

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
Escuela Politécnica de Enseñanza Superior



**Rediseño de la empuñadura del
martillo neumático rotopercutor para
la reducción de vibraciones**

TESIS DOCTORAL

Presentada para optar al título de Doctor por:

Beatriz Ivorra Zaragoza

Máster Universitario en Ingeniería en Diseño Industrial

Madrid, 2023



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
Escuela Politécnica de Enseñanza Superior

Doctorado en Arquitectura, Diseño, Moda y Sociedad

**Rediseño de la empuñadura del
martillo neumático rotopercutor para
la reducción de vibraciones**

TESIS DOCTORAL

Presentada para optar al título de Doctor por:

Beatriz Ivorra Zaragoza

Máster Universitario en Ingeniería en Diseño Industrial

Bajo la dirección de:

Dr. Sara Gómez Martín (Director)

Dr. Silvia Nuere Menéndez-Pidal (Director)

Madrid, 2023

Título: Rediseño de la empuñadura del martillo neumático rotopercutor para la reducción de vibraciones

Autor: Beatriz Ivorra Zaragoza

Programa de Doctorado: Arquitectura, Diseño, Moda y Sociedad

Dirección de tesis:

Sara Gómez Martín, Doctora en Ingeniería de Materiales por la Universidad Politécnica de Madrid (Director)

Silvia Nuere Menéndez-Pidal, Doctora en Bellas Artes por la Universidad Complutense de Madrid (Director)

Revisores externos:

Tribunal de tesis:

Fecha de defensa:

A todas aquellas personas que han pasado por esta tesis. A mis directoras Sara Gómez Martín y Silvia Nuere Menéndez-Pidal, a Juan David Cano Moreno y a Miguel Berzal Rubio.

En especial quiero agradecer a mis padres, Marga y José Rafael, a mis hermanos, Marga y Rafa, a mi pareja Nacho, a Luke y a mi amigo Ignacio. Gracias por haberme apoyado en todos los sentidos.

Agradecimientos

Quiero agradecer a José María Jiménez G. del Departamento Administración y Calidad, a Javier Barrena del Dpto. Admón. y Comunicación, todos ellos de la empresa Segeda S.L por facilitar la cesión del martillo neumático rotopercutor para su estudio.

También quiero agradecer el apoyo prestado a José María Chillón jefe del Laboratorio de Instalaciones, a Borja Frutos Vázquez Doctor arquitecto, a Amelia Romero, a Belén Casla Herguedas y a Manuel Olaya Adán jefe del Departamento de Investigación y Edificación y Habitabilidad, todos ellos del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja del CSIC. A Elena Gayo Moncó, Técnico de normalización de UNE Asociación Española de Normalización y a José Ángel Gamallo jefe de Aislamiento Acústico de Danosa.

Además, quiero agradecer a Juan López Valentín y a Rodrigo Navarro, ambos del Instituto de Ciencia y Tecnología de Polímeros del CSIC, por las consultas realizadas y por el apoyo recibido.

A Rafael Sánchez-Guardamino Elorriaga, Técnico Superior de Prevención del departamento de seguridad de las máquinas y equipos de trabajo del Centro Nacional de Verificación de la Maquinaria del Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo, por las consultas y por el apoyo prestado.

A Mario Cerdá Galiana del Departamento I+d+i y a Maite Córdoba Candela del área técnica, ambos de la empresa Synthelast S.A., por la cesión de los materiales elastoméricos.

A Alejandro Arribas Agüero del Departamento de Investigación y Desarrollo y a Virginia Mayor ambos del Centro Tecnológico del Calzado y del Plástico, CETEC, por la ayuda prestada para realizar los ensayos en sus instalaciones.

A Emilio Blanco, Asesor Técnico Gama Profesional de la empresa Robert Bosch España, S.L.U.

Por último, quiero agradecer al Departamento de mecánica y auxiliar de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial de la Universidad Politécnica de Madrid, concretamente al equipo de Fernando Elena jefe de mantenimiento.

Abstract

The vibrations generated by manual machines can produce occupational diseases with both vascular and osteoarticular affectations, also known as hand-arm vibration syndromes. The rotary percussor pneumatic hammer is a machine, that is widely used in the construction sector, but it also belongs to the category of vibrating machines that cause the above mentioned diseases in machine operators. The general objective of the thesis is to verify that the redesign of the handle of a rotary pneumatic hammer reduces mechanical vibrations. Several specific objectives have been derived from the general objective, such as: study the effects of exposure to vibrations in the hand-arm system, as well as the evaluation of the risk associated with the use of the hammer, study the biomechanical and biodynamic response of the hand-arm system to vibration, study the materials that generate damping and also determine the optimized design and study the damping of the optimized design by a numerical model.

The consulted bibliography indicated that the transmission of vibrations from the grip to the hand-arm system depends both on the composition of applied materials and on the design of the grip. And although studies have already found improvements in the damping of vibrations received through the handles, there is still a large field for its optimization, redesign and development of materials, as of today, unused in pneumatic hammer handles.

This doctoral thesis proposes a methodology for the study of possible new materials used in the grip, including analysis of the design and of the machine. It also includes real tests for the characterization of the materials and their simulation by finite elements. Overall, the results obtained pointed out that design is a decisive factor for both vibration damping and weight of it. The results show several combinations of new designs and materials that improved the damping of this grip. The best combination of design and materials obtained presents a 4,43 % improvement over the commercial design.

Keywords: industrial design, materials analysis, mechanical vibrations, occupational diseases, pneumatic hammer handle, elastomeric materials.

Resumen

Las vibraciones generadas por las máquinas manuales pueden causar enfermedades profesionales con afectaciones tanto vasculares como osteoarticulares, también conocidas como síndrome de vibraciones mano-brazo. El martillo neumático rotopercutor es una de las máquinas que más vibraciones transmiten, ampliamente usada en el sector de la construcción, y que produce graves dolencias al trabajador.

El objetivo general de la tesis es comprobar que el rediseño de la empuñadura de un martillo neumático rotopercutor reduce las vibraciones mecánicas. Del objetivo general se han derivado varios objetivos específicos como son: estudiar los efectos de la exposición de vibraciones en el sistema mano-brazo, así como la evaluación del riesgo asociado al uso del martillo neumático, estudiar la respuesta biomecánica y biodinámica del sistema mano-brazo frente a la vibración, estudiar los materiales que generan amortiguación y condicionan el diseño optimizado y comprobar mediante un modelo numérico que la optimización del diseño produce la amortiguación de la vibración.

En la bibliografía consultada, se constata que la transmisión de vibraciones desde la empuñadura al sistema mano-brazo depende tanto de la composición del material de la empuñadura como de su diseño. Aunque existen ya mejoras en esta amortiguación de las vibraciones recibidas a través de las empuñaduras, hay un gran campo para su optimización. Desde la modificación del diseño hasta la búsqueda de nuevos materiales que aún no se emplean en las empuñaduras de martillos neumáticos.

En esta tesis doctoral se presenta una metodología para el estudio de posibles nuevos materiales para fabricar la empuñadura, incluyendo el análisis del diseño y de la máquina manual. Incluye, además, ensayos reales para la caracterización de los materiales y su simulación por elementos finitos. De los resultados obtenidos se constata que el diseño es un factor decisivo tanto para la amortiguación de la vibración como para la disminución del peso. Los resultados muestran varias combinaciones de nuevos diseños y materiales que mejoran la amortiguación de la vibración que le llega a la empuñadura. La mejor combinación obtenida de diseño y materiales presenta un 4,43 % de mejora respecto del diseño comercial.

Palabras clave: Diseño industrial, análisis de materiales, vibraciones mecánicas, enfermedades profesionales, empuñadura de martillo neumático, materiales elastómeros.

Tabla de Contenido

<i>Agradecimientos</i>	<i>iii</i>
<i>Abstract</i>	<i>iv</i>
<i>Resumen</i>	<i>v</i>
<i>Tabla de Contenido</i>	<i>vi</i>
<i>Lista de Figuras</i>	<i>xii</i>
<i>Lista de Tablas</i>	<i>xvii</i>
<i>Lísta de Ecuaciones</i>	<i>xx</i>
<i>Lista de Gráficas</i>	<i>xxi</i>
MARCO TEÓRICO	1
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Tema de la Tesis	1
1.1.1 Introducción	1
1.1.2 Justificación	3
1.2 Estado del arte	4
1.3. Hipótesis.....	14
1.4 Objetivos	15
1.4.1 Objetivos generales.....	15
1.4.2 Objetivos específicos.....	15
1.5 Antecedentes	15
1.6 Metodología	23
1.7 Estructura de la tesis	24
CAPÍTULO 2: REPERCUSIÓN DE LAS VIBRACIONES MECÁNICAS EN ENFERMEDADES CONSIDERADAS PROFESIONALES	28
2.1 ¿Qué es la vibración mecánica?	28
2.1.1 Características de las vibraciones, magnitudes y su tipología	29

2.1.1.1 La frecuencia	29
2.1.1.2 Magnitud de la vibración.....	30
2.1.1.3 Dirección o ejes de la vibración.....	31
2.1.1.4 Tiempo de exposición o duración	31
2.1.1.5 Impedancia mecánica.....	31
2.1.1.6 Tipos de vibraciones mecánicas.....	32
2.1.1.6.1 Vibraciones mecánicas transmitidas al sistema mano-brazo	33
2.1.1.6.2 Vibraciones transmitidas al cuerpo entero	34
2.1.2 Magnitudes de las vibraciones en el ser humano	34
2.1.2.1 La frecuencia	35
2.1.2.2 Frecuencia natural y efecto de resonancia	36
2.1.2.2.1 Frecuencia natural.....	36
2.1.2.2.2 Efecto de resonancia	37
2.1.2.3 Ejes de dirección de la vibración: <i>X, Y, Z</i>	40
2.1.2.4 Tiempo de exposición o duración	42
2.1.2.5 Impedancia.....	43
2.1.2.6 Tipos de vibraciones en el cuerpo entero y en el sistema mano-brazo.....	43
2.1.2.6.1 Vibraciones transmitidas al cuerpo entero	44
2.1.2.6.2 Vibraciones transmitidas al sistema mano-brazo	44
2.1.3 Resumen.....	46
2.2. Actividades Económicas expuestas a riesgos físicos	47
2.2.1 Actividades Económicas expuestas a vibraciones mecánicas	65
2.2.1.1 Sector de la construcción y la minería	66
2.2.1.2 Equipos emisores de vibraciones mecánicas	68
2.2.1.2.1 Herramientas manuales	69
2.2.2 Resumen.....	71
2.3 Efectos de la exposición a vibraciones mecánicas	72

2.3.1 Enfermedades generales.....	74
2.3.2 Enfermedades en el sistema mano-brazo.....	77
2.3.3 Enfermedades en el cuerpo entero.....	90
2.3.4 Resumen.....	91
2.4 Evaluación de las vibraciones mecánicas.....	92
2.4.1 Marco normativo.....	92
2.4.2 Fabricantes de equipos.....	93
2.4.3 Empresario usuario.....	97
2.4.3.1 Valores.....	97
2.4.3.2 Métodos y evaluación de la exposición a la vibración.....	99
2.4.3.2.1 Método de estimación.....	100
2.4.3.2.2 Evaluación por medición.....	104
2.4.3.2.3 Cálculo de $A(8)$	113
2.4.3.2.4 Evaluación a través del método de puntos.....	117
2.4.4 Normativa INSST.....	120
2.4.5 Resumen.....	124
CONCLUSIONES CAPÍTULO 2.....	124
CAPÍTULO 3: MARTILLOS NEUMÁTICOS Y ELÉCTRICOS.....	126
3.1 Martillos neumáticos y eléctricos.....	126
3.1.1 Situación del mercado.....	128
3.1.2 Materiales y sistemas antivibratorios.....	131
3.1.3 Fuerzas de agarre y condiciones atmosféricas.....	144
3.1.4 Normativas de diseño del martillo neumático.....	148
3.1.5 Resumen.....	150
3.2 Equipos de protección individual (EPI).....	152
3.2.1 Eficacia de los guantes antivibratorios.....	153
3.2.2 Resumen.....	157

3.3 La biomecánica y la biodinámica.....	158
3.3.1 Resumen.....	161
3.4 La ergonomía aplicada al trabajo, problemas ergonómicos y ergonomía del producto	162
3.4.1 Ergonomía aplicada al diseño.....	165
3.4.1.1 Antropometría estática y dinámica.....	165
3.4.1.2 Entorno de trabajo y posicionamiento de la mano.....	166
3.4.1.3 Medidas de los datos antropométricos	169
3.4.1.4 Aplicación al diseño de herramientas manuales.....	172
3.4.2 Resumen.....	174
CONCLUSIONES CAPÍTULO 3	175
CONCLUSIONES MARCO TEÓRICO	176
MARCO PRÁCTICO	178
CAPÍTULO 4: ENSAYOS.....	178
4.1 Introducción y justificación	178
4.1.1 Martillo neumático rotopercutor de la empresa Segeda	178
4.1.2 Intervención en la empuñadura	181
4.1.3 Resumen.....	186
4.2 Ensayos del material	187
4.2.1 Introducción	187
4.2.2 Comportamiento mecánico de los elastómeros	188
4.2.3 Propiedades mecánicas de los elastómeros	191
4.2.4 Materiales de estudio	195
4.2.4.1 Características de los materiales de estudio.....	198
4.2.4.2 Ensayos.....	202
4.2.4.3 Cálculos	208
4.2.4.4 Resultados	223
CONCLUSIONES CAPÍTULO 4	224

CAPÍTULO 5: DISEÑO	226
5.1 Introducción	226
5.2 Análisis de las empuñaduras actuales para ciclismo extremo	226
5.2.1 Resumen.....	228
5.3 Fases del Diseño	229
5.3.1 Diseño Conceptual	231
5.3.1.1 Análisis y medición de la empuñadura de Segeda	232
5.3.1.2 Información para el diseño conceptual.....	237
5.3.1.2.1 Técnicas de creatividad y bocetos para el diseño conceptual	241
5.3.1.3 Resumen.....	253
5.3.2 Diseño de Detalle	253
5.3.2.1 Bocetos para el diseño de detalle	254
5.3.2.2 Aplicación de medidas a las empuñaduras	258
5.3.2.3 Aplicación de materiales	263
5.3.2.4 Resumen.....	264
5.3.2.5 Simulación en 3D de la empuñadura con Catia V5	264
5.3.2.5.1 Resumen.....	270
5.3.2.6 Análisis y comprobación del diseño	271
5.3.2.6.1 Modelos numéricos.....	271
5.3.2.6.2. Resumen.....	307
5.3.2.7 Render con KeyShot	309
5.3.2.7.1 Resumen.....	313
CONCLUSIONES CAPÍTULO 5	314
CONCLUSIONES MARCO PRÁCTICO	315
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES	316
6.1 Cumplimiento de Objetivos.....	316
6.1.1 Validación de la hipótesis.....	319

6.2 Aportaciones	320
6.3 Trabajos futuros	321
BILIOGRAFÍA	323
ANEXOS	333
Anexo A: Normativas adicionales a la evaluación de vibraciones mecánicas.....	334
Anexo B: Despiece del martillo neumático rotopercutor	341
Anexo C: Informes de ensayos mecánicos tracción uniaxial.....	361
Anexo D: Informes de ensayos de histéresis elástica.....	374
Anexo E: Planos	387
Anexo F: Explicación detallada del proceso de Ansys	395

Lista de Figuras

Figura 1: Modelo mecánico	39
Figura 2: Sistema basicéntrico	41
Figura 3: Relación entre sectores económicos a nivel europeo y la exposición a riesgos en porcentaje (%)	54
Figura 4: Estadio I.....	83
Figura 5: Estadio II.....	84
Figura 6: Estadio III-a.....	84
Figura 7: Estadio III-b	85
Figura 8: Estadio IV.....	85
Figura 9: Sistema biodinámico y basicéntrico.....	107
Figura 10: Sistema de coordenadas basicéntricas y posición de la palma	108
Figura 11: Sistema interno de la empuñadura auxiliar Bosch	130
Figura 12: Oscilación de la empuñadura auxiliar de Bosch.....	131
Figura 13: Muelles elastoméricos	135
Figura 14: Tipos de muelles metálicos.....	135
Figura 15: Suspensión típica de muelles constituida por muelles helicoidales de compresión.....	136
Figura 16: Ejemplos de muelles neumáticos.....	136
Figura 17: Diseño de un amortiguador por fricción y de un amortiguador de líquido.....	137
Figura 18: Combinaciones de muelles y amortiguadores.....	137
Figura 19: Simulación sistema antivibratorio	142
Figura 20: (i) Modelo real sistema antivibratorio y (j) Modelo inspiración para sistema antivibratorio	142
Figura 21: (c) Modelo virtual y (d) Físico sistema anivibratorio.....	143
Figura 22: Martillo neumático rotopercutor MS76 de Segeda.....	168
Figura 23: Imagen real y física del martillo neumático rotopercutor MS76 de Segeda	168
Figura 24: Presa cilíndrica con toda la palma de la mano sin intervención del pulgar.....	168
Figura 25: Inclinación radial para el bloqueo de la presa	169
Figura 26: Martillo neumático rotopercutor MS76 Segeda.....	180
Figura 27: Barrenas con vidia.....	181
Figura 28: Barrena tipo cónica	181
Figura 29: Detalle ensamblado y materiales de la empuñadura	183
Figura 30: Embalaje y disposición empuñadura	184
Figura 31: Pasador elástico DIN 1481	184
Figura 32: Casquillo polietileno APM 500.....	185
Figura 33: Empuñadura Acero F212 + Caucho sintético	185
Figura 34: Detalle inyección empuñadura	185
Figura 35: Comportamiento de un material en función de la amplitud de la deformación y el número de Déborah.....	189
Figura 36: Representación del comportamiento viscoelástico de un material mediante los modelos de a) Kelvin-Voigt, b) Maxwell, c) Burgers y d) Maxwell generalizado	191
Figura 37: Caucho negro y caucho natural	200
Figura 38: PU-2(TipoB) y PU-1(TipoA).....	201

Figura 39: Etilvinilacetato D50 y D30	202
Figura 40: Probeta tipo 5	203
Figura 41: (m) Ordenador para el tratamiento de los datos, (n) mordazas para fijación de la muestra	204
Figura 42: (ñ) troquel probeta tipo 5, (o) pie de rey digital	204
Figura 43: Proceso de obtención de probetas	205
Figura 44: Proceso ensayo mecánico tracción uniaxial	205
Figura 45: Ensayos de tracción cíclicos, probeta tipo 5 de los distintos materiales	206
Figura 46: Caucho Natural	208
Figura 47: <i>Caucho Negro</i>	211
Figura 48: EVA D30	213
Figura 49: EVA D50	215
Figura 50: PU-1	218
Figura 51: PU-2	220
Figura 52: Estructura genérica en fases basada en la metodología de Pugh y Ullman.	229
Figura 53: (i) Estructura genérica en fases basada en la metodología de Pugh y Ullman. (j) Estructura en fases mediante capítulos de la presente tesis	230
Figura 54: Estructura en fases de la presente tesis y su organización en un marco teórico y práctico basadas en la metodología de Pugh y Ullman.	230
Figura 55: Desglose del proceso de diseño	231
Figura 56: (p) foto empuñadura "Segeda original" y (q) modelo en 3D del martillo rotopercutor modelo MS76	232
Figura 57: Mediciones de las piezas físicas con el pie de rey	233
Figura 58: Mediciones de la empuñadura en el programa Catia V5	233
Figura 59: Bocetos de las dimensiones reales de la empuñadura "Segeda original"	234
Figura 60: Unión de la empuñadura	236
Figura 61: Empuñadura de caucho objeto de mejora	236
Figura 62: Primer diseño conceptual del sistema de amortiguación	243
Figura 63: Segundo boceto conceptual del sistema amortiguación	245
Figura 64: Bocetos propuesta de introducir muelles de alto módulo elástico	246
Figura 65: Primera opción: propuesta desechada	251
Figura 66: Segunda opción: propuesta seleccionada	252
Figura 67: Bocetos empuñadura "R1"	255
Figura 68: Boceto empuñadura "R2"	258
Figura 69: Bocetado de las dimensiones del nuevo diseño	259
Figura 70: Bocetado de las dimensiones del elemento interno	260
Figura 71: Boceto de las dimensiones del elemento externo	263
Figura 72: (r) vástago de acero F-212, (s) casquillo, (t) pasador elástico, (u) unión del vástago, del casquillo y del pasador, (v) empuñadura caucho sintético y (w) unión de las piezas	265
Figura 73: (x) ensamblaje empuñadura "R1" y (y) ensamblaje empuñadura "R2"	266
Figura 74: (z) ensamblaje casquillo y vástago, (A) producto interno, (B) unión del vástago de acero, del casquillo, del pasador y del producto interno, (C) producto externo y (D) diseño de empuñadura "R1" con todos los elementos	266
Figura 75: (E) unión del vástago, del casquillo y del pasador, (F) producto interno y (G) diseño de empuñadura "R2" con todos los elementos	267

Figura 76: (H) vista frontal del elemento interno, (I) vista isométrica del elemento interno, (J) y (K) vista sección elemento interno.....	268
Figura 77: (L) vástago acero, (M) elemento interno y (N) ensamblaje del vástago y del elemento interno	268
Figura 78: (Ñ) vista frontal del elemento externo, (O) vista isométrica del elemento externo, (P) y (Q) vista sección del elemento externo.....	269
Figura 79: Sección de toda la empuñadura "R1"	269
Figura 80: Sección de la empuñadura "R1" con el vástago de acero y los elementos internos y externos.....	270
Figura 81: Detalle de la unión de la empuñadura "R2"	270
Figura 82: Detalle espacios de aire de la empuñadura "R2"	270
Figura 83: Simplificación del diseño.....	274
Figura 84: Características mecánicas del EVA-D50 a analizar, módulo de Young, densidad, coeficiente de Poisson y límite elástico	276
Figura 85: Características mecánicas del EVA-D30 a analizar, módulo de Young, densidad, coeficiente de Poisson y límite elástico	276
Figura 86: Características mecánicas del PU-2 a analizar, módulo de Young, densidad, coeficiente de Poisson y límite elástico	277
Figura 87: Características mecánicas del PU-1 a analizar, módulo de Young, densidad, coeficiente de Poisson y límite elástico	277
Figura 88: Características del caucho negro a analizar, módulo de Young, densidad, coeficiente de Poisson y límite elástico	278
Figura 89: Características del caucho natural a analizar, módulo de Young, densidad, coeficiente de Poisson y límite elástico	278
Figura 90: Características del acero F-212 a analizar, módulo de Young, densidad, coeficiente de Poisson y límite elástico	279
Figura 91: Empuñadura "R1" (PU-2/EVA-D50)	279
Figura 92: (R) Modo 5: Flexión + Torsión. (S) Modo 6: Torsión	280
Figura 93: (T) Modo 5: Flexión. (U) Modo 6: Flexión	281
Figura 94: (V) Modo 5: Torsión. (W) Modo 6: Torsión.....	281
Figura 95: (X) Modo 5: Flexión. (Y) Modo 6: Flexión.....	282
Figura 96: (Z) Modo 5: Flexión. (1) Modo 6: Flexión.....	282
Figura 97: (2) Modo 5: Flexión. (3) Modo 6: Flexión.....	283
Figura 98: (4) Modo 5: Torsión. (5) Modo 6: Flexión	284
Figura 99: (6) Modo 5: Flexión. (7) Modo 6: Torsión	284
Figura 100: (8) Modo 5: Flexión. (9) Modo 6: Torsión	285
Figura 101: (10) Modo 5: Flexión. (11) Modo 6: Flexión.....	285
Figura 102: (12) Modo 5: Flexión. (13) Modo 6: Flexión.....	286
Figura 103: (14) Modo 5: Torsión. (15) Modo 6: Flexión	287
Figura 104: (16) Modo 5: Flexión. (17) Modo 6: Flexión.....	287
Figura 105: (18) Modo 5: Flexión. (19) Modo 6: Flexión.....	288
Figura 106: (20) Modo 5: Flexión. (21) Modo 6: Torsión	288
Figura 107: (22) Modo 5: Torsión. (23) Modo 6: Flexión	289
Figura 108: (24) Modo 5: Flexión. (25) Modo 6: Flexión.....	290
Figura 109: (26) Modo 5: Flexión. (27) Modo 6: Flexión.....	290

Figura 110: (28) Modo 5: Torsión. (29) Modo 6: Flexión	291
Figura 111: Ejemplo del análisis de la empuñadura "R1" (PU-2/EVA-D50)	292
Figura 112: Tipos de movimientos amortiguados	300
Figura 113: Unión entre el vástago, el casquillo y el pasador elástico	310
Figura 114: Detalle de la unión entre el vástago y el elemento interno	310
Figura 115: Detalle dientes elemento interno	311
Figura 116: Detalle del elemento externo	311
Figura 117: Empuñadura en forma de la mano	311
Figura 118: Unión del elemento interno con el externo	312
Figura 119: Render "R1" Caucho negro/EVA-D50	312
Figura 120: Render "R1" Caucho negro/PU-2	313
Figura 121: Render "R2" Caucho negro	313
Figura 122: Despiece Martillo neumático rotopercutor MS76 Segeda	342
Figura 123: Embalaje martillo neumático MS76 Segeda	344
Figura 124: Imágenes martillo neumático rotopercutor real	344
Figura 125: Imágenes detalle martillo neumático rotopercutor MS76 Segeda	345
Figura 126: Dimensiones generales	346
Figura 127: 1 despiece: Tuerca esparrago y espárrago	346
Figura 128: 2 despiece: cabeza, cuerpo bucha, cuerpo pistón, retenedor cuadrado, deflector	347
Figura 129: 3 despiece: deflector y abrazadera deflector	347
Figura 130: 4 despiece: cabeza, cuerpo bucha, cuerpo pistón, tuerca esparrago	348
Figura 131: 5 despiece: esparrago y cabeza	348
Figura 132: 6 despiece: esparrago, arandela esparrago grover M16, tuerca esparrago, deflector y abrazadera deflector	349
Figura 133: 7 despiece: esparrago, cabeza, cuerpo bucha y cuerpo pistón	349
Figura 134: 8 despiece: trinquete, barra rotación, muelle trinquete, pivote trinquete, espiga corona, corona válvula perforadora, casquillo válvula, cuerpo válvula, cuerpo pistón, cuerpo intermedio y cuerpo bucha	350
Figura 135: 9 despiece: cuerpo intermedio y cuerpo pistón	351
Figura 136: 10 despiece: Primer subconjunto compuesto de cuerpo pistón, trinquete, barra rotación, muelle trinquete y pivote trinquete. Segundo subconjunto compuesto de espiga corona, corona, válvula perforada, casquillo válvula y cuerpo válvula	351
Figura 137: 11 despiece: espiga corona, corona, válvula perforada, casquillo válvula, cuerpo válvula y cuerpo pistón	352
Figura 138: 12 despiece: cabeza, trinquete, barra rotación, muelle trinquete, pivote trinquete	352
Figura 139: 13 despiece: trinquete, pivote trinquete y muelle trinquete	353
Figura 140: 14 despiece: aguja agua/aire, tapón de cabeza aire/racor barrido aguja/aire y junta metalbuna racor barrido 1/2	354
Figura 141: 15 despiece: aguja agua/ aguja aire, cabeza, goma aguja aire/aguja	355
Figura 142: 16 despiece: manilla, cuña roscada manilla, tuerca cuña manilla y arandela grover M10	355
Figura 143: 17 despiece: codo alimentación, tuerca codo alimentación	356
Figura 144: 18 despiece: tuerca codo alimentación y junta tórica codo	356

Figura 145:	19 despiece: codo alimentación, junta tórica codo y tuerca codo alimentación ..	357
Figura 146:	20 despiece: codo alimentación, cabeza y manilla	357
Figura 147:	21 despiece: manilla, tuerca cuña manilla	357
Figura 148:	22 despiece: cuña roscada manilla y arandela grover M10.....	358
Figura 149:	23 despiece: manilla	358
Figura 150:	24 despiece: manilla, eje repartidor y MS85 mano	359
Figura 151:	Manilla detalle	359
Figura 152:	Detalle trinquete/embolo manilla cabeza	360
Figura 153:	25 despiece: trinquete/embolo manilla cabeza	360

Lista de Tablas

Tabla 1: Algunas herramientas y procesos potencialmente asociados con lesiones por vibración	10
Tabla 2: Frecuencia de la vibración.....	47
Tabla 3: Cuadro de enfermedades profesionales.....	49
Tabla 4: Lista complementaria de enfermedades cuyo origen profesional se sospecha y cuya inclusión en el cuadro de enfermedades profesionales podría contemplarse en el futuro.....	51
Tabla 5: Riesgos físicos.....	52
Tabla 6: Índice de entorno físico: proporción de trabajadores en la UE28 (%) y puntuaciones medias del índice (0-100), 2005-2015.....	53
Tabla 7: Enfermedades causadas por el trabajo 2022.....	56
Tabla 8: Índices de incidencia entre el periodo 2009-2021.....	56
Tabla 9: Evaluación de vibraciones mecánicas de máquinas manuales.....	61
Tabla 10: Actividades económicas con mayor exposición a riesgos físicos, químicos y biológicos	64
Tabla 11: Factores de riesgo y patologías derivadas	66
Tabla 12: Tipos de vibraciones.....	69
Tabla 13: Frecuencia de vibraciones según las fuentes de origen.....	70
Tabla 14: Algunas herramientas y procesos potencialmente asociados con lesiones por vibración.....	72
Tabla 15: Fases neurosensoriales de la escala del Taller de Estocolmo para el síndrome de vibraciones mano-brazo.....	80
Tabla 16: Escala del Taller de Estocolmo para las fases del fenómeno de Raynaud inducido por el frío en el síndrome de vibraciones mano-brazo	82
Tabla 17: Valor medio "a" multiplicativo.....	102
Tabla 18: Determinación de los puntos de exposición a vibraciones a partir del valor total equivalente de vibración y la duración de la exposición asociada	118
Tabla 19: Acciones requeridas por el empresario para diferentes niveles de exposición a vibraciones según la Directiva UE 2002/44/CE	119
Tabla 20: Tabla resumen. Procedimientos y normas para evaluar las vibraciones mecánicas en el sistema mano-brazo.....	121
Tabla 21: Tabla de elaboración propia. Fórmulas de la normativa para la evaluación de vibraciones mecánicas.	122
Tabla 22: Tabla de elaboración propia. Duración de la medición	123
Tabla 23: Marcas fabricación y distribución de maquinaria manual.....	128
Tabla 24: Actuaciones para la selección de un EPI	152
Tabla 25: Datos antropométricos de la población trabajadora española del año 1999.....	170
Tabla 26: Medidas norma UNE-EN ISO 7250 2010	171
Tabla 27: Dimensiones mínimas recomendadas para los mandos manuales	174
Tabla 28: Parámetros de ensayo mecánico de tracción uniaxial.....	206
Tabla 29: Datos generales de los ensayos mecánicos de tracción cíclicos	207
Tabla 30: Recopilación de datos de resiliencia e histéresis elástica de los materiales.....	223
Tabla 31: Medidas generales de las propuestas de empuñadura	265

Tabla 32: Análisis modal de la empuñadura "R1" materiales PU-2/EVA-D50	280
Tabla 33: Análisis modal de la empuñadura "R1" materiales PU-2/EVA-D30	280
Tabla 34: Análisis modal de la empuñadura "R1" materiales PU-2/PU-1.....	281
Tabla 35: Análisis modal de la empuñadura "R1" materiales PU-2/Caucho negro	281
Tabla 36: Análisis modal de la empuñadura "R1" materiales PU-2/Caucho natural.....	282
Tabla 37: Análisis modal de la empuñadura "R1" materiales EVA-D50/PU-2	283
Tabla 38: Análisis modal de la empuñadura "R1" materiales EVA-D50/PU-1	283
Tabla 39: Análisis modal de la empuñadura "R1" materiales EVA-D50/EVA-D30	284
Tabla 40: Análisis modal de la empuñadura "R1" materiales EVA-D50/Caucho negro.....	284
Tabla 41: Análisis modal de la empuñadura "R1" materiales EVA-D50/Caucho natural.....	285
Tabla 42: Análisis modal de la empuñadura "R1" materiales Caucho negro/PU-2	286
Tabla 43: Análisis modal de la empuñadura "R1" materiales Caucho negro/PU-1	286
Tabla 44: Análisis modal de la empuñadura "R1" materiales Caucho negro/EVA-D50.....	287
Tabla 45: Análisis modal de la empuñadura "R1" materiales Caucho negro/EVA-D30.....	287
Tabla 46: Análisis modal de la empuñadura "R1" materiales Caucho negro/Caucho natural .	288
Tabla 47: Análisis modal de la empuñadura "R2" material PU-2.....	289
Tabla 48: Análisis modal de la empuñadura "R2" material Caucho negro	289
Tabla 49: Análisis modal de la empuñadura "R2" material EVA-D50	290
Tabla 50: Análisis modal de la empuñadura "Segeda original"	291
Tabla 51: Respuesta a la frecuencia de la empuñadura "R1" materiales PU-2/EVA-D50	293
Tabla 52: Respuesta a la frecuencia de la empuñadura "R1" materiales PU-2/EVA-D30	293
Tabla 53: Respuesta a la frecuencia de la empuñadura "R1" materiales PU-2/PU-1.....	293
Tabla 54: Respuesta a la frecuencia de la empuñadura "R1" materiales PU-2/Caucho negro	294
Tabla 55: Respuesta a la frecuencia de la empuñadura "R1" materiales PU-2/Caucho natural	294
.....	
Tabla 56: Respuesta a la frecuencia de la empuñadura "R1" materiales EVA-D50/Caucho negro	294
.....	
Tabla 57: Respuesta a la frecuencia de la empuñadura "R1" materiales EVA-D50/Caucho	295
natural	
Tabla 58: Respuesta a la frecuencia de la empuñadura "R1" materiales EVA-D50/EVA-D30 ..	295
Tabla 59: Respuesta a la frecuencia de la empuñadura "R1" materiales EVA-D50/PU-1	295
Tabla 60: Respuesta a la frecuencia de la empuñadura "R1" materiales EVA-D50/PU-2	296
Tabla 61: Respuesta a la frecuencia de la empuñadura "R1" materiales Caucho negro/EVA-D50	296
.....	
Tabla 62: Respuesta a la frecuencia de la empuñadura "R1" materiales Caucho negro/EVA-D30	296
.....	
Tabla 63: Respuesta a la frecuencia de la empuñadura "R1" materiales Caucho negro/Caucho	297
natural	
Tabla 64: Respuesta a la frecuencia de la empuñadura "R1" materiales Caucho negro/PU-1	297
Tabla 65: Respuesta a la frecuencia de la empuñadura "R1" materiales Caucho negro/PU-2	297
Tabla 66: Respuesta a la frecuencia de la empuñadura "R2" materiales PU-2	298
Tabla 67: Respuesta a la frecuencia de la empuñadura "R2" materiales Caucho negro.....	298
Tabla 68: Respuesta a la frecuencia de la empuñadura "R2" materiales EVA-D50.....	298
Tabla 69: Respuesta a la frecuencia de la empuñadura "Segeda original" material Caucho negro	299
.....	

Tabla 70: Resultado de los cálculos de las empuñaduras "R1", "R2" y "Segeda original"	303
Tabla 71: Empuñadura con mejores porcentajes de amortiguación.....	305
Tabla 72: Grado de mejora relativa respecto a la empuñadura "Segeda original"	306
Tabla 73: Comités técnicos	335
Tabla 74: Comités técnicos y normativas de interés	335
Tabla 75: Referencias piezas martillo neumático rotopercutor MS76 Segeda	343

Lísta de Ecuaciones

Ecuación 1: Ecuación aceleración declarada	102
Ecuación 2: Aceleración eficaz	103
Ecuación 3: Aceleración equivalente ponderada en frecuencia.....	109
Ecuación 4: Aceleración equivalente ponderada en frecuencia de N muestras	112
Ecuación 5: Cálculo de A(8).....	113
Ecuación 6: Cálculo del A(8) de exposición a varias fuentes de vibración	114
Ecuación 7: Cálculo del A(8) para periodos superiores a 1 día.....	114
Ecuación 8: Cálculo del A(8) en un periodo de duración de 40 h.....	115
Ecuación 9: Punto de exposición	117
Ecuación 10: Número de Deborah.....	189
Ecuación 11: Histéresis elástica	194
Ecuación 12: Cálculo de resiliencia e histéresis elástica	208
Ecuación 13: Ecuación de movimiento de un movimiento amortiguado.....	300
Ecuación 14: Ecuación de amplitud de un movimiento amortiguado.....	301
Ecuación 15: Cálculo de la constante de amortiguación	302
Ecuación 16: Cálculo del periodo amortiguado	302
Ecuación 17: Cálculo del porcentaje de amortiguación.....	302

Lista de Gráficas

Gráfica 1: Índice de incidencia de enfermedades profesionales según actividades económica (2022)	58
Gráfica 2: Grupo 2 causadas por agentes físicos (2022)	59
Gráfica 3: Exposición a riesgos. Evolución 2005-2015 (%)	63

MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Tema de la Tesis

1.1.1 *Introducción*

El ser humano vive dentro de un mundo de vibraciones y además se encuentra continuamente en movimiento, ya sea por su propia voluntad, es decir, caminando, corriendo, trotando o realizando cualquier actividad. También, cuando emplean vehículos, equipos o cualquier tipo de herramientas manuales. Todo el cuerpo en general, con cualquier movimiento acaba expuesto a una vibración ya sea pequeña o grande.

Normalmente, las acciones que los sujetos por sus propios medios realizan, las nombradas anteriormente, como el acto de caminar o trotar, no generan daño alguno a los órganos internos ya sea porque el propio cuerpo genere sus propios mecanismos de mitigación o bien porque el nivel de vibración es insignificante como para no producir trastornos.

Además, existen otro tipo de vibraciones que son en cierta manera difíciles de controlar, como las provenientes de la naturaleza, terremotos, maremotos y ciclones que pueden o no, afectar al ser humano dependiendo de determinados factores como son la frecuencia y el tiempo.

Parte de la maquinaria manual empleada en el ámbito laboral presenta durante su operación comportamientos vibratorios. Algunos sucesos son causados por anomalías, como es el caso de la presencia de piezas sueltas o masas rotativas desbalanceadas cuya fuerza centrífuga somete al eje a esfuerzos oscilantes que son transmitidos a las bases de la máquina. Otros incidentes son consecuencia de un subconjunto inapelable del funcionamiento normal de la máquina, como es el caso del martillo neumático (Miyara, 2005).

Las vibraciones generadas por maquinaria y las herramientas que se emplean en la industria, en ciertas ocasiones suelen superar determinados límites, pudiendo afectar y dañar al ser humano. Muchas de estas afectaciones no suelen aparecer en el momento, sino que, se

hacen visibles transcurrido un cierto tiempo. Además de ser dañinas por el nivel de vibración generado, también lo son por el tiempo transcurrido en el empleo de esa herramienta o maquinaria a motor (Griffin, 2001).

En muchas ocasiones, en ciertos puestos de trabajo, estas acciones pueden ser peligrosas para la salud de los trabajadores. La exposición a las vibraciones no solo es algo molesto a lo cual se acaba uno acostumbrando sino que está demostrado que cuando se realiza una actividad constante puede acarrear dolencias, como dolor de espalda, dolor de cabeza, mareos, síndrome del túnel carpiano, también cervicalgias o dorsolumbalgias, la reducción de la eficiencia o inclusive patologías severas y latentes (Griffin, 2001).

Estos efectos se deben en general a la aparición de fuerzas oscilantes que son contrarrestadas físicamente por tres mecanismos (Miyara, 2005, p. 1):

- 1) La tensión muscular
- 2) La compresión de los tejidos
- 3) La aceleración de las masas de tejido, produciendo un estrés articulario

La vibración transmitida al ser humano provoca una tensión muscular derivándose en mayor fatiga y reduciendo la precisión en los movimientos, ya que se comprimen los tejidos pudiendo provocar trastornos circulatorios locales y en otros casos la ruptura de vasos sanguíneos capilares que pueden afectar el suministro de oxígeno a diversos órganos. Estas situaciones o circunstancias se pueden percibir en el sistema del cuello, cuerpo entero, o en las manos y muñecas. En el caso del cuello puede verse involucrado el oído, por la afluencia de sangre al laberinto, provocando sensación de vértigo y acúfenos, es decir, percepciones de ruidos que no corresponden a ninguna señal acústica de su entorno. Por otro lado, en el caso de las manos se observan multitud de síntomas que dan origen a distintos síndromes y malestares. En el cuerpo entero, normalmente, suelen recaer en las articulaciones o en las vértebras (Miyara, 2005).

Todo el mundo reconoce que el riesgo para la salud depende de muchos factores, los más importantes de los cuales serían: la intensidad del efecto, la repetición diaria a la exposición durante un tiempo indeterminado, el mal uso de la herramienta, acciones repetidas, el mal posicionamiento del operario al realizar la acción, la fuerza de agarre y también el desconocimiento del uso de la maquinaria. Pero sobre todo sus riesgos potenciales

dependerán del tiempo al que está sometido el cuerpo humano, de la frecuencia de acción de las vibraciones y de la intensidad de las mismas (Griffin, 2001).

1.1.2 Justificación

La presente investigación se centra en mejorar la empuñadura de un martillo neumático rotopercutor, cuyo objeto es amortiguar sus vibraciones, para reducir los riesgos de contraer enfermedades profesionales al sistema mano-brazo causadas por la vibración mecánica.

Hoy en día la vibración es un problema social que afecta a los trabajadores de distintas actividades económicas, entre ellas la construcción y las industrias extractivas que menoscaban la vida laboral, familiar y personal de estos trabajadores. Por lo tanto, intervenir sobre la reducción de vibraciones puede ayudar a mejorar la situación laboral de los usuarios de maquinaria y de todo su entorno.

En el ámbito de la prevención y seguridad laboral, no se ha podido demostrar la efectividad del uso de guantes como protección individual frente a la vibración. En algunos casos, incluso, ha llegado a aumentar la vibración (Pascual Lizana, 2005).

Aunque las empresas más punteras fabricantes de martillos neumáticos han introducido sistemas de amortiguación, no se ha demostrado una reducción significativa de la vibración que permita evitar contraer, por parte de los trabajadores, enfermedades profesionales. A día de hoy, todavía se perpetúan las enfermedades profesionales por el empleo de martillos neumáticos (Cavas Martínez et al., 2007). El área del diseño industrial, poco explotada en este ámbito, no se ha aplicado en investigar, desarrollar e innovar nuevos materiales y diseños utilizados en las empuñaduras, siendo uno de los elementos más importantes, dado que son responsables de la transmisión de la vibración al sistema mano-brazo al estar en contacto directo con la mano del trabajador (Griffin, 2001).

Así, el presente trabajo permite mostrar un proceso metodológico para mejorar la empuñadura de un martillo neumático rotopercutor y profundizar en los conocimientos teóricos y prácticos sobre el análisis y estudio del diseño y la amortiguación, además de ofrecer una metodología de trabajo que puede extrapolarse a otras máquinas vibratorias. Por lo tanto, la solución del problema será un adelanto en el campo de estudio.

1.2 Estado del arte

Hoy en día está extendida la creencia de que las vibraciones mecánicas producidas por herramientas y máquinas vibrantes no generan daños significativos al cuerpo humano, como la enfermedad de Kienböck (Stahl et al., 2012). Sin embargo, los recientes desarrollos en este campo suscitan lo contrario.

A principios del siglo XX, concretamente en 1911, Giovanni Loriga un médico italiano, informó por primera vez de que los cortadores de piedra que empleaban martillos neumáticos en bloques de mármol y piedra en algunas serrerías de Roma manifestaban dedos blancos. Estos síntomas ya se vieron reflejados cuando en 1862 Maurice Raynaud demostraba que algunas personas frente a condiciones atmosféricas como el frío y también el estrés, sufrían un blanqueado en los dedos, es decir, una respuesta vasospástica digital (Massimo Bovenzi, 2001).

Unos años más tarde, fue en 1918 cuando Alice Hamilton hizo la primera descripción clínica. Para ello examinó a los operarios que trabajaban en canteras de piedra caliza en Bedford, Indiana, EE.UU. manifestando este tipo de dolencia (Devine, 2015).

Más adelante, Alexander, Cotzin, Klee y Wendt (1947), citados por Griffin (2001), reflejaron estos fenómenos relacionados con las frecuencias y por tanto con las vibraciones.

Junto a otros autores como Helmut Seidel (2001), Michael J. Griffin (1997), Steve Kihlberg (1995), Massimo Bovenzi (2001) y también organismos como el British Standards Institution (BSI) o la American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), entre otros, se comienza a vislumbrar un creciente interés sobre esta área y empieza a tomar gran relevancia el problema derivado de las vibraciones.

Considerando la gran trascendencia que estaba tomando este fenómeno que afectaba a los trabajadores, años más tarde la Comisión Europea comenzó a analizar más de cerca este hecho para poder establecer un seguimiento más cercano.

Desde la Comisión Europea las vibraciones mecánicas son definidas como movimientos oscilatorios sobre una posición fija centrada, son expresadas en Hercios (*Hz*) que describen la naturaleza cíclica de la vibración y las separa en dos clases. Por un lado, las vibraciones mano-

brazo (Hand-arm vibration (HAV)) y vibraciones cuerpo entero (Whole-body vibration (WBV)) (European Commission, 2009).

Debido a lo cual, cuando se determina que un trabajador ha contraído una enfermedad profesional ocasionada por las vibraciones mecánicas esta queda establecida dentro de un grupo de enfermedades denominado como síndrome vibración mano-brazo (Hand-arm Vibration Syndrome (HAVS)).

Estas enfermedades profesionales adquiridas por el trabajador son debidas al empleo de máquinas manuales durante la jornada laboral, y a su exposición a una determinada frecuencia.

Los principales trabajos que se realizan con riesgo a contraer el síndrome vibración mano-brazo son los que utilizan herramientas vibratorias como el martillo perforador, la apisonadora, el martillo para picar y la motosierra. En definitiva, el trabajador adquiere esa dolencia al ejecutar presión en la pieza de trabajo contra una herramienta rotatoria o al presionar la herramienta a la pieza de trabajo (European Commission, 2009).

La mayoría de las enfermedades profesionales contraídas en el sistema mano-brazo son una combinación de efectos vasculares y efectos neurosensoriales. Las enfermedades más comunes que han sido diagnosticadas debido a este fenómeno son las enfermedades angioneuróticas (European Commission, 2009).

Se puede encontrar la enfermedad inducida por vibración de los dedos blancos llamado el fenómeno de Raynaud, como una afectación que se caracteriza por ser vasoconstrictor de las arterias siendo más frecuente en temperaturas bajas (European Commission, 2009).

En 1986 durante "The Stockholm Workshop HAVS", seminario sobre el síndrome de vibración mano brazo realizado en Estocolmo, se clasificaron los síntomas vasculares periféricos inducidos por el frío en varias etapas, al ser un potencial fenómeno conductor de enfermedades profesionales (European Commission, 2009).

Otras enfermedades que son originadas por las vibraciones mecánicas son las enfermedades osteoarticulares, como la osteoartrosis del codo y de la muñeca, enfermedad del hueso carpiano, es decir, osteonecrosis del hueso semilunar o enfermedad de Kienböck (European Commission, 2009).

La Comisión Europea, viendo la gran trascendencia que estaba produciéndose, expresó su preocupación por este acontecimiento haciendo que se instaurara una Directiva que englobara a todos los Miembros de la Unión en materia de seguridad y salud de los trabajadores.

La directiva que se aprobó es la Directiva de la Unión Europea 2002/44/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de junio de 2002 sobre las disposiciones mínimas de seguridad y de salud relativas a la exposición de los trabajadores a los riesgos derivados de los agentes físicos, traspuesta al Real Decreto 1311/2005, de 4 de noviembre, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores frente a los riesgos derivados o que puedan derivarse de la exposición a vibraciones mecánicas (European Commission, 2009).

Determinaron en la misma que el valor límite de exposición de una jornada de trabajo de 8 h fuera de 5 m/s^2 y el valor de acción de $2,5 \text{ m/s}^2$ para aquellos trabajadores que emplearan máquinas manuales (European Commission, 2009).

Según la Comisión Europea, existe una relación entre el nivel de aceleración y la duración de exposición a las que el trabajador se encuentra expuesto. Esto es que si el trabajador se encuentra expuesto a una aceleración ponderada en frecuencia superior o igual a 3 m/s^2 durante un periodo de 10 años, el 10 % de los operarios desarrollarán, entre otras patologías, dedos blancos, inducido por las vibraciones mecánicas. Se cree que las frecuencias inferiores a 100 Hz y de gran magnitud parecen estar asociadas con enfermedades óseas y articulares producidas por herramientas de percusión neumáticas (European Commission, 2009).

Asimismo, la Comisión Europea expone que el trabajador que está expuesto a una aceleración ponderada en frecuencia entre 3 a 10 m/s^2 durante una jornada laboral de 8 h entre 3 a 10 años puede padecer dolencias. Para aceleraciones ponderadas en frecuencia mayores a 10 m/s^2 en una jornada laboral de 8 h puede contraer enfermedades entre 1 año a 3 años (European Commission, 2009).

Otros factores importantes relacionados con la aparición de enfermedades en el sistema mano-brazo y que acompañan a la exposición del trabajador a vibraciones mecánicas son los movimientos repetitivos. El uso de la fuerza y posiciones incómodas de la muñeca y mano son factores agravantes de dolencias como el síndrome del túnel carpiano (European Commission, 2009).

También, aquellos trabajos en los que se requiera hacer fuerza o realizar el mismo procedimiento ininterrumpidamente, como cortar carne en una carnicería o ensamblar piezas, son movimientos repetitivos que realizados en una jornada laboral producen malestar al trabajador. Además, por medio de otras actividades como el uso de herramientas manuales motorizadas realizando trabajos de pulido, esmerilado o taladrado los trabajadores se exponen a patologías relacionadas con el sistema mano-brazo (European Commission, 2009).

En definitiva, la exposición a vibraciones mecánicas puede llevar a síndromes relacionados con el sistema mano-brazo, es decir, al grupo de enfermedades denominado como síndrome vibración mano-brazo (Hand-arm Vibration Syndrome (HAVS)), los cuales están compuestos por componentes vasculares, neurológicos y musculares (Burström et al., 1998) (Ye et al., 2015) (Bast-Pettersen et al., 2016).

La clasificación de Taylor-Permea se basó en la experiencia clínica y en los informes efectuados a los trabajadores expuestos a vibraciones. Esta clasificación se centra en los episodios vasoespásticos "*vasospasms*" que presentan operarios que emplean herramientas motorizadas o procesos industriales en los que se transmite una intensa vibración a las manos. Estos episodios vasoespásticos son síntomas tempranos en los que en muchos casos acaban agravando la situación sobre todo en el trabajo, es decir, como primeras etapas, los trabajadores manifiestan una pérdida de la destreza manual que son causados al menos en parte por una neurología periférica o una disfunción neuromuscular (Brammer et al., 1987).

A través del estudio y la evidencia de las fuentes se pudo determinar que los síndromes que perjudican al trabajador se pueden desarrollar de formas diferentes (Bast-Pettersen et al., 2016) (Brammer et al., 1987).

Proponen una separación de los estadios neurosensoriales, vasculares, neurológicos y periféricos. Relaciona las etapas de desarrollar alguna de estas patologías junto con pruebas objetivas. Estos análisis se discutieron durante la jornada de Stockmalm, sobre sintomatología y métodos de diagnóstico para el síndrome de vibración mano-brazo (Bast-Pettersen et al., 2016) (Brammer et al., 1987).

La exposición a vibraciones mecánicas con el uso de herramientas manuales durante un periodo largo causa daños en las articulaciones de los brazos, músculos de los brazos, arterias y nervios en el tejido blando de la mano. La aparición de los síndromes de vibración mano-brazo aumenta linealmente al aumentar el tiempo de exposición y el nivel de vibración. La enfermedad de síndrome del dedo blanco presenta características como la pérdida de

sensibilidad de los dedos, produciendo malestar, disconfort y dolor al trabajador (Kamalakar & Mitra, 2018).

En definitiva, se trata de una verdad que se ha demostrado durante los años en mucho de los artículos y estudios clínicos realizados por diferentes autores desde los ya nombrados al principio como Giovanni Loriga (1911), Alice Hamilton (1918), Helmut Seidel (2001), Michael J. Griffin (1997), Massimo Bovenzi (2001) hasta los más recientes como Guru Kamalakar (2018) y Anirban Mitra (2018), que estudiaron las posibles formas de protección para reducir la vibración transmitida a la mano mediante el uso de sistemas aisladores de la vibración.

Por lo tanto, es importante atender esta dolencia, conocer su origen e intentar minimizarlo mediante herramientas que reduzcan la transmisión de vibración.

A pesar de estas evidencias científicas, durante el desarrollo del estudio se hallaron diferentes análisis y controversias sobre algunas enfermedades profesionales causadas por las vibraciones mecánicas, como, por ejemplo, en el trabajo de Stahl, Santos Stahl, Meisner, Rahmanian-Schwarz, Schaller y Lotter (2012), en el que se analiza una no relación de la enfermedad profesional de Kienböck con las vibraciones mecánicas. En el artículo se realiza una revisión sistemática de 220 artículos sobre la etiopatología de Kienböck y la aplicación de los criterios de Bradford Hill, concluyendo que no proporciona evidencia científica suficiente para confirmar o refutar una relación causal entre esta enfermedad con las vibraciones mano-brazo.

“Se conocen como criterios de Bradford Hill, aunque estrictamente no son criterios, es paradigmático en el estudio de las enfermedades no infecciosas. Conlleva una relación causal no necesaria y no suficiente” (Álvarez-Martínez & Pérez-Campos, 2004, p. 469). Se trata de una asociación estadística en el que se analiza si existe una relación entre el factor causal y el efecto estudiado (Asociación Española de Pediatría, 1965).

Sin embargo, se requiere de una mayor investigación con un mayor nivel de evidencia científica y clínica para determinar con más exactitud si la vibración mano-brazo es un factor de riesgo para la patología de Kienböck (Stahl et al., 2012).

A pesar de esta controversia, a lo largo de la historia, esta relación causa-efecto se ha ido estudiando y se sigue estudiando hoy en día ya que existen datos clínicos que suscitan esta relación no solo por parte de esta enfermedad citada, sino también por las relacionadas con otras patologías vibratorias.

Para muchos fabricantes de herramientas motoras, la minimización de la emisión de vibraciones mecánicas representa un importante objetivo a cumplir, dadas las continuas mejoras que a lo largo del proyecto se han podido considerar. Es un tema muy relevante que afecta tanto en la vida de las personas como en la economía de las empresas, ya que generan bajas laborales por accidentes de trabajo o enfermedades profesionales producidos por este agente físico (Pinilla García et al., 2015).

Los impactos provocados por máquinas vibratorias y la aparición de lesiones agudas implican también otras cualidades que se encuentran relacionadas con las enfermedades profesionales como el tiempo transcurrido entre la causa y el efecto (Griffin, 1997).

En 1907 en el Reino Unido aparecieron las primeras publicaciones sobre lesiones producidas por vibraciones por el Departamento de Compensación de Enfermedades Industriales “Departmental Committee on Compensation for Industrial Diseases” en el que decía que habían estudiado una neurosis producida por la vibración por el uso de herramientas neumáticas en las que observaron al paciente con temblores e insomnio, pero no obtuvieron evidencias de la existencia de ninguna enfermedad nerviosa por esta causa (Griffin, 1997).

Sin embargo, más adelante se reconoció que las vibraciones transmitidas a la mano por varias herramientas podrían causar trastornos como el blanqueamiento de dedos ya citado. En otros países también se estudiaba esta relación clínica (Griffin, 1997).

Una de las primeras listas que englobaban posibles enfermedades profesionales causadas por herramientas fue la que propuso Griffin en 1997.

Tabla 1: Algunas herramientas y procesos potencialmente asociados con lesiones por vibración

Tipo de herramienta	Ejemplos de tipos de herramientas (normas que identifican el tipo de prueba)
Herramientas de trabajo de metal de percusión	<p>Herramientas para remachar (ISO 8662-2)</p> <p>Herramientas de calafateo (ISO 8662-5)</p> <p>Martillos picadores (ISO 8662-2)</p> <p>Herramientas de clinchado y rebordeado (ISO 8662-10)</p> <p>Llaves de impacto (ISO 8662-7)</p> <p>Destornilladores de impacto (ISO 8662-7)</p> <p>Atornillador (ISO 8662-7)</p> <p>Martillo cincelador (ISO 8662-10)</p> <p>Pistolas de agujas (ISO 8662-10)</p> <p>Máquinas mordedoras y cizallas (ISO 8662-10)</p> <p>Máquina de estampado</p>
Amoladoras y otras herramientas rotativas	<p>Amoladoras de pedestal</p> <p>Amoladoras de mano (ISO 8662-4; ISO 8662-8)</p> <p>Lijadoras de mano (ISO 8662-4; ISO 8662-8)</p> <p>Pulidoras de mano (ISO 8662-4; ISO 8662-8)</p> <p>Amoladoras o pulidoras accionadas por flexión (ISO 8662-17)</p> <p>Herramientas rotativas de rebabas (ISO 8662-17)</p>
Martillos y taladros de percusión utilizados en minería, demolición, construcción de carreteras y trabajo en piedra	<p>Taladros percutores (ISO 8662-3)</p> <p>Taladros de roca (ISO 8662-3)</p> <p>Pisón compactador (ISO 8662-9)</p> <p>Taladros de asfalto (ISO 8662-5)</p>

	Herramientas para trabajar la piedra (ISO 8662-14)
Maquinaria forestal y de jardín	Motosierras (ISO 7505) Motosierras antivibración (ISO 7505) Sierras de cepillo Cortacéspedes (ISO 5395) Cortasetos y recortasetos Trituradoras de tocones
Otros procesos y herramientas	Pistola de clavar (ISO 8662-11) pistola grapadora (ISO 8662-11) Sierras de cojinete (ISO 8662-12) Sierras circulares (ISO 8662-12) Desbastadora Herramienta de grabado Máquinas para golpear zapatos Rodillos vibratorios Vibroespesadores de hormigón Mesas vibratorias de nivelación de hormigón Manillares de moto Máquinas controladas por peatones

Nota: Adaptado de Griffin M. J. (1997, p.4)

Asimismo, no solo el tipo de herramienta que se empleaba constituía un factor determinante para la aparición de enfermedades profesionales, sino también otras circunstancias pueden favorecer la aparición de patologías. En años anteriores algunas de estas enfermedades ya empezaban a contemplarse (Griffin, 1997).

Los expertos y estudiosos de esta materia destacaban como complemento a la frecuencia de emisión la baja temperatura, la postura del individuo, la fuerza de agarre y el área de contacto (Griffin, 1997). Estas condiciones nombradas pueden englobarse en una mala ergonomía tanto de la ejecución del trabajador como de la misma herramienta motora.

Las actividades expuestas a vibraciones mecánicas en los últimos años se han ido asociando, entre otras cosas, a malas condiciones ergonómicas del trabajo produciendo un interés en la sociedad y en los expertos de la prevención (Rosel Ajamil et al., 2005).

El sector de la construcción, entre otros, representa una de las actividades más perjudicadas por accidentes de trabajo y enfermedades profesionales producidas por diferentes factores. Entre ellos se encuentran los trastornos musculoesqueléticos, uno de ellos ya citado, como es el síndrome de Raynaud, por la insuficiencia de aporte sanguíneo relacionada con los agarres y el empleo de martillos neumáticos (Rosel Ajamil et al., 2005).

Para contextualizar la investigación, se ha tratado de localizar las posibles mejoras relacionadas con la minimización de la emisión de vibraciones, las cuales se hallaron en artículos científicos tanto los vinculados con materiales antivibratorios, como con sistemas antivibratorios aplicados a máquinas manuales.

En muchos de los artículos, para poder proceder a una buena ejecución de mejora, analizaban la transmisión de vibraciones de la herramienta. En particular, estudiaban las respuestas dinámicas de transferencia del agarre como la impedancia del punto de conducción de la muñeca y el codo, la energía absorbida en el sistema mano-brazo y la influencia del agarre de la herramienta (Kihlberg, 1995).

Además, se han analizado artículos relacionados con sistemas y materiales antivibratorios tanto aplicados a herramientas vibratorias manuales como para equipos de protección individual, es decir, en los guantes.

Se ha constatado que la eficacia de los guantes, como material preventivo, se encuentra en controversia, incluso en ocasiones puede incrementar la frecuencia transmitida (Pascual Lizana, 2005). Es más, en algunos casos, hace que los trabajadores aumenten la fuerza de agarre reduciendo así la destreza manual (Hewitt et al., 2014).

También, entre estos estudios analizados, se puede destacar el de Cherng J. G., Eksioglu M. y Kizilaslan K. (2009), sobre análisis de martillos remachadores, en el que analizaron herramientas diseñadas ergonómicamente que introdujeron un mecanismo de amortiguamiento que combina el uso de resortes y materiales poliméricos para mitigar la transmisión de la vibración y el ruido. Los resultados de este estudio dieron respuesta a que el uso de resortes y el empleo de materiales poliméricos, son efectivos para reducir el nivel de vibración y de ruido.

En general, se ha afirmado que existe un uso común de materiales para amortiguar la vibración, que se caracterizan por ser elastómeros termoestables debido a su capacidad de amortiguar la vibración, por su aplicabilidad, versatilidad y alcance para distintos productos.

En otros estudios se determinó que la respuesta biodinámica es un factor que viene determinado por la impedancia de las distintas zonas que contiene el sistema mano-brazo y que, en función de ello, absorben diferente nivel de vibración (Dong et al., 2004).

Asimismo, se pudo observar que la mayoría de los dispositivos antivibratorios estudiados, para máquinas neumáticas, se encuentran en su interior, en forma de mecanismos que evitan el contacto metal-metal. De esta manera, se impide el impacto del pistón contra el cuerpo de la máquina reduciendo la vibración (Caruel & Donati, 2013).

Pero también, se ha comprobado que, como la transmisión de la vibración al trabajador se transmite a través de las manos, en muchos artículos se detectó una intervención en los mangos de las herramientas que habían sido diseñados específicamente para amortiguar la vibración (Adewusi et al., 2008).

En los diseños de los mangos empleaban elastómeros termoestables, como el caucho, para reducir la vibración. Confirmando que, insertar estos materiales entre el mango y la fuente de excitación de la máquina, constituyen una técnica eficaz para restar la transferencia de las vibraciones, reduciendo la magnitud del movimiento que es transmitido a la empuñadura.

Es por ello por lo que toda la recopilación de estudios que se ha llevado a cabo ha dado pie a analizar e investigar en esta dirección. De tal manera que el propósito de la presente tesis doctoral sea optimizar una empuñadura de un martillo neumático rotopercutor para minimizar la transmisión de la vibración y así reducir las enfermedades profesionales que provocan.

1.3. Hipótesis

Después de analizar las distintas publicaciones relacionadas con el uso de maquinaria y las posibles enfermedades causadas en el ser humano por las vibraciones generadas por ellas y teniendo en cuenta que se trabajará, a nivel práctico, sobre el martillo roto percutor de Segeda, modelo MS76, la hipótesis de esta memoria sobre la que se centrará la investigación queda formulada de la siguiente manera:

- El rediseño de la empuñadura del martillo neumático roto percutor reduce las vibraciones mecánicas

Para responder a la hipótesis se formulan las siguientes cuestiones de investigación:

- ¿Qué actividades económicas están expuestas a vibraciones mecánicas y producen más enfermedades profesionales?
- ¿Qué tipo de máquina manual produce más vibración?
- ¿Cuáles son los efectos de la exposición a la vibración en el sistema mano-brazo?
- ¿Cómo se evalúa la exposición de los trabajadores a vibraciones mecánicas en el sistema mano-brazo en máquinas manuales?
- ¿Cómo funcionan los martillos neumáticos?
- ¿Qué tipo de materiales se emplean para minimizar la transmisión de la vibración?
- ¿Qué tipo de sistema antivibratorios existen?
- ¿La fuerza de agarre influye en la transmisión de la vibración?
- ¿Las condiciones atmosféricas afectan en la aparición de enfermedades profesionales con el uso de máquinas manuales vibratorias?
- ¿Existen normativas de diseño de empuñaduras de martillos neumáticos?
- ¿Las vibraciones mecánicas influyen en la respuesta biomecánica del sistema mano-brazo?
- ¿La ergonomía influye en la transmisión de la vibración mecánica?

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivos generales

Esta tesis tiene como objetivo general:

- Comprobar que el rediseño de la empuñadura propuesto reduce las vibraciones mecánicas

1.4.2 Objetivos específicos

Del objetivo general se derivan los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar los efectos de la exposición de vibraciones en el sistema mano-brazo, así como la evaluación del riesgo asociado al uso del martillo neumático.
- Estudiar la ergonomía y la respuesta biomecánica y biodinámica del sistema mano-brazo frente a la vibración.
- Estudiar los materiales que generan amortiguación y condicionan el diseño optimizado.
- Estudiar la amortiguación del diseño optimizado mediante un modelo numérico.

1.5 Antecedentes

Una vez planteada la hipótesis, se analizarán las investigaciones existentes para comprobar si el planteamiento es innovador y si procede continuar con esta línea de investigación.

Para ello, se realizarán diversas exploraciones en la base de datos TESEO, mediante palabras clave como vibraciones mecánicas, martillo neumático, diseño industrial, enfermedades profesionales, empuñadura, empuñadura de martillo neumático, elastómeros, amortiguación y elementos finitos. Cabe mencionar que también se ha efectuado el registro en inglés con el fin de obtener la máxima cobertura a la indagación.

Además, a la hora de rastrearlas dentro de la opción de búsqueda avanzada, se ha informado en la plataforma de que estas palabras se encuentren tanto en el título como en el resumen.

Finalmente, TESEO ha registrado nueve tesis con título y resumen relacionado con “Rediseño de la empuñadura del martillo neumático rotopercutor para la reducción de vibraciones” que a continuación se detallan.

Título: Efectos de las vibraciones mecánicas “WBV” (“WholeBody Vibration”) sobre el rendimiento muscular

Autor: Edir Da Silva Marzo

Universidad: Universidad de Córdoba

Fecha de Lectura: 02/06/2006

Título: Estudio epidemiológico del ruido en el trabajo en la industria del mármol.

Autor: Remón López Carmen Begoña

Universidad: Universidad de Granada

Fecha de Lectura: 01/01/1995

Título: On ship roll damping, analysis, and contributions on experimental techniques

Autor: Oliva Remolà, Adriana

Universidad: Universidad Politécnica de Madrid

Fecha de Lectura: 17/12/2018

Título: Design and development of high-performace thermoplastic vulcanizates with vibration damping properties

Autor: Burgoa Beitia, Aizeti

Universidad: Universidad del País Vasco/EuskalHerrikoUnibertsitatea

Fecha de Lectura: 30/10/2020

Título: Simulación por elementos finitos de efectos inelásticos en materiales elastómeros.

Autor: Gracia Grijot, Leticia Aranzazu

Universidad: Universidad de Zaragoza

Fecha de Lectura: 1/12/2006

Título: Desarrollo de modelos de fatiga para materiales elastómeros. Aplicación a componentes de automoción.

Autor: Tobajas Alonso, Rafael

Universidad: Universidad de Zaragoza

Fecha de Lectura: 21/06/2019

Título: Desarrollo de material elastomérico a partir de neumático fuera de uso para alta atenuación de vibraciones en sistemas de vía en placa con carril embebido.

Autor: Gómez Hoyos, Jorge

Universidad: Universidad de Cantabria

Fecha de Lectura: 08/11/2019

Título: Vibro-acoustic characterization of railway wheels: application to sandwich-type constrained layer damping solutions

Autor: Merideño Labayen, Iñaki

Universidad: Universidad de Navarra

Fecha de Lectura: 01/07/2013

Título: Dynamic analysis and control of broadband frequency harmonic vibrations in lightweight pedestrian structures.

Autor: Soria Herrera, José Manuel

Universidad: Universidad Politécnica de Madrid

Fecha de Lectura: 28/10/2019

Entre todos los resultados obtenidos, se aprecian tesis relacionadas con la evaluación y amortiguación de las vibraciones mecánicas, el uso de elastómeros y el análisis por elementos finitos. Algunas de ellas están enfocadas en áreas concretas de ingeniería como las dedicadas al estudio de sistemas de amortiguamiento según el tipo de estructuras. En otros casos, se ocupan fundamentalmente del amplio campo para estudio que abren los materiales elastómeros por su facilidad de procesamiento y posibilidades de generación de residuos limpios, ya que pueden ser reprocesados. Igualmente, debido a que no siempre es posible obtener para estos materiales simulaciones ajustadas al comportamiento real de la pieza que viene marcada por las exigencias de su diseño, se desarrollan investigaciones en la búsqueda de una correcta caracterización mecánica con la que obtener los datos necesarios, que una vez introducidos en los programas comerciales de simulación puedan definir correctamente el comportamiento de los nuevos materiales elastoméricos.

En la tesis "Efectos de las vibraciones mecánicas "WBV" sobre el rendimiento muscular", Edir Da Silva Marzo, persigue la evaluación y estandarización de distintos parámetros en el marco del entrenamiento del cuerpo humano a través de vibraciones mecánicas, con el objetivo de mejorar la fuerza, la potencia muscular y la capacidad de salto. En su trabajo se observaron las diferentes frecuencias en el cuerpo entero WBV (WholeBodyVibration), los tiempos de exposición, así como el efecto de la aplicación de distinto número de exposiciones y los tiempos de recuperación únicamente en relación con el rendimiento muscular.

Aunque el estudio se centra en los efectos de las vibraciones mecánicas sobre el cuerpo entero, no lo vincula al impacto de las mismas en los trabajadores durante la

realización de actividades profesionales por el uso de maquinaria manual, se focaliza en una modalidad de entrenamiento físico y en sus efectos sobre el rendimiento muscular.

En el “Estudio epidemiológico del ruido en el trabajo en la industria del mármol”, su autora, Carmen Begoña Remón López, dentro del campo de la medicina del trabajo, aborda toda la problemática asociada al ruido dentro de la industria del mármol en la comarca de Macael. Sus investigaciones arrojaron entre otros resultados que, la maquinaria de disco puente para mármol y los martillos neumáticos exponen a los trabajadores a niveles diarios de ruido equivalentes o superiores a 100 *dB*, superando ampliamente las cifras permitidas en el Real Decreto 1316/89 sobre protección de los trabajadores.

A pesar de que se reconocen diferencias entre el estudio de un contaminante físico u otro como son el ruido y las vibraciones, existen coincidencias al subrayar la importancia de los tiempos de exposición de los trabajadores a estos agentes, así como el uso de medidas protectoras, haciéndose necesaria una mayor educación sanitaria y uso de protección general.

Adriana Oliva, autora de “Onship roll damping, analysis and contribution on experimental techniques” presenta su trabajo dentro de su especialidad en ingeniera naval. Esta investigación surge de la necesidad de tener una estimación adecuada de la amortiguación de balanceo en buques que está directamente relacionada con la seguridad y representa un tema relevante desde la perspectiva regulatoria. Por ello, desarrolla las diferentes metodologías experimentales existentes para estimar el amortiguamiento del balanceo del buque e intentar determinar si los coeficientes de amortiguamiento de balanceo obtenidos difieren según el escenario hidrodinámico involucrado y en qué medida las posibles discrepancias pueden afectar a las valoraciones del comportamiento del buque, especialmente cuando se aplican factores relacionados con la estabilidad en regulaciones internacionales.

La memoria se sitúa en el ámbito de la amortiguación de cuerpos sólidos en fluidos, especialmente importante en la ingeniería naval. Existen las coincidencias propias de una investigación de estas características y en la necesidad de conseguir diseños de sistemas o productos que mejoren la seguridad adaptada a las normativas vigentes.

La investigación presentada por Aizeti Burgoa en “Design and development of high-performance thermoplastic vulcanizates with vibration damping properties”, estudia la formulación de los materiales termoplásticos vulcanizados que permiten la combinación de diferentes cauchos, termoplásticos y sistemas de reticulación para desarrollar materiales

elastoméricos con propiedades personalizadas de alto rendimiento, cubriendo de esta forma una parte de la amplia gama de materiales demandada por las aplicaciones automotrices.

Según indica la autora, la clave para adaptar los nuevos materiales termoplásticos vulcanizados de alto rendimiento será comprender, por un lado, cómo influye su microestructura en las propiedades macroscópicas del material, como el rendimiento térmico, mecánico o de amortiguación de vibraciones y, por otro, cómo controlar y modificar sus propiedades según se desee.

El marco sobre el que transcurre su investigación se dirige hacia el estudio de diferentes materiales y mezclas de productos con determinadas propiedades, mientras que aquí se estudian el diseño y vibraciones en el martillo neumático rotopercutor. Los materiales analizados en esta tesis se corresponden con los idóneos en la actualidad para formar parte de la herramienta manual seleccionada por su diseño y ergonomía, no obstante, es muy importante considerar nuevas alternativas futuras de materiales que puedan aportar mayores prestaciones.

El desarrollo de compuestos que proporcionen nuevas propiedades a los elastómeros conduce, entre otros, a los llamados elastómeros reforzados formados por una matriz de moléculas de caucho entrelazadas con partículas como el negro de carbono, óxido de zinc o azufre embebidas en dicha matriz.

La autora de “Simulación por elementos finitos de efectos inelásticos en materiales elastómeros”, Leticia Aranzazu Gracia, estudia el comportamiento mecánico de los elastómeros reforzados, cuya variedad de compuestos hace difícil establecer reglas y herramientas de diseño de carácter general, siendo la simulación mediante métodos numéricos, especialmente el método de los elementos finitos, el utilizado en esta tesis.

En la actualidad, los materiales elastómeros están cobrando un gran protagonismo en la industria. Estos polímeros son capaces de alcanzar grandes deformaciones a tracción y compresión, y poseen unas muy buenas características de amortiguación, haciéndolos adecuados para el empleo en la disipación de energía cinética asociada a impactos y vibraciones.

Para asegurar la durabilidad de los componentes es indispensable centrarse en el fenómeno de fatiga, que es el fallo experimentado en un material cuando es sometido a cargas cíclicas de amplitud máxima inferior a su carga de rotura estática. El conocimiento sobre el comportamiento de los materiales elastómeros para desarrollar un modelo de predicción de

vida a fatiga de cara a su aplicación en el diseño de componentes mecánicos fue una de las principales motivaciones de la tesis doctoral de Rafael Tobajas, “Desarrollo de modelos de fatiga para materiales elastómeros. Aplicación a componentes de automoción”.

En el fenómeno de fatiga existen una gran cantidad de factores que pueden alterar la vida útil del material, en algunos casos puede ser la variable energética, mientras que en otros es la deformación.

En el transcurso de su estudio, el autor implementa los modelos de fatiga propuestos, en un software de elementos finitos, con el objeto de poder realizar los análisis de fatiga de forma rápida y sobre los resultados de una simulación numérica. Además, se describió un modelo de fatiga probabilística a los materiales seleccionados consiguiendo así, una probabilidad de rotura del componente a partir de una estimación de vida útil.

En los últimos años, la protección del medio ambiente y las energías alternativas verdes se han convertido en una de las principales preocupaciones sociales y políticas, debido a las emisiones de gases de efecto invernadero y la alta contaminación del planeta. Estas circunstancias llevan al mundo de la ingeniería y a todos los fabricantes a enfrentarse a nuevos desafíos tecnológicos.

La necesidad medioambiental junto con los nuevos requisitos y nuevos materiales llevaron a Jorge Gómez en su tesis “Desarrollo de material elastomérico a partir de neumático fuera de uso para alta atenuación de vibraciones en sistemas de vía en placa con carril embebido”, a poner en valor el caucho procedente de neumáticos usados para conseguir una alta atenuación de vibraciones, actuando como aislador entre el carril y la plataforma.

La aplicación directa de este tipo de elastómero a los sistemas de vía en placa con carril embebido dentro de la plataforma de hormigón permite una mejor coexistencia de sistemas ferroviarios con otros medios de transporte en los ámbitos urbanos. Partiendo de las teorías de mecánica de vía, se ensayaron en laboratorio diferentes prototipos de revestimiento del carril y, se realizó un modelo a escala real en condiciones de servicio que permitió garantizar el perfecto funcionamiento del elastómero propuesto.

Las nuevas exigencias medioambientales referentes al ruido emitido en el transporte por ferrocarril han llevado a distintos investigadores, al estudio exhaustivo de este contaminante, así como a la búsqueda de soluciones para su reducción. Entre ellos, Iñaki Merideño en su tesis “Vibro-acoustic characterization of railway wheels: application to sandwich-type constrained layer damping solutions”, identifica la rueda de los ferrocarriles

como una de las principales fuentes de ruido, por lo que, aumentar el amortiguamiento de la rueda es un método efectivo para reducir el ruido generado por la misma. Este punto de partida le conduce a presentar diversas metodologías en la evaluación de ruedas sin insonorizar y a la comparación numérica de sistemas insonorizadores.

Posteriormente, desarrolla el modelado y diseño de soluciones basadas en amortiguadores multicapa tipo sándwich. Esta clase de soportes han sido concebidos para soportar fuertes cargas en compresión, cuyas características mecánicas son variables, estando determinadas fundamentalmente por la dureza del elastómero, normalmente un policloropreno, y el número de interposiciones metálicas. Y finalmente, realiza una predicción teórica de la efectividad de las mismas al ser instaladas en una rueda de ferrocarril.

Bajo el proyecto de Investigación "Desarrollo de nuevos sistemas para la reducción de vibraciones en estructuras peatonales", José Manuel Soria, desarrolló una serie de estrategias de control de vibraciones activas y semiactivas, contribuyendo de este modo a su aceptación por parte de la comunidad de ingeniería civil. El continuo desarrollo de materiales estructurales y técnicas de construcción están dando lugar a estructuras más esbeltas y, por tanto, más ligeras, que pueden ser susceptibles a las vibraciones inducidas por el hombre, comprometiendo el Estado Límite de Servicio por Vibraciones (VSL).

Por ello, cada vez es más frecuente encontrar estructuras peatonales esbeltas con problemas de vibraciones y/o confort para sus usuarios. Estas estructuras interactúan con los movimientos humanos, como caminar y correr, y esto a veces produce efectos no deseados, que ocurren particularmente cuando las frecuencias de excitación de los humanos o sus armónicos están cerca de una frecuencia natural estructural.

Es precisamente en este contexto, donde el autor desarrolla su tesis "Dynamic analysis and control of broadband frequency harmonic vibrations in lightweight pedestrian structures". Sus objetivos se centran en: estudiar la variabilidad de los principales parámetros que identifican una estructura a través de medidas reales, frecuencia y amortiguamiento. Desarrollar un método para seguir los parámetros modales de una estructura y estudiar sus variaciones. Y por último en desarrollar diversas metodologías de diseño de los parámetros de un controlador inercial semiactivo para optimizar la reducción de vibraciones; el modelo derivado se incluirá en el proceso de optimización de forma que se pueda cuantificar la degradación de un amortiguador ideal.

Según lo expuesto anteriormente, en cuanto a la generación de ideas, análisis, metodologías y soluciones al problema que conlleva el uso de martillos neumáticos, no existe ninguna tesis dentro de esta área de ingeniería en esta materia. Por lo tanto, se concluye que la investigación que se propone es original, innovadora e inédita.

1.6 Metodología

El presente trabajo de investigación se basa en dos enfoques, el cualitativo y el cuantitativo, dicho de otro modo, es un trabajo de investigación mixto. En este tipo de proyecto, en el marco de la ingeniería en diseño industrial, ambos enfoques ayudan a lograr los objetivos que se plantean. De tal manera, la parte cualitativa, ayuda a orientar la parte cuantitativa, mediante las observaciones y estudios analizados y la parte cuantitativa que consiste en la recogida de datos realizados mediante ensayos, diseño asistido por ordenador y técnicas numéricas.

Esta tesis ha implicado la realización de un marco teórico que comprende la revisión de la literatura existente, con el fin de conocer el estado actual de la cuestión. Se comenzará con una exposición sobre una revisión del estado del arte, de la cuestión que ha suscitado su estudio, mediante las evidencias científicas aportadas, en el que el uso de máquinas manuales que generan vibraciones mecánicas produce daños significativos en el cuerpo humano. Asimismo, se realizará un estudio teórico sobre cuestiones que rodean o enmarcan la vibración mecánica con objeto de comprender el origen, el comportamiento y los métodos de solución sobre este fenómeno.

En cuanto al marco práctico, para dar respuesta al enfoque cuantitativo, de acuerdo con las directrices que se han establecido en el marco teórico, resulta indispensable la realización de estudios de campo. Se ha determinado la empresa con la que se ha realizado un contrato de cesión del martillo neumático rotopercurtor, así como la empresa con la cual se ha colaborado en la cesión de materiales y la colaboración con una asociación sin ánimo de lucro para realizar los ensayos reales. Todo este proceso se ha llevado a cabo con objeto de conseguir resultados empíricos para poder diseñar un elemento que dé solución al problema planteado.

El desarrollo de la tesis se ha basado en un proceso metodológico apoyado, como ya indicaban Pugh S. (1991) y Ullman D. G. (2010), citados por Blanca Romero (2015), en una metodología fundamentada en un proceso de diseño en fases.

Dichas fases de investigación, que contemplan todo lo expuesto anteriormente, se configuran como capítulos que se han ido activando a lo largo del desarrollo de la tesis teniendo en cuenta un conjunto de diversas funciones como las técnicas y conocimientos de diseño, de ingeniería, así como de investigaciones, estudios sobre el tema a tratar y los conocimientos y soluciones de mercado que hay en la actualidad.

En las distintas fases se han estudiado desde la repercusión de las enfermedades profesionales, el estudio y análisis de los martillos neumáticos, las normas de diseño, la biomecánica y la ergonomía. Se han realizado asimismo ensayos y estudios de nuevos materiales para amortiguar las vibraciones mecánicas aplicadas a la mejora de una empuñadura de un martillo neumático rotopercutor.

1.7 Estructura de la tesis

La presente Tesis Doctoral se desarrolla en orden secuencial, estructurada en un proceso metodológico apoyado en un proceso de diseño en fases, como se ha mencionado anteriormente.

Las diferentes fases de desarrollo del trabajo de investigación son denominadas capítulos y van relacionadas de manera directa con los objetivos planteados.

En la primera parte del Marco Teórico, que recoge los capítulos 1, 2 y 3, se exponen los conceptos teóricos sobre las vibraciones mecánicas que ayudan a contextualizar y entender este fenómeno. A continuación, se muestran razonadamente las actividades económicas expuestas a este riesgo físico, con el objetivo de determinar cuáles son los equipos manuales emisores de vibraciones mecánicas. Seguidamente, se examinarán los efectos que sobre el cuerpo humano produce la exposición a las vibraciones mecánicas, estudiando las articulaciones más perjudicadas por el uso de herramientas manuales. Por último, se expondrán las diferentes normas que existen en la actualidad para realizar una correcta evaluación de las vibraciones mecánicas enfocando el análisis a una perspectiva en materia de prevención de riesgos laborales.

Una vez seleccionada la máquina manual, en concreto, los martillos neumáticos y eléctricos, se estudiará su composición y funcionamiento. Seguidamente se presentará un estudio de mercado enfocado a conocer actualmente estas máquinas manuales, su diseño, los sistemas antivibratorios y los materiales empleados por los fabricantes para minimizar las vibraciones mecánicas.

También, se llevará a cabo un estudio de artículos de investigación enfocados hacia los materiales y sistemas antivibratorios empleados en los martillos neumáticos y en concreto en las empuñaduras, así como otros aspectos relacionados con la transmisión de las vibraciones mecánicas, como las fuerzas de agarre y las condiciones atmosféricas. Además, se estudiará si existen normativas específicas de diseño sobre estas máquinas con el objeto de conocer cuáles son los requisitos esenciales que se plantean para desarrollar y diseñar este producto en concreto.

Se planteará si los guantes, como equipos de protección individual, verdaderamente cumplen con su cometido y se estudiarán los materiales empleados para reducir la transmisión de la vibración. Para finalizar el marco teórico, se estudiará la influencia de la biomecánica y la biodinámica en el sistema mano-brazo en la transmisión de la vibración y un estudio ergonómico sobre las empuñaduras.

El Marco Práctico contempla los capítulos 4, 5 y 6, y comenzará con la determinación del martillo neumático que se analizó en el estudio de mercado, sobre empresas fabricantes extranjeras y nacionales. Segeda, la empresa española seleccionada, cederá la máquina de estudio, siendo esta el martillo neumático rotopercutor modelo MS76.

A continuación, se realizará un estudio físico de la máquina, un despiece, con el objeto de conocer el producto sobre el que se va a hacer una propuesta de rediseño para mejorar y minimizar la transmisión de la vibración. Una vez determinado que la empuñadura es el objeto de rediseño, se realizarán ensayos de materiales en el Centro Tecnológico del Calzado y del Plástico (CETEC) situado en Alhama de Murcia. Estos materiales, distintos a los determinados en el marco teórico, han sido cedidos por la empresa Synthelast S.A. para compararlos con los comúnmente empleados en las empuñaduras.

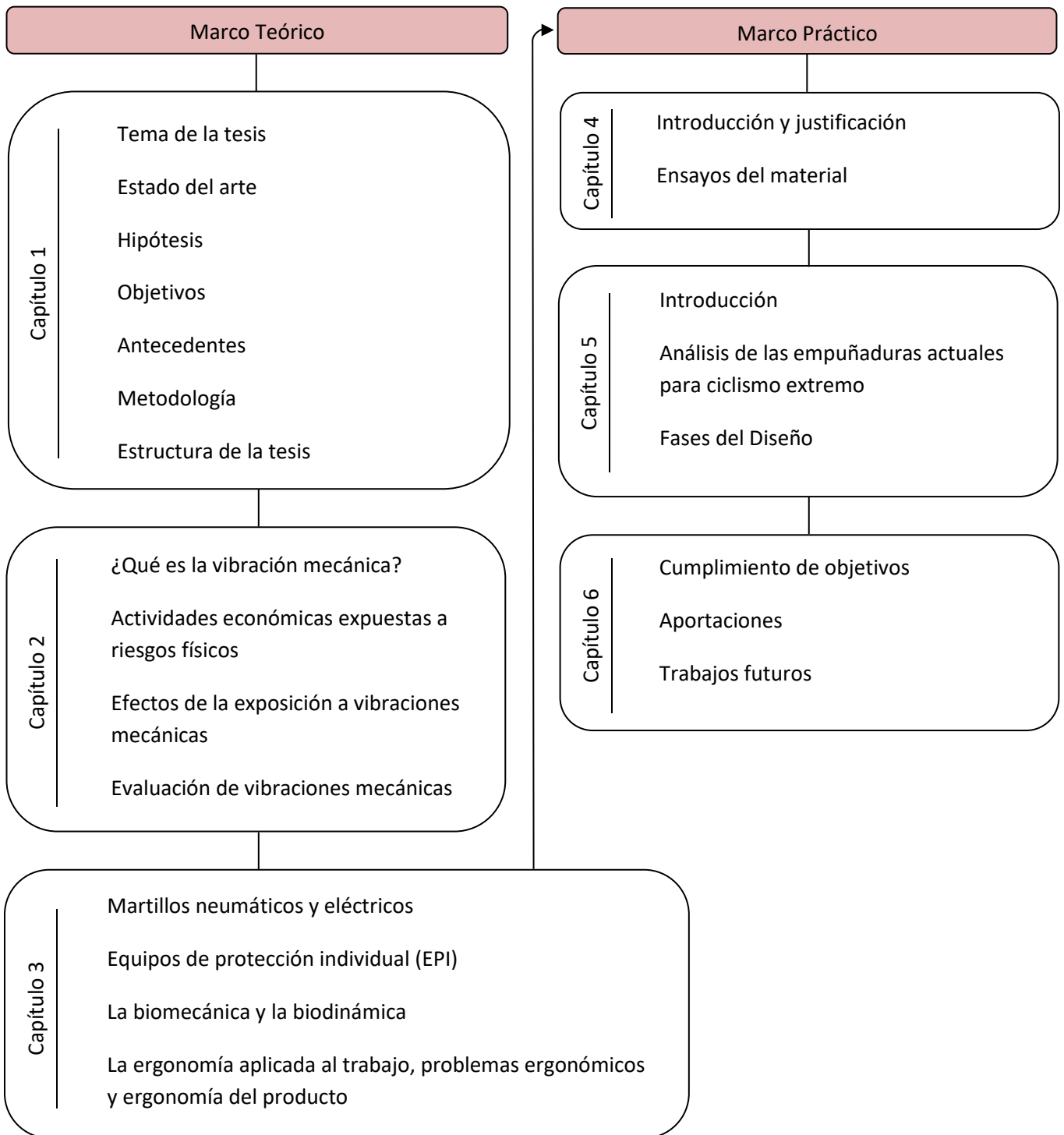
Para el rediseño de la empuñadura, se realizará un análisis de la situación del mercado de empuñaduras de los martillos neumáticos. Se analizan las empuñaduras actuales para ciclismo extremo por ser una actividad en la cual el usuario se somete también a las vibraciones, se analizan asimismo los materiales, el diseño y las tecnologías empleadas que

permiten reducir las vibraciones mecánicas. Esta analogía puede contribuir a una mejor búsqueda de soluciones.

Este planteamiento se validará mediante el diseño conceptual y diseño de detalle con el rediseño final de la empuñadura que se representará mediante la simulación en 3D. Finalmente, se analizará la amortiguación a través de la simulación numérica por elementos finitos.

En el último capítulo, en la parte de discusión de los resultados y conclusiones se muestran las respuestas a las preguntas de investigación, la consecución de los objetivos, así como la validación o no de la hipótesis planteada al comienzo de esta tesis. Se expondrán igualmente propuestas para investigaciones futuras.

Se incluye finalmente un apartado referencias utilizadas en la investigación, las fuentes bibliográficas, así como páginas de internet consultadas, incluyendo la fecha de acceso y los anexos, utilizando en todo momento las normas APA7 para la organización de las citas. En los anexos se muestran normativas adicionales a la evaluación de vibraciones mecánicas, el despiece del martillo neumático rotopercutor, los ensayos de los materiales para su caracterización, la explicación detallada del proceso de Ansys y los planos.



CAPÍTULO 2: REPERCUSIÓN DE LAS VIBRACIONES MECÁNICAS EN ENFERMEDADES CONSIDERADAS PROFESIONALES

2.1 ¿Qué es la vibración mecánica?

Para entender el desarrollo de esta investigación se debe conocer qué es la vibración mecánica y sus particularidades. Cada organización o institución la denomina de una forma diferente, pero todas engloban una misma idea.

No obstante, la vibración, en su forma más sencilla, se puede considerar como la oscilación o el movimiento repetitivo de un objeto alrededor de una posición de equilibrio. Además, la posición de equilibrio es aquella a la que llegará el objeto cuando la fuerza que actúa sobre él sea cero (G. White, 2010).

Según la “nota técnica de prevención 839, exposición a vibraciones mecánicas, evaluación del riesgo” del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, se define la vibración mecánica como “el movimiento de un cuerpo sólido alrededor de su posición de equilibrio sin que se produzca desplazamiento “neto” del objeto que vibra. Dicho de otra manera no se produce transporte de materia” (Senovilla, 2009, p. 1). Esta definición sugiere que un cuerpo que recibe una vibración de otro cuerpo vibratorio no se traslada por el impacto de esta vibración, sino que absorbe la vibración mecánica recibida pudiendo disiparse o no, en el mismo cuerpo.

Por otro lado, desde el punto de vista de la Higiene Ocupacional, la vibración se define como “cualquier movimiento o fuerza mecánica oscilante, continua o intermitente, que afecta al hombre en el trabajo a través de estructuras y receptores distintos al oído” (Ideara-SL, 2014, p. 9).

El Convenio 148 de la Organización Internacional del Trabajo (OIT) sobre la Protección de los Trabajadores contra los Riesgos profesionales debidos a la contaminación del aire, el ruido y las vibraciones en el lugar de trabajo, lo describe como “toda vibración transmitida al organismo humano por estructuras sólidas que sea nociva para la salud o entrañe cualquier otro tipo de peligro” (OIT, 1980, p. 2).

En conclusión, independientemente de qué tipo de institución defina la vibración mecánica, todas ellas engloban la misma idea y es aquella energía transmitida a través de

máquinas y herramientas a motor que ha sido absorbida por el cuerpo humano durante su trabajo produciéndole trastornos en el organismo en un periodo de tiempo.

2.1.1 Características de las vibraciones, magnitudes y su tipología

En este apartado se tratarán los conceptos que son imprescindibles para el desarrollo de la tesis y que ayudarán a comprender los elementos que intervienen en un sistema vibratorio.

Las vibraciones mecánicas se caracterizan, en rasgos generales, por unas magnitudes específicas como pueden ser la frecuencia, la amplitud y los ejes de la vibración. Asimismo, cabe destacar que existen otros aspectos fundamentales que entran en juego en un sistema vibratorio y que se debe tener en cuenta, como la magnitud de la vibración, el tiempo de exposición o duración, la impedancia mecánica y los tipos de vibraciones mecánicas que pueden ser amortiguadas o no amortiguadas.

Por último, se ha de mencionar que las vibraciones se pueden estudiar desde la perspectiva de la prevención definiéndolas como vibraciones mecánicas transmitidas al sistema mano-brazo o al cuerpo entero que vendrán establecidas en función de la máquina que emplee el trabajador. Aunque en esta tesis no son objeto de estudio las vibraciones mecánicas transmitidas al cuerpo entero, es necesario conocer dónde y cómo se originan, así como sus afectaciones para diferenciarlas del sistema mano-brazo.

2.1.1.1 La frecuencia

La frecuencia en física es una magnitud que mide el número de repeticiones por unidad de tiempo de cualquier fenómeno o suceso. Por decirlo de otra manera, es el número de veces por segundo que realiza el ciclo completo de la oscilación. Según la Nota Técnica de Prevención 839, se indica que es el número de veces que el objeto vibra por segundo. Esta magnitud se mide en Hercios (*Hz*) (Senovilla, 2009).

Cuando se habla de frecuencia de una máquina o herramienta a motor, las vibraciones que producen no son frecuencias únicas sino que son una mezcla de vibraciones de diversas frecuencias, por lo tanto no se puede hablar de una sola frecuencia porque no se consideran frecuencias individuales sino que se agrupan en bandas de octava (Senovilla, 2009).

Por otro lado, existen diversas gamas de frecuencia que se suelen clasificar y agrupar según unas escalas específicas. A los profesionales de la prevención les interesan determinados grupos de gamas de frecuencia, como afirma el autor Ideara-SL (2014), con el proyecto “Vibraciones mecánicas. Factores relacionados con la fuente y medidas de control” que “en Higiene Industrial tienen interés las vibraciones con frecuencias comprendidas entre 1 y 1.500 *Hz*” (Ideara-SL, 2014, p. 10). Sin embargo, otros proyectos como el realizado por Santurio, Rodríguez y Argüelles (2006) decía que “el intervalo de frecuencias de interés para la valoración de las vibraciones que se transmiten a través del sistema mano-brazo es el acotado entre 6,3 *Hz* y 1.250 *Hz*” (Santurio Díaz et al., 2006, p. 14). A pesar de las diferentes gamas de frecuencia que presentan estos dos proyectos, ambas son aceptadas, pues forman parte del mismo intervalo, salvo que una de ellas se encuentra más acotada para precisar a partir de qué frecuencia se tendrán que evaluar las vibraciones mecánicas del sistema mano-brazo.

Existen distintas herramientas que transmiten vibraciones mecánicas, muchas de ellas se emplean utilizando las dos manos estando en una posición vertical, mientras que otras se deben manejar en asientos para poder usar la maquinaria. Normalmente, las frecuencias de vibración se reúnen por grupos de frecuencia, no por tipo de máquina, sin embargo, las vibraciones mecánicas se pueden clasificar de otras formas y dependiendo del interés se encuentran de muy baja frecuencia (<1 *Hz*); baja frecuencia (1-20 *Hz*) y alta frecuencia (20-1000 *Hz*) (Gómez Etxebarria, 2008).

2.1.1.2 Magnitud de la vibración

Se denomina magnitud de una vibración al desplazamiento producido por la vibración. Al tratarse de un movimiento puede medirse en términos de velocidad o aceleración (Senovilla, 2009). No obstante, esta propiedad se suele medir en m/s^2 .

Otros autores como Griffin (2001), afirmaban que la magnitud de una oscilación puede expresarse como la distancia entre los extremos alcanzados por el movimiento (valor pico-pico) o como la distancia desde algún punto central hasta la desviación máxima (valor pico).

2.1.1.3 Dirección o ejes de la vibración

En rasgos generales el movimiento vibratorio de un cuerpo se puede explicar como una composición de movimientos individuales de 6 tipos. Traslaciones en las tres direcciones ortogonales X , Y y Z y rotaciones alrededor de los ejes X , Y y Z . Cualquier movimiento que el objeto pueda presentar se puede separar en una combinación de esos seis movimientos. Un cuerpo posee seis grados de libertad (G. White, 2010).

2.1.1.4 Tiempo de exposición o duración

El tiempo de exposición es el tiempo que el usuario o el trabajador está sometido a la vibración durante su jornada laboral. Se trata de un parámetro cuya determinación no necesariamente siempre coincide con el tiempo durante el cual se utiliza una máquina, pues con una misma máquina pueden realizarse diferentes operaciones que representen un nivel de vibraciones también diferente (Senovilla, 2009).

Cuando un trabajador realiza actividades o procesos durante la jornada laboral, en muchos casos la exposición laboral suele ser intermitente, por lo tanto, tienen una magnitud variable en cada momento o contienen choques esporádicos (Griffin, 2001), como por ejemplo los provocados por el martillo neumático por el tipo de piedra que este trabajando.

Las operaciones de esos movimientos pueden acumularse de manera que conlleve a períodos cortos de vibración de alta magnitud y períodos largos de vibración de baja magnitud (Griffin, 2001).

Para el cálculo del tiempo de exposición se pueden realizar diferentes métodos, pero es fundamental observar cómo el trabajador realiza la actividad, no sólo del cómo la está realizando sino también del tiempo que le dedica y los descansos que realiza. Para ello, se podría utilizar un cronómetro o registrar las operaciones realizadas en video (Senovilla, 2009).

2.1.1.5 Impedancia mecánica

La impedancia mecánica es una propiedad en la que el cuerpo realiza una oposición a la energía proporcionada por la herramienta, es decir, es la fuerza que se requiere para que el cuerpo se mueva a cada frecuencia. Depende de muchos factores como son el peso del

individuo, la posición del cuerpo del trabajador mientras realiza un proceso y la constitución corporal (Ideara-SL, 2014).

Massimo Bovenzi (2001), afirmaba que:

Los resultados experimentales indican que el comportamiento mecánico de la extremidad superior humana es complejo, dado que la impedancia del sistema de la mano y el brazo—es decir, la resistencia a vibrar—presenta marcadas variaciones en función de los cambios de amplitud de vibración, frecuencia y dirección, fuerzas aplicadas y orientación de la mano y el brazo con respecto al eje del estímulo (Bovenzi, 2001, p. 9).

En general, a mayores niveles de vibración y a mayores presiones de agarre de la mano, mayor impedancia, pues las variaciones de impedancia dependen de la frecuencia y dirección del estímulo de la vibración y de las diversas fuentes de intravariabilidad e intervariabilidad de la persona (Bovenzi, 2001), es decir, de las variables internas condicionadas por la fisiología del propio cuerpo y por las variables externas que interactúan con el cuerpo.

2.1.1.6 Tipos de vibraciones mecánicas

Las vibraciones mecánicas se pueden clasificar de varias formas, desde el punto de vista mecánico y físico, es decir, vibraciones lineales y no lineales. También, según el grado de excitación se dividen en: vibraciones libres y forzadas.

Por último, desde el punto de vista del amortiguamiento:

- “Vibraciones sin amortiguamiento: En este caso, las vibraciones sin amortiguamiento son nulas o se desprecia la fuerza de amortiguamiento (Orquin Casas, 2018, pp. 100–105).
- Vibraciones amortiguadas: Las vibraciones amortiguadas se dan cuando existen las fuerzas de rozamiento” (Orquin Casas, 2018, pp. 100–105).

Sin embargo, las vibraciones también se podrían analizar desde otra posición, como es el caso desde el punto de vista de la salud y el bienestar del trabajador. En prevención de riesgos laborales se toman en consideración dos tipos de grupos y división del cuerpo humano, que dependen de la zona afectada por las vibraciones mecánicas.

Según el Real Decreto 1311/2005, de 4 de noviembre, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores frente a los riesgos derivados o que puedan derivarse de la exposición a vibraciones mecánicas se dividen en dos grupos, vibraciones mecánicas transmitidas al sistema mano-brazo (VMB) y vibraciones mecánicas transmitidas al cuerpo entero (VC) (Juan y Seva, 2005).

2.1.1.6.1 Vibraciones mecánicas transmitidas al sistema mano-brazo

Se llama sistema mano-brazo porque las operaciones que realiza un trabajador sirviéndose de una herramienta las puede realizar de dos formas, empleando una mano o las dos. Por lo que exige un contacto directo con la herramienta a través de los mangos en los que la energía discurre en la palma de la mano llegando a alcanzar otras partes del cuerpo.

Este tipo de vibraciones son vibraciones que penetran en el cuerpo a través de las manos. Están causadas por numerosos procesos de la industria, la agricultura, la construcción y la minería, en los que se agarran o empujan herramientas o piezas vibrantes con las manos o los dedos. Se conocen como vibraciones mano-brazo y vibraciones locales o segmentarias (Griffin, 2001).

La exposición a este tipo de vibraciones se da en puestos de trabajo donde la intensidad de la vibración se alcanza a través del empleo de máquinas y equipos manuales, manipulación de piezas a mecanizar, o el manejo de elementos de control sometidos a vibración. Es decir, a procesos, herramientas a motor y piezas vibrantes sostenidas por el operario con las manos.

El Real Decreto 1311/2005, citado anteriormente, define en su artículo 2 que, se entenderán las vibraciones transmitidas al sistema mano-brazo como “La vibración mecánica que, cuando se transmite al sistema humano de mano y brazo, supone riesgos para la salud y la seguridad de los trabajadores, en particular problemas vasculares, de huesos o de articulaciones, nerviosos o musculares” (Pascual Lizana, 2005, p. 10).

2.1.1.6.2 Vibraciones transmitidas al cuerpo entero

En este caso, cuando se habla del cuerpo entero se entiende a aquella circunstancia en la que el cuerpo está en contacto con la máquina, ayudándose de las manos, pero desde una posición fija, en un asiento.

En esas circunstancias el cuerpo descansa sobre una superficie vibrante pudiendo ser un asiento o respaldo del puesto de conducción. Las máquinas que suelen manejar los operarios son excavadoras, maquinaria y vehículos de obras públicas, vehículos industriales, vehículos de transporte urbano, tractores y cosechadoras (Griffin, 2001).

Las vibraciones del cuerpo completo ocurren cuando el cuerpo está apoyado en una superficie vibrante, por ejemplo, cuando se está sentado en un asiento vibrante, como el caso de maquinaria agrícola o de construcción, como se ha mencionado anteriormente. En general, las vibraciones de cuerpo completo se presentan en todas las formas de transporte (Griffin, 2001).

Al igual que en las vibraciones transmitidas al sistema mano-brazo en el Real Decreto 1311/2005, en su artículo 2, denomina las vibraciones transmitidas al cuerpo entero como “La vibración mecánica que, cuando se transmite a todo el cuerpo, conlleva riesgos para la salud y la seguridad de los trabajadores, en particular lumbalgias y lesiones de la columna vertebral” (Pascual Lizana, 2005, p. 11).

2.1.2 Magnitudes de las vibraciones en el ser humano

Una vez definidos los conceptos esenciales que engloban un sistema vibratorio cabe citar que estas vibraciones mecánicas provocan en el ser humano durante la jornada laboral, enfermedades profesionales debido al uso de esas máquinas vibrantes. Los factores que propician la aparición de las afectaciones son muchos. Entre ellos se encuentra la frecuencia, la frecuencia natural, el efecto de la resonancia, el tiempo de exposición o duración, la impedancia y la dirección de los ejes de vibración.

También, se debe entender cómo afectan todos estos factores en el ser humano desde la perspectiva de la prevención que las diferencia entre el sistema mano-brazo y de cuerpo entero.

En esta tesis, aunque el sistema cuerpo entero no es objeto de estudio, se citará puesto que la prevención así lo diferencia. No obstante, se hará hincapié en el sistema mano-brazo siendo objeto de estudio ya que el trabajador realiza las operaciones empleando la máquina manual a través del contacto de las manos con los mangos y es por donde la vibración se transmite a todo el sistema mano-brazo.

2.1.2.1 La frecuencia

La frecuencia es una de las causas que más perjudican al ser humano, dado que las grandes frecuencias, independientemente de cómo sean recibidas, es decir, a través del sistema mano-brazo o del cuerpo entero, son perjudiciales, sin olvidar que las bajas frecuencias pueden ser incluso más lesivas que las grandes, debido a la frecuencia natural que poseen los cuerpos y a la combinación de las dos frecuencias.

Sin embargo, se ha observado que, dependiendo de la intensidad, afectarán de una manera u otra a ciertas partes del cuerpo. Cuando se hable de una vibración inferior a 3 *Hz*, el cuerpo se moverá como unidad. Conforme vaya aumentando la frecuencia de vibración, ciertas partes del cuerpo tenderán a responder en forma diferencial a la frecuencia de vibración (Ideara-SL, 2014).

Por otro lado, las frecuencias comprendidas entre 4 a 12 *Hz*, favorecerán a que las caderas, hombros, partes abdominales entre otros, comiencen a resonar (Ideara-SL, 2014).

Conforme vaya subiendo de frecuencia por ejemplo entre 20 y 30 *Hz* el cráneo comenzará a resonar, producirá un deterioro de la agudeza visual. Entre 60 y 90 *Hz*, ocurrirá algo parecido en los globos oculares (Ideara-SL, 2014).

Los efectos adversos sobre la salud de los trabajadores, dependerán fundamentalmente de los factores y características de las vibraciones, y de las condiciones de trabajo del organismo receptor (fatiga postural, fatiga física, fatiga mental, frecuencia respiratoria y presión sanguínea) (Ideara-SL, 2014).

En la frecuencia se encuentran dos aspectos fundamentales directamente relacionados, como son la frecuencia natural y el efecto de resonancia que se genera en ciertas circunstancias. Un ejemplo de esto sería cuando la frecuencia natural, ya sea de un órgano del cuerpo humano o de un material, coincide con otra frecuencia externa aplicada.

2.1.2.2 Frecuencia natural y efecto de resonancia

De acuerdo con Seidel y Griffin (2001):

Como todas las estructuras mecánicas, el cuerpo humano tiene frecuencias de resonancia a las que presenta una respuesta mecánica máxima. En el cuerpo humano existen muchas resonancias y las frecuencias de resonancia varían de unas personas a otras y en función de la postura. En biodinámica para describir el modo en que la vibración produce movimiento en el cuerpo se suelen utilizar dos términos: transmisibilidad e impedancia (Seidel y Griffin, 2001, p. 3).

Cuando se habla de transmisibilidad se entiende a la distancia o al fragmento a la que la vibración, ya sea transmitida por el sistema mano-brazo o a través del cuerpo entero, perjudica una parte del cuerpo humano. Un ejemplo sería desde el asiento a la cabeza (Seidel y Griffin, 2001). Aunque la impedancia se tratará en otro punto, cabe citar que esta se encuentra relacionada con la transmisibilidad, la frecuencia natural y el efecto de resonancia que se describirán seguidamente.

2.1.2.2.1 Frecuencia natural

Para poder conocer exactamente qué es la frecuencia natural, primero se debe atender a la propiedad de la elasticidad.

La elasticidad es la propiedad que ciertos cuerpos poseen al deformarse bajo la acción de fuerzas externas que recuperan su forma una vez que se le deja de aplicar estas fuerzas. La deformación en ocasiones puede ser permanente en algunos cuerpos. En ciertos rangos, la deformación para todos los cuerpos es proporcional a la fuerza deformante aplicada. Por eso, antes de que el cuerpo vuelva a recuperarse, es decir, vuelva otra vez a su estado de equilibrio, los cuerpos desarrollarán oscilaciones. Cada cuerpo, dependiendo de determinadas características como la forma, la masa, el material del cual esté formado, de la misma manera que las restricciones a las cuales estén sometidos, oscilará con frecuencias propias a las que se denomina frecuencias naturales (Peralta et al., 2009).

Dicho de otra manera, según Fungencio García García 2006 en el proyecto “Las vibraciones mecánicas en el ambiente laboral” afirmaba lo siguiente:

Cuando un cuerpo elástico se desplaza de su posición de equilibrio y posteriormente se deja libre, tiende a recuperar su posición inicial de reposo mediante una serie de oscilaciones. La frecuencia de este movimiento de vibración, denominada frecuencia natural de vibración, depende exclusivamente de las características elásticas del propio sistema (García García, 2006, p. 15).

Como consecuencia, al haber dejado el cuerpo libre tendiendo éste a recuperar su posición inicial, en el transcurso del tiempo, la vibración disminuye y su amplitud también.

Por otro lado, si se restringe el cuerpo y además se aplica una fuerza periódica externa, el objeto continuará vibrando mientras reciba energía. El resultado de este movimiento vibrante viene, por lo tanto, determinado no solo por las propiedades elásticas del cuerpo, sino también por su capacidad de adaptación a la frecuencia impuesta desde el exterior. En este caso, el resultado de la vibración dependerá de la frecuencia impuesta por el sistema exterior que se le aplica al cuerpo y por supuesto de la frecuencia natural propia del cuerpo (García García, 2006).

Con todo esto se concluye que, es importante entender que cada parte del cuerpo humano posee determinadas frecuencias de resonancia y que las vibraciones que reciba el cuerpo coincidentes a las frecuencias naturales pueden amplificar la intensidad y como consecuencia sus efectos nocivos (Ágila Soto, 2019).

2.1.2.2.2 Efecto de resonancia

El efecto de resonancia lo define Jaureguiberry (2000) como un fenómeno que “cuando un sistema es excitado por una fuerza armónica externa, cuya frecuencia es igual a la frecuencia natural del sistema, la amplitud de la vibración crece y se dice que el sistema está en la resonancia” (Jaureguiberry, 2000, p. 1).

Este hecho se puede manifestar en cualquier momento puesto que al estar en un mundo sometido constantemente a fuerzas oscilantes y relacionadas con estructuras elásticas como ventanas, puentes, edificios, es natural que, las frecuencias oscilantes coincidan con alguna de las frecuencias naturales de las estructuras elásticas provocando este tipo de fenómenos (Peralta et al., 2009).

En un sistema dinámico de una estructura aparecen, durante el movimiento, fuerzas de inercia relacionadas con la masa del sistema. Un claro ejemplo de combinación de ambas fuerzas, elástica y de inercia fue el desplome producido en un puente de acero en Broughton 1831 Inglaterra, por las vibraciones inducidas por un grupo de 60 soldados al atravesarlo marcando el paso. Los soldados aplicaban con su paso una fuerza con una determinada frecuencia, produciendo el movimiento del sistema, y como consecuencia aparecieron fuerzas de inercia proporcionales a la aceleración que hacían que se alejara el puente de su posición de equilibrio (Orquín Casas, 2018). Tal es así que, actualmente, el continuo desarrollo de materiales y técnicas de construcción están dando lugar a pasarelas peatonales más esbeltas, más ligeras que pueden ser susceptibles a las vibraciones inducidas por el ser humano. Estas estructuras interactúan con los movimientos del hombre, como caminar y correr, y esto a veces produce efectos no deseados, que ocurren particularmente cuando las frecuencias de excitación del hombre o sus armónicos están cerca de una frecuencia natural estructural (Soria Herrera, 2019).

Se afirma que, cualquier estructura física puede amplificar la intensidad de una vibración que reciba de forma externa. Dentro de estas estructuras físicas se incluyen también las partes del cuerpo humano, que dan como resultado una combinación de vibración coincidente con ciertas frecuencias que son características de la estructura receptora, es decir, del propio cuerpo (Ágila Soto, 2019).

Por eso, no se debe subestimar que una baja magnitud de frecuencia no vaya a ser amplificada o intensificada dado que, como ya se ha mencionado anteriormente, al aplicar una vibración externa pueden coincidir las dos magnitudes y como consecuencia obtener una oscilación resultante con una gran amplitud.

Cualquier estructura física puede verse afectada por este fenómeno y se puede indicar que, siendo el cuerpo humano un sistema complejo formado por varias masas comunicadas con la ayuda de elementos elásticos, cada parte del cuerpo humano asumirá rangos diferentes de frecuencia resonante (García García, 2006).

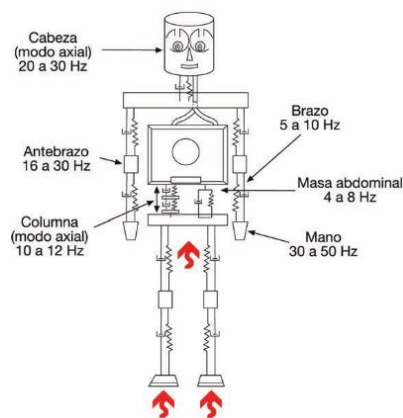
El cuerpo humano frente a la absorción de energía emitida por un objeto externo es, por un lado, capaz de amortiguar parte de las vibraciones, sin embargo, en unas bandas de frecuencias concretas, la amplitud del movimiento puede aumentar de forma paulatina (Álvarez Bayona et al., 2014).

La columna es resonante en modo axial para frecuencias de 10 a 12 Hz , la masa abdominal en bandas de 4 a 8 Hz y la cabeza de 20 a 30 Hz (Álvarez Bayona et al., 2014).

También, se observa que los dedos, la mano y el brazo son resonantes en la gama de frecuencias comprendida entre 80 y 300 Hz (Bovenzi, 2001).

Estos grupos de rangos de frecuencia citados vienen determinados en función de la zona del cuerpo a través de los denominados modelos mecánicos compuestos por muelles y amortiguadores. Son sistemas que representan las capacidades que tiene el cuerpo humano para absorber energía y en qué rangos de frecuencia se produce el efecto de la resonancia, como se puede observar en la imagen siguiente (Álvarez Bayona et al., 2014).

Figura 1: Modelo mecánico



Nota: Adaptado de Álvarez Bayona T., del Centro Nacional de Nuevas Tecnologías y del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (2014, p. 9).

Como conclusión, se afirma que, para el diseño de nuevas herramientas o máquinas a motor, hay que tener muy presente que el efecto de resonancia es un factor muy importante a tener en cuenta para la fabricación del producto, puesto que los efectos para la salud de los individuos pueden con el tiempo ser perjudiciales y no solo en el ámbito profesional sino también en el ámbito personal.

Además, los expertos en el trabajo y sobre todo en la medicina laboral deben cuidar y conocer que la frecuencia de vibración de herramientas y máquinas como los taladros, que rompen las capas de pavimento, no coincidan con la frecuencia natural de algunas de las partes de la estructura ósea (Peralta et al., 2009).

Se ha estudiado, mediante medición a través del sistema mano-brazo del ser humano, que las vibraciones de baja frecuencia, por debajo de 50 *Hz*, se transmiten con poca atenuación a lo largo de la mano y el antebrazo (Bovenzi, 2001). Esto es debido al hecho de que las frecuencias de resonancia de la mayoría de las partes del cuerpo humano se encuentran por debajo de 50 *Hz* (Ágila Soto, 2019). En el modelo mecánico del cuerpo humano de la figura anterior se pueden observar las frecuencias a las cuales las diferentes partes del cuerpo humano pueden crear amplitud de movimiento.

La posición de ejecución del mecanizado de una pieza con la herramienta influye en la atenuación, por eso, la postura del brazo puede mitigar las vibraciones en el codo, puesto que la transmisión de vibración tiende a reducirse a medida que aumenta el ángulo de flexión en la articulación del codo. De igual forma, conforme las frecuencias son más elevadas, es decir, superiores a 50 *Hz*, la transmisión de vibraciones disminuye gradualmente a medida que esta frecuencia se va incrementando. Con valores mayores de 150 a 200 *Hz* la mayoría de la energía de vibración se disipa en los tejidos de la mano y los dedos. La transmisión de vibración de altas frecuencias puede afectar a las estructuras blandas de los dedos y manos, en cambio, las de baja frecuencia y gran amplitud se relacionan con lesiones de muñeca, codo y hombro. En general, todas estas afectaciones se conciben debido al uso de herramientas de percusión (Bovenzi, 2001).

2.1.2.3 Ejes de dirección de la vibración: *X*, *Y*, *Z*

Los ejes por los que pasa la vibración son factores importantes a tener en consideración ya que, dependiendo de en qué eje se transmita con más intensidad afectará de una manera u otra a distintas partes del cuerpo humano. Es decir, dependiendo de la dirección de incidencia de la vibración, tendrán efectos diferentes en el cuerpo humano.

En esta tesis, cuando se habla de los ejes de vibración se hace referencia a la interacción de esa transmisión de energía al cuerpo y de cómo se utilizan para la medición de la vibración. Por eso, cuando se quieran realizar mediciones para el sistema mano-brazo se utilizará un sistema de referencia respecto a la empuñadura basicéntrico o biodinámico; ambos sistemas están ligados a la incidencia de la vibración en el sistema mano-brazo sobre los ejes ortogonales *X*, *Y* y *Z* (Senovilla, 2009).

Por el contrario, cuando el trabajador realice su actividad sentada, estos tres ejes se designan de forma diferente. Así, el eje X es el longitudinal, el eje Y lateral y el Z vertical. Las rotaciones alrededor de los ejes X , Y y Z se designan como rx balanceo, ry cabeceo y rz deriva, respectivamente (Griffin, 2001).

En higiene industrial, para la evaluación de vibraciones mecánicas, la incidencia de vibración ha interesado siempre fijarla a los ejes ortogonales nombrados antes, que están unidos al cuerpo, de tal forma que queden orientados en el sentido de las vibraciones emitidas. De modo que, para el cuerpo entero, quedaría de esta manera: “Eje X : dirección espalda – pecho. sentido positivo: hacia el frente. Eje Y : dirección hombro – hombro. sentido positivo: hacia hombro izquierdo. Eje Z : dirección pies – cabeza. sentido positivo: hacia la cabeza” (Senovilla, 2009, p. 1).

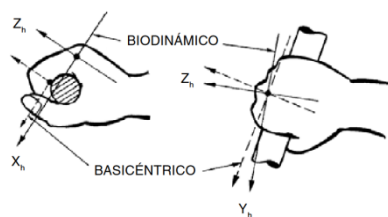
Mientras tanto, para el sistema mano-brazo, la vibración de incidencia se orienta en este otro sentido:

Eje X : dirección dorso - palma. sentido positivo: hacia la palma

Eje Y : dirección perpendicular a los otros dos. sentido positivo: hacia el pulgar

Eje Z : dirección del eje longitudinal del 3er hueso metacarpiano. sentido positivo: hacia la extremidad distal del dedo (Senovilla, 2009, p. 30).

Figura 2: Sistema basicéntrico



Nota: Adaptado de Senovilla L.P (2009, p. 2).

En la práctica, para la medición, se utiliza el sistema basicéntrico. Es el mismo sistema biodinámico simplemente que rota alrededor del eje X , haciendo que el eje Y coincida con la línea de los nudillos y por consiguiente con el eje de agarre de las máquinas (Senovilla, 2009).

Cuando se emplea el acelerómetro, para conocer las vibraciones mecánicas que se transmiten, pueden existir ejes predominantes, eso quiere decir que, la vibración en ese eje es

mayor que en otros. Además, con herramientas en las que se emplean las dos manos, a veces la mano dominante no tiene por qué ser siempre la que reciba mayor nivel de vibración.

Como se ha mencionado, la incidencia de la vibración se expresa en relación a unos ejes ortogonales que se encuentran conexos al sistema del cuerpo humano, pues, según la vibración transmitida por el sistema mano-brazo o por el cuerpo entero, pueden aparecer enfermedades profesionales caracterizadas por la forma de transmisión.

2.1.2.4 Tiempo de exposición o duración

El factor del tiempo es un elemento fundamental que perjudica la salud del trabajador, dado que la respuesta del ser humano a esa oscilación depende de la duración total a la que esté sometido. Griffin (2001) afirmaba que “si las características de la vibración no varían en el tiempo, el valor eficaz de la vibración proporciona una medida adecuada de su magnitud promedio” (Griffin, 2001, p. 2). Si varían las características de la vibración, la vibración promedio medida dependerá del período durante el que se mida.

Por eso, cuando se quiera medir el tiempo de exposición o la duración que conlleva al ejecutar un proceso mediante el empleo de una herramienta, existen mediciones de larga duración, en operaciones con equipos en funcionamiento continuado, mediciones de larga y corta duración, en operaciones con equipos en funcionamiento intermitentes, y mediciones de duración fija en operaciones con equipos que producen impactos o choques (Pascual Lizana, 2005).

Esto quiere decir que en ocasiones la intensidad de los movimientos que contienen choques son intermitentes, y hacen que la aceleración eficaz sea infravalorada. Puede suceder que en ciertas exposiciones profesionales existan picos o choques esporádicos. Muchas exposiciones profesionales son intermitentes y como consecuencia tienen magnitudes variables. Además, puede ocurrir que la intensidad de los movimientos se acumule y como consecuencia proporcione períodos cortos de vibración de alta magnitud y períodos largos de vibración de baja magnitud (Griffin, 2001).

2.1.2.5 Impedancia

La mayoría de los autores y estudiosos de este fenómeno afirman que los efectos de la exposición a las vibraciones están relacionados con la energía que se disipa y que es por lo tanto absorbida en las extremidades (Bovenzi, 2001).

Esta absorción de energía depende de elementos que afectan al acoplamiento del sistema dedos-mano de la fuente de vibración. Uno de los componentes importantes, en cuanto a la transmisión de vibración se refiere, es la presión de agarre que ejerce el trabajador, la fuerza elástica y postura modifican la respuesta dinámica del dedo, la mano y el brazo y, como consecuencia, la cantidad de energía transmitida y absorbida (Bovenzi, 2001).

Cada parte del cuerpo humano tendrá una impedancia mecánica distinta, en el caso de los dedos la impedancia mecánica es muy inferior a la de la palma de la mano (Bovenzi, 2001).

Las afectaciones derivadas de la exposición a vibraciones mecánicas dependen de respuestas biomecánicas, es decir, las vibraciones de frecuencias por debajo de 50 *Hz* se transmiten con poca atenuación a lo largo de la mano y del antebrazo. Todo esto depende de la postura de ejecución, la transmisión tiende a disminuir a medida que aumenta el ángulo de flexión en la articulación del codo. Sin embargo, por encima de 50 *Hz* la transmisibilidad disminuye progresivamente. Cuando supera los 150 a 200 *Hz* la mayor parte de la energía de vibración se disipa en los tejidos de la mano y los dedos (Bovenzi, 2001).

Según expone Bovenzi (2001), de las medidas de transmisibilidad se infiere que, en la región de alta frecuencia, las vibraciones pueden ser responsables de daños a las estructuras blandas de los dedos y manos, mientras que las vibraciones de baja frecuencia y gran amplitud podrían estar relacionadas con lesiones de muñeca, codo y hombro. Por eso, es interesante conocer la atenuación que el propio cuerpo realiza frente a la exposición de vibraciones mecánicas.

2.1.2.6 Tipos de vibraciones en el cuerpo entero y en el sistema mano-brazo

Las afectaciones provocadas por las vibraciones mecánicas transmitidas tanto al miembro superior como al inferior no tendrían por qué verse de inmediato, se trata de procesos que podrían tardar tiempo en aparecer. Además, como ya se ha mencionado, depende de muchos factores, entre otros, de la disposición física y psíquica del trabajador.

Existen muchas enfermedades profesionales derivadas de la exposición a vibraciones mecánicas. El Real Decreto 1311/2005 de 4 de noviembre las separa en enfermedades provocadas por vibraciones de mano-brazo y vibraciones de cuerpo entero.

Para la prevención de los riesgos relacionados con las vibraciones mecánicas, este Real Decreto junto con la Guía Técnica para la evaluación y prevención de los riesgos relacionados con las vibraciones mecánicas, especifican, entre otras cosas, los valores límite de exposición diaria y los valores de exposición diaria que dan lugar a una acción tanto para la vibración transmitida al sistema mano-brazo como para la vibración transmitida al cuerpo entero (Pascual Lizana, 2005).

Asimismo, no solo es importante y de obligado cumplimiento por los empresarios que evalúen los riesgos, sino también es importante desde el punto de vista legal, pues, las vibraciones mecánicas producen efectos adversos en la salud del trabajador.

2.1.2.6.1 Vibraciones transmitidas al cuerpo entero

Aunque las vibraciones transmitidas en el cuerpo entero no son objeto de estudio es necesario conocerlas para diferenciarlas de las del sistema mano-brazo que sí lo son.

En este caso, debido a la maquinaria empleada, la transmisibilidad de la vibración al cuerpo entero depende de la frecuencia de vibración, del eje de incidencia, de la postura del cuerpo y de la disposición y sensibilidad del individuo.

Para evaluar las vibraciones mecánicas transmitidas al cuerpo entero, el rango de frecuencia de interés está en torno al 0,5 Hz y 100 Hz, a excepción del sector de la navegación marítima que se sitúa por encima de 1 Hz. En los valores menores a 0,5 Hz se ubican las molestias causadas por el mareo (Ideara-SL, 2014) .

2.1.2.6.2 Vibraciones transmitidas al sistema mano-brazo

En las vibraciones transmitidas al sistema mano-brazo o también llamadas vibraciones locales o segmentarias, el contacto principalmente es la mano. La vibración es amortiguada por el conjunto de mano-brazo-hombro o, por el contrario, dependiendo de la frecuencia a la que se está expuesto, puede ocurrir que la vibración recaiga solamente en la articulación

radio-carpiana, en la zona palmar o en la muñeca. Los procesos o herramientas a motor que generan este tipo de vibraciones mecánicas y que se introducen en el cuerpo, a través de los dedos o la palma de las manos, producen una serie de dolencias que provocan problemas osteoarticulares y vasculares, en la salud del trabajador (Bovenzi, 2001).

Las enfermedades profesionales debidas a la exposición a vibraciones transmitidas a las manos provienen de herramientas a motor que se utilizan en distintos procesos de fabricación, como herramientas percutoras y amoladoras. En construcción y en la minería se emplean martillos rompedores, martillos picadores y compactadores (Bovenzi, 2001), que también exponen a los operarios a vibraciones.

La aparición de las enfermedades como consecuencia del uso de herramientas motoras depende de factores tanto de ejecución del proceso, es decir, de la dirección, del material que se trabaja y de las condiciones de exposición, como de la temperatura ambiente, la humedad y las respuestas dinámicas del sistema dedo-mano-brazo. De igual modo, un factor importante que condiciona esta aparición de la enfermedad es el diseño de la herramienta, ya sea portátil o fija (Bovenzi, 2001).

Las enfermedades profesionales causadas por agentes físicos se recogen en el cuadro de enfermedades profesionales del Real Decreto 1299/2006, de 10 de noviembre, por el que se aprueba el cuadro de enfermedades profesionales en el sistema de la Seguridad Social y se establecen criterios para su notificación y riesgos (Cavas Martínez et al., 2007).

Concretamente, figuran en el grupo 2 estos agentes físicos, y en particular como agente B, las vibraciones mecánicas. Las enfermedades que producen son denominadas osteoarticulares o anginoneuróticas y dentro de ese grupo se diferencian en afectación vascular y osteoarticular. Estas dolencias aparecen en trabajos en los que se emplee máquinas que vibran o por objetos mantenidos sobre una superficie vibrante en una gama de frecuencia comprendida en 25 a 250 *Hz*. El cuadro determina algunas de las máquinas que trabajan en este rango de frecuencia y que producen estas enfermedades, entre los que se encuentran los martillos neumáticos, punzones, taladros, taladros a percusión, perforadoras, pulidoras, esmeriladoras, sierras mecánicas y desbrozadoras (Cavas Martínez et al., 2007). No obstante, más adelante se describirán las enfermedades profesionales causadas por las vibraciones.

2.1.3 Resumen

La vibración, en su forma más sencilla, se puede considerar como la oscilación o el movimiento repetitivo de un objeto alrededor de una posición de equilibrio. En cuanto a la vibración mecánica, según la Organización Internacional del Trabajo (OIT) las vibraciones mecánicas son movimientos transmitidos al cuerpo por parte de estructuras capaces de producir efectos perjudiciales o molestias sobre el trabajador. Este movimiento genera una energía que el cuerpo absorbe. Dependiendo de su intensidad y zona de incidencia, las vibraciones pueden causar lesiones y trastornos.

Entre los conceptos esenciales de esta vibración mecánica transmitida al cuerpo humano por el uso de máquinas vibrantes se destacan la frecuencia, la frecuencia natural, el efecto de la resonancia, el tiempo de exposición o duración, la impedancia y la dirección de los ejes de vibración.

La frecuencia natural es el movimiento de vibración a que tiende un cuerpo al recuperar su posición inicial de reposo cuando se le desplaza de su posición de equilibrio y se le deja libre. Cuando en un sistema coincide la frecuencia motivada por una fuerza externa y la frecuencia natural, se dice que el sistema está en resonancia.

Como cualquier estructura física, el cuerpo humano al ser un sistema complejo formado por varias masas comunicadas con ayuda de elementos elásticos asumirá diferentes rangos de frecuencia resonante según la parte del cuerpo afectada por la vibración.

La impedancia mecánica es una propiedad en la que el cuerpo realiza una oposición a la energía proporcionada por la herramienta, es decir, es la fuerza que se requiere para que el cuerpo se mueva a cada frecuencia y depende de muchos factores.

Las enfermedades profesionales derivadas de la exposición a vibraciones se separan en enfermedades originadas por las vibraciones de mano-brazo y vibraciones de cuerpo entero. Adicionalmente, los ejes ortogonales, X , Y , Z unidos al cuerpo y orientados en el sentido de las vibraciones emitidas permitirán la medición de vibraciones mecánicas.

Por último, el factor tiempo de exposición es un elemento fundamental que perjudica la salud del trabajador, dado que la respuesta del ser humano a esa oscilación depende de la duración total a la que esté sometido.

2.2. Actividades Económicas expuestas a riesgos físicos

Se denomina actividad económica, según la Clasificación Nacional de Ocupaciones (2013) a la forma mediante la cual se produce, intermedia y/o se vende un bien o servicio destinado a satisfacer una necesidad o un deseo (INE, 2013).

Para analizar cuáles son las actividades económicas expuestas a riesgos físicos se debe hacer referencia, primeramente, al Centro Nacional de Actividades Económicas, CNAE (2009) que clasifica todas las actividades económicas mediante códigos, con el objetivo de unificar la información agrupándolas en unidades homogéneas, según unos criterios específicos, para facilitar los análisis estadísticos y la interpretación de los datos (INE, 2009). Las actividades económicas se reúnen en diferentes grupos y existen diversos grupos principales. Se pueden encontrar desde el Grupo A hasta el Grupo U y cada grupo se desglosa en distintos niveles.

Esta tesis está asociada a actividades económicas relacionadas con el uso de herramientas motoras que producen vibraciones mecánicas y que son transmitidas al ser humano. Según la frecuencia de vibración, citada en el capítulo anterior, existen ciertas herramientas que podrían ser dañinas para la salud.

Las herramientas que producen vibraciones mecánicas en la gama de frecuencias más altas son las que pertenecen al grupo de los martillos neumáticos.

Tabla 2: Frecuencia de la vibración

Frecuencia de la vibración	Maquinaria y vehículos
Muy baja frecuencia ($< 1Hz$)	Movimiento oscilatorio lento o balanceo en: <ul style="list-style-type: none"> • Trenes • Barcos • Plataformas flotantes • Aviones, etc.
Baja frecuencia ($1 - 20 Hz$)	Vibraciones producidas por: <ul style="list-style-type: none"> • Carretillas elevadoras. • Excavadoras. • Maquinaria y vehículos de obras públicas. • Vehículos industriales. • Vehículos de transporte urbano. • Tractores. • Cosechadoras.

	<ul style="list-style-type: none"> • Otras maquinarias agrícolas.
Alta frecuencia (20 – 1000 Hz)	Máquinas neumáticas y rotatorias <ul style="list-style-type: none"> • Martillos picadores neumáticos. • Moledoras. • Pulidoras. • Lijadoras. • Motosierras. • Cortadoras.

Nota: Adaptado de "Gómez Etxebarria G. (2008, p. 1039-1040).

Estas herramientas, al ser capaces de transmitir vibraciones mecánicas al sistema mano-brazo, VMB, pueden llegar a producir dolencias al ser humano, tal como se define en el Real Decreto 1311/2005 de 4 de noviembre sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores frente a los riesgos derivados o que puedan derivarse de la exposición a vibraciones mecánicas (Pascual Lizana, 2005).

Las actividades económicas que suelen emplear máquinas que producen vibraciones con la máxima frecuencia, en la gran mayoría de sus operaciones, son las que pertenecen al grupo F denominado Construcción y al grupo B integrado por Industrias Extractivas. El grupo F se halla desglosado en varios apartados donde se pueden observar con el número 41, Construcción de edificios, el 42 Ingeniería Civil y el 43 Actividades de construcción especializada (Instituto Nacional de Estadística, 2017).

Asimismo, como se ha citado anteriormente, en el grupo B formado por Industrias extractivas, se puede localizar de forma segregada con el número 05, Extracción de antracita, hulla y lignito, 06 Extracción de crudo de petróleo y gas natural, 07 Extracción de minerales metálicos, 08 Otras industrias extractivas y 09 Actividades de apoyo a las industrias extractivas (Instituto Nacional de Estadística, 2017).

Cabe destacar que las herramientas a motor manuales, empleadas en las actividades económicas de los grupos B y F, generan vibraciones mecánicas como es el caso de los martillos, tanto eléctricos como neumáticos. En ciertas ocasiones se empleará más de una herramienta dependiendo de las condiciones y del uso, como por ejemplo del material a mecanizar y la disposición de la localización.

Aunque es cierto que en la actualidad este tipo de máquinas se van empleando cada vez menos no se debe olvidar que aún desempeñan un papel trascendental para estas

actividades económicas mencionadas y que el atender las dolencias causadas por las vibraciones mecánicas constituye un valor positivo para el bienestar de los trabajadores.

Recientes investigaciones no dejan de contemplar mejoras y sistemas de minimización de las vibraciones mecánicas producidas por este tipo de herramientas. Todo ello hace muy interesante analizar este campo, debido a que hoy en día se encuentran pocos métodos de mitigación.

Como cualquier instrumento que se emplee, siempre se debe tener en consideración los posibles efectos que puedan producir al cuerpo humano. En este caso las vibraciones producidas por las frecuencias demuestran un significativo malestar al ser humano.

Las dolencias causadas por este fenómeno se recogen, en la tabla siguiente, por el Real Decreto 1299/2006 del 10 de noviembre por el que se aprueba el cuadro de enfermedades profesionales en el sistema de la Seguridad Social y se establecen criterios para su notificación y registro. Concretamente, en el Anexo 1 denominado como cuadro de enfermedades profesionales se encuentra en el Grupo 2: Enfermedades profesionales causadas por agentes físicos, que recoge las enfermedades tanto vasculares como osteoarticulares provocados por las vibraciones mecánicas (Cavas Martínez et al., 2007).

Tabla 3: Cuadro de enfermedades profesionales

Grupo	Agente	Subagente	Actividad	Código	Enfermedades profesionales con la relación de las principales actividades capaces de producirlas
2					Enfermedades profesionales causadas por agentes físicos
	B				Enfermedades osteoarticulares o angioneuróticas provocadas por las vibraciones mecánicas:
		01			Afectación vascular
			01	2B0101	Trabajos en los que se produzca: Vibraciones transmitidas a la mano y al brazo por gran número de máquinas o por objetos mantenidos sobre una superficie vibrante (gama de frecuencia de 25 a 250 Hz), como son aquellos en los que se manejan maquinarias que transmitan

					vibraciones, como martillos neumáticos, punzones, taladros, taladros a percusión, perforadoras, pulidoras, esmeriladoras, sierras mecánicas, desbrozadoras.
			02	2B0102	Utilización de remachadoras y pistolas de sellado.
			03	2B0103	Trabajos que exponen al apoyo del talón de la mano de forma reiterativa, percutiendo sobre un plano fijo y rígido, así como los choques transmitidos a la eminencia hipotenar por una herramienta percutante.
		02			Afectación osteoarticular
			01	2B0201	Trabajos en los que se produzcan: vibraciones transmitidas a la mano y al brazo por gran número de máquinas o por objetos mantenidos sobre una superficie vibrante (gama de frecuencia de 25 a 250 Hz), como son aquellos en los que se manejan maquinarias que transmitan vibraciones, como martillos neumáticos, punzones, taladros, taladros a percusión, perforadoras, pulidoras, esmeriladoras, sierras mecánicas, desbrozadoras.
			03	2B0203	Utilización de remachadoras y pistolas de sellado.

Nota: Adaptado de Cavas Martínez F., Fernández Collados M.B, Ferrando García F., García Romero B., González Díaz F., Francisco, López Anierte M. C., Rodríguez Iniesta G., Sánchez Trigueros C. y Selma Penalva A. (2007, p. 422).

En el Anexo 2 de este Real Decreto se encuentra una lista complementaria de enfermedades cuyo origen profesional se sospecha y cuya inclusión en el cuadro de enfermedades profesionales podría contemplarse en el futuro. Dentro de Grupo 2: Enfermedades provocadas por agentes físicos se encuentra esta posible ampliación de tabla (Cavas Martínez et al., 2007).

Tabla 4: Lista complementaria de enfermedades cuyo origen profesional se sospecha y cuya inclusión en el cuadro de enfermedades profesionales podría contemplarse en el futuro.

Lista	Grupo	Agente	Código	Descripción
C				
	2			Enfermedades provocadas por agentes físicos:
		01	C201	Enfermedades provocadas por vibraciones verticales repetitivas: Discopatías de la columna dorsolumbar causadas por vibraciones verticales repetidas de todo el cuerpo.
		02	C202	Enfermedades provocadas por el frío.

Nota: Adaptado de Cavas Martínez F., Fernández Collados M.B, Ferrando García F., García Romero B., González Díaz F., Francisco, López Aniorte M. C., Rodríguez Iniesta G., Sánchez Trigueros C. y Selma Penalva A. (2007, p. 484).

Como se puede observar, el Real Decreto destaca el empleo de las herramientas que producen vibraciones mecánicas, los martillos neumáticos como herramientas dañinas, ya que su utilización produce a lo largo del tiempo enfermedades profesionales tanto vasculares como osteoarticulares. Además, si se aíslan los datos que nos muestra este Real Decreto, se puede observar que, la gama de frecuencias se encuentra localizada entre 25 y 250 Hz y en este intervalo de frecuencias se encuentran las herramientas neumáticas.

También, el Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo, INSST, (2012) en “Directrices para la decisión clínica en enfermedades profesionales relacionadas con los trastornos musculoesqueléticos” (Marqués Marqués et al., 2012), se declaran dolencias osteoarticulares causadas por la transmisión de vibraciones mecánicas a la mano y al brazo por máquinas o herramientas sujetadas manualmente, siendo también la escala de frecuencia responsable de 25 a 250 Hz. Por lo que coinciden las gamas de frecuencias específicas anteriormente mencionadas en el Real Decreto en el Grupo 2 Agentes físicos, Agente B Enfermedades osteoarticulares o angioneuróticas provocadas por las vibraciones mecánicas, tanto el subagente 01 Afectación vascular como el subagente 02 Afectación osteoarticular.

Las enfermedades profesionales en la actualidad también generan dificultades y molestias tanto en el trabajo como en su día a día, a diversos empleados.

Cuando se habla de riesgos físicos se definen como la posibilidad que tienen los trabajadores de sufrir daños en la salud provocados por agentes físicos como el ruido o las

vibraciones que se encuentran presentes en actividades laborales como es la construcción (Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo, 2023).

El entorno físico es uno de los elementos que influyen en la productividad y la ejecución del trabajo debido a las posturas forzadas, las vibraciones, el ruido y la temperatura.

También, intervienen otros aspectos como el entorno social ya que el trabajador puede o no, disponer de un apoyo social. La empresa en la cual trabaja, si presenta una buena calidad de gestión, favorecerá un buen desarrollo del trabajo.

Otro aspecto que determina la actividad del trabajador es la intensidad del trabajo y sus habilidades.

Tabla 5: Riesgos físicos

Entorno físico	Entorno social
Relacionado con la postura (ergonómico)	Comportamiento social negativo
Ambiente (vibración, ruido, temperatura)	Apoyo social
Biológico y químico	Calidad de gestión
Intensidad de trabajo	Habilidades y criterio
Exigencias cuantitativas	Dimensión cognitiva
Determinantes del ritmo e interdependencia	Toma de decisión
Exigencias emocionales	Organización y participación
	Formación
Calidad del tiempo de trabajo	Perspectivas de futuro
Duración	Situación laboral
Horario de trabajo atípico	Perspectivas de carrera
Acuerdos laborales de tiempo de trabajo	Seguridad laboral
Flexibilidad	Reducción tiempo laboral

Nota: Adaptado de Parent-Thirion A., Biletta I., Cabrita J., Vargas O., Vermeylen G., Wilczynska A. y Wilkens M. (2017, p. 37).

Los riesgos físicos han sido durante muchos años, y lo siguen siendo hoy en día, objeto de acciones preventivas en las industrias. Aunque es cierto que la economía se va reorientando

hacia el servicio, los riesgos físicos no están disminuyendo significativamente (Parent-Thirion et al., 2017).

Ciertos trabajos duros, tales como los derivados de la construcción, representan niveles de riesgo por el nivel de exposición a los peligros físicos y psicosociales. Estos trabajos provocan que los empleados estén expuestos durante un período de tiempo a factores de riesgo, lo cual implica que puedan presentar efectos irreversibles en la salud del trabajador (Darina Peycheva et al., 2014).

Cabe destacar que ciertas ocupaciones tienden a ser propensas a que los trabajadores estén expuestos y sean vulnerables en la salud física y mental, que se deriva en realizar acciones o situaciones malas como los que se presenta en la tabla siguiente (Darina Peycheva et al., 2014, p. 7).

Tabla 6: Índice de entorno físico: proporción de trabajadores en la UE28 (%) y puntuaciones medias del índice (0-100), 2005-2015

	2005	2010	2015
<i>Proporción de trabajadores en EU28 expuestos una cuarta parte del tiempo o más (%)</i>			
Vibraciones de herramientas manuales, maquinaria	24	23	20
Ruido tan fuerte que tendrías que levantar la voz para hablar con la gente.	30	29	28
Altas temperaturas que hacen transpirar incluso cuando no se está trabajando	25	22	23
Bajas temperaturas tanto en interior como en exterior	22	23	21
Respirar humo, vapores (como gases de soldadura o de escape), polvo (como polvo de madera o polvo mineral)	19	17	15
Respirar vapores, como solventes y diluyentes	11	10	11
Manipular o estar en contacto con la piel de productos o sustancias químicas	14	15	17
Humo de tabaco de otras personas.	20	11	9
Manipular o estar en contacto directo con materiales que puedan ser infecciosos, tales como desechos, fluidos corporales, materiales de laboratorio, etc.	9	11	13
Posturas cansadas o dolorosas	46	46	43

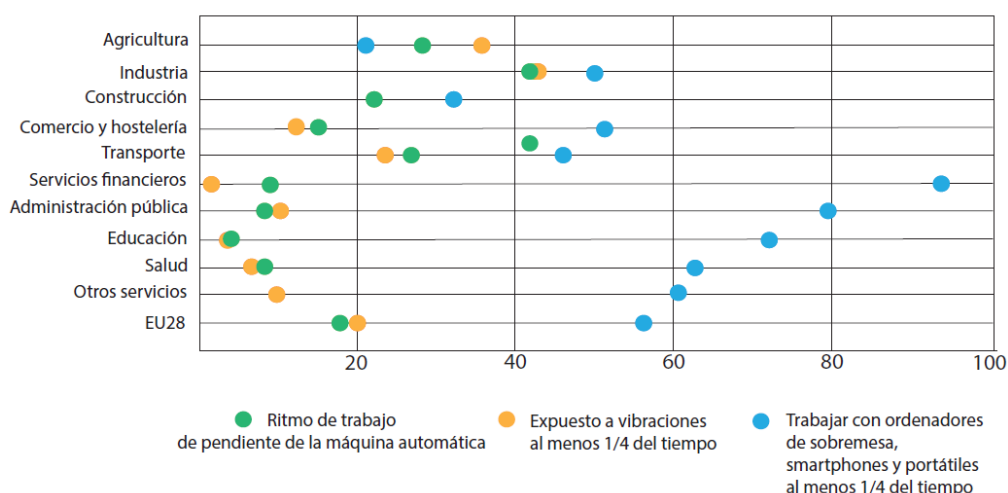
Levantar o mover personas	8	9	10
Llevar o mover cargas pesadas	35	34	32
Movimientos repetitivos de manos o brazos.	62	63	61
<i>Puntuaciones medias del índice (0-100)</i>			
Índice del entorno físico	82	83	84

Nota: Adaptado de Parent-Thirion A., Biletta I., Cabrita J., Vargas O., Vermeulen G., Wilczynska A. y Wilkens M. (2017, p. 43).

Los riesgos ergonómicos en Europa también representan materia de estudio y es habitual que ocurra en el lugar del trabajo. Estos riesgos se relacionan con la exposición a las vibraciones, y con las posturas forzadas, produciendo trastornos musculoesqueléticos. Asimismo, se relaciona con los riesgos ambientales la exposición a vibraciones, al ruido y a las temperaturas. Es común encontrarse este tipo de riesgos, en la industria, en la construcción y la agricultura, entre otros (Parent-Thirion et al., 2017).

Los sectores que más emplean herramientas manuales o maquinaria son los de la construcción, industria y agricultura. En la figura siguiente se presenta la relación entre los sectores económicos a nivel europeo y la exposición al riesgo físico, la vibración (Parent-Thirion et al., 2017).

Figura 3: Relación entre sectores económicos a nivel europeo y la exposición a riesgos en porcentaje (%)



Nota: Adaptado de Parent-Thirion A., Biletta I., Cabrita J., Vargas O., Vermeulen G., Wilczynska A. y Wilkens M. (2017, p. 85).

Para poder localizar las actividades económicas que han sido afectadas por enfermedades profesionales y conocer esta situación se debe definir qué se entiende por enfermedad profesional.

Del mismo modo que el término de accidente de trabajo se encuentra definido en el artículo 156 del Real Decreto Legislativo 8/2015, de 30 de octubre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley General de la Seguridad social, en su artículo 157 queda dispuesto el significado de enfermedad profesional de este modo:

Se entenderá por enfermedad profesional la contraída a consecuencia del trabajo ejecutado por cuenta ajena en las actividades que se especifiquen en el cuadro que se apruebe por las disposiciones de aplicación y desarrollo de esta ley, y que esté provocada por la acción de los elementos o sustancias que en dicho cuadro se indiquen para cada enfermedad profesional.

En tales disposiciones se establecerá el procedimiento que haya de observarse para la inclusión en dicho cuadro de nuevas enfermedades profesionales que se estime deban ser incorporadas al mismo. Dicho procedimiento comprenderá, en todo caso, como trámite preceptivo, el informe del Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad (Ministerio de Trabajo y Seguridad Social, 2015, p. 80).

Tras la definición se deben conocer los agentes físicos que las producen, y para ello se debe hacer referencia al Centro de enfermedades profesionales de la seguridad social, CEPROSS, servicio del Ministerio de Inclusión, Seguridad Social y Migraciones donde a través de su web se podrán analizar las enfermedades profesionales según su actividad, las que más afectan a la población afiliada y las actividades económicas más perjudiciales.

El informe anual 2022 de enfermedades profesionales (CEPROSS) y de patologías no traumáticas causadas o agravadas por el trabajo (PANOTRASS) muestra una radiografía de todas las enfermedades profesionales identificadas en el listado de enfermedades profesionales y las no incluidas para el año 2022 respecto al anterior.

Tabla 7: Enfermedades causadas por el trabajo 2022

	2022	%Δ(2021)
Enfermedades Profesionales CEPROSS	22.408	9,95
Patologías no traumáticas causadas por el trabajo (PANOTRATTS)	4.370	-4,23
TOTAL Enfermedades causadas por el trabajo	26.778	-7,35

Nota: Adaptado de Secretaria de estado de la seguridad social-Dirección general de ordenación de la seguridad social (2023, p. 6).

En el año 2022 se notificaron 22.408 partes de enfermedades profesionales asociadas al desarrollo de una actividad económica. Respecto al año 2021 se ha producido un aumento en un 9,95 % en el número de expedientes de enfermedad profesional informados mediante la aplicación CEPROSS (Secretaria de estado de la seguridad social-Dirección general de ordenación de la seguridad social, 2023).

Los partes de enfermedades profesionales notificados en 2022 representan un índice medio de incidencia de 85,75 casos por 100.000 trabajadores. Entre el periodo 2009-2022 se observa cambios anuales en los índices registrados según las distintas variables que se estudian. No obstante, no proporcionan tendencias decisivas a señalar. A continuación, se presenta una tabla con la evolución de los índices de incidencia entre el periodo 2009-2021 (Secretaria de estado de la seguridad social-Dirección general de ordenación de la seguridad social, 2023).

Tabla 8: Índices de incidencia entre el periodo 2009-2021

AÑO	Índice
2009	119,92
2010	116,21
2011	121,82
2012	103,29
2013	112,10
2014	111,20
2015	120,47
2016	124,24
2017	119,63
2018	127,19
2019	119,79

CAPÍTULO 2: REPERCUSIÓN DE LAS VIBRACIONES MECÁNICAS EN ENFERMEDADES
CONSIDERADAS PROFESIONALES

2020	81,90
2021	88,79
2022	85,75

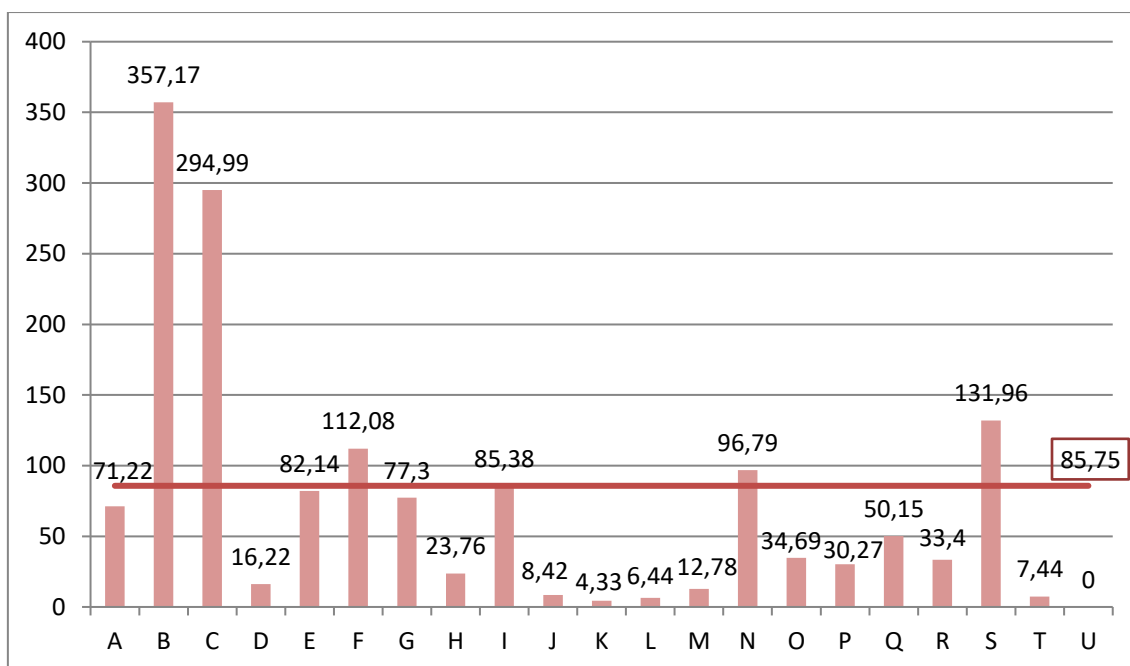
Nota: Adaptado de Secretaria de estado de la seguridad social-Dirección general de ordenación de la seguridad social (2023, p. 33).

La considerable reducción de los índices de incidencia en 2020, 2021 y 2022 tienen su origen en la pandemia del Covid-19 y, por tanto, tales reducciones son coyunturales, por lo que es esperable que en el futuro esos índices empeoren.

Los índices de incidencia permiten expresar en términos relativos la trascendencia de las enfermedades profesionales y discriminar la incidencia respecto de determinadas variables como la actividad económica (CNAE-2009) y el grupo de enfermedad profesional causada por los diferentes agentes (químicos, físicos, biológicos, inhalación, enfermedades de la piel, cancerígenos) (Secretaria de estado de la seguridad social-Dirección general de ordenación de la seguridad social, 2023).

Los trabajadores de la "Industria extractiva" son los que más padecieron enfermedades profesionales, con un índice de 357,17 casos por cada 100.000 trabajadores, después "Industrias manufactureras" con un índice de 294,99. Seguidamente, se sitúan "otros servicios" con 131,96, la "Construcción" con 112,08 y las "Actividades administrativas y servicios auxiliares" con 96,79. El resto de las actividades económicas no alcanzan la media nacional (Secretaria de estado de la seguridad social-Dirección general de ordenación de la seguridad social, 2023).

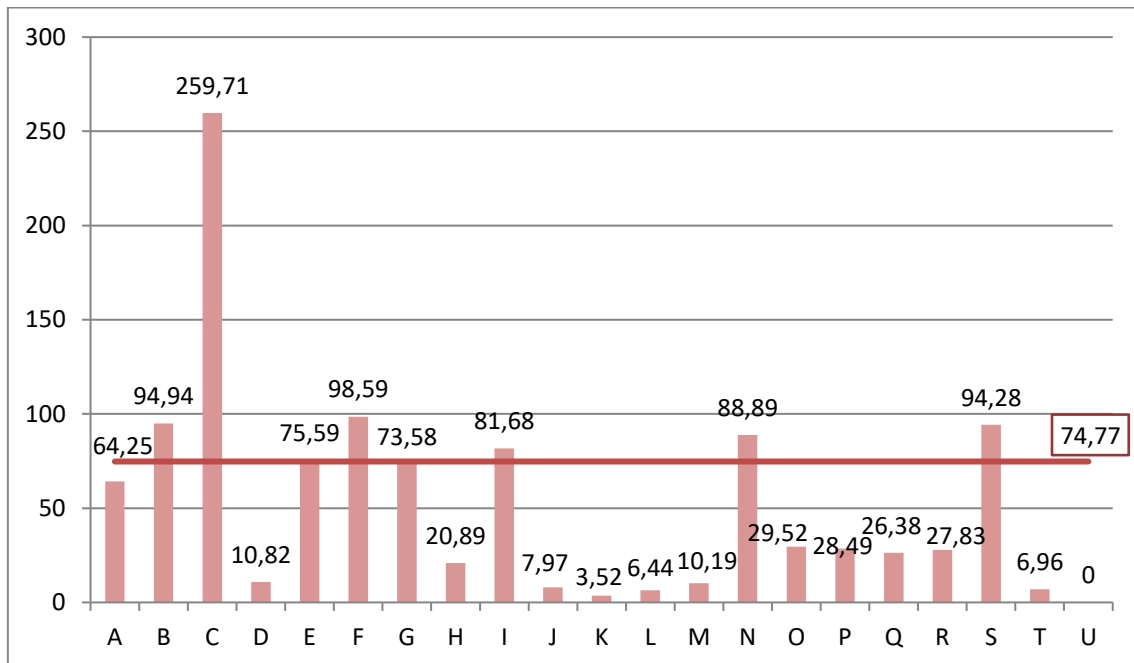
Gráfica 1: Índice de incidencia de enfermedades profesionales según actividades económica (2022)



Nota: Adaptado de Secretaria de estado de la seguridad social-Dirección general de ordenación de la seguridad social (2023, p. 34).

Del mismo modo que en años previos las enfermedades profesionales “causadas por agentes físicos” que representan el 87,2 % del total de partes de enfermedad han registrado en 2022 un índice de incidencia de 74,77 por cada 100.000 trabajadores que tienen cubierta esta contingencia. Muy por debajo de éstas se encuentran las enfermedades de la piel (3,59) (Secretaria de estado de la seguridad social-Dirección general de ordenación de la seguridad social, 2023).

Gráfica 2: Grupo 2 causadas por agentes físicos (2022)



Nota: Adaptado de Secretaria de estado de la seguridad social-Dirección general de ordenación de la seguridad social (2023, p. 95).

Como se puede observar, las industrias extractivas, B, y el sector de la construcción, F, forman parte de las actividades económicas que más enfermedades profesionales causan por agentes físicos con valores, por encima de la media, de 94,34 y 98,59, respectivamente (Secretaria de estado de la seguridad social-Dirección general de ordenación de la seguridad social, 2023).

Por último, cabe citar que, en 2022 se han detectado 4.370 patologías no traumáticas, 3.995 son enfermedades causadas por el trabajo y 375 son enfermedades agravadas por el trabajo (Secretaria de estado de la seguridad social-Dirección general de ordenación de la seguridad social, 2023).

Como conclusión, las actividades económicas que más enfermedades profesionales han ido produciendo durante estos últimos años son la agricultura, la ganadería, la caza y los servicios relacionados con las mismas, transporte terrestre y por tubería, actividades de construcción especializada, construcción de edificios, industrias extractivas, industria de la alimentación y fabricación de productos metálicos. Sin embargo, la construcción, así como las industrias extractivas están muy relacionadas con las enfermedades profesionales del grupo 2 causadas por agentes físicos como son las vibraciones mecánicas.

Tras el análisis realizado a través del CEPROSS hay otras entidades y organismos que emplean estos datos para investigar sobre ello y dar respuesta a estas bajas laborales causadas por las enfermedades profesionales, en especial sobre las producidas con el uso de herramientas mecánicas manuales.

Entre estas entidades se destacan los organismos relacionados con la prevención de riesgos laborales como el Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo de España y también en colaboración con otras instituciones.

Uno de los proyectos que ha estudiado la relación laboral con el empleo de máquinas vibratorias produciendo enfermedades profesionales, es el de los autores Santurio Díaz J. M^a, Rodríguez Carballido J. y Argüelles Bayón E. (2006). En mayo de 2006 a través del proyecto promovido por el Instituto Asturiano de Prevención de Riesgos Laborales y la Universidad de Oviedo, realizaron como dice el título, un estudio sobre la exposición a vibraciones de mano-brazo en distintos sectores laborales. Analizaron 175 herramientas manuales empleadas en estos sectores: jardinería, construcción, metal mecánico, carpintería, limpieza, automóvil y forestal. Realizaron mediciones de vibraciones para cada una de las 175 herramientas y los valores medios de vibración mano-brazo por cada sector. Tras los análisis, el sector con mayor riesgo que observaron fue el de la construcción debido al empleo de martillos neumáticos y eléctricos. Además, durante el desarrollo del proyecto detectaron que muchas de las máquinas estudiadas superaban los límites de exposición, en concreto el 62,1 %.

Documentos más recientes proporcionados por el Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo, concretamente por el Centro Nacional de Verificación de Maquinaria con el título “Estudio del nivel de exposición a vibraciones mecánicas en diferentes puestos de trabajo”, realizado con la colaboración de órganos técnicos de comunidades autónomas, muestran un estudio del año 2011 cuyo objeto es:

Realizar la evaluación higiénica de la exposición a las vibraciones de los diferentes puestos de trabajo susceptibles de encontrarse afectados dentro de los siguientes sectores productivos: Construcción Naval, Siderurgia, Obras Públicas, Limpieza urbana, Transporte terrestre (tren), Transporte terrestre (autobús), Agricultura y Silvicultura” (Centro Nacional de Verificación de la Maquinaria & Órganos Técnicos de Comunidades Autónomas, 2011, p. 3).

CAPÍTULO 2: REPERCUSIÓN DE LAS VIBRACIONES MECÁNICAS EN ENFERMEDADES
CONSIDERADAS PROFESIONALES

Evaluaron diferentes herramientas y maquinaria realizando la medición de cuerpo entero y de mano-brazo, todo dependiendo de la herramienta o máquina que hubiera empleado el trabajador.

En el sector de obra pública referente a la medición del sistema mano-brazo se ha podido detectar diferentes máquinas que superan el valor límite. Entre ellas destacan el martillo, el martillo eléctrico y martillo percutor (Centro Nacional de Verificación de la Maquinaria & Órganos Técnicos de Comunidades Autónomas, 2011).

Tabla 9: Evaluación de vibraciones mecánicas de máquinas manuales

Empresa	Puesto	$a_{v,eq8h} (m/s^2)$	Tiempo exp, (min)	$A(8)(m/s^2)$	N° operarios	Valoración
A	Rodillo	8,11	240	5,73	1	Supera el valor límite
	Radial	8,87	360	7,68	1	Supera el valor límite
	Radial	14,75	360	12,77	1	Supera el valor límite
	Rana	12,41	180	7,60	1	Supera el valor límite
	Martillo	68,57	180	41,99	1	Supera el valor límite
B	Martillo eléctrico	7,64	120	3,82	34	Da lugar a una acción
	Martillo percutor	12,10	120	6,05	34	Supera el valor límite
	Radial	1,52	30	0,38	34	Aceptable
	Vibrador	21,42	480	21,42	34	Supera el valor límite

Nota: Adaptado de Centro Nacional de Verificación de la Maquinaria, CNVM y Órganos Técnicos de Comunidades Autónomas, OTCA, (2011, p. 15).

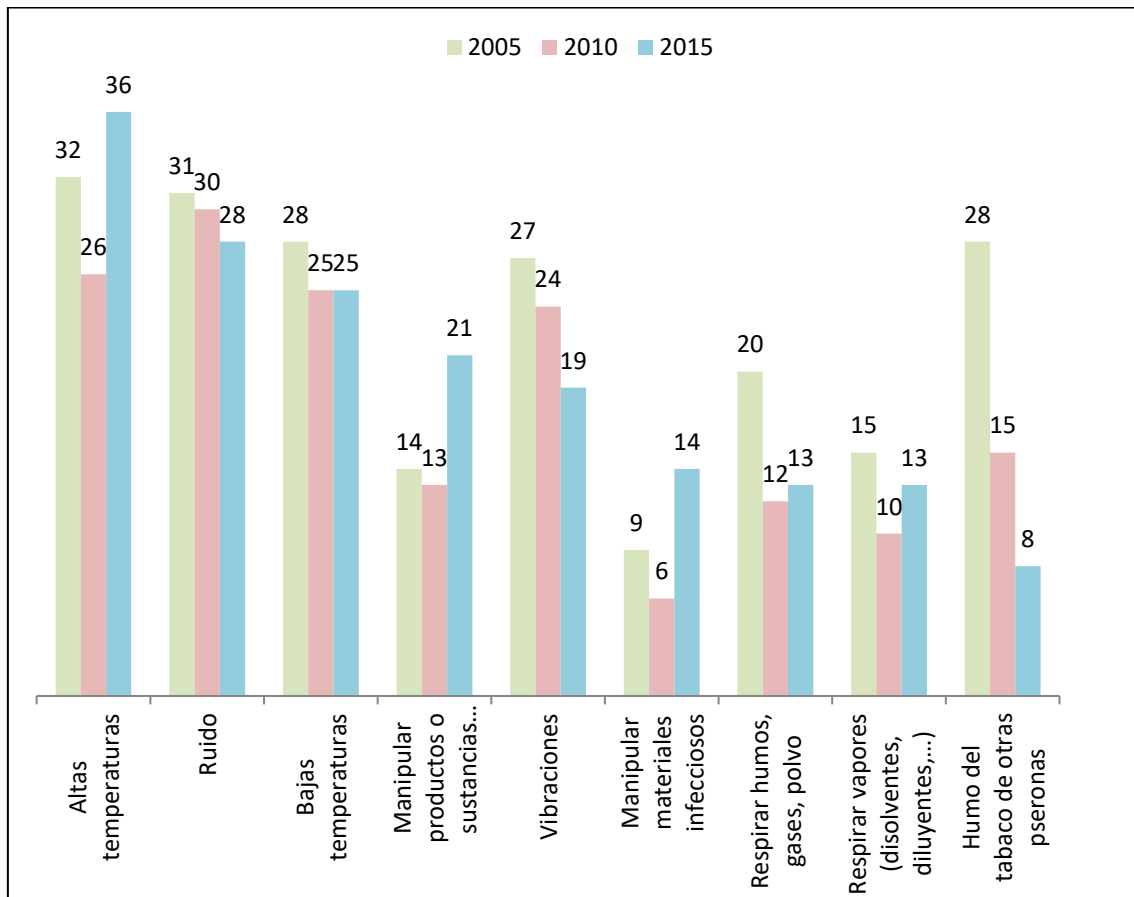
Como resumen, se puede decir que, desde hace años se viene estudiando, por los organismos competentes, las bajas laborales producidas en las distintas actividades

económicas relacionadas, directamente, con el uso de herramientas vibrantes, repercutiendo en la salud de los trabajadores.

Aparte de analizar este tipo de documentos, también se deben tener en cuenta las encuestas de trabajo, ya que son una herramienta imprescindible que emplea el Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo para tener un conocimiento actualizado sobre las condiciones de los trabajadores en España. En este momento, las últimas series históricas publicadas por este organismo científico técnico especializado de la Administración General del Estado, es la encuesta denominada “Encuesta Nacional de Condiciones de Trabajo 6ª EWCS-España” (2015).

En relación con las vibraciones mecánicas, entre los riesgos más señalados por los trabajadores, a los que estarían expuestos como mínimo una cuarta parte de su tiempo de trabajo, son las vibraciones. Si bien es cierto, como recogen en la gráfica siguiente, la exposición a vibraciones ha disminuido desde el 2010 en 4,5 % (Pinilla García et al., 2015, p. 34).

Gráfica 3: Exposición a riesgos. Evolución 2005-2015 (%)



Nota: Adaptado de Pinilla García J., Almodóvar Molina A., Galiana Blanco M^a L., Hervás Rivero P. y Zimmermann Verdejo M. (2015, p. 33).

Por el contrario, si se analiza por actividad económica, de acuerdo a la tabla siguiente, se observa que las actividades que presentan mayores frecuencias de exposición que el promedio total son la Construcción, la Industria, la Agricultura y la Salud (Pinilla García et al., 2015).

Tabla 10: Actividades económicas con mayor exposición a riesgos físicos, químicos y biológicos

	Agricultura	Industria	Construcción	Salud	Total
Vibraciones	43 (%)	41 (%)	65 (%)	8 (%)	19 (%)
Ruido	31 (%)	45 (%)	63 (%)	13 (%)	28 (%)
Altas temperaturas	74 (%)	45 (%)	71 (%)	24 (%)	36 (%)
Bajas temperaturas	68 (%)	27 (%)	55 (%)	12 (%)	25 (%)
Respirar humos o gases, polvo, etc.	13 (%)	30 (%)	48 (%)	4 (%)	13 (%)
Respirar vapores, como disolventes o diluyentes	11 (%)	24 (%)	36 (%)	12 (%)	13 (%)
Manipular productos o sustancias químicas	38 (%)	29 (%)	42 (%)	35 (%)	21 (%)
Humo del tabaco de otras personas	10 (%)	8 (%)	30 (%)	3 (%)	8 (%)
Manipular materiales infecciosos	16 (%)	17 (%)	15 (%)	59 (%)	14 (%)
<i>Base: total de trabajadores (N=3.364)</i>					
<i>Nota: las celdas sombreadas indican diferencias estadísticamente significativas con el promedio total.</i>					
<i>Categoría de respuesta: ¼ parte del tiempo o más.</i>					

Nota: Adaptado de Pinilla García J., Almodóvar Molina A., Galiana Blanco M^a L., Hervás Rivero P. y Zimmermann Verdejo M. (2015, p. 34).

Como conclusión, las actividades económicas que más afectan a la población trabajadora son entre otras la construcción, la industria, la agricultura e industrias extractivas, a pesar de haber una tendencia de desarrollo en el sector servicio.

Por eso, más adelante, se analizarán estos sectores de desarrollo con el propósito de conocer las herramientas y máquinas más empleadas en ellos.

2.2.1 Actividades Económicas expuestas a vibraciones mecánicas

Las actividades económicas expuestas a vibraciones mecánicas están relacionadas con exposiciones de origen profesional producidas por procesos o máquinas que emplean motor y que penetran en el ser humano a través del agarre de la herramienta por las empuñaduras, es decir, de la palma de las manos y de los dedos (Bovenzi, 2001).

Estas herramientas a motor empleadas en diferentes actividades industriales, así como las herramientas de percusión para trabajos de metales, amoladoras y llaves de impacto, se suelen emplear en fabricación. Para explotación de canteras, minería y construcción, las máquinas son más potentes ya que trabajan materiales más duros y por eso emplean martillos perforadores de roca, martillos rompedores de piedra, martillos picadores y compactadores vibrantes (Bovenzi, 2001).

Por otro lado, otra de las actividades económicas que también emplean herramientas vibratorias es en agricultura y trabajos forestales, pues suelen emplear sierras de cadena y sierra de recortar. Por último, para trabajos en asfalto y hormigón, se emplea martillos rompedores, martillos perforadores y amoladoras de mano (Bovenzi, 2001).

Además de estas actividades económicas expuestas a vibraciones, cabe señalar que también podemos encontrar otros trabajos expuestos a este riesgo, como son los de jardinería con el uso de cortacésped o trabajos con amoladoras de columna (Bovenzi, 2001).

Esta exposición no es única en España, en muchos países también surge esta problemática. Se estima que del 1,7 al 3,6 % de los trabajadores de los países europeos y de Estados Unidos están expuestos a vibraciones transmitidas a las manos (AISSA Sección Internacional de Investigación 1989) (Bovenzi, 2001).

Si además de realizar trabajos con máquinas que generan vibración, se acompaña con un grado de esfuerzo físico debido a las posturas de trabajo unido a circunstancias personales e individuales de cada trabajador, se puede establecer el tipo de patología que se puede llegar a mostrar con mayor facilidad en el trabajo, pues, de acuerdo a la tabla siguiente, el trabajador que emplee herramientas vibrantes podrá padecer alguna patología traumática como el síndrome túnel carpiano (Activa Mutua, 2008).

Tabla 11: Factores de riesgo y patologías derivadas

FACTORES DE RIESGO	FACTORES DE RIESGO
Tareas repetitivas	Posturas incorrectas
Esfuerzos prolongados o repetidos	Esfuerzos prolongados o repetidos
Posturas extremas y/o prolongadas de segmentos corporales	Posturas extremas y/o prolongadas
Trabajos con herramientas que vibran	Manipulación de cargas
Variables ambientales	Variables ambientales
Características individuales	Características individuales y hábitos (vida sedentaria, exceso de peso etc).
PATOLOGÍAS DERIVADAS	PATOLOGÍAS DERIVADAS
Traumatismos (tendinitis, tenosinovitis, síndrome túnel carpiano)	Lumbalgias, hernias

Nota: Adaptado de Activa Mutua (2008, p. 2).

2.2.1.1 Sector de la construcción y la minería

Este proyecto se centrará en las actividades económicas como la construcción e industrias extractivas ya que es, en estas industrias, donde se emplea más maquinaria y las herramientas producen más vibraciones mecánicas.

Construcción

Cuando se habla de construcción, este sector comprende tanto las actividades generales y especializadas de construcción de edificios como las de obras de ingeniería civil. También, se corresponde con las obras nuevas, la reparación, las ampliaciones y las reformas (Instituto Nacional de Estadística, 2017).

La construcción de ingeniería civil engloba a obras como las realizadas en las autopistas, carreteras, calles, puentes, túneles, líneas férreas, aeropuertos, puertos, sistemas de riego y alcantarillado e instalaciones industriales. Estas actividades pueden llevarse a cabo por cuenta propia o por cuenta de terceros (Instituto Nacional de Estadística, 2017).

Los trabajadores que realizan estas actividades están expuestos a riesgos de una forma pasiva o activa, es decir, el trabajador puede sufrir directamente el riesgo debido a la acción de su propio trabajo. Pero también de forma indirecta como trabajador observador pasivo, a los riesgos generados por quienes trabajan en una zona próxima (Weeks, 2001).

La gravedad de ese riesgo al que esté expuesto el trabajador, vendrá determinada por la concentración y duración de la exposición (Weeks, 2001).

En los proyectos de construcción se encuentran definidos diferentes tipos de riesgos físicos como el ruido, el calor, el frío, las radiaciones, las vibraciones y la presión barométrica. En muchas de las ocasiones, los trabajadores trabajan en condiciones atmosféricas duras como calores o fríos extremos, con tiempo ventoso, lluvioso, con nieve, niebla, radiaciones ionizantes y no ionizantes (Weeks, 2001).

Muchas de las herramientas como los martillos neumáticos y máquinas de movimiento de tierras someten a los trabajadores a vibraciones mecánicas en partes del cuerpo como el sistema mano-brazo y el cuerpo entero (Weeks, 2001).

En uno de los estudios analizados anteriormente, el de los autores J. M^a Santurio Díaz, J. Rodríguez Carballido y E. Argüelles Bayón (2006), declararon que los martillos neumáticos mostraban un valor de vibración superior al del resto de máquinas estudiadas de los diferentes sectores. El sector de la construcción emplea muchas máquinas que son destinadas a romper materiales como es el caso de los martillos neumáticos y eléctricos generando niveles muy altos de vibración.

Industrias extractivas: minería

El sector minero representa una de las actividades económicas del sector primario que forma parte como una pieza fundamental de muchas de las industrias (Amstrong & Menon, 2001).

En el ámbito laboral, la población global asociada con la minería ha ido decreciendo a lo largo de estos años.

La industria extractiva, como se ha citado, según el CNAE-2009 comprende la letra B. Se trata de la extracción de minerales en su estado natural, pudiendo ser este en estado sólido, como el carbón y los minerales metálicos, en estado líquido como es el caso del petróleo y por último el estado gaseoso como es el caso del gas natural. Esta extracción se

puede realizar a través de diferentes métodos como la minería subterránea o a cielo abierto, la extracción de pozos y minería de los fondos marinos (Instituto Nacional de Estadística, 2017).

Se pueden clasificar, las industrias extractivas, en diferentes grupos y divisiones. En el artículo de CNAE-2009 se divide en 05 y 06 correspondiente a la extracción de combustibles fósiles como el carbón, el lignito, el petróleo y el gas. Por otro lado, las divisiones 07 y 08 representan los minerales metálicos y otros minerales y productos de cantera. Por último, la división 09 corresponde a la extracción de hidrocarburos (Instituto Nacional de Estadística, 2017).

Los trabajadores que sufren enfermedades profesionales como la pneumoconiosis o la pérdida de audición y lesiones causadas por vibraciones pueden perjudicar su día a día, y pueden presentar incapacidad e incluso fallecimiento (Jennings, 2001).

Los riesgos físicos asociados a esta actividad económica también dependen de las condiciones de trabajo, es decir, de las características de la mina o de la cantera, como la profundidad, la composición del mineral, las rocas (Weeks, 2001).

Una de las herramientas muy recurrentes en esta industria son los martillos o el taladrado manual. Transmiten una gran cantidad de vibraciones al operario produciéndoles falta de riego en las manos o el llamado síndrome de dedos blancos (Weeks, 2001).

Este tipo de herramientas, como el martillo picador, se comparte con otras actividades económicas como en los proyectos de obra civil en los que requiere taladrar o volar rocas para construir carreteras, triturar rocas para cimientos o efectuar reparaciones (Weeks, 2001).

2.2.1.2 Equipos emisores de vibraciones mecánicas

Los equipos emisores de vibraciones mecánicas se clasifican en dos tipos: aquellas cuya vibración se transmite a través de las manos, es decir, las denominadas herramientas manuales y aquellas cuya vibración se transmite a todo el cuerpo, es decir, el trabajador debe estar sentado para que la máquina funcione correctamente.

2.2.1.2.1 Herramientas manuales

Las vibraciones se definen como oscilaciones de partículas alrededor de su punto de equilibrio. La energía de la vibración se transmite mediante ondas que son recibidas por el receptor a través del oído, o mediante una vía sólida como es una empuñadura en las que son receptores de la vibración distintas partes del cuerpo (Aníbal Rodríguez, 2009).

Aparece así una primera aproximación a las clasificaciones de las vibraciones, las que afectan al cuerpo entero, ya sea sentado o de pie y las que afectan al sistema mano-brazo (Aníbal Rodríguez, 2009).

A continuación, se presenta una tabla de las diferentes formas de transmisión de las vibraciones y las herramientas que lo producen. Como se observa, todas las herramientas empleadas que transmiten vibraciones al sistema mano-brazo son máquinas que requieren el uso de las manos. Por el contrario, las vibraciones del cuerpo entero son máquinas en las que el trabajador se encuentra sentado.

Tabla 12: Tipos de vibraciones

Vibraciones del cuerpo entero	Vibraciones del sistema mano-brazo
Tractor	Martillo neumático
Camiones	Rebarbadoras
Cosechadoras	Taladros
Puentes grúa	Amoladoras
Maquinaria de la construcción y la minería	Sierras eléctricas

Nota: Adaptado de Aníbal Rodríguez C. (2009, p. 239).

Además de esta clasificación, existe otro tipo de clasificación relacionada con su frecuencia. La frecuencia puede variar en, muy baja, es decir, vibraciones inferiores a 2 Hz, vibraciones de baja frecuencia de 2 a 20-30 Hz y vibraciones de alta frecuencia que oscilan desde 20-30 a 1000 Hz como son el caso de los martillos neumáticos (Aníbal Rodríguez, 2009).

La frecuencia a la cual el trabajador está expuesto depende de la fuente de origen, es decir, que cada vehículo o maquinaria emitirá una vibración específica que afectará al cuerpo del trabajador ya sea de forma localizada o en su totalidad.

Tabla 13: Frecuencia de vibraciones según las fuentes de origen

Vehículos útiles	Frecuencia
Automóvil	0,8 a 1,3 Hz y 9 a 12 Hz
Navío	0,1 a 0,3 Hz
Autobús	1,3 a 2 Hz y 8 a 12 Hz
Tren	1 a 8 Hz
Tractor	2 a 4 Hz
Avión comercial	0,2 a 7 Hz
Helicóptero	3 a 6 Hz y 15 a 21 Hz
Útiles neumáticos	15 a 50 Hz
Afeitadora eléctrica	200 Hz
Torno dental a aire	1.500 a 2.000 Hz

Nota: Adaptado de Aníbal Rodríguez C. (2009, p. 239).

Para las vibraciones de muy baja frecuencia se puede localizar el llamado “mal de los transportes” o cinetosis. Este tipo de frecuencias bajas y malestar se suele presentar en transportes marítimo, aéreo y el terrestre (Aníbal Rodríguez, 2009).

En el caso de baja frecuencia los trastornos que producen en el trabajador son en la zona lumbar, dorsal de la columna. Estos síntomas se han observado en tractoristas, conductores de camiones, autobuses y gruistas. En definitiva, en trabajadores que emplean maquinaria pesada de construcción, construcción de viales o minería (Aníbal Rodríguez, 2009).

Los problemas que desarrollan los trabajadores son provocados por el uso de herramientas cuya frecuencia es superior a 20 Hz e inferiores a 40 Hz. Las herramientas que emplean los trabajadores son martillos neumáticos, rebarbadoras, taladros, amoladoras y sierras eléctricas. Las lesiones que implica el uso de estas herramientas son variadas y perjudica huesos, articulaciones y tendones, acompañados de malestar y dolor (Aníbal Rodríguez, 2009).

En otras palabras, cuando el trabajador realiza trabajos recibe la vibración a través del sistema mano-brazo, en concreto por medio de la mano, como cuando esmerila, devasta,

emplea una manguera de agua a alta presión y otros instrumentos neumáticos (European Commission, 2009).

También, en frecuencias entre 40 y 300 *Hz* se manifiesta otro tipo de dolencias vasculares conocidas como el Síndrome del dedo blanco y el Síndrome de Raynaud, todo ello acompañado de condiciones atmosféricas adversas como la exposición al frío o cuando se emplea la herramienta de una forma incómoda (Aníbal Rodríguez, 2009).

En uno de los estudios observados, analizaron la magnitud de vibración que transmiten diferentes máquinas de una empresa constructora. Evaluaron diferentes factores de las máquinas como la antigüedad, la ubicación de los mangos, el peso de la herramienta, la marca del fabricante, el terreno en el cual se trabaja y su magnitud (Coggins et al., 2010).

Una de las máquinas analizadas fue el martillo neumático y observaron que éste era propenso a generar magnitudes de alta vibración que venían determinadas, en parte, por las características del trabajador, la calidad de la herramienta, su antigüedad, la marca y el peso (Coggins et al., 2010).

Comprobaron que la antigüedad era de uno de los factores más importantes, pues en las máquinas más antiguas con desgastes de piezas y un mal mantenimiento no se observaba una minimización de la vibración. Sin embargo, las herramientas más nuevas con diseños más ergonómicos y sistemas antivibratorios mostraban mejores prestaciones frente a la vibración. Esta investigación puso en evidencia que muchas de las empresas no invierten en desarrollos tecnológicos para atenuar las vibraciones o el remplazo de las máquinas (Coggins et al., 2010).

2.2.2 Resumen

Las actividades económicas relacionadas con el uso de herramientas motoras que generan vibraciones mecánicas transmitidas al ser humano producen dolencias. Los datos estadísticos del CEPROSS, manifiestan que la construcción y las industrias extractivas son las que más enfermedades profesionales manifiestan por esa causa.

Como conclusión se puede afirmar que tanto la construcción como las industrias extractivas emplean muchas herramientas y máquinas que emiten vibraciones mecánicas y son perjudiciales para la salud de los trabajadores, producen dolencias y malestar al trabajador.

Este tipo de malestar y dolencia depende de propiedades de las herramientas y de las condiciones de trabajo. Una de las máquinas más perjudiciales que dañan al sistema mano-brazo son los martillos neumáticos debido entre otros motivos a su frecuencia de vibración.

2.3 Efectos de la exposición a vibraciones mecánicas

Desde hace años, las diferentes organizaciones y estudiosos de la exposición a vibraciones vienen concretando y reuniendo en listas o grupos las diferentes enfermedades profesionales producidas por distintas dolencias.

Una de las primeras listas relacionadas con las enfermedades profesionales causadas por agentes físicos, exactamente las vibraciones mecánicas, fue la propuesta por Griffin M. J. (1997) que englobaba las herramientas y procesos potencialmente asociados a lesiones causadas por vibraciones.

Tabla 14: Algunas herramientas y procesos potencialmente asociados con lesiones por vibración

Tipo de herramienta	Ejemplos de tipos de herramientas (normas que identifican el tipo de prueba)
Herramientas de trabajo de metal de percusión	Herramientas para remachar (ISO 8662-2) Herramientas de calafateo (ISO 8662-5) Martillos picadores (ISO 8662-2) Herramientas de clinchado y rebordado (ISO 8662-10) Llaves de impacto (ISO 8662-7) Destornilladores de impacto (ISO 8662-7) Atornillador (ISO 8662-7) Martillo cincelador (ISO 8662-10) Pistolas de agujas (ISO 8662-10) Máquinas mordedoras y cizallas (ISO 8662-10) Máquina de estampado

CAPÍTULO 2: REPERCUSIÓN DE LAS VIBRACIONES MECÁNICAS EN ENFERMEDADES
CONSIDERADAS PROFESIONALES

<p>Amoladoras y otras herramientas rotativas</p>	<p>Amoladoras de pedestal</p> <p>Amoladoras de mano (ISO 8662-4; ISO 8662-8)</p> <p>Lijadoras de mano (ISO 8662-4; ISO 8662-8)</p> <p>Pulidoras de mano (ISO 8662-4; ISO 8662-8)</p> <p>Amoladoras o pulidoras accionadas por flexión (ISO 8662-17)</p> <p>Herramientas rotativas de rebabas (ISO 8662-17)</p>
<p>Martillos y taladros de percusión utilizados en minería, demolición, construcción de carreteras y trabajo en piedra</p>	<p>Taladros percutores (ISO 8662-3)</p> <p>Taladros de roca (ISO 8662-3)</p> <p>Pisón compactador (ISO 8662-9)</p> <p>Taladros de asfalto (ISO 8662-5)</p> <p>Herramientas para trabajar la piedra (ISO 8662-14)</p>
<p>Maquinaria forestal y de jardín</p>	<p>Motosierras (ISO 7505)</p> <p>Motosierras antivibración (ISO 7505)</p> <p>Sierras de cepillo</p> <p>Cortacéspedes (ISO 5395)</p> <p>Cortasetos y recortasetos</p> <p>Trituradoras de tocones</p>
<p>Otros procesos y herramientas</p>	<p>Pistolas de clavar (ISO 8662-11)</p> <p>pistolas grapadoras (ISO 8662-11)</p> <p>Sierras de cojinete (ISO 8662-12)</p> <p>Sierras circulares (ISO 8662-12)</p> <p>Desbastadoras</p> <p>Herramientas de grabado</p> <p>Máquinas para golpear zapatos</p> <p>Rodillos vibratorios</p>

	<p>Vibroespesadores de hormigón</p> <p>Mesas vibratorias de nivelación de hormigón</p> <p>Manillares de moto</p> <p>Máquinas a motor controladas por personas (ejemplo: un cortacésped)</p>
--	---

Nota: Adaptado de Griffin M. J. (1997, p. 4).

Hoy en día, en España, como se ha citado en el punto anterior, se recogen en el Real Decreto 1299/2006, de 10 de noviembre, el cuadro de enfermedades profesionales en el sistema de la Seguridad Social y se establecen criterios para su notificación, así como los riesgos que las producen. El Anexo 1 contiene el cuadro de enfermedades profesionales y, en concreto, el grupo 2 es el relacionado con las enfermedades profesionales causadas por agentes físicos, en particular las vibraciones mecánicas (Cavas Martínez et al., 2007).

2.3.1 Enfermedades generales

El Real Decreto 1299/2006 llama a los martillos neumáticos máquinas vibratorias que producen a lo largo del tiempo enfermedades profesionales tanto vasculares como osteoarticulares.

Sin embargo, a pesar de esta distinción, se debe entender que las diferentes afectaciones contraídas por el trabajador dependerán de una serie de factores, entre los que se destaca la frecuencia de vibración.

Ante vibraciones de *muy baja frecuencia (inferiores a 2 Hz)*, las dolencias que se generan en este rango son las denominadas “mal de los transportes” o cinetosis produciendo náuseas, vómitos, palidez, sudores y lipotimias. Estos trastornos son los producidos por el transporte marítimo y aéreo. El sistema nervioso central posee un excelente archivo sobre las informaciones sensoriales que recibe y a ellas ajusta su modelo interno. Cuando recibe una sensación nueva, en este caso el tipo de vibración que se está considerando, puede suceder que el archivo se enriquezca con esta nueva información y el cuerpo se adapte. Éste es el caso de las personas que no tienen dificultades durante la navegación y, cuando regresan a tierra, sienten la sensación de que la tierra tiene el movimiento que poseía el barco, algo que suele llamarse “mareo de tierra”. En cambio, en otras personas puede no presentarse la adaptación

y, entonces, aparece el cuadro que se ha descrito. En relación a estas afectaciones, en travesías marítimas, con malas condiciones atmosféricas, el 50 % de las personas presentan estas sintomatologías. Aunque se puede entrenar, para no sufrir este malestar, existe un número de personas que sigue experimentando esta sensación (Aníbal Rodríguez, 2009).

Las vibraciones de *baja frecuencia (de 2 a 20-30 Hz)* son las que generan trastornos en las zonas dorsal y lumbar de la columna. Estas dolencias las presentan los tractoristas, conductores de camiones, autobuses y los gruistas. También, en la construcción, en las obras de vialidad y minería por el uso de maquinaria pesada. Estos trabajadores manifiestan con mayor regularidad las lumbalgias y las lumbociatalgias; además presentan otras dolencias como artrosis, hernias de disco y radiculitis crónicas. Otro tipo de trastornos son los digestivos, urinarios y de visión (Aníbal Rodríguez, 2009).

En lo que respecta a las vibraciones de *alta frecuencia (20-30 Hz a 1000 Hz)*, en esta gama de frecuencia se encuentran los martillos neumáticos, rebarbadoras, taladros, amoladoras y sierras eléctricas. Las lesiones que presentan los trabajadores cuando emplean este tipo de máquinas suelen dañar los huesos, las articulaciones y los tendones. No obstante, existe controversia sobre cómo ciertas herramientas manuales eléctricas, que generan una frecuencia de vibración inferior a 25 Hz, puedan transmitir y afectar, a la parte superior del brazo, el hombro, el cuello y la cabeza (Aníbal Rodríguez, 2009).

En un estudio realizado por Xu X. S., Dong R. G., Welcome D. E., Warren C., Mcdowell T. W. y Wu J. Z. (2017) evaluaron el efecto de las vibraciones mecánicas de ocho sujetos, en ambos brazos. Para el análisis, utilizaron un vibrómetro y tres acelerómetros aplicados a las distintas subestructuras. Midieron la palma de cada mano para ayudar a comprender la vibración transmitida y la respuesta biodinámica. Tras el análisis observaron que existía resonancia en el brazo para frecuencias de entre 7 a 12 Hz, en el hombro de entre 7 a 9 Hz. En el caso de la espalda y el cuello la resonancia se produjo para frecuencias de 6 a 7 Hz. Además, observaron que las resonancias en las distintas subestructuras venían influenciadas, también, por las posturas realizadas con los brazos, manos y por la fuerza aplicada.

En definitiva, señalan que las frecuencias de vibración obtenidas en las distintas subestructuras no implican que las personas puedan contraer enfermedades, ya que dependen de muchos factores y circunstancias personales individuales de cada trabajador. Sin embargo, cabe señalar que, al estar expuesto a ese fenómeno, se es propenso a que a lo largo de los años pueda presentarse alguna patología (Xu et al., 2017).

Una de las afectaciones más recurrentes en vibraciones de alta frecuencia es la epicondilitis y la tenosinovitis, afectaciones dolorosas e incómodas que Aníbal Rodríguez C., (2009), define como:

La epicondilitis es también denominada “codo del tenista”, cuando en verdad debería llamarse “codo del trabajador metalúrgico, minero o de la madera”. Se trata de un proceso caracterizado por la aparición de dolor en el borde lateral del codo (a nivel del epicóndilo, de allí su nombre). Este dolor es importante y suele necesitar tratamiento especializado.

La tenosinovitis es una dolencia producida por el continuo frotamiento de los tendones del antebrazo sobre sus vainas, consecuencia de las sacudidas dadas por las vibraciones y por la presión que ejerce la mano sobre la herramienta. También es un proceso muy doloroso. El dolor aumenta, en general, con los giros del antebrazo hacia afuera o hacia adentro (Aníbal Rodríguez, 2009, p. 241).

Además, puede haber fractura y artrosis en mano y muñeca generadas por vibraciones mecánicas (Aníbal Rodríguez, 2009).

Las frecuencias entre 40 y 300 *Hz* producen los fenómenos vasculares como el Síndrome de Raynaud, referido anteriormente. Esta dolencia aparece con el frío y también cuando se adopta una posición no ergonómica al emplear la herramienta por encima de la altura de los hombros para desarrollar su tarea. Al producirse los primeros síntomas de esta dolencia, la sensación de hormigueo, adormecimiento y cosquilleo en brazos y manos debe interrumpirse el trabajo con el fin de evitar la cronificación de la dolencia. En esta gama de frecuencias también puede aparecer la enfermedad de Dupuytren y los trastornos neurológicos (Aníbal Rodríguez, 2009).

Las afectaciones patológicas en la mano frente a la vibración, pueden verse influidas por un gran número de factores como los ya citados, pero también por la hidratación, la edad de la persona y su estructura anatómica de la misma (Derler et al., 2006) (Shao et al., 2009) (Almagirby et al., 2018).

Según Brammer A. J. (1986) y Miwa T. (1967), citados por Xu, Dong, Welcome, Warren, Mcdowell y Wu (2017), afirman que la percepción de la vibración de todo el sistema de mano-brazo está influenciada, en gran medida, por la respuesta biodinámica del sistema de la mano ante la presencia de este riesgo físico.

En conclusión, las vibraciones mecánicas son una materia importante en el desarrollo de nuevas máquinas, se debe tener en cuenta la fatiga y el desgaste que puede producir en los trabajadores. De igual modo, la optimización en el diseño de máquinas en sectores como la construcción y la minería, que cubra los riesgos derivados de las vibraciones sobre los trabajadores, ayudarán a aumentar la eficiencia en el trabajo.

2.3.2 Enfermedades en el sistema mano-brazo

La exposición profesional de trabajadores a vibraciones mecánicas transmitidas a través de los dedos o a la palma de las manos es lo que se denomina vibraciones mano-brazo, vibraciones locales o segmentarias. Esta exposición produce una serie de enfermedades que se agrupan con el mismo nombre de síndrome de vibraciones mano-brazo (HAV) y cuya definición hace referencia a enfermedades asociadas a la exposición a vibraciones transmitidas a las manos.

En relación con la revisión sistemática que se realizó sobre las afectaciones concernientes a las vibraciones mecánicas del sistema mano-brazo se encuentra junto a las enfermedades relacionadas con las vibraciones mecánicas, otras como los trastornos vasculares, trastornos neurológicos periféricos, trastornos de los huesos, trastornos de las articulaciones y trastornos musculares (Griffin, 2001).

En los inicios, según Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional de Estados Unidos (NIOSH) (2020), el síndrome de vibración mano-brazo (HAVS) no agrupaba las enfermedades que afectaban al sistema mano-brazo, como viene sucediendo en la actualidad, sino que sólo se definían los síntomas y la patología sufrida por los trabajadores. Así, en 1918, Hamilton analizó que los trabajadores que empleaban martillos neumáticos y taladros en las canteras de piedra caliza de Indiana manifestaban anemia espástica de las manos "*spastic anemia of the hands*" debidas al uso de estas herramientas. Más adelante, a partir de 1930 comenzaron a asociar cierto tipo de patologías que se repetían asiduamente con máquinas vibratorias en actividades laborales similares. Fue en ese mismo año cuando, a través del estudio realizado por Seyring (1930), se empezó a agrupar el síndrome de vibración. En 1936, Hunt vinculó el uso de estas herramientas manuales neumáticas con el fenómeno de Raynaud.

A lo largo de los años se han ido sucediendo en distintos sectores industriales, numerosos estudios que han demostrado la existencia de una relación directa en la aparición

de determinadas patologías con el uso de herramientas manuales vibratorias, tanto Telford Ed, McCann MB y Mac Cormack DJ (1945), como Agate y Druett (1947), citados por Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional de Estados Unidos (NIOSH) (2020), encontraron esa relación. Por último, en la industria aeronáutica, Dart EE (1946), citado por The National Institute of Occupational Safety and Health (NIOSH) (2020), concluyó que un importante grupo de trabajadores (112) sufrían patologías similares por haber usado herramientas neumáticas y eléctricas.

En 1960, Ashe W.F, Cook M.T y Old J.W., y de nuevo Ashe W.F. junto con Williams N., en 1964, citados por The National Institute of Occupational Safety and Health (NIOSH) (2020), tras una profunda investigación clínica de arteriografías y biopsias sobre las arterias digitales de los trabajadores, observaron un estrechamiento de los vasos sanguíneos. Esta investigación demostró que la exposición prolongada a la vibración conducía a daños en el sistema mano brazo y especialmente en las arterias digitales.

En la actualidad se conoce que determinadas máquinas vibratorias empleadas por los trabajadores, como los martillos neumáticos, alcanzan valores de magnitud muy altos produciendo patologías al sistema mano-brazo y por tanto se puede actuar para corregirlo.

También, es común denominarlas como “afectaciones osteo-articulares por vibraciones mano-brazo” a los trastornos vasculares, neurológicos y músculo-esqueléticos (Marqués Marqués et al., 2012).

Estas exposiciones de origen profesional, causantes de dolencias y malestar al trabajador, vienen definidas por el empleo de herramientas vibratorias como herramientas de percusión, amoladoras y otras herramientas rotativas, martillos rompedores de piedra, martillos perforadores de roca, martillos picadores, martillos rompedores de asfalto y hormigón.

En muchos estudios se ha reconocido que la exposición a vibraciones mecánicas afecta a la mano, al hombro, a la espalda, al cuello, a la cabeza, y también en otros lugares del cuerpo. Entre ellos se cita el realizado por Pyykko I., Starck J. y Pekkarinen J. (1986), citado por de Pyykkö M., Färkkilä M., Inaba R., Starck J., Pekkarinen J. (1994), y la propia investigación de Pyykkö M., Färkkilä M., Inaba R., Starck J., Pekkarinen J. (1994). Por último, cabe mencionar el análisis de Tirabasso A., Botti T., Lunghi A., Giovanni R.D., Sacco F., Marchetti E., Cerini L., Sanjust F., Moleti A. y Sisto R. (2015), citados por Xu, Dong, Welcome, Warren, McDowell y Wu

(2017), en el que exponen los efectos negativos sobre el sistema auditivo que puede producir la vibración transmitida a la cabeza, a través de las manos.

Para finalizar, cabe añadir que, el desarrollo de enfermedades musculoesqueléticas por la exposición a vibraciones mecánicas transmitida al sistema mano-brazo también se encuentra asociada con aspectos biomecánicos y ergonómicos, tanto del trabajador como de la propia máquina. Obviamente, cuando el trabajador realiza un esfuerzo excesivo, no ergonómico, en condiciones de vibración se verá favorecido el desarrollo de este tipo de enfermedades.

Primeros síntomas

Los primeros efectos de la exposición a vibraciones mecánicas se encuentran en el malestar subjetivo, es decir, la sensación creada a través de los mecanorreceptores de la piel localizados en los tejidos epidérmicos y subcutáneos de la piel de los dedos y de las manos (Griffin, 2001).

La sensibilidad humana, cuando se encuentra expuesta a vibraciones se reduce a medida que se incrementa la frecuencia y también afecta a la actividad del trabajador causándole incrementos en los umbrales vibrotáctiles a consecuencia de la excitabilidad de los mecanorreceptores de la piel (Griffin, 2001).

La aparición de enfermedades asociadas al sistema mano-brazo por las vibraciones mecánicas está relacionada con las características y propiedades de la misma exposición, es decir, la frecuencia, la amplitud, la temperatura, pero también con otras cualidades físicas del mismo trabajador como la edad. Para cierto tipo de enfermedades, la exposición al frío representa un problema, ya que, la baja temperatura favorece el efecto vasoconstrictor en la circulación digital al margen de reducir considerablemente la temperatura que facilitará el riesgo de contraer lesiones graves por accidentes (Griffin, 2001).

Tipos de afectaciones

Hoy en día existe discusión sobre la posible relación entre las alteraciones óseas y articulares producidas por el empleo de herramientas vibratorias, o por el trabajo manual pesado. Sin embargo, las enfermedades surgidas en las manos, muñecas y codos evidencian que las vibraciones transmitidas a las manos producen enfermedades esqueléticas.

Las enfermedades informadas según los análisis realizados son: la osteoartrosis de muñeca, artrosis y osteofitosis de codo, en especial en la minería, en la construcción y en la industria del metal, producida por herramientas neumáticas de percusión (Griffin, 2001).

El sufrir dolencias en esta región por el uso de herramientas vibrantes es debido a que el 90 % de la vibración transmitida a la mano es absorbida en el sistema de la articulación del carpo, es decir, en los huesos semilunar y escafoides (Marqués Marqués et al., 2012).

Neurológicas

Por otro lado, las afectaciones neurológicas son aquellas en las que el trabajador emplea herramientas vibrantes produciéndole hormigueo y adormecimiento en dedos y manos. La exposición a las vibraciones de forma continuada podría agravar los síntomas, provocando alteraciones patológicas en los nervios de los dedos tales como: edema perineural, fibrosis y pérdida de fibra nerviosa. Todos estos síntomas decidieron recogerlos en una lista durante el seminario realizado en Estocolmo (Stockholm Workshop) en 1987. Esta lista se fundamenta en tres fases, según las investigaciones clínicas que se presentan a continuación (Griffin, 2001).

Tabla 15: Fases neurosensoriales de la escala del Taller de Estocolmo para el síndrome de vibraciones mano-brazo

Fase	Síntomas
0SN	Expuesto a vibración, pero sin síntomas
1SN	Adormecimiento intermitente, con o sin hormigueo
2SN	Adormecimiento intermitente o persistente, percepción sensorial reducida
3SN	Adormecimiento intermitente o persistente, discriminación táctil y/o destreza de manipulación reducidas
Fuente: Stockholm Workshop 86, 1987	

Nota: Adaptado de Griffin M. J. (2001, p. 10).

Asimismo, otros síndromes que pertenecen a esta rama como el conocido síndrome del túnel carpiano (CTS), es una patología producida en trabajadores que emplean máquinas vibrantes, ya sean chapistas, perforadores y trabajadores forestales. El efecto que produce

este síndrome es una compresión del nervio mediano por un túnel anatómico de la muñeca (Griffin, 2001).

Musculares

En lo que respecta a las patologías musculares, los trabajadores presentan malestar y debilidad muscular en brazos y manos. Se trata de una fatiga muscular que puede producir discapacidad y reducción en la fuerza de agarre de la mano, se suele dar sobre todo en leñadores. La tendinitis, tenosinovitis y la contractura de Dupuytren, patología del tejido fascial de la mano, son también patologías relacionadas a la exposición a vibraciones en el sistema mano-brazo, aunque no están del todo comprobadas. No obstante, también se relacionan con el estrés ergonómico producido por un trabajo manual pesado (Griffin, 2001).

De igual modo, las articulaciones se ven afectadas originando artrosis de codo y necrosis del semilunar debida a la falta de riego sanguíneo, incluso agravándose en osteonecrosis del escafoides (Segarra Larrosa, 2016).

Vasculares

Los trastornos vasculares como el “Fenómeno de Raynaud”, dedo muerto o dedo blanco, como también se le conoce, y cuyo origen es profesional, es una enfermedad vasospástica traumática, es decir, por episodios de dedos blancos o pálidos causados por obstrucción espástica de las arterias digitales. El riego sanguíneo anormal de los tejidos de la piel y uñas produce palidez por isquemia, hiperemia y cianosis (Segarra Larrosa, 2016).

Esta enfermedad en concreto, si viene acompañada por la exposición a temperaturas muy bajas y durante mucho tiempo, puede producir en el trabajador una pérdida de sensibilidad táctil, que en caso de complicarse puede desembocar en una ulceración o gangrena en las puntas de los dedos (Griffin, 2001).

En cuanto al origen de este fenómeno existen diversas opiniones, unos dicen que se trata de un reflejo vasoconstrictor simpático central, en cambio otros abogan por alteraciones locales en los vasos digitales, como engrosamiento de la pared muscular y modificaciones del receptor funcional, producidas ambas por la exposición a vibraciones (Griffin, 2001).

Al ser una de las enfermedades que más se manifiestan en los trabajadores, en el mismo seminario realizado en Estocolmo (Stockholm Wokshop) en 1989 recogieron en una lista una graduación o escala de los síntomas, como se muestra en la tabla siguiente (Griffin, 2001) (European Commission, 2009).

Tabla 16: Escala del Taller de Estocolmo para las fases del fenómeno de Raynaud inducido por el frío en el síndrome de vibraciones mano-brazo

Fase	Grado	Síntomas
0	-	Ningún ataque
1	Leve	Ataques esporádicos que sólo afectan a las puntas de uno o más dedos
2	Moderado	Ataques esporádicos que afectan a las falanges distal y media (rara vez también a la proximal)de uno o más dedos
3	Grave	Ataques frecuentes que afectan a todas las falanges de la mayorías de los dedos
4	Muy grave	Como en las fase 3, con alteraciones tróficas de la piel en las puntas de los dedos
Fuente: Stoackholm Workshop 86, 1987		

Nota: Adaptado de Griffin M. J. (2001, p. 11) y de European Commission (2009, p.240).

La aparición de esta enfermedad, según los análisis clínicos, viene determinada por el empleo de herramientas de percusión, el uso de amoladoras, herramientas rotativas, martillos percusores y perforadores (Griffin, 2001).

Además, de todos las enfermedades que se han citado anteriormente que son originadas por la exposición a vibraciones mecánicas, uno de los síndromes que también se ha relacionado con los traumatismos repetitivos es el síndrome del martillo hipotenar, es una lesión de la arteria cubital localizada en la región cubital de la mano (Serrano Gisbert & Gómez Conesa, 2003).

Osteoarticulares

Otras de las enfermedades caracterizadas por ser consecuencia de la emisión de vibraciones mecánicas son las afectaciones de los huesos del carpo, como la necrosis del

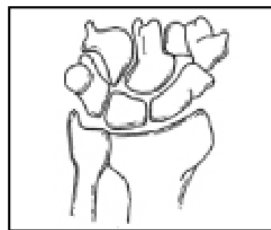
semilunar, también denominado enfermedad de Kienböck. Se dice que es la afectación osteoarticular más frecuente (Marqués Marqués et al., 2012).

Sin embargo, Stahl, Santos Stahl, Meisner, Rahmanian-Schwarz, Schaller y Lotter (2012) determinaron, a través de una revisión sistemática de 220 artículos sobre la etiopatología de esta enfermedad, no encontrar ninguna relación causal entre esta enfermedad con las vibraciones mano-brazo. Aunque afirman que es un área en el que se debe realizar un estudio más profundo.

Retomando los síntomas que producen la patología de Kienböck se presenta como un dolor local intenso vinculado a una pérdida de flexión palmar y una pérdida de fuerza de agarre. A través de radiografías, resonancias magnéticas y gammagrafías se han podido diagnosticar diferentes estadios de esta enfermedad.

Los estadios según los propuestos por Lichtman comienzan con una etapa inicial que presenta en un principio sintomatología positiva sin alteraciones radiográficas como se puede observar en la figura 6. Normalmente, se puede diagnosticar a través de la resonancia magnética mencionada (Marqués Marqués et al., 2012).

Figura 4: Estadio I

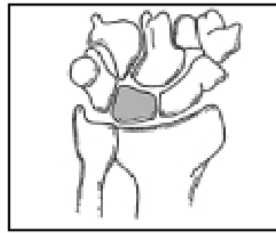


Estadio I

Nota: Adaptado de Marqués Marqués F., Rodríguez Morales D., García Cubero M.C., Mena Mateo J., Silió Villamil F., Maqueda Blasco J., Guillén Subirán C., Jardón Dato E., Hermosa Hernán J. C. y Tejedor Varillas A. (2012, p. 3).

El segundo estadio se aprecia en el semilunar esclerosis subcondral y cavidades quísticas sin que se aprecie colapso del mismo (Marqués Marqués et al., 2012).

Figura 5: Estadio II

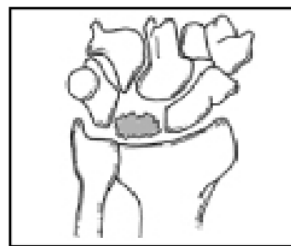


Estadio II

Nota: Adaptado de Marqués Marqués F., Rodríguez Morales D., García Cubero M.C., Mena Mateo J., Silió Villamil F., Maqueda Blasco J., Guillén Subirán C., Jardón Dato E., Hermosa Hernán J. C. y Tejedor Varillas A. (2012, p. 3).

En el estadio III-a se origina un colapso del semilunar, observándose un ensanchamiento de la primera fila y migración proximal del hueso grande, pero no hay alteraciones en la articulación escafolunar.

Figura 6: Estadio III-a

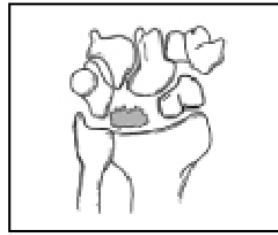


Estadio III-a

Nota: Adaptado de Marqués Marqués F., Rodríguez Morales D., García Cubero M.C., Mena Mateo J., Silió Villamil F., Maqueda Blasco J., Guillén Subirán C., Jardón Dato E., Hermosa Hernán J. C. y Tejedor Varillas A. (2012, p. 3).

En el estadio III-b aparece una inestabilidad escafolunar produciendo una subluxación rotatoria del escafoide. En el plano radiográfico anteroposterior se produce el “signo del anillo” y en la de perfil una dorsiflexión del semilunar comúnmente denominado DISI (*dorsiflexedintercalary segmente instability*) (Marqués Marqués et al., 2012).

Figura 7: Estadio III-b



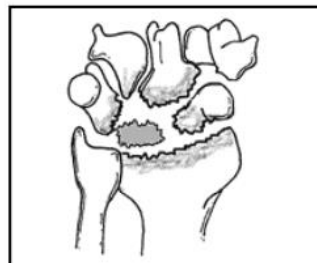
Estadio III-b

Nota: Adaptado de Marqués Marqués F., Rodríguez Morales D., García Cubero M.C., Mena Mateo J., Silió Villamil F., Maqueda Blasco J., Guillén Subirán C., Jardón Dato E., Hermosa Hernán J. C. y Tejedor Varillas A. (2012, p. 3)

En el último estadio, el IV, se encuentra la artrosis radiocarpiana, produciendo “muñeca SLAC” (Marqués Marqués et al., 2012).

Según H.K Watson HK y F.L Ballet (1984), citados por García López y Delgado (2007), se diagnosticó el colapso avanzado escafolunar con las siglas SLAC (*Scaphoid Lunate Advanced Collapse*). Es una de las formas más comunes de artrosis degenerativa de la muñeca.

Figura 8: Estadio IV



Estadio IV

Nota: Adaptado de Marqués Marqués F., Rodríguez Morales D., García Cubero M.C., Mena Mateo J., Silió Villamil F., Maqueda Blasco J., Guillén Subirán C., Jardón Dato E., Hermosa Hernán J. C. y Tejedor Varillas A. (2012, p. 3).

También, se presentan otras patologías como la artrosis hiperostósica del codo, la osteonecrosis del escafoide o también enfermedad de Köhler (Marqués Marqués et al., 2012).

Estas alteraciones mencionadas, son enfermedades profesionales relacionadas con los trastornos musculoesqueléticos, es decir, son patologías osteoarticulares del sistema mano-brazo. Desafortunadamente, estas patologías osteoarticulares son generalmente irreversibles, si bien el desgaste, el envejecimiento de los movimientos de los brazos y las manos se produce en fases más avanzadas. Otros factores que influyen en el desarrollo de estas patologías son la

edad, así como los antecedentes de artritis y de trastornos angioneuróticos (Marqués Marqués et al., 2012).

La absorción de esa vibración depende de muchos factores tanto intrínsecos de la máquina como extrínsecos. Los llamados intrínsecos de la máquina hacen referencia a la edad de la máquina, la magnitud de vibración, el desgaste asociado a la antigüedad y un mantenimiento deficiente (Coggins et al., 2010). Pero también dependen del trabajador, del estado físico de la persona, de los antecedentes personales y de la existencia de resonancia entre la vibración transmitida por parte de la máquina y del cuerpo receptor.

Asimismo, sin olvidar que realizar una buena postura con el brazo mientras se emplea la máquina vibratoria es un aspecto importante a tener en cuenta, se ha demostrado que una mala postura al ejecutar el trabajo provoca una gran transmibilidad de la vibración produciendo diferentes efectos y resonancias para diferentes ubicaciones del sistema (Xu et al., 2017).

En definitiva, esta exposición profesional, además de afectar al trabajador en su vida laboral, con dolencias producidas por este fenómeno, puede perjudicar su vida personal (Mitra et al., 2017).

Las afectaciones tanto vasculares, neurológicas y musculoesqueléticas de la mano y el brazo producidas por la vibración son procesos progresivos debidos a la exposición continua a la vibración, muchas de ellas se consideran irreversibles produciéndoles una discapacidad en las extremidades superiores y perjudiciales en su vida diaria y profesional según House R., Wills M., Liss G., Switzer-McIntyre S., Manno M. y Lander L., (2009) y Youakim S. (2014), citados por Leduc, House, Eger, Thompson y Holness (2016).

Esta dolencia se presenta en trabajadores que realizan actividades manuales como lo son los obreros que trabajan con metal, carpinteros y mecánicos de motor, según Denoel C., Collignon L., Dardenne C.B., Clanet M., Verhelle N., Heymans O. y Carlier A. (2001), citados por Serrano Gisbert y Gómez Conesa (2003).

Según Cooke (2003), sobre esta patología, a través de la revisión de 52 artículos, dedujo que los cambios que producía este síndrome de martillo hipotenar son imprecisos, no como la enfermedad de Raynaud que resulta estar más definida.

Sin embargo, Cooke (2003) cree que se podría reconocer la posibilidad del síndrome del martillo hipotenar como causa potencial de la enfermedad de Raynaud.

Igualmente, propuso la posibilidad de que exista el síndrome del martillo hipotenar como consecuencia de los efectos de traumas hipotenares repetidos por herramientas vibratorias, siendo la magnitud de los episodios traumáticos más importantes que el nivel de aceleración de la exposición a la vibración (Cooke, 2003).

Otros estudios como el realizado por Kaji H., Honma H., Usui M., Yasuno Y., Saito K. (1993), citado por Serrano Gisbert y Gómez Conesa (2003), sobre 330 trabajadores que se encuentran expuestos a vibración, localizaron 29 casos de síndrome del martillo hipotenar mediante arteriografía. Por un lado, en concreto la mano derecha se encontraba dañada en 13 casos. Por otro lado, la izquierda en 6 de los casos presentaba dolencia y se encontraron 5 casos con las dos manos dañadas. La edad media de los trabajadores en el estudio era de 55 años, la duración media de la exposición a la vibración en la que se encontraban los trabajadores era de 19,4 años, con una duración media de episodios de Raynaud de 6,4 años.

Otros autores como Aarhus L., Stranden E., Nordby K.C, Einarsdottir E., Olsen R., Ruud B. y Bast-Petterse R. (2018) consideran que la evaluación del dedo blanco inducido por la vibración que emplean la escala que se planteó en “The Stockhol Workshop Scale (SWS)” y el examen de plestimografía de las extremidades debida al frio, son pruebas escasas para su determinación. Consideraban que, además de evaluar la enfermedad, se debía tener en cuenta otros aspectos como la edad del trabajador y la exposición continuada a la vibración, ya que predice un empeoramiento de los síntomas del dedo blanco. También, afirman que se debe contemplar el tabaquismo como un elemento de consideración en las evaluaciones de los factores de diagnóstico y pronóstico.

En uno de los estudios recientes de un estudio clínico de un hombre de 41 años de edad que empleaba herramientas vibratorias presentaba heridas que no llegaban a curarse en el dedo pulgar derecho y el dedo corazón. Mediante una arteriografía revelaba oclusiones de múltiples arterias en la mano. Las heridas que presentaba el trabajador fueron tratadas y se curaron después de varias semanas con un tratamiento adecuado. En la arteriografía se descubrió que el trabajador tenía oclusiones de las arterias cubital, radial, palmar superficial, entre otras, por lo que se propuso que pudiera tener el síndrome del martillo hipotenar, síndrome del martillo tenar o síndrome vibración de mano-brazo (Rebecca et al., 2017).

Sin embargo, tras el análisis se propuso como síndrome más acorde con el entorno y la situación en la cual el trabajador realizaba su tarea, fue el síndrome vibración de mano-brazo ya que se encontraba expuesto de forma prolongada a herramienta vibratoria por lo que se propuso como síndrome más probable (Rebecca et al., 2017).

Thompson y House (2006) estudiaron tres trabajadores con antecedentes de haber estado más de 10 años expuestos a vibración, diagnosticados con síndrome de vibraciones mano-brazo con afectaciones vasculares, así como trombosis de la arteria digital que se pudieron obtener mediante angiografía (radiografía de los vasos sanguíneos). Este desarrollo de trombosis y la detección de oclusiones arteriales propusieron los autores que podría ser debida a las vibraciones.

De la misma manera, según Shunto R., Shirakami A., Ohara A., Toibana N., Saito S. (1991), citados por Rebecca, Campbell, Matthew, Janko, Robert y Hacker (2017), establecieron una hipótesis sobre la relación entre el síndrome de vibración mano-brazo y la trombosis arterial en la que la tensión que se produce debida a la vibración daña al endotelio vascular conduciendo a la activación de la cascada de coagulación, es decir, se produce un proceso de lesión en un vaso sanguíneo.

Por otro lado, otros estudios han demostrado una mayor liberación de endotelina-1, esto es un potente vasoconstrictor, en las células endoteliales en respuesta a la vibración produciéndose una menor liberación de óxido nítrico del endotelio (tejido que recubre la zona interna de todos los vasos sanguíneos) que ha sido dañado (C. R. White et al., 2004). En definitiva, si estas teorías de fisiopatología son correctas, disminuir la exposición a la vibración de los trabajadores tendría que ayudar a prevenir una mayor trombosis arterial.

Como se ha citado anteriormente la exposición a vibraciones mecánicas conlleva el síndrome vibración mano-brazo pudiendo producir discapacidad, baja productividad en el trabajo y mala calidad de vida.

Tanto es así que, en uno de los cuestionarios que se les hicieron a 149 pacientes con síndrome vibración mano-brazo, dos tercios de los pacientes tuvieron un pronóstico estable o tuvo un descenso continuado de la enfermedad afectándole en su salud, en la calidad de vida y en el trabajo (Sauni et al., 2015).

En otro de los estudios examinaron la destreza de manipulación de 115 trabajadores que se encontraban expuestos a vibración transmitida en la mano. Pudieron determinar una mala destreza manual de los trabajadores expuestos a vibración en comparación con los que se encontraban realizando otra actividad de control (Rui et al., 2008).

Según Cederlund R, Nordenskiöld U, Lundborg G (2001) y Fridén (2001), citados por Rebecca, Campbell, Matthew, Janko, Robert y Hacker (2017), sugieren que no solo afecta en el

trabajo sino también en la propia capacidad del trabajador para realizar actividades en su vida diaria, como escribir, abrir tapas o incluso abrocharse la ropa.

En otro de los estudios se localizó que el 48 % de los trabajadores con síndrome vibración mano-brazo tuvieron problemas para realizar actividades en su vida diaria, por lo que se relacionó con la reducción en la fuerza de agarre que además les producía dolor según Cederlund R., Nordenskiold U., Lundborg G. (2001), citados por Rebecca, Campbell, Matthew, Janko, Robert y Hacker (2017).

El Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional de Estados Unidos (NIOSH) (2020) manifiesta preocupación con el síndrome de vibración mano-brazo, recomienda que los trabajos se rediseñen para minimizar el empleo de herramientas manuales y que si hay trabajos que requieren de herramientas manuales vibratorias que sean rediseñadas para minimizar las vibraciones.

En conclusión, debido a que la exposición de los trabajadores a herramientas vibratorias como los martillos neumáticos pueden ocasionarles síntomas vasculares y neuromusculares en el sistema mano-brazo, además de malestar general que la enfermedad les produce, las habilidades propias de la actividad que realice el trabajador se verán deterioradas.

Las consecuencias de las vibraciones que sufren los operarios conducen a problemas económicos para los trabajadores y elevados costes para la sociedad según Friden J. (2001), citado por Serrano Gisbert y Gómez Conesa (2003).

Además, el Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional de Estados Unidos (NIOSH) (2020) sugiere que los trabajadores tienden a no informar el síndrome porque los síntomas son intermitentes y ocurren con mayor frecuencia en condiciones que no están presentes en la consulta del médico.

Al igual que muchos de estos trabajadores no están familiarizados con la posible gravedad del síndrome de vibración que estén padeciendo, los médicos tienden a no informar sobre los casos porque la mayoría no han sabido cómo distinguir los síntomas del fenómeno de Raynaud de otras afecciones médicas en las que se produce un blanqueo o una pérdida sensorial. Como consecuencia, estos médicos no realizan el examen clínico pertinente y la entrevista adecuada para evaluar el síndrome de vibración (The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), 2020).

Las enfermedades que los trabajadores presentan son patologías antinaturales que no son producidas por el envejecimiento de los huesos, arterias, es decir, del mismo ser humano por el paso del tiempo, sino que se trata de patologías producidas por las vibraciones mecánicas que el mismo cuerpo no puede contrarrestar. Son fenómenos antinaturales que el propio cuerpo no está capacitado para tolerar ya que la vibración no es generada por su propia voluntad, sino que son acciones que se le están imponiendo al cuerpo en contra de su voluntad debida a la obligación de tener que trabajar con esa herramienta que genera vibraciones mecánicas.

En general, en el ámbito de la seguridad y salud del trabajador, recomiendan un rápido diagnóstico para que se pueda limitar la exposición de vibración evitando daños mayores en el tejido de tal forma que pueda el trabajador tener una buena calidad de vida y laboral (Rebecca et al., 2017). Igualmente, como manifestaba NIOSH hay que rediseñar los trabajos para minimizar el empleo de herramientas manuales así como rediseñar las propias herramientas para minimizar la emisión de vibraciones mecánicas (The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), 2020).

2.3.3 Enfermedades en el cuerpo entero

Aunque el objeto del estudio no sea conocer las distintas afectaciones producidas por las vibraciones mecánicas al cuerpo humano, es interesante exponer de forma resumida algunas de ellas.

En lo que respecta a la exposición profesional a las vibraciones de cuerpo entero, se transmiten normalmente en el transporte, es decir, cuando el trabajador se encuentra en una posición sentada, y en procesos industriales. Los transportes a los que se refiere son el terrestre, marítimo y aéreo que producen incomodidad, malestar y en ocasiones se convierten en lesiones. Entre los efectos que generan se encuentran los producidos por el área de contacto con el cuerpo y la duración de la exposición a la vibración. La dirección de la vibración hace referencia, en este caso, a la vertical de las personas sentadas. El malestar aumenta en proporción a la magnitud de la vibración y a pesar de no existir límites sobre ello, éste varía de unos ambientes a otros.

Las vibraciones afectan al sistema del cuerpo entero deteriorando la adquisición de información que se obtiene a través de los ojos, es decir, presentan dificultades por ejemplo

en el aprendizaje, a la hora de tomar decisiones o retener en la memoria información. Sin embargo, también hay afectaciones en las funciones fisiológicas que son producidas cuando los trabajadores están expuestos a vibraciones en condiciones de laboratorio. Esto es las alteraciones típicas de un sobresalto, como por ejemplo el aumento de la frecuencia cardíaca. Las alteraciones fisiológicas que sufre el cuerpo humano suelen ser en general menos sensibles que las psicológicas (Griffin, 2001).

Otra de las afectaciones que presentan el cuerpo entero son las alteraciones neuromusculares. El movimiento humano está compuesto por una serie de mecanismos motores en los que interviene de forma controlada, natural y continua, ajustado por la retroinformación originado por los sensores localizados en los músculos, tendones y articulaciones. La exposición a vibración de cuerpo completo representa un movimiento artificial pasivo del cuerpo humano, ya que no es el propio cuerpo el que de forma natural proporciona esa activación de forma controlada. En ocasiones, la fatiga muscular de la espalda en una posición sentada produce carga muscular si el sujeto no se encuentra bien posicionado en la silla, pues si se añade vibración se observa un aumento de fatiga muscular. Los efectos que produce son una disminución o desaparición temporal de los tendones durante la exposición a las vibraciones de cuerpo entero (Griffin, 2001).

Al igual que las alteraciones cardiovasculares, respiratorias, endocrinas y metabólicas las relacionan con las que se produce durante el trabajo físico moderado, ya sea aumento de la frecuencia cardíaca, presión arterial y consumo de oxígeno. Asimismo, relacionan la exposición a vibraciones mecánicas en el cuerpo entero con alteraciones sensoriales y del sistema nervioso central.

2.3.4 Resumen

La exposición a vibraciones mecánicas genera diferentes dolencias, denominadas como síndromes de vibración mano-brazo, recogidas por distintas organizaciones e investigaciones como enfermedades profesionales causadas por agentes físicos. En este apartado se presenta un recorrido histórico sobre el origen de los efectos a la exposición a la vibración que experimentan los trabajadores, cuyo objetivo es ratificar que existe un problema de salud en torno al uso de máquinas manuales vibratorias y en concreto con el uso de martillos neumáticos.

2.4 Evaluación de las vibraciones mecánicas

2.4.1 Marco normativo

2.4.2 Fabricantes de equipos

2.4.3 Empresario usuario

2.4.3.1 Valores

2.4.3.2 Métodos de evaluación de la exposición a la vibración

2.4.3.2.1 Método de estimación

2.4.3.2.1.1 Mediante datos del fabricante empresario

2.4.3.2.1.2 Otras fuentes

2.4.3.2.2 Evaluación por medición

2.4.3.2.2.1. Sistema mano-brazo

2.4.3.2.2.1.1. Metodología para evaluar la exposición del sistema mano-brazo

2.4.3.2.3 Cálculo de $A(8)$

2.4.3.2.4 Evaluación a través del método de puntos

2.4.4 Normativa INSST

2.4.1 Marco normativo

La Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales, constituye la normativa general sobre Seguridad y Salud en el Trabajo, y determina el cuerpo básico de garantías y responsabilidades para establecer un nivel de protección adecuado de la salud de los trabajadores frente a los riesgos producidos en el trabajo. Según el Artículo 6 de esta ley, las normas reglamentarias son las que deben ir concretando los aspectos más técnicos de las medidas preventivas y estableciendo las medidas mínimas de protección (Pascual Lizana, 2005). Posteriormente, el Reglamento de los Servicios de Prevención, desarrollado por el Real Decreto 39/1997, de 17 de enero, y sus posteriores normas reglamentarias, han ido concretando los aspectos más técnicos de las medidas preventivas, así como las medidas mínimas de protección.

Más adelante, la Directiva 2002/44/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de junio de 2002, referente a las disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas a la exposición de los trabajadores a los riesgos derivados de los agentes físicos, ha sido

transpuesta a nuestro ordenamiento jurídico a través del Real Decreto 1311/2005, de 4 de noviembre y posteriormente en el Real Decreto 330/2009, de 13 de marzo sobre protección de la salud de los trabajadores frente a los riesgos derivados o que puedan derivarse de la exposición a vibraciones mecánicas.

También, desde la Unión Europea, la Directiva de Máquinas 2006/42/CE, permite la libre circulación de máquinas y garantiza del mismo modo un nivel de protección de los trabajadores a través de una serie de requisitos esenciales de seguridad y salud.

Algunos de los requisitos esenciales están en el anexo I de la Directiva de máquinas relativas a los peligros derivados de las vibraciones producidas por las máquinas:

- “Asientos (1.1.8): reducir la vibración que se transmite a través del asiento” (Diario Oficial de la Unión Europea, 2006, p. 14).
- “Vibraciones (1.5.9): Reducir la emisión de vibraciones” (Diario Oficial de la Unión Europea, 2006, p. 22).
- “Contenido del manual de instrucciones (relacionado con las vibraciones) letra j) (1.7.4.2): instalación y montaje para reducir ruido y vibraciones” (Diario Oficial de la Unión Europea, 2006, p. 25).
- “Manual de instrucciones (2.2.1.1): Declaración de las vibraciones para máquinas portátiles” (Diario Oficial de la Unión Europea, 2006, p. 27).
- “Manual de instrucciones (3.6.3). Vibraciones (3.6.3.1) Vibraciones: Declaración de las vibraciones para máquinas móviles” (Diario Oficial de la Unión Europea, 2006, p. 33).

Tras analizar brevemente las diferentes normas que se deben establecer para garantizar la seguridad de los trabajadores frente a los riesgos derivados o que puedan derivarse de la exposición a agentes físicos, así como otras directivas para la comercialización de máquinas, se han de tener en cuenta otros actores como son: el fabricante de equipos, el empresario usuario y los métodos de evaluación derivados de la exposición a agentes físicos, que se detallará a continuación.

2.4.2 Fabricantes de equipos

El fabricante de equipos es aquel que diseña y produce la herramienta a motor. Para un fabricante de máquinas, la Directiva de Máquinas 2006/42/CE contiene las exigencias

técnicas de diseño, fabricación y comercialización de las máquinas, así como las condiciones relativas a las vibraciones que producen.

Otras normas de referencia que el fabricante debe tener en cuenta son las relativas a la seguridad y salud laboral como la Directiva 2002/44/CE sobre la exposición de los trabajadores a vibraciones mecánicas, transpuesta al ordenamiento jurídico español por el Real Decreto 1311/2005 y la normativa medioambiental la Directiva 2002/49/CE sobre evaluación y gestión del ruido ambiental, incorporado como Ley 37/2003, que pretende prevenir, evitar o reducir los efectos perjudiciales de la exposición a la contaminación acústica generada en el ambiente tanto de ruidos como de vibraciones (Serrano Tomás, 2020).

A la hora de evaluar las vibraciones mecánicas, no es de obligado cumplimiento realizar esta evaluación para el fabricante.

El fabricante para poder comercializar su máquina debe dar conformidad a los requisitos esenciales de la Directiva de Máquinas y dado que las normas a las que se refiere este apartado son normas técnicas, les resulta más sencillo basarse en normas armonizadas. Un ejemplo es la UNE-EN 1299 que establece especificaciones generales para el aislamiento de las fuentes de vibración, también las normas UNE-EN ISO 7096 y UNE-EN 13490 que establecen especificaciones que deben cumplir los asientos de las máquinas de movimiento de tierras y de las carretillas elevadoras. A la hora de diseñar una máquina puede ser de gran utilidad para el fabricante los informes técnicos UNE-CR 1030-1 y UNECEN/TR 15172-1, donde se establecen reglas generales de diseño para la reducción de las emisiones de vibraciones mano-brazo y de cuerpo entero respectivamente (Serrano Tomás, 2020).

En el caso de que la máquina fabricada sea peligrosa, el fabricante podrá emplear las normas armonizadas para poder evaluarla o podrá acudir a un organismo notificado para ello. Si no es peligrosa, el fabricante realiza el expediente técnico de construcción y a continuación el control interno de fabricación de acuerdo con la Directiva de Máquinas.

Como conclusión a esta introducción, el fabricante en términos generales debe cumplir con los requisitos esenciales de seguridad y salud establecidos en la Directiva de Máquinas 2006/42/CE. Para ello puede apoyarse en unas normas armonizadas cuyo cumplimiento en la mayoría de los casos pueden dar presunción de conformidad.

Requisitos esenciales de seguridad y de salud relativos al diseño y la fabricación de las máquinas.

Para la fabricación de máquinas teniendo en cuenta las vibraciones mecánicas, se ha de contar con una serie de datos que se encuentran tanto en la Directiva de Máquinas 2006/42/CE, puntos 1.5 Riesgos debidos a otros peligros y 1.5.9 Vibraciones, como en el Real Decreto 1644/2008, de 10 de octubre, por el que establece las normas para la comercialización y puesta en servicio de las máquinas, (Diario Oficial de la Unión Europea, 2006) (Boletín Oficial del Estado, 2008).

A continuación, se especifica lo que dicta la Directiva y el Real Decreto en los apartados citados:

La máquina se debe diseñar y fabricar de manera que los riesgos, que resulten de las vibraciones que ella produzca, se reduzcan al nivel más bajo posible, teniendo en cuenta el progreso técnico y la disponibilidad de medios de reducción de las vibraciones, especialmente en su fuente (Boletín Oficial del Estado, 2008, p. 15) (Diario Oficial de la Unión Europea, 2006, p. 22).

El nivel de vibraciones producidas podrá evaluarse tomando como referencia los datos de emisión comparativos de máquinas similares (Boletín Oficial del Estado, 2008, p. 15) (Diario Oficial de la Unión Europea, 2006, p. 22).

Por otro lado, destacar que en el manual de instrucciones expuesto en el punto 1.7.4.2 deberá contener información relativas a la instalación y al montaje, dirigidas a reducir el ruido y las vibraciones, dispuesto en el punto j) (Diario Oficial de la Unión Europea, 2006) (Boletín Oficial del Estado, 2008).

También, en el punto 2.2 Máquinas portátiles y máquinas guiadas a mano, en el punto 2.2.11. Manual de instrucciones, relativas al manual de instrucciones, se indicarán las vibraciones que emitan las máquinas portátiles y las máquinas guiadas a mano cuyos datos se presentan a continuación:

- El valor total de la vibración a la que esté expuesto el sistema mano-brazo, cuando exceda de $2,5 m/s^2$. Cuando este valor no exceda de $2,5 m/s^2$, se deberá mencionar este particular.

- La incertidumbre de la medición.
- Estos valores se medirán realmente en la máquina considerada, o bien se establecerán a partir de mediciones efectuadas en una máquina técnicamente comparable y representativa de la máquina a fabricar.
- Cuando no se apliquen las normas armonizadas, los datos relativos a las vibraciones se deben medir utilizando el código de medición que mejor se adapte a la máquina.
- Deberán describirse las condiciones de funcionamiento de la máquina durante la medición, así como los métodos utilizados para esta, o la referencia a la norma armonizada aplicada (Diario Oficial de la Unión Europea, 2006, p. 27 y 28) (Boletín Oficial del Estado, 2008, p. 18)

El empresario fabricante además deberá proporcionar información relativa a la emisión de vibraciones, que se encuentra dispuesto en el punto 3.6 Información e indicaciones, 3.6.3 Manual de instrucciones, 3.6.3.1. Vibraciones:

En el manual de instrucciones se indicará sobre las vibraciones que la máquina transmita al sistema mano-brazo o a todo el cuerpo, lo siguiente:

- El valor total de la vibración a la que esté expuesto el sistema mano-brazo, cuando exceda de $2,5 \text{ m/s}^2$. Cuando este valor no exceda de $2,5 \text{ m/s}^2$, se debe mencionar este particular,
- El valor cuadrático medio más elevado de la aceleración ponderada a la que esté expuesto todo el cuerpo, cuando este valor exceda de $0,5 \text{ m/s}^2$. Cuando este valor no exceda de $0,5 \text{ m/s}^2$, se debe mencionar este particular,
- La incertidumbre de la medición.
- Estos valores se medirán realmente en la máquina considerada, o bien se establecerán a partir de mediciones efectuadas en una máquina técnicamente comparable y representativa de la máquina a fabricar.
- Cuando no se apliquen normas armonizadas, los datos relativos a las vibraciones se deben medir utilizando el código de medición que mejor se adapte a la máquina.
- Deberán describirse las condiciones de funcionamiento de la máquina durante la medición, así como los códigos de medición utilizados para esta” (Diario Oficial de la Unión Europea, 2006, p. 33 y 34) (Boletín Oficial del Estado, 2008, p. 22) .

Por último, cabe destacar que en el Anexo V se especifica una lista de componentes de seguridad que podrá emplear el empresario fabricante. Este anexo se encuentra en la Directiva de Máquinas, concretamente relativo a las vibraciones, en el punto 13. Sistemas y dispositivos para reducir la emisión de ruido y de vibraciones (Diario Oficial de la Unión Europea, 2006).

2.4.3 Empresario usuario

El empresario usuario es aquel que tiene a su servicio trabajadores que emplean la herramienta proporcionada por el empresario fabricante, debe velar por su seguridad y salud, además tiene la obligación de atender y resolver los posibles riesgos físicos que conllevan el uso de herramientas vibratorias en los puestos de trabajo.

Para el empresario usuario es de obligado cumplimiento realizar la evaluación de las vibraciones mecánicas, así como establecer y ejecutar un programa de medidas. En este caso debe observar y especificar los valores de exposición diaria que dan lugar a una acción de la vibración transmitida al sistema mano-brazo y la vibración transmitida al cuerpo entero, que nunca serán superiores al valor límite salvo en los casos contemplados en la directiva. Los trabajadores han de ser consultados y deben participar en todo lo relacionado con la prevención y diagnóstico precoz de cualquier daño causado por las vibraciones mecánicas.

Para poder evaluar la seguridad y salud de los trabajadores frente a la exposición de vibraciones mecánicas, el empresario usuario debe seguir las normas establecidas como referencia en la Guía Técnica para la evaluación y prevención de los riesgos relacionados con las vibraciones mecánicas del Real Decreto 1311/2005, de 4 de noviembre.

2.4.3.1 Valores

Primero, se definirá el valor límite de exposición y valor de exposición que da lugar a una acción.

Valor límite de exposición

Los valores límite de exposición son aquellos que el trabajador usuario no debe superar en ninguna jornada laboral. Siendo esta una jornada de 8 h.

El valor medio de exposición puede ser extendida a 40 h siempre y cuando el nivel de exposición sea inferior al de acción, pero varíe de un periodo de trabajo a otro, de tal forma que esporádicamente pueda sobrepasar el valor límite. Justificando que los riesgos son inferiores al valor límite de exposición diaria, deberá consultarlo con los trabajadores y comunicarlo a la autoridad laboral (Ayo, 2009).

Valor de exposición que da lugar a una acción

Por el contrario, el valor de exposición que da lugar a una acción, es la situación en la que los valores obtenidos superan los valores establecidos, como consecuencia deberá el empresario usuario realizar el programa de medidas técnicas y de vigilancia de la salud del trabajador (Ayo, 2009).

Según el artículo 3 del Real Decreto 1311/2005, los valores límite de exposición y valores de exposición que dan lugar a una acción son los siguientes:

-Vibración transmitida al **sistema mano-brazo**:

- **Valor límite de exposición diaria** normalizado para un período de referencia de 8 h se fija en $5 m/s^2$.

- **Valor de exposición diaria (valor de acción)** normalizado para un período de referencia de 8 h que da lugar a una **acción** se fija en $2,5 m/s^2$.

El nivel de exposición a vibraciones se compara con el valor límite o con el valor que da lugar a una acción.

-Vibración transmitida al **cuerpo entero**:

- **Valor límite de exposición diaria** normalizado para un período de referencia de 8 h se fija en $1,5 m/s^2$.

- **Valor de exposición diaria** normalizado para un período de referencia de 8 h que da lugar a una acción se fija en $0,5 m/s^2$.

El nivel de exposición a vibraciones de cuerpo entero se calcula tomando el mayor de los valores eficaces de la aceleración ponderada en frecuencia en cada uno de los tres

ejes, habiéndoseles aplicado un factor de ponderación según el eje (Pascual Lizana, 2005, p. 11).

2.4.3.2 Métodos y evaluación de la exposición a la vibración

Para la evaluación de vibraciones mecánicas, el Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST), aconseja seguir una serie de pasos para su evaluación. Ante todo, identificar cada una de las máquinas que se utilizan durante la jornada y determinar $A(8)$, valor de la exposición diaria para un periodo de 8 h, más los valores de las vibraciones (aceleración eficaz a_{hv}).

Para esto, recomiendan en primer lugar evaluar por estimación, por valores declarados de emisión, según el manual de instrucciones de la máquina y como segundo lugar emplear en tal caso los valores de exposición según bases de datos de vibraciones mecánicas como la base de datos BASEVIBRA del Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST).

Sin embargo, si valiéndose de estos datos no es posible evaluar se deberá recurrir a la medición.

Esto por lo tanto quedaría así:

- Evaluación por estimación:

- Datos por los datos del fabricante
- Otras fuentes (como BASEVIBRA)

- Evaluación por medición:

Empleando normativa útil:

- UNE-EN ISO 5349. Vibraciones mecánicas. Medición y evaluación de la exposición humana a las vibraciones transmitidas por la mano. Parte 1 y 2.
- UNE-ISO 2631-1. Vibraciones y choques mecánicos. Evaluación de la exposición humana a las vibraciones de cuerpo entero. Parte 1: Requisitos generales.
- UNE-EN 14253. Vibraciones mecánicas. Medidas y cálculos de la exposición laboral a las vibraciones de cuerpo completo con referencia a la salud. Guía práctica.
- UNE-EN ISO 8041. Respuesta humana a las vibraciones. Instrumentos de medida (Juan y Seva Guevara et al., 2014, p. 1).

2.4.3.2.1 Método de estimación

- La evaluación a partir de los datos

- Datos del fabricante

2.4.3.2.1.1 Mediante datos del fabricante empresario

El método de estimación por datos del fabricante empresario es un método basado en el manual de instrucciones, dado que mediante la información que proporciona el fabricante empresario sobre su máquina, se puede evaluar el riesgo de vibraciones mecánicas.

Para poder obtener estos valores, el empresario ha debido de utilizar códigos de ensayo específicos. Estos documentos están normalizados y el tipo de norma son los llamados tipo C. Los códigos describen todas y cada una de las condiciones en las que debe hacerse un ensayo; mediante estas condiciones se pueden obtener los valores declarados por el fabricante, es decir, las aceleraciones que el fabricante tiene que declarar en el manual de instrucciones como son; a_d (aceleración declarada) o a_e (aceleración emitida) y k (incertidumbre) (Juan y Seva, 2005).

Existe para cada tipo de maquinaria o grupo de máquinas códigos de ensayo particulares en las que se indica la forma de realizar el ensayo de vibraciones, por tanto, a través de estos códigos se pueden conocer las condiciones en que se han desarrollado las medidas y si estas son similares a nuestro caso (Ayo Calvo, 2013).

Los valores de emisión, es decir, los declarados por el fabricante se obtienen aplicando los códigos de ensayo armonizados elaborados por los comités europeos e internacionales de normalización, se basan en la norma UNE EN ISO 20643:2005 Vibración mano-brazo. Máquinas portátiles y guiadas a mano (UNE EN ISO 20643:2008 Vibraciones mecánicas. Maquinaria sujeta y guiada con la mano. Principios para la evaluación de la emisión de las vibraciones. (ISO 20643:2005)). Por ejemplo, se pueden encontrar códigos de ensayos para herramientas neumáticas y otras no eléctricas como la serie de normas UNE ISO 8662 (Anulada por la serie de normas EN ISO 28927) y para herramientas eléctricas, la serie de normas EN 60745 (Anulada por EN 62841) (Pascual Lizana, 2005).

Sin embargo, se debe citar que al principio la medida de la aceleración eficaz que se obtenía era solo de un eje por lo que no era representativo del uso habitual de la máquina

para calcular la a_{hv} o a_{hw} (aceleración eficaz), como podía suceder con normas anteriores a la norma UNE EN ISO 20643:2005. Al encontrarse en esta situación se decide introducir en la medida de lo posible la medición en los tres ejes y es esta norma quien lo sugiere. En la actualidad la mayoría de los códigos de ensayo anteriores a la publicación de dicha norma, se están revisando (Ayo Calvo, 2013). Cabe destacar que la norma UNE EN ISO 20643:2005 es la norma internacional y la UNE EN ISO 20643:2008 es la española, pero es la misma normativa.

Con lo cual se puede decir que antes de que existiera la norma UNE EN ISO 20643 estaban los códigos de ensayo que no se ajustaban a las normas de ensayo de uso, es decir, que no se ajustaban a la realidad.

Por eso se debía revisar los códigos de ensayo y para ello la norma UNE EN ISO 20643 aporta unas directrices para que las normas se ajusten a las normas reales. Debido a que como se ha citado anteriormente la medición se hacía en un solo eje y, como resultado en algunos casos infravaloraban los riesgos que podían sufrir los trabajadores, a partir de esa norma UNE EN ISO 20643 van actualizándose y se van realizando normativas.

Por otro lado, como se ha mencionado anteriormente, en el manual de instrucciones debe aparecer el valor de aceleración de emisión (a_e) y la incertidumbre de la medida (k) por separado, siendo el valor declarado (a_d) la suma del valor de emisión más la incertidumbre (Ayo Calvo, 2013).

Los valores a partir de los cuales el fabricante debe indicar el nivel de vibraciones de su máquina son coincidentes con los valores que dan lugar a una acción, como indica el Real Decreto 1311/2005, nombrados anteriormente. Sistema mano-brazo: $V_{ACCIÓN} 2,5 m/s^2$ y Cuerpo entero: $V_{ACCIÓN} 0,5 m/s^2$ (Ayo, 2009).

Sin embargo, se tienen que dar 4 requisitos para poder evaluar el riesgo por vibraciones anteriormente explicado siguiendo las directrices del informe:

1. Disponer de los valores declarados y de su código de ensayo (EN ISO 20643:2005)
2. Las condiciones de operación que se van a evaluar sean similares a las de los valores de emisión declarados.
3. Equipo en buenas condiciones y mantenimiento según el fabricante.
4. Las herramientas insertadas sean similares a las empleadas para la determinación de los valores de emisión de vibraciones (Juan y Seva, 2005, p. 16).

En el mismo informe se tiene en cuenta la influencia de diferentes parámetros a la hora de evaluar el riesgo, por ejemplo:

- Condiciones de operación de la máquina
- Dirección y localización de las medidas de vibración
- Antigüedad y el estado de la máquina
- Sistemas antivibratorios y agarres resilientes
- Herramientas insertadas

Normalmente, en el manual de instrucciones aparece una aceleración que puede ser la aceleración de emisión (a_e) también nombrada la normal, o incluso la aceleración declarada (a_d). En el caso de que el valor dado sea el de la aceleración de emisión (a_e) hay que sumarle siempre su incertidumbre (k) para que de este modo se obtenga la aceleración declarada (a_d).

Es decir, en fórmula quedaría así:

Ecuación 1: Ecuación aceleración declarada

$$a_d = a_e + k$$

En el caso de haber manuales que no faciliten la incertidumbre (k), se debe emplear la tabla que se encuentra en la Norma UNE-EN 12096:1998 Vibraciones mecánicas. Declaración y verificación de los valores de emisión vibratoria.

Tabla 17: Valor medio "a" multiplicativo

Valor medio, a		Incertidumbre, k
Vibraciones mano brazo	Vibraciones de cuerpo completo	
$2,5 \text{ m/s}^2 < a \leq 5 \text{ m/s}^2$	$0,5 \text{ m/s}^2 < a \leq 1 \text{ m/s}^2$	0,5 a
$a > 5 \text{ m/s}^2$	$a > 1 \text{ m/s}^2$	0,4 a

Nota: Adaptado de AENOR (1998, p. 14).

De esta manera, se debe localizar en el manual de instrucciones la aceleración y observar en qué situación se encontraría la aceleración con respecto a la tabla dada. En el caso de que la aceleración que faciliten en el manual de instrucciones para sistema mano-brazo esté entre los rangos: $2,5 \text{ m/s}^2 < a \leq 5 \text{ m/s}^2$ o para el cuerpo entero: $0,5 \text{ m/s}^2 < a \leq 1 \text{ m/s}^2$ habrá que multiplicar la aceleración, a , por 0,5. Por el contrario, si la aceleración del sistema mano brazo se encuentra en $a > 5 \text{ m/s}^2$ y para el cuerpo completo se encuentra $a > 1 \text{ m/s}^2$ se multiplicará por 0,4.

Como resultado se obtendría la aceleración declarada (a_d) y a continuación se tendría que multiplicarlo por “ c ” que es el factor multiplicativo según los códigos de ensayo que varía en función de la máquina. El informe técnico UNE-CEN/TR 15350 recoge dichos códigos de ensayos y dice que en aquellos casos en los que los ensayos que se hayan realizado no se hayan representado las condiciones de trabajo reales, no se requerirá volver a medir, sino simplemente multiplicar el valor “ c ” por la aceleración declarada (a_d) (AENOR, 2013a).

La UNE CEN/TR 15350 es una de las normas que surge, como se ha citado anteriormente, a raíz de la norma EN ISO 20643 y que al ver que no cumplían con los ensayos reales surge la necesidad de transformar los datos del fabricante para que el usuario a la hora de evaluar las distintas familias de máquinas pueda realizarlo de acuerdo con los valores reales que da la máquina y de esta manera se ajuste a la realidad del uso de la misma máquina.

La expresión quedaría así:

Ecuación 2: Aceleración eficaz

$$a_{hv} = c \cdot a_d$$

Tras obtener el valor a_{hv} se puede calcular el $A(8)$, con la fórmula: $A(8) = a_{hv} \sqrt{\frac{T_{exp}}{T_0}}$, y compararlo con los valores límite de exposición y los valores de exposición que dan lugar a una acción respectivamente. Siendo T_{exp} el tiempo de exposición y T_0 el tiempo de referencia de 8 h.

2.4.3.2.1.2 Otras fuentes

El método de evaluación por estimación mediante el empleo de otras fuentes es el uso de plataformas de instituciones u organismos oficiales como el Instituto de Salud Laboral, universidades, empresas consultoras, asociaciones de fabricante de maquinaria, publicaciones científicas, internet, páginas web, estudios técnicos, consultoras, en los que se encuentran bases de datos de máquinas y herramientas. En ellos se puede consultar por ejemplo, las aceleraciones declaradas y los datos obtenidos tras la evaluación de vibraciones mecánicas como Basevibra, Portale Agenti Fisici Prevenzione e Sicurezza, Department of Public Health and Clinical Medicine Occupational and Environmental Medicine (Juan y Seva, 2005).

La base de datos Basevibra nombrada anteriormente es una aplicación creada por el Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST) que permite la estimación de la aceleración a través de los datos proporcionados por los fabricantes. La base de datos las divide en valores de exposición a vibraciones mano-brazo y valores de exposición a vibraciones cuerpo entero. En ella se puede seleccionar el tipo de máquina, la marca y el modelo. La aplicación selecciona un número x de máquinas según el criterio seleccionado y además da la opción de poder calcular el $A(8)$ a partir de la aceleración eficaz (a_{hv}) más el tiempo de exposición (T_e) (Juan y Seva, 2005).

Una vez calculada el $A(8)$ se compara con los valores límite ($V_{LÍMITE}$) y de acción ($V_{ACCIÓN}$) establecidos en el Real Decreto 1311 para obtener los criterios de evaluación correspondientes (Juan y Seva, 2005).

2.4.3.2.2 Evaluación por medición

En el caso de que por el método de estimación no se haya podido evaluar el riesgo de vibraciones mecánicas el Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST), se establece que hay que recurrir a los métodos de medición. “La medición siguiendo las normas técnicas es un proceso complejo que exige el manejo de una instrumentación específica por parte de técnicos con experiencia” (Juan y Seva Guevara et al., 2014, p. 1).

2.4.3.2.2.1 Sistema mano-brazo

Como ya se ha expuesto anteriormente la evaluación del nivel de exposición puede efectuarse mediante una estimación basada en las informaciones referentes al nivel de emisión de los equipos de trabajo empleados, que han sido facilitados por los fabricantes o mediante bases de datos que existen en determinados organismos.

En la Guía técnica para la evaluación y prevención de los riesgos relacionados con las vibraciones mecánicas del Real Decreto 1311/2005, de 4 de noviembre en el anexo A “Vibración transmitida al sistema mano-brazo”, especifica qué tipo de normativa hay que seguir para poder calcular y evaluar las vibraciones mecánicas.

La evaluación por medición es un sistema que requiere aparatos especiales para poder medir los valores. Para poder medir los valores se emplea el vibrómetro y el acelerómetro de conformidad con UNE EN ISO 8041.

Primero de todo, a la hora de evaluar la exposición, se debe prestar debida atención a la norma UNE-EN ISO 5349-1:2002 Vibraciones mecánicas. Medición y evaluación de la exposición humana a las vibraciones transmitidas por la mano. Parte 1: Requisitos generales. (ISO 5349-1:2001). A nivel de equivalencias internacionales esta normativa UNE presenta las normas: EN ISO 5349-1:2001 y ISO 5349-1:2001.

Cuando se realice la medición, de conformidad con el artículo 4.1, los métodos empleados deberán ser representativos de la exposición del trabajador, deberán adaptarse a las características específicas de las vibraciones mecánicas que se vayan a medir, y a los factores ambientales y las características de los aparatos de medidas. Para ello, se emplea la norma UNE-EN ISO 5349-2:2002 Vibraciones mecánicas. Medición y evaluación de la exposición humana a las vibraciones transmitidas por la mano. Parte 2: Guía práctica para la medición en el lugar de trabajo. (ISO 5349-2:2001). Esta normativa informa que debe ser leída junto con la UNE-EN ISO 5349-2:2002/A1:2016 (ISO 5349-2:2001/Amd 1:2015). A nivel de equivalencias internacionales con esta normativa están las normas: EN ISO 5349-2:2001 e ISO 5349-2:2001.

La normativa señala que, cuando se trate de máquinas que deban sostenerse con ambas manos, las mediciones deberán realizarse en cada mano y la evaluación será por referencia al valor más elevado; también se dará información sobre la otra mano.

Por otro lado, según el artículo 4, 4-d) de la Guía técnica para la evaluación y prevención de los riesgos relacionados con las vibraciones mecánicas, el Real Decreto 1311/2005 establece que se debe tener en cuenta las vibraciones que produce la máquina en otros equipos o dispositivos de trabajo que esté empleando el trabajador como por ejemplo un andamio y que estas vibraciones no interfieran en la estabilidad del trabajador y como consecuencia en su seguridad. También, se debe tener en cuenta que a la hora de la medición se pueda perder destreza manual, haciendo que se produzca un aumento de percepción táctil y/o térmica. Incluso que la vibración pueda afectar a la percepción de señal pudiendo acarrear riesgos en la salud del trabajador (Pascual Lizana, 2005).

2.4.3.2.2.1.1 Metodología para evaluar la exposición del sistema mano-brazo

Para poder medir la exposición se debe seguir una serie de normativas.

Según la guía técnica para evaluación y prevención de los riesgos relacionados con las vibraciones mecánicas, la evaluación de la exposición a vibraciones por medición consta de las siguientes etapas: "Identificación de las operaciones discretas que constituyen el modo normal de trabajo. Selección de las operaciones a medir. Medición de la aceleración para cada operación seleccionada. Estimación del tiempo de exposición diario representativo de cada operación identificada" (Pascual Lizana, 2005, p. 47).

Respecto al instrumental y a los procedimientos establecidos por las normativas, se encuentra, en el apéndice 3 de la Guía técnica para la evaluación y prevención de los riesgos relacionados con las vibraciones mecánicas, un resumen en el que explica y proporciona una metodología de medición acorde con los criterios contemplados en el R.D 1311/2005.

Se observa que en este apéndice el instrumental de medida empleado consta de un vibrómetro que se conecta con el transductor (acelerómetro) que capta las vibraciones y que está conectado con un cable. También se pueden emplear analizadores de vibraciones en tiempo real, que son sistemas de medida más sofisticados que permiten almacenar los valores de vibración en el tiempo y obtener el análisis de frecuencia. Se suele utilizar este tipo de sistemas cuando existe alguna duda sobre la calidad de la señal de aceleración, y para identificar frecuencias dominantes y armónicos. Este instrumental también puede ser útil en el caso de choques simples repetidos (Pascual Lizana, 2005).

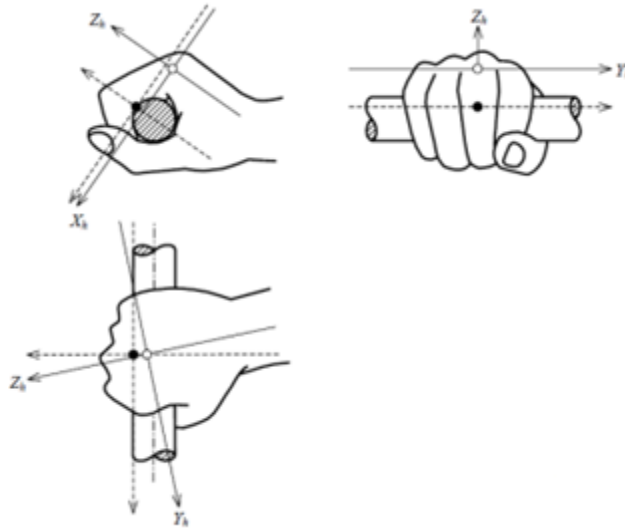
Con respecto a la medición de las vibraciones transmitidas a través de las manos, se evalúa mediante la aceleración medida según tres ejes (X , Y , Z). Para ello hay dos sistemas de referencia: el sistema biodinámico y el basicéntrico.

El biodinámico es aquel en el cual el origen de coordenadas está ubicado en la cabeza del tercer metacarpo. El eje Z tiene la dirección del eje longitudinal de dicho hueso, el eje X es perpendicular al plano de la palma de la mano y el eje Y es perpendicular a ambos (Miyara, 2005). Se podría decir que el sistema biodinámico tiene como referencia, para situar los ejes de coordenadas, el cuerpo humano.

Por otro lado, el sistema basicéntrico es aquel en el cual el eje es paralelo a la máquina, es decir a la empuñadura.

En este caso, el acelerómetro, dispositivo que recoge los valores para la medición, se coloca de tal forma que el eje Z es el que va a lo largo del brazo, el eje X es el que atraviesa la palma de la mano y el eje Y es el que va paralelo al agarre (Juan y Seva Guevara Begoña, Leiva Pérez Juan, Sánchez-Guardamino Elorriaga Rafael, 2018).

Figura 9: Sistema biodinámico y basicéntrico



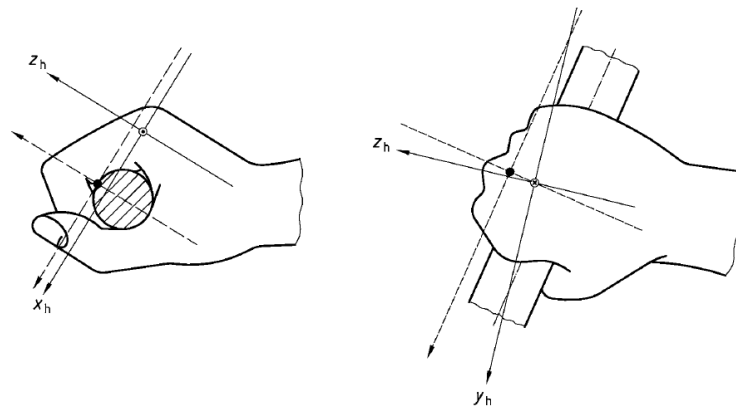
Línea llena = Sistema biodinámico
Línea a trazos = Sistema basicéntrico

Nota: Adaptado de Miyara F. (2005, p. 3).

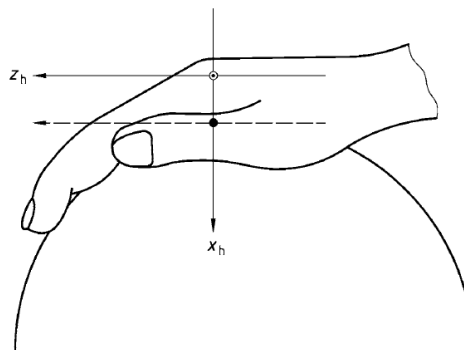
Como consecuencia, el sistema biodinámico va a tener un ángulo respecto al basicéntrico, pero este ángulo no debe ser mayor a 15 grados (Juan y Seva Guevara Begoña, Leiva Pérez Juan, Sánchez-Guardamino Elorriaga Rafael, 2018).

Sin embargo, para la medición de las vibraciones se puede definir el sistema de coordenadas como el sistema de coordenadas basicéntricas (AENOR, 2002, p. 9).

Figura 10: Sistema de coordenadas basicéntricas y posición de la palma



Esta posición es una posición de agarre en la que la mano adopta un agarre normalizado de una barra cilíndrica



Posición de la palma plana, la palma presiona sobre una esfera

Nota: Adaptado de AENOR (2002, p. 10).

En cuanto a la colocación, debe fijarse el acelerómetro de forma rígida a la superficie vibrante y colocarse de manera que no produzca molestias ni interferencias en la tarea que esté realizando el trabajador. Para vibraciones mano-brazo, se colocará el acelerómetro en el punto de entrada de la vibración hacia la mano y el brazo del trabajador, por ejemplo en la zona de agarre, mango, o en la mitad del ancho de la mano cuando se sostiene una herramienta motorizada (Pascual Lizana, 2005).

En la norma UNE-EN ISO 5349-2:2002 aparecen ejemplos de los puntos de localización para herramientas que poseen empuñaduras o zonas de agarre rígidas. En muchos casos es difícil realizar las mediciones en esos puntos nombrados, y para ello se suelen utilizar adaptadores entre los dedos que se fijan rígidamente a la empuñadura y sobre los que se montan los acelerómetros (Pascual Lizana, 2005).

La misma norma citada en el punto anterior (UNE-EN ISO 5349-2:2002) expone en el anexo D los métodos para fijar los acelerómetros a las superficies, herramientas o piezas vibrantes y adaptadores a la mano según el tipo de superficie (Pascual Lizana, 2005).

Durante la medición pueden existir diferentes problemas con respecto al cable conector como la pérdida de señal, señales eléctricas ficticias a las frecuencias reales de trabajo, que se produzca el efecto triboeléctrico y de herramientas percutoras carentes de sistemas antivibratorios que podrían sobrecargar mecánicamente el sistema piezoeléctrico dando lugar a valores de señal erróneos. Una forma de subsanar este error la encontraríamos mediante el empleo de filtros mecánicos, en el Anexo C de la Norma UNE EN ISO 5349-2:2002 (Pascual Lizana, 2005, p. 47).

Los equipos de análisis y medida deben ser de conformidad con la norma UNE-EN ISO 8041:2006 “Respuesta humana a las vibraciones. Instrumentos de medida (ISO 8041:2005)” que se encuentra actualizada por UNE-EN ISO 8041-1:2018: Respuesta humana a las vibraciones. Instrumentos de medida. Parte 1: Instrumento de medida para uso general (ISO 8041-1:2017).

Centrándose en las mediciones, estas se deben realizar en los tres ejes de referencia (X_h, Y_h, Z_h) del sistema de referencias. Para cada uno de los ejes de referencias se obtiene su valor de aceleración continua equivalente ponderada en frecuencia ($a_{hwx}, a_{hwy}, a_{hwz}$). A partir de ellos se obtendrá el valor total de aceleración equivalente ponderada en frecuencia mediante la siguiente expresión (Pascual Lizana, 2005):

Ecuación 3: Aceleración equivalente ponderada en frecuencia

$$a_{hv} = \sqrt{(a_{hwx})^2 + (a_{hwy})^2 + (a_{hwz})^2}$$

El subíndice "h", significa hand = mano en inglés

Nota: Adaptado de Pascual Lizana C. (2005, p. 48).

El acelerómetro recoge desplazamientos según vibra la máquina. Ese desplazamiento lo transforma en una señal eléctrica que llega al vibrómetro. El vibrómetro integra esa señal. En lugar de obtener un único valor ponderado en frecuencia, da la posibilidad de ver cómo se distribuye ese valor en las distintas frecuencias aplicando un filtro, dando un coeficiente de

ponderación para cada frecuencia. Es decir, aquellos valores que son más perjudiciales se multiplican por valores muy poco por encima de uno y aquellos que son menos perjudiciales los multiplican por un factor menor que uno (Juan y Seva Guevara Begoña, Leiva Pérez Juan, Sánchez-Guardamino Elorriaga Rafael ,2018).

Como ya se ha ilustrado previamente, las vibraciones se determinan según tres ejes ortogonales, para ello se puede servir de acelerómetros monoaxiales que son aquellos que miden la aceleración según uno de los ejes y sin embargo los acelerómetros triaxiales miden los tres ejes sincrónicos (Pascual Lizana, 2005) . En el caso de que se emplee el acelerómetro monoaxial habrá que realizar la medición de cada uno de los ejes y llevar a cabo la ecuación anterior para obtener la aceleración eficaz (a_{hv}).

Conocimiento del tiempo de exposición

Uno de los factores que interviene en la medición para el cálculo del $A(8)$ es el tiempo durante el cual, diariamente, el trabajador está expuesto a las vibraciones. Debemos conocer también qué tareas realiza. Puede ser que el trabajador realice varias tareas en las que esté expuesto a las vibraciones, por eso debemos conocer el tiempo de exposición de cada una de ellas (Pascual Lizana, 2005).

Para determinar el tiempo de exposición se pueden organizar en diferentes tiempos. En el anexo E de la presente normativa UNE-EN ISO 5349:2, menciona cuatro (Pascual Lizana, 2005, pp. 48–49):

1-Mediciones de larga duración en operaciones con equipos en funcionamiento continuado.

Equipo: funciona de manera continua durante un largo periodo de tiempo, la mano siempre está en contacto con la herramienta o pieza vibrante. Son trabajos que se realizan con pisón compactador, con vibradores de hormigón o con segadoras de césped.

Medición: se realiza en el transcurso de la utilización en intervalos largos, nos proporcionarán valores específicos de la vibración.

Tiempo de exposición: es el mismo que en el que se emplea el equipo.

2-Mediciones de larga duración en operaciones con equipos en funcionamiento intermitente.

Equipo: no está en continuo funcionamiento, pero la mano no abandona la posición, es decir sigue en contacto con el equipo vibrante durante los descansos. Trabajos que emplean pulidoras, rompedoras de pavimento, etc.

Medición: Las mediciones se realizan durante el uso incluyendo los periodos cortos de descanso sin exposición ya que forma parte del proceso de ejecución, no alterando las posiciones de sus manos de manera significativa.

Tiempo de exposición: el tiempo de utilización del equipo.

3-Mediciones de corta duración en operaciones con equipos en funcionamiento intermitente.

Equipo: Maquinaria que el trabajador/a durante el proceso realiza descansos durante la operación o deja de tener contacto con la herramienta. Empleo de cepilladoras, sierras de cadena o martillos neumáticos.

Medición: Corta duración de la magnitud de las vibraciones a lo largo de un periodo de operación continuada.

Tiempo de exposición: el tiempo de utilización del equipo.

4-Mediciones de duración fija en operaciones con equipos que producen impactos o choques.

Equipo: Herramientas en las que el trabajador/a está expuesta a impactos o choques simples o múltiples, con periodos de interrupción entre cada uno de ellos. Es el ejemplo de llaves de impacto.

Medición: De duración fija con un número de impactos, magnitud ponderada de las vibraciones.

Tiempo de exposición: Multiplicando la duración de la medida por el número de impactos por día y dividiendo el resultado por el número de impactos en cada periodo.

Es recomendable recopilar varias muestras en diferentes horas del día y promediarlas para poder obtener una buena aproximación de una medida representativa de las condiciones reales de la exposición.

“El promedio de la magnitud de las vibraciones de una serie de N muestras de magnitudes de las vibraciones viene dada por la siguiente ecuación” (Pascual Lizana, 2005, p. 49) :

Ecuación 4: Aceleración equivalente ponderada en frecuencia de N muestras

$$a_{hw} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{j=1}^N a_{hwj}^2 t_j}$$

$$T = \sum_{j=1}^N t_j$$

Donde:

a_{hwj} la magnitud de las vibraciones medida para las muestras j ;

t_j duración de la medición de las muestras j .

Nota: Adaptado de Pascual Lizana C. (2005, p. 49-50).

El tiempo total de la medición, es decir, el número de muestras multiplicado por la duración de cada medición que debe ser de al menos de 1 *min* y se debe componer como mínimo de tres muestras para cada operación. La medición de corta duración de tiempo inferior a 8 s no es fiable y se debe evitar. En el caso de que no sea posible realizar las mediciones durante 1 *min*, se debe recurrir a procedimientos de trabajo simulados para obtener la duración mínima de medición (Pascual Lizana, 2005).

También, se debe conocer la duración de la exposición diaria para cada fuente de vibración. El tiempo diario se basa en una medida del tiempo de exposición real durante un periodo de uso normal, es decir, por ejemplo, durante un ciclo de trabajo completo o por un periodo típico de 30 *min*. Asimismo, se puede basar en información sobre la pauta de trabajo que realice, es decir, el número de ciclos diarios o duración de la jornada de trabajo (Pascual Lizana, 2005).

Al final, el tiempo de exposición diario se obtiene multiplicando la duración de ese ciclo de trabajo por el número de ciclos por día. Cuando se trata de medición durante el contacto de la mano con la herramienta y sean mediciones de corta duración o intermitentes, será imprescindible evaluar el tiempo de contacto diario. Para el caso de herramientas en las que se deban emplear ambas manos, las mediciones se realizarán en cada mano.

2.4.3.2.3 Cálculo de $A(8)$

Cuando ya se disponga del valor de la aceleración eficaz (a_{hv}) y del tiempo de exposición (T_{exp}), podremos determinar la exposición diaria a vibraciones normalizado para un periodo de 8 h.

Vibraciones mano-brazo y una sola fuente de exposición

El valor de $A(8)$ se calcula mediante esta fórmula (Pascual Lizana, 2005, p. 43) :

Ecuación 5: Cálculo de $A(8)$

$$A(8) = a_{hv} \sqrt{\frac{T_{exp}}{T_0}}$$

Donde:

$$a_{hv} = \sqrt{(a_{hwx}^2 + a_{hwy}^2 + a_{hwz}^2)}$$

Subíndice h = vibraciones mano-brazo.

Nota: Adaptado de Pascual Lizana C. (2005, p. 43).

Estas ecuaciones se pueden encontrar en las normas UNE-EN-ISO 5349-1 y UNE-EN-ISO 5349-2, que son las versiones oficiales de la adaptación de la ISO 5349 a la que remite el R.D. 1311/2005.

Vibraciones mano-brazo y exposición a varias fuentes

El procedimiento para la determinación del cálculo del $A(8)$, debido a diferentes exposiciones a varias fuentes de vibración, se obtiene por los valores parciales correspondientes a cada exposición, empleando la fórmula $A(8)$ expuestas en el apartado anterior, pues el valor global de esta exposición a vibraciones sería la raíz cuadrada de la suma

de los cuadrados de cada una de estas exposiciones y quedaría representado en la siguiente expresión (Pascual Lizana, 2005, p. 43) :

Ecuación 6: Cálculo del $A(8)$ de exposición a varias fuentes de vibración

$$A(8) = \sqrt{A_1(8)^2 + A_2(8)^2 + A_2(8)^2 + \dots}$$

Nota: Adaptado de Pascual Lizana C. (2005, p. 43).

Evaluación de exposición a vibraciones para periodos de un día

La norma UNE-EN-ISO 5349-2 con relación a la medición, propone en su Anexo B que para la evaluación de vibraciones para periodos superiores a un día se utilice la expresión (Pascual Lizana, 2005, p. 43) :

Ecuación 7: Cálculo del $A(8)$ para periodos superiores a 1 día

$$A_{típica}(8) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{d=1}^N A_d^2(8)}$$

$A_d(8)$ = exposición a vibraciones en el día d .

N = es el número de días sobre el que se determina la exposición típica diaria estimada sobre un período de N días.

$A_{típica}(8)$ = exposición típica diaria estimada sobre un período de N días.

Nota: Adaptado de Pascual Lizana C. (2005, p. 43).

Cabe la posibilidad de poder evaluar la exposición en un periodo de duración de 40 horas (serían 5 días, una semana de trabajo), bajo las condiciones descritas en el artículo 3, utilizando la expresión que se presenta a continuación y este valor de exposición se comparará con los valores límite ($V_{LÍMITE}$) y con los valores que dan lugar a una acción ($V_{ACCIÓN}$) para evaluar el riesgo (Pascual Lizana, 2005, p. 44).

Ecuación 8: Cálculo del $A(8)$ en un periodo de duración de 40 h

$$A_{típica}(8) = \sqrt{\frac{1}{5} \sum_{d=1}^5 A_d^2(8)}$$

Nota: Adaptado de Pascual Lizana C. (2005, p. 44).

Determinación y evaluación de los riesgos

Cuando ya se ha obtenido el valor $A(8)$, se compara con el valor que da lugar a una acción y con el valor límite, y que como consecuencia conducirá a tres posibles escenarios (Pascual Lizana, 2005) :

- $A(8)$ esté por debajo del valor que da lugar a una acción.
- $A(8)$ esté entre este y el valor límite.
- $A(8)$ esté por encima de él.

En cada uno de estos supuestos las acciones a realizar serán diferentes según se establece en los artículos 5, 6 y 8 (Pascual Lizana, 2005).

Según F. Ayo (2009), las medidas que se deberá adoptar dependerán de la situación que se obtenga:

- Primera posibilidad: $A(8)$ esté por debajo del valor que da lugar a una acción $A(8) < V_{ACCIÓN}$ (Indica que el riesgo es aceptable)
 - Eliminar los riesgos o reducir al nivel más bajo posible.
 - La reducción de los riesgos se basa en los principios de la acción preventiva establecida en el artículo 15 de la Ley 31/1995.
 - Debemos tener en cuenta que la incertidumbre asociada a este tipo de medidas es alta debido a la cantidad de factores que intervienen.
- Segunda posibilidad: $A(8)$ esté entre el valor que da lugar a una acción y el valor límite $V_{ACCIÓN} < A(8) < V_{LÍMITE}$ (Implica la necesidad de adoptar una serie de medidas indicadas en el artículo 5 del R.D 1311/2005).
 - Programa de medidas técnicas y/o de organización

- Otros métodos de trabajo (UNE-CR 1030-2:1997).
- Elección del equipo de trabajo adecuado. (Manual de instrucción).
- Suministro de equipo auxiliar (Asientos, amortiguadores, etc).
- La concepción y disposición de los lugares y puestos de trabajo.
- Programas de mantenimiento de los equipos de trabajo, del lugar de trabajo y de los puestos de trabajo.
- Información y formación de los trabajadores sobre el manejo correcto y seguro del equipo de trabajo.
- Limitación de la duración e intensidad de la exposición.
- Ordenación adecuada del tiempo de trabajo (Periodos de descanso).
- Protección del frío y de la humedad (Suministro de ropa adecuada).
- Vigilancia de la salud.

- Tercera posibilidad: $A(8)$ esté por encima del valor límite $A(8) > V_{LÍMITE}$ (Obliga a adoptar de inmediato medidas, para que los trabajadores/as no estén expuestos/as a niveles de vibraciones que superen el valor límite según establece el artículo 5.

- Aplicar medidas provisionales (limitación tiempo de exposición).
- Ejecutar el programa de medidas técnicas y/u organizativas (igual que en el caso anterior).
- Información y formación de los trabajadores sobre el manejo correcto y seguro del equipo de trabajo.
- Vigilancia de la salud (Ayo, 2009).

Durante la jornada laboral puede suceder que sin haber superado durante las 8 h el valor límite quepa la posibilidad de que puedan existir valores instantáneos superiores a $5 m/s^2$ y $1,5 m/s^2$, para vibraciones mano-brazo y cuerpo entero. También, se debe tener en cuenta que los valores que dan lugar a una acción, es decir, los valores de acción, no deben entenderse como valores por debajo de los cuales no existen riesgos derivados de la exposición a vibraciones. Pues como bien se ha ido mencionando dependerá de numerosos factores como la susceptibilidad individual de los trabajadores, o el ambiente, si es frío o húmedo, entre otros (Pascual Lizana, 2005).

2.4.3.2.4 Evaluación a través del método de puntos

El método por puntos es un método que sirve como alternativas a los dos métodos nombrados anteriormente, es decir, el método por medición y por estimación.

Este procedimiento sigue las Normas EN ISO 5349-1 y EN ISO 5349-2, sin embargo, en vez de medir in situ, es decir, en el lugar de trabajo, los métodos que se emplean en este informe técnico son valores de vibración existentes procedentes de otras fuentes de información, como los facilitados por los fabricantes de maquinaria según los requisitos de la Directiva de Máquinas 2006/42/CE (AENOR, 2013a).

Se necesita para la valoración, la aceleración eficaz (a_{hv}), que puede ser determinada por estimación o por medición, y el tiempo de exposición para obtener el parámetro $A(8)$, que determina la exposición diaria a vibraciones (Juan y Seva Guevara et al., 2014).

Se trata de un método sencillo que emplea una tabla de puntos P_E en el que nos muestra la exposición a vibraciones como una función del valor total equivalente de las vibraciones y la duración de exposición (Juan y Seva Guevara et al., 2014).

Ecuación 9: Punto de exposición

$$P_E = \left(\frac{a_{hv,eq}}{2,5m/s^2} \right)^2 \frac{T}{8h} \times 100 = A^2(8)$$

$P_E = \text{Punto de Exposición}$

Nota: Adaptado de Juan y Seva Guevara Begoña, Leiva Pérez Juan, Sánchez-Guardamino Elorriaga Rafael (2019).

Los valores de oscilación empleados para la evaluación deben de ser representativos de los que tienen lugar durante el empleo de la máquina. En el caso de que no se pueda determinar conviene disponer de datos adecuados que manifiesten la vibración bajo las circunstancias específicas del trabajo o si los resultados obtenidos no ayudan a determinar si es o no probable que se supere el valor límite de exposición o el valor de exposición que da lugar a una acción, se podrán realizar mediciones in situ, en el lugar de trabajo (AENOR, 2013a).

En la tabla 18 de esta norma podemos observar los valores de aceleración $a_{hv,eq}$ de duración de la exposición T por los que se puede resumir en:

Tabla 18: Determinación de los puntos de exposición a vibraciones a partir del valor total equivalente de vibración y la duración de la exposición asociada

Valor total equivalente de vibración $a_{hv,eq}$ m/s^2	Duración de la exposición T									
	0,1h	0,2h	0,5h	1h	2h	3h	4h	5h	6h	8h
	6 min	12 min	30 min	60 min	120 min	180 min	240 min	300 min	360 min	480 min
2,5	1	3	6	13	25	38	50	63	75	100
3	2	4	9	18	36	54	72	90	108	144
3,5	2	5	12	25	49	74	98	123	147	196
4	3	6	16	32	64	96	128	160	192	256
4,5	4	8	20	41	81	122	162	203	243	324
5	5	10	25	50	100	150	200	240	300	400
5,5	6	12	30	61	121	182	242	303	363	484
6	7	14	36	72	144	216	288	360	432	576
6,5	8	17	42	85	169	254	338	423	507	676
7	10	20	49	98	196	294	392	490	588	784
7,5	11	23	56	113	225	338	450	563	675	900
8	13	26	64	128	256	384	512	640	768	1024
8,5	14	29	72	145	289	434	578	723	867	1156
9	16	32	81	162	324	486	648	810	972	1156
9,5	18	36	90	181	361	542	722	903	1083	1444
10	20	40	100	200	400	600	800	1000	1200	1600

Valor que da lugar a una acción: $2,5 m/s^2 = 100$ puntos

Valor límite: $5 m/s^2 = 400$ puntos

El color gris claro representa una situación de riesgo y el gris oscuro representa un riesgo extremo

Nota: Adaptado de AENOR (2013, p.18).

En los anexos D, E y F de esta normativa se muestran ejemplos de la utilización de los puntos de exposición a vibraciones.

En la tabla siguiente se detalla las acciones que deberá realizar el empresario en función de los resultados obtenidos en los puntos de exposición $P_{E\ tot}$ de la tabla anterior.

Tabla 19: Acciones requeridas por el empresario para diferentes niveles de exposición a vibraciones según la Directiva UE 2002/44/CE

Puntos totales de exposición a vibraciones $P_{E\ tot}$	Exposición diaria a vibraciones $A(8)$	Intervalo de exposición a vibraciones	Acciones a adoptar por el empresario
$P_{E\ tot} \leq 100$	$A(8) \leq 2,5\ m/s^2$	No se supera el valor de exposición que da lugar a una acción	Adoptar acciones razonables para reducir al mínimo los riesgos de la exposición a vibraciones. Proporcionar al trabajador información y formación sobre vibraciones.
$100 < P_{E\ tot} \leq 400$	$2,5\ m/s^2 < A(8) \leq 5\ m/s^2$	Por encima del valor de exposición que da lugar a una acción, pero no se supera el valor límite de exposición	Implementar un programa de medidas para reducir al mínimo la exposición y los riesgos. Asegurara que se proporciona vigilancia para la salud para los trabajadores expuestos.
$400 < P_{E\ tot}$	$5\ m/s^2 < A(8)$	Por encima del valor límite de exposición	Adoptar acciones inmediatas para llevar la exposición por debajo del valor límite de exposición

El color gris oscuro es intolerable, es decir, se debe adoptar medidas inmediatas para llevar la exposición por debajo del valor límite de exposición. Además, se implementará un programa de medidas de control y de vigilancia de la salud si la exposición a la vibración continúa por encima del valor de exposición que da lugar a una acción.

Nota: Adaptado de AENOR (2013, p.19).

Antes de evaluar se debe comprobar si se le aplica la incertidumbre (k) o no. De esa manera se podrá corroborar en el manual de instrucciones.

Como resultado dependiendo de la evaluación obtenida habrá que actuar según se esté en riesgo o no y aplicar el plan correspondiente a su caso.

2.4.4 Normativa INSST

La tabla de Normativas que se presenta a continuación es una tabla resumen de elaboración propia que reúne los procedimientos y las normas para poder evaluar las vibraciones mecánicas al sistema mano-brazo.

**CAPÍTULO 2: REPERCUSIÓN DE LAS VIBRACIONES MECÁNICAS EN ENFERMEDADES
CONSIDERADAS PROFESIONALES**

Tabla 20: Tabla resumen. Procedimientos y normas para evaluar las vibraciones mecánicas en el sistema mano-brazo

Normativas evaluación de vibraciones mecánicas	-DIRECTIVA DE MÁQUINAS 2006/42/CE que ha sido transpuesta por: REAL DECRETO 1644/2008 de 10 de octubre por el que se establecen las normas para la comercialización y puesta en servicio de las máquinas. -DIRECTIVA 2002 44/CE disposiciones mínimas de seguridad y salud relativa a la exposición de los trabajadores a los riesgos derivados de los agentes físicos. (vibraciones). Ha sido transpuesta por: REAL DECRETO 1311/2005 , de 4 de noviembre, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores frente a los riesgos derivados o que puedan derivarse de la exposición a vibraciones mecánicas. Actualizada al Real Decreto 330/2009	1-Evaluación por estimación	1.1-Datos fabricante	Cuando no conocemos la K: UNE EN 12096:1998 Vibraciones mecánicas. Declaración y verificación de los valores de emisión vibratoria.	Códigos de ensayo	Basados en la norma siguiente ya actualizada: UNE EN ISO 20643: 2008 Vibraciones mecánicas. Maquinaria sujeta y guiada con la mano. Principios para la evaluación de la emisión de las vibraciones. (ISO 20643: 2005)	Otros Códigos de ensayo	Códigos de ensayo para herramientas neumáticas y otras no eléctricas como la serie de normas UNE ISO 8662 (Anulada por la serie de normas EN ISO 28927)	Para la evaluación de la exposición a las vibraciones	Informe: UNE CEN/TR 15350 IN: 2008, Vibraciones mecánicas. Directivas para la evaluación de la exposición a las vibraciones transmitidas por la mano usando la información disponible la información proporcionada por los fabricantes	
								Códigos de ensayo para herramientas eléctricas, la serie de normas EN 60745 (Anulada por EN 62841)			
								1.2 - Otras fuentes			
								1.2 - Otras fuentes			
Normativas evaluación de vibraciones mecánicas	Normativas evaluación de vibraciones mecánicas	2-Evaluación por medición	Sistema mano-brazo	-UNE EN ISO 5349-1:2002 Vibraciones mecánicas. Medición y evaluación de la exposición humana a las vibraciones transmitidas por la mano. Parte 1: Requisitos generales. (ISO 5349-1: 2001). A nivel de equivalencias internacionales con esta normativa AENOR nos presenta las normas: EN ISO 5349-1: 2001 y ISO 5349-1:2001	Códigos de ensayo	Basados en la norma siguiente ya actualizada: UNE EN ISO 20643: 2008 Vibraciones mecánicas. Maquinaria sujeta y guiada con la mano. Principios para la evaluación de la emisión de las vibraciones. (ISO 20643: 2005)	Otros Códigos de ensayo	Códigos de ensayo para herramientas neumáticas y otras no eléctricas como la serie de normas UNE ISO 8662 (Anulada por la serie de normas EN ISO 28927)	Para la evaluación de la exposición a las vibraciones	Informe: UNE CEN/TR 15350 IN: 2008, Vibraciones mecánicas. Directivas para la evaluación de la exposición a las vibraciones transmitidas por la mano usando la información disponible la información proporcionada por los fabricantes	
				-UNE EN ISO 5349-2: Guía práctica para la medición en el lugar de trabajos. (ISO 5349-2:2001). (Esta normativa AENOR nos informa que debe ser leída junto con UNE EN ISO 5349-2:2002/A:2016 (ISO 5349-2:2001/Amd 1: 2015) A nivel de equivalencias internacionales con esta normativa ENOR nos presenta las normas: EN ISO 5349-2: 2001 y ISO 5349-2:2001							Códigos de ensayo para herramientas eléctricas, la serie de normas EN 60745 (Anulada por EN 62841)

Tabla 21: Tabla de elaboración propia. Fórmulas de la normativa para la evaluación de vibraciones mecánicas.

Evaluación de vibraciones mecánicas. FÓRMULAS	1- Por estimación		1.1-Datos del fabricante Manual de instrucciones	a_d (aceleración declarada) ó a_e (aceleración nominal o de emisión) Para obtener: a_{hv} (aceleración eficaz)	1.1.1-Suma de la incertidumbre $a_d = a_e + K$ a_e =aceleración nominal o de emisión. K=incertidumbre	1.1.2- Aplicar factor multiplicativo según código de ensayo. UNE CEN/TR 15350 IN: 2008 $a_{hv} = c \times a_d$	2- Por medición	Institutos, organismos, etc....	Cuando no conocemos la K: Mirar la tabla de valor medio. UNE-EN 12096:1998 $K = a_e \times 0,4$ ó $K = a_e \times 0,5$							
	1.2-Otras fuentes															
	1- Por estimación															
	1.2-Otras fuentes															
Evaluación de exposición para periodos de un día								Cálculo $A(8)$	Fuente de exposición	1	$(*)A(8) = a_{hv} \sqrt{\frac{T_{exp}}{T_0}}$ $a_{hv} = \sqrt{(a_{hwx}^2 + a_{hwy}^2 + a_{hwz}^2)}$ En los 3 ejes: X, Y, Z	Método por puntos	Vibración cuerpo entero	n	Pasos: 1) Cálculo de $A(8)$ para las diferentes fuentes. Fórmula (*) 2) Suma de todas las $A(8)$. $A(8) = \sqrt{A_1(8)^2 + A_2(8)^2 + \dots}$	$P_{E.TOTAL} \leq 100 \rightarrow A(8) \leq 0,5 \text{ m/s}^2$ $100 < P_{E.TOTAL} \leq 529 \rightarrow 0,5 \text{ m/s}^2 < A(8) \leq 1,15 \text{ m/s}^2$ $529 < P_{E.TOTAL} \rightarrow 1,15 \text{ m/s}^2 < A(8)$
Evaluación de la exposición en un periodo de 40 h = 5 días.									Evaluación de exposición para periodos de un día		$A_{típica}(8) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{d=1}^N A_d^2(8)}$ $A_d(8)$ = exposición a vibraciones en el día d. N = es el número de días sobre el que se determina la exposición típica diaria estimada sobre un periodo de N días. $A_{típica}(8)$ = exposición típica diaria estimada sobre un periodo de N días.			$A_{típica}(8) = \sqrt{\frac{1}{5} \sum_{d=1}^5 A_d^2(8)}$		$P_{E.TOTAL} \leq 100 \rightarrow A(8) \leq 2,5 \text{ m/s}^2$ $100 < P_{E.TOTAL} \leq 400 \rightarrow 2,5 \text{ m/s}^2 < A(8) \leq 5 \text{ m/s}^2$ $400 < P_{E.TOTAL} \rightarrow A(8) > 5 \text{ m/s}^2$
Evaluación de la exposición en un periodo de 40 h = 5 días.								Evaluación de la exposición en un periodo de 40 h = 5 días.		$A_{típica}(8) = \sqrt{\frac{1}{5} \sum_{d=1}^5 A_d^2(8)}$		$P_{E.TOTAL} \leq 100 \rightarrow A(8) \leq 2,5 \text{ m/s}^2$ $100 < P_{E.TOTAL} \leq 400 \rightarrow 2,5 \text{ m/s}^2 < A(8) \leq 5 \text{ m/s}^2$ $400 < P_{E.TOTAL} \rightarrow A(8) > 5 \text{ m/s}^2$				
Evaluación de la exposición en un periodo de 40 h = 5 días.								Evaluación de la exposición en un periodo de 40 h = 5 días.		$A_{típica}(8) = \sqrt{\frac{1}{5} \sum_{d=1}^5 A_d^2(8)}$		$P_{E.TOTAL} \leq 100 \rightarrow A(8) \leq 2,5 \text{ m/s}^2$ $100 < P_{E.TOTAL} \leq 400 \rightarrow 2,5 \text{ m/s}^2 < A(8) \leq 5 \text{ m/s}^2$ $400 < P_{E.TOTAL} \rightarrow A(8) > 5 \text{ m/s}^2$				

Tabla 22: Tabla de elaboración propia. Duración de la medición

FÓRMULAS	<p style="text-align: center;">DURACIÓN DE LA MEDICIÓN</p> <p>(para calcular las diferentes aceleraciones eficaces (a_{hw}) de diferentes máquinas o de la misma máquina utilizadas en periodos determinados de tiempo)</p>	$a_{hw} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{j=1}^N a_{hwj}^2 t_j}$ <p>a_{hwj} = la magnitud de las vibraciones medida para las muestras j;</p> <p>t_j = duración de la medición de las muestras j.</p> $T = \sum_{j=1}^N t_j$
----------	--	---

Finalmente, se aporta la relación de todos los comités técnicos actuales de AENOR que tienen relación con la tesis cuyo objetivo es analizar las normativas que puedan estar implicadas tanto para la evaluación de vibraciones mecánicas como para el diseño de martillos neumáticos. A continuación, se destacan los comités técnicos:

- CTN 81 – SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO
- CTN 81/SC 1- PROTECCIÓN INDIVIDUAL
- CTN 81/SC 3-SEGURIDAD DE LAS MÁQUINAS
- CTN 81/SC 6 – VIBRACIONES Y CHOQUES MECÁNICOS
- CTN 16 – HERRAMIENTAS
- CTN 1/SC 2 – DIBUJOS TÉCNICOS

Dentro de cada comité técnico existen normativas relativas a dicho comité. Cabe destacar que muchas de las normativas se pueden encontrar en varios comités técnicos. De las normativas encontradas, la mayoría de ellas se emplean para la evaluación de vibraciones mecánicas. Además, se observa que algunas de las normas ya se han citado como la UNE-EN ISO 5349-1:2002: Vibraciones mecánicas. También a lo largo de este epígrafe: medición y evaluación de la exposición humana a las vibraciones transmitidas por la mano. Parte 1: Requisitos generales (ISO 5349-1:2001) o la UNE-EN ISO 5349-2:2002/A1:2016: Vibraciones mecánicas. Medición y evaluación de la exposición humana a las vibraciones transmitidas por la mano. Parte 2: Guía práctica para la medición en el lugar de trabajo (ISO 5349-2:2001/Amd 1:2015). En el apartado Anexo A se especifica más en detalle.

2.4.5 Resumen

Este apartado contiene un recopilatorio de la legislación vigente en materia de protección de la salud y seguridad de los trabajadores, así como la específica derivada de la exposición a vibraciones mecánicas en el que se determina el proceso de evaluación de vibraciones mecánicas desde el punto de vista de la prevención y sus distintos métodos, así como los agentes implicados en este proceso. Asimismo, se realiza una recopilación de normativa que tenga relación con la tesis, recogida en el Anexo A, cuyo objetivo es analizar las normativas que puedan estar implicadas tanto para la evaluación de vibraciones mecánicas como para el diseño de martillos neumáticos.

El objetivo de este apartado es tener conocimiento de las normativas relativas al proceso de medición y evaluación de la vibración, así como la de comercialización ya que se encuentran relacionados y se deben tener en cuenta para el desarrollo y diseño de la empuñadura, puesto que sin el estudio global en el que convergen todos y cada uno de los ordenamientos no sería viable la realización del producto.

Es muy conveniente conocer todas las normativas citadas en este apartado (la EN ISO 11148-4, la UNE-EN 614-1:2006+A1, la UN-EN ISO 12100 o la UNE-EN 1299:1997+A1), ya que se constituyen como normas armonizadoras. Sus especificaciones técnicas, aun no siendo obligatorias, deben ser contempladas por el usuario fabricante para su comercialización, de acuerdo a la Directiva 2006/42/CE a la que se hace referencia en este apartado y también en el posterior epígrafe 3.1.4 Normativas de diseño del martillo neumático.

CONCLUSIONES CAPÍTULO 2

La construcción y las industrias extractivas son actividades económicas donde se emplean muchas herramientas y máquinas que emiten vibraciones mecánicas perjudiciales para la salud de los trabajadores ya que les producen enfermedades profesionales.

Las consecuencias de las vibraciones que sufren los operarios conducen a problemas de salud para los trabajadores y elevados costos para la sociedad, de ahí su importancia. El Real Decreto 1299/2006, de 10 de noviembre, recoge el cuadro de enfermedades

profesionales causadas por agentes físicos, reconociéndose las causadas por las vibraciones mecánicas, así como, las patologías asociadas a las mismas.

Actualmente, existe un marco normativo marcado por la Directiva Europea Directiva 2002/44/CE y la consiguiente transposición a nuestro ordenamiento, en el que se distinguen las figuras del empresario fabricante y del empresario usuario, lo que conlleva la obligación de establecer métodos de evaluación de las vibraciones a las que están expuestos sus operarios.

CAPÍTULO 3: MARTILLOS NEUMÁTICOS Y ELÉCTRICOS

3.1 Martillos neumáticos y eléctricos

Los martillos neumáticos y eléctricos son herramientas que se emplean en diferentes ámbitos y actividades económicas, como en las industrias extractivas o en la construcción de edificios e ingeniería civil. Se encuentran en el grupo de herramientas manuales con mayor índice de frecuencia emitida, debido a que están especialmente diseñadas para romper o agujerear materiales duros.

Estas herramientas pueden trabajar en superficies horizontales o verticales y dependiendo de la operación que se pretenda realizar, se elegirá el martillo con el diseño ergonómico que mejor se adapte a las necesidades requeridas.

Se puede decir que, los martillos neumáticos y eléctricos son máquinas-herramientas, máquinas puesto que funcionan a motor y herramientas debido a que son de manejo manual. En la mayoría de las etapas que requiere una obra de edificación se usan este tipo de herramientas. Su empleo está condicionado por muchos factores, entre ellos está su adecuación al tipo de trabajo, al tipo de energía que las haga funcionar, estarán alimentadas por electricidad, por alimentación neumática o por motor de combustión (Monfort i Signes et al., 2016).

Un martillo eléctrico es una herramienta con alimentación eléctrica, que suministra un desplazamiento lineal a un cincel intercambiable. La operación se realiza mediante la acción del operario con el empleo de las dos manos a través de las empuñaduras localizadas de tal forma que faciliten el trabajo que se quiera realizar. Normalmente, se trabaja en el suelo con el cincel y en la pared, para picar o romper materiales cerámicos porosos, manejando la herramienta tanto en posición vertical como horizontal. La actividad económica donde se usa más comúnmente es en el sector de la construcción (Santurio Díaz et al., 2006).

Por otro lado, el martillo neumático es parecido al martillo eléctrico, pero más potente, la diferencia está en el accionamiento que en este caso es neumático, siendo su fundamento de trabajo, el movimiento alternativo. En este caso, la actividad económica en la que se utiliza es variada, se pueden encontrar tanto en el sector de la obra civil y en la construcción, como en la minería. Suele utilizarse para picar, romper materiales cerámicos y pavimentos, pero sobre todo en trabajos horizontales, son los rompedores o demoledores

diseñados normalmente en forma de T, capaces de romper hormigón, demoler ladrillos o cortar capas de asfalto. Son máquinas más robustas y pesadas. Para superficies verticales como paredes, están singularmente indicados los martillos picadores, más ligeros y manejables en este tipo de tareas. Sin olvidar los perforadores que se emplean para roca y los acuñadores que se usan para levantar terrenos (Santurio Díaz et al., 2006).

En el estudio realizado por el Instituto Asturiano de Prevención de Riesgos Laborales (2006) "Proyecto SV-PA-04-09. Estudio de la Exposición a vibraciones mano-brazo en el trabajo con máquinas-herramienta portátiles", se analizó, entre otras cuestiones, el estado vibracional de las máquinas manuales y entraron a valorar los niveles alcanzados durante el empleo de éstas.

Evaluaron herramientas de diferentes actividades económicas como la construcción, forestal, jardinería, sector metal/mecánico, taller de automóvil, carpintería y limpieza. Dando como resultado el mayor nivel medio de vibración por sector, el de la construcción. Igualmente, las valoraron según el tipo de alimentador, es decir, si era mediante alimentación eléctrica, neumático o de combustión.

Algunas consideraciones relevantes de este estudio son:

Cuando las máquinas no tienen como forma de funcionamiento intrínseco la vibración, el accionamiento más perjudicial es el proporcionado por los motores de combustión.

Cuando se introduce la percusión en el modo de operar de la máquina, el nivel vibracional transmitido al trabajador pasa a depender casi en exclusiva de esa manera de funcionamiento, y el nivel aportado por la fuente de alimentación cobra escasa relevancia (Santurio Díaz et al., 2006, p. 88).

Por consiguiente, las máquinas neumáticas cuya fuente de alimentación externa consiste en un motor de combustión que lo transforma en aire comprimido, como en el caso de los martillos neumáticos, son las que producen mayores vibraciones incluso estando estos motores fuera de la propia estructura interna de la máquina o del propio sistema de trabajo. Así pues, los sistemas de alimentación eléctricos son los menos perjudiciales desde el punto de vista de las vibraciones.

En conclusión, las características técnicas de las máquinas eléctricas o neumáticas dependen de la labor que se quiera realizar y según el material que se trabaje. Dependiendo

de estos factores y de las condiciones de trabajo, se elegirá una herramienta-máquina determinada.

3.1.1 Situación del mercado

Es muy importante conocer la situación real del mercado de estas máquinas, ya que permitirá identificar tendencias de diseño, de materiales, de sistemas antivibratorios, así como de la geometría empleada. Vamos a recoger la información más relevante de las empresas fabricantes de estos martillos tanto neumáticos como eléctricos. Se trata de conocer sus productos y extraer las conclusiones que estén más alineadas con el objetivo de esta tesis. El objetivo final es conocer y analizar los sistemas antivibratorios que emplean los fabricantes actualmente, para minimizar la emisión de las vibraciones mecánicas provenientes de los martillos neumáticos. Principalmente, se centrará en esta herramienta debido a que, como se ha expuesto en los capítulos anteriores, este tipo de herramienta-máquina emite en una gama de frecuencia vibracional muy alta y perjudicial para la salud de los trabajadores. No obstante, para el estudio no se descartarán los sistemas antivibratorios y la geometría empleados en las herramientas eléctricas y electroneumáticas con gran potencia de acción.

De las marcas que se han seleccionado se encuentran las nombradas a continuación.

Tabla 23: Marcas fabricación y distribución de maquinaria manual

Atlas Copco	Ingersoll Rand	Stayer	Erdeko	Larwind
Bosh	Kaesar Compressors	Sullair	Cohidrex S.L.	Aixia
ChicagoPneumatic	LA+EMISA	Einh Eneloina	Remyc	Hilti
Hitachi	Segeda	Estehyne S.L.		

Tras el análisis realizado de las diferentes marcas y empresas fabricantes y/o distribuidoras de martillos neumáticos, eléctricos y electroneumáticos, se ha observado que muchas de las máquinas, además de haber sido diseñadas para su función, también, como se verá a continuación, se ha buscado disminuir las vibraciones mecánicas y proteger la salud del operador mientras realiza el trabajo.

Entre las diversas mejoras, se encuentran las realizadas mediante la incorporación de sistemas antivibratorios fijados en la parte interna de la máquina, como sucede con las marcas

Atlas Copco y Bosch. En ambos casos, sus desarrollos e investigaciones están basados en el trabajo en vacío, donde el pistón cambia el sentido de su movimiento a través de la producción de un colchón de aire en ambos extremos del cilindro, disminuyendo el contacto metal-metal. Este sistema se basa en las fuerzas de reacción, el pistón se mueve gracias a la cámara de presión constante que se genera (Atlas Copco, 2017) (Bosch, 2022a). También, el uso de fuelles elastoméricos, muelles y pernos de seguridad, situados en el interior de la máquina, permiten controlar las vibraciones emitidas (Bosch-vibration, 2019).

En la misma línea de intervención para la reducción de las vibraciones, Hitachi incorpora una estructura de aluminio con doble aislamiento situada en el sistema interno de la máquina que consigue minimizar tanto las vibraciones mecánicas como el ruido que emiten (Hitachi, 2018b).

En cambio, Hilti e Incoinsa, emplean sistemas antivibratorios propios, muchos de ellos situados en el interior de la máquina. Estos sistemas se combinan con diseños en las empuñaduras que no son públicos ya que forman parte de su *know how* (Incoinsa, 2019) (Hilti, 2022).

En general, todas las empresas han mostrado especial interés, dirigiendo sus investigaciones a las empuñaduras ya que son elementos esenciales durante el diseño y fabricación de la máquina. La mano está en contacto directo con ella, por lo tanto, es ahí donde se produce la transmisión de vibración.

Así se observa en distintas empresas que usan tecnologías diseñadas y aplicadas en la empuñadura en aras de reducir las vibraciones. Atlas Copco emplea el sistema denominado *Hand and arm Protections System (HAPS)*, que consiste en situar muelles pretensados en la empuñadura que cuando se ejerce una presión excesiva sobre ellos actúa sobre un dispositivo que los activa. Al empujar la empuñadura a la mitad del recorrido se aplica de forma sistemática una cantidad determinada de fuerza de avance, haciendo que la vibración disminuya (Atlas Copco, 2015). Igualmente, siguiendo esta filosofía de trabajo, Hikoki presenta una protección de la vibración para el usuario (UVP) (Hikoki, 2018) y Stayer muestra un dispositivo denominado *Vibration Absorbing Technology (VAT)* (Stayer, 2018), ambos métodos proporcionan amortiguación mediante elementos mecánicos.

Otras marcas emplean empuñaduras rígidas o flexibles con diseños fijos para atenuar las vibraciones, como ocurre con Ingersoll Rand (Ingersoll Rand, 2022) y Sullair, en los que sus diseños minimizan la vibración absorbiendo el impacto y reduciendo la fatiga del operador. Su

diseño flexible consiste en dos resortes helicoidales que evitan el contacto directo entre los mangos y el cuerpo del martillo neumático. La tensión mantenida por los resortes permite que actúe como amortiguación de la vibración (Sullair, 2016).

Las empresas Bosch, Hitachi, Dewalt, Einherll y Chicago Pneumatic, complementan sus productos con diseños ergonómicos que, además de reducir las vibraciones, mejoran el agarre e incluyen un sistema de multiposición facilitando su versatilidad (Bosch, 2022b) (Hitachi, 2018) (Dewalt, 2022) (Einhell, 2014) (Chigaco Pheumatic, 2012).

En la línea del diseño de empuñaduras con mangos adaptados al tipo de máquina, Chicago Pneumatic apuesta por un mango en forma de D, para herramientas concretas como los martillos cinceladores o las remachadoras fabricadas en acero forjado (Chigaco Pheumatic, 2014).

En cuanto al estudio de los materiales que componen las empuñaduras para amortiguar vibraciones, Einhell, utiliza materiales antideslizantes que absorben la vibración tanto en la zona del mango principal como en el asa (Einhell, 2015). Imcoinsa, diseña sus empuñaduras con materiales como el poliuretano (Imcoinsa, 2019). En cambio, Milwaukee combina materiales como el caucho con sistemas antivibratorios mecánicos para amortiguar las vibraciones (Milwaukee, 2022).

La marca Bosch, combina materiales y técnicas de suspensión de la empuñadura para minimizar la transmisión de la vibración. Los materiales empleados son el polipropileno con fibra de vidrio borosilicato, PP-GF, es resistente a temperaturas altas y los materiales SEBS (*Styrene-Ethylene/Butylene-Styrene*) son elastómeros termoplásticos sintéticos, fundamentados en un copolímero en bloque de estireno, etileno y butadieno que presenta buenas prestaciones mecánicas en ensayos mecánicos de tracción uniaxial previo a la rotura, es decir, en su alargamiento a la rotura, también al envejecimiento y resistencia a fenómenos atmosféricos (Synthelast s.a, 2022).

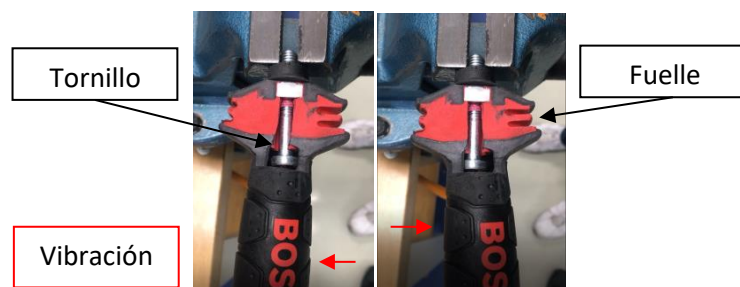
Figura 11: Sistema interno de la empuñadura auxiliar Bosch



Nota: Adaptado de Bosch (2019, p. 24).

Respecto a la técnica de suspensión empleada, consiste en un tornillo interno, que contiene la empuñadura, que sirve de unión entre la misma y la cabeza de la máquina. El tornillo se encuentra unido por un extremo y el resto del cuerpo se encuentra en voladizo, haciendo que el cuerpo del tornillo no toque al resto de la empuñadura, es decir, al material. En la parte externa de la empuñadura, en la misma sección donde se encuentra el tornillo citado, mediante el diseño en fuelle permite crear flexión en la empuñadura cuando la máquina se encuentre en oscilación, es decir, cuando se encuentre vibrando. Así se puede ver en las imágenes siguientes.

Figura 12: Oscilación de la empuñadura auxiliar de Bosch



Nota: Adaptado de Bosch (2019, p. 24).

De alguna manera, La + Emisa (la cruz), Segeda, Aixia y Larwind, incorporan en sus herramientas tecnologías que les permiten crear máquinas robustas, ligeras, de fácil manejo y con gran potencia que contribuyen a reducir la vibración (La+ Emisa equipos industriales S.A., 2022) (Segeda, 2018) (Aixia, 2022) (Larwind, 2022).

En definitiva, los elementos imprescindibles que alteran la transmisión minorándola, no son únicamente las innovaciones incorporadas en los mecanismos internos y externos de las herramientas que fabrican las empresas, sino también los materiales que las componen, representando un factor tecnológico fundamental. Todo ello hace que, determinados materiales, junto con el diseño y la ergonomía del producto influyan positivamente en la reducción de la transmisión de la vibración.

3.1.2 Materiales y sistemas antivibratorios

Hoy en día existen diferentes formas de intervenir en la reducción de las vibraciones mecánicas y es función del diseñador ayudar a minimizar esas fuerzas que generan cierto tipo de herramientas.

En algunas normativas como la “UNE-CR 1030-1. Vibraciones mano-brazo directrices para la reducción de los riesgos por vibraciones Parte 1: Métodos de ingeniería para el diseño de máquinas”, se proponen aspectos interesantes para reducir los efectos de la exposición a los riesgos derivados de las máquinas (AENOR, 1997).

La manera en la que esta normativa plantea los métodos de reducción de la vibración es variada, pero destacan los que se centran en reducir la magnitud de la vibración en la fuente, y los que se focalizan en la reducción del traslado de la vibración desde la fuente a las empuñaduras de las máquinas, así como de otras superficies que estén en contacto con las manos. Otra forma de intervención sobre la transferencia de la vibración de las empuñaduras sería mediante el diseño de esta pieza, adoptando medidas ergonómicas, considerado como un método comúnmente empleado con buenos resultados. Igualmente, un diseño térmico, que permita aislar la mano del frío como puede ser el uso de materiales aislantes como el neopreno, con el objeto de optimizar la temperatura de la mano cuando el operario realice el trabajo, contribuye a la disminución de la transmisión de la vibración (AENOR, 1997).

Para poder solventar y actuar sobre estos temas se pueden emplear varias técnicas aislantes de las vibraciones como masas, resortes y otros elementos resilientes situados entre la fuente de vibración y las empuñaduras (AENOR, 1997).

El efecto de la resonancia constituye un factor importante en el diseño que puede ocurrir en ausencia de un medio de absorción de energía vibratoria dado que, si las frecuencias de las fuerzas oscilantes generadas por el uso de la máquina son próximas a la frecuencia natural de la vibración de la máquina o sus componentes, puede producirse una amplificación de la vibración. En el caso de que no se pueda reducir la resonancia, es importante emplear dispositivos de amortiguamiento viscoelásticos, hidráulicos, por aire, fricción o alguna forma de absorción de la energía de la vibración (AENOR, 1997).

Existen productos específicos que absorben la vibración mediante la sintonización o no sintonización, de tal manera que ayude a reducir la vibración y que no se produzca el efecto de la resonancia (AENOR, 1997). La incorporación de absorbedores dinámicos de vibraciones o masas auxiliares neutralizadoras de vibraciones (amortiguadores dinámicos) son productos utilizados hoy en día para atenuar esa emisión de vibración. Está formado por un sistema masa-resorte, que se añade al sistema vibratorio, cuyo funcionamiento consiste en alejar las frecuencias naturales del sistema resultante, alejándose de esta manera de la frecuencia de excitación y tiene como objetivo principal minimizar las afectaciones derivadas de la exposición a la vibración (Universidad Pública de Navarra, 1993).

El empleo de elementos aislantes es otra forma de limitar la transferencia de vibraciones. Los sistemas de aislamiento de vibraciones son procedimientos que permiten restar el impacto producido por la vibración. Su técnica consiste en la introducción de un elemento elástico (aislante) entre la masa vibrante y la fuente de vibración, de tal manera que se consigue reducir la magnitud de la respuesta dinámica del sistema. Estos sistemas de aislamiento pueden ser activos o pasivos, según se requiera una fuente externa de potencia, o no, para lograr el objetivo. El control pasivo está formado por un elemento elástico que incorpora una rigidez y un elemento disipador de energía proporcionando amortiguación. Como elementos de control pasivo pueden servir: un muelle metálico, un corcho, un fieltro, un resorte neumático y un elastómero. Un control activo de vibración está formado por un servomecanismo que incorpora un sensor, un procesador de señal y un actuador. El control de la vibración se puede observar en el proceso por el que mantiene constante una distancia entre la masa vibrante y un plano de referencia. El método de funcionamiento del control activo actuaría cuando al aplicar una fuerza al sistema y variar esa distancia, el sensor lo detecta y se genera una señal que es proporcional a la magnitud de la excitación o a la respuesta del sistema. La señal es recibida por el procesador que envía una orden al actuador para que desarrolle un movimiento o fuerza proporcional a dicha señal (Universidad Pública de Navarra, 1993).

En pasarelas peatonales también se utiliza este tipo de control de vibración, clasificándolas en activas, semiactivas, híbridas y pasivas. Los dispositivos de control activo son aquellos que aplican fuerzas externas controladas, a la estructura. Sin embargo, requieren necesariamente de suministro continuo de energía produciendo un riesgo en la estabilidad del sistema del control activo. Los sistemas pasivos se dividen en, disipativos, que son capaces de disipar energía mediante la fricción y calor, y los sistemas de control de inercia, son los denominados amortiguadores de masa sintonizada o TMD que aplican fuerzas de control inercial sobre la estructura sin requerir energía externa, por lo que el problema de riesgo de inestabilidad que presentaban los dispositivos de control activo se elimina. En cuanto a los sistemas híbridos, se componen de un dispositivo pasivo y otro activo, mientras que el semiactivo se basa en un sistema pasivo, cuyo consumo de energía suele ser mucho menor que el de un dispositivo puramente activo (Soria Herrera, 2019).

No obstante lo anterior cabe citar que, muchas de las fuerzas que provocan la excitación del sistema produciendo la vibración, son originadas por desequilibrios y desalineamientos (Universidad Pública de Navarra, 1993). Por ese motivo, resulta de vital

importancia tener en cuenta el proceso de ensamblaje y fabricación de los elementos de una especie.

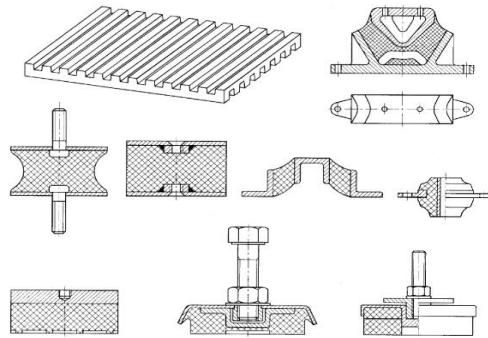
Otra de las cuestiones a considerar para el aislamiento de vibraciones mecánicas es lo que sugiere la norma “UNE-EN 1299:1997+A1 Vibraciones y choques mecánicos. Septiembre 2009. Aislamiento de las vibraciones de las máquinas. Información para la aplicación del aislamiento en la fuente”. Esta norma se centra en aislar la fuente de vibración para así proteger la estructura mediante el empleo de medidas de diseño que permitan reducir los efectos que provocan las vibraciones, y puede aplicarse tanto a máquinas vibrantes como para cuando se diseñan edificios donde se encuentran las máquinas vibrantes (AENOR, 2009b).

Las formas de proporcionar amortiguación que menciona la norma son el uso de muelles, ya que constituyen elementos elásticos complementarios aislantes de las vibraciones y choques de las máquinas. Existen diferentes tipos de muelles que dependen del material con el cual estén fabricados. Los muelles elastoméricos son elásticos y tienen pequeño módulo de Young, por lo que son materiales buenos para el diseño de muelles. Las características del muelle dependen de factores como la rigidez y el amortiguamiento, que a su vez vienen condicionados por el material y también por la forma y el diseño del mismo. Si bien es cierto que hay factores fundamentales que ayudan a que el producto mantenga la capacidad de carga y que dure a través del tiempo, como son el material o la mezcla de materiales empleados, su diseño en cuanto a la forma, la carga estática y dinámica, la amplitud de las vibraciones y la frecuencia del sistema vibrante; igualmente existen otros factores que intervienen en las condiciones de ejecución como son las condiciones ambientales y el envejecimiento del material debido a sus propiedades viscoelásticas (AENOR, 2009b).

Los muelles de elastómeros (o muelles elastoméricos) al tener propiedades como la flexibilidad, proporcionan una buena adaptabilidad a diversas aplicaciones, además de una buena fijación a las piezas metálicas y a combinaciones de posibles materiales. También se emplean como sistemas de separación en múltiples placas o mallas (AENOR, 2009b).

En el caso de compresiones grandes y distribuidas se suele emplear muelles elastoméricos en forma de placas o mallas como se puede observar en la imagen siguiente (AENOR, 2009b).

Figura 13: Muelles elastoméricos

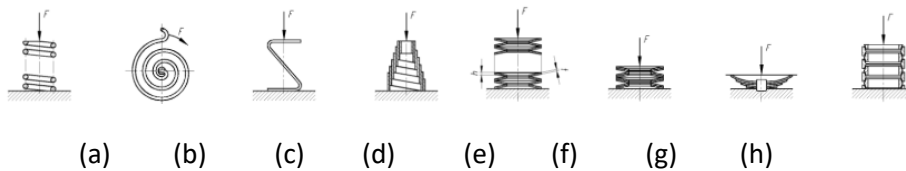


Nota: Adaptado de AENOR (2009, p. 14).

Los muelles metálicos también se emplean para aislar las vibraciones de las máquinas, están fabricados en acero y diseñados en forma de hilo, placa o varilla. A diferencia de los muelles anteriores, este tipo de muelles no muestra diferencia entre la rigidez estática y la dinámica; son especialmente sensibles a grandes diferencias de temperatura, pero son resistentes a una gran variedad de sustancias orgánicas (AENOR, 2009b).

Los muelles fabricados de acero tienen la capacidad de almacenar grandes cantidades de energía de deformación y sus propiedades elásticas no varían con el tiempo (AENOR, 2009b).

Figura 14: Tipos de muelles metálicos



- Leyenda
- a) muelle helicoidal
 - b) muelle en espiral
 - c) muelle de flexión
 - d) muelle cónico
 - e) columna de muelle en disco compuesta por discos separados
 - f) columna de muelle en disco compuesta por paquetes de muelles (discos separados por lamas)
 - g) muelle de hojas
 - h) muelle en anular
 - F carga
 - s flexión en la dirección de la carga F
 - h y t dimensiones

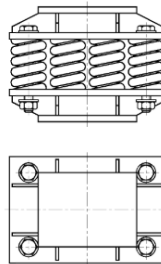
Nota: Adaptado de AENOR (2009, p. 14).

No obstante, el muelle metálico más empleado en el aislamiento vibratorio de máquinas es el helicoidal, ya que las propiedades de deformación, es decir, de la curva de deformación bajo carga de compresión que presenta es en su mayoría lineal. Este tipo de

muelles se utilizan sobre todo para fijaciones elásticas en la mayoría de las máquinas (AENOR, 2009b).

La figura 15 es una suspensión típica de muelles helicoidales de compresión en la que, dependiendo de las dimensiones del muelle, podrá variar el coeficiente de elasticidad transversal u horizontal del muelle helicoidal de compresión respecto al coeficiente de elasticidad vertical (AENOR, 2009b).

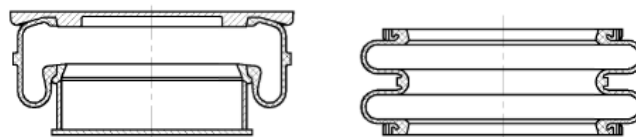
Figura 15: Suspensión típica de muelles constituida por muelles helicoidales de compresión



Nota: Adaptado de AENOR (2009, p. 16)

Por último, los muelles neumáticos están formados por un volumen lleno de gas con paredes elásticas. Al variar la carga, el muelle tiene la capacidad de deformarse hasta el nivel de las paredes elásticas, de tal manera que el volumen cambia y como consecuencia se produce un cambio de presión. Este tipo de producto se suele emplear tanto para los pistones de los cilindros como para los diferentes sistemas de fuelles. Sus propiedades de deformación dependen de la carga externa y de la diferencia de presión entre las presiones internas y externas multiplicadas por la superficie útil. La figura 16 ejemplifica lo mencionado (AENOR, 2009b).

Figura 16: Ejemplos de muelles neumáticos



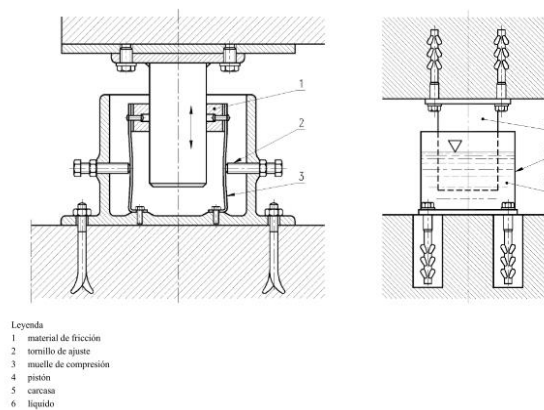
Nota: Adaptado de AENOR (2009, p. 16)

Otras piezas importantes que ayudan a restar el traslado de las vibraciones son los amortiguadores, cuyo sistema se utiliza en caso de excitaciones periódicas, resonancias, choques o de excitaciones aleatorias. Su funcionamiento consiste en limitar los movimientos

de los sistemas soportados elásticamente, siendo la forma habitual de colocarlo, en paralelo a los muelles para transformar la energía mecánica en calor (AENOR, 2009b).

Existen dos modalidades: los amortiguadores de fricción basados en el amortiguamiento entre cuerpos rígidos, cuyo inconveniente principal son los posibles problemas de ruido que difunden y los amortiguadores líquidos o gaseosos que emplean el intercambio energético con el medio líquido. La figura 17 recoge la imagen de ambos amortiguadores (AENOR, 2009b).

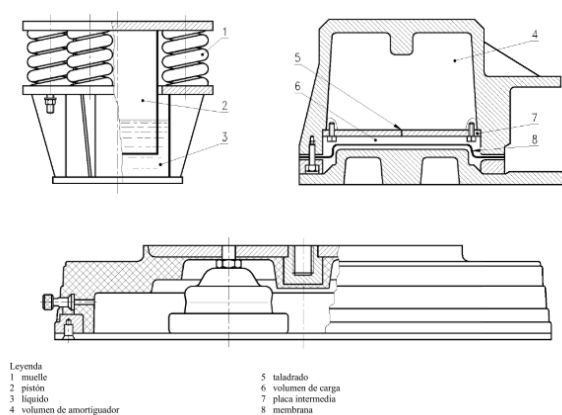
Figura 17: Diseño de un amortiguador por fricción y de un amortiguador de líquido



Nota: Adaptado de AENOR (2009, p. 17)

También, suele ser habitual la combinación de muelles con amortiguadores de líquido viscoso, y son especialmente interesantes para grandes amplitudes de vibración, de bajas a medias frecuencias. Este sistema está formado por una envoltura, un medio amortiguador y un pistón. La figura 18 muestra la combinación de muelles y amortiguadores (AENOR, 2009b).

Figura 18: Combinaciones de muelles y amortiguadores



Nota: Adaptado de AENOR (2009, p. 17-18)

En definitiva, el amortiguamiento cobra significado en el sistema aislante de la vibración mecánica, bien sea por el uso de materiales de amortiguamiento o por el diseño de amortiguadores integrados en la máquina. Estos métodos se suelen emplear incluso en las máquinas rotativas o de golpeo ya que sus condiciones de funcionamiento son susceptibles de generar fuerzas de desequilibrado, de esta manera se evita un aumento de la amplitud de la vibración cuando se roza la frecuencia de resonancia (AENOR, 2009b).

Materiales

En cuanto a materiales antivibratorios como elementos resilientes se pueden encontrar de diversos tipos, como el caucho y materiales de similares características como los engranajes de resina aglomerada que son empleados como sistemas de reducción de la vibración mecánica. Este tipo de materiales se encuentran aplicados en distintas partes de la herramienta, de tal manera que reducen las fuerzas de choque y de impacto (AENOR, 1997).

El uso de materiales con características que minimizan las vibraciones suele ser muy utilizado por los diseñadores y fabricantes. Desde hace años el caucho se ha empleado como aislante para reducir la vibración del motor según Choi S.B., Kim J.W. y Sohn J.W. (2008), citados por Ko, Ean y Ripin (2011). Los investigadores, Mallik, Kher, Puri y Hatwal (1999) recogen las afirmaciones de Harris y Stevensen que definen al caucho como un polímero elastómero cuyo comportamiento en general es muy complejo y viene determinado por sus propiedades dinámicas no lineales en los que sus resultados no son predecibles y cuyo comportamiento suele predecirse por métodos iterativos.

Como dijo R. D. Corsaro and L. H. Sperling (1990), citado por Mallik, Kher, Puri y Hatwal (1999), las características de los elastómeros, los hacen eficaces para controlar las vibraciones debido a que proporcionan mayor reducción de vibración. Del mismo modo, las redes de polímeros interpenetrantes, IPN, pueden proporcionar propiedades mecánicas similares a las de un polímero. Estas redes de polímeros se definen como una mezcla de dos o más polímeros en forma de red, es decir, que están entrelazados pero no unidos químicamente mediante enlaces covalentes, donde al menos uno de ellos se sintetiza y/o reticula en presencia del otro u otros (Mexpolímeros, 2023).

Los materiales elastómeros insertados entre el mango y la fuente de excitación de la máquina constituyen una técnica eficaz para restar la transferencia de las vibraciones, puesto

que, de esta forma, se reduce la magnitud del movimiento que es transmitido a la empuñadura.

Las afirmaciones anteriores quedaron avaladas por distintos estudios como el análisis experimental en el sistema mano-mango de una sierra circular, donde se comparaba la vibración transmitida de la máquina sin aislar con cada uno de los materiales aislantes. La medición de la vibración se realizó mediante un acelerómetro en el sistema mano-mango con objeto de determinar cuál de los materiales estudiados era el más idóneo para minimizar la transmisión de vibración a la mano. El grupo de materiales de estudio se componía del caucho butílico, el caucho de nitrilo, el caucho natural, el caucho neopreno y el caucho de silicona. Finalmente, como resultado de las muestras, se observó que el caucho de butilo proporcionaba mayor amortiguación que el resto de materiales (Mitra et al., 2017).

En otro de los trabajos estudiaron las vibraciones transmitidas al sistema mano-brazo de un cortacésped de gasolina cuyo objeto era diseñar nuevos mangos suspendidos para reducir el nivel de vibración. Para ello, diseñaron tres prototipos diferentes de mangos en los cuales cada mango estaba compuesto de diferentes materiales, uno estaba fabricado de acero templado y los otros dos de aluminio. Todos ellos estaban fabricados con un soporte de caucho, que permitía que el sistema se mantuviera en voladizo o suspensión. El caucho se había introducido entre el final de la empuñadura y el principio de la máquina, es decir, en la unión de estos dos elementos. Durante los ensayos, variaron la posición de los soportes de caucho para estudiar la transmisibilidad de las vibraciones a distintas distancias. Como conclusión establecieron que, el mango fabricado de acero templado reduce más la vibración que los mangos fabricados de aluminio. No obstante, afirman que la transmisibilidad de la vibración depende de la dinámica del mango, es decir, de la respuesta que presenta el mango frente a la vibración y que este a su vez depende de los materiales y del diseño empleado (Ko et al., 2011).

Todos los mangos diseñados contenían soportes de caucho, por lo que establecer un sistema de aislamiento ya sea con caucho u otro material representa un aspecto muy significativo a la hora de reducir las vibraciones.

En otras investigaciones diseñaron un sistema antivibratorio para la empuñadura de una motoazada incorporando a ese sistema el isómero denominado estireno butadieno o comúnmente SBR (*Styrene-Butadiene Rubber*), dando como resultado buen aislamiento (Sam & Kathirvel, 2009).

También, se realizaron trabajos con diferentes revestimientos de mangos de una máquina perforadora o taladradora. Estudiaron cinco mangos con diferentes coberturas y uno de ellos sin recubrir. Los materiales empleados con distintas combinaciones como: tela vaquera intercalada con algodón, yute con algodón, esponja con terciopelo, lámina de caucho con Rexine. Los resultados obtenidos mostraban una reducción importante de las vibraciones con el uso de mangos recubiertos con una lámina de caucho y Rexine (Singh & Khan, 2013).

En este otro estudio investigaron los factores de mayor influencia en relación a la vibración de martillos picadores que producen molestias al trabajador. También, analizaron maneras de reducir la vibración transmitida a la mano (Clarke et al., 1986).

En un principio desarrollaron un prototipo de casquillo fabricado con poliuretano, bajo el nombre comercial de Sorbothane, que iba sujeto al cincel (Clarke et al., 1986).

A pesar de que como resultados sí observaron que reducía la transmisión de la vibración a la mano de forma satisfactoria, causaban otros perjuicios por la transmisión de calor al trabajador al realizar algunas actividades (Clarke et al., 1986).

Por ese motivo, investigaron otras alternativas de diseño para mitigar la transmisión de la vibración. Desarrollaron un prototipo de martillo al que le incorporaron el mismo material, es decir, el Sorbothane, pero esta vez lo introdujeron entre la empuñadura y el resto del cuerpo cilíndrico del martillo. Al aplicar el poliuretano entre la empuñadura y el resto del cuerpo cilíndrico observaron que tras analizar las aceleraciones éstas se veían reducidas de 7 a 3 m/s^2 (Clarke et al., 1986).

También, aplicaron este material a los guantes y se comprobó que empleando los guantes con la máquina con el casquillo fabricado con poliuretano se reducía la vibración hasta un 63 % (Clarke, Dalby, & Gunn, 1986, p. 2). No obstante, hoy en día el material Sorbothane, nombre comercial de un polímero de poliuretano viscoelástico, a lo largo de estos últimos años ha ido evolucionando positivamente (Sorbothane, 2023).

Existe un uso común de materiales para amortiguar la vibración que son los elastómeros termoestables en el que su aplicabilidad es diversa, versátil y alcanza un gran abanico de posibilidades para minimizar la vibración en distintos productos que interfieren en la vida diaria de las personas. De hecho, en una reciente investigación en el sector ferroviario se estudió la capacidad antivibratoria que tiene un nuevo material elastómero basado en neumáticos, al final de su vida útil. El material obtenido mediante la mezcla de gránulos de neumático unidos con resina de matriz polimérica al que se añaden aditivos resultó ser un

material reciclado que confirmó su eficiencia para la atenuación de la vibración en aplicaciones ferroviarias (Diego et al., 2016).

A pesar de que los elastómeros son materiales que científicamente se ha comprobado que amortiguan la vibración, durante la investigación se consultó artículos dónde se analizan otro tipo de materiales distintos a los elastómeros que también presentan estas características amortiguadoras. Es el caso de los metales, el cemento o el hormigón. El cemento no presentaba propiedades viscoelásticas como sucede con los elastómeros o algunos metales, aunque si se le añaden aditivos puede llegar a presentar propiedades amortiguadoras. En cambio, el hormigón sí puede tener estas propiedades amortiguadoras si se combina con otros materiales como los denominados materiales estructurales, es decir, el acero (Chung, 2001).

En definitiva, es necesario recalcar que el uso de elastómeros es extendido para amortiguar la vibración y que viene determinado por la idoneidad del mismo y de su aplicabilidad.

Sistemas antivibratorios

Además de emplear materiales que minimicen la transmisión de la vibración al sistema mano-brazo, también se pueden introducir como ya se venía exponiendo al inicio del punto, fuerzas reactivas mediante la creación de productos o sistemas con materiales específicos que sean adecuados para reducir la transmisión de la vibración mecánica. En el caso de que se empleen máquinas guiadas a mano de baja frecuencia se puede reducir la transmisión mediante el empleo de masas de contra movimiento. Se puede incorporar un sistema de resorte cuya función sea absorber las ondas de choque producidas por los impactos (AENOR, 1997).

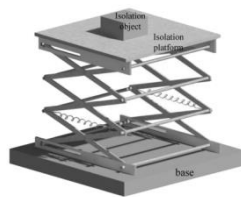
Así, Golysheva E. V, Babitsky V. I y Veprík A. M. (2003) comprobaron que la combinación de sistemas pasivos, como es un elastómero, y un amortiguador dinámico alimentado por energía eléctrica, esto es, un sistema masa-resorte para alejar las frecuencias naturales del sistema en la empuñadura de un martillo electroneumático, reducen la vibración percibida por el trabajador.

De los desarrollos más recientes sobre mitigación de las vibraciones mecánicas provenientes concretamente de martillos neumáticos se encuentra el trabajo de Jing X., Zhang

L., Feng X., Sun B. y Li Q. (2018) que diseñaron un sistema para minimizar la acción de las vibraciones que repercuten negativamente en los trabajadores.

Este diseño se basa en dos artículos publicados, el primero de los autores Sun X., Jing X., Xu J. y Cheng L. (2014) en el cual diseñan una plataforma que mediante un sistema de estructura similar a una tijera de n-capas permite que no se transmita la vibración a la plataforma.

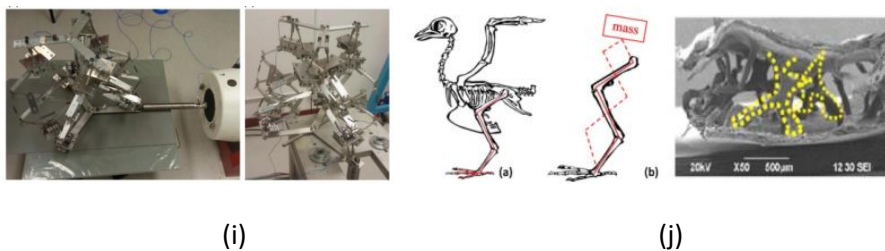
Figura 19: Simulación sistema antivibratorio



Nota: Adaptado de Sun X., Jing X., Xu J. y Cheng L. (2014, p. 3).

En el segundo artículo de Wu Z., Jing X., Sun B. y Li F. (2016) se diseña un novedoso sistema de aislamiento de vibración con 6 grados de libertad (6-DOF). Éste, a su vez, se basa en otro sistema denominado plataforma Stewart, la estructura de 6-DOF está construida con 6 estructuras en forma de X simulando unas patas, que permite la amortiguación de la vibración.

Figura 20: (i) Modelo real sistema antivibratorio y (j) Modelo inspiración para sistema antivibratorio



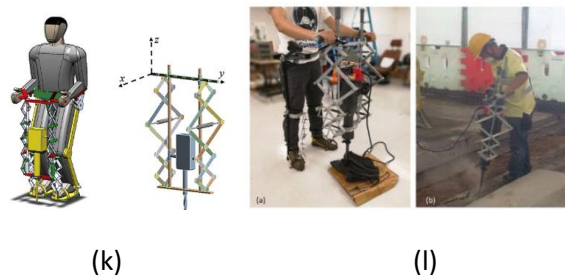
Nota: Adaptado la figura (i) Wu Z., Jing X., Sun B. y Li F. (2016, p. 19) y la figura (j) de de Jing X., Zhang L., Feng X., Sun B. y Li Q. (2018, p.3).

La estructura antivibración bioinspirada en estos dos artículos mencionados para los martillos neumáticos aplican y extrapolan estos conceptos para resolver el problema de las vibraciones producidas por los martillos neumáticos manuales de demolición que se emplean en construcción (Jing et al., 2018).

Jing X., Zhang L., Feng X., Sun B. y Li Q. (2018) desarrollaron, un innovador exoesqueleto antivibratorio pasivo basado en la estructura bioinspirada en forma de X, referido al exoesqueleto antivibración también bioinspirado, denominado como (BIAVE). El sistema BIAVE consta de dos estructuras en forma de X en paralelo, instalando en cada uno varias capas y muelles, siendo liviano, plegable y ajustable en tamaño y rigidez y, por lo tanto, adaptable para ser utilizado por diferentes martillos neumáticos como se puede ver en la imagen siguiente.

El diseño permite que cuando el trabajador presiona hacia abajo los mangos del BIAVE las fuerzas descendentes pueden verse añadidas al martillo neumático de tal modo que puede incrementar la eficiencia de demolición. Además existe una baja rigidez dinámica entre el martillo neumático y la empuñadura del BIAVE que puede permitir no recibir vibraciones (Jing et al., 2018).

Figura 21: (c) Modelo virtual y (d) Físico sistema antivibratorio



Nota: Adaptado la figura (k) y (l) de Jing X., Zhang L., Feng X., Sun B. y Li Q. (2018, p.3 y p. 19).

Con este estudio y este diseño se ha demostrado que el BIAVE es un producto muy efectivo para mitigar la vibración desde el mango al sistema mano-brazo ya que reduce hasta el 70 % o incluso más, la vibración (Jing et al., 2018).

Por otro lado, los autores Jing X., Zhang L., Feng X., Sun B. y Li Q. (2018) admitieron que este producto no produce molestias a la hora de trabajar, pero tampoco se veía aumentada la eficiencia de demolición. Además, su tamaño ocupa un espacio que empeora la maniobrabilidad de la máquina, sobre todo cuando ha de emplearse en posición horizontal.

En otro estudio emplean como sistemas aisladores de la vibración una malla híbrida de tres ejes que usa la pseudoelasticidad de un alambre en forma enrollada como sistema de amortiguación (Youn et al., 2011).

La pseudoelasticidad o superelasticidad es una respuesta elástica reversible, se trata de un comportamiento que sufren algunas aleaciones con memoria de forma que tras aplicar una carga en frío se deforma pero que vuelven a recuperar su forma o preforma cuando se calientan. La malla al tener un comportamiento de memoria de forma es uno de los productos aisladores de vibración que puede emplearse para aplicaciones de soportes de motores, soportes de engranajes y para las líneas de ferrocarril. Presenta mayor rigidez que los materiales elastómeros, produce un ciclo de histéresis mayor y como consecuencia es un excelente aislante a la vibración (Mezghani et al., 2017).

Algunos estudios, han desarrollado sistemas de amortiguación, basados en masas amortiguadoras y muelles que son empleados para atenuar la vibración producida por el mecanizado de piezas durante el proceso de mandrinado que dan lugar a imperfecciones en la pieza. En concreto, Lawrance G, Sam Paul P, Varadarajan A. S, Paul Praveen A y Ajay Vasanth X (2015), el sistema de amortiguador consiste en una masa de un tamaño y forma determinados unido al vástago de la herramienta, que realiza el mandrinado, mediante muelles.

Los materiales que se consideraron como amortiguación para la masa fueron el cobre, el latón, el hierro fundido y el acero templado. A través del programa Ansys modelaron los productos para poder identificar la mejor ubicación y el mejor material para el amortiguador. Según los resultados obtenidos pudieron observar que el amortiguador fabricado con el acero templado presentaba mejores propiedades mecánicas para minimizar la vibración y por lo tanto mejorar el acabado superficial durante el proceso de mecanizado (Lawrance et al., 2015).

3.1.3 Fuerzas de agarre y condiciones atmosféricas

Diversos estudios señalaron que, es muy importante diseñar correctamente y de forma ergonómica los mangos de las máquinas vibratorias, ya que existen muchos factores que favorecen la transmisión de la vibración y no solo los nombrados anteriormente como la posición del trabajador al realizar el trabajo, el material aislante empleado en la herramienta o los sistemas de protección individual, sino también factores como el diseño del mango, pueden desencadenar una transmisión mayor de la vibración.

En un estudio analizaron la percepción vibrotáctil, es decir, el sentido del tacto, midiendo la temperatura de los dedos, una vez han sido expuestos a la vibración, y la vibración

transmitida a través de acelerómetros. En el laboratorio, observaron los efectos que producían según el tamaño del mango, combinando la frecuencia de vibración. Concluyeron que a diámetros más grandes de 35 mm disminuía la percepción vibrotáctil, es decir, la sensibilidad en los dedos (Shibata & Maeda, 2008). Esto es debido a que la exposición a vibraciones produce un aumento temporal de los umbrales vibrotáctiles por causa de una depresión de la excitabilidad de los mecanorreceptores de la piel (M. Bovenzi, 2001), es decir, se produce una disminución del riego sanguíneo produciendo una insensibilización del sentido del tacto.

Además de estas observaciones de diseño, también se ha de tener en cuenta que la cantidad de energía transmitida de una herramienta vibratoria a través del mango depende del área superficial de contacto, de la fuerza de agarre y del empuje (D. Welcome et al., 2004).

Fuerzas de agarre

La fuerza de agarre influye en la transmisión de la vibración, por eso, cuando se quiera diseñar una máquina se debe prestar atención a las medidas tomadas para que no incrementen su peso y que no produzca efectos adversos en el organismo ya que, por el hecho de mitigar la emisión de la vibración se incrementa el peso de la herramienta provocando mayor fuerza de agarre y transporte. De tal manera que, una mayor fuerza de agarre causa una mayor intensidad de transmisión de la vibración, una mayor carga vibratoria y una mayor carga muscular (AENOR, 1997).

En la investigación de los autores Hamouda K., Rakheja S., Dewangan K. N. y Marcotte P. (2017) también se reveló la existencia de una reducción significativa en la fuerza de agarre de la mano en los materiales empleados, pero, no se pudo conocer si existía una correlación entre la fuerza de agarre y el grosor del guante.

Asimismo, Marchetti E., Sisto R., Lunghi A., Sacco F., Sanjust F., Di Giovanni R., Botti T., Morgia F. y Tirabasso A. (2017) investigaron sobre la transmisibilidad de la vibración del codo a lo largo de la dirección del antebrazo en función de la fuerza de agarre de la mano. Para el desarrollo del proyecto, la vibración que aplicaron al sistema fue entre 6 Hz a 500 Hz. Esta energía, fue generada con un agitador eléctrico con un único eje y se transmitió al codo desde un mango mecánico fijado en el agitador a través del sistema mano-brazo. En el experimento participaron 34 adultos sanos, cada uno de ellos aplicaba una fuerza de agarre constante mientras mantenían el antebrazo en dirección horizontal con un ángulo de 90° con el codo.

En el estudio encontraron que, a baja frecuencia, el sistema mano-antebrazo tiene una respuesta positiva a estímulos externos y la acción de agarre no afecta de forma significativa a la hora de transmitir la vibración. Sin embargo, al incrementar la fuerza de agarre se incrementó la transmisión de la vibración y por lo tanto la frecuencia transmitida (Marchetti et al., 2017).

Esto significa que a frecuencias bajas y al aumentar la fuerza de agarre, generalmente se reduce la vibración en los dedos, más que a frecuencias cercanas a la resonancia. Pero, a frecuencias altas, se incrementa la transmisión de la vibración (D. E. Welcome et al., 2014).

En otros términos, una mayor compresión de la palma de la mano contra el mango provoca una mayor transmisión de la vibración debido a la existencia de una mayor superficie de contacto.

La variación de la fuerza de agarre depende de varios factores, sin embargo, es probable que cambien las propiedades biodinámicas como la dureza, el amortiguamiento y la masa del sistema mano-brazo (Marchetti et al., 2017).

Una fuerza mayor aumenta la transmisión de energía vibracional en el codo, en rangos de frecuencia alta. Por lo que la fuerza de agarre requerida en la operación de una herramienta vibratoria debería ser tan baja como sea posible, siempre y cuando la herramienta pueda ser controlada en la operación. Esta afirmación resulta del estudio E. Marchetti, R. Sisto, A. Lunghi, F. Sacco, F. Sanjust, R. Di Giovanni, T. Botti, F. Morgia y A. Tirabasso (2017) en el que se señala que existen dos frecuencias significativas que se producen en el sistema mano-brazo a lo largo de la dirección del antebrazo. La primera es que a 8 Hz no es afectado por la fuerza de agarre y la segunda es que en rangos de 23-34 Hz, depende de la fuerza de agarre.

Además de tener en cuenta la fuerza de agarre como forma de transmisión de la vibración también se ha de incluir la fuerza de empuje como elemento de transferencia de las vibraciones.

Al aumentar la fuerza de empuje incrementa ligeramente la magnitud pico con la postura del codo en 90°. Sin embargo, con la postura del codo en 120° los resultados son opuestos, en la transmisibilidad para el hombro y la parte superior del brazo (Xu et al., 2017).

Las consecuencias de estos fenómenos en el cuerpo humano tienen repercusiones porque ocasionan alteraciones en el organismo. La exposición a la vibración indirectamente

afecta al desarrollo de trastornos musculoesqueléticos a través del incremento de cargas biomecánicas debidas al incremento de fuerzas de control o de sobreesfuerzos bajo las condiciones de vibración (Xu et al., 2017).

Condiciones atmosféricas

Tanto el calor como el frío, encarnan una faceta de la higiene industrial muy importante. El trabajador en esas circunstancias se puede encontrar en estrés, disconfort e insatisfacción en el trabajo y además está sujeto a agentes susceptibles de generar riesgos más severos a la salud (Gómez Etxebarria, 2008).

Sin embargo, los ambientes térmicos agresivos tanto la temperatura como la humedad, la presión del aire y la velocidad del aire pueden provocar efectos indeseables al organismo. Como consecuencia de las temperaturas extremas se pueden producir multitud de síntomas en el cuerpo humano como malestar general, disminución de la sensibilidad, confusión, torpezas y pérdida de coordinación, congelación de miembros del cuerpo y una disminución de la destreza manual (Gómez Etxebarria, 2008).

En estudios epidemiológicos se ha conocido que en las zonas tropicales son menos frecuentes las enfermedades vasculares (como el dedo blanco) que en las zonas más frías. Estudios relacionados con la exposición a vibraciones mecánicas de zonas cálidas se pueden encontrar en Hong Kong, Lo W.K., Ma P.L., O'Kelly F.J (1985), en Okinawa, Yamamoto H., Zheng K.-C. y Ariizumi M. (2002) o en Sudáfrica, en la minería en la extracción de oro, Nyantumbu B., Barber C.M., Ross M., Curran A.D., Fishwick D., Dias B., Kgalamono S. y Phillips J.I. (2007), todos ellos citados por Devine (2015), en los que mediante el análisis y la observación concluyeron que, en las zonas cálidas se producen con menos frecuencia este tipo de dolencias.

En una zona cálida como la India se plantea la prevalencia de neuropatías periféricas y anomalías musculoesqueléticas en lugar de trastornos circulatorios (Dasgupta & Harrison, 1996, p. 1). En Vietnam ocurre lo mismo, como se muestra en el estudio donde se analizó que existen diferentes razones por las que los trabajadores no contraen las enfermedades del dedo blanco que son derivadas de trabajar en ambientes cálidos (Futatsuka et al., 2005)

Las condiciones ambientales frías perjudican al trabajar y por ello, cuando se empleen herramientas manuales vibratorias o equipos vibratorios se deberán aislar de las partes frías para evitar el contacto directo y calentar en la medida de lo posible las

empuñaduras como método de prevención frente a enfermedades profesionales. Este hecho contribuirá en mejorar el rendimiento y el confort de los trabajadores durante su jornada laboral (Futatsuka et al., 2005).

En definitiva, cabe recalcar que, independientemente de las condiciones atmosféricas adversas en las que trabaje el operador, para minimizar padecer enfermedades profesionales derivadas de la exposición a la vibración, es imprescindible optimizar el diseño de la empuñadura o en el sistema interno de la máquina vibratoria empleando recursos de ingeniería tanto mecánicos como térmicos. En este sentido, emplear materiales que amortigüen la vibración, y que a la vez aíslen del calor y del frío extremo, reduciendo así la sensación térmica.

3.1.4 Normativas de diseño del martillo neumático

A pesar de que no aparecen normativas específicas de diseño que deban cumplir los fabricantes de este tipo de productos, la Directiva 2006/42/CE del Parlamento europeo y del Consejo de 17 de mayo de 2006 relativa a las máquinas recoge las normas armonizadas que son especificaciones técnicas elaboradas por el Comité Europeo de Normalización (CEN) y pueden ser consultadas en la página web de la Comisión Europea.

La aplicación de este tipo de normativa aun no siendo obligatorias, debe ser tenida en cuenta por el fabricante en la comercialización de sus productos. Sobre este aspecto, se puede encontrar información más detallada en el punto 2.4 Evaluación de vibraciones mecánicas.

El Anexo I de la Directiva de máquinas, contiene los requisitos esenciales de seguridad y salud relativos al diseño y fabricación de las máquinas (Diario Oficial de la Unión Europea, 2006).

Los fabricantes y diseñadores deberán realizar una evaluación de riesgos, a fin de determinar los requisitos de seguridad y salud que se aplican a la máquina. La máquina debe ser diseñada y fabricada teniendo en cuenta los resultados de la evaluación de riesgos (Diario Oficial de la Unión Europea, 2006). Por otro lado, el marcado CE es reconocido como el único que garantiza la conformidad de la máquina con los requisitos de esta Directiva.

En cuanto a las normas aplicables a los martillos neumáticos no se ha encontrado normativa específica respecto a su diseño, únicamente aparecen en la página web de la Comisión Europea, las relacionadas y asociadas a la medición de las vibraciones.

A continuación, se señalan algunas de las normativas aplicables al diseño y fabricación de este tipo de productos como la norma EN ISO 11148-4 Herramientas portátiles de accionamiento no eléctrico. Requisitos de seguridad.

Otras normas destacables son la UNE-EN 614-1:2006+A1 y la anterior de 2001, ambas relativas tanto a seguridad de las máquinas como a sus principios de diseño ergonómico a los que se debe prestar atención en el proceso de diseño (AENOR, 2008).

Además de estas normativas cabe destacar la UN-EN ISO 12100. Seguridad de las máquinas. Principios generales para el diseño. Evaluación del riesgo y reducción del riesgo. Mayo 2012. El objeto de esta norma es que los proyectistas puedan consultar una guía general para la toma de decisiones durante el proceso de creación de las máquinas, en ella se abordan recomendaciones acerca del aspecto físico de las herramientas. En el caso de la reducción de vibraciones se propone la redistribución de la masa o incorporar otra y cambiar parámetros del proceso, ya sea la frecuencia o la amplitud. Igualmente recomiendan la aplicación de aisladores de vibraciones como los amortiguadores tanto en la fuente como en las empuñaduras (AENOR, 2012a).

También, existe normativa que contiene orientaciones para el control de riesgos para la salud consecuencia de los efectos musculares asociados a las máquinas como la UNE-EN 1005-3:2002+A1 Seguridad de las máquinas. Comportamiento físico del ser humano. Parte 3 (AENOR, 2009a).

Una de las normas que podría estar más relacionada con el diseño de las máquinas es la norma UNE-CR 1030-1. Vibraciones mano-brazo. Directrices para la reducción de los riesgos por vibraciones Parte 1: Métodos de ingeniería para el diseño de máquinas. En este sentido, la norma establece recursos de ingeniería que podrían emplearse como forma de mitigación de las vibraciones mecánicas; se podría destacar la reducción de la magnitud de la vibración en la fuente, por ejemplo, eliminando el peso excesivo de la máquina o modificando el principio técnico de funcionamiento de la máquina. El uso de empuñaduras suspendidas y materiales resilientes sería otra forma de paliar la transmisión de la vibración (AENOR, 1997).

Por otro lado, hay que tener en consideración que las empresas, dentro del marco de la Directiva de Máquinas, generan sus propias formas de mejora y de diseño, a través de

inversiones en I+D para desarrollar sus productos de forma ergonómica. Buena prueba de ello son las patentes que hay en el mercado sobre diseños de empuñaduras. De forma general y para distintas herramientas como martillos cinceladores o remachadoras, se pueden encontrar empuñaduras con forma de Arco, “C”, o “D”, este tipo de diseños suelen emplearse para martillos cinceladores y remachadoras.

Es esencial que las máquinas empleadas por los trabajadores sean ergonómicas. En el caso del martillo neumático, una forma muy factible de mejorar el producto es mediante la aplicación de un buen diseño ergonómico en las empuñaduras, pues es la parte donde el hombre está directamente en contacto con la máquina y se reduce más directamente la transmisión de la vibración, así como la fatiga del operador.

En cualquier caso, para que las empuñaduras sean ergonómicas y se adapte el hombre a la máquina, las empuñaduras deben ser diseñadas con las medidas antropométricas de la población. Por ello, en el punto “3.4 La ergonomía aplicada al trabajo, problemas ergonómicos y ergonomía del producto”, se tratarán temas relacionados con las medidas antropométricas, las posiciones ergonómicas para realizar el trabajo y también se hablará sobre el rediseño de la empuñadura que se va a realizar en esta tesis, aplicando todo lo analizado.

3.1.5 Resumen

Los martillos neumáticos y eléctricos se encuentran en el grupo de herramientas manuales con mayor índice de frecuencia emitida, debido a que tienen unas características técnicas especialmente diseñadas para romper o agujerear materiales duros en cualquier tipo de superficies.

La amplia gama de frecuencia vibracional que emiten estas máquinas ha llevado a sus fabricantes a investigar sobre los distintos materiales y a la aplicación de nuevas medidas de diseño para proteger la estructura de las máquinas consiguiendo el aislamiento de las vibraciones en el origen. Actualmente, entre los diferentes sistemas antivibratorios fijados en la parte interna de la máquina se observan los de trabajo en vacío donde el pistón cambia de sentido para reducir el contacto metal-metal. Los fuelles elastoméricos en muelles y pernos de seguridad se usan para reducir la vibración e incluso se colocan estructuras de aluminio con doble aislamiento de la máquina.

Los métodos de reducción de la vibración se centran tanto en la reducción de la vibración en la fuente como en la disminución del traslado de la vibración desde la fuente a las empuñaduras y otras superficies de contacto. Igualmente, el diseño de la pieza con el uso de materiales térmicos y la adopción de medidas ergonómicas son elementos clave para conseguir este resultado.

Los sistemas de aislamiento de vibraciones son procedimientos que permiten restar el impacto producido por la vibración, y pueden ser activos o pasivos, según se requiera una fuente externa de potencia, o no, para lograr el objetivo. Su técnica consiste en la introducción de un elemento elástico (aislante) entre la masa vibrante y la fuente de vibración, de tal manera que se consigue reducir la magnitud de la respuesta dinámica del sistema.

La incorporación de absorbedores dinámicos de vibraciones o masas auxiliares neutralizadoras de vibraciones (amortiguadores dinámicos) son productos utilizados hoy en día para atenuar esa emisión de vibración. Es importante emplear dispositivos de amortiguamiento viscoelásticos como los muelles elastoméricos; también los hidráulicos o por aire, como los muelles neumáticos y de fricción o alguna otra forma de absorción de la energía de la vibración.

Igualmente resultan eficaces las combinaciones de sistemas pasivos, como es un elastómero, y un amortiguador dinámico alimentado por energía eléctrica, esto es, un sistema masa-resorte que alejaría las frecuencias naturales del sistema en la empuñadura de un martillo reduciendo la vibración que percibe el trabajador.

El sistema BIAVE consiguió una reducción de las vibraciones que producen los martillos en un 70 % e incluso más, aunque presenta otros problemas como su gran tamaño y la gran dificultad de maniobrabilidad para desarrollar el trabajo, por eso es imprescindible el diseño ergonómico de cualquier herramienta.

En los martillos neumáticos, el mango o la empuñadura es el punto inicial de contacto de las vibraciones emitidas por la herramienta al sistema mano-brazo, de ahí que para diseñar una máquina tenga tanta importancia sus dimensiones y el peso con el objeto de reducir la fuerza de agarre. La vinculación entre la fuerza de agarre, la frecuencia y la transmisión de la vibración a las manos ha sido confirmada por distintas investigaciones.

El uso de materiales con características que minimizan las vibraciones suele ser muy recurrido por los diseñadores y fabricantes. Los materiales elastómeros insertados entre el mango y la fuente de excitación de la máquina constituyen una técnica eficaz para restar la

transferencia de las vibraciones, puesto que, de esta forma, se reduce la magnitud del movimiento que es transmitido a la empuñadura. Todo ello ha quedado avalado por distintos análisis experimentales.

Por otro lado, la selección de materiales debe a la vez aislar del frío y del calor, para minimizar padecer enfermedades profesionales derivadas de la exposición a la vibración. Es imprescindible optimizar el diseño de la empuñadura o en el sistema interno de la máquina vibratoria, empleando recursos de ingeniería tanto mecánicos como térmicos.

3.2 Equipos de protección individual (EPI)

Se entiende por equipo de protección individual a “cualquier equipo destinado a ser llevado o sujetado por el trabajador para que le proteja de uno o varios riesgos que puedan amenazar su seguridad o su salud, así como cualquier complemento o accesorio destinado a tal fin” (Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST), O.A., 2012, p. 11) . Así se define en el artículo 2 del Real Decreto 773/1997, de 30 de mayo, sobre las disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas a la utilización por los trabajadores de equipos de protección individual (EPI), que transpone a la Directiva Europea 89/656/CEE, de 30 de noviembre de 1989 (Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST), O.A., 2012)

Los posteriores reglamentos recogen desde las disposiciones sobre diseño y fabricación en materia de seguridad y salud Real Decreto 1407/1992, hasta las actuaciones que se deberán llevar a cabo para seleccionar un EPI.

Tabla 24: Actuaciones para la selección de un EPI

Selección EPI adecuado Art.6	
1-Identificar y evaluar riesgos * Art. 6.1.a)	-Vías de entrada-Parte del cuerpo a proteger -Naturaleza y magnitud de la exposición
2-Definir el EPI necesario* Art.6.1.b)	-Características del trabajo (arts. 5.1.a) y 5.2) -Características del trabajador (arts. 5.1.b) y c)) -Marcado CE (art. 5.3,)) -Normas técnicas armonizadas
3-Comparar con EPI existentes. Art.6.1.c)	-Posibles EPI adecuados

	-Consulta y participación de los trabajadores * (art.9)
* La consulta y participación de los trabajadores puede estar presente en cualquier momento del proceo de selección del EPI	

Nota: Adaptado de Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST), O.A., M.P (2012, p.17).

En términos generales, la decisión de emplear EPI está precedida por una evaluación de riesgos, según la cual, dependiendo de los resultados obtenidos en la evaluación, se determinará el conjunto de medidas y actividades preventivas que se deberá utilizar para eliminar o reducir esos riesgos.

3.2.1 Eficacia de los guantes antivibratorios

Durante el desarrollo de esta tesis, se ha podido conocer que, en numerosos estudios la relación de atenuación de muchos de los guantes que ofrecen los fabricantes no proporciona ni ejerce su función en materia preventiva, sino todo lo contrario, de tal manera que incluso incrementan las frecuencias transmitidas (Pascual Lizana, 2005).

No obstante, en otros artículos revisados se estudia la capacidad que tienen los guantes de atenuar las vibraciones mecánicas y por tanto su eficacia. En su gran mayoría, los guantes que presentan estas características antivibratorias dependen del material empleado en su fabricación, por lo que resulta un factor de gran importancia la selección y evaluación de esos materiales.

Con el propósito de evaluar objetivamente la efectividad de los guantes, cuya estructura incorpore características específicas para la reducción de las vibraciones tales como, los guantes de gel o los de burbuja de aire, en el trabajo de Xu X. S., Riley D. A., Persson M., Welcome D. E., Krajnak K., Wu J. Z., Govinda Raju S. R. y Dong R. G. (2011) se publicaron los resultados de un experimento con animales concretamente ratas, exponiéndolas sobre una estructura vibrante para evaluar la efectividad de los guantes antivibratorios, empleando una metodología similar a la que posteriormente Krajnak K., Waugh S., Johnson C., Miller R. G., Welcome D., Xu X., Warren C., Sarkisian S., Andrew M. y Dong R. G. (2015) emplearon para analizar, sobre los guantes antivibratorios, los efectos vasculares y neurosensoriales producidos por la vibración en el modelo animal.

En sus resultados Xu X. S., Riley D. A., Persson M., Welcome D. E., Krajnak K., Wu J. Z., Govinda Raju S. R. y Dong R. G. (2011) obtuvieron que los guantes de gel, sí absorbían la vibración a frecuencias altas, es decir, a 1500 Hz , pero no reducía la aceleración medida a esa frecuencia. Esto viene a decir que, de acuerdo a la normativa para la evaluación y prevención de los riesgos relacionados con las vibraciones mecánicas, la medición de la aceleración obtenida, $A(8)$, se encontraba entre el valor de acción y el valor límite, $V_{ACCIÓN} < A(8) < V_{LÍMITE}$, lo cual implica la necesidad de adoptar medidas para evitar esa exposición, o bien, que el $A(8)$ se encontraba por encima del valor límite, $A(8) > V_{LÍMITE}$, en este caso se obliga a adoptar inmediatamente medidas para que los trabajadores no se encuentren expuestos a esos niveles de aceleración, siendo el valor límite fijado en $5 m/s^2$ y el valor de acción $2,5 m/s^2$ (Pascual Lizana, 2005).

Por su parte, Krajnak K., Waugh S., Johnson C., Miller R. G., Welcome D., Xu X., Warren C., Sarkisian S., Andrew M. y Dong R. G. (2015) analizaron si los materiales antivibratorios de los guantes fabricados con cuero y las burbujas de aire reducen los efectos producidos por la vibración en la zona vascular periférica y las funciones neurosensoriales. Tras los experimentos realizados pudieron observar que el material de los guantes previno alguno de los cambios vasculares en las arterias y vieron que el material no atenúa los efectos de la vibración en las respuestas neurosensoriales. Algo curioso fue que después de someter a la rata a un episodio de vibración se observó que apareció una sensibilidad de presión decreciente en la cola, es decir, se encontraba vibrando sin estar sujeta a la plataforma donde estaba situado el material antivibratorio. Tal es la controversia que existe con la efectividad de los guantes antivibratorios que afirman que los guantes antivibratorios no brindan la protección frente a la vibración y manifiestan que se han de realizar estudios adicionales para evaluar la efectividad de estos equipos de protección individual.

Karim H., Rakheja S., Marcotte P. y Dewangan K. N. (2016) analizaron cuatro guantes fabricados en diferentes materiales, uno fabricado con burbujas de aire, otro con gel, otro de cuero y por último un híbrido que contenía burbujas de aire y gel. Todos ellos eran guantes que se utilizaban para distintas máquinas.

Evaluaron, entre otras cosas, la transmisión de la vibración a la palma de la mano y a los dedos en función de los materiales fabricados para los guantes. Como resultado del experimento pudieron obtener que muchos de los guantes que se presentan como antivibratorios, no reducen la vibración sino que la amplifican en distintos rangos de frecuencia (Hamouda et al., 2016).

Los guantes fabricados con burbujas de aire amplifican la vibración en la palma de la mano en el rango de frecuencia de 10-40 *Hz*, mientras que, en los dedos, la vibración es amplificada en el rango de 125-200 *Hz* y a frecuencias superior de 200 *Hz*, también se puede observar un aumento en los guantes de gel, híbridos y los de cuero. No obstante, el guante de burbujas de aire mostró mayor resistencia en términos de atenuación de la vibración para los dedos. Mientras que los híbridos fabricados de burbujas de aire en el área de la palma y de gel, en el área de los dedos presentó mejores resultados (Hamouda et al., 2016).

Estos mismos autores en años posteriores, realizaron otro análisis empleando combinaciones de materiales. Los guantes estudiados eran los elaborados con burbujas de aire, los de gel, los híbridos fabricados con aire-gel, los de gel-foam y por último los fabricados con cuero. Estos guantes obtuvieron diferentes resultados de reducción de propagación de la vibración mecánica (Hamouda et al., 2017).

Los resultados obtenidos de estos guantes encontraron cierta similitud con los análisis realizados años atrás. Los guantes de burbuja de aire amplificaron la vibración de baja frecuencia en la palma de la mano, sin embargo, se atenuó a frecuencias superiores a 40 *Hz*. En el dedo índice se observó atenuación de la vibración en el rango de frecuencia de 30-160 *Hz* y en el dedo corazón en el rango 10-200 *Hz*. El guante de cuero también atenuó la vibración, pero en un rango superior a 1000 *Hz*. En general, constatan que muchos de los guantes analizados sólo reducen la vibración en rangos de frecuencias muy altas, superiores a los 1000 *Hz* (Hamouda et al., 2017). Con lo cual no se adaptan eficazmente a las frecuencias de emisión de las máquinas neumáticas y rotatorias que trabajan en rangos de frecuencia de 20 *Hz* a 1000 *Hz*, por lo que no actúan propiamente como equipo de protección individual.

Estas conclusiones evidencian que la transmisión de la vibración viene determinada por muchos factores. Por tanto, conocer tanto la frecuencia natural de los materiales como la frecuencia en la cual se produce resonancia en función de la frecuencia que transfiera la máquina es fundamental para poder minimizar la transmisión de la vibración.

Algunos trabajos, proponen como atenuación de la vibración, guantes fabricados con materiales combinados. Por un lado, situar burbujas de aire en la palma de la mano y por otro, emplear neopreno en una zona específica, concretamente, en los dedos. De esta manera, la colocación de distintos materiales, en función de la zona, podrá ayudar a minimizar la transmisión de la vibración. No obstante, concluyen que la efectividad de reducir la vibración depende de muchos factores, entre ellos, la dirección de la vibración hacia los dedos y la colocación de los mismos (D. E. Welcome et al., 2016).

Esta idea de situar materiales en distintas zonas de la mano, es decir, en los dedos y en la palma de la mano, para estudiar la transmisibilidad de la vibración en el sistema mano-brazo, viene influenciada por estudios previos como el realizado por Dong R.G., Welcome D.E. y Wu J.Z. (2005) en el que afirmaban que para evaluar la exposición a la vibración transmitida al sistema mano-brazo es fundamental estudiar la transmisibilidad de la vibración medida en los dedos, la mano, la muñeca, el codo, el hombro y la cabeza, para obtener una verdadera aproximación de la vibración que se transmite al sistema mano-brazo. De tal modo que establecieron para cada parte del sistema mano-brazo, es decir, en los dedos, en la mano, en la muñeca, en el codo, en el hombro y en la cabeza, distintas ponderaciones en frecuencia, en función de cada zona, para evaluar la aceleración transmitida, es decir, la exposición a la vibración de la respuesta biodinámica que presenta el sistema mano-brazo ante la presencia de la vibración.

En esta línea, Dong J. H., Dong R. G., Rakheja S., Welcome D. E., McDowell T. W. y Wu J. Z. (2008), aplicaron esta teoría, a través de un modelo matemático de cinco grados de libertad para analizar y evaluar la vibración transmitida al sistema mano-brazo. El modelo matemático de cinco grados de libertad hace referencia a las distintas partes que constituye el sistema mano-brazo, agrupándolo como el brazo-hombro, palma-muñeca-antebrazo, los dedos, la piel de la palma y la piel de los dedos. Empleando este modelo matemático similar, los autores Kamalakar G. B. y Mitra A. C. (2018) desarrollaron otro modelo con cinco grados de libertad que asociaba, de igual modo que en el artículo anterior, ecuaciones a distintas partes del sistema mano-brazo, de modo que una ecuación se constituía como el grupo de la parte superior del brazo, otra como la palma-muñeca-antebrazo, otra los dedos, otra la piel que cubre el dedo y la palma-muñeca y la última ecuación como el movimiento de la palma de la mano, obteniendo que emplear en la empuñadura de una herramienta manual vibratoria, un material amortiguador reduce la aceleración, es decir, la transmisión de la vibración al sistema mano-brazo.

Por su parte, Welcome D. E., Dong R. G., Xu X. S., Warren C. y McDowell T. W. (2012) manifestaron que la manera en el que clasifican los guantes de vibración que presenta la normativa ISO 10819: 2009-2010 no se ajusta a la realidad, en cuanto a definir su efectividad frente a la vibración, y proponen una nueva forma donde verdaderamente se especifique el rango de aceptabilidad de la eficacia del guante, para poder seleccionar, en su caso, el guante más adecuado. Para ello, analizaron tres tipos de guantes, obteniendo que los guantes con cámaras de aire presentan mejores propiedades antivibratorias, situándose los de burbujas de

aire en un rango intermedio siendo los de burbujas de gel los que peor resultado proporcionaban.

En el trabajo de Welcome D. E., Dong R. G., Xu X. S., Warren C. y McDowell T. W., (2014) se analizaron dos tipos de guantes antivibratorios, unos fabricados con burbujas de gel y otros con burbujas de aire, para estudiar su efectividad en las puntas de los dedos. Como resultado obtuvieron que los guantes aumentan la vibración en las yemas de los dedos, pero a frecuencias por debajo de 100 *Hz* las reduce de forma poco significativa. En general, ambos diseños reducen en un 3 % la vibración en los dedos, a frecuencias inferiores a 80 *Hz*, pero aumentan a frecuencias de 80 *Hz* a 400 *Hz*. A frecuencias más altas de los 400 *Hz* el guante de gel es el más eficaz para reducir la vibración en los dedos que los de burbujas de aire.

Aunque los guantes se han empleado para minimizar la transmisión de la vibración como un enfoque alternativo para reducir la exposición de la vibración, su efectividad, en ciertas zonas, como en los dedos sigue sin estar determinada.

En España, el Instituto Asturiano de Prevención junto a la Universidad de Oviedo analizaron nueve guantes de distintos fabricantes, elaborados con diferentes materiales y observaron que todos los guantes presentan un comportamiento parecido a frecuencias similares. En frecuencias bajas entre 6,3-50 *Hz* presentan alternancias entre atenuar y amplificar. En frecuencias medias, en el entorno de 50-500 *Hz*, se visualiza una amplificación del nivel vibracional en todos los guantes. En frecuencias altas, de 500-16.000 *Hz* todos los guantes se comportan de forma igual atenuando la vibración en porcentajes superiores al 50 %. En definitiva, constataron que existe una escasa eficacia por parte de los equipos de protección individual frente a la vibración (Santurio Díaz et al., 2006).

Todas estas afirmaciones evidencian y clarifican que los guantes antivibratorios no son fiables como dispositivos antivibratorios. Es más, en algunos casos, los guantes antivibratorios pueden presentar algunos efectos adversos como aumentar la fuerza de agarre y reducir la destreza manual (Hewitt et al., 2014). Por lo que, a día de hoy, en general, los guantes antivibratorios no cumplen como un EPI adecuado para su función.

3.2.2 Resumen

Los equipos de protección individual constituyen medidas preventivas que protegen únicamente a la persona que lo estén empleando y se debe valorar su eficacia en la prevención

de riesgos frente a los inconvenientes que al trabajador le pueda reportar. En cuanto a los guantes antivibratorios, hay gran profusión de estudios para evaluar su efectividad, pero no ha habido consenso definitivo en los resultados, puesto que en ciertas zonas de la mano como en las yemas de los dedos aumentan la vibración, pero a frecuencias por debajo de 100 *Hz* las reduce en esa misma zona, aunque de forma poco significativa. En general, los guantes atenúan la vibración en rangos de frecuencias muy altas, superiores a los 1000 *Hz*, con lo cual no se adaptan a las frecuencias de emisión de las máquinas neumáticas y rotatorias que trabajan en rangos de frecuencia de 20 *Hz* a 1000 *Hz*, por lo que no actúan propiamente como un equipo de protección individual.

En cualquier caso, existe amplia reglamentación sobre su uso y obligatoriedad tanto para trabajadores como para los fabricantes y empresarios, al objeto de ser aplicados según la actividad del operario.

3.3 La biomecánica y la biodinámica

El diccionario de la Real Academia Española, RAE, define la biomecánica como el “estudio de la aplicación de las leyes de la mecánica a la estructura y el movimiento de los seres vivos” (Real Academia Española, 2022b).

La biomecánica se emplea para estudiar distintos ámbitos de nuestra vida tales como las actividades cotidianas, la actividad laboral, el deporte y, en definitiva, cualquier dinamismo asociado al cuerpo humano puede tener sentido para esta disciplina.

El desarrollo y avance de las nuevas técnicas sobre el análisis de las respuestas de movimiento del cuerpo humano ha llevado a la biodinámica, definida según la RAE, como “Disciplina que estudia el efecto de los procesos dinámicos en relación con los organismos vivos” (Real Academia Española, 2022a). Se puede decir que esta ciencia busca comprender la respuesta que presenta el cuerpo humano ante la presencia de un movimiento y cómo reacciona este ante un fenómeno. Una de las respuestas más comúnmente observadas son los movimientos involuntarios de articulaciones que el cuerpo realiza para protegerse.

La respuesta biodinámica que presenta el cuerpo humano está relacionada con el comportamiento mecánico de las extremidades superiores producido por uno de los fenómenos ya citados en capítulos anteriores que es: la impedancia que presenta la mano y el

brazo con distintas amplitudes de vibración, frecuencia, dirección, fuerzas aplicadas, orientación de la mano y el brazo en relación al eje de excitación (Santurio Díaz et al., 2006).

Diversas investigaciones concluyen que la respuesta biodinámica, cuando el operario recibe estímulos externos fruto del empleo de herramientas vibratorias, ocasiona cambios en la microcirculación de la piel y en las propiedades biomecánicas de la piel, provocando efectos adversos como el deterioro de la destreza manual ya citado en capítulos anteriores, según Lundström R, Johansson RS (1986), citado por Rui, D'Agostin, Negro y Bovenzi (2008).

En relación con la respuesta que presentan las distintas estructuras del cuerpo ante la presencia de la vibración, es decir, la respuesta biodinámica, se afirma que, a frecuencias por debajo de 50 *Hz* se transmiten a la mano y al antebrazo. La atenuación de las vibraciones va a depender del ángulo de flexión del codo al sujetar la máquina, a mayor ángulo menor es la transmisión. A frecuencias por encima de 50 *Hz* la transmisión de la vibración disminuye. Al superar los 150 a 200 *Hz*, parte de la energía de vibración la absorben los tejidos de los dedos y de la mano (Ideara-SL, 2014).

En general, muchos de los trabajos de investigación citados en el 3.2.1, como el de Dong R.G, Welcome D.E y Wu J.Z (2005) o el de Kamalakar G. B. y Mitra A. C. (2018) se fundamentan en estudios biomecánicos y biodinámicos en los que analizan la transmisibilidad de la vibración y la respuesta del sistema mano-brazo, ante la presencia de vibración en distintas zonas, es decir, en la mano, en los dedos, en la muñeca, en el hombro, en el antebrazo y en la palma de la mano.

Los análisis que antiguamente se realizaban no representaban adecuadamente las propiedades biomecánicas del sistema, ya que se basaban en analizar el sistema mano-brazo conjuntamente. No se realizaba este análisis en términos locales como se propone en un análisis biomecánico, lo que hacía imposible comprender los comportamientos dinámicos locales en términos de tensión, presión y densidad de absorción de potencia (Dong et al., 2005).

Es por ello, durante estos últimos años, los estudios se han centrado principalmente en las respuestas biodinámicas localizadas. Esto se ha conseguido mediante la utilización de modelos, entre ellos el de elementos finitos. Estos modelos han servido para simular la interacción biodinámica entre los dedos y la herramienta y conocer así los estímulos mecánicos que reciben los dedos durante el empleo de herramientas motorizadas (Dong et al.,

2005). También, ha sido posible simular las interacciones con la muñeca, la palma de la mano, el hombro y el antebrazo.

Las repuestas biomecánicas de la piel y los tejidos subcutáneos frente al estrés y la tensión influyen en la transmisión de los estímulos mecánicos, modificando la respuesta biodinámica y la sensación táctil que experimenta la persona (Dong et al., 2005). De tal manera que, al estar expuesto a la vibración, puede ocurrir que aparezcan en zonas como los dedos un aumento temporal de los umbrales vibrotáctiles por causa de la depresión de la excitabilidad de los mecanorreceptores de la piel, como venía diciendo M. Bovenzi (2001), en “Vibraciones transmitidas a la mano” de la enciclopedia de “Vibraciones 50. Riesgos Generales. Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo” ya citado en el punto 3.1.

Como es sabido, el método de los elementos finitos es un método numérico que posibilita soluciones de ecuaciones diferenciales parciales asociadas a problemas complejos, que convergen en soluciones numéricas. Fleury G. (2007) empleó este método desarrollando un modelo en 3D del dedo para analizar y describir el comportamiento biodinámico ante la presencia de la vibración.

El objetivo de Fleury (2007), a través del modelado en 3D del dedo, es desarrollar un método que sea capaz de predecir, mediante elementos finitos, cómo se propagan las vibraciones en los tejidos del dedo y así poder calcular las propiedades mecánicas internas como la tensión y presión que sufre esta zona, cuya medición real es técnicamente imposible de realizar. Gracias a esta metodología encontró una frecuencia de resonancia a los 200 *Hz* en los dedos, frecuencia que ya planteaba que existiera Lundström R. (1984), lo que le permitió estimar que la resonancia que se producía en los tejidos de los dedos podía producir efectos vasculares y neurológicos negativos a largo plazo.

Por otro lado, algunos estudios como los de Bovenzi M., Lindsell C. J. y Griffin M. J. (2000) y los de Dong J. H., Dong R. G., Rakheja S., Welcome D. E., McDowell T. W. y Wu J. Z. (2008), se han planteado cuestionar las normativas relacionadas con la evaluación de las vibraciones mecánicas del sistema mano-brazo, como la “UNE-EN ISO 5349-1:2002 Vibraciones mecánicas. Medición y evaluación de la exposición humana a las vibraciones transmitidas por la mano. Parte 1: Requisitos generales. (ISO 5349-1:2001)”, argumentando que la ponderación en frecuencia, que es aplicada a la aceleración, no asume ni se encuentra dentro de la gama de frecuencia que afecta a los dedos, es decir, no recoge la gama de frecuencias que estudian los posibles efectos negativos debidos a los procesos dinámicos relacionados con el dedo.

Aunque la norma recoge que la ponderación de frecuencia se usa para evaluar todos los efectos biológicos de la vibración transmitida a la mano, los resultados de los estudios biodinámicos, fisiológicos y epidemiológicos sugieren que es poco probable que una ponderación de frecuencia, como recoge esta normativa, sea apropiada para poder cubrir todos los efectos adversos que sufre el trabajador, como los vasculares, neurológicos y osteoarticulares asociados a esta exposición (Bovenzi et al., 2011).

En conclusión, la biomecánica como sistema y método de conocimiento para determinar las respuestas del cuerpo humano junto con la biodinámica del mismo, en especial del sistema mano-brazo, constituyen una parte importante para poder realizar mediciones, evaluaciones y conocer la exposición a la vibración transmitida a la mano.

El concepto biodinámico y las metodologías recientemente desarrolladas empiezan a brindar nuevas y variadas oportunidades para estudiar las respuestas biodinámicas de los diferentes puntos y secciones del sistema mano-brazo.

Además, ofrece la oportunidad de poder desarrollar inéditos métodos de medición, ayudando al progreso de nuevos y mejores herramientas, así como crear e investigar en nuevos dispositivos antivibratorios.

3.3.1 Resumen

La biodinámica del sistema mano-brazo y la exposición a la vibración transmitida a través de la mano por herramientas vibratorias están íntimamente relacionadas. Durante los últimos años esta cuestión ha sido investigada en esta dirección, y ha dejado claro que realizar un análisis en términos locales permite comprender las respuestas dinámicas locales de la estructura del sistema mano-brazo, para lo que es conveniente utilizar una variedad de diferentes métodos, entre ellos el de elementos finitos.

3.4 La ergonomía aplicada al trabajo, problemas ergonómicos y ergonomía del producto

La ergonomía aplicada al trabajo

La ergonomía constituye el campo de conocimiento multidisciplinario que estudia las necesidades, características, capacidades y habilidades de los seres humanos, por tanto, es un campo de conocimiento que une tres disciplinas, las disciplinas humanas, las relativas al trabajo y por último las de la producción. En consecuencia, analiza las interacciones entre el operario y el ambiente de trabajo en el que esté expuesto, junto con los aspectos que afectan al diseño de productos o procesos productivos como sucede en la industria (Atlas Copco, 2007).

Sin embargo, la aplicación mayoritaria de la ergonomía se orienta al ámbito laboral, ya que se busca la mejor adaptación de las tareas y elementos de trabajo a las características y capacidades físicas, psíquicas y sensoriales del trabajador.

En un ambiente laboral ergonómicamente bien diseñado, es importante que la máquina o instrumento que emplee el trabajador también lo esté. Para ello, se aplica la antropometría, es decir, se diseñan los lugares de trabajo, los instrumentos, máquinas y herramientas con medidas generales del cuerpo humano. De esta forma, se facilitarán al trabajador condiciones de seguridad y salud para el desarrollo de las actividades, evitando así la manifestación de dolencias y malestar, como enfermedades físicas y psíquicas.

La obtención de un producto debe asegurar una buena ergonomía, por lo que herramientas como las neumáticas, que emiten vibraciones, deben ir de la mano de esta disciplina para generar la mejor comodidad y seguridad al trabajador. De esta manera, un buen diseño ergonómico será un elemento esencial para lograr un óptimo y ergonómico lugar de trabajo, siendo uno de los muchos factores que contribuyen al mismo.

Estos conceptos han trascendido al ámbito de las empresas demostrándose que, para poder conseguir una alta productividad con buena calidad de producción, es esencial contar con puestos de trabajo ergonómicos. Además, si un trabajador sufre un accidente de trabajo por una deficiente ergonomía en el mismo, habrá un coste adicional para la empresa, ya que tendrá que asumir los costes de rehabilitación del trabajador, así como de la pérdida de producción (Atlas Copco, 2007).

En definitiva, tanto los puestos de trabajo como los modos de trabajo deben estar bien diseñados para evitar que el trabajador esté expuesto a cargas físicas, a ruidos, vibraciones o ambientes contaminados, entre otros. De esta forma se favorece mantener un buen ritmo de trabajo, productividad y calidad.

Problemas ergonómicos

Las herramientas portátiles manuales, en especial los martillos neumáticos, suelen presentar problemas ergonómicos que se observan en la ejecución de la tarea y el propio producto. Entre ellos, se puede destacar el peso excesivo de la herramienta, sobre todo cuando se emplea en la pared. Igualmente, se aprecian cuando el trabajador ejerce presión sobre el gatillo de la máquina continuamente, provocando tensión y produciendo problemas en la mano, muñeca y dedos (Fundación laboral de la construcción et al., 2007).

En diseños antiguos el mango del martillo era corto y por ello el trabajador realizaba posturas forzadas para llevar a cabo la tarea. En estas circunstancias, los operarios flexionaban espalda y brazos, situándolos en posturas raras e incómodas, produciéndose así una fuerza elevada en la ejecución de su trabajo (Fundación laboral de la construcción et al., 2007).

Hoy en día se emplean herramientas que están provistas de mangos más largos para evitar flexiones, recomendándose a la hora de realizar la tarea doblar ligeramente las rodillas y levemente los hombros para evitar apoyar todo el peso del cuerpo sobre las muñecas (Fundación laboral de la construcción et al., 2007).

Al emplear un martillo neumático, la forma más adecuada y correcta de realizar el trabajo consiste en flexionar el tronco y realizar la fuerza con la propia mano para poder equilibrar la máquina (Fundación laboral de la construcción et al., 2007).

Otros problemas ergonómicos son los provenientes de la propia función de la máquina, como el ruido y la vibración. Ambos fenómenos generan dolencias y desarrollan lesiones en el operario. Las recomendaciones que sugieren, tanto entidades públicas como privadas, se basan en que los equipos utilizados estén lo mejor dotados con soluciones, de tal manera que mitiguen la emisión de vibraciones (Fundación laboral de la construcción et al., 2007).

En conclusión, un diseño ergonómico incompleto, puede producir problemas en su uso, un rendimiento deficiente, accidentes y lesiones (Piedrabuena Cuesta & Palomares Olivares, 2012).

Ergonomía del producto

El proceso de mejora ergonómica de un producto se puede llevar a cabo a través de distintos métodos. Ya sea aplicando mejoras ergonómicas mediante el diseño de forma y geometría en las partes problemáticas, o introduciendo nuevas tecnologías creando sistemas que permitan mejorar el propio producto.

Igualmente, de forma adicional, durante el proceso de estudio ergonómico del producto se pueden analizar los movimientos que realiza el trabajador cuando emplea la máquina para poder aplicar de manera más precisa la ergonomía.

Para llevar a cabo estas mejoras existen instrumentos como son los goniómetros que miden los ángulos entre dos objetos y que pueden servir de apoyo para el análisis de transmisión de vibraciones. Joshi A., Leu M. y Murray S. (2012) emplean este instrumento de apoyo para la medición y evaluación de las vibraciones mecánicas y así estudiar la transmisión de la vibración en distintas posiciones. Estas posiciones se denominan: posición neutra, posición por encima de la posición neutra, brazo extendido horizontal, brazo levantado, brazo levantado doblado y posición por debajo de la posición neutra. Los mencionados autores, aplicaron esta metodología para realizar un estudio comparativo entre dos máquinas, una pistola de impacto y una llave dinamométrica neumática de ángulo recto.

Tras los análisis, los resultados obtenidos concluyeron que la pistola de impacto producía mayor vibración en el sistema mano-brazo que la llave dinamométrica neumática de ángulo recto. También, observaron que los niveles de aceleración indican que hay un cambio de los niveles de transmisión de vibración cuando se cambia de postura (Joshi et al., 2012).

Por tanto, se puede establecer que emplear instrumentos de apoyo como el uso de un goniómetro puede ayudar a realizar una medición de las vibraciones mecánicas más precisa en las zonas donde se produce más transmisión de vibración.

La empuñadura del martillo neumático es el objeto a mejorar en esta investigación ya que constituye la principal zona de interacción entre la máquina y el hombre. Si se aplica la ergonomía de una forma eficiente y efectiva en ese sector, ayudará al trabajador a realizar la

actividad de una manera más cómoda, haciendo que la productividad aumente. Asimismo, evitará que le produzca malestar, y que se desarrollen enfermedades en el sistema mano-brazo.

Esta recopilación de artículos, ideas y métodos pone de manifiesto que la ergonomía es un factor importante para el diseño y mejora de los productos. Realizar un análisis ergonómico de las máquinas vibratorias y más concretamente en las empuñaduras, ayudará a atenuar la transmisión de la vibración a los operarios y, por tanto, mejorará directamente la prevención frente a enfermedades profesionales. Los mangos constituyen el elemento más sensible de la máquina ya que están en contacto directo con la mano y es esa quien hace que se transmita la vibración al resto del cuerpo, por lo que un diseño ergonómico en este elemento favorece la reducción de la emisión vibracional de la herramienta.

3.4.1 Ergonomía aplicada al diseño

En este apartado se va a analizar distintos aspectos y consideraciones que hay que tener en cuenta a la hora de aplicar la ergonomía a un producto, entre ellos: la antropometría estática y dinámica, el entorno de trabajo y posicionamiento de la mano y las dimensiones según los datos antropométricos de la población española.

3.4.1.1 Antropometría estática y dinámica.

Una correcta aplicación de la ergonomía debe distinguir entre la antropometría estática, cuyas mediciones se efectúan cuando el trabajador se encuentra realizando una actividad de forma estática, y la antropometría dinámica que mide las dimensiones dinámicas vinculadas con el movimiento asociado a actividades, teniendo en cuenta el estudio de las articulaciones, sus funciones, los posibles movimientos y la dinámica articular. La antropometría dinámica es compleja debido a la cantidad de elementos a tener en cuenta y a la necesidad de disponer de conocimientos de biomecánica para poder analizar adecuadamente los movimientos que realiza el trabajador en todas las operaciones (Valero Cabello, 2013).

Los percentiles más utilizados para el diseño ergonómico se encuentran entre el P5 y el P95, de esta forma se plantean para un 90 % de los usuarios. Cuando se quiere garantizar la

seguridad de los trabajadores se emplean percentiles entre el P1 y el P99 ya que de esta manera se cubriría a la gran mayoría de la población, dejando fuera solo un 2 %. El percentil P5 se suele emplear para alcances, en cambio, para establecer las dimensiones de holgura, es decir, las dimensiones internas, se utiliza el P95 para que también se tengan en cuenta aquellas personas de mayor tamaño (Valero Cabello, 2013).

3.4.1.2 Entorno de trabajo y posicionamiento de la mano

La actividad realizada en un entorno determinado puede condicionar la seguridad y la salud de los trabajadores. Por lo que es preciso tener un adecuado diseño de los puestos de trabajo teniendo en consideración tanto las dimensiones dinámicas como las estáticas (Valero Cabello, 2013).

En este sentido, se debe realizar un correcto análisis biomecánico, llegando a conocer todas las exigencias de la tarea y las distintas posturas que se realicen de pie, sentado, si el cuerpo se inclina con determinado ángulo y si existen torsiones del tronco. Asimismo, si se emplean herramientas para realizar una actividad. Otra cuestión importante es conocer los materiales con los que se va a trabajar, tamaño y dureza (Álvarez Bayona et al., 2016).

Es importante, para el estudio ergonómico, tener en cuenta la postura que se adopta a la hora de realizar un determinado trabajo, ya que existen problemas posturales por estar adoptando posturas mantenidas durante largos periodos de tiempo. El problema reside en que al mantenerlos durante un largo periodo produce contracciones isométricas desfavorables, incluso aunque las posturas que se adopten tengan ángulos pequeños. También puede ocurrir que las personas, mientras realizan una actividad, tengan que realizar posturas forzadas que les obligan a mantener ángulos muy pronunciados y poco funcionales (Álvarez Bayona et al., 2016). En este sentido, se observa fatiga muscular cuando se realizan tareas estáticas o posturales durante un período. Sin embargo, sólo se podrá mantener la posición por un período largo cuando se utilice entre un 15 y un 20 % de la capacidad muscular, ya que este es el límite en el cual la circulación sanguínea continúa siendo normal (Melo, 2009).

En definitiva, las posturas que se deben tomar a la hora de realizar una actividad deben ser posturas lo más naturales posible de tal manera que se puedan realizar cambios posturales. En la mayoría de los trabajos en los que se empleen herramientas manuales suelen predominar las posiciones de pie. Cuando se tenga que ejercer fuerza, es preferible aplicarla

de manera descendente, procurando tener el plano de trabajo por debajo del codo y adoptando una postura relajada. Es preferible que la herramienta permita que el trabajador pueda realizar la actividad con los codos lo más próximos al cuerpo (Álvarez Bayona et al., 2016).

A la hora de conocer las posiciones de la mano se debe tener en cuenta que la mano puede realizar diferentes posturas. Pero para establecer las posturas y los movimientos se debe partir de una posición neutra. A partir de esta posición, la mano puede realizar diferentes movimientos, como flexión e hiperextensión del antebrazo, pronación y supinación de la muñeca, flexión y extensión, desviación cubital y radial (Álvarez Bayona et al., 2016).

No solo son estos movimientos los que realiza la muñeca y el antebrazo, sino que las falanges también realizan movimientos como flexiones, movimientos de pinza, presión, hiperextensión de los dedos y compresión digital. En definitiva, la postura de la mano y del antebrazo deben ser naturales como ocurre con la posición corporal para realizar una tarea (Álvarez Bayona et al., 2016).

Se debe tener en cuenta también la postura de la muñeca, del antebrazo y el agarre para realizar la actividad lo más cómodo, adecuado y ergonómicamente posible. La forma de coger una herramienta es muy importante y existen cuatro tipos de agarre: palmar, de fuerza, pinza y gancho (Álvarez Bayona et al., 2016).

Igualmente, el acoplamiento es fundamental tenerlo en consideración ya que es la zona de la herramienta que está en contacto con la mano, por eso, cuanto mejor acoplamiento tenga el puño de la herramienta más natural será la realización de la actividad. La precisión y el ajuste de la mano a la herramienta vienen definidos por las dimensiones antropométricas de la mano del trabajador (Álvarez Bayona et al., 2016).

El desarrollo de esta tesis parte de un producto en concreto, el martillo rotopercutor, por tanto, el estudio biomecánico y el análisis ergonómico se centrarán exclusivamente en las extremidades superiores.

Para realizar el rediseño de la empuñadura se debe observar el diseño del martillo neumático, es decir, si se analiza el martillo, se puede comprobar que la forma de la empuñadura del martillo rotopercutor es en forma de "T" por lo que el agarre que presenta es de forma horizontal.

Figura 22: Martillo neumático rotopercutor MS76 de Segeda



Nota: Adaptado de Segeda (2022, p.3)

Como se puede observar en la imagen siguiente, la empuñadura tiene una forma cilíndrica, por lo que, normalmente, el agarre se realiza de tal manera que el pulgar bloquea la empuñadura, lo que implica que el bloqueo del agarre del cilindro lo realiza la articulación metacarpofalángica (Arjona Ballesteros, 2014).

Figura 23: Imagen real y física del martillo neumático rotopercutor MS76 de Segeda



Nota: Adaptado de Segeda (2020, p.1)

En el caso de que no interviniera el pulgar quedándose de forma paralelo al eje de la empuñadura, el cilindro no se queda bloqueado y por lo tanto el objeto puede moverse y caerse por el hueco que ha quedado libre entre las puntas de los dedos, es decir, del índice, del corazón, del anular y del meñique con el dedo pulgar (Arjona Ballesteros, 2014), como se puede observar en la imagen siguiente.

Figura 24: Presa cilíndrica con toda la palma de la mano sin intervención del pulgar



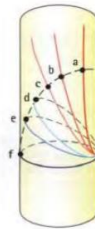
Nota: Adaptado de D. Arjona Ballesteros (2014, p.265)

Por ello, es importante que, cuando se vaya a realizar una actividad se bloquee el cilindro, de tal forma que el círculo que forma el pulgar y el dedo índice que sujeta el cilindro

se encuentre cerrado y recorra en la superficie el trayecto más corto (Arjona Ballesteros, 2014, p. 266).

Para consolidar el cilindro, en la figura 25 el pulgar debe estar situado en el punto “f”, aun sabiendo que puede hacer un recorrido desde el punto “a” hasta el punto “f”. De tal manera que, al realizar la pronación de la primera falange del dedo pulgar hacia el cilindro, formando un ángulo de 12°, permite que el pulgar haga contacto con el cilindro con la máxima superficie de su cara palmar y no con su borde interno. Así, se permite que aumente la superficie de contacto con el objeto y se produce una mayor consolidación del cilindro (Arjona Ballesteros, 2014).

Figura 25: Inclinación radial para el bloqueo de la presa



Nota: Adaptado de D. Arjona Ballesteros (2014, p.266)

3.4.1.3 Medidas de los datos antropométricos

Para la realización de la incorporación de las medidas al producto se trabajará con datos antropométricos ya publicados (Valero Cabello, 2013).

En general, se trabaja con datos transversales, es decir, medidas obtenidas a partir del estudio de un número grande de individuos, medidos una sola vez y que, generalmente, representan a una población numerosa, que se han recogido durante un periodo de tiempo determinado (Valero Cabello, 2013).

Existen varias normativas relativas a medidas antropométricas, conceptos y métodos de obtención de datos. También, hay otras normas que son interesantes de nombrar porque facilitan el proceso de diseño al proyectista, destacando las siguientes:

- “UNE-EN 894-3:2001 + A1 Seguridad de las máquinas. Requisitos ergonómicos para el diseño de dispositivos de información y mandos. Parte 3: Mandos”, que facilitan medidas para el diseño de las empuñaduras.

- “UNE-EN 547-3: 1997+A1 Seguridad de las máquinas. Medidas del cuerpo humano. Parte 3: Datos antropométricos” que ha sido diseñada para ayudar a los proyectistas en relación con los datos antropométricos.
- “UNE-EN ISO 7250-1:2010 Definiciones de las medidas básicas del cuerpo humano para el diseño tecnológico. Parte 1: Definiciones de las medidas del cuerpo y referencias”. Es interesante para poder aplicar las medidas antropométricas, ya que establece la definición de la sección que se ha medido de forma estandarizada.
- “UNE-EN ISO 15537 Principios para la selección y empleo de personas en el ensayo de aspectos antropométricos de productos y diseños industriales”. En esta normativa no se proporciona una tabla específica completa de las medidas antropométricas de la población española para poder aplicar a este producto en concreto, por lo que es necesario añadir otro tipo de documentación.

Finalmente, para la aplicación de las medidas antropométrica se van a emplear los datos antropométricos de la población española recogidos por el Centro Nacional de Medios de Protección (CNMP) del INSST, en Sevilla, y por los Organismos homólogos de diferentes Comunidades Autónomas, cuyas medidas fueron tomadas durante los años 1992 y 1996, siendo posteriormente actualizados en 1999 (Carmona Benjumea, 2001).

En esta tesis se va a rediseñar la empuñadura de un martillo rotopercutor por lo que se necesitará conocer las dimensiones antropométricas de la mano. Es por ello que, en la tabla siguiente, se presentan de forma resumida los datos antropométricos de la población española conjunta relacionados con la mano, teniendo en cuenta las dimensiones corporales tanto de las mujeres como de los hombres. De esta forma, se pueden estimar valores de los grosores y longitudes para el rediseño de la empuñadura.

Tabla 25: Datos antropométricos de la población trabajadora española del año 1999

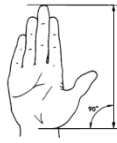




Dimensión (mm)				Mujeres			Hombres		
	P5	P50	P95	P5	P50	P95	P5	P50	P95
Longitud de la mano	163	183	202	159	173	188	172	188	204
Anchura de la mano en los metarcapianos	72	86	97	70	78	86	80	90	99
Longitud del dedo índice	64	72	81	62	68	75	67	73	82
Anchura proximal del dedo índice	17	20	23	16	18	21	18	21	23

Anchura distal del dedo índice	14	17	20	13	15	18	16	18	21
--------------------------------	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Nota: Adaptado de A. Carmona Benjumea (2001, p.13-15).

Para poder conocer las definiciones de estos conceptos expuestos en la tabla, se va a emplear la norma UNE-EN ISO 7250-1:2010, que contiene los datos antropométricos de la población española, aunque no se encuentran incorporadas las nuevas definiciones de medición de la norma actual de 2017.

Tabla 26: Medidas norma UNE-EN ISO 7250 2010

Longitud de la mano	Se define como la distancia perpendicular medida desde una línea recta trazada entre las apófisis estiloides hasta la punta del dedo medio.	 Figura 29 – Longitud de la mano
Anchura de la mano en los metacarpios	Se define como la distancia entre los metacarpios radial y cubital, medida entre las cabezas del segundo y quinto metacarpios.	 Figura 31 – Anchura de la mano en los metacarpios
Longitud del dedo índice	Se define como la distancia desde la punta del dedo índice hasta la arruga proximal en la palma de la mano.	 Figura 32 – Longitud del dedo índice
Anchura proximal del dedo índice	se define como la distancia máxima entre las superficies medial y lateral del dedo índice medida sobre la articulación entre las falanges medial y proximal	 Figura 33 – Anchura proximal del dedo índice
Anchura distal del dedo índice	se define como la distancia desde la punta del deo índice hasta la arruga proximal en la palma de la mano	 Figura 32 – Longitud del dedo índice

Nota: Adaptado de AENOR (2010, p.22-23).

3.4.1.4 Aplicación al diseño de herramientas manuales

Cuando se vayan a determinar los criterios dimensionales de las empuñaduras se deben adaptar a la anchura y longitud de la mano, siendo recomendable que el mango sobresalga del puño, de esta manera se impedirá que se establezca excesiva presión sobre los tejidos de la palma de la mano (Arjona Ballesteros, 2014).

Las dimensiones correctas para el diseño de la empuñadura son la anchura de la mano en el metacarpo y la anchura de la mano incluyendo el pulgar cerrado. Podría considerarse adecuada en los siguientes tamaños:

- GRANDE para los percentiles P50 a P95 –HOMBRES
- MEDIANA para los percentiles P5 a P50 –HOMBRES
- MEDIANA para P50 a P95 –MUJERES
- PEQUEÑA para percentiles P5 a P50 –MUJERES

(Arjona Ballesteros, 2014, p. 58)

En esta lista de tamaños de la mano no se incluye el tamaño grande de las mujeres porque la medida grande ya se encuentra dentro de los percentiles de los hombres.

Asimismo, es interesante realizar huellas de los dedos en las empuñaduras, ya que favorece el agarre ergonómico (Arjona Ballesteros, 2014).

Además, para favorecer un adecuado acoplamiento en el agarre de la empuñadura, los criterios de diseño de los mangos deben satisfacer un conjunto de principios, como, por ejemplo:

- Los mangos de las herramientas no deberían provocar marcas en las manos (Álvarez Bayona et al., 2016, p. 35).

- Las empuñaduras deberán ser redondeadas, sin cantos agudos ni rebabas.

- Deberán ser diseñados de tal manera que se distribuya la fuerza por toda la superficie de contacto (Álvarez Bayona et al., 2016, p. 35).

- Deben ser diseñados de tal manera que no resulten ásperos para la mano (Álvarez Bayona et al., 2016, p. 35).

- El mango debe tener un mínimo de 120 *mm* de ancho y contar con un espacio de 70*mm* por encima de los dedos (Álvarez Bayona et al., 2016, p. 27). Es decir, se debe acoplar a la anchura y longitud de la mano. Diseñarlo de tal manera que sobresalga del puño para evitar presión sobre la palma de la mano (Álvarez Bayona et al., 2016, p. 30).

- Deberá tener un diámetro de 40 *mm* aproximadamente (Álvarez Bayona et al., 2016, p. 27). No obstante, con diámetros más pequeños, en torno a 34 *mm*, se consigue un agarre más fuerte con menor fatiga en la mano.

Estas dimensiones y sugerencias de diseño que se acaban de detallar y las que se van a citar a continuación, han sido extraídas de un documento divulgativo titulado “Herramientas manuales: Criterios ergonómicos y de seguridad para su selección”, realizado por el Teresa Álvarez Bayona, Carlos Sánchez Villar, Antonio Merayo Sánchez, el Centro Nacional de Nuevas Tecnologías, CNNT y el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, INSHT, (2016) para ayudar a los proyectistas en el proceso de diseño. Es decir, aunque estos criterios han sido establecidos para herramientas y no para máquinas, sin embargo, ayudan a establecer medidas para las máquinas manuales ya que, en el caso de las empuñaduras, las dimensiones son estándar. Por ello, serán empleadas como medidas antropométricas para el diseño de las empuñaduras de esta tesis.

Como se ha mencionado, el mango debe ser largo, pero no excesivamente, dependiendo del tamaño de la mano de los trabajadores, los mangos tendrán que adaptarse a estas características. Asimismo, deberá tenerse en cuenta si se empleará la máquina con guantes y en caso de que así fuera, se deben añadir 10 *mm* más de longitud. Por ejemplo, para los martillos manuales una longitud adecuada estaría entre los 100 *mm* y los 150 *mm* (Álvarez Bayona et al., 2016).

Otra normativa que se ha tenido en cuenta y que ya se ha referenciado anteriormente es la UNE-EN 894-3:2001+A1 Seguridad de las máquinas. Requisitos ergonómicos para el diseño de dispositivos de información y mandos. Parte 3: Mandos” que sirve como recomendación en el diseño de la empuñadura, a pesar de que está prevista para mandos manuales.

Tabla 27: Dimensiones mínimas recomendadas para los mandos manuales

Método de presión	Parte de la mano que aplica la fuerza	Anchura o diámetro del mando manual, r (mm)	Longitud del mando manual según el eje de desplazamiento o rotación, s (mm)
Contacto	Dedo	$r \geq 7$	$s \geq 7$
	Pulgar	$r \geq 20$	$s \geq 20$
	Mano (plana)	$r \geq 40$	$s \geq 40$
Pinza	Dedo / pulgar	$7 \leq r \leq 80$	$7 \leq s \leq 80$
	Mano / pulgar	$15 \leq r \leq 60$	$60 \leq s \leq 100$
Agarre	Dedo / mano	$15 \leq r \leq 35$	$s \geq 100$

Nota: Adaptado de AENOR (2009, p.34)

3.4.2 Resumen

En este apartado se ha recopilado información sobre aspectos ergonómicos que hay que tener en cuenta, como el diámetro y la longitud de la empuñadura y las posturas a la hora de realizar la actividad laboral. Todo ello permite subrayar que la ergonomía es una disciplina imprescindible que contribuye a determinar problemas ergonómicos y a introducir mejoras en el diseño del producto.

En su aplicación a la empuñadura hemos distinguido entre antropometría dinámica y estática. En esta memoria de tesis doctoral utilizaremos la antropometría estática, ya que el trabajador se encuentra realizando una actividad de forma estática cuando utiliza el martillo neumático.

Se ha tenido en cuenta el entorno de trabajo, es decir, la actividad que el trabajador va a realizar, el tipo de máquina manual y el material a trabajar, así como la postura de trabajo. Al utilizar la herramienta de trabajo debe utilizarse la postura más natural posible que permita realizar cambios, se ha de aplicar la fuerza de manera descendente, con el plano de trabajo por debajo del codo y con los codos lo más próximos al cuerpo.

Además, el posicionamiento de la mano deberá ser horizontal, dada la forma en "T" del martillo neumático rotorpercutor, y con un agarre en el que el pulgar bloquee la empuñadura. También se han tenido en cuenta las medidas antropométricas de la mano, de manera que el mango tenga como mínimo 120 mm de longitud y un diámetro en torno a 34 mm.

CONCLUSIONES CAPÍTULO 3

En este capítulo se han presentado los martillos neumáticos y eléctricos, que son las máquinas que mayor vibración transmiten al sistema mano-brazo. Se ha detallado su funcionamiento, características técnicas, así como la normativa aplicable en su diseño y fabricación.

También se han analizado los equipos de protección individual (EPI) y su limitada respuesta desde el punto de vista de la protección de la salud de los operarios.

Después se ha presentado el martillo neumático de la marca Segeda, que es el producto que se analizará en los sucesivos capítulos. También, se ha presentado una selección de las empresas más relevantes del sector de herramientas manuales, con especial mención de los fabricantes de martillos neumáticos y/o eléctricos que se utilizan en posición horizontal, tanto los que incorporan a su diseño mecanismos antivibratorios como los que contemplan sistemas de agarre específicos.

Posteriormente, se ha estudiado el fenómeno de la biodinámica y biomecánica asociado a la vibración, lo que nos ha permitido observar las respuestas dinámicas localizadas en la estructura del sistema mano-brazo. Con ello se obtienen las frecuencias resultantes relacionadas a los efectos vasculares y neurológicos.

La exposición a la vibración ocasiona cambios en la microcirculación de la piel, que provocan un deterioro en la destreza manual. Con frecuencias inferiores a 50 *Hz* la vibración se transmite a la mano y al antebrazo, reduciéndose esa transmisión con frecuencias mayores. Para frecuencias comprendidas entre 150 a 200 *Hz* las vibraciones son absorbidas por los dedos y la mano. Finalmente se comprueba que, al sujetar la máquina, cuanto mayor sea el ángulo de flexión del codo menor es la transmisión de la vibración.

Este capítulo termina realizando un estudio ergonómico del producto, obteniendo que la forma más ergonómica de emplear un martillo neumático es doblar ligeramente las rodillas y levemente los hombros para evitar apoyar todo el peso sobre las muñecas, flexionando el tronco y realizando fuerza con la mano para equilibrar la máquina. Además, las dimensiones que se deben aplicar a la empuñadura deben ser acordes con las medidas antropométricas de la mano, que como mínimo han de ser de 120 *mm* de longitud y con un diámetro alrededor de 34 *mm*.

CONCLUSIONES MARCO TEÓRICO

El marco teórico que se ha analizado ha pretendido dar un contexto al objeto de estudio de esta tesis doctoral. Se ha iniciado con la descripción de los conceptos más sencillos que forman parte de las vibraciones, como la frecuencia, la resonancia y la impedancia, y su influencia sobre el ser humano.

Se han descrito las actividades económicas que utilizan las herramientas motoras manuales que generan vibraciones mecánicas transmitidas al sistema mano-brazo. Los datos estadísticos de CEPROSS concluyen que la construcción y las industrias extractivas son las que más uso hacen de estas herramientas. Y también se ha podido comprobar que la exposición a agentes físicos puede producir diferentes dolencias que son consideradas como enfermedades profesionales.

Se ha hecho una recopilación de la legislación vigente relativa a las medidas preventivas que deben establecerse en presencia de exposiciones a vibraciones mecánicas del sistema mano-brazo. Asimismo, se describen los actores que han de ocuparse de la normativa vigente, así como los diferentes métodos, por estimación o por medición directa, de evaluación de las vibraciones mecánicas.

Posteriormente se analizan los martillos neumáticos y eléctricos cuyas vibraciones tienen un mayor índice de frecuencia emitida. En el mercado actual existe una gran variedad de modelos y marcas, y se han descrito aquellas herramientas que contienen sistemas específicos de agarre, o que incorporan algún sistema mecánico o de cualquier otro tipo que permitan mitigar la transmisión de vibraciones, así como aquellas que deben ser utilizadas en posición horizontal. Se han considerado los estudios ergonómicos y biodinámicos de estas herramientas y, finalmente, se ha presentado el modelo de martillo neumático proporcionado por la marca Segeda, haciendo hincapié en las empuñaduras, las cuales van a ser el elemento principal y diferenciador en el que se basa la presente investigación.

Igualmente, se han analizado distintas investigaciones sobre materiales, como las de Anirban C. Mitra, Akshay Desai, Akash Bharate, Vipul Rane y Sudhir Gholap (1917) o de Ying Hao Ko, Ooi Lu Ean y Zaidi Mohd Ripin (2011), sobre el empleo de elastómeros como material amortiguador de la vibración aplicado a las empuñaduras de máquinas manuales vibratorias.

También, se han descrito las investigaciones de sistemas antivibratorios en martillos neumáticos, como el más reciente de Xingjian Jing, Linli Zhang, Xiao Feng, Bo Sun y Quankun Li

(2018). Asimismo, se ha realizado una recopilación de estudios sobre otros factores que intervienen en la transmisión de la vibración, como la fuerza de agarre que, según Enrico Marchetti, Renata Sisto, Alessandro Lunghi, Floriana Sacco, Filippo Sanjust, Raoul Di Giovanni, Teresa Botti, Federica Morgia y Angelo Tirabasso (2017), a frecuencias bajas y aumentando la fuerza de agarre, se incrementa la transmisión de la vibración.

Además, se ha expuesto cómo, al utilizar máquinas manuales vibratorias, las condiciones atmosféricas pueden influir en la aparición de enfermedades profesionales, tal como ha sido demostrado por Lo W.K., Ma P.L., O'Kelly, F.J (1985), al observar que las enfermedades vasculares son menos frecuentes en las zonas tropicales que en las zonas más frías. Asimismo, se ha constatado que la eficacia de los guantes fabricados como equipos de protección individual frente a la vibración se encuentra en controversia.

Igualmente, se ha estudiado que los aspectos biomecánicos que ayudan a relacionar los elementos mecánicos de los sistemas fisiológicos, en este caso con la acción de emplear la máquina manual vibratoria, y en concreto la biodinámica del sistema mano-brazo, están íntimamente relacionadas con la exposición a la vibración transmitida.

Finalmente, se ha realizado un estudio ergonómico y antropométrico de la empuñadura, teniendo en cuenta especialmente aquellos aspectos más relevantes, como son el diámetro y la longitud de la empuñadura y las posturas en el ejercicio de la actividad laboral.

El análisis que se ha realizado en esta primera parte de la tesis va a permitir, en los siguientes capítulos, proponer nuevos diseños de empuñaduras de martillos neumáticos que presenten ciertos grados de mejora. Y ello se va a llevar a cabo con relación a la empuñadura de un martillo neumático rotopercutor de la empresa Segeda.

MARCO PRÁCTICO

CAPÍTULO 4: ENSAYOS

4.1 Introducción y justificación

Hasta el momento la tesis se ha centrado en un marco teórico abarcando conceptos sobre vibraciones mecánicas producidas por determinadas máquinas como la concernida en esta tesis y, sobre todo, su repercusión en la salud de los trabajadores que la utilizan. También, se han realizado estudios de mercado, de equipos de protección individual, biomecánicos y ergonómicos. Todo ello se ha enfocado para comprender los elementos que participan e integran el desarrollo y la mejora de un producto, con el objetivo de minimizar la transmisión de la vibración y no menoscabar la salud de los trabajadores.

No obstante, para conocer la aplicabilidad de lo investigado, en los siguientes capítulos y epígrafes se llevará a cabo un marco práctico centrado en el análisis de la especie objeto de estudio, ensayos reales de materiales, rediseño de la empuñadura mediante un programa informático de diseño, fabricación e ingeniería asistida por ordenador, Catia V5, y la simulación por elementos finitos de una determinada frecuencia con el programa Ansys para conocer cómo reaccionará un producto ante dicho fenómeno. Todos estos pasos, proporcionarán el grado de mejora relativa de amortiguamiento de las vibraciones provocadas por el producto diseñado y constituirán una metodología de trabajo que puede extrapolarse a otros productos, equipos o máquinas.

4.1.1 Martillo neumático rotopercutor de la empresa Segeda

El marco teórico expuesto en los capítulos anteriores se va a aplicar a una herramienta concreta: un martillo neumático rotopercutor. Una vez analizado el mercado de estas máquinas, y buscando la colaboración entre la empresa privada y la universidad, se contactó con un conjunto de empresas españolas fabricantes de estos equipos.

Las empresas españolas que se contactaron, de acuerdo al estudio de mercado, fueron Imcoinsa, Aixia, La+Emisala (La cruz), Larwind y Segeda.

Segeda, empresa con más de 35 años de experiencia, fue con quien se realizó un contrato de cesión del martillo neumático rotopercutor. Tiene su sede central en España concretamente en Zafra (Badajoz), fundada en 1982 como una empresa auxiliar de Deutz Diter que se inició en la fabricación de maquinaria para canteras en 1990 (Segeda, 2022d).

Actualmente, su producción se centra en la fabricación de banqueadores y todo tipo de maquinaria de perforación en canteras, sondas y equipos neumáticos e hidráulicos para retroexcavadoras, así como en la fabricación de maquinaria auxiliar para la extracción y transformación de rocas ornamentales, es decir, máquinas de corte y taladros de placas, carros de transporte de piedra, pinzas de carga y descarga. En definitiva, maquinaria de perforación para obra civil y minería (Segeda, 2022d).

El martillo cedido por esta empresa es un martillo neumático rotopercutor MS-76 diseñado para realizar perforaciones de forma manual. Sus características principales son las siguientes:

Martillo Neumático Rotopeructor- MS 76

- Especialmente diseñado para perforar a mano.
- Peso en *kg*: 21 *kg*
- Consumo *l/s*: 66,6
- Frecuencia de Impactos: 33 *Hz*
- Rotación rpm: 260
- Alimentación Manguera: 3/4"
- Presión bares: 6,3 (Segeda, 2022b, p. 9)

Figura 26: Martillo neumático rotopercutor MS76 Segeda



Nota: Adaptado de Segeda (2022, p.9)

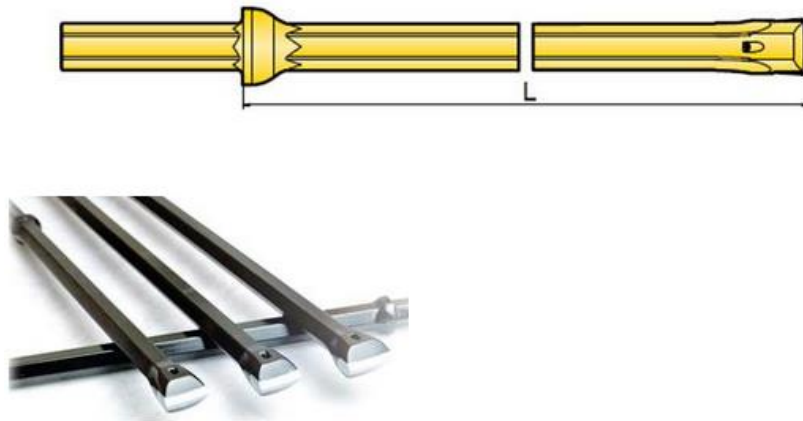
Para poder emplear este tipo de martillo se requiere de un grupo compresor o una línea de aire comprimido, el compresor debiendo tener el compresor una capacidad mínima de 3.500-4.000 *l/min* a 6,5 bares (Segeda, 2022a).

En cuanto a la forma de trabajo, podría decirse que trabaja en cualquier tipo de piedra. Aunque se usa habitualmente para trabajar sobre granito o mármol, también se puede emplear sobre areniscas y otras rocas calcáreas. También, se emplea en piedra natural para realizar agujeros de un diámetro máximo de 40 *mm*. La profundidad del martillo manual varía desde los 80 *cm* hasta los 2 *m*. Los taladros que se realizan con este martillo, hacen posible la fractura de la roca o piedra colocando en ellos bien cemento expansivo, o bien cuñas (Segeda, 2022a).

El tiempo de duración de uso por parte de los trabajadores suele estar entre los 30 *min* y las 3 *h*, siempre y cuando trabajen en intervalos de tiempo (Segeda, 2022a) Normalmente, se recomienda interrumpir la exposición a la vibración durante 10 *min* por cada hora de trabajo (García García, 2006).

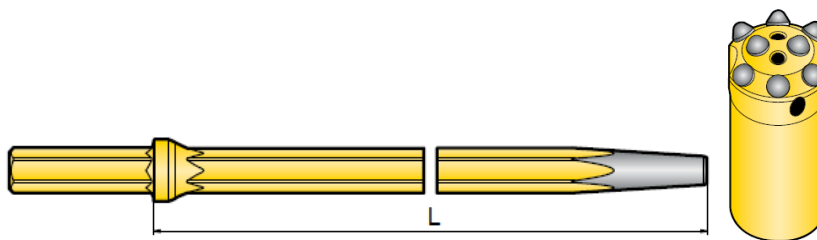
En definitiva, se trata de un martillo perforador que percute y rota a la vez, de tal modo que se va abriendo paso realizando un agujero sobre un terreno más o menos duro o abrasivo como son el granito, el mármol y las areniscas (Segeda, 2022a).

Las herramientas que se emplean para este martillo son barrenas integrales que pueden ser de dos tipos. Por un lado, aquellas cuya punta es de vidia (carburo) que se emplean para abrir el agujero mientras rota, como se puede observar en la siguiente imagen (Segeda, 2022c).

Figura 27: Barrenas con vidia

Nota: Adaptado de Segeda (2022, p.1)

Por otro lado, están la de forma cónica que acaban en punta y llevan una boca de perforación como se presenta en la imagen.

Figura 28: Barrena tipo cónica

Nota: Adaptado de Segeda (2022, p.1)

Si bien es cierto que existen muchas longitudes y tipos de barrenas, este martillo solo puede emplear barrenas con una longitud máxima de 1,6 m. La más empleada es la barrena de 0,8 m, no obstante puede emplearse una de 1,2 m y excepcionalmente la de 1,6 m (Segeda, 2022c).

Asimismo, la envergadura de la barrena, para que pueda introducirse en el buje del martillo, tiene que ser de entre 7 y 22 mm (Segeda, 2022c).

4.1.2 Intervención en la empuñadura

Tras realizar el despiece del martillo con el fin de conocer su funcionamiento y las distintas piezas que lo forman, se valoró que la empuñadura era el objeto de mejora, pues la composición del material, el diseño de las hendiduras y funcionamiento no mostraban buena

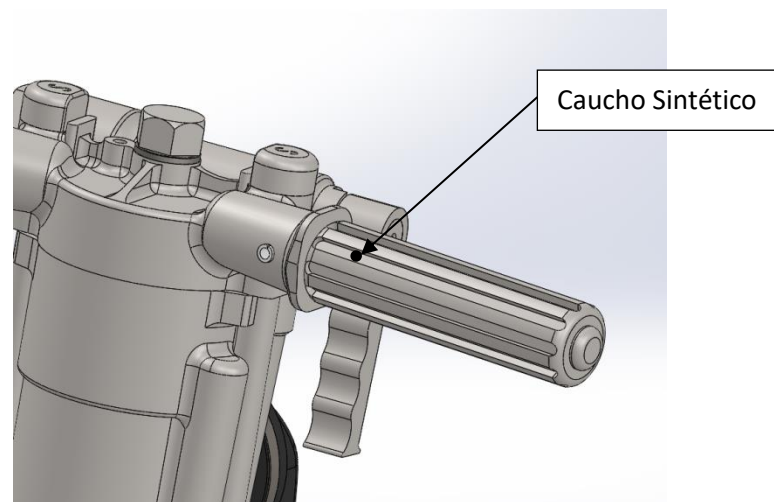
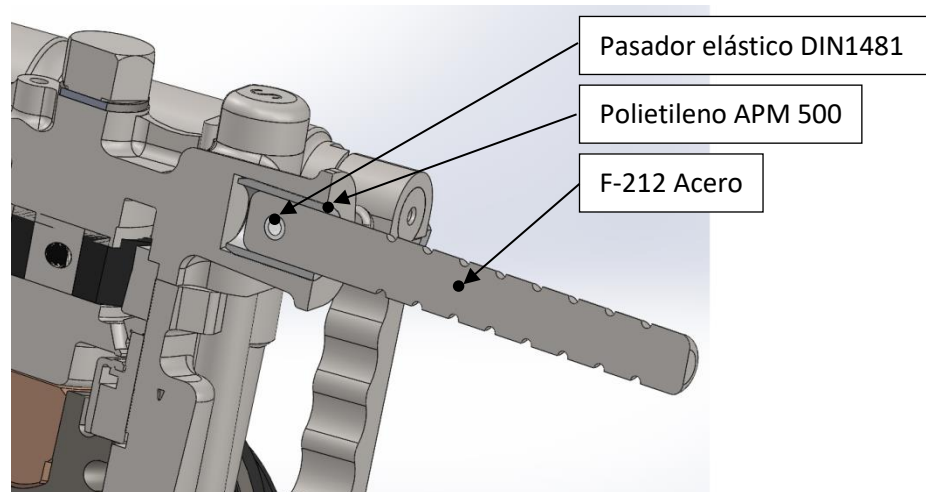
ergonomía y eran incómodos frente al agarre. No hay duda de que es un aspecto importante que puede ser mejorado aplicando una buena ergonomía y mejorando su funcionamiento y características. Además, de acuerdo a las evidencias científicas estudiadas en el marco teórico que se ha ido mencionando en distintas ocasiones durante la tesis, una manera eficaz y efectiva para minimizar las vibraciones es actuar sobre las empuñaduras.

El despiece del martillo neumático rotopercutor MS-76 objeto de estudio se encuentra desarrollado en el Anexo B donde se describe el proceso de despiece del martillo incluyendo la descripción de las piezas que están referenciadas en la tabla, facilitada por la empresa fabricante Segeda.

Una vez determinado que la empuñadura es el objeto de mejora se procederá a analizar en profundidad la composición, características y diseño de la empuñadura del martillo suministrado por la empresa Segeda.

En el proceso de despiece del martillo la empuñadura no se pudo separar de la cabeza de fundición. Las razones que imposibilitaron este desmontaje fueron dos; por una parte, la cabeza de fundición y la empuñadura están unidas a presión y sujetas mediante un pasador y un casquillo que impiden desligar cabeza y empuñadura. Por otro lado, el material de la empuñadura había sido moldeado por inyección sobre el vástago de tal manera que era imposible separarlos.

Llegado a este punto se solicitó a la empresa los elementos que conforman la empuñadura antes de su ensamblaje. Asimismo, se solicitó que especificaran cómo se había ensamblado el conjunto, de la empuñadura con la cabeza de fundición del martillo neumático rotopercutor para poder contrastar si el desmontaje realizado era el adecuado. De esta manera pudimos contar con el diseño en 3D, una imagen del ensamblado y los materiales de la empuñadura.

Figura 29: Detalle ensamblado y materiales de la empuñadura

Nota: Adaptado de Segeda (2020, p.1)

De acuerdo con las imágenes presentadas, el conjunto de la empuñadura se compone de un pasador elástico DIN1481 de acero inoxidable austenítico, un casquillo de polietileno APM500 y un vástago de acero F-212. Especificaron que la empuñadura estaba insertada en su eje por presión mediante impacto, por esa razón no se pudo separar la empuñadura de la cabeza de fundición durante el despiece.

Figura 30: Embalaje y disposición empuñadura



Nota: Adaptado de Segeda (2020, p.1)

La composición y funciones de los elementos de la empuñadura se describen a continuación.

Pasador elástico DIN1481

Compuesto por dos pasadores elásticos de acero inoxidable austenítico, cuyo objetivo es asegurar el bloqueo del conjunto de la empuñadura.

Figura 31: Pasador elástico DIN 1481



Nota: Adaptado de Segeda (2020, p.1)

Casquillo polietileno APM 500

Estas dos piezas de polietileno APM500, además de amortiguar las vibraciones producidas por la máquina, protegen el vástago de acero.

Figura 32: Casquillo polietileno APM 500

Nota: Adaptado de Segeda (2020, p.1)

Vástago de acero F-212 + camisa de caucho sintético

En las imágenes siguientes tanto el vástago de acero como el caucho sintético se encuentran ensamblados. No se pudo facilitar por separado ya que la camisa de polímero ha sido realizada mediante inyección del polietileno directamente sobre el vástago de acero.

Figura 33: Empuñadura Acero F212 + Caucho sintético

Nota: Adaptado de Segeda (2020, p.1)

En las imágenes siguientes se puede observar la zona de inyección realizada a la empuñadura.

Figura 34: Detalle inyección empuñadura



Nota: Adaptado de Segeda (2020, p.1)

Existen elementos que ayudan a minimizar la transmisión de la vibración, como reducir el peso de la propia máquina, puesto que un peso excesivo hace que el trabajador ejerza mayor fuerza de agarre provocando mayor intensidad de transmisión de vibración y por tanto conduciendo a una mayor carga vibratoria (AENOR, 1997). Otro factor de diseño es el relativo a los mangos pequeños y cortos. Estos elementos pueden hacer que el trabajador realice posturas forzadas para trabajar (Fundación laboral de la construcción et al., 2007). Es importante considerar que las investigaciones realizadas en el capítulo 3 han demostrado que el empleo de elastómeros, como el caucho, son los más conocidos y efectivos para aislar las vibraciones (Ko et al., 2011). Esta es la razón por la cual los fabricantes emplean en las empuñaduras un caucho sintético. No obstante, existe un gran abanico de combinaciones (materiales y diseños) que permiten minimizar la transmisión de vibración en las empuñaduras.

Por los argumentos anteriormente expuestos será la empuñadura el elemento en el cual se va a intervenir ya que a través de ella se realiza el contacto directo con la mano y por donde se transmite la vibración.

4.1.3 Resumen

En estos apartados se recopila información sobre el funcionamiento y características principales de la máquina cedida por la empresa Segeda. También, el proceso que se ha llevado a cabo para la obtención de la máquina. Una vez adquirido se realiza el despiece del martillo neumático rotopercutor en concreto el modelo MS-76, donde se ha analizado su funcionamiento y características. Se trata de una herramienta que está especialmente diseñada para perforar a mano, pesa 21 *kg* y emplea una frecuencia de impactos de 33 *Hz*. Además, trabaja en cualquier tipo de piedra, perfora percutiendo y rotando a la vez, de tal

manera que se va abriendo paso realizando un agujero sobre un terreno, para ello emplea dos tipos de barrenas integrales, las que acaban con una vidia (carburo) y las de forma cónica. Por último, del despiece se ha valorado que la empuñadura es el objeto de mejora, pues la composición del material, el diseño de las hendiduras y funcionamiento no mostraban buena ergonomía y eran incómodos frente al agarre.

4.2 Ensayos del material

Después de haber determinado que la empuñadura es el elemento en el cual se va a intervenir, existe un gran abanico de combinaciones no estudiados de materiales y diseños que permiten minimizar la transmisión de la vibración en las empuñaduras. En esta sección se procede a desarrollar un estudio de materiales, cuyo objetivo es realizar ensayos reales sobre materiales para estudiar su amortiguación frente a la vibración.

4.2.1 Introducción

En el capítulo 3 se comprobó que los materiales más empleados para minimizar la transmisión de vibraciones mecánicas en máquinas son los elastómeros puesto que presentan características recuperadoras y tienen alta capacidad de disipación de energía según Corsaro R. D. y Sperling L. H. (1990), citados por Mallik, Kher, Puri y Hatwal (1999).

Entre los más conocidos y empleados para aislar las vibraciones mecánicas se encuentra el caucho (Ko et al., 2011). Se trata de un elastómero que tiene un comportamiento que viene determinado por sus propiedades dinámicas no lineales según Harris J. y Stevensen A. (1986) y Harris J. (1987), citados por Mallik, Kher, Puri y Hatwal (1999). Cuando un sistema tiene un comportamiento no lineal, en general éste es muy complejo y sus resultados no suelen ser predecibles y habitualmente se predice este comportamiento por métodos iterativos.

Existen estudios que han investigado distintos materiales aplicados a empuñaduras de máquinas para minimizar la transmisión de la vibración, como es el caso del análisis experimental del mango de una sierra circular, donde el caucho de butilo toma gran relevancia frente a la vibración (Mitra et al., 2017). El caucho butadieno-estireno (SBR), otro de los

elastómeros, para una empuñadura de una motoazada (Sam & Kathirvel, 2009) así como la combinación de lámina de caucho y Rexine, para una perforadora (Singh & Khan, 2013) o incluso, materiales resilientes similares a los polímeros, como la resina aglomerada (AENOR, 1997). Todos estos materiales tienen un denominador común y es que presentan un comportamiento viscoelástico.

4.2.2 Comportamiento mecánico de los elastómeros

En primer lugar, antes de estudiar las propiedades mecánicas de los elastómeros, su comportamiento físico, es fundamental destacar que los materiales poliméricos presentan un comportamiento viscoelástico, es decir, un comportamiento reológico anelástico que manifiestan tanto propiedades viscosas como elásticas cuando se deforman.

En esta línea, se debe entender el comportamiento de los sólidos elásticos desde dos perspectivas. La primera, la teoría clásica de la elasticidad considera las propiedades mecánicas de estos sólidos, y de acuerdo a la ley de Hooke, la deformación que presenta el sólido elástico es directamente proporcional al esfuerzo aplicado. La segunda, la teoría hidrodinámica estudia las propiedades de los líquidos viscosos, conforme a la ley de Newton, donde el esfuerzo aplicado es directamente proporcional a la velocidad de deformación pero independiente de la deformación misma (García Quesada, 2008).

En un sólido elástico la deformación desaparece cuando lo hace la causa que la provoca, mientras que un fluido viscoso no recupera la forma inicial cuando desaparece la causa que la ha provocado. Es por ello que un comportamiento intermedio es el que presentan los materiales viscoelásticos (García Quesada, 2008).

De acuerdo al número de *Déborah (De)*, parámetro empleado para caracterizar las sustancias según su comportamiento elástico, viscoso o viscoelástico, determinado por el Dr. Reiner uno de los fundadores de la reología, la mayoría de las sustancias pueden fluir, sólo hay que esperar un tiempo determinado (García Quesada, 2008).

Ecuación 10: Número de Deborah

$$De = \frac{\tau}{t}$$

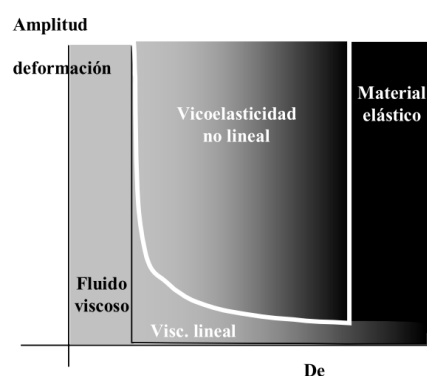
t = tiempo del proceso de deformación al que está sometido una sustancia

τ = tiempo de relajación de la sustancia

Nota: Adaptado de García Quesada J. C. (2008, p.2)

De esta forma, el comportamiento de los materiales se puede clasificar cualitativamente en un diagrama de Deformación/ De en el que se diferencian 3 zonas: una a bajos número de De que corresponde a un comportamiento viscoso, otra a números de De elevados, concerniente a un comportamiento elástico y la última zona intermedia correspondiente a un comportamiento viscoelástico. No obstante, los materiales no son siempre ideales por lo que, a su vez, dentro de cada zona podrían aparecer distintos comportamientos en los sólidos elásticos y en los fluidos viscosos considerando la linealidad existente entre esfuerzo/deformación y esfuerzo/velocidad de deformación. Asimismo, algunos sólidos elásticos se alejan de la linealidad según la ley de Hooke por encima de un cierto valor de deformación. Lo mismo ocurre con algunos fluidos viscosos que se alejan de la ley de Newton por encima de un cierto valor de velocidad de deformación. En la imagen siguiente se puede observar el comportamiento de estos materiales de acuerdo a la gráfica de Deformación/ De (García Quesada,2008).

Figura 35: Comportamiento de un material en función de la amplitud de la deformación y el número de Déborah



Nota: Adaptado de García Quesada J. C., (2008, p.2)

Con el comportamiento de los materiales viscoelásticos sucede algo parecido ya que, para deformaciones muy bajas, existe una relación lineal entre esfuerzo y deformación

nombrada zona de viscoelasticidad lineal. Cuando las deformaciones son mayores la relación deja de ser lineal y se alcanza la zona de viscoelasticidad no lineal (García Quesada,2008).

Estas conductas que presentan los materiales están directamente relacionadas con los fenómenos de fluencia y de relajación. El fenómeno de relajación se basa en la reducción progresiva de la tensión mientras la deformación permanece constante. Por el contrario, la fluencia se basa en el aumento progresivo de la deformación mientras la tensión no aumenta. En este sentido cabe mencionar que las deformaciones remanentes en un material son el resultado de un comportamiento plástico ya que al eliminar la fuerza aplicada no recupera su forma inicial (Valiente Cancho, 2018).

Se puede afirmar que las combinaciones de estos dos comportamientos no elásticos dan lugar a tres clases de materiales inelásticos, materiales plásticos, los viscoplásticos y los ya nombrados viscoelásticos donde los estados de tensión y deformación no se estabilizan a la vez, si bien una vez estabilizados los valores que se obtienen se corresponden biunívocamente. En este sentido se puede afirmar que la viscoelasticidad es un tipo de comportamiento reológico anelástico que presentan algunos materiales que manifiestan tanto propiedades viscosas como propiedades elásticas cuando se deforman (Valiente Cancho, 2018).

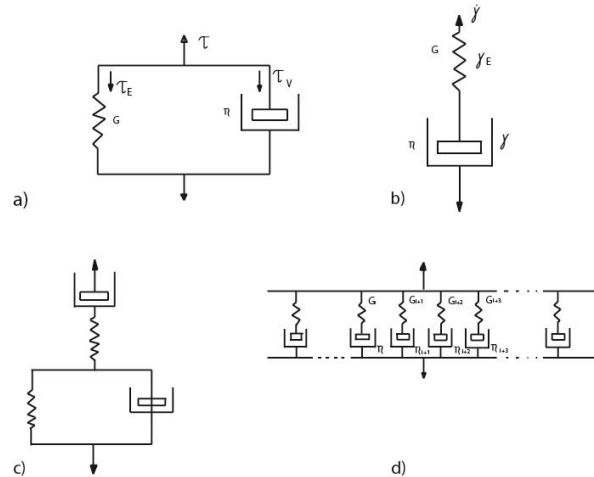
Por otro lado, como el comportamiento reológico de los materiales viscoelásticos es complicado visualizar, se recurre a modelos mecánicos para su representación. De este modo, el comportamiento de un fluido de Newton se suele representar como un émbolo o pistón trabajando en un cilindro y el comportamiento elástico de un sólido de Hooke como un muelle. El pistón o émbolo representa la disipación de la energía en forma de calor, en cambio el muelle representa la energía almacenada en el cuerpo (García Quesada, 2008).

Estos modelos consideran que, la combinación de un elemento elástico, un muelle, con un elemento viscoso, un émbolo, puede explicar el comportamiento del material viscoelástico. Así, tanto los modelos de Kelvin-Voigt como el de Maxwell son modelos sencillos que aportan la base para la obtención de modelos más reales que se ajustan al comportamiento viscoelástico. El modelo de Kelvin-Voigt se basa en la combinación de un elemento elástico y un elemento viscoso en paralelo y el de Maxwell en serie (Balar Gimeno, 2011).

Sin embargo, al tratarse de modelos simples, la representación del comportamiento viscoelástico resulta poco precisa. Por ello, el modelo de Burgers se aproxima a dicho comportamiento al combinar los modelos de Maxwell y el de Kelvin-Voigt. Asimismo, existen

los modelos denominados como generalizados que se ajusta mayormente al comportamiento real viscoelástico que consiste en superponer el suficiente número de modelos de Kelvin-Voigt y de Maxwell (García Quesada, 2008).

Figura 36: Representación del comportamiento viscoelástico de un material mediante los modelos de a) Kelvin-Voigt, b) Maxwell, c) Burgers y d) Maxwell generalizado



Nota: Adaptado de García Quesada J. C. (2008, p.8), fuente original: Barnes, H.A.; Hutton, J.E; Walters F. R. S., K.; An introduction to rheology, Ed. Elsevier 1989.

No obstante, el modelo mecánico general del material de Boltzmann es el que mayor aproximación presenta del comportamiento del material viscoelástico, ya que postula la combinación de la unión en paralelo de un muelle y de un modelo de Maxwell (Valiente Cancho, 2018).

4.2.3 Propiedades mecánicas de los elastómeros

Una vez expuesto el comportamiento básico de los elastómeros mediante los modelos mecánicos simples se debe analizar cuáles son las propiedades mecánicas que caracterizan a los elastómeros. Estas se pueden dividir en dos clases: las propiedades estáticas y propiedades dinámicas (Meseguer-Valdenebro et al., 2020).

Dentro de las propiedades estáticas se encuentran, la dureza, el desgarro, las propiedades a bajas y altas temperaturas, la resistencia al aceite y disolventes y la exposición al ozono y al oxígeno (Meseguer-Valdenebro et al., 2020).

La dureza, según Roger Brown (2018), citado por Meseguer-Valdenebro, Portoles y Martínez-Conesa (2020), se determina como la resistencia a la indentación donde el

durómetro, instrumento para medirla, expresa los valores en unidades *Shore A* o *Shore D* de acuerdo a unos procedimientos.

En cuanto al desgarro se trata de una propiedad que ayuda a conocer en qué área se produce la concentración de la tensión ya que muchos aisladores y amortiguadores de vibraciones se encuentran sujetos a cargas cíclicas que con asiduidad se rompen debido a esa concentración de la tensión haciendo que la velocidad de crecimiento de la fisura aumente de tamaño y finalice en una acción de desgarro del elastómero (Meseguer-Valdenebro et al., 2020). Los ensayos de rotura por desgarro son interesantes para algunas aplicaciones que ayudan a determinar su vida útil.

Respecto a las propiedades a baja temperatura, los elastómeros se vuelven más duros, más rígidos y menos resistentes con la disminución de la temperatura. Así, al acercarse a la temperatura de transición vítrea (T_g), se fragilizan. En cuanto a las altas temperaturas, algunos aisladores y amortiguadores de vibraciones funcionan en condiciones de alta temperatura, por lo tanto, son resistentes a la degradación a altas temperaturas. Esta resistencia viene definida por su fórmula estructural y por los enlaces de reticulación químicos formados durante la vulcanización, es decir, los compuesto químicos que sirven para mejorar los procesos de curado y sus propiedad (Meseguer-Valdenebro et al., 2020).

La propiedad de resistencia al aceite y a disolventes que presentan los elastómeros es interesante conocerla ya que permite que se empleen como aisladores y amortiguadores de vibraciones en elementos de automoción puesto que muchos se encuentran en contacto directo con estas sustancias. Un aceite o un disolvente pueden hacer que, al estar en contacto con el elastómero, pierda sus propiedades físicas, que se hinche, que extraiga los químicos o incluso reaccione químicamente con él. La exposición al ozono y al oxígeno es una propiedad que hace que sean resistentes ya que en alguna circunstancias los aisladores y amortiguadores de vibraciones pueden estar expuestos al ozono producido por la descarga de equipos eléctricos (Meseguer-Valdenebro et al., 2020).

Por último, cabe mencionar que la adhesión es una característica que adquieren los elastómeros permitiéndoles adherirse a los metales siendo imprescindible en la fabricación de la mayoría de los aisladores y amortiguadores de vibraciones. De tal manera que el adhesivo se impregna en el metal y el elastómero se une al metal durante el proceso de vulcanización (Meseguer-Valdenebro et al., 2020).

Entre las propiedades dinámicas de los elastómeros se encuentran la viscoelasticidad y la resiliencia. Como se ha mencionado, la viscoelasticidad es una propiedad dinámica, propia del material, caracterizado mecánicamente por su comportamiento elástico similar a un muelle y de su comportamiento viscoso a la de un pistón. Esta forma de actuar permite que el elastómero mantenga una forma constante después de la deformación, al mismo tiempo que absorbe la energía mecánica (Meseguer-Valdenebro et al., 2020). Por otro lado, la resiliencia es una propiedad dinámica que sirve para caracterizar un material viscoso. Es la relación entre la energía retornada cuando se ha producido una deformación y la energía total que se le aplique para producir dicha deformación. Por esa razón, los elastómeros termoestables son utilizados en muchas ocasiones por estas propiedades de resiliencia. A resiliencias más bajas la vibración transmitida es menor, por eso, el caucho con resiliencia baja se emplea en amortiguadores, mientras que con valores altos de resiliencia se emplea para reducir la energía calorífica producida por el rozamiento de un neumático (González Hernández, 2004).

Existen muchos ensayos dinámicos que permiten determinar las propiedades dinámicas, entre ellas se destacan la norma “UNE-ISO 4664-1:2011. Caucho, vulcanizado o termoplástico. Determinación de las propiedades dinámicas. Parte 1: Directrices generales”, que proporciona directrices para la determinación de las propiedades dinámicas mediante métodos de oscilación forzada o libres, cuyo objetivo es estudiar la fatiga del material (AENOR, 2011). Los ensayos del material suelen realizarse a compresión, tracción, flexión o cortadura, el conjunto de estos ensayos se denominan análisis mecánico dinámico (Meseguer-Valdenebro et al., 2020).

También, la normativa “UNE-ISO 37:2013: Elastómeros. Caucho, vulcanizados o termoplásticos. Determinación de las propiedades de esfuerzo-deformación en tracción”, que describe un método para la determinación de distintas propiedades, entre ellas la resistencia en tracción, el alargamiento a la rotura y el esfuerzo a un alargamiento dado. Los ensayos se realizan con unas dimensiones de las probetas de material determinadas y con distintos valores de velocidad de aplicación de la carga 100 mm/min , 200 mm/min y 500 mm/min (AENOR, 2013b). La norma “UNE-ISO 2285:2019 Caucho, vulcanizado o termoplástico. Determinación de la deformación remanente por tensión bajo alargamiento constante, y de la deformación remanentes por tensión, alargamiento y fluencia bajo carga de tracción constante”, que detalla métodos de ensayo para la determinación de los cambios dimensionales de las probetas durante y después de la carga de tracción en períodos cortos bajo alargamiento o carga constante (AENOR, 2019b). Cuando un elastómero se tracciona por un periodo determinado de tiempo y luego se descarga, no recuperando su longitud inicial, la

diferencia de ese alargamiento es lo que se denomina como deformación remanente (Meseguer-Valdenebro et al., 2020).

No obstante, una forma relativamente sencilla de conocer la propiedad dinámica de resiliencia de un elastómero es mediante el rebote de un péndulo tras su impacto en el material, este tipo de ensayo se realiza mediante la normativa “UNE-EN ISO 4662:2013 Caucho, vulcanizado o termoplástico. Determinación de la resiliencia por rebote”(AENOR, 2013c). Aunque se han realizado innumerables dispositivos basados en este sistema como son los péndulos Lüpken y Dunlop o el péndulo de Schob, los resultados que se obtienen entre los diversos métodos no suelen ser normalmente coincidentes y por lo tanto sólo tienen un valor comparativo (Royo, 1989).

Partiendo de todo lo analizado, la resiliencia y la histéresis elástica, conceptos relacionados entre sí, forman parte de esos comportamientos. Es por ello que, a raíz de estos dos conceptos, se realizará el estudio de diversos materiales para comprender sus propiedades de una forma real. Por esa razón en el desarrollo de esta investigación se han realizado ensayos para obtener directamente la histéresis elástica mediante ensayos normalizados que se desarrolla más adelante.

Respecto a la histéresis elástica, los elastómeros termoestables, como el caucho, al aplicar un esfuerzo experimentan una deformación elástica, es decir, no permanente, pero al cesar la causa que los ha deformado recuperan su longitud inicial realizando recorridos distintos en el proceso de carga y descarga. El área encerrada por ambas curvas es proporcional a la energía que disipa en el interior del material elástico. En este sentido si un material tiene una gran histéresis elástica será apropiado para absorber las vibraciones.

En definitiva, la histéresis es la energía perdida durante el ciclo de deformación y recuperación (carga- descarga). Cuando un material es sometido a tracción con varios ciclos carga-descarga se produce calor, es decir, se transforma la energía producida en los ciclos de histéresis en calor (Royo, 1989). La expresión analítica que responde a este fenómeno es la siguiente:

Ecuación 11: Histéresis elástica

$$Resiliencia = \frac{ET(Energía\ Recuperada) * 100}{EA(Energía\ Inicial\ Aplicada)}$$

$$Histéresis = 100 - Resiliencia$$

De tal modo que, como se ha mencionado anteriormente, si un material tiene menor resiliencia y mayor histéresis elástica proporcionará mejor capacidad de amortiguación.

4.2.4 Materiales de estudio

Los elastómeros son materiales que día a día van tomando mayor relevancia en la industria. En muchos sectores estos materiales son esenciales, un ejemplo de ello es el sector de la construcción que los utiliza para el desarrollo de productos para amortiguar cargas dinámicas como en el caso de terremotos. En el sector de los electrodomésticos lo emplean para impermeabilizar frigoríficos o en sectores como la aeronáutica o en automoción que lo utilizan para el desarrollo de neumáticos. La explicación por la que los elastómeros son materiales extensamente empleados es por las ya citadas propiedades mecánicas como la capacidad de deformación, la durabilidad, la reciclabilidad y por su relación precio/peso. Se trata de materiales capaces de alcanzar grandes deformaciones, y poseen excelentes características de amortiguación, haciéndolos apropiados para el uso de la disipación de energía cinética producida por impactos y vibraciones. En la actualidad, los elastómeros que se utilizan en la industria tienen poca antigüedad debido a que empezaron a desarrollarse en la década de los 70 y 80. Asimismo, son materiales complejos por su relación tensión-deformación puesto que apenas es lineal, es decir, presentan un comportamiento no lineal incluso en reducidas deformaciones. Además, son materiales sensibles a la velocidad de deformación y a ciertas condiciones ambientales como la temperatura, el ozono y el envejecimiento (Tobajas Alonso, 2019).

Existen dos tipos de elastómeros, los termoplásticos y los termoestables. Una de las diferencias fundamentales entre estos elastómeros es su comportamiento ante temperaturas elevadas. Los termoestables pueden vulcanizarse. La vulcanización es un proceso de curado en el que se generan enlaces entre las cadenas poliméricas. Esto hace que sea irreversible a diferencia de los elastómeros termoplásticos que se ablandan y fluyen por encima de una temperatura establecida. Algunos elastómeros termoestables más comunes son la goma natural (NR), el caucho de poliuretano (PU, AU, EU) (Meseguer-Valdenebro et al., 2020), el caucho de butadieno-estireno (SBR), los cauchos butílicos y halobutílicos (IIR) y (BIIR y CIIR), los cauchos de silicona (Q), los cauchos nitrílicos (NBR) y los cauchos de poliéter (CO, ECO, ETER) (L. G. Hernández, 2004).

Por otro lado, los elastómeros termoplásticos se suelen emplear como adhesivos, para calzado e incluso para dispositivos médicos (Meseguer-Valdenebro et al., 2020). También, se suelen emplear según Spontak y Patel (2000), citados por Burgoa Beitia (2020), para aplicaciones automotrices y en transporte ya que tienen buena capacidad de procesamiento y son reciclables. No obstante, en ciertas condiciones como la exposición al sudor no son adecuados y pueden degradarse. Normalmente, en su formulación no requieren agentes de refuerzo, estabilizadores o sistemas de curado. Aunque la materia prima para su creación es bastante cara, tienen baja resistencia química y térmica, alta compresión y baja estabilidad térmica (Meseguer-Valdenebro et al., 2020). Algunos termoplásticos más conocidos son el copolímero de estileno y butadieno con una proporción máxima de estireno del 30 % (TPE-S), la poliolefina termoplástica (TPO), el copoliésteres (COPE), copoliamidas (PEBA), poliuretanos termoplásticos (TPU), siendo el caucho nitrilo nitrilicocarboxilado (XNBR) un elastómero termoplástico iónico (L. G. Hernández, 2004).

Asimismo, cabe añadir que existe un tipo de termoplástico denominado vulcanizado termoplástico (TPV) que se ha convertido hoy en día en uno de los materiales más empleados en la industria de la automoción. Las razones de este crecimiento son debidas a sus características y a la versatilidad en el diseño. Principalmente se basa en la combinación de cauchos, termoplásticos y sistemas de reticulación que proporcionan propiedades adaptadas para un alto rendimiento. Actualmente, los cauchos vulcanizados clásicos están siendo sustituidos por los TPV aunque todavía queda mucho camino por recorrer puesto que hay pocos estudios sobre el diseño de estos materiales y en especial en aplicaciones que amortigüen la vibración (Burgoa Beitia, 2020). Son materiales complejos y difíciles de producir, tal es así que según Adeniyi, Agboola, Sadiku, Durowoju, Olubambi, Babul Reddy, Ibrahim y Kupolati (2016), citados por Burgoa Beitia (2020), establecieron que las mezclas de elastómeros termoplásticos con propiedades finales mejoradas sólo son posibles obtenerlas si el caucho y el termoplástico son compatibles. Además, la mayoría de los polímeros empleados al tener alto peso molecular son inmiscibles entre ellos (Utracki, 2002) esto hace que sea complejo su proceso de mezcla reactiva.

Una vez expuestos los diferentes tipos de elastómeros existentes en la industria, para el desarrollo de la tesis se ha desechado el uso de los termoplásticos puesto que, en general, las propiedades que se buscan para la empuñadura deben desempeñar unas funciones determinadas y los termoplásticos no las cumplen al no ser adecuados para estar expuestos al sudor ya que el operario se encuentra trabajando en la intemperie en condiciones de calor como de frío y pueden degradarse. Además, la materia prima que se emplea para crearlos es

cara, siendo no rentable para la industria de la construcción, concretamente en la fabricación de maquinaria. Asimismo, tiene baja resistencia química y térmica por lo que las condiciones climatológicas a las que el operario estará expuesto condicionan su empleabilidad. Por último, principalmente por lo que se desechan, aunque los elastómeros clásicos están siendo sustituidos por los termoplásticos vulcanizados, actualmente existen pocos estudios sobre aplicaciones que amortigüen la vibración.

Es por ello que, para el estudio de materiales se ha contado con el análisis de elastómeros termoestables que se emplean actualmente en la industria. Tanto en parte del marco teórico como en el inicio del marco práctico, se ha ido mencionando en distintas ocasiones que los termoestables han presentado durante muchos años óptimos resultados frente a la vibración, puesto que presentan propiedades dinámicas de resiliencia en las que a resiliencias más bajas la vibración transmitida es menor y es por ello que el caucho, como material termoestable, se emplea en amortiguadores.

Se ha contado con dos entidades, una privada y otra pública. La empresa privada denominada Synthelast S.A. ha sido la encargada de proporcionar los materiales termoestables con buenas prestaciones en materia de amortiguación y sobre todo materiales empleados en la industria. Se trata de una empresa situada en Elche, provincia de Alicante, que desarrolla su actividad industrial en el sector de los materiales plásticos, diseñando, desarrollando y optimizando polímeros y elastómeros para su empleo en productos del sector industrial como es el sector del calzado (Synthelast. S.A, 2022).

A continuación, se presentan los elastómeros termoestables seleccionados para el estudio:

- Caucho Natural
- Caucho Negro
- EVA (Etilvinilacetato)
 - EVA D30
 - EVA D50
- Poliuretano PU
 - PU-1
 - PU-2

A través del Centro tecnológico del calzado y del plástico (CETEC) de la Región de Murcia, se han realizado los ensayos para analizar las características mecánicas de los materiales y así estudiar su histéresis.

En este epígrafe se escriben los ensayos realizados y sus conclusiones con el fin de caracterizar y seleccionar aquellos que tengan mejores prestaciones frente a la amortiguación de las vibraciones.

4.2.4.1 Características de los materiales de estudio

Para aplicar el material más idóneo a la empuñadura es preciso analizar el componente principal de la empuñadura original de Segeda, es decir, el caucho sintético para compararlo con los demás materiales de estudio.

De la empuñadura original del martillo neumático rotopercurtor modelo MS76 se conoce que el caucho sintético lleva incorporado en su formulación negro de humo. Se puede comprobar debido al color negro, ya que se trata de un producto que en la industria es muy común emplearlo mezclándolos con caucho, pues actúa como agente reforzante, como pigmento, como agente conductor o estabilizante a los rayos ultravioletas (Alfonso Los Santos, 2011). Asimismo, se caracteriza por ser insoluble en agua y solventes, de esta forma resulta interesante su aplicabilidad en las industrias (Flexicon, 2020). La variación de la cantidad de negro de humo que se aporte a otras formulaciones si puede hacer variar el compuesto final. La adición de este producto por exceso o por defecto para obtener formulaciones puede hacer variar los resultados del producto final (en este caso las características del caucho). El negro de humo tiene más del 95 % de carbono, el resto de factores son sustancias producto de la combustión para su obtención (Ibarra Rueda, 2004).

Por ese motivo, de entre los materiales analizados, se incorporó en el estudio un caucho denominado en esta investigación, como caucho negro ya que contiene en su formulación negro de humo asemejándose al caucho sintético de la empuñadura original para analizarlo y compararlo con el resto de materiales.

Como se ha citado, la empresa Synthelast S.A. ha sido la encargada de proporcionar los elastómeros sobre los que se va a realizar una serie de ensayos para confirmar la idoneidad de este tipo de elementos en determinados componentes de las empuñaduras en los martillos neumáticos. Los materiales son: dos tipos de caucho, natural y negro; dos tipos de

etilvinilacetato (EVA), el EVA D30 y el EVA D50. Por último, dos tipos de poliuretanos (PU), el PU-1 y el PU-2.

El caucho negro empleado para el análisis que se asemeja al caucho sintético de la empuñadura original se compone de un 15 % de SBR que hace referencia al Caucho estireno-butadieno, un 40 % Natural es cis-1, 4-poliisopreno, es decir, lo que se conoce como caucho natural, el 1 % de óxido de zinc (ZnO), el 1 % de ácido esteárico, el 5 % de ayudas de proceso que se caracterizan por los peróxidos orgánicos entre los cuales el más empleado es el 2,4 diclorobenzoilo. Igualmente, tiene un 15 % de aceites, normalmente cuando se habla de aceites para este tipo de composición nos referimos a aceites parafínicos. Por último, en su composición hay un 20 % de negro de humo y un 3 % de azufre, además de acelerantes como son los peróxidos orgánicos.

Normalmente, el caucho natural puede obtenerse mediante diferentes especies vegetales, sin embargo, el árbol más común es el árbol *Hevea Brasiliensis* proveniente de la Amazonía y cultivado en el sudeste asiático. El producto obtenido es de aspecto lechoso y reactivo, se puede clorar e hidroclorar para emplearlo en el ámbito industrial. Así, la reacción de epoxidación en forma de látex da lugar al citado caucho natural epoxidado con excelentes propiedades de amortiguación, impermeabilidad a los gases, resistencia a la rodadura y a los aceites. Se trata de un material amorfo que tiende a cristalizar al estirarlo. De esta forma, la resistencia a la rotura está sujeta al grado de cristalización obtenido en el momento de la rotura (L. G. Hernández, 2004).

Por otro lado, los vulcanizados de caucho natural se caracterizan por su elevada resistencia y alargamiento a rotura, buena resistencia al desgarró, a la abrasión, cuando están trabajando a fatiga tienen un buen comportamiento a cargas cíclicas y presenta resiliencia elevada. El caucho natural se emplea en aplicaciones que requieren un buen comportamiento a esfuerzos dinámicos fundamentado en su elevada capacidad de deformación, en su resiliencia y su resistencia a fatiga. Algunas de estas aplicaciones son en neumáticos (L. G. Hernández, 2004). En este caso, la composición del caucho natural empleado en el análisis, es similar al caucho negro analizado anteriormente. No obstante, contiene pequeñas peculiaridades. El caucho natural se puede obtener de diversas formas, es decir, de forma natural, como se ha citado anteriormente, o de forma sintética. En este caso, que se ha obtenido de forma sintética, su composición es: un 70 % de caucho natural, un 15 % de sílice, un 1 % de óxido de zinc (ZnO), un 1 % de ácido esteárico, un 10 % de aceites como son los parafínicos. Un 3 % de azufre y acelerantes como son los peróxidos orgánicos.

Figura 37: Caucho negro y caucho natural



Nota: Adaptado de Synthelast (2020, p.1).

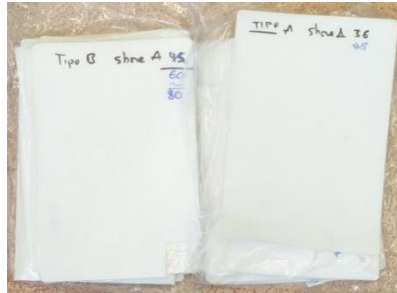
El caucho de poliuretano (PU) es muy versátil, tanto es así que se puede obtener a partir de elastómeros sólidos, plásticos rígidos, elastómeros líquidos moldeados por colada, hasta espumas. Los cauchos líquidos se moldean por colada y los sólidos se trabajan en rodillos. Los sólidos parten de diisocianatos y polioles que han reaccionado formando polímeros con alto peso molecular que terminan en grupos hidróxilos. Se pueden procesar como cualquier elastómero y vulcanizar con azufre o con peróxido. Este producto se suele emplear en juntas de estanqueidad, para calzado y también como adhesivos (L. G. Hernández, 2004). Presenta buena resistencia a la abrasión, alta resistencia a la tracción y al desgarro. También, resistencia a solventes alifáticos, a aceites minerales, al oxígeno y al ozono (Meseguer-Valdenebro et al., 2020).

En cuanto al PU empleado en la tesis, tanto para el PU-2 como para el PU-1, su formulación se estructura según la relación estequiométrica (75A/100B). La diferencia de los dos PUs viene marcada por los diferentes porcentajes que hay en el polioliol, ya que ambos tienen el prepolímero común.

El polioliol contiene poliéster más un porcentaje de adipato de etilenglicol (EG) y un porcentaje de 1,4 butanodiol (BD) o bien uno de ellos solo. Por otro lado, está compuesto por diclorobenzidina que es un tipo de alargador de cadena que permite una mayor polimerización del PU. También, contiene antiestáticos como el estearato de butilo y la trietanolamina. Cuenta con colorantes, aditivos como el fosfato de éster clorado, catalizadores (aminas terciarias como el DABCO), siliconas o aceites de silicona (polidimetilsiloxano) y finalmente espumantes como el agua.

El prepolímero consta de un porcentaje de 4,4 diisocianato de difenilmetano (MDI) y poliéster. El poliéster que lleva el polioliol y el poliéster que lleva el prepolímero son el mismo producto para que exista compatibilidad en la reacción química.

Figura 38: PU-2(TipoB) y PU-1(TipoA)



Nota: Adaptado de Synthelast (2020, p.1).

Los cauchos de etileno-acetato de vinilo (EVA), se obtienen por la fabricación de copolímeros de etileno acetato de vinilo ($\text{CH}_3\text{CO-O-CH=CH}_2$) y, dependiendo del contenido relativo de los comonómeros, se puede producir para diversas aplicaciones como por ejemplo los adhesivos. Estos elastómeros sólo se pueden vulcanizar por peróxidos, y generalmente están presentes los protectores de hidrólisis como las carbodiimidas. La propiedad más destacada de estos materiales es su excelente resistencia al calor, sólo superada por los cauchos de siliconas y fluorados. Son importantes los bajos valores de deformación remanente a compresión a temperaturas elevadas, entre 100 y 180 °C, incluso superiores al caucho de silicona. Su resistencia a los aceites está comprendida entre los cauchos de cloropreno y los nitrílicos. Por ser insaturado se emplea en mezclas con caucho natural (NR), caucho de butadieno-estireno (SBR) y caucho nitrílicos (NBR) otorgándoles protección contra el ozono (L. G. Hernández, 2004).

En cuanto al EVA empleado en el análisis, tanto la composición del EVA D50 como del EVA D30 varían según los elementos que los integran. El EVA D50 como el EVA D30 se encuentra conformado por (vinil silano y parafina) fundamentalmente. La composición de ambos está integrada por un copolímero de acetato de vinilo del 18 %, un porcentaje de ácido esteárico, un porcentaje de óxido de zinc, un porcentaje de sílice precipitada, un porcentaje de terbutilperoxiisopropilbenceno y por último un porcentaje de azodicarbonamida.

Figura 39: Etilvinilacetato D50 y D30



Nota: Adaptado de Synthelast (2020, p.1).

4.2.4.2 Ensayos

Durante el proceso de desarrollo del producto, es importante conocer el comportamiento mecánico del material que se va a utilizar, ya que debe responder a las necesidades y solicitaciones de servicio para las que ha sido concebido. En este sentido, la realización de ensayos sobre los elastómeros, permitirán su caracterización que ayudarán a sentar las bases para el diseño de empuñaduras más seguras.

Como se ha indicado en el punto “4.2.3 propiedades mecánicas de los elastómeros”, existen varias normativas para estudiar las propiedades dinámicas, la UNE-ISO 4664-1 que describe directrices para estudiar la fatiga del material mediante métodos de oscilación forzadas o libres. La UNE-ISO 37 que proporciona una metodología para determinar la resistencia a tracción, el alargamiento a la rotura, el esfuerzo a un alargamiento dado, el esfuerzo en el punto de fluencia y alargamiento en el punto de fluencia. La UNE-ISO 2285 analiza el material durante y después de someter al material a cargas de tracción en períodos cortos bajo alargamiento o carga constante y la UNE-EN ISO 4662 estudia la resiliencia mediante rebote. Todas ellas forman parte de ensayos para estudiar comportamientos dinámicos de los materiales. No obstante, el procedimiento que se ha seguido en esta tesis para determinar las propiedades mecánicas de los materiales y su comportamiento dinámico en ciclos de carga y descarga y así estudiar su histéresis, sigue lo dispuesto en la norma UNE-EN ISO 527.

Las pruebas reales realizadas en los laboratorios del Centro tecnológico del calzado y del plástico (CETEC) en Alhama de Murcia, son ensayos normalizados, habituales en este tipo de estudios y particularizados en los materiales de esta investigación. Es fundamental llevar a cabo este proceso con el fin de estudiar su comportamiento y seleccionar los materiales que

presenten mejores propiedades. Estos ensayos son un paso previo para conseguir un modelo numérico que permitirá estudiar la amortiguación de los diseños optimizados.

La estructura de ambos ensayos es la siguiente:

- 1- Marco regulador
- 2- Instrumental empleado
- 3- Preparación y manipulación de muestras
- 4- Ensayo mecánico de tracción uniaxial
- 5- Ensayo mecánico de tracción cíclico

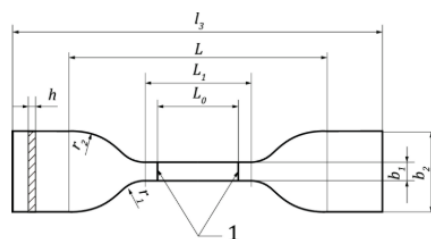
1- Marco regulador

Los ensayos se han orientado hacia una serie de normas comúnmente empleadas en la caracterización de este tipo de materiales.

Para la determinación de las propiedades a tracción de las láminas poliméricas se ha seguido la norma UNE-EN ISO 527. Concretamente, han sido especialmente tenidos en cuenta los apartados UNE-EN ISO 527-1, el cual detalla los principios generales para la determinación de las propiedades en tracción de los plásticos, y la UNE-EN ISO 527-3 que profundiza en las condiciones de ensayo. Actualmente, ambas se encuentran vigentes, desde 2012 y desde 2019 respectivamente (AENOR, 2012b) (AENOR, 2019a).

De la UNE-EN ISO 527-3 se han extraído la geometría de las probetas y sus dimensiones. Para ensayos de tracción es la siguiente:

Figura 40: Probeta tipo 5



Nota: Adaptado de AENOR (2019, p.9)

Se han preparado las muestras a partir de la probeta seleccionada para ejecutar conforme normativa, preparándolo in situ en los instantes previos a la realización de las pruebas conforme sugiere el apartado 9.1 de la norma UNE-EN ISO 527-1.

Tanto en los ensayos a tracción uniaxial como en los ensayos a tracción cíclicos, se han empleado el mismo instrumental y las mismas técnicas que dicta la norma UNE-EN ISO 527.

2- Instrumental empleado

En este apartado se detalla el instrumental empleado en la parte experimental de ambos ensayos.

Para los ensayos se ha empleado una máquina de ensayos universal ZwickRoell de la gama ProLine Z010 de sobremesa, contiene los siguientes elementos:

Figura 41: (m) Ordenador para el tratamiento de los datos, (n) mordazas para fijación de la muestra



(m)

(n)

Nota: Adaptado de Centro Tecnológico del Calzado y del Plástico, CETEC, (2020, p.1)

Se ha empleado un troquel de acuerdo a la norma UNE-EN ISO 527-3 que detalla las especificaciones de las dimensiones de la probeta tipo 5. También, un pie de rey digital para comprobar dichas dimensiones.

Figura 42: (ñ) troquel probeta tipo 5, (o) pie de rey digital



(ñ)

(o)

Nota: Adaptado de Centro Tecnológico del Calzado y del Plástico, CETEC, (2020, p.1)

3- Preparación y verificación de las muestras

El proceso llevado a cabo en la preparación y verificación de las muestras sigue lo dispuesto en la normativa UNE-EN ISO 527-1 y UNE-EN ISO 527-3 apartados 6 y 7. A partir de los materiales laminados, se procede a generar las probetas situando el troquel encima de la plancha del polímero y mediante presión, según normativa, se obtiene entre 5 y 7 probetas con un espesor aproximado de 2 mm y una anchura de la parte estrecha entorno a 4 mm. Una vez obtenidas las probetas se procede a su verificación mediante el pie de rey digital.

Figura 43: Proceso de obtención de probetas

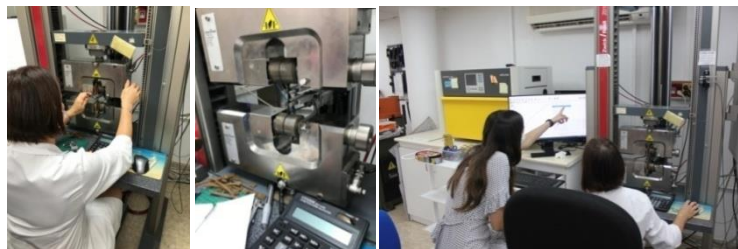


Nota: Adaptado de Synthelast (2020, p.1)

4- Ensayo mecánico de tracción uniaxial

Para realizar esta prueba se procede de la siguiente manera: las probetas se insertan en las mordazas y se aplica una carga de tracción creciente hasta la rotura. Los parámetros y resultados se encuentran en el Anexo C.

Figura 44: Proceso ensayo mecánico tracción uniaxial



Nota: Adaptado de Centro tecnológico del calzado y del plástico, CETEC, (2020, p.1)

Tabla 28: Parámetros de ensayo mecánico de tracción uniaxial

Datos generales en los ensayos mecánicos de tracción uniaxial	
Precargas en función del material	0,2 N -3 N
Velocidad de ensayo	100 mm/min

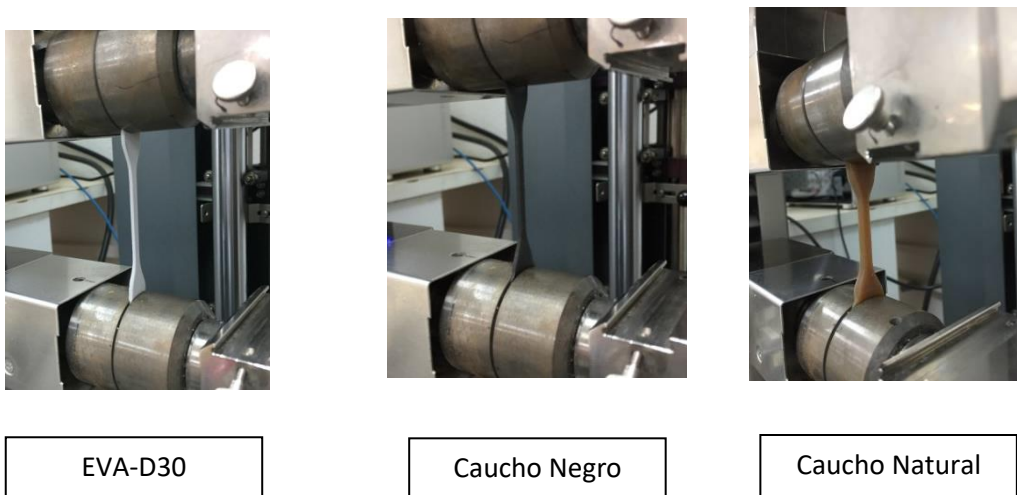
Nota: Adaptado de Centro tecnológico del calzado y del plástico, CETEC, (2020, p.1-12)

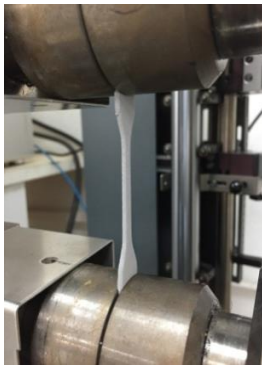
Estos ensayos tienen como objetivo analizar el comportamiento mecánico de los materiales y de esta forma aplicar parámetros adecuados para los ensayos de tracción cíclicos que se describen a continuación.

5- Ensayo mecánico de tracción cíclicos

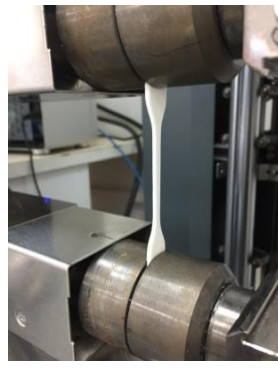
A cada probeta se han realizado tres ciclos de carga y descarga porque se observó que en el primer ciclo la curva dibujada no se modificaba demasiado, la segunda, alguna vez era diferente y en los siguientes ciclos las curvas eran iguales a la segunda, y, al estabilizarse las curvas, ya no era necesario hacer más ciclos. Se realizó a una velocidad de ensayo de 50 mm/min (AENOR, 2012b) y a una fuerza máxima que viene determinada por el material a ensayar. A continuación, se presentan algunas fotos de los ensayos realizados a cada material.

Figura 45: Ensayos de tracción cíclicos, probeta tipo 5 de los distintos materiales

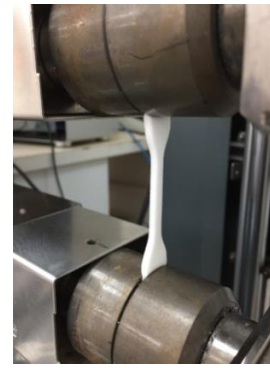




EVA-D50



PU-1



PU-2

Nota: Adaptado de Centro tecnológico del calzado y del plástico, CETEC, (2020, p.1)

En los ensayos se ha observado que la mayoría de estos elastómeros termoestables cuyo comportamiento viene definido por su viscoelasticidad, sufren histéresis, es decir, la descarga se efectúa a una tensión inferior que la carga. La histéresis implica disipación de energía especialmente bajo los primeros ciclos de carga. Los únicos materiales en los que se ha observado poca histéresis son el caucho natural, el PU-1 y el EVA-D30.

Los datos y resultados obtenidos del ensayo se encuentran en el Anexo D.

Tabla 29: Datos generales de los ensayos mecánicos de tracción cíclicos

Datos generales en los ensayos mecánicos de tracción cíclicos	
Precargas en función del material	0,2 N-3 N
Ciclos por cada probeta	3
Alargamiento	Entre 0 % y el 50 %
Velocidad de ensayo	50 mm/min
Fuerza máxima en función del material (F_{max})	7 N-34 N

Nota: Adaptado de Centro tecnológico del calzado y del plástico, CETEC, (2020, p.1-12).

Todos estos ensayos son el primer paso para seleccionar el material óptimo a incorporar en el diseño del producto. En el epígrafe siguiente se realizarán los cálculos para obtener la histéresis elástica de los elastómeros.

4.2.4.3 Cálculos

En este apartado se realiza el cálculo de la resiliencia y la histéresis elástica de los materiales objeto de estudio, empleando la siguiente expresión:

Ecuación 12: Cálculo de resiliencia e histéresis elástica

$$Resiliencia = \frac{ET(Energía Recuperada) * 100}{EA (Energía Inicial Aplicada)}$$

$$Histéresis = 100 - Resiliencia$$

Para ello, en primer lugar, se ha calculado en cada probeta la media de la energía recuperada, $\overline{\Delta W_{ides}}$, y de la energía inicial aplicada, $\overline{\Delta W_{icar}}$. Después de obtener la media de cada probeta se ha realizado una media total de todas las probetas, es decir, de las 5 probetas de un mismo material, $\overline{\Delta W_{iTOTAL}}$.

Figura 46: Caucho Natural

Nº	Índice	WiCar	WiDes
		Nmm	Nmm
1	1	129,83	109,67
	2	125,87	113,56
	3	130,19	118,76
2	1	106,94	88,08
	2	103,38	91,98
	3	108,12	97,12
3	1	117,01	96,33
	2	111,76	99,49
	3	115,69	104,81
4	1	121,62	101,07
	2	116,48	104,48
	3	120,21	108,85
5	1	122,54	103,58
	2	118,63	106,23
	3	121,96	110,53

Nota: Adaptado de Centro tecnológico del calzado y del plástico, CETEC, (2020, p.1-2)

1º) Obtención de la media de los 3 ciclos de cada probeta de la energía inicial aplicada y la media de la energía recuperada.

Cálculo de carga y descarga

Probeta 1 de los 3 ciclos

$$\overline{W}_{Car1} = \frac{129,83 + 125,87 + 130,19}{3} = 128,63 \text{ Nmm}$$

$$\overline{W}_{Des1} = \frac{109,67 + 113,56 + 118,76}{3} = 113,99 \text{ Nmm}$$

Probeta 2 de los 3 ciclos

$$\overline{W}_{Car2} = \frac{106,94 + 103,38 + 108,12}{3} = 106,15 \text{ Nmm}$$

$$\overline{W}_{Des2} = \frac{88,08 + 91,98 + 97,12}{3} = 92,39 \text{ Nmm}$$

Probeta 3 de los 3 ciclos

$$\overline{W}_{Car3} = \frac{117,01 + 111,76 + 115,69}{3} = 114,82 \text{ Nmm}$$

$$\overline{W}_{Des3} = \frac{96,33 + 99,49 + 104,81}{3} = 100,21 \text{ Nmm}$$

Probeta 4 de los 3 ciclos

$$\overline{W}_{Car4} = \frac{121,62 + 116,48 + 120,21}{3} = 119,436 \text{ Nmm}$$

$$\overline{W}_{Des4} = \frac{101,07 + 104,48 + 108,85}{3} = 104,8 \text{ Nmm}$$

Probeta 5 de los 3 ciclos

$$\overline{W}_{Car5} = \frac{122,54 + 118,63 + 121,96}{3} = 121,043 \text{ Nmm}$$

$$\overline{W}_{Des5} = \frac{103,58 + 106,23 + 110,53}{3} = 106,78 \text{ Nmm}$$

2º) Después obtención de la media de la energía inicial aplicada a las 5 probetas y la media de la energía recuperada, la media de la energía inicial y de la energía retornada, el Cálculo de la resiliencia y el de la histéresis elástica son:

Media de la energía inicial y energía retornada

$$\overline{W_{Car\ TOTAL}} = \frac{\overline{W_{Car1}} + \overline{W_{Car2}} + \overline{W_{Car3}} + \overline{W_{Car4}} + \overline{W_{Car5}}}{5} = 118,015\ Nmm$$

$$\overline{W_{Des\ TOTAL}} = \frac{\overline{W_{Des1}} + \overline{W_{Des2}} + \overline{W_{Des3}} + \overline{W_{Des4}} + \overline{W_{Des5}}}{5} = 103,6346\ Nmm$$

Cálculo resiliencia

$$Resiliencia = \frac{ET(Energía\ Recuperada) * 100}{EA(Energía\ Inicial\ Aplicada)}$$

$$Resiliencia = \frac{\overline{W_{Desc\ TOTAL}} * 100}{\overline{W_{Car\ TOTAL}}} = 87,8147$$

Cálculo histéresis elástica

$$Histéresis = 100 - Resiliencia$$

$$Histéresis = 100 - 87,8147 = 12,1853$$

Figura 47: *Caucho Negro*

Nº	Índice	W _{iCar}	W _{iDesc}
		Nmm	Nmm
1	1	217,12	115,25
	2	173,99	118,65
	3	176,21	124,26
2	1	231,81	123,53
	2	184,44	127,39
	3	186,54	132,94
3	1	223,47	118,64
	2	177,58	121,70
	3	179,76	127,91
4	1	226,27	119,63
	2	180,55	123,99
	3	183,16	129,63
5	1	227,85	121,50
	2	180,35	124,71
	3	182,46	130,59

Nota: Adaptado de Centro tecnológico del calzado y del plástico, CETEC, (2020, p.1-2)

1º) Obtención de la media de los 3 ciclos de cada probeta de la Energía inicial aplicada y la media de la energía recuperada.

Cálculo carga y descarga

Probeta 1 de los 3 ciclos

$$\overline{W}_{Car1} = \frac{217,12 + 173,99 + 176,21}{3} = 189,107 \text{ Nmm}$$

$$\overline{W}_{Des1} = \frac{115,25 + 118,65 + 124,26}{3} = 119,386 \text{ Nmm}$$

Probeta 2 de los 3 ciclos

$$\overline{W}_{Car2} = \frac{231,81 + 184,44 + 186,54}{3} = 200,93 \text{ Nmm}$$

$$\overline{W}_{Des2} = \frac{123,53 + 127,39 + 132,94}{3} = 127,953 \text{ Nmm}$$

Probeta 3 de los 3 ciclos

$$\overline{W_{Car3}} = \frac{223,47 + 177,58 + 179,76}{3} = 193,603 \text{ Nmm}$$

$$\overline{W_{Des3}} = \frac{118,64 + 121,70 + 127,91}{3} = 122,75 \text{ Nmm}$$

Probeta 4 de los 3 ciclos

$$\overline{W_{Car4}} = \frac{226,27 + 180,55 + 183,16}{3} = 196,66 \text{ Nmm}$$

$$\overline{W_{Des4}} = \frac{119,63 + 123,99 + 129,63}{3} = 124,417 \text{ Nmm}$$

Probeta 5 de los 3 ciclos

$$\overline{W_{Car5}} = \frac{227,85 + 180,35 + 182,46}{3} = 196,886 \text{ Nmm}$$

$$\overline{W_{Des5}} = \frac{121,50 + 124,71 + 130,59}{3} = 125,6 \text{ Nmm}$$

2º) Después obtención de la media de la energía inicial aplicada a las 5 probetas y la media de la energía recuperada, la media de la energía inicial y de la energía retornada, el Cálculo de la resiliencia y el de la histéresis elástica son:

Media de la energía inicial y energía retornada

$$\overline{W_{Car\ TOTAL}} = \frac{\overline{W_{Car1}} + \overline{W_{Car2}} + \overline{W_{Car3}} + \overline{W_{Car4}} + \overline{W_{Car5}}}{5} = 195,437 \text{ Nmm}$$

$$\overline{W_{Des\ TOTAL}} = \frac{\overline{W_{Des1}} + \overline{W_{Des2}} + \overline{W_{Des3}} + \overline{W_{Des4}} + \overline{W_{Des5}}}{5} = 124,0211 \text{ Nmm}$$

Cálculo resiliencia

$$Resiliencia = \frac{\overline{W_{Desc\ TOTAL}} * 100}{\overline{W_{Car\ TOTAL}}} = 63,4583$$

Cálculo histéresis elástica

$$Histéresis = 100 - Resiliencia = 100 - 63,4583 = 36,5417$$

Figura 48: EVA D30

Nº	Índice	WiCar Nmm	WiDesc Nmm
1	1	161,16	60,37
	2	107,77	62,19
	3	106,39	64,10
2	1	182,22	77,29
	2	126,22	77,91
	3	125,00	80,33
3	1	160,66	62,17
	2	110,14	63,98
	3	109,43	66,01
4	1	154,32	59,51
	2	105,36	61,11
	3	105,12	63,56
5	1	149,73	57,51
	2	102,75	58,80
	3	102,03	61,46

Nota: Adaptado de Centro tecnológico del calzado y del plástico, CETEC, (2020, p.1-2)

1º) Obtención de la media de los 3 ciclos de cada probeta de la Energía inicial aplicada y la media de la energía recuperada.

Cálculo carga y descarga

Probeta 1 de los 3 ciclos

$$\overline{W_{Car1}} = \frac{161,16 + 107,77 + 106,39}{3} = 125,106 \text{ Nmm}$$

$$\overline{W}_{Des1} = \frac{60,37 + 62,19 + 64,10}{3} = 62,22 \text{ Nmm}$$

Probeta 2 de los 3 ciclos

$$\overline{W}_{Car2} = \frac{182,22 + 126,22 + 125,00}{3} = 144,48 \text{ Nmm}$$

$$\overline{W}_{Des2} = \frac{77,29 + 77,91 + 80,33}{3} = 78,51 \text{ Nmm}$$

Probeta 3 de los 3 ciclos

$$\overline{W}_{Car3} = \frac{160,66 + 110,14 + 109,43}{3} = 126,743 \text{ Nmm}$$

$$\overline{W}_{Des3} = \frac{62,17 + 63,98 + 66,01}{3} = 64,053 \text{ Nmm}$$

Probeta 4 de los 3 ciclos

$$\overline{W}_{Car4} = \frac{154,35 + 105,36 + 105,12}{3} = 121,6 \text{ Nmm}$$

$$\overline{W}_{Des4} = \frac{59,51 + 61,11 + 63,56}{3} = 61,393 \text{ Nmm}$$

Probeta 5 de los 3 ciclos

$$\overline{W}_{Car5} = \frac{149,73 + 102,75 + 102,03}{3} = 118,17 \text{ Nmm}$$

$$\overline{W}_{Des5} = \frac{57,51 + 58,80 + 61,46}{3} = 59,256 \text{ Nmm}$$

2º) Después obtención de la media de la energía inicial aplicada a las 5 probetas y la media de la energía recuperada, la media de la energía inicial y de la energía retornada, el Cálculo de la resiliencia y el de la histéresis elástica son:

Media de la energía inicial y energía retornada

$$\overline{W_{Car\ TOTAL}} = \frac{\overline{W_{Car1}} + \overline{W_{Car2}} + \overline{W_{Car3}} + \overline{W_{Car4}} + \overline{W_{Car5}}}{5} = 127,2198 \text{ Nmm}$$

$$\overline{W_{Des\ TOTAL}} = \frac{\overline{W_{Des1}} + \overline{W_{Des2}} + \overline{W_{Des3}} + \overline{W_{Des4}} + \overline{W_{Des5}}}{5} = 65,0864 \text{ Nmm}$$

Cálculo de la resiliencia

$$\text{Resiliencia} = \frac{\overline{W_{Desc\ TOTAL}} * 100}{\overline{W_{Car\ TOTAL}}} = 51,1605$$

Cálculo de la histéresis elástica

$$\text{Histéresis} = 100 - \text{Resiliencia} = 100 - 51,1605 = 48,839$$

Figura 49: EVA D50

Nº	Índice	WiCar Nmm	WiDesc Nmm
1	1	280,04	80,64
	2	168,60	83,87
	3	165,49	86,82
2	1	277,63	79,04
	2	165,05	81,54
	3	161,78	85,01
3	1	275,93	78,35
	2	163,84	80,58
	3	160,38	83,50
4	1	271,28	77,14
	2	160,96	79,00
	3	157,44	81,84
5	1	271,22	76,51
	2	162,08	78,96
	3	159,02	82,02

Nota: Adaptado de Centro tecnológico del calzado y del plástico, CETEC, (2020, p.1-2)

1º) Obtención de la media de los 3 ciclos de cada probeta de la Energía inicial aplicada y la media de la energía recuperada.

Cálculo carga y descarga

Probeta 1 de los 3 ciclos

$$\overline{W_{Car1}} = \frac{280,04 + 168,60 + 165,49}{3} = 204,71 \text{ Nmm}$$

$$\overline{W_{Des1}} = \frac{80,64 + 83,87 + 86,82}{3} = 83,776 \text{ Nmm}$$

Probeta 2 de los 3 ciclos

$$\overline{W_{Car2}} = \frac{277,63 + 165,05 + 161,78}{3} = 201,486 \text{ Nmm}$$

$$\overline{W_{Des2}} = \frac{79,04 + 81,54 + 85,01}{3} = 81,863 \text{ Nmm}$$

Probeta 3 de los 3 ciclos

$$\overline{W_{Car3}} = \frac{275,93 + 163,84 + 160,38}{3} = 200,05 \text{ Nmm}$$

$$\overline{W_{Des3}} = \frac{78,35 + 80,58 + 83,50}{3} = 80,81 \text{ Nmm}$$

Probeta 4 de los 3 ciclos

$$\overline{W_{Car4}} = \frac{271,28 + 160,96 + 157,44}{3} = 196,56 \text{ Nmm}$$

$$\overline{W_{Des4}} = \frac{77,14 + 79,00 + 81,84}{3} = 79,326 \text{ Nmm}$$

Probeta 5 de los 3 ciclos

$$\overline{W_{Car5}} = \frac{271,22 + 162,08 + 159,02}{3} = 197,44 \text{ Nmm}$$

$$\overline{W_{Des5}} = \frac{76,51 + 78,96 + 82,02}{3} = 79,163 \text{ Nmm}$$

2º) Después obtención de la media de la energía inicial aplicada a las 5 probetas y la media de la energía recuperada, la media de la energía inicial y de la energía retornada, el Cálculo de la resiliencia y el de la histéresis elástica son:

Media de la energía inicial y energía retornada

$$\overline{W_{Car\ TOTAL}} = \frac{\overline{W_{Car1}} + \overline{W_{Car2}} + \overline{W_{Car3}} + \overline{W_{Car4}} + \overline{W_{Car5}}}{5} = 200,0492 \text{ Nmm}$$

$$\overline{W_{Des\ TOTAL}} = \frac{\overline{W_{Des1}} + \overline{W_{Des2}} + \overline{W_{Des3}} + \overline{W_{Des4}} + \overline{W_{Des5}}}{5} = 80,9876 \text{ Nmm}$$

Cálculo de la resiliencia

$$\text{Resiliencia} = \frac{\overline{W_{Desc\ TOTAL}} * 100}{\overline{W_{Car\ TOTAL}}} = 40,4838$$

Cálculo de la histéresis elástica

$$\text{Histéresis} = 100 - \text{Resiliencia} = 100 - 40,4838 = 59,5161$$

Figura 50: PU-1

Nº	Índice	Wi _{Car}	Wi _{Desc}
		Nmm	Nmm
1	1	131,67	111,10
	2	127,09	114,90
	3	132,01	119,91
2	1	127,92	108,16
	2	124,01	112,75
	3	129,50	118,50
3	1	124,77	105,77
	2	121,74	110,30
	3	126,89	115,82
4	1	127,32	107,05
	2	122,06	110,14
	3	126,57	115,16
5	1	121,78	102,89
	2	118,07	107,25
	3	123,39	112,40

Nota: Adaptado de Centro tecnológico del calzado y del plástico, CETEC, (2020, p.1-2)

1º) Obtención de la media de los 3 ciclos de cada probeta de la Energía inicial aplicada y la media de la energía recuperada.

Cálculo carga y descarga

Probeta 1 de los 3 ciclos

$$\overline{W}_{Car1} = \frac{131,67 + 127,09 + 132,01}{3} = 130,256 \text{ Nmm}$$

$$\overline{W}_{Des1} = \frac{111,10 + 114,90 + 119,91}{3} = 115,303 \text{ Nmm}$$

Probeta 2 de los 3 ciclos

$$\overline{W}_{Car2} = \frac{127,92 + 124,01 + 129,50}{3} = 127,143 \text{ Nmm}$$

$$\overline{W}_{Des2} = \frac{108,16 + 112,75 + 118,50}{3} = 113,1367 \text{ Nmm}$$

Probeta 3 de los 3 ciclos

$$\overline{W_{Car3}} = \frac{124,77 + 121,74 + 126,89}{3} = 124,46 \text{ Nmm}$$

$$\overline{W_{Des3}} = \frac{105,77 + 110,30 + 115,82}{3} = 110,63 \text{ Nmm}$$

Probeta 4 de los 3 ciclos

$$\overline{W_{Car4}} = \frac{127,32 + 122,06 + 126,57}{3} = 125,316 \text{ Nmm}$$

$$\overline{W_{Des4}} = \frac{107,05 + 110,14 + 115,16}{3} = 110,783 \text{ Nmm}$$

Probeta 5 de los 3 ciclos

$$\overline{W_{Car5}} = \frac{121,78 + 118,07 + 123,39}{3} = 121,08 \text{ Nmm}$$

$$\overline{W_{Des5}} = \frac{102,89 + 107,25 + 112,40}{3} = 107,513 \text{ Nmm}$$

2º) Después obtención de la media de la energía inicial aplicada a las 5 probetas y la media de la energía recuperada, la media de la energía inicial y de la energía retornada, el Cálculo de la resiliencia y el de la histéresis elástica son:

Obtención media energía inicial y energía retornada

$$\overline{W_{Car\ TOTAL}} = \frac{\overline{W_{Car1}} + \overline{W_{Car2}} + \overline{W_{Car3}} + \overline{W_{Car4}} + \overline{W_{Car5}}}{5} = 125,651 \text{ Nmm}$$

$$\overline{W_{Des\ TOTAL}} = \frac{\overline{W_{Des1}} + \overline{W_{Des2}} + \overline{W_{Des3}} + \overline{W_{Des4}} + \overline{W_{Des5}}}{5} = 111,473 \text{ Nmm}$$

Cálculo de la resiliencia

$$Resiliencia = \frac{\overline{W_{Desc\ TOTAL}} * 100}{\overline{W_{Car\ TOTAL}}} = 88,7163$$

Cálculo de la histéresis elástica

$$Histéresis = 100 - Resiliencia = 100 - 88,7163 = 11,28363$$

Figura 51: PU-2

Nº	Índice	WiCar	WiDesc
		Nmm	Nmm
1	1	603,04	233,74
	2	408,62	232,30
	3	401,42	237,93
2	1	607,13	235,28
	2	412,14	233,66
	3	404,22	239,05
3	1	589,86	228,48
	2	399,20	228,28
	3	392,15	233,39
4	1	589,00	230,63
	2	405,57	231,98
	3	400,35	237,89
5	1	592,03	230,07
	2	403,98	230,01
	3	397,48	236,08

Nota: Adaptado de Centro tecnológico del calzado y del plástico, CETEC, (2020, p.1-2)

1º) Obtención de la media de los 3 ciclos de cada probeta de la Energía inicial aplicada y la media de la energía recuperada.

Cálculo carga y descarga

Probeta 1 de los 3 ciclos

$$\overline{W}_{Car1} = \frac{603,04 + 408,62 + 401,42}{3} = 471,026 \text{ Nmm}$$

$$\overline{W}_{Des1} = \frac{233,74 + 232,30 + 237,93}{3} = 234,656 \text{ Nmm}$$

Probeta 2 de los 3 ciclos

$$\overline{W}_{Car2} = \frac{607,13 + 412,14 + 404,22}{3} = 474,496 \text{ Nmm}$$

$$\overline{W}_{Des2} = \frac{235,28 + 233,66 + 239,05}{3} = 235,996 \text{ Nmm}$$

Probeta 3 de los 3 ciclos

$$\overline{W}_{Car3} = \frac{589,86 + 399,20 + 392,15}{3} = 460,403 \text{ Nmm}$$

$$\overline{W}_{Des3} = \frac{228,48 + 228,28 + 233,39}{3} = 230,05 \text{ Nmm}$$

Probeta 4 de los 3 ciclos

$$\overline{W}_{Car4} = \frac{589,00 + 405,57 + 400,35}{3} = 464,973 \text{ Nmm}$$

$$\overline{W}_{Des4} = \frac{230,63 + 231,98 + 237,89}{3} = 233,5 \text{ Nmm}$$

Probeta 5 de los 3 ciclos

$$\overline{W}_{Car5} = \frac{592,03 + 403,98 + 397,48}{3} = 464,496 \text{ Nmm}$$

$$\overline{W_{Des5}} = \frac{230,07 + 230,01 + 236,08}{3} = 232,053 \text{ Nmm}$$

2º) Después obtención de la media de la energía inicial aplicada a las 5 probetas y la media de la energía recuperada, la media de la energía inicial y de la energía retornada, el Cálculo de la resiliencia y el de la histéresis elástica son:

Media de la energía inicial y energía retornada

$$\overline{W_{Car \text{ TOTAL}}} = \frac{\overline{W_{Car1}} + \overline{W_{Car2}} + \overline{W_{Car3}} + \overline{W_{Car4}} + \overline{W_{Car5}}}{5} = 467,0781 \text{ Nmm}$$

$$\overline{W_{Des \text{ TOTAL}}} = \frac{\overline{W_{Des1}} + \overline{W_{Des2}} + \overline{W_{Des3}} + \overline{W_{Des4}} + \overline{W_{Des5}}}{5} = 233,251 \text{ Nmm}$$

Cálculo de la resiliencia

$$\text{Resiliencia} = \frac{\overline{W_{Desc \text{ TOTAL}}} * 100}{\overline{W_{Car \text{ TOTAL}}}} = 49,9383$$

Cálculo de la histéresis elástica

$$\text{Histéresis} = 100 - \text{Resiliencia} = 100 - 49,9383 = 50,06167$$

4.2.4.4 Resultados

En este apartado se recopilan los datos relativos a la resiliencia y la histéresis elástica de los materiales que se presentan en esta tabla.

Tabla 30: Recopilación de datos de resiliencia e histéresis elástica de los materiales

Material	Resiliencia	Histéresis elástica
Caucho Natural	87,8147	12,1853
Caucho Negro	63,4583	36,5417
EVA D30	51,1605	48,839
EVA D50	40,4838	59,5161
PU-1	88,7163	11,28363
PU-2	49,9383	50,06167

Según lo analizado anteriormente a valores de resiliencia más baja, la vibración transmitida es menor (González Hernández, 2004) y por lo tanto la energía que se recupera es menor.

Por el contrario, cuanto mayor histéresis elástica tenga el material será más apropiado para absorber las vibraciones, por un razonamiento antagónico al anterior.

Los materiales con mejores propiedades son el EVA D50, que presenta un valor de resiliencia de 40,4838 % menor que el resto de los materiales y un valor de histéresis elástica de 59,5161 % mayor que el resto de los materiales. El segundo material adecuado, el PU-2, tiene un valor de resiliencia de 49,9383 % y un valor de histéresis elástica de 50,06167 %. El tercer material, el Caucho Negro, tiene unos valores de 63,4583 % de resiliencia y 36,5417 % de histéresis elástica. Esto nos permite compararlo con la empuñadura de Segeda, ya que utiliza un material muy similar al Caucho Negro.

4.2.4.5 Resumen

En este apartado hemos expuesto los resultados de los ensayos realizados a los materiales seleccionados, obteniendo que los materiales más adecuados para aplicar a las empuñaduras de los martillos neumáticos son el EVA D50 y el PU-2, ya que presentan la mayor histéresis elástica, lo que les permite absorber mejor las vibraciones. Ahora bien, una evaluación completa de los materiales necesariamente ha de tener en cuenta también otros requerimientos, como son las condiciones de trabajo del usuario, el sudor que se produce en las manos, las condiciones meteorológicas (como la humedad y el calor), la degradación y fatiga de material. Por tanto, deberíamos introducir estas variables en el proceso de evaluación, lo que requerirá realizar nuevos ensayos. Diversos estudios científicos realizados a lo largo del tiempo han evidenciado que los elastómeros tienen unas excelentes condiciones para minimizar las vibraciones. En esta memoria de tesis se han presentado un conjunto de materiales elastoméricos para los que, en unas condiciones óptimas de trabajo, se han realizado unos ensayos para obtener cuál de todos ellos son los mejores elastómeros capaces de amortiguar los efectos de las vibraciones sobre el sistema mano-brazo.

CONCLUSIONES CAPÍTULO 4

El acuerdo de cesión del martillo neumático rotopercutor MS-76 de la empresa española Segeda ha permitido estudiar en profundidad el funcionamiento de la máquina. Según las evidencias científicas, una manera eficaz y efectiva de minimizar la transmisión de las vibraciones mecánicas es actuar en la empuñadura.

Los elastómeros termoestables se constatan como buenos materiales para amortiguar las vibraciones, debido a su comportamiento viscoelástico. Además, sufren de histéresis y si un material tiene una gran histéresis elástica será apropiado para absorber las vibraciones. A partir de los fenómenos de histéresis y de resiliencia, se han realizado ensayos reales para obtener directamente la histéresis elástica de los materiales de estudio que han servido como precedente para la determinación del material óptimo.

Se ha realizado el cálculo de la resiliencia y la histéresis elástica. El EVA D50 presenta un valor de resiliencia de 40,4838 % menor que el resto de los materiales y un valor de histéresis elástica de 59,5161 % mayor que el resto de los materiales. El PU-2, tiene un valor de resiliencia de 49,9383 % y un valor de histéresis elástica de 50,06167 %. El Caucho Negro, material similar al empleado en la empuñadura de Segeda, proporciona unos valores de 63,4583 % de resiliencia y 36,5417 % de histéresis elástica. Por tanto, se constata que los materiales ideales para amortiguar la vibración son el EVA D50, el PU-2 y el Caucho negro, cuya combinación, aplicando al rediseño, permitirá establecer la mejor opción frente a la vibración.

CAPÍTULO 5: DISEÑO

5.1 Introducción

En el punto 3.1.1 analizamos el estado actual del mercado de los martillos neumáticos, eléctricos y electroneumáticos, observando las tendencias de diseño, de materiales y de sistemas antivibratorios. Comprobamos que las innovaciones dirigidas a minimizar la transmisión de la vibración afectan a los mecanismos internos y externos de la máquina, y que los materiales que componen las empuñaduras representan un factor tecnológico esencial para reducir las oscilaciones.

La empuñadura es uno de los componentes esenciales de la máquina y, por ello, se ha de tener en cuenta el material con que se ha fabricado, el grosor, su tamaño y el tipo de acoplamiento. Para profundizar en las características y diseño de las empuñaduras vamos a compararlas con las utilizadas en una de las modalidades de ciclismo extremo más técnica, como es el enduro. Este deporte desarrolla su actividad en algunas ocasiones en condiciones ambientales extremas de frío o calor, terreno abrupto y superficies escarpadas con elevados desniveles de montaña. Además, requieren de una precisión de maniobrabilidad y agarre excepcional ya que el control de la bicicleta sólo puede hacerse desde las empuñaduras, al igual que sucede con los martillos neumáticos (Puños para MTB, 2023).

5.2 Análisis de las empuñaduras actuales para ciclismo extremo

Del mismo modo que sucede con los trabajadores que están expuestos a la vibración proveniente de máquinas manuales, las personas que realizan este deporte se encuentran sometidas a este fenómeno, perjudicando la salud de los usuarios. El propósito que tiene llevar a cabo este estudio es conocer los materiales, características y diseños de los mangos que emplean las marcas para amortiguar la vibración.

Para el estudio de la situación del mercado de las empuñaduras se ha analizado las tiendas de ciclismo Mammoth y Karacol, y nos hemos centrado en el estudio sus empuñaduras, especialmente en los sistemas y materiales que amortiguan la vibración y sus diseños ergonómicos.

Hemos observado que sus empuñaduras están fabricadas ergonómicamente para minimizar la transmisión de la vibración, de la misma manera que sucede con las empuñaduras de los martillos neumáticos, eléctricos y electroneumáticos.

Entre las diversas mejoras, se han encontrado sistemas antivibratorios de suspensión de empuñaduras, como las de la marca Pro y Revgrips, que, gracias al empleo de arandelas de polímero especialmente diseñadas, crean espacio entre el puño y el manillar aislándolo de golpes y vibraciones. Las arandelas permiten personalizar la sensación y el recorrido de movimiento de la empuñadura, desde una posición fija, sin movimiento, hasta cualquier punto determinado con movimiento. De tal modo que cuanto más gruesas sean las arandelas que se empleen más movimiento creará y mayor amortiguación (Revgrips, 2021).

En la misma línea de intervención para la reducción de las vibraciones, Esgrrips, Race face, El gallo, Syncros, MSC, y Supacaz, apuestan por el empleo de elastómeros termoestables para amortiguar la vibración, como los fabricados en silicona que presentan resistencia a las condiciones meteorológicas adversas como los rayos UV y al desgaste por el uso. Asimismo, Crankbrothers, Ritchey y Scram se decantan, respectivamente, por el caucho, el neopreno y el foam. La combinación de materiales es otra alternativa que se emplea para este tipo de disciplinas tan extremas. Las marcas Brooks, Specialized, Ergon y Onoff combinan el cuero con la goma o el corcho natural haciéndolo antibacteriano e hipoalergénico, así como la silicona y el foam o el Kevlar, todos ellos materiales excelentes para la absorción de impactos (Mammoth, 2022) (Karacol Sport, 2022).

En cambio, Renthal utiliza materiales fabricados tecnológicamente como el compuesto Ultra Tacky™ que presenta buena adhesión y agarre, aumentando el control y reduciendo la fatiga. Velo y Cube emplean el material innovador comercial denominado Kraton, nombre de un conjunto de elastómeros cuyas propiedades son similares a los cauchos, presenta buena flexibilidad, mayor resistencia al calor, a la intemperie y a productos químicos. Mientras que Lizard Skins utiliza un material termoplástico denominado Durasoft que es resistente a la rotura y a la abrasión. Gian, aplica materiales semejantes a los empleados en los equipos de protección individual como los guantes, es decir, los fabricados con capas o burbujas de gel para reducir las vibraciones (Mammoth, 2022) (Karacol Sport, 2022).

En general, todas las empresas han mostrado especial interés, dirigiendo sus investigaciones en amortiguar las vibraciones, puesto que la mano está en contacto directo con las empuñaduras y es ahí, donde se produce la transmisión de la vibración. No obstante, el diseño y la ergonomía del producto son, también, aspectos fundamentales que acompañan en

la reducción de las oscilaciones. En este sentido, en conjunto, las dimensiones generales de los mangos son similares a los datos antropométricos de la población española, se encuentran diámetros desde 22 *mm* hasta un máximo de 35 *mm*, una longitud desde 80 *mm* a 180 *mm* y un peso en torno a 55 *g* y 80 *g* (Mammoth, 2022) (Karacol Sport, 2022).

De forma genérica, las empuñaduras están diseñadas ergonómicamente adaptadas a la anatomía de la mano con el fin de repartir la presión que ejerce el peso del cuerpo sobre las manos. Esto se debe a las diferentes densidades que presenta el mango ya que evita su adormecimiento, permite una posición más natural y cómoda y por tanto mayor control sobre el manillar (Mammoth, 2022) (Karacol Sport, 2022). En esta línea, hay diseños que sirven para aliviar la presión sobre el nervio cubital mediante una parte plana para apoyar parte de la palma de la mano lo que facilita el descanso en el agarre (J. D. Hernández, 2022).

El diseño acompaña la forma de la palma de la mano para crear distintas percepciones, mediante canales o textura de arena que permiten disipar la humedad y el patrón de diamante o gofre garantizando la adherencia de los dedos, que junto a las estrías contrarrestadas evitan el deslizamiento de la mano (Mammoth, 2022) (Karacol Sport, 2022).

En definitiva, las marcas apuestan por polímeros y diseños ergonómicos adaptadas a la mano, todo ello hace que influya positivamente en la reducción de la propagación de la vibración. En general, el caucho, el foam, el neopreno y la silicona son los materiales más usados puesto que ofrecen un buen agarre, son ligeros y cómodos y absorben las vibraciones (Labrador, 2022).

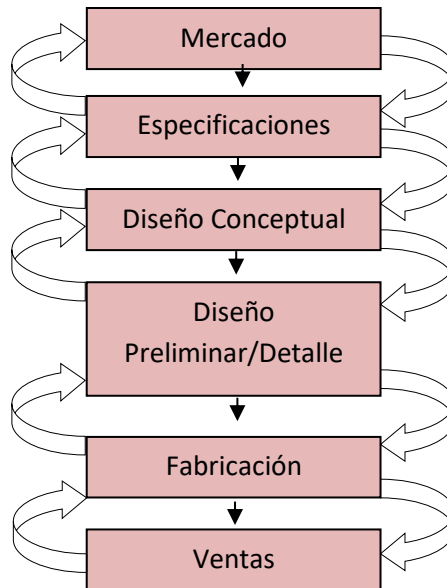
5.2.1 Resumen

Hemos realizado un análisis de las empuñaduras de dos tipos de actividades deportivas extremas, enduro y descenso, que exponen a los usuarios a vibraciones constantes perjudiciales para la salud. Los mangos que emplean para amortiguar la transmisión de las vibraciones se basan en el uso de elastómeros termoestables como el caucho, el foam, la silicona y el neopreno. También, materiales tecnológicos como el compuesto Ultra Tacky™, el Kraton, que son un conjunto de elastómeros cuyas propiedades son similares a los cauchos y el elastómero termoplástico Durasoft. Además, el uso de sistemas antivibratorios como las empuñaduras suspendidas, junto al diseño ergonómico adaptado a la anatomía de la mano forman parte, todos ellos, de elementos que reducen la transmisión de la vibración.

5.3 Fases del Diseño

El desarrollo de la tesis está basado, de forma indirecta, en un proceso metodológico, apoyado, como ya indicaba Pughn (1991) y Ullman (2010), citados por Blanco Romero (2015), en una metodología fundamentada en un proceso de diseño en fases. Una estructura genérica de fases sería la siguiente:

Figura 52: Estructura genérica en fases basada en la metodología de Pugh y Ullman.



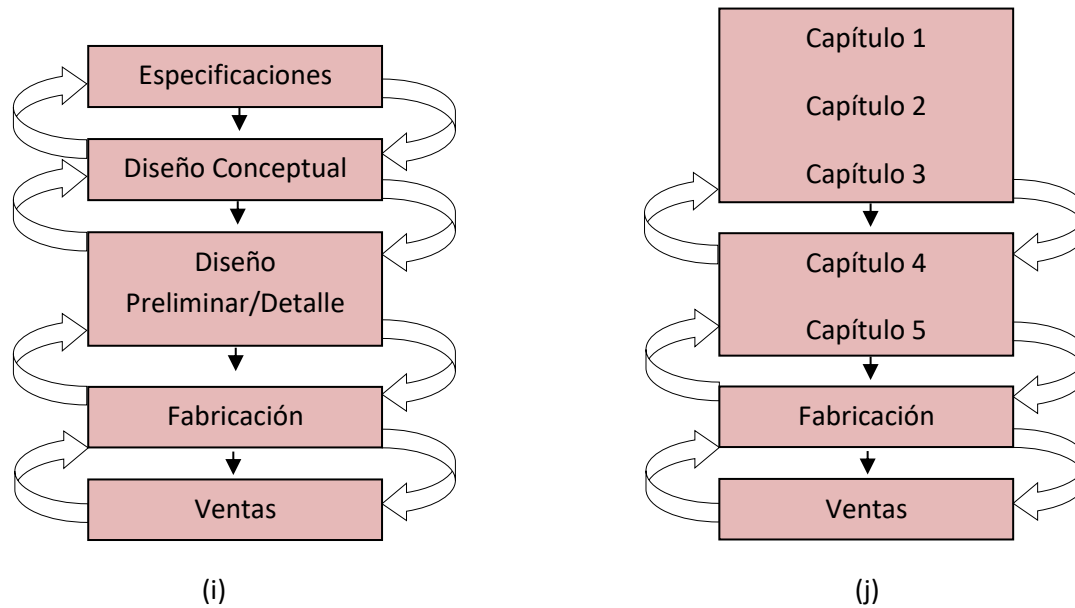
Estas fases se irán activando y completarán de forma progresiva, ya sea mediante estudios de la situación del mercado de los martillos neumáticos, eléctricos y electroneumáticos, análisis de investigaciones, conocimientos técnicos y de ingeniería, o estudios sobre el tema a tratar, y todo ello enfocado a dar solución y desarrollar un producto.

En la tesis, dichas fases se han ido activando a lo largo del desarrollo de la investigación, configurándose como capítulos, hasta llegar al punto de diseño donde se aplicarán todos los conocimientos recogidos en los distintos apartados.

Las flechas introducidas en el esquema se tienen que entender como un sistema de retroalimentación y *feedback* que se encuentra en constante movimiento produciéndose necesariamente a lo largo del desarrollo y mejora de un producto.

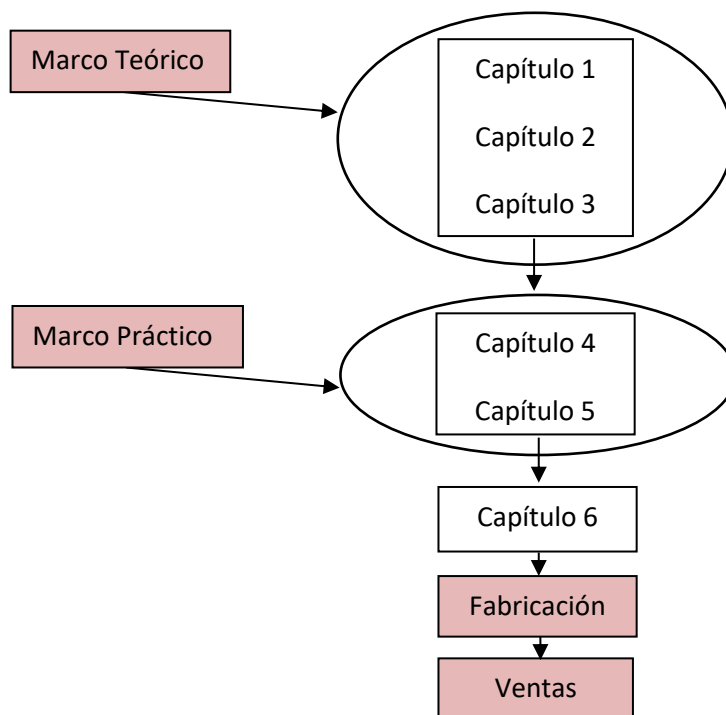
Siguiendo la metodología de Pughn (1991) y Ullman (2010), para esta tesis, los capítulos que se han desarrollado se corresponden con la siguiente estructura:

Figura 53: (i) Estructura genérica en fases basada en la metodología de Pugh y Ullman. (j) Estructura en fases mediante capítulos de la presente tesis.



Como se ha indicado anteriormente estas fases determinadas por Pughn (1991) y Ullman (2010), de forma análoga, se corresponden a capítulos de la tesis que se organizan en un marco teórico y en un marco práctico, según se plantea en la imagen siguiente:

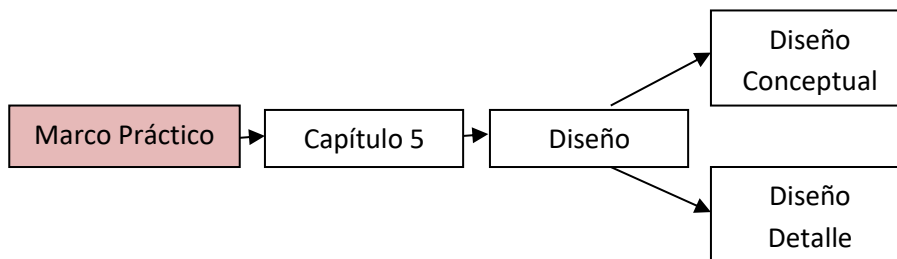
Figura 54: Estructura en fases de la presente tesis y su organización en un marco teórico y práctico basadas en la metodología de Pugh y Ullman.



El marco teórico recoge los capítulos 1, 2 y 3, en los que se desarrollan aspectos que ayudan a situar el objeto de estudio, se tratan conceptos y estudios anteriores vinculados al problema. Respecto al marco práctico, los capítulos 4 y 5, se plantean dirigidos a dar solución al problema que es amortiguar las vibraciones.

Este punto, denominado fases del diseño, recoge las fases de diseño conceptual y diseño de detalle ubicadas en la tesis en el capítulo 5 del marco práctico que se van a desarrollar en los siguientes apartados.

Figura 55: Desglose del proceso de diseño



5.3.1 Diseño Conceptual

Según Hozvatz (2005), citado por Ingeniería del diseño (2023), el diseño conceptual es un procedimiento creativo de solución de problemas que es realizado simultáneamente por el conocimiento humano, la creatividad y el razonamiento. Asimismo, el proceso cognitivo, la generación de ideas, la externalización, la síntesis y los conceptos de diseño acompañan a su desarrollo.

El proceso de diseño conceptual se fundamenta por una investigación de un nicho de mercado que justifica la toma de decisión de iniciar el desarrollo o mejora del nuevo producto. Conceptualizarlo, de acuerdo a unas especificaciones y unos requisitos, permite generar soluciones para determinar la más idónea (Ingeniería del diseño, 2023).

En este sentido, es necesario entender que el proceso de diseño conceptual se ocupa de propiedades, atributos y funciones del producto, mientras que en el diseño de detalle se dimensiona y se aplica materiales (Ingeniería del diseño, 2023).

French (1984), citado por Ingeniería del diseño 2023, dice que los conceptos del diseño conceptual son generados por una serie de esquemas e ideas que sirven de base para

materializar el producto. Estos esquemas deben dar solución, teniendo en cuenta el resto de componentes, sin entrar en detalle pero que den información para estimar, por ejemplo, sobre el dimensionamiento del producto.

En general, se afirma que, los productos en la fase de diseño conceptual son diseñados de forma global, es decir, no se detalla los subsistemas y componentes del producto, se centra en las funciones principales (Ingeniería del diseño, 2023) y para su desarrollo, las técnicas típicamente empleadas son sobre el papel (López Soto et al., 2013).

No obstante, al tratarse de un producto determinado, en los siguientes apartados, se estudiará la empuñadura de Segeda que, junto al análisis realizado en el punto 4.1.2 intervención en la empuñadura, ayudará a especificar y limitar el diseño conceptual. Además, se recogerá información y conocimientos, de forma esquemática, determinados en la investigación de mercado que se volcarán en el empleo de técnicas de creatividad, mediante el bocetado, para el desarrollo del diseño conceptual del producto.

5.3.1.1 Análisis y medición de la empuñadura de Segeda

Este apartado se dedica a analizar el caso particular de estudio que tiene por objeto optimizar la empuñadura de un martillo neumático rotopercutor. Para ello, la empresa Segeda facilitó su modelo, MS76, modelado en 3D y su modelo físico. Nuestro objetivo es estudiar la empuñadura en profundidad, es decir, los subsistemas y conocer los objetos posibles de mejora.

En primer lugar, se procede a la medición de la empuñadura, en adelante "Segeda original", para optimizar el producto. En las imágenes siguientes se exponen los dos modelos citados anteriormente.

Figura 56: (p) foto empuñadura "Segeda original" y (q) modelo en 3D del martillo rotopercutor modelo MS76



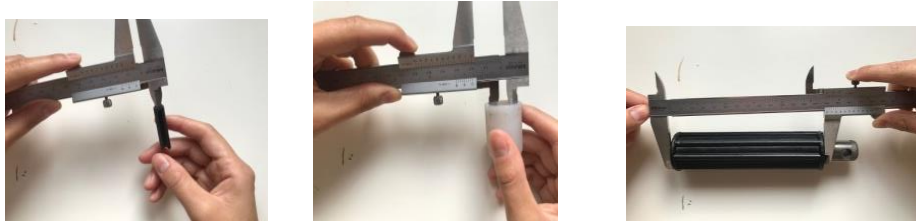
(p)

(q)

Nota: Adaptado de Segeda (2020, p.1)

A partir de estos dos modelos se miden las dimensiones de la empuñadura “Segeda original” empleando el pie de rey para el modelo físico y la herramienta de medición del programa Catia V5, “*Measure*” para el modelo virtual obteniendo una medición lo más próxima a la realidad. En las siguientes imágenes aparecen algunas mediciones realizadas con el pie de rey a los componentes de las empuñaduras.

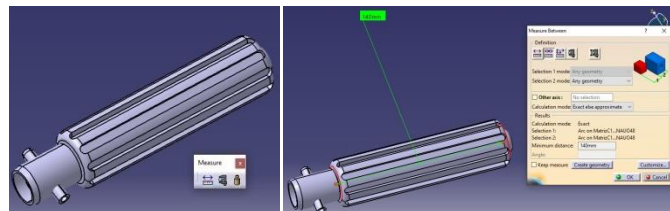
Figura 57: Mediciones de las piezas físicas con el pie de rey



Nota: Adaptado de Segeda (2020, p.1)

A continuación, se muestran dos imágenes una de ellas es una medición de la empuñadura “Segeda original” del modelo MS76 de Segeda empleando la herramienta “*Measure*” del programa Catia V5.

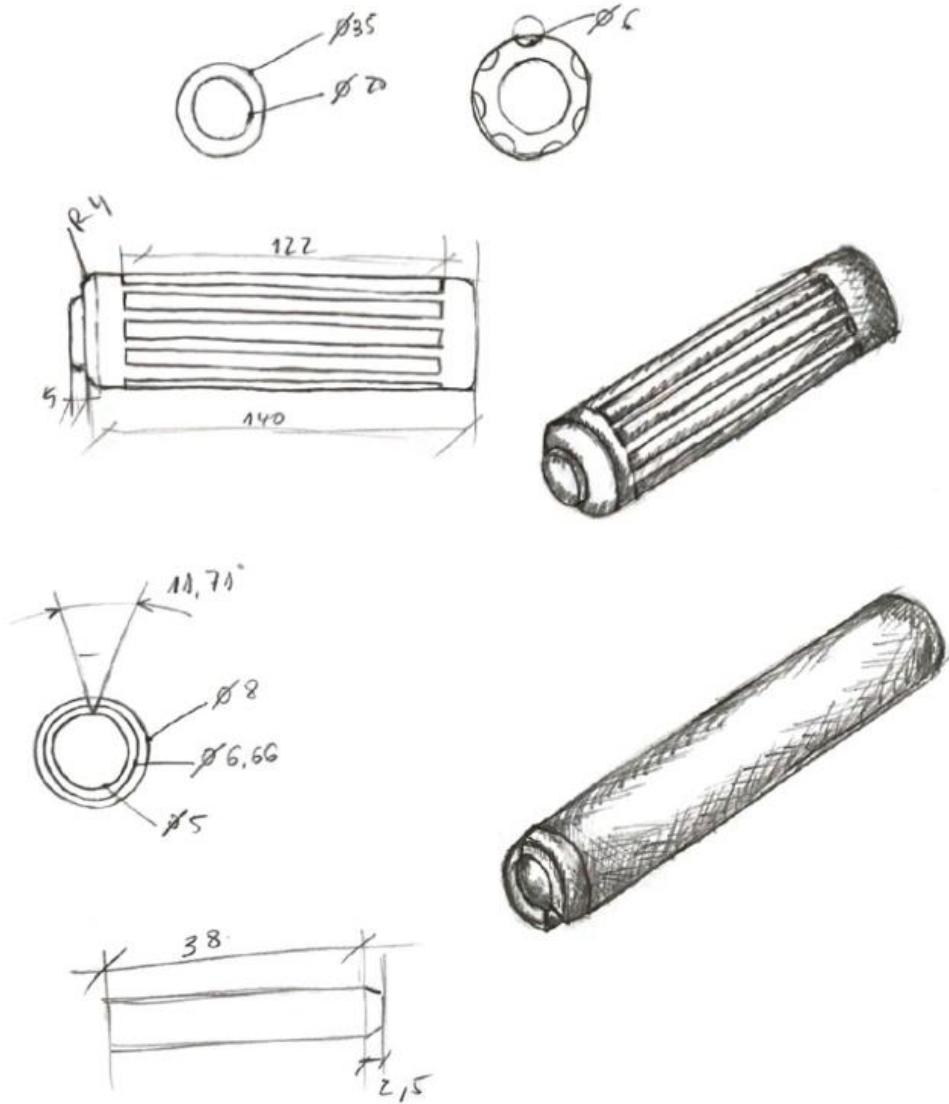
Figura 58: Mediciones de la empuñadura en el programa Catia V5

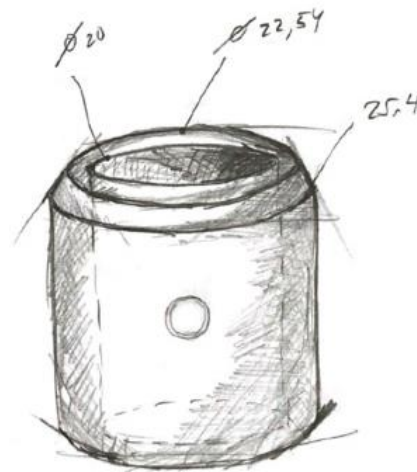
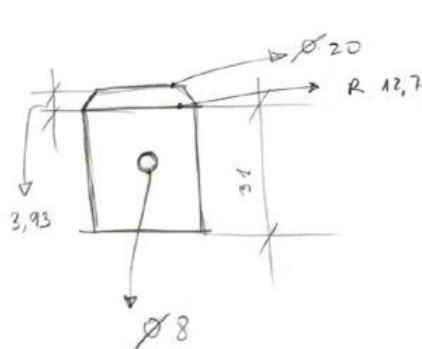
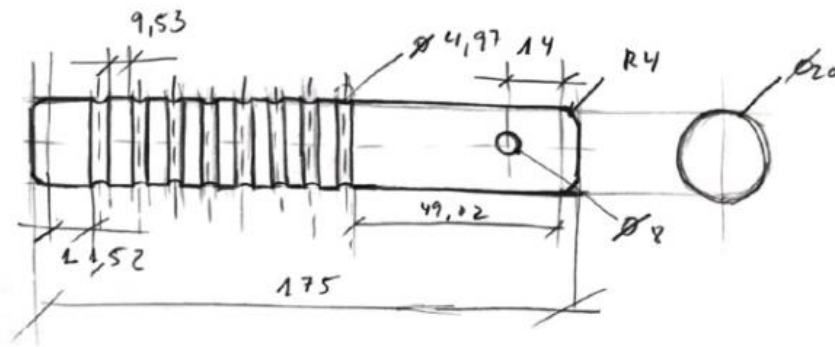


Nota: Adaptado de Segeda (2020, p.1)

Mediante estos dos procedimientos se conocen las dimensiones exactas de la empuñadura. Una vez obtenidas y concretadas se plasman al papel.

Figura 59: Bocetos de las dimensiones reales de la empuñadura "Segeda original"





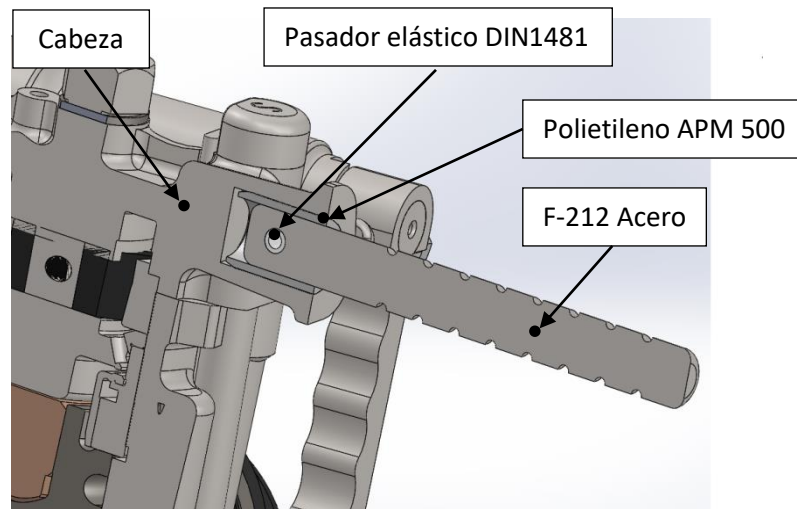
Nota: Adaptado de Segeda (2020, p.1)

Del análisis detallado realizado a la empuñadura “Segeda original” se han encontrado varios aspectos susceptibles de mejoras.

Aunque las medidas de las empuñaduras se encuentran en los percentiles antropométricos de la población española, 35 *mm* de diámetro y una longitud de 145 *mm*, desde el punto de vista de la ergonomía las empuñaduras son demasiado rígidas con hendiduras incómodas y el material empleado es un caucho negro.

Parte de las piezas de la empuñadura se encuentran unidas a la cabeza de la máquina. Por esa razón, se han decidido mantener intactas la forma y el material tanto del vástago de acero F-212, como el casquillo y el pasador elástico. En las imágenes siguientes se puede observar la unión.

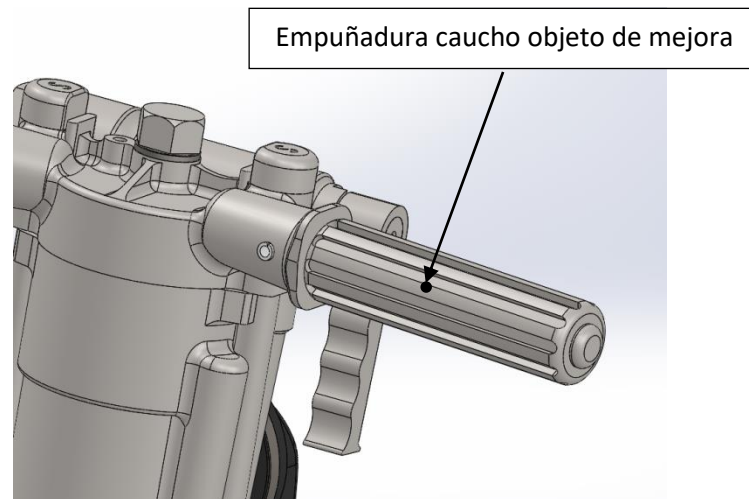
Figura 60: Unión de la empuñadura



Nota: Adaptado de Segeda (2020, p.1)

En consecuencia, el objeto de mejora se realizará en el material y en el diseño de la empuñadura mejorando la ergonomía y reduciendo la transmisión de vibraciones.

Figura 61: Empuñadura de caucho objeto de mejora



Nota: Adaptado de Segeda (2020, p.1)

Como se ha citado anteriormente las medidas ergonómicas aplicadas de la empuñadura original son adecuadas a las dimensiones de las manos de las personas. Por ese motivo, las nuevas medidas de los diseños se ajustarán a las dimensiones originales, es decir, un diámetro de 35 *mm* y una longitud entorno a 145 *mm*.

5.3.1.2 Información para el diseño conceptual

De todo el desarrollo de investigación realizado en cada fase, en cada capítulo, se han extraído conocimientos e ideas que ayudarán a mejorar la empuñadura para reducir la transmisión de la vibración y que se verán plasmados en los bocetos.

De este modo, a la hora de diseñar la empuñadura se ha de tener en cuenta que el efecto de la resonancia es un factor importante en el diseño ya que, en ausencia de un medio de absorción de la energía vibratoria, si las frecuencias de las fuerzas oscilantes generadas por el uso de la máquina son próximas a las frecuencias naturales de la vibración de la máquina o sus componentes, puede producirse una ampliación de la vibración (AENOR, 1997). En este sentido, los desequilibrios y desalineamientos en el proceso de ensamblaje y fabricación, también son motivo de incremento de la oscilación (Universidad Pública de Navarra, 1993).

Para eludir este fenómeno o reducirlo, los medios de absorción de la vibración que se pueden emplear son muy variados, desde amortiguamientos viscoelásticos, hidráulicos, hasta por aire o fricción (AENOR, 1997).

La norma “UNE-EN 1299:1997 +A1” plantea el uso de muelles elastoméricos, ya que, amortiguan la vibración y son flexibles, es decir, se pueden fijar a piezas metálicas o a otros materiales. Otros muelles que presentan buena amortiguación son los metálicos y en concreto, el helicoidal de compresión siendo el más usado en esta rama, son fabricados en acero y diseñados en forma de hilo, placas o varillas. No hay que olvidarse de los muelles neumáticos y otras piezas importantes como los sistemas de amortiguación y la combinación de muelles con material de amortiguamiento o amortiguadores de líquido viscoso (AENOR, 2009b).

Todos estos elementos pueden ser buenas opciones para introducir en el sistema de la empuñadura, de modo que se tendrán en cuenta a la hora de diseñarla. No obstante, se plantea si su empleo puede ser necesario o no, pues no debe modificar el resto del martillo, ya que su inserción puede modificar el *know how* de la propia máquina al depender y estar unidas todas las piezas en un mismo conjunto como se ha visto anteriormente y en el despiece recogido en el Anexo B.

Cuando se vaya a diseñar hay que tener en consideración los materiales a emplear, según lo analizado en el capítulo 3, siendo los elastoméricos son los más empleados para minimizar la transmisión de la vibración, puesto que, como ya afirmaban Corsaro y Sperling,

(1999), presentan características recuperadoras y tienen alta capacidad de disipación de la energía.

El caucho es el elastómero termoestable más empleado (Ko et al., 2011) para amortiguar las vibraciones. Sin embargo, existen otros materiales derivados del caucho como el caucho de butilo (Mitra et al., 2017), el SBR (Sam & Kathirvel, 2009) o la combinación del caucho y Rexine (Singh & Khan, 2013) que son empleados, en distintas máquinas, por su capacidad de amortiguación frente a la vibración, como se ha estudiado en el punto 3.1.

Los fabricantes y distribuidores de martillos también apuestan por polímeros termoestables para sus empuñaduras. Einhell, Imcoinsa y Milwaukee eligen materiales antideslizantes, el poliuretano y el caucho.

Así como los productores de empuñaduras para ciclismo extremo. Crackbrothes utiliza el caucho, Ritchey y Scram el neopreno y el foam respectivamente. Esgrips, Race face, El gallo, Syncros, MSC, y Supacaz, utilizan la silicona o la combinación de materiales como las marcas Brooks, Specialized, Ergon y Onoff que combinan el cuero con la goma o el corcho natural, la silicona y el foam o el Kevlar. Velo y Cube emplean materiales similares al caucho, el denominado compuesto Kraton (Mammoth, 2022) (Karacol Sport, 2022).

Igualmente, se ha de conocer que, para minimizar la vibración, existen sistemas antivibratorios fijados tanto en la parte interna de la empuñadura, como elementos externos que no modifican su *know how*.

Así, Jing X., Zhang L., Feng X., Sun B. y Li Q. (2018) diseñaron un sistema para minimizar la acción de vibración. Esta estructura de exoesqueleto diseñada en forma de X, basada en Sun X., Jing X., Xu J. y Cheng L., (2014), y Wu Z., Jing X., Sun B. y Li F. (2016), para martillos neumáticos manuales de demolición, permite amortiguar la vibración adaptándose a diferentes martillos neumáticos.

Por el contrario, los desarrollos de algunas de las empresas fabricantes de máquinas como Atlas Copco y Bosch están concentrados en el sistema interno de la máquina, fundamentados en el trabajo en vacío, donde el pistón cambia el sentido de su movimiento a través de la producción de un colchón de aire en ambos extremos del cilindro, disminuyendo el contacto metal-metal. También, el uso de fuelles elastoméricos, muelles y pernos de seguridad, situados en el interior de la máquina, permiten controlar las vibraciones emitidas (Bosch-vibration, 2019). En cambio, Hitachi incorpora en el sistema interno de sus máquinas

una estructura de aluminio con doble aislamiento que consigue minimizar tanto las vibraciones mecánicas como el ruido que emiten (Hitachi, 2018b).

Las empresas Atlas Copco, Hikoki y Stayer emplean en las empuñaduras diferentes sistemas antivibratorios: el sistema *Hand and arm Protections System (HAPS)* (Atlas Copco, 2015), la protección de la vibración para el usuario (UVP) (Hikoki, 2018) y el dispositivo *Vibration Absorbing Technology (VAT)* (Stayer, 2018), utilizando todos estos métodos amortiguación mediante elementos mecánicos.

Sullair, mediante dos resortes helicoidales, situados en la empuñadura, consigue obtener empuñaduras flexibles que evitan el contacto directo entre los mangos y el cuerpo del martillo neumático, minimizando la vibración, absorbiendo el impacto y reduciendo la fatiga del operador.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que para minimizar la transmisión de la vibración es posible combinar materiales y sistemas antivibratorios en las empuñaduras. Bosch combina materiales como el PP-GF y los materiales SEBS junto a la técnica de suspensión de empuñadura, que lo mantiene en voladizo, que consiste en un tornillo que únicamente se encuentra unido en un extremo y el resto del cuerpo se encuentra en voladizo, de tal modo que no toca el material (Bosch-vibration, 2019).

Se trata de un sistema que se ha observado en otros productos analizados en la tesis como en la fabricación y diseño de guantes, según Hamouda K., Rakheja S., Marcotte P. y Dewangan K.N. (2016) analizaron que los guantes que están fabricados con cámaras de aire presentan mejores resultados de minimización de la vibración frente a otros. Del mismo modo, la marca Pro y Revgrrips emplean sistemas antivibratorios de suspensión de empuñaduras, gracias al uso de arandelas de polímero especialmente diseñadas que permite crear espacio entre el puño y el manillar aislándolo de golpes y vibraciones (Revgrrips, 2021).

En este sentido, se debe tener en cuenta que, a la hora de determinar los criterios dimensionales de las empuñaduras, se deben emplear adecuadamente las dimensiones antropométricas de la población española, adaptándose a la anchura y longitud de la mano. De esta manera, el mango deberá sobresalir del puño, para reducir la presión sobre los tejidos de la palma de la mano (Arjona Ballesteros, 2014). Como mínimo, el ancho del mango debe ser de 120 mm y aproximadamente 40 mm de diámetro (Álvarez Bayona et al., 2016). Aunque, si se empleara la máquina con guantes, es recomendable añadir 10 mm más. Una longitud

adecuada para los martillos manuales sería entre 100 *mm* y 150 *mm* (Álvarez Bayona et al., 2016).

Los rangos mencionados se encuentran dentro de las medidas antropométricas de la población española incluso las magnitudes de las empuñaduras de bicis para ciclismo extremo recogen tramos desde 22 *mm* hasta un máximo de 35 *mm* de diámetro y una longitud de 80 *mm* a 180 *mm* (Mammoth, 2022) (Karacol Sport, 2022).

Además, la empuñadura deberá estar diseñada para que el trabajador opere con la máquina de forma eficaz y cómodamente. Aplicar ergonomía en el producto ayudará a resolver los problemas de peso excesivo de la herramienta (Fundación laboral de la construcción et al., 2007), permitiendo que no se produzca un mayor agarre.

En la línea del diseño de empuñaduras con mangos adaptados al tipo de máquina, existen diseños de empuñaduras en forma de D, como en el modelo Chicago Pneumatic para martillos cinceladores o remachadores. Sin embargo, en este caso, la máquina es un martillo rotopercutor, por lo que no se va a alterar el *know how* de la empresa, es decir, no se modificará su estructura base en forma de T.

En general, los fabricantes de máquinas manuales vibratorias diseñan sus empuñaduras ergonómicamente en aras de reducir las vibraciones y mejorar el agarre, incluso algunos incluyen un sistema de multiposición, facilitando su versatilidad, como en el caso de Bosch, Hitachi, Dewalt, Einhell y Chicago Pneumatic.

Todas las empuñaduras están adaptadas a la anatomía de la mano, incluso en las empuñaduras de ciclismo extremo. En algunos casos, a través de diferentes densidades evitan el adormecimiento de la mano, permitiendo una posición natural, cómoda y por tanto un mayor control del manillar (Mammoth, 2022) (Karacol Sport, 2022).

En ese sentido, es interesante destacar que realizar huellas de los dedos en las empuñaduras, favorece el agarre ergonómico (Arjona Ballesteros, 2014). Los diseños con canales o textura de arena permite disipar la humedad y el patrón de diamante o gofre garantiza la adherencia de los dedos que junto a las estrías contrarrestadas evitan el deslizamiento de la mano (Mammoth, 2022) (Karacol Sport, 2022).

En general, las empresas dedicadas a la fabricación y distribución, tanto de máquinas vibratorias como de empuñaduras para ciclismo extremo, muestran especial interés en amortiguar las vibraciones, mediante el empleo de elastómeros termoestables, ergonomía y

diseño, puesto que la mano está en contacto directo con las empuñaduras y es ahí donde se produce la transmisión de la vibración.

Todas estas técnicas de ingeniería de diseño citadas se tomarán en cuenta para el desarrollo de la nueva empuñadura.

5.3.1.2.1 Técnicas de creatividad y bocetos para el diseño conceptual

Las técnicas de creatividad empleadas son el *brainstorming* y la técnica analógica de la sinéctica que emplea la analógica como recurso de búsqueda de soluciones a los problemas de diseño. En concreto, la búsqueda de soluciones aplicados en otros productos para amortiguar la vibración como son las empuñaduras de ciclismo extremo.

Los primeros bocetos que se han planteado, teniendo en cuenta las piezas que intervienen, están basados en la evidencia científica que se ha obtenido en toda la tesis y que se recogen en el apartado anterior, cuyo objeto es responder a la necesidad fundamental planteada que es reducir la transmisión de las vibraciones.

Las técnicas citadas se recogen en forma de conocimiento que se ha ido desarrollando a lo largo de la tesis en los distintos capítulos y que posteriormente se llevarán al bocetado.

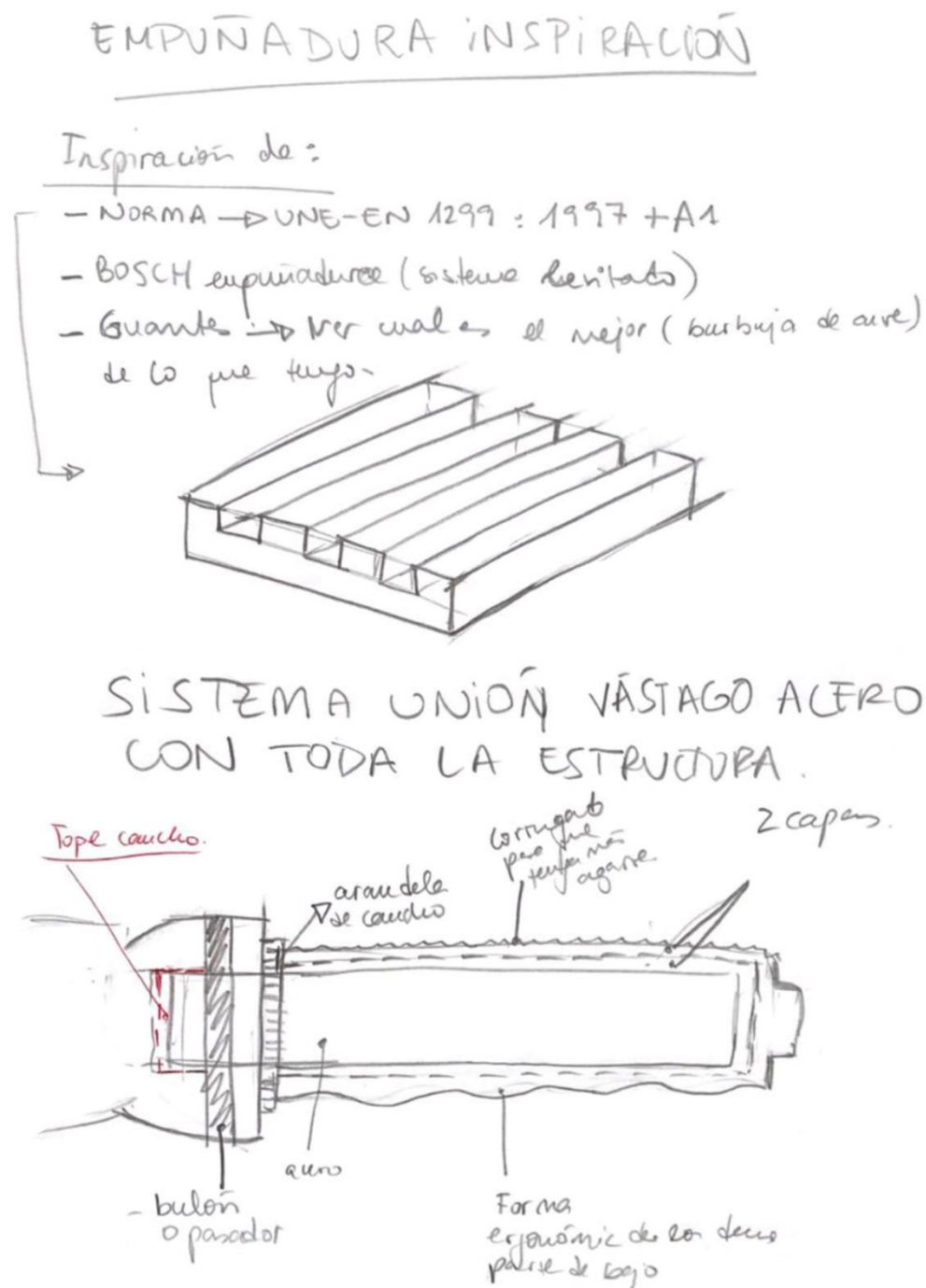
Desde el inicio, como especificaciones, se deseaba modificar la empuñadura, tanto el material como la forma para amortiguar la vibración.

Para ello, se quiere incorporar un sistema en suspensión de la empuñadura, en el que exista espacio entre el vástago de acero y la empuñadura. Este concepto responde a los sistemas diseñados por otras empresas como Bosch, sobre sus empuñaduras suspendidas (Bosch-vibration, 2019), los guantes diseñados con sistemas de burbujas de aire (Hamouda et al., 2016), o el diseño de Atlas Copco en sus empuñaduras con un sistema HAPS® (*Hand and arm Protection system*), cuyas empuñaduras están ensambladas sobre muelles que proporcionan parte de la amortiguación frente a la vibración (Atlas Copco, 2017). También, se considera el diseño de Sullair que utiliza resortes helicoidales que evitan el contacto directo entre las empuñaduras y el cuerpo del martillo neumático, permitiendo que actúen como materiales absorbentes (Sullair, 2008). Además, se toma como referencia el de la empuñadura de bici de Revgrips, el cual no hace contacto con el manillar por lo que aísla de golpes y vibraciones. Este último emplea arandelas de ajuste para personalizar la sensación y el

recorrido de movimiento de la empuñadura. En el interior se insertan unas estructuras de polímero que ayudan a amortiguar los golpes y las vibraciones (Revgrips, 2021). Se ha comprobado que cuanto menos contacto directo tengan los objetos, menos transmisión de la vibración y menos presión se ejerce por la insensibilización que produce la propia vibración, ya que, cuanta más presión, más vibración se transmite (AENOR, 1997).

El primer boceto, teniendo en cuenta todo lo analizado, se concreta en un diseño conceptual cuyo objetivo es diseñar un sistema en suspensión que lógicamente se encuentra en el interior de la empuñadura para minimizar la transmisión de la vibración.

Figura 62: Primer diseño conceptual del sistema de amortiguación

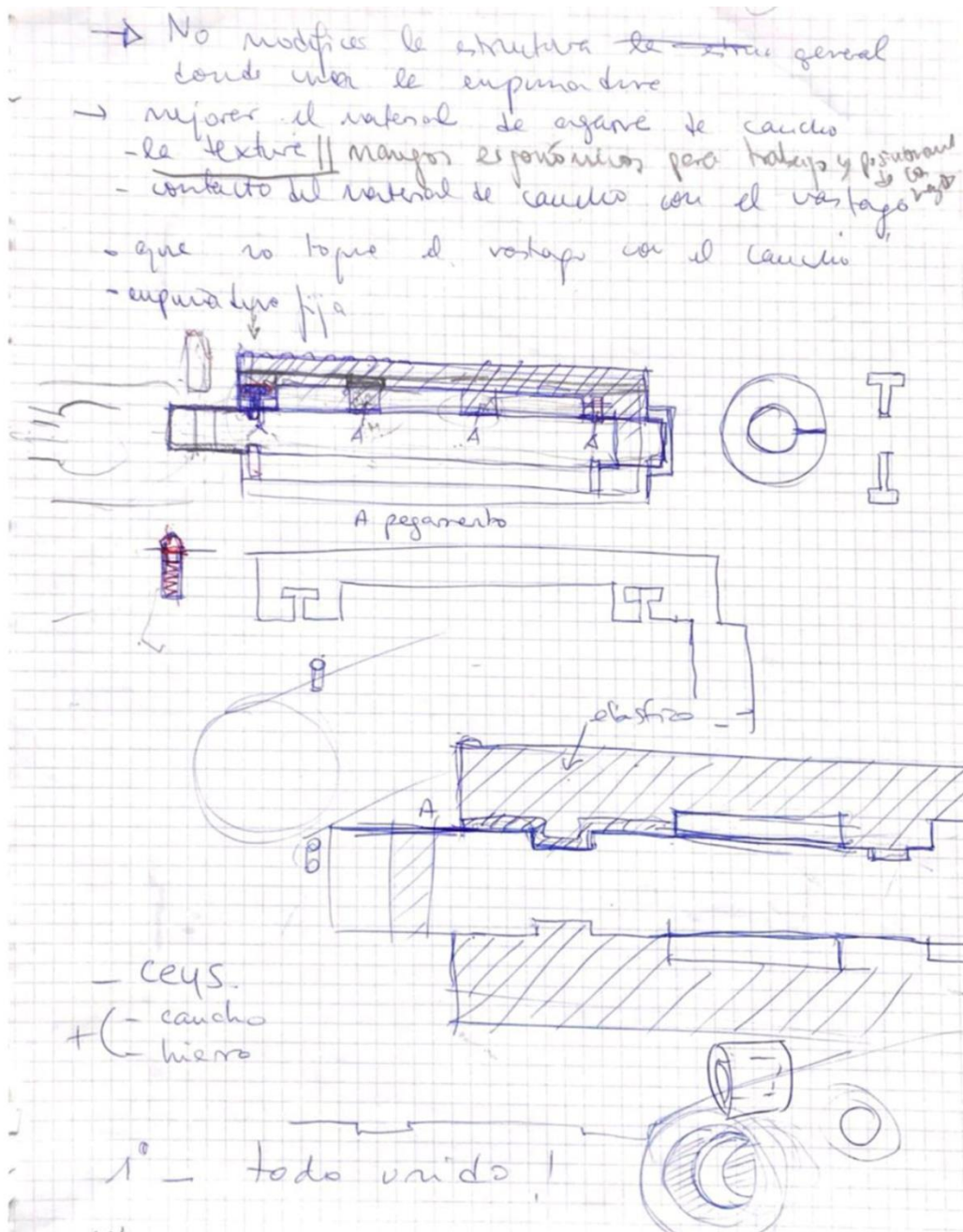


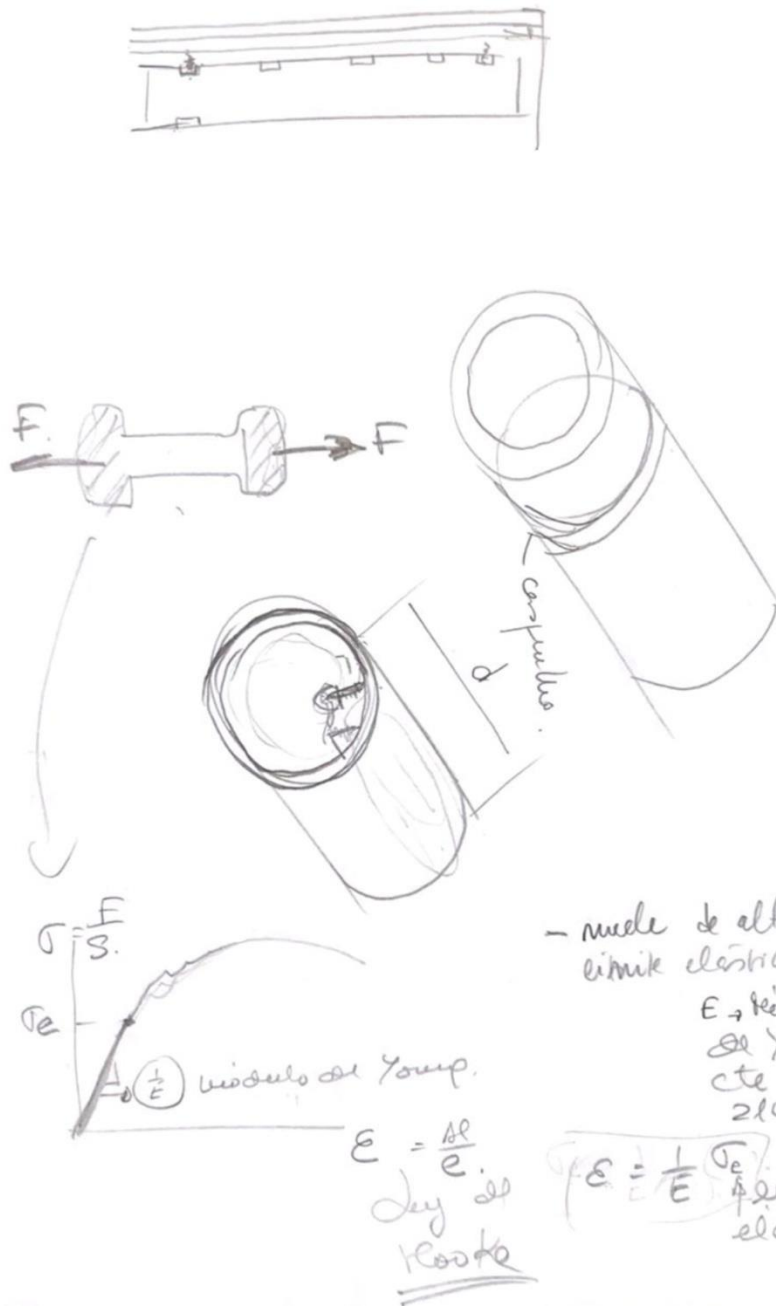
El primer dibujo recoge y refleja algunos conceptos de inspiración basados en la evidencia científica analizada entre los que se cita la norma UNE-EN 1299:1997+A1, el sistema de la empresa Bosch para su empuñadura, el concepto de las burbujas de aire recogidos en los guantes o el sistema de arandelas aplicado a las empuñaduras de ciclismo para crear ese sistema de suspensión como se puede ver en la imagen anterior.

Este diseño conceptual ha permitido sentar las bases para el desarrollo del sistema antivibratorio que concierne a esta tesis.

El segundo boceto conceptual parte del primero aproximándose a los posibles diseños que se desarrollan en la fase de diseño de detalle. En este caso, se debate la necesidad de introducir, además, elementos mecánicos ya propuestos y definidos en anteriores capítulos para apoyar y contribuir en la reducción de la transmisión de la vibración. Pero a la vez, se reflexiona si el sistema interno de la empuñadura, es decir, el que se encuentra en contacto con el vástago de acero deben estar las vetas posicionadas de forma horizontal o vertical.

Figura 64: Bocetos propuesta de introducir muelles de alto módulo elástico



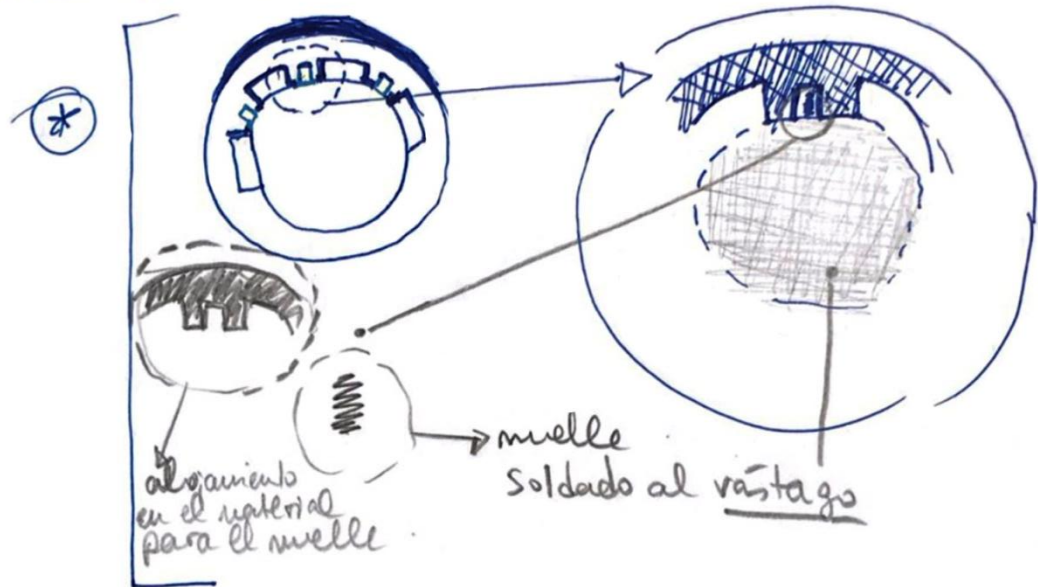


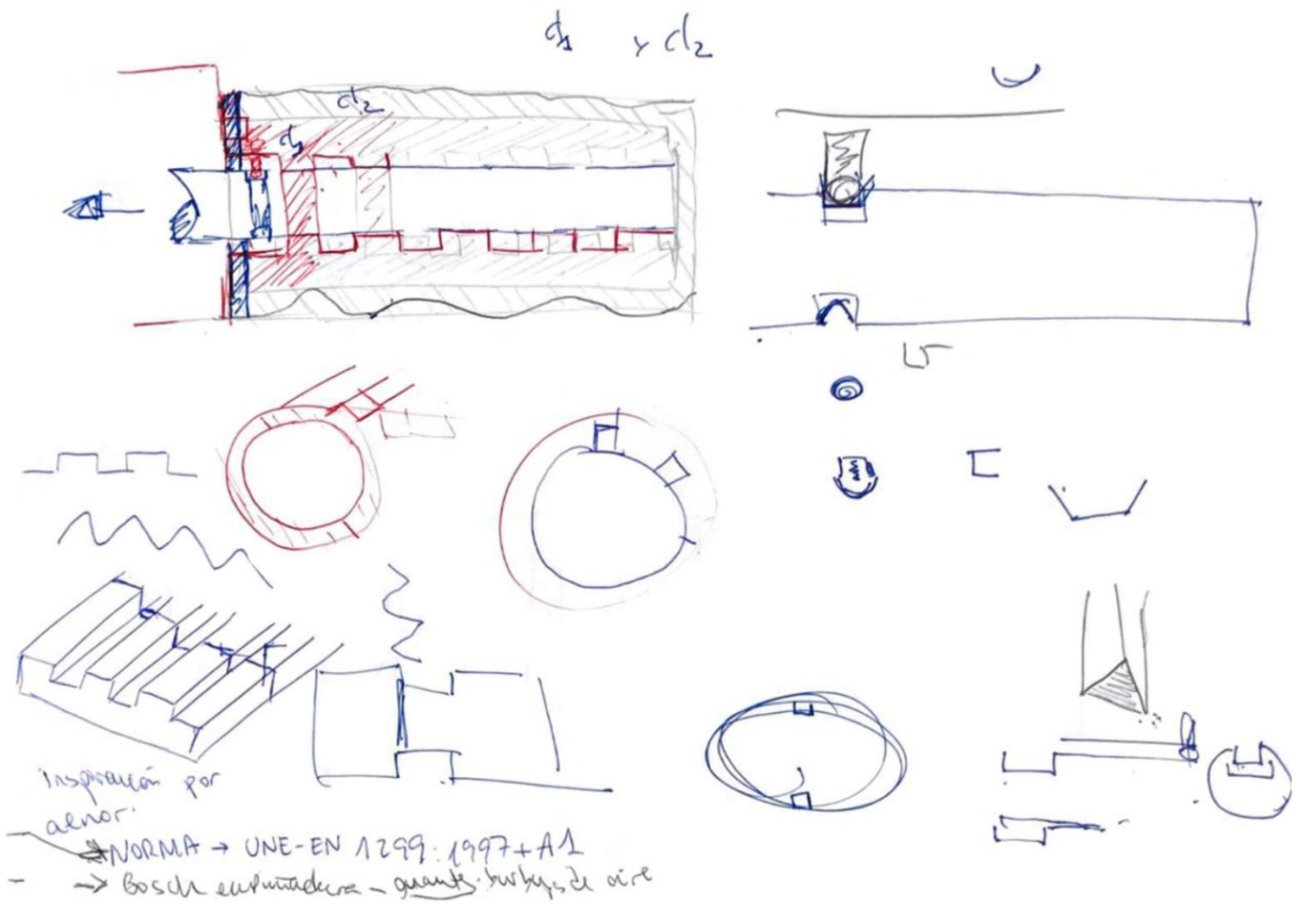
Ideas introducidas a la eempunadura

- ⊗ [- soldar muelle al macarrón o vástago
- Formar en el molde de inyección para alojar muelles

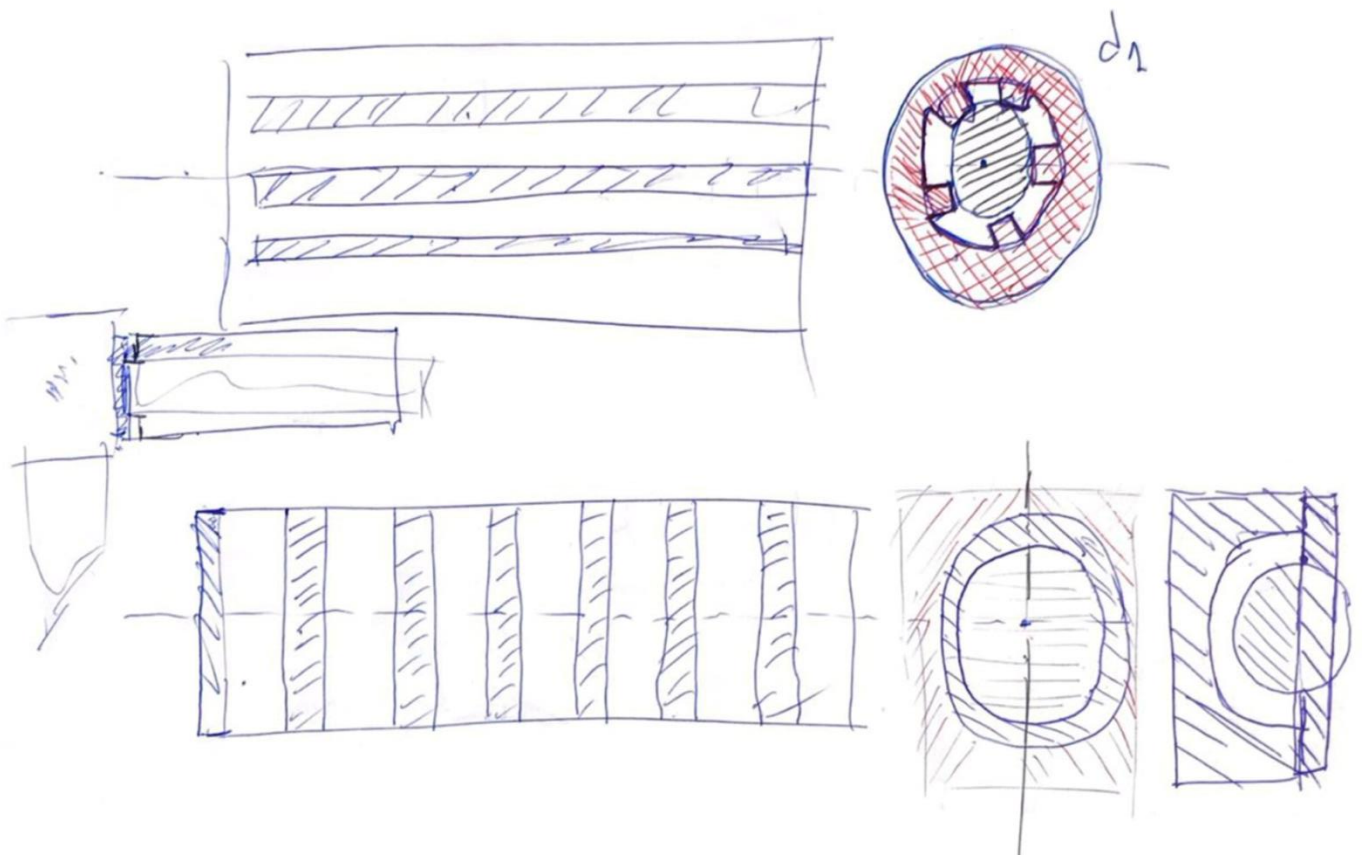
BUSCAR

- MUELLES DE ALTO LIMITE ELÁSTICO.





Inspiración por
 aenor:
 - NORMA → UNE-EN 1299:1997+A1
 - → Bosch aspiradora - quant. burbujas de aire



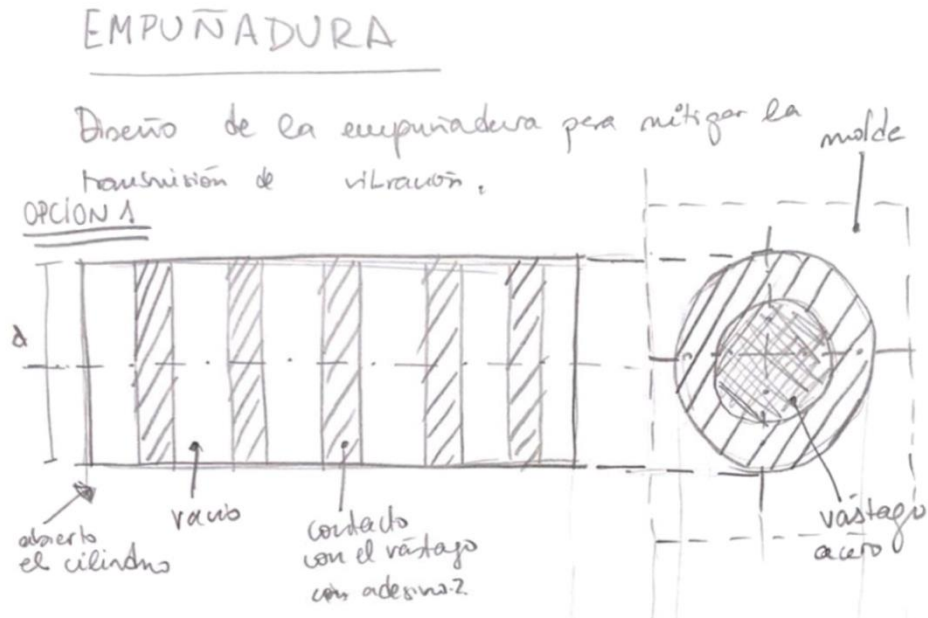
Sin embargo, se evitó emplear algún tipo de muelle, ya sea elástico, metálico, helicoidal o neumático a la hora de diseñar la empuñadura, como ya planteaba la norma UNE-EN 1299:1997+A1, ya que su empleo no es necesario y no se quiere modificar el martillo, su inserción modificaría el *know how* de la propia máquina al depender y estar unidas todas las piezas en un mismo conjunto.

Igualmente, se cuestionó si crear un sistema externo a la máquina como el que planteaba Xingjian Jing, Linli Zhang, Xiao Feng, Bo Sun y Quankun Li (2018) era realmente necesario, ya que su efectividad frente a la vibración se encontraba comprobada. No obstante, se desestimó esta idea debido a que su estudio desplazaría el objetivo principal que es rediseñar la empuñadura y, además, sería un elemento adicional a la máquina que no forma parte, de manera intrínseca, de la propia máquina.

Tras desechar la incorporación de muelles de alto límite elástico, se mantuvieron las dos propuestas planteadas al inicio. De estas dos, en cuanto a la dirección de las vetas, se

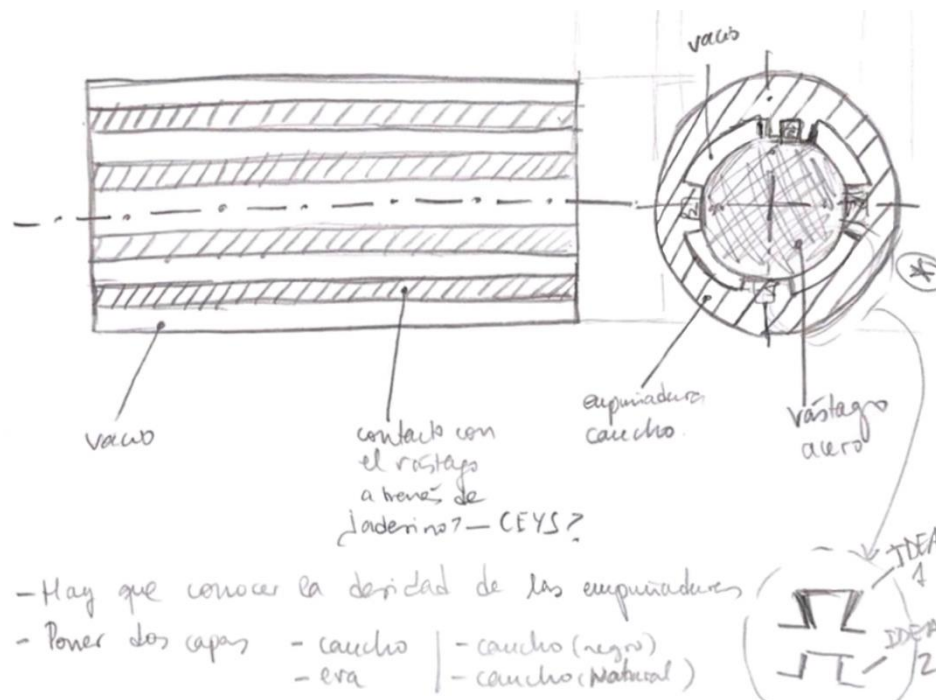
desechó la primera opción, debido a su forma, ya que podría dificultar su fabricación y no producir el efecto deseado de amortiguación.

Figura 65: Primera opción: propuesta desechada



Asimismo, la propuesta de diseño seleccionada es con la dirección de las vetas horizontales, es decir, a lo largo de la empuñadura, ya que favorece la fluidez de la inyección del elastómero.

Figura 66: Segunda opción: propuesta seleccionada



El contacto del material con el acero, es decir, en su interior, debía de ser parcial siguiendo el concepto de sistema en suspensión que ya se ha mencionado anteriormente. Sin embargo, no podría tener menos contacto el material con el acero, ya que se trata de una empuñadura que va a experimentar alta frecuencia y deterioraría, de forma temprana, el material. Aunque en algunas empuñaduras como las de la empresa Bosch si se observaba un sistema de suspensión del vástago, se trata de un elemento, un tornillo, muy pequeño en comparación con el vástago de la empuñadura de esta máquina. En este caso, el vástago del martillo neumático rotopercutor es muy grande y no se puede modificar porque depende de otras piezas como la cabeza y del resto del cuerpo, como se ha comprobado en el despiece en el Anexo B.

Una vez planteado cual es el sistema conceptual que se va a aplicar a los rediseños, se va a especificar el diseño de detalle de este producto teniendo en cuenta los materiales, analizados en el capítulo 4, las dimensiones ergonómicas, capítulo 3, y todas las piezas que forman la empuñadura.

5.3.1.3 Resumen

El diseño conceptual forma parte de las fases del diseño que permite sentar las bases del producto a rediseñar. Es la primera fase en la que se analiza, se considera, se esquematiza la información recogida en la investigación, para dar una solución que posteriormente se detalla. En este proceso, la información reunida es la relativa a la minimización de la transmisión de la vibración, como el uso de muelles que recoge la norma UNE-EN 1299:1997 +A1, los elastómeros termoestables, empleados en las empuñaduras de martillos neumáticos y el análisis de productos análogos como las empuñaduras de ciclismo extremo en el que se destaca el sistema de suspensión mediante arandelas para amortiguar la vibración.

Para poder realizar el proceso de diseño conceptual se ha contextualizado y analizado la empuñadura de Segeda midiendo cada subconjunto y componentes que dependen de forma global para que la función principal de la empuñadura se mantenga, así como con el resto de la máquina. En todo este desarrollo de diseño se ha empleado el boceto como método de materialización y las técnicas de creatividad, el *brainstorming* y la técnica analógica de la sinéctica, que emplea la analógica como recurso de búsqueda de soluciones aplicadas en otros productos, en este caso las empuñaduras de endurecido, para dar solución a los problemas de diseño.

Toda esta metodología de diseño ha permitido obtener un diseño conceptual del sistema interno de la empuñadura cuyo objetivo es reducir la transmisión de la vibración.

5.3.2 Diseño de Detalle

Tras finalizar la fase de diseño conceptual se comienza con la fase de diseño de detalle donde se tienen en cuenta y se relacionan los subsistemas y componentes que integran todo el conjunto del producto ya que todos los productos están formados por otros subconjuntos que en mayor o menor medida condicionan el producto a rediseñar y que además son necesarios definirlos en la fase previa (López Soto et al., 2013).

En esta fase se recurre, entre otros conocimientos, a conceptos sobre materiales y procesos productivos convirtiéndose en restricciones que el proyectista debe considerar a la hora de rediseñar para que encaje con el producto global, tanto física como funcionalmente (López Soto et al., 2013).

En este sentido, en el diseño de detalle se definen los componentes del producto y los subsistemas que afectan al producto final, igual que sucedía en el diseño conceptual. Sin embargo, ahora, hay que definir, calcular, dimensionar las piezas que, integradas en un subsistema, permite el funcionamiento del conjunto (López Soto et al., 2013).

Para ello, se emplea el diseño asistido por ordenador, comúnmente conocido como CAD por sus siglas en inglés “*computer-aided design*”, para verificar los diseños. Igualmente, se generan planos definitivos del producto, acotados y con indicaciones donde se requiera (López Soto et al., 2013).

En este apartado, el proceso que se ha llevado a cabo para desarrollar el diseño de detalle de las empuñaduras parte de bocetos, después, se dimensionará y se tendrá en cuenta los materiales de estudio para su posterior generación por CAD con Catia V5 y Ansys, para calcular y verificar la amortiguación.

5.3.2.1 Bocetos para el diseño de detalle

Una vez desarrollada la idea base se empleará el bocetado para desarrollar más en detalle el diseño interno planteado en la fase previa.

Los bocetos están enfocados con el objetivo de minimizar la transmisión de la vibración mediante la modificación de la forma de la empuñadura.

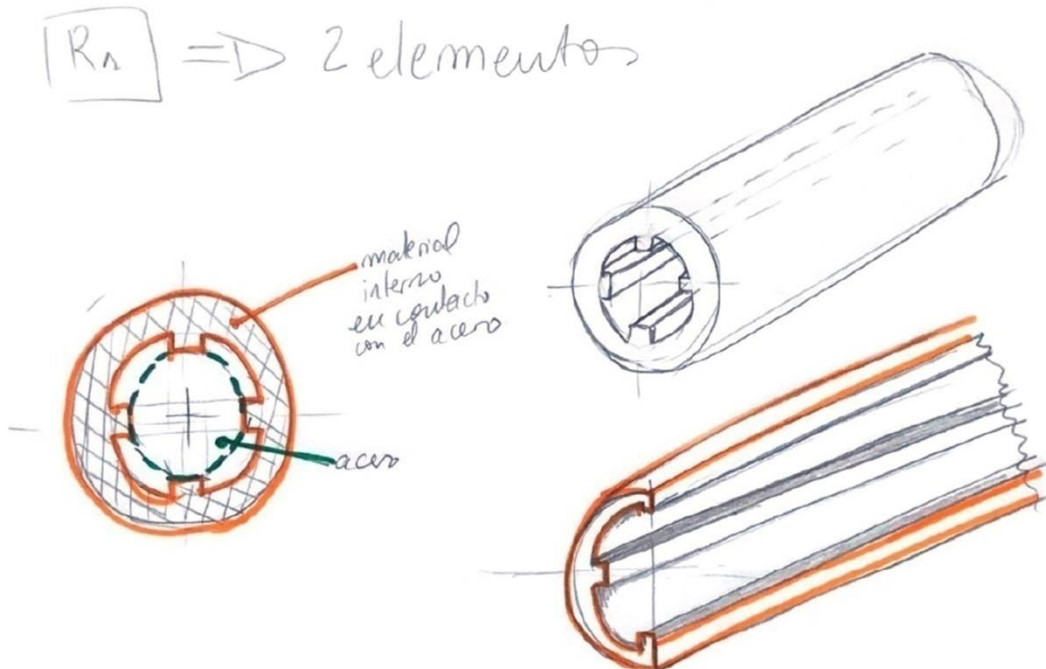
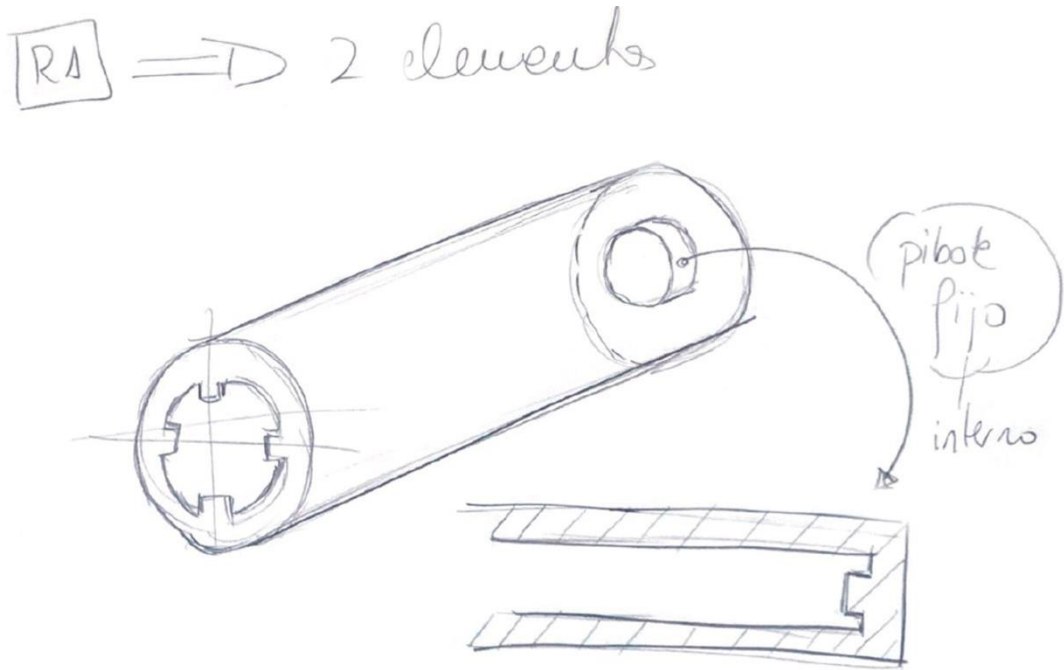
Se ha realizado dos tipos de empuñaduras denominados “R1” y “R2”, uno diseñado con dos elementos y otro diseñado con un elemento, respectivamente, para combinar los materiales obtenidos en el punto 4.2 y así estudiar la combinación de materiales en función de la forma.

Empuñadura “R1” con dos elementos

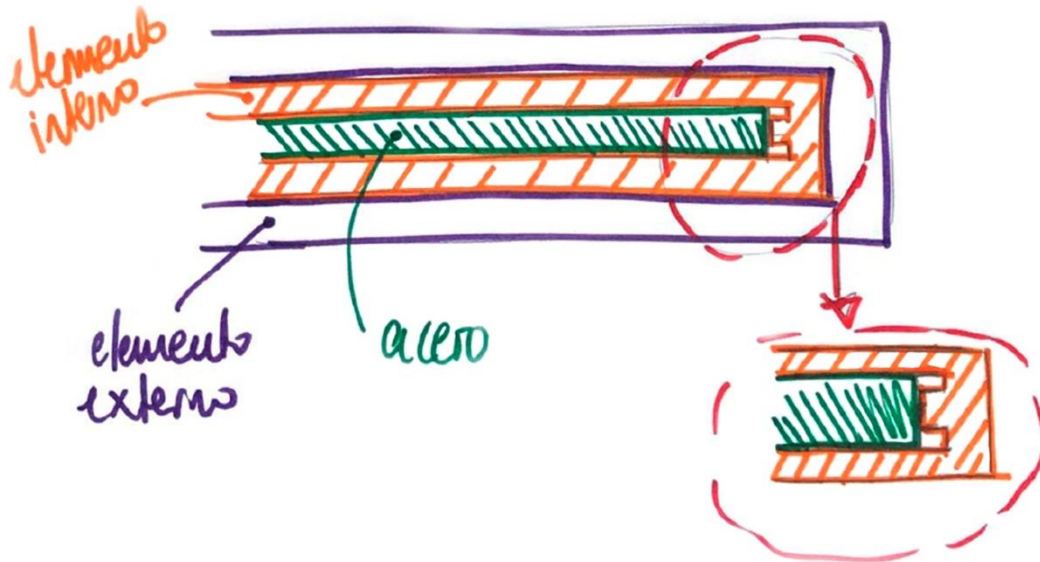
El diseño R1 está compuesto por dos elementos, el elemento interno y el elemento externo. El elemento interno está en contacto con el vástago de acero, diseñado con dientes a lo largo de la empuñadura. En el interior contiene un pivote cuyo objetivo es crear espacio entre el vástago y el elemento interno. Respecto al elemento externo está diseñado con un

orificio a lo largo del producto, propio de una empuñadura, para ser insertada sobre el producto interno.

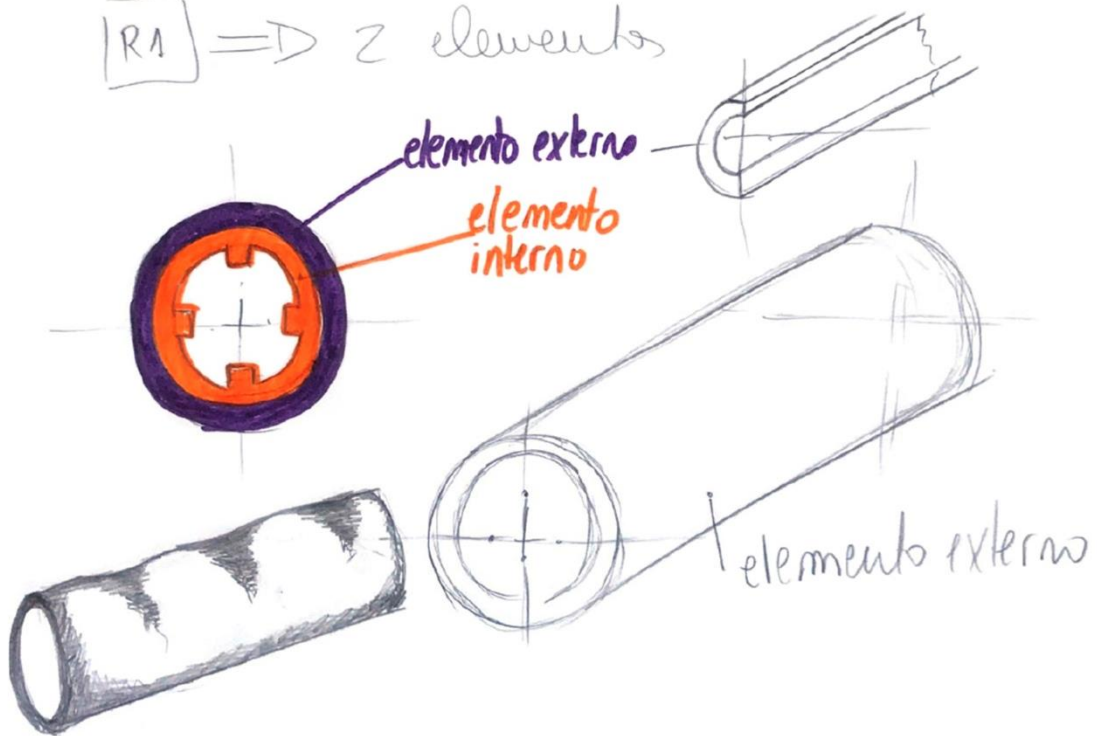
Figura 67: Bocetos empuñadura "R1"

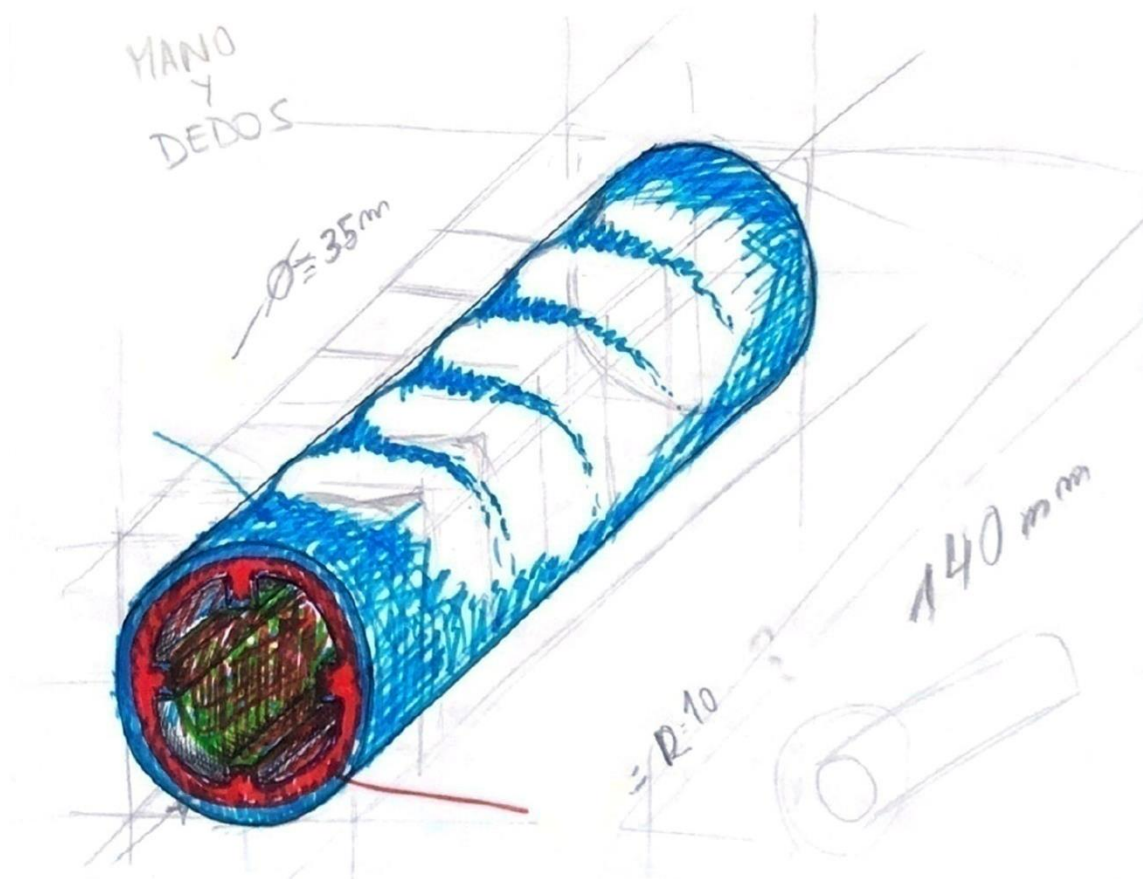


$\boxed{RA} \Rightarrow 2$ elementos



$\boxed{RA} \Rightarrow 2$ elementos

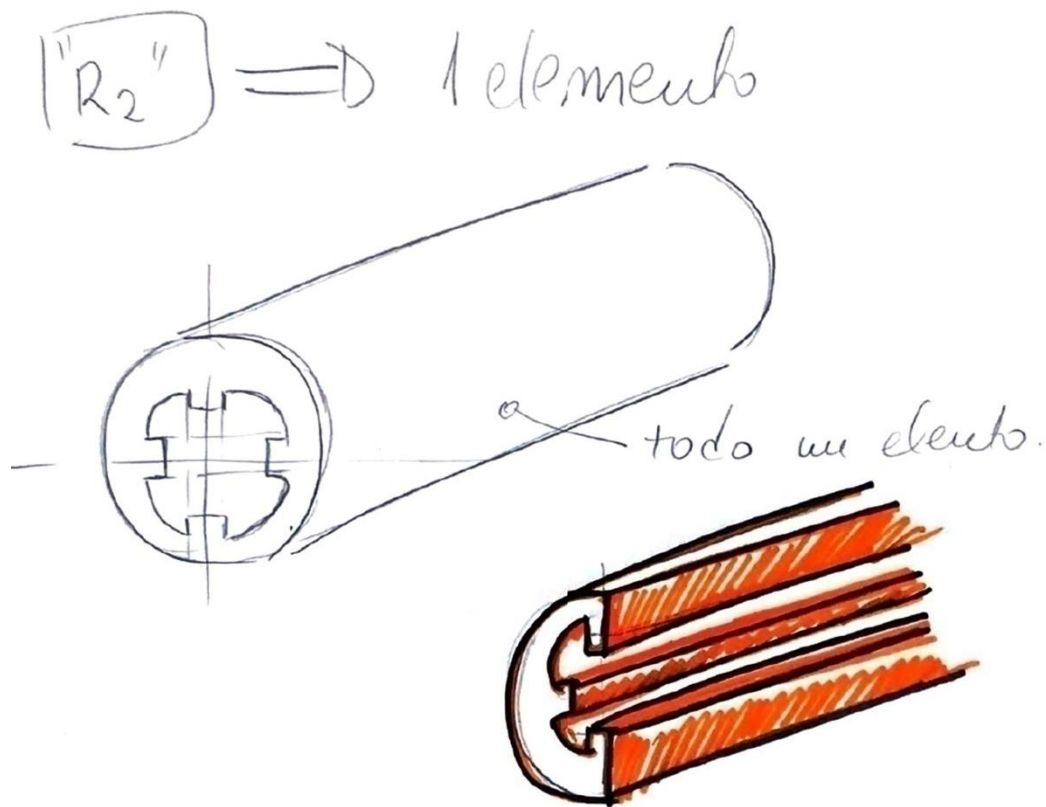




Empuñadura "R2" con un elemento

Esta empuñadura se diferencia de la empuñadura "R1" en que está compuesta por un único elemento. Véase la figura 68.

Figura 68: Boceto empuñadura "R2"



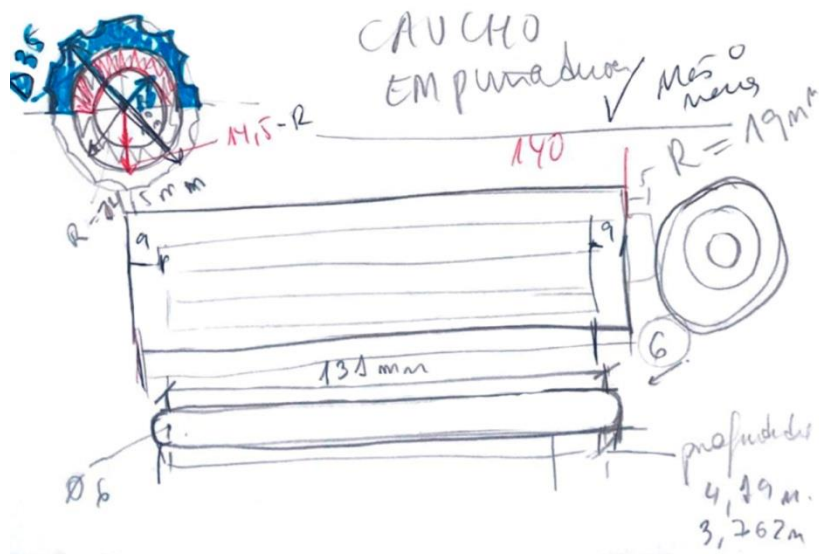
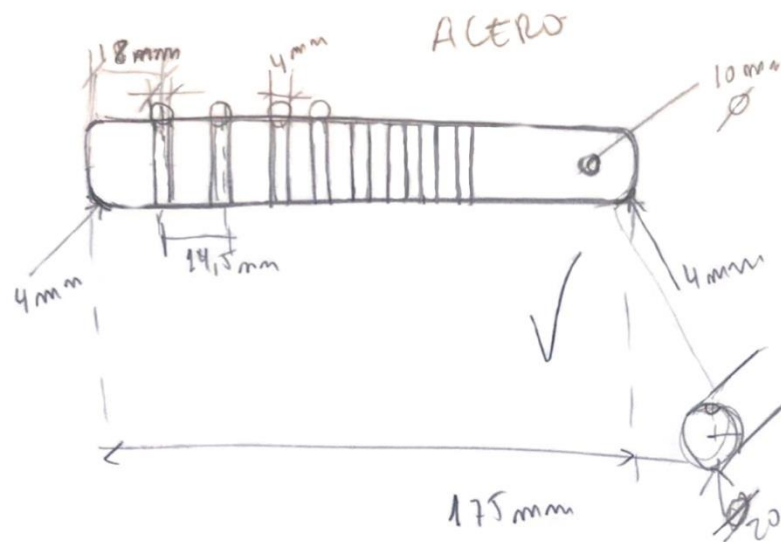
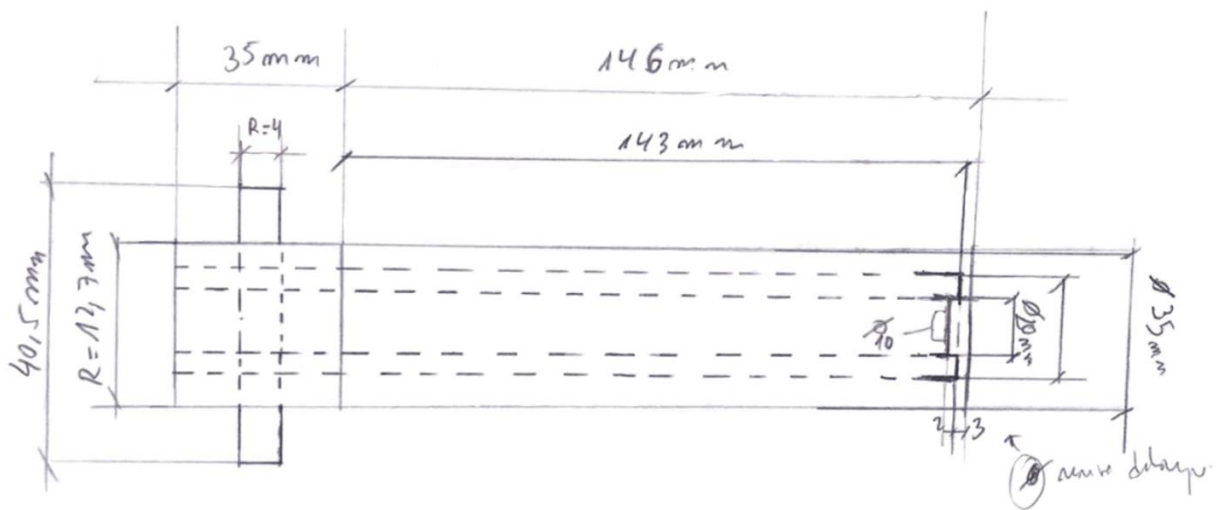
5.3.2.2 Aplicación de medidas a las empuñaduras

Ahora, es necesario dimensionar el producto teniendo en cuenta todos los elementos que depende la empuñadura, como el vástago, el casquillo y el pasador.

Las dimensiones finales de las dos propuestas de rediseño de empuñaduras vienen determinadas por la ergonomía enfocada en la normativa, como se ha indicado en el punto 3.4.1 Ergonomía aplicada al diseño. De tal manera que, las dimensiones aplicadas serán finalmente 146 *mm* de longitud y 35 *mm* de diámetro y varía 1 *mm* de longitud respecto de la empuñadura "Segeda original".

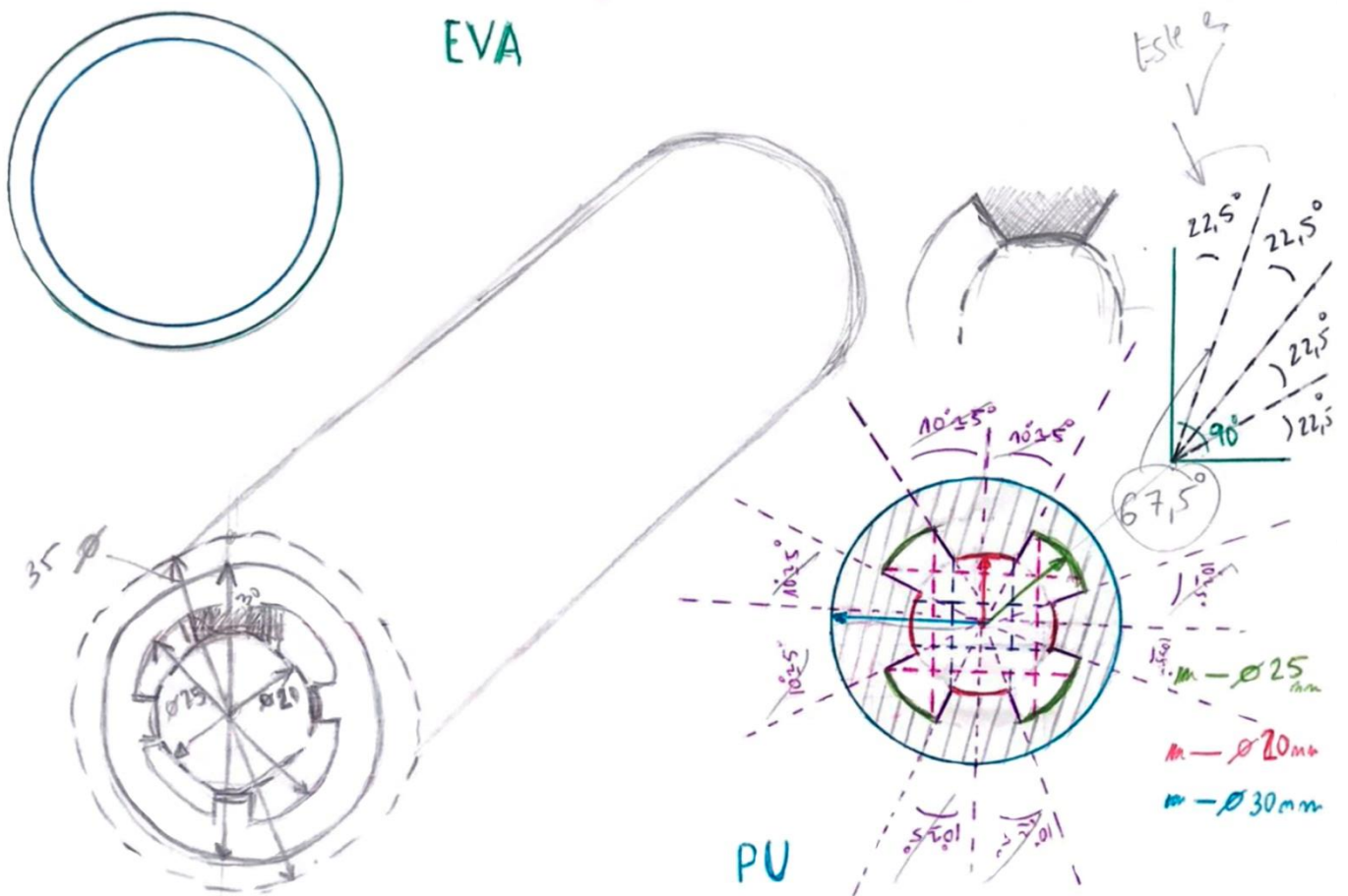
En primer lugar, se presentan dos bocetos correspondientes a las dimensiones genéricas de los nuevos rediseños ensamblados con todos los subsistemas insertados, es decir, teniendo en cuenta las dimensiones de todos los elementos dependientes de la empuñadura, el vástago de acero, el pasador, el casquillo y también el propio rediseño de empuñadura.

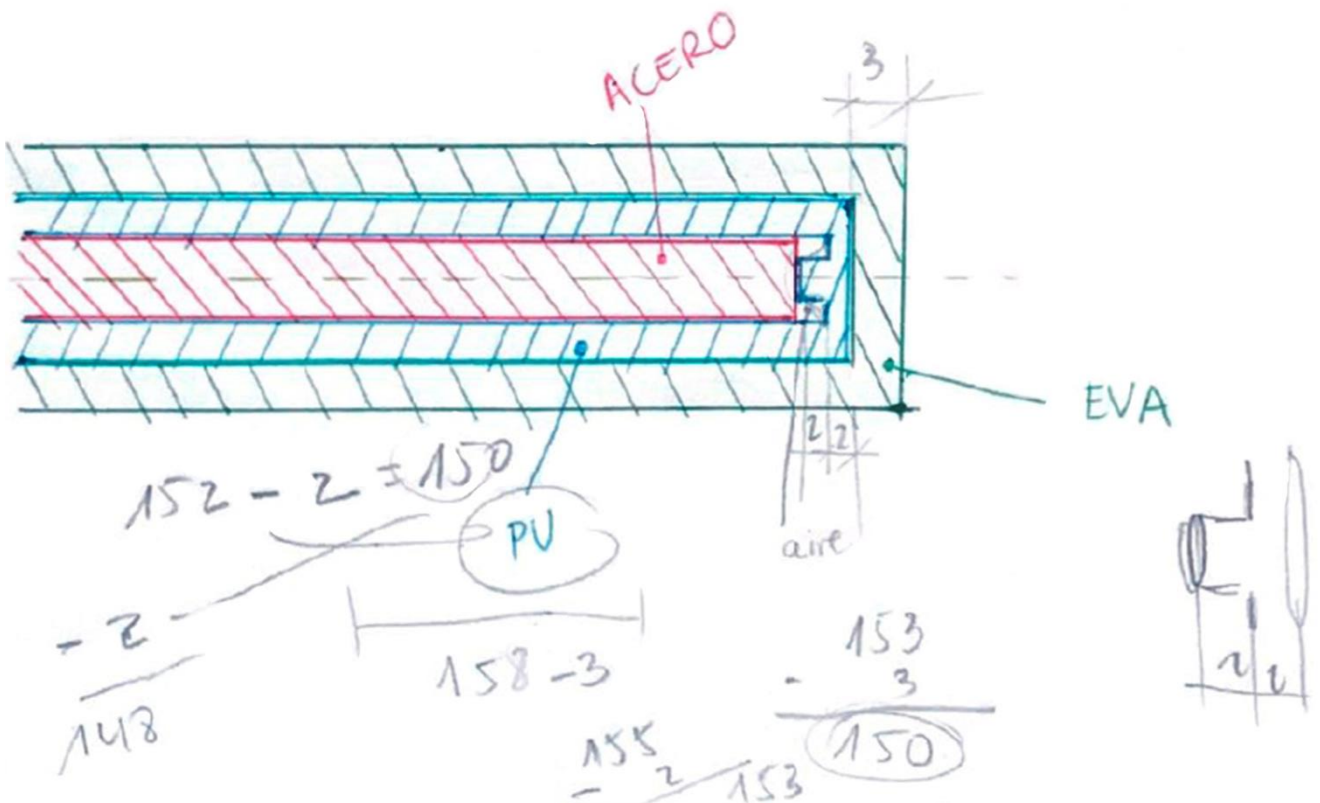
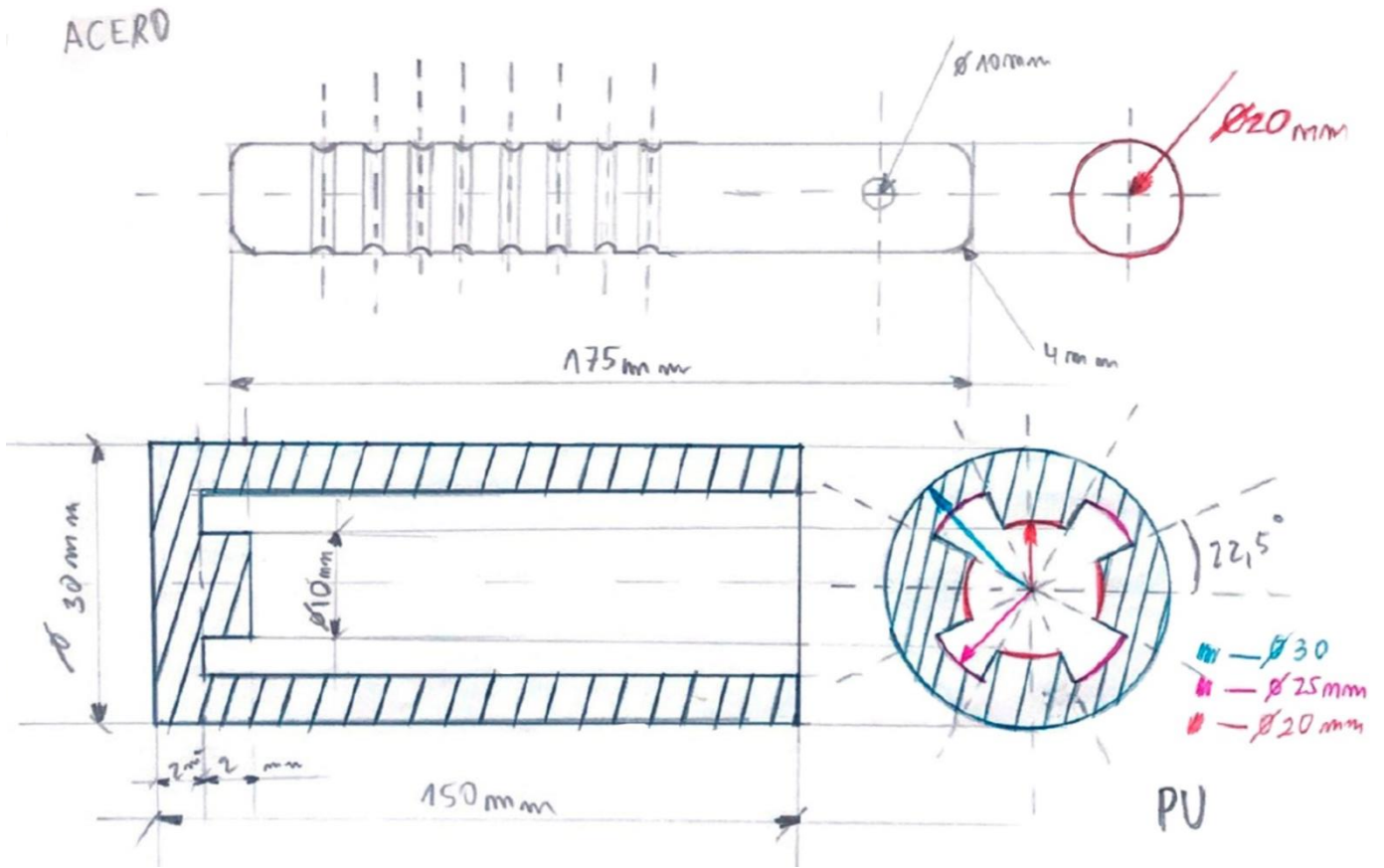
Figura 69: Bocetado de las dimensiones del nuevo diseño



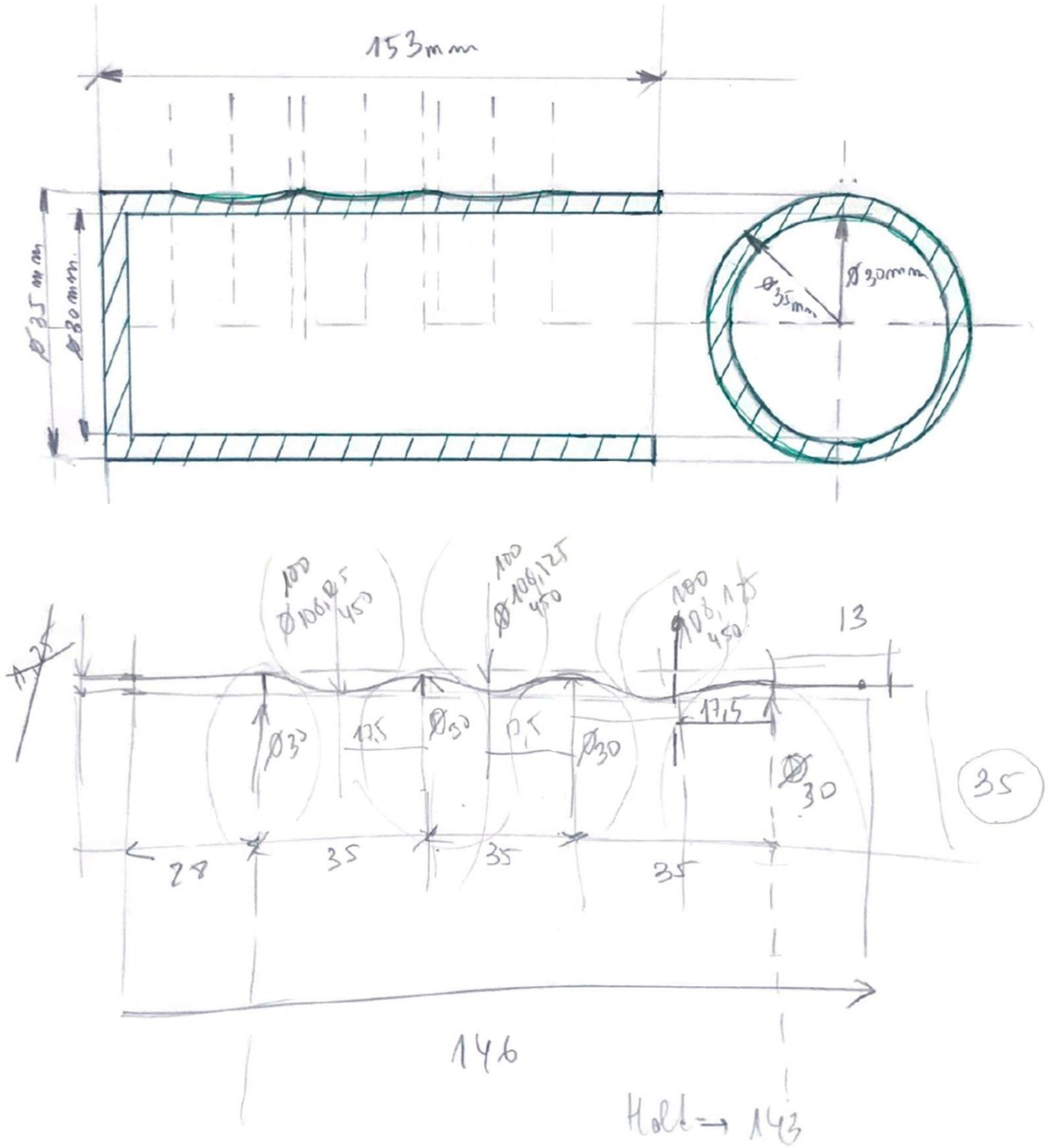
En segundo lugar, en estas tres imágenes se pueden observar las dimensiones específicas de los dientes internos que se encuentran en contacto con el vástago de acero. Se trata de un elemento muy importante que hay que tener en cuenta a la hora de dimensionar el elemento interno ya que el vástago une el conjunto de la empuñadura.

Figura 70: Bocetado de las dimensiones del elemento interno





En tercer lugar, se exponen las dimensiones relativas al elemento externo y de las formas cóncavas adaptadas a la mano para tener un agarre más natural, siempre teniendo en cuenta las dimensiones del elemento interno.



- Elemento interno Caucho Negro combinado con los siguientes elementos externos: EVA-D50, EVA-D30, PU-1, PU-2, Caucho Natural.

- Elemento interno EVA-D50 combinado con los siguientes elementos externos: EVA-D30, PU-1, PU-2, Caucho Negro, Caucho Natural.

Para el caso de la empuñadura “R2” al constituirse de un elemento, se aplica EVA-D50; EVA-D30; PU-1; PU-2; Caucho Negro; Caucho Natural.

5.3.2.4 Resumen

La segunda fase del desarrollo de diseño es a la que pertenece al diseño de detalle, para esta tesis se ha especificado los componentes del producto, que afectan al producto final, definiendo, combinando los materiales obtenidos en el capítulo 4, y dimensionando, de acuerdo a normativa, las piezas que integradas en un subsistema permiten el funcionamiento de la empuñadura en la máquina.

En esta fase de detalle se han propuesto dos diseños denominados “R1” y “R2”. La empuñadura “R1” está compuesta por dos elementos, el elemento interno que se encuentra en contacto con el vástago de acero diseñado en su interior con dientes a lo largo de la empuñadura y un pivote y el elemento externo diseñado con un orificio, propio de una empuñadura, para ser insertada sobre el producto interno. En cambio, “R2” se constituye de un elemento, en el que se elimina el elemento externo y solo está formado por el elemento interno.

5.3.2.5 Simulación en 3D de la empuñadura con Catia V5

Una vez dimensionado las empuñaduras, en este apartado vamos a exponer la simulación en 3D de las empuñaduras y sus componentes mediante un programa informático de diseño, fabricación e ingeniería asistida por ordenador denominado Catia V5.

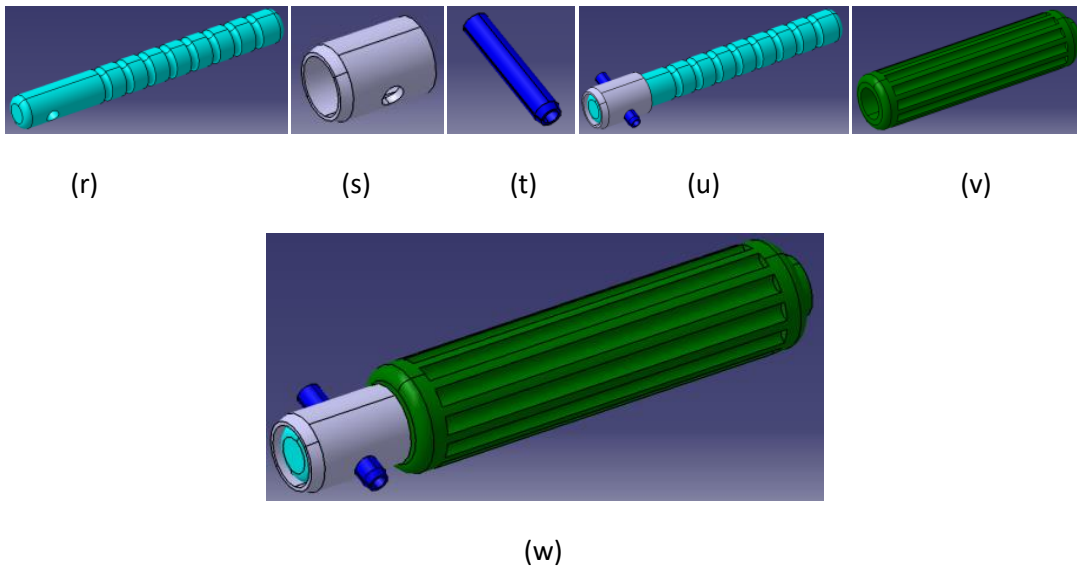
Utilizando las dimensiones que han sido plasmadas en el punto 5.2, Diseño conceptual, vamos a recoger en la siguiente tabla las medidas generales de las propuestas de empuñadura, mientras que los planos se expondrán en el Anexo E.

Tabla 31: Medidas generales de las propuestas de empuñadura

Medidas generales		
"R1" parte externa y "R2" un elemento	Longitud	146 <i>mm</i>
	Diámetro	35 <i>mm</i>
"R" parte interna	Longitud	143 <i>mm</i>
	Diámetro	30 <i>mm</i>

En la siguiente figura se presenta el diseño de la empuñadura original, "Segeda original", modelado en 3D con Catia V5, el vástago de acero F-212, el casquillo y el pasador elástico.

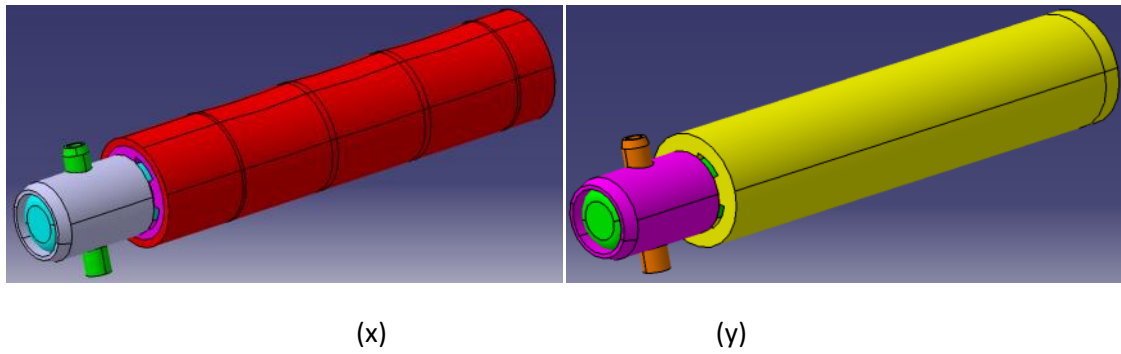
Figura 72: (r) vástago de acero F-212, (s) casquillo, (t) pasador elástico, (u) unión del vástago, del casquillo y del pasador, (v) empuñadura caucho sintético y (w) unión de las piezas



Una vez diseñada la empuñadura "Segeda original" en Catia V5, para realizar los nuevos rediseños se mantuvieron las dimensiones del casquillo, del pasador elástico y del vástago de acero.

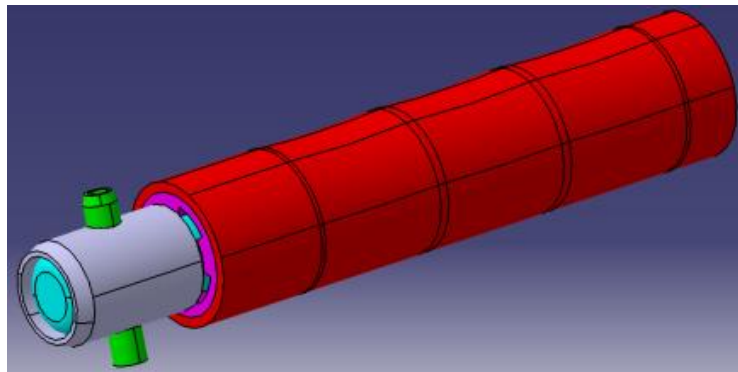
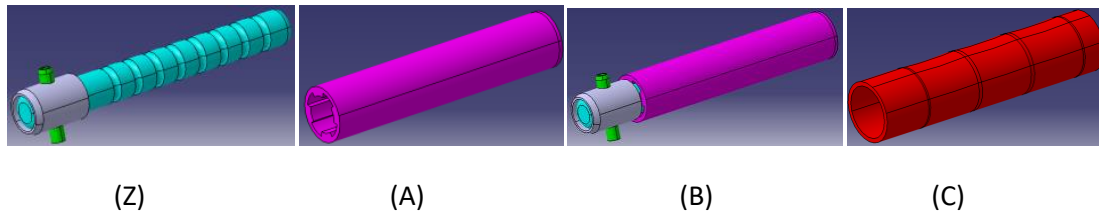
De esa forma se adaptan los rediseños a estos elementos que son clave para la sujeción de la empuñadura a la cabeza del martillo. Así, los nuevos rediseños de empuñadura "R1" y "R2" pasaron del papel al modelado en 3D, como se puede observar en las siguientes imágenes.

Figura 73: (x) ensamblaje empuñadura "R1" y (y) ensamblaje empuñadura "R2"



En la figura 74 posterior se presenta el ensamblaje de la empuñadura "R1"

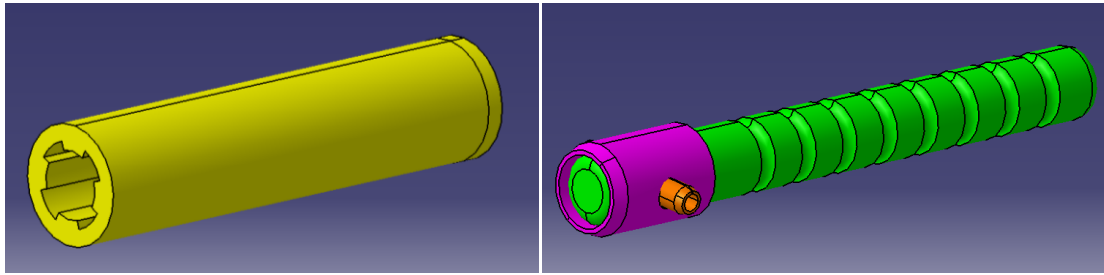
Figura 74: (z) ensamblaje casquillo y vástago, (A) producto interno, (B) unión del vástago de acero, del casquillo, del pasador y del producto interno, (C) producto externo y (D) diseño de empuñadura "R1" con todos los elementos



(D)

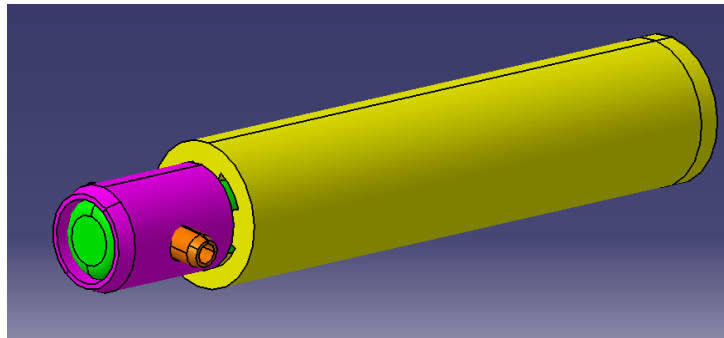
A continuación, se muestra la empuñadura "R2" con el vástago, el casquillo, el pasador elástico y el producto interno.

Figura 75: (E) unión del vástago, del casquillo y del pasador, (F) producto interno y (G) diseño de empuñadura “R2” con todos los elementos



(E)

(F)

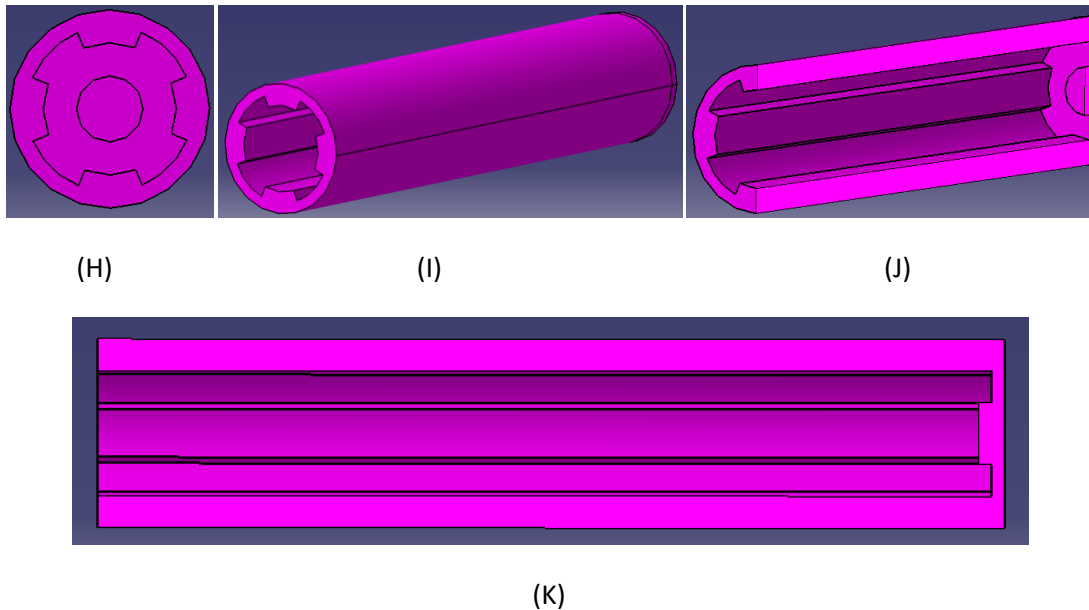


(G)

Las empuñaduras “R1” y “R2” se han diseñado adaptadas a las dimensiones de la mano, de forma que son ergonómicas en el agarre y en la comodidad de la mano.

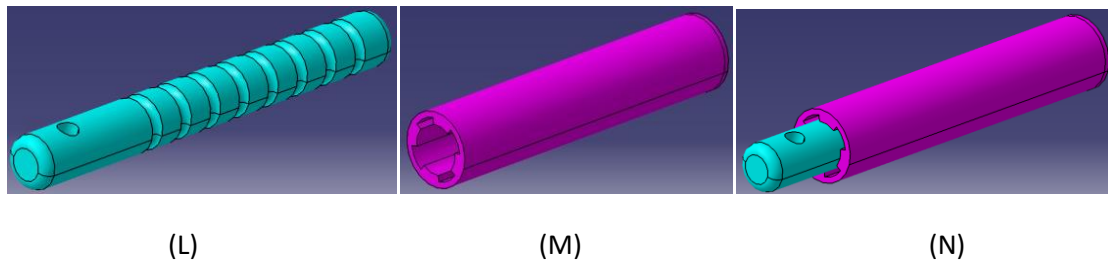
La principal característica de ambos diseños radica en que el producto interno que se encuentra en contacto con el vástago de acero F-212, presenta unos dientes que se prolongan a lo largo del producto y en el interior se ha diseñado un pivote cuyo objetivo es crear un espacio entre el vástago de acero F-212 y el producto interno. El espacio creado permite que la empuñadura se encuentre parcialmente en suspensión de tal manera que no crea contacto en toda su superficie. El proceso de fabricación sería mediante un molde por inyección sobre el vástago de acero, el mismo proceso que el realizado para la inyección de la empuñadura original de Segeda. En las imágenes siguientes se puede observar la pieza con su sección.

Figura 76: (H) vista frontal del elemento interno, (I) vista isométrica del elemento interno, (J) y (K) vista sección elemento interno



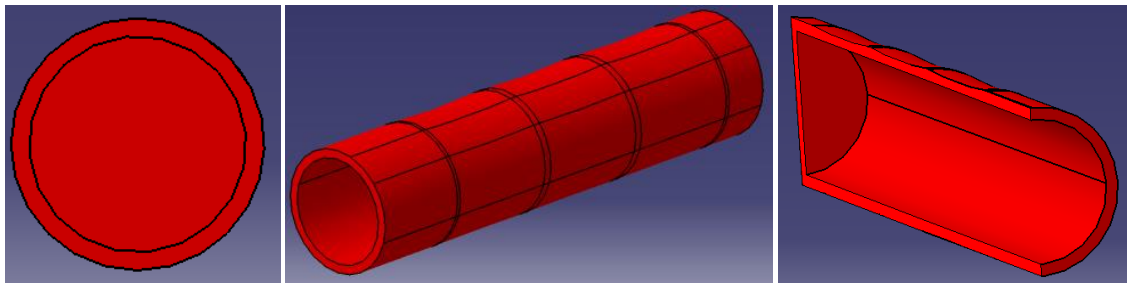
Así, en las siguientes imágenes se puede visualizar el espacio creado entre el vástago de acero F-212 y el producto interno que se encuentran insertados de forma virtual.

Figura 77: (L) vástago acero, (M) elemento interno y (N) ensamblaje del vástago y del elemento interno



Respecto al diseño externo, que sólo se aplica a la empuñadura “R1” (con dos productos), consiste en un producto que se superpone al producto interno para dar mayor confort a la mano y que, a su vez, es extraíble para que pueda ser sustituido por otro debido al desgaste. El proceso de inserción de este elemento externo sobre el interno se realizaría por presión. El diseño presenta un orificio a lo largo del producto, propio de una empuñadura, para ser insertada sobre el producto interno, Figura 78. También, se le aplican ciertas zonas cóncavas para facilitar el agarre de los dedos siendo una posición más natural.

Figura 78: (Ñ) vista frontal del elemento externo, (O) vista isométrica del elemento externo, (P) y (Q) vista sección del elemento externo



(Ñ)

(O)

(P)

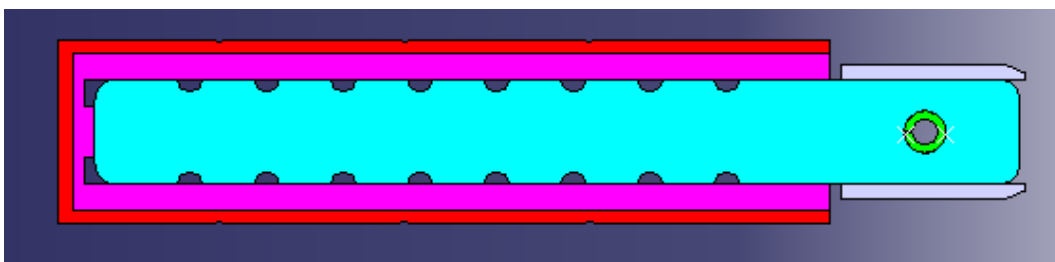


(Q)

Para conocer en detalle la unión de la empuñadura “R1” y de la empuñadura “R2” se ha realizado una sección a ambas con el programa Catia para apreciar el ensamblaje de todos los elementos.

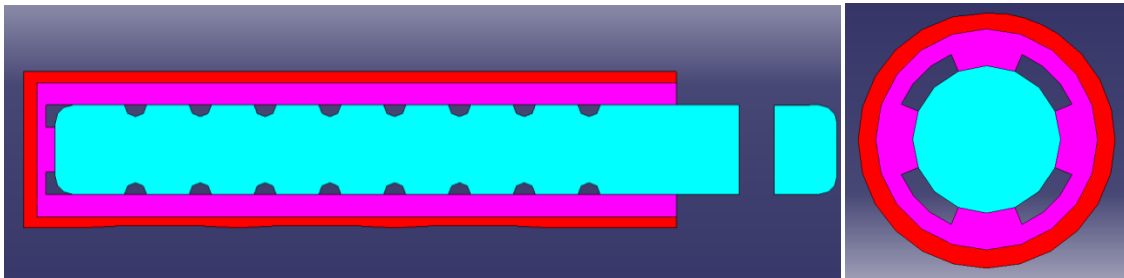
La figura 79 muestra el acoplamiento de toda la empuñadura “R1”, del vástago de acero, del casquillo, del pasador elástico, del producto interno y del externo.

Figura 79: Sección de toda la empuñadura "R1"



En las dos siguientes imágenes correspondientes a las secciones, se aprecia el detalle de los espacios de aire especialmente diseñados, tal como se ha indicado anteriormente.

Figura 80: Sección de la empuñadura "R1" con el vástago de acero y los elementos internos y externos



Para la empuñadura "R2", con un solo elemento, el acople de los productos y el espacio creado entre el vástago de acero y el acople de los productos y el espacio creado entre el vástago de acero y el producto interno son los mismos que los de la empuñadura "R1", tal como se muestra en las figuras 81 y 82.

Figura 81: Detalle de la unión de la empuñadura "R2"

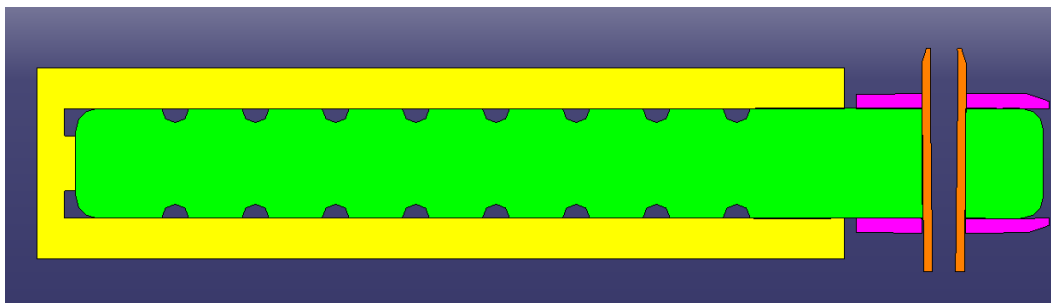
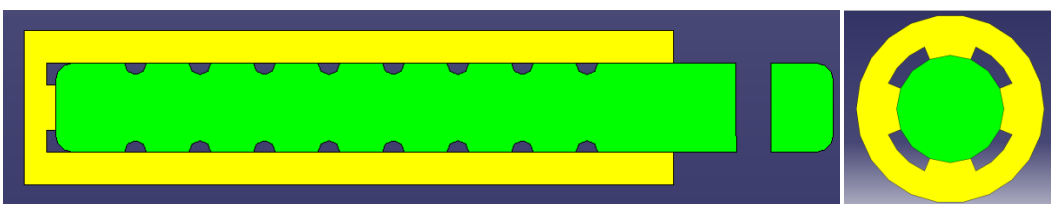


Figura 82: Detalle espacios de aire de la empuñadura "R2"



5.3.2.5.1 Resumen

Como parte del proceso de desarrollo del diseño de detalle se ha empleado como método, el diseño asistido por ordenador, CAD, concretamente el programa Catia V5. Se ha modelado en 3D tanto la empuñadura de "Segeda original" como las empuñaduras "R1" y "R2", en las que se han generado planos con medidas de detalle que se encuentran en el

anexo E. La empuñadura “R1” consta de dos componentes, un elemento interno y de otro externo. En cambio, la empuñadura “R2” consta de un solo componente que es el denominado elemento interno. Todas las empuñaduras se encuentran unidas por un conjunto de subconjuntos, es decir, poseen todas ellas el vástago de acero F-212, el casquillo y el pasador elástico, originales del martillo neumático, ya que de esta manera permite su funcionamiento, como empuñadura, dentro de la máquina modelo MS76 de Segeda.

5.3.2.6 Análisis y comprobación del diseño

Dentro de la fase de diseño de detalle es fundamental comprobar los rediseños a través de técnicas de simulación computacional usadas en ingeniería. En este caso, se va a emplear el análisis por elementos finitos, como método de comprobación para la minimización de la transmisión de la vibración en función de la forma del diseño y la combinación de materiales.

5.3.2.6.1 Modelos numéricos

En primer lugar, se realizará una breve introducción el porqué se emplea los modelos numéricos como método para verificar un producto y las ventajas que supone su uso en este tipo de análisis.

5.3.2.6.1.1 Introducción

El desarrollo tecnológico computacional ha permitido que, a día de hoy los métodos tradicionales procedentes de las teorías clásicas de elasticidad y resistencia de materiales, la teoría de estructuras, la teoría de vibraciones o los ensayos experimentales, se vean desplazados a un segundo plano por los cálculos numéricos de la ingeniería asistida por ordenador, en concreto, mediante el método de análisis de elementos finitos. El método de análisis numérico asistido por ordenador permite entender el comportamiento de la pieza a analizar con mayor precisión, versatilidad y menor coste (Abasolo Bilbao et al., 2019b) .

Este método posibilita que, en el proceso de desarrollo de un producto, se minimice el vacío entre el conocimiento del producto y el coste de desarrollo del mismo, para así reducir

los gastos, el tiempo de desarrollo y permitiendo la generación de productos óptimos con mayores prestaciones (Abasolo et al., 2017).

En este punto, el analista debe tener en cuenta que este método no tiene por qué reemplazar en su totalidad a los ensayos experimentales, todo depende de lo que se quiera analizar. Deberá entender que los ensayos experimentales son un apoyo o complemento de veracidad y comprobación. No se puede afirmar que un método sea mejor que otro, todo depende del tipo de análisis y la precisión/coste que se persiga. En función de ello, se empleará un método u otro o la combinación de diversos de ellos (Abasolo Bilbao et al., 2019b).

5.3.2.6.1.2 Ansys

Ansys es uno de los softwares más utilizados en ingeniería asistida por ordenador para análisis y simulación por elementos finitos. Este programa contiene las fases de preprocesador, resolución y postprocesador en una única plataforma. Trabaja analizando una única pieza o un conjunto de ellas. Se emplea en ingeniería y diseño mecánico sometiendo al objeto a una o varias solicitaciones físicas (NyS, 2022).

Desde que se desarrolló en la década de los 70, ha servido de soporte para el diseño y desarrollo de productos, debido a su variedad de módulos que permite realizar cualquier análisis (Ponsoda Acedo, 2019).

Para el desarrollo de esta tesis, se empleará uno de los módulos más completos de diseño en 3D y simulación de elementos finitos, el denominado ANSYS® Workbench, que gracias a la aportación del diseño en 3D permite crear, ajustar los materiales y simular los esfuerzos estáticos y dinámicos (Ponsoda Acedo, 2019).

5.3.2.6.1.2.1 Simulación por elementos finitos con Ansys

La simulación por elementos finitos, MEF, es un proceso que se emplea hoy en día para conocer los posibles fallos de tensiones de un producto, permitiendo que, los diseñadores, puedan prevenir dichos fallos antes de su fabricación.

El MEF transforma un problema de ecuaciones diferenciales determinado en un problema en forma matricial, generando el resultado apropiado para un número finito de puntos. Después, inserta la solución al resto del dominio, dando como resultado una solución próxima. El conjunto de puntos, donde la solución es precisa, se denomina conjunto de nodos. Estos forman una red designada como malla, conformado por retículos, es decir, por un conjunto de ecuaciones. De esta manera, cada uno de los retículos contenidos en la malla es un elemento finito. El conjunto de nodos se consigue dividiendo o discretizando la estructura en elementos de distinta forma, esto es, en superficies, volúmenes o barras (Benito Muñoz et al., 2014)

Actualmente, se aplica en distintos campos de la ingeniería y se emplea para analizar tanto las tensiones como las vibraciones. El dominio sometido a vibraciones tiene la particularidad que puede entrar en resonancia dependiendo de las frecuencias naturales del mismo.

Para estudiar la amortiguación y comprobar que no existe resonancia en el modelo a analizar en Ansys lo principal es conocer las frecuencias naturales del producto.

Así, mediante el análisis modal, en el modelo de elementos finitos, lo que se analiza es que las frecuencias externas se encuentren por debajo de la primera frecuencia natural del sistema y por lo tanto también de todas las demás frecuencias naturales, (Abasolo Bilbao et al., 2019a) permitiendo así que el sistema no entre en resonancia.

En la presente investigación, a partir de los resultados obtenidos en el punto 4.2 sobre ensayos de los materiales de estudio y su combinación de materiales para cada diseño de empuñadura, se procede a iniciar el proceso de simulación por elementos finitos donde se observarán los efectos de deformación por frecuencia generados por la amortiguación que producen en el diseño de las empuñaduras y los materiales elastómeros aplicados.

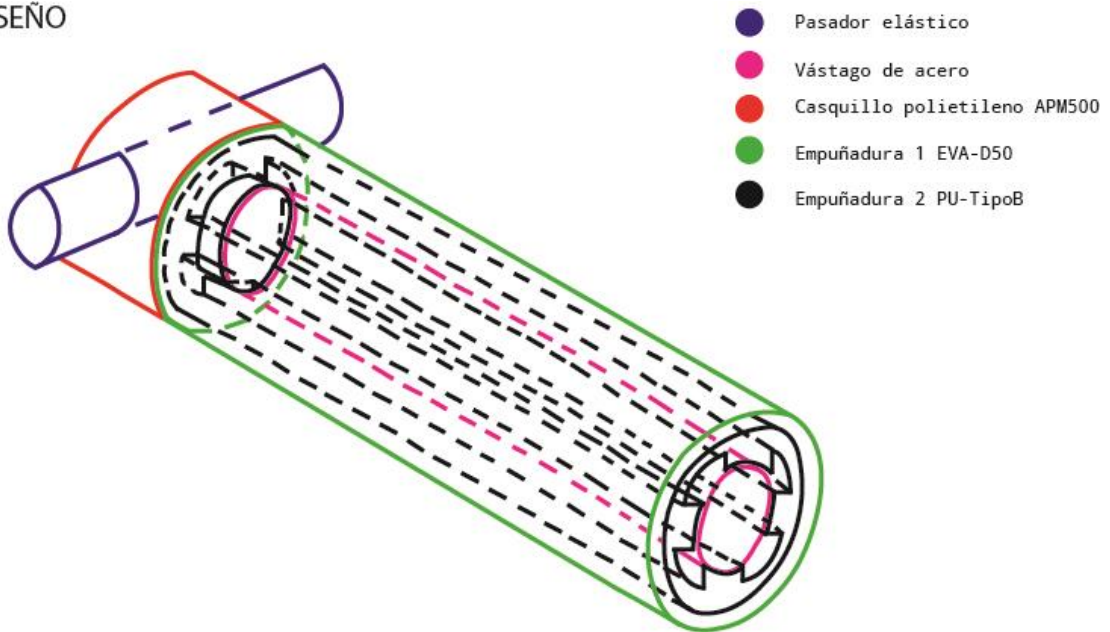
Posteriormente, se procederá a la comparación de las empuñaduras "R1" y "R2" con la de "Segeda original" y se seleccionará la empuñadura que contenga la combinación de materiales capaz de generar mayor amortiguación frente a la de "Segeda original". Para ello, se realizará un análisis modal, análisis de respuesta armónica y respuesta a la frecuencia de los materiales estudiados.

Para la simulación por elementos finitos con Ansys se diseñan las empuñaduras en *Workbench*. Simplificamos todos los elementos de las empuñaduras, observándose durante el desarrollo de los análisis que no intervienen en la simulación el pasador elástico y el casquillo,

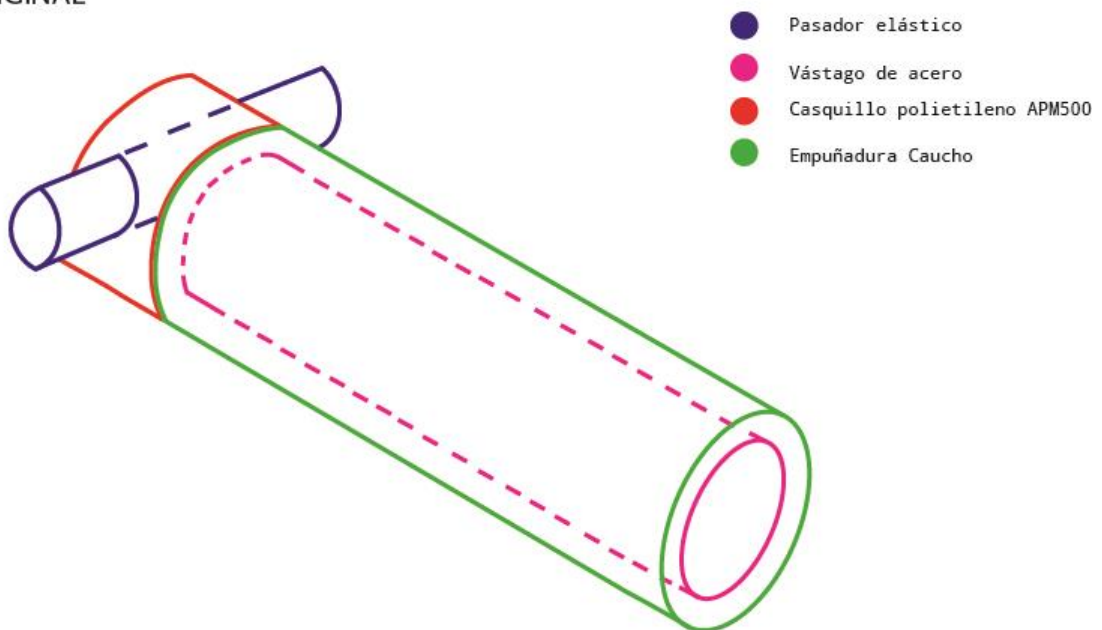
ya que ambos se encuentran unidos a la cabeza del martillo, siendo consideradas piezas fijas. De forma que, en la empuñadura “R1”, el análisis tuvo por objeto el elemento interno, el elemento externo y el vástago de acero. En la empuñadura “R2” se consideraron el elemento interno y el vástago de acero. Finalmente, se analizó la empuñadura “Segeda original” de caucho negro y el vástago de acero como se puede ver en las imágenes siguientes.

Figura 83: Simplificación del diseño

DISEÑO



ORIGINAL



Para el análisis modal de la empuñadura “R1” se ha empleado la combinación de materiales antes citadas siendo:

- Elemento interno PU-2 combinado con los siguientes elementos externos: EVA-D50; EVA-D30; PU-1; caucho negro; caucho natural.
- Elemento interno caucho negro combinado con los siguientes elementos externos: EVA-D50, EVA-D30, PU-1, PU-2, caucho natural.
- Elemento interno EVA-D50 combinado con los siguientes elementos externos: EVA-D30, PU-1, PU-2, Caucho Negro, Caucho Natural.

En la empuñadura “R2” también se aplica la misma combinación y para la “Segeda original”, el caucho negro.

El proceso que se ha llevado a cabo en Ansys se ha basado en Ramesha, Abhijith, Sigh, Raj y Naik (2015). En primer lugar, para el análisis, se han determinado las frecuencias naturales de las empuñaduras de cada combinación de materiales, cuyo objetivo es estudiar las formas de modo y someter a las empuñaduras a una carga armónica que varía en frecuencia de 0 a 33 *Hz*, siendo esta la frecuencia que genera la propia máquina. De este modo, se busca estudiar su respuesta en términos de desplazamiento y tensión.

Todo el proceso detallado realizado en Ansys se encuentra en el Anexo F.

5.3.2.6.1.2.1.1 Análisis modal

Aunque para conocer la frecuencia natural de los materiales no es necesario aplicar restricciones, para el análisis de respuesta armónica sí lo es. Todas las empuñaduras se encuentran en voladizo y por lo tanto se obtendrán distintas frecuencias naturales debido a la restricción a la que se les somete y a las características de los materiales (Ramesha et al., 2015).

A lo largo de los ensayos, los materiales cambiarán de acuerdo a las empuñaduras a analizar y a sus materiales.

Para conocer las frecuencias naturales de los materiales, de acuerdo con las empuñaduras, se introduce en Ansys el módulo de Young, la densidad, el coeficiente de Poisson y el límite elástico (Ramesha et al., 2015). Se indican a continuación las características de los materiales que se van a emplear para el análisis modal y para la respuesta armónica:

Figura 84: Características mecánicas del EVA-D50 a analizar, módulo de Young, densidad, coeficiente de Poisson y límite elástico

Properties of Outline Row 4: EVA-D50			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	600	kg m ⁻³
4	Isotropic Elasticity		
5	Derive from	Young's Modulu...	
6	Young's Modulus	4,976	MPa
7	Poisson's Ratio	0,415	
8	Bulk Modulus	9,7569E+06	Pa
9	Shear Modulus	1,7583E+06	Pa
10	Tensile Yield Strength	2,97	MPa
11	Compressive Yield Strength	2,97	MPa

Nota: Adaptado de Centro tecnológico del calzado y del plástico, CETEC, (2020, p.7-8) y de Synthelast (2020, p.1).

Figura 85: Características mecánicas del EVA-D30 a analizar, módulo de Young, densidad, coeficiente de Poisson y límite elástico

Properties of Outline Row 5: EVA-D30			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	450	kg m ⁻³
4	Isotropic Elasticity		
5	Derive from	Young's Modulu...	
6	Young's Modulus	1,138	MPa
7	Poisson's Ratio	0,391	
8	Bulk Modulus	1,7401E+06	Pa
9	Shear Modulus	4,0906E+05	Pa
10	Tensile Yield Strength	1,755	MPa
11	Compressive Yield Strength	1,755	MPa

Nota: Adaptado de Centro tecnológico del calzado y del plástico, CETEC, (2020, p.5-6) y de Synthelast (2020, p.1).

Figura 86: Características mecánicas del PU-2 a analizar, módulo de Young, densidad, coeficiente de Poisson y límite elástico

Properties of Outline Row 5: PU-TipoB			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	1000	kg m ⁻³
4	Isotropic Elasticity		
5	Derive from	Young's Modulu...	
6	Young's Modulus	10,712	MPa
7	Poisson's Ratio	0,498	
8	Bulk Modulus	8,9267E+08	Pa
9	Shear Modulus	3,5754E+06	Pa
10	Tensile Yield Strength	7,522	MPa
11	Compressive Yield Strength	7,522	MPa

Nota: Adaptado de Centro tecnológico del calzado y del plástico, CETEC, 2020, (2020, p.11-12), y de Synthelast (2020, p.1).

Figura 87: Características mecánicas del PU-1 a analizar, módulo de Young, densidad, coeficiente de Poisson y límite elástico

Properties of Outline Row 5: PU-TipoA			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	900	kg m ⁻³
4	Isotropic Elasticity		
5	Derive from	Young's Modulu...	
6	Young's Modulus	0,328	MPa
7	Poisson's Ratio	0,49	
8	Bulk Modulus	5,4667E+06	Pa
9	Shear Modulus	1,1007E+05	Pa
10	Tensile Yield Strength	4,888	MPa
11	Compressive Yield Strength	4,888	MPa

Nota: Adaptado de Centro tecnológico del calzado y del plástico, CETEC, (2020, p.9-10) y de Synthelast (2020, p.1).

Figura 88: Características del caucho negro a analizar, módulo de Young, densidad, coeficiente de Poisson y límite elástico

Properties of Outline Row 4: Caucho Negro			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	1170	kg m ⁻³
4	Isotropic Elasticity		
5	Derive from	Young's Modulu...	
6	Young's Modulus	0,134	MPa
7	Poisson's Ratio	0,44	
8	Bulk Modulus	3,7222E+05	Pa
9	Shear Modulus	46528	Pa
10	Tensile Yield Strength	8,2116	MPa
11	Compressive Yield Strength	8,2116	MPa

Nota: Adaptado de Centro tecnológico del calzado y del plástico, CETEC, (2020, p.3-4), y de Synthelast (2020, p.1).

Figura 89: Características del caucho natural a analizar, módulo de Young, densidad, coeficiente de Poisson y límite elástico

Properties of Outline Row 4: Caucho Natural			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	1120	kg m ⁻³
4	Isotropic Elasticity		
5	Derive from	Young's Modulu...	
6	Young's Modulus	0,038	MPa
7	Poisson's Ratio	0,45	
8	Bulk Modulus	1,2667E+05	Pa
9	Shear Modulus	13103	Pa
10	Tensile Yield Strength	7,67	MPa
11	Compressive Yield Strength	7,67	MPa

Nota: Adaptado de Centro tecnológico del calzado y del plástico, CETEC, (2020, p.1-2) y de Synthelast (2020, p.1).

Figura 90: Características del acero F-212 a analizar, módulo de Young, densidad, coeficiente de Poisson y límite elástico

Properties of Outline Row 3: Acero F-212			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	8030	kg m ⁻³
4	Isotropic Elasticity		
5	Derive from	Young's Modulu...	
6	Young's Modulus	210	GPa
7	Poisson's Ratio	0,3	
8	Bulk Modulus	1,75E+11	Pa
9	Shear Modulus	8,0769E+10	Pa
10	Tensile Yield Strength	1034	MPa
11	Compressive Yield Strength	1034	MPa

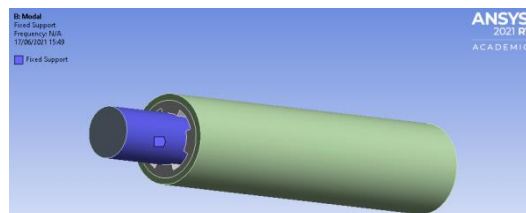
Nota: Adaptado de Steelss (2021) y de Aceros Llobregat s.a. (2015, p.1).

Una vez introducidas las propiedades, se seleccionan los elementos de la empuñadura a estudiar y sus materiales. Como resultado, Ansys mostrará las frecuencias naturales y la deformación.

Este proceso se ha aplicado a todas las combinaciones de materiales de la empuñadura "R1", "R2" y "Segeda original".

En la imagen siguiente se muestra la restricción fija que se ha aplicado a la empuñadura "R1" aplicándose del mismo modo al resto de empuñaduras y sus ensayos.

Figura 91: Empuñadura "R1" (PU-2/EVA-D50)



A continuación, se presenta el análisis modal de la empuñadura "R1" y la deformación producida.

Tabla 32: Análisis modal de la empuñadura "R1" materiales PU-2/EVA-D50

PU-2 / EVA-D50			
	Modo	Frecuencia (Hz)	Tipo de modo
1	1,	1138,6	Torsión
2	2,	1163,2	Torsión
3	3,	1214,3	Torsión
4	4,	1292,5	Torsión
5	5,	1360,1	Flexión + Torsión
6	6,	1384,8	Torsión

Figura 92: (R) Modo 5: Flexión + Torsión. (S) Modo 6: Torsión

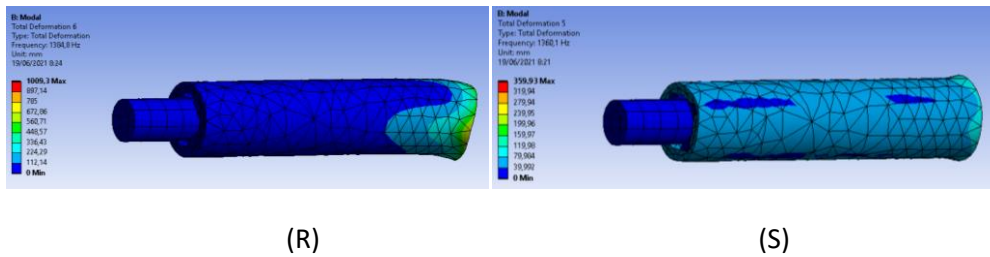


Tabla 33: Análisis modal de la empuñadura "R1" materiales PU-2/EVA-D30

PU-2 / EVA-D30			
	Modo	Frecuencia (Hz)	Tipo de modo
1	1,	1166,2	Torsión
2	2,	1182,8	Torsión
3	3,	1218,8	Torsión
4	4,	1269,2	Flexión + Torsión
5	5,	1274,1	Flexión
6	6,	1281,1	Flexión

Figura 93: (T) Modo 5: Flexión. (U) Modo 6: Flexión

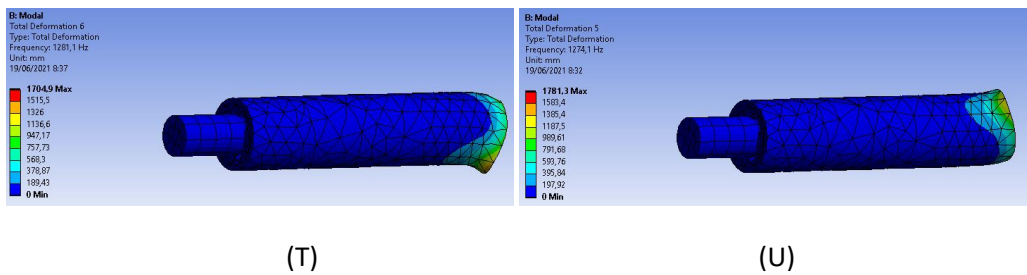


Tabla 34: Análisis modal de la empuñadura "R1" materiales PU-2/PU-1

PU-2 / PU-1			
	Modo	Frecuencia (Hz)	Tipo de modo
1	1,	684,98	Flexión
2	2,	726,81	Flexión
3	3,	730,01	Flexión
4	4,	768,02	Torsión
5	5,	781,02	Torsión
6	6,	798,91	Torsión

Figura 94: (V) Modo 5: Torsión. (W) Modo 6: Torsión

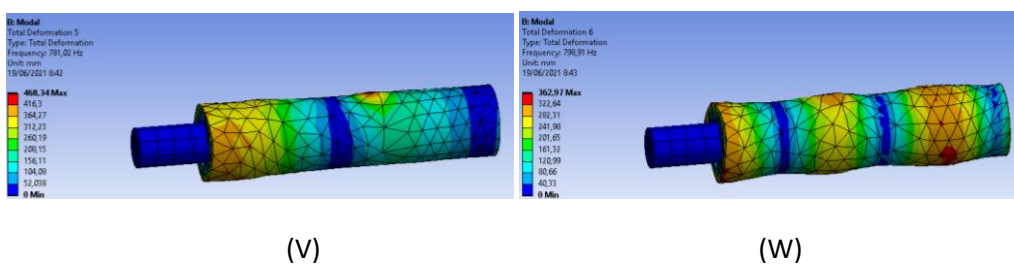


Tabla 35: Análisis modal de la empuñadura "R1" materiales PU-2/Caucho negro

PU-2 /Caucho negro			
	Modo	Frecuencia (Hz)	Tipo de modo
1	1,	425,32	Flexión
2	2,	439,35	Flexión
3	3,	440,4	Flexión

4	4,	475,93	Flexión
5	5,	479,31	Flexión
6	6,	483,76	Flexión

Figura 95: (X) Modo 5: Flexión. (Y) Modo 6: Flexión

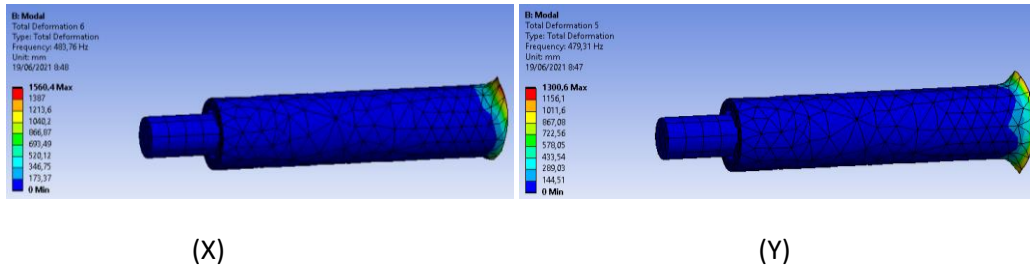


Tabla 36: Análisis modal de la empuñadura "R1" materiales PU-2/Caucho natural

PU-2 / Caucho natural			
	Modo	Frecuencia (Hz)	Tipo de modo
1	1,	241,58	Flexión
2	2,	248,59	Flexión
3	3,	249,44	Flexión
4	4,	268,25	Flexión
5	5,	273,54	Flexión
6	6,	273,68	Flexión

Figura 96: (Z) Modo 5: Flexión. (1) Modo 6: Flexión

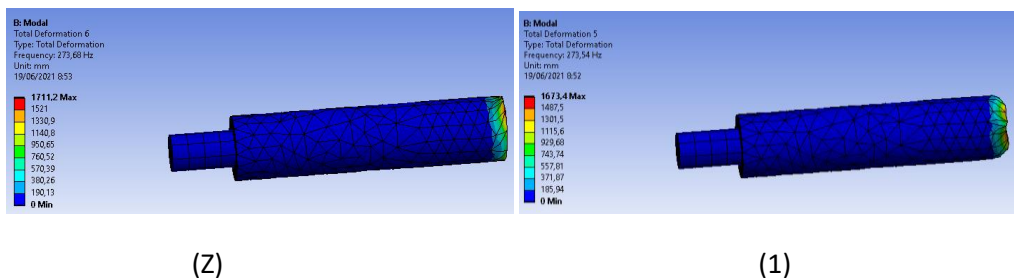


Tabla 37: Análisis modal de la empuñadura "R1" materiales EVA-D50/PU-2

EVA-D50 / PU-2			
	Modo	Frecuencia (Hz)	Tipo de modo
1	1,	728,25	Torsión
2	2,	755,6	Torsión
3	3,	829,99	Torsión
4	4,	942,76	Torsión
5	5,	954,71	Flexión
6	6,	957,92	Flexión

Figura 97: (2) Modo 5: Flexión. (3) Modo 6: Flexión

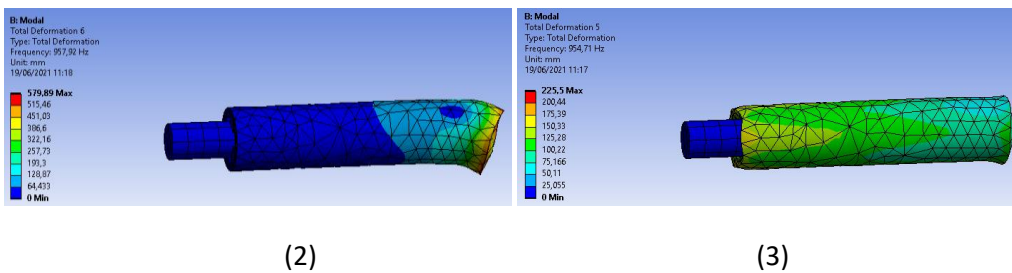


Tabla 38: Análisis modal de la empuñadura "R1" materiales EVA-D50/PU-1

EVA-D50 / PU-1			
	Modo	Frecuencia (Hz)	Tipo de modo
1	1,	581,55	Flexión
2	2,	596,51	Flexión
3	3,	599,89	Flexión
4	4,	625,81	Torsión
5	5,	636,34	Torsión
6	6,	642,38	Flexión

Figura 98: (4) Modo 5: Torsión. (5) Modo 6: Flexión

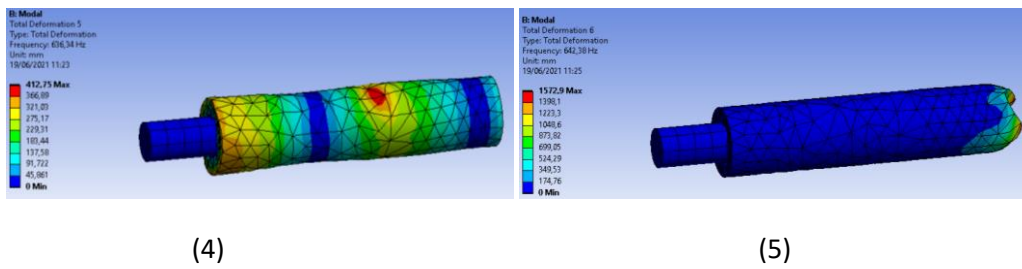


Tabla 39: Análisis modal de la empuñadura "R1" materiales EVA-D50/EVA-D30

EVA-D50 / EVA-D30			
	Modo	Frecuencia (Hz)	Tipo de modo
1	1,	893,41	Torsión
2	2,	905,73	Torsión
3	3,	936,82	Torsión
4	4,	971,13	Flexión
5	5,	974,39	Flexión
6	6,	987,15	Torsión

Figura 99: (6) Modo 5: Flexión. (7) Modo 6: Torsión

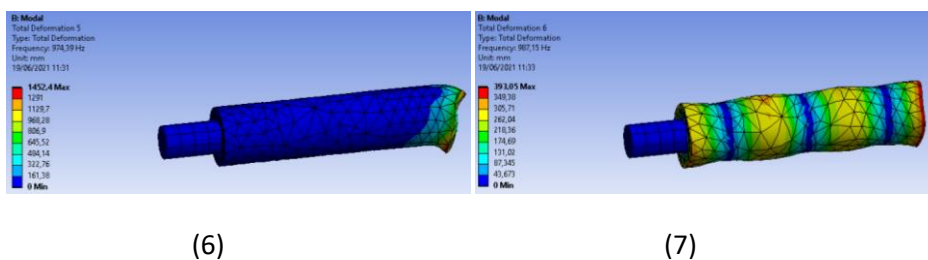


Tabla 40: Análisis modal de la empuñadura "R1" materiales EVA-D50/Caucho negro

EVA-D50 / Caucho negro			
	Modo	Frecuencia (Hz)	Tipo de modo
1	1,	394,73	Flexión
2	2,	403,63	Flexión
3	3,	404,91	Flexión

4	4,	431,44	Flexión
5	5,	435,38	Flexión
6	6,	442,51	Torsión

Figura 100: (8) Modo 5: Flexión. (9) Modo 6: Torsión

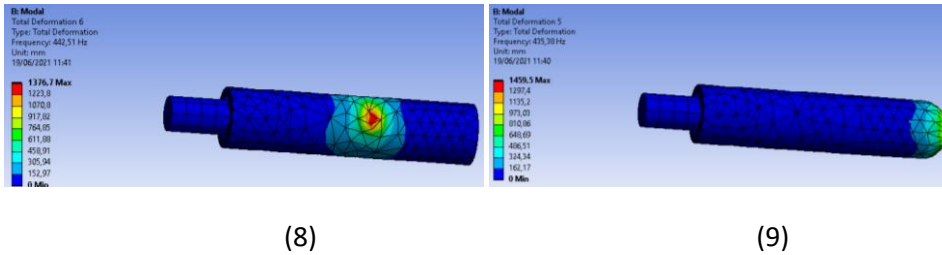


Tabla 41: Análisis modal de la empuñadura "R1" materiales EVA-D50/Caucho natural

EVA-D50 / Caucho natural			
	Modo	Frecuencia (Hz)	Tipo de modo
1	1,	236,54	Flexión
2	2,	243,75	Flexión
3	3,	244,32	Flexión
4	4,	263,65	Torsión
5	5,	267,33	Flexión
6	6,	268,41	Flexión

Figura 101: (10) Modo 5: Flexión. (11) Modo 6: Flexión

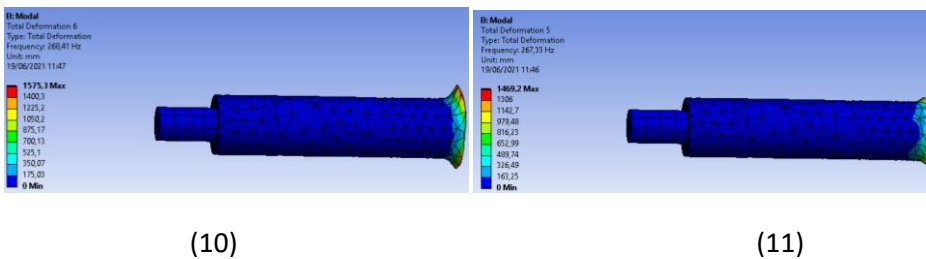


Tabla 42: Análisis modal de la empuñadura "R1" materiales Caucho negro/PU-2

Caucho negro / PU-2			
	Modo	Frecuencia (Hz)	Tipo de modo
1	1,	114,17	Torsión
2	2,	150,12	Flexión
3	3,	194,24	Torsión
4	4,	217,25	Flexión
5	5,	217,79	Flexión
6	6,	238,32	Flexión

Figura 102: (12) Modo 5: Flexión. (13) Modo 6: Flexión

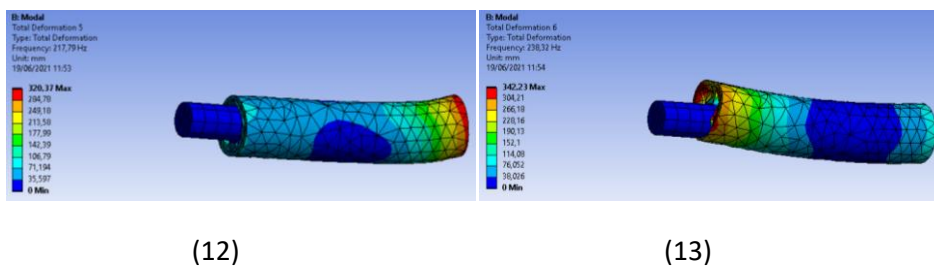


Tabla 43: Análisis modal de la empuñadura "R1" materiales Caucho negro/PU-1

Caucho negro / PU-1			
	Modo	Frecuencia (Hz)	Tipo de modo
1	1,	110,68	Torsión
2	2,	115,73	Torsión
3	3,	128,27	Torsión
4	4,	141,37	Torsión
5	5,	146,78	Torsión
6	6,	151,56	Flexión

Figura 103: (14) Modo 5: Torsión. (15) Modo 6: Flexión

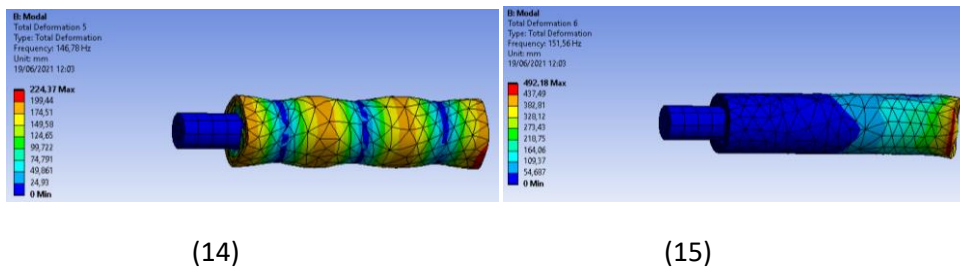


Tabla 44: Análisis modal de la empuñadura "R1" materiales Caucho negro/EVA-D50

Caucho negro / EVA-D50			
	Modo	Frecuencia (Hz)	Tipo de modo
1	1,	129,04	Torsión
2	2,	166,03	Torsión
3	3,	181,49	Torsión
4	4,	230,61	Flexión
5	5,	231,11	Flexión
6	6,	243,82	Flexión

Figura 104: (16) Modo 5: Flexión. (17) Modo 6: Flexión

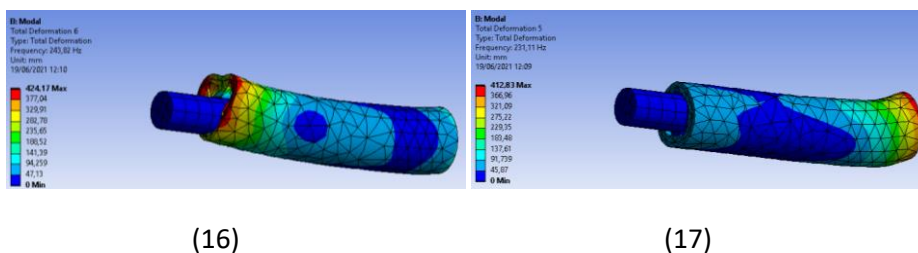


Tabla 45: Análisis modal de la empuñadura "R1" materiales Caucho negro/EVA-D30

Caucho negro / EVA-D30			
	Modo	Frecuencia (Hz)	Tipo de modo
1	1,	133,21	Torsión
2	2,	150,37	Torsión
3	3,	168,84	Flexión

4	4,	189,08	Torsión
5	5,	203,19	Flexión
6	6,	208,68	Flexión

Figura 105: (18) Modo 5: Flexión. (19) Modo 6: Flexión

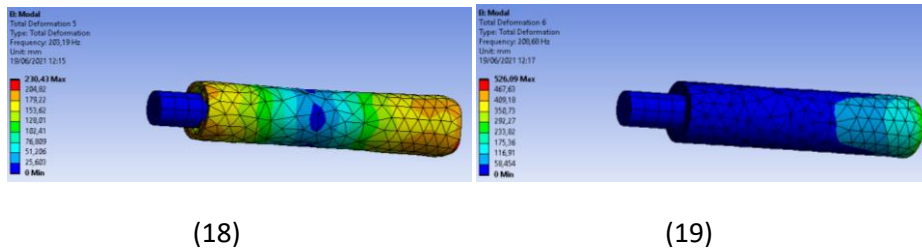
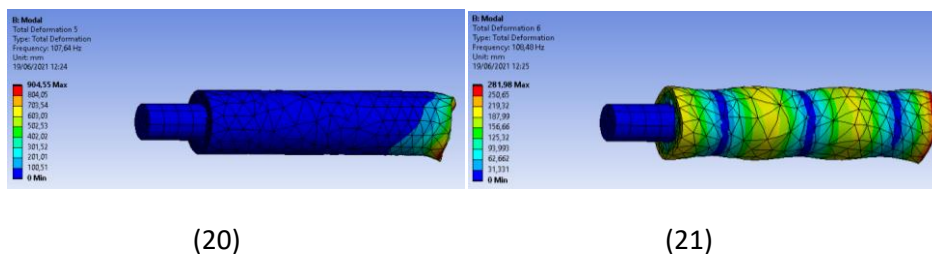


Tabla 46: Análisis modal de la empuñadura "R1" materiales Caucho negro/Caucho natural

Caucho negro / Caucho natural			
	Modo	Frecuencia (Hz)	Tipo de modo
1	1,	97,645	Torsión
2	2,	99,172	Torsión
3	3,	102,73	Torsión
4	4,	107,31	Flexión
5	5,	107,64	Flexión
6	6,	108,48	Torsión

Figura 106: (20) Modo 5: Flexión. (21) Modo 6: Torsión



De las frecuencias naturales obtenidas de los materiales analizados se puede afirmar que en ningún momento va a existir resonancia si se le aplica una frecuencia externa a la empuñadura de 0 a 33 Hz, ya que, las frecuencias naturales del producto son muy altas respecto a la frecuencia externa de 33 Hz. Para que exista resonancia tienen que coincidir las

frecuencias. Si coincidieran la frecuencia de trabajo y la frecuencia natural del material se producirá resonancia aumentando la vibración, generando mayor deformación.

Resultados del análisis modal de la empuñadura "R2":

Tabla 47: Análisis modal de la empuñadura "R2" material PU-2

PU-2			
	Modo	Frecuencia (Hz)	Tipo de modo
1	1,	1023,5	Torsión
2	2,	1082,8	Torsión
3	3,	1150,1	Torsión
4	4,	1229,3	Flexión
5	5,	1243,4	Torsión
6	6,	1288,5	Flexión

Figura 107: (22) Modo 5: Torsión. (23) Modo 6: Flexión

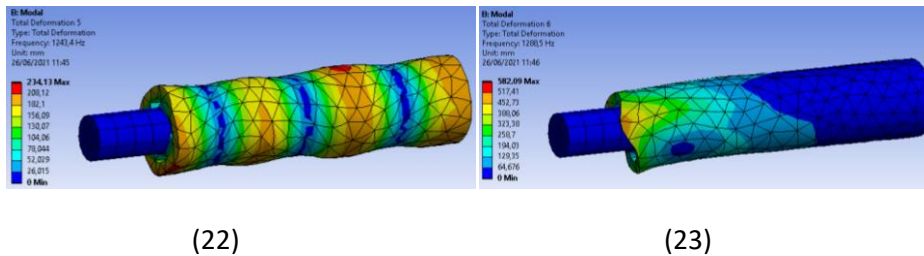
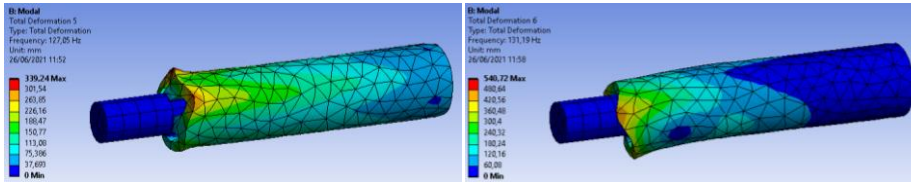


Tabla 48: Análisis modal de la empuñadura "R2" material Caucho negro

Caucho negro			
	Modo	Frecuencia (Hz)	Tipo de modo
1	1,	102,35	Torsión
2	2,	107,04	Torsión
3	3,	114,6	Torsión
4	4,	124,8	Torsión

5	5,	127,05	Flexión
6	6,	131,19	Flexión

Figura 108: (24) Modo 5: Flexión. (25) Modo 6: Flexión



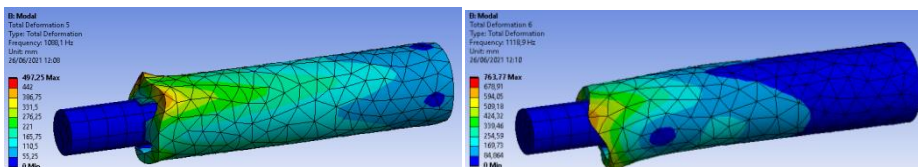
(24)

(25)

Tabla 49: Análisis modal de la empuñadura "R2" material EVA-D50

EVA-D50			
	Modo	Frecuencia (Hz)	Tipo de modo
1	1,	869,55	Torsión
2	2,	908,41	Torsión
3	3,	973,99	Torsión
4	4,	1062,8	Torsión
5	5,	1088,1	Flexión
6	6,	1118,9	Flexión

Figura 109: (26) Modo 5: Flexión. (27) Modo 6: Flexión



(26)

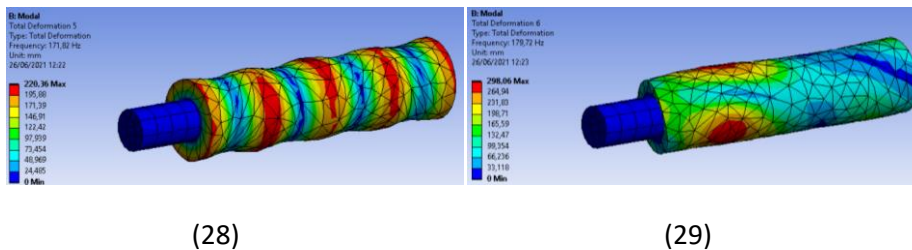
(27)

Por último, se presenta el análisis modal de la empuñadura “Segeda original”.

Tabla 50: Análisis modal de la empuñadura "Segeda original"

Caucho negro			
	Modo	Frecuencia (Hz)	Tipo de modo
1	1,	146,49	Torsión
2	2,	148,23	Torsión
3	3,	153,04	Torsión
4	4,	161,22	Torsión
5	5,	171,82	Torsión
6	6,	179,72	Flexión

Figura 110: (28) Modo 5: Torsión. (29) Modo 6: Flexión



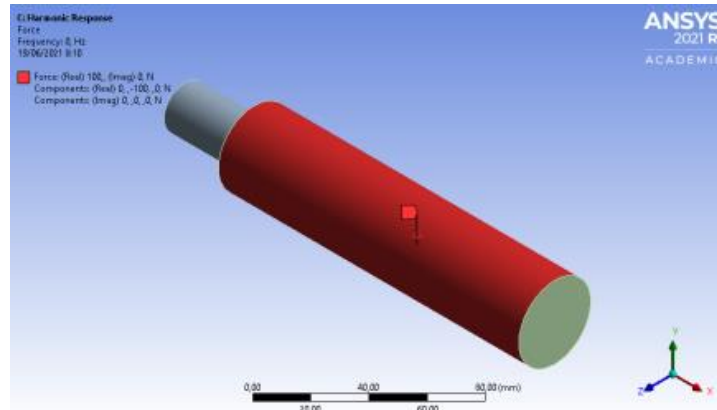
5.3.2.6.1.2.1.2 Análisis de respuesta armónica

El análisis de respuesta armónica es un estudio que sirve para conocer la respuesta que presenta un objeto a una frecuencia externa. Este análisis, que se ejecuta a los tres diseños, se basa en el empleo de coordenadas modales, ya que, para obtener la solución armónica, se utiliza el método de superposición modal que requiere necesariamente del análisis modal realizado previamente, de tal modo que las formas de modos factorizadas se suman para calcular la respuesta del sistema (Ros Martín, 2019). Así, de forma automática la simulación determina el número de modos necesarios (n) para dar una solución lo más precisa posible (Ramesha et al., 2015).

Para el análisis, se aplica una fuerza máxima de 100 N en dirección $-Y$ como fuerza ejercida por la acción de la mano (Aldien et al., 2005), (Aldien et al., 2006) y (Kalra et al., 2015).

En la imagen siguiente se presenta un ejemplo de la fuerza aplicada para el desarrollo del análisis.

Figura 111: Ejemplo del análisis de la empuñadura "R1" (PU-2/EVA-D50)



Estos parámetros se han aplicado por igual a todos los ensayos y en cada análisis se ha determinado la deformación en función de la dirección Y . El tiempo introducido en el sistema como intervalos es de 33 s ya que al no conocer el tiempo que tarda en alcanzar la frecuencia de trabajo de 33 Hz, se ha supuesto que tarda 33 s en alcanzarlo.

5.3.2.6.1.2.1.3 Respuesta a la frecuencia

Ansys representa la deformación a una frecuencia de 0 a 33Hz mediante una gráfica relacionando la amplitud y la frecuencia. Además, presenta los valores de amplitud inicial o deformación inicial, A_0 , y la amplitud final o deformación máxima, A_f , que se recogen en las tablas.

La respuesta a la frecuencia de la empuñadura "R1" es la siguiente:

Tabla 51: Respuesta a la frecuencia de la empuñadura "R1" materiales PU-2/EVA-D50

PU-2 / EVA-D50		
Hoja de cálculo	Resultados iniciales A_0	Resultados finales A_f
	4878,2 mm	4,9617 mm

Tabla 52: Respuesta a la frecuencia de la empuñadura "R1" materiales PU-2/EVA-D30

PU-2 / EVA-D30		
Hoja de cálculo	Resultados iniciales A_0	Resultados finales A_f
	4903,3 mm	5,033 mm

Tabla 53: Respuesta a la frecuencia de la empuñadura "R1" materiales PU-2/PU-1

PU-2 / PU-1		
Hoja de cálculo	Resultados iniciales A_0	Resultados finales A_f
	4731,5 mm	4,8241 mm

Tabla 54: Respuesta a la frecuencia de la empuñadura "R1" materiales PU-2/Caucho negro

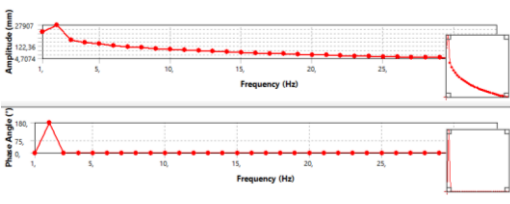
PU-2 / Caucho negro		
Hoja de cálculo	Resultados iniciales A_0	Resultados finales A_f
	4634,8 mm	4,7074 mm

Tabla 55: Respuesta a la frecuencia de la empuñadura "R1" materiales PU-2/Caucho natural

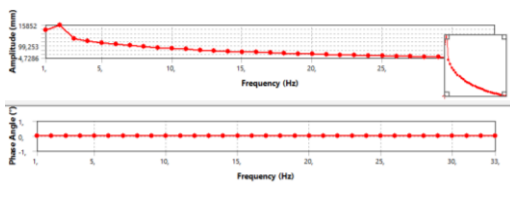
PU-2 / Caucho natural		
Hoja de cálculo	Resultados iniciales A_0	Resultados finales A_f
	4649,2 mm	4,7286 mm

Tabla 56: Respuesta a la frecuencia de la empuñadura "R1" materiales EVA-D50/Caucho negro

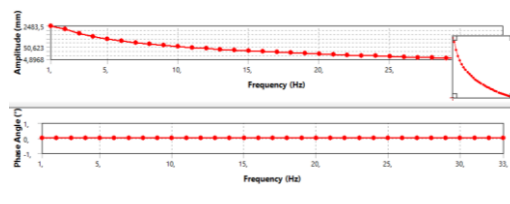
EVA-D50 / Caucho negro		
Hoja de cálculo	Resultados iniciales A_0	Resultados finales A_f
	2483,5 mm	4,8968 mm

Tabla 57: Respuesta a la frecuencia de la empuñadura "R1" materiales EVA-D50/Caucho natural

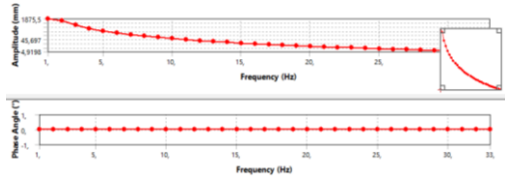
EVA-D50 / Caucho natural		
Hoja de cálculo	Resultados iniciales A_0	Resultados finales A_f
	1875,5 mm	4,9198 mm

Tabla 58: Respuesta a la frecuencia de la empuñadura "R1" materiales EVA-D50/EVA-D30

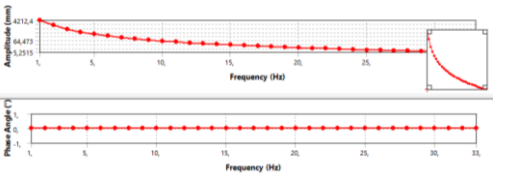
EVA-D50 / EVA-D30		
Hoja de cálculo	Resultados iniciales A_0	Resultados finales A_f
	4212,4 mm	5,2515 mm

Tabla 59: Respuesta a la frecuencia de la empuñadura "R1" materiales EVA-D50/PU-1

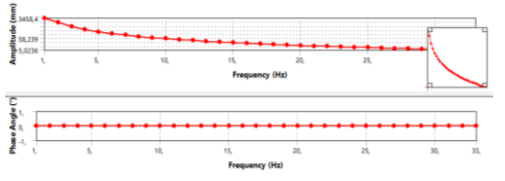
EVA-D50 / PU-1		
Hoja de cálculo	Resultados iniciales A_0	Resultados finales A_f
	3458,4 mm	5,0236 mm

Tabla 60: Respuesta a la frecuencia de la empuñadura "R1" materiales EVA-D50/PU-2

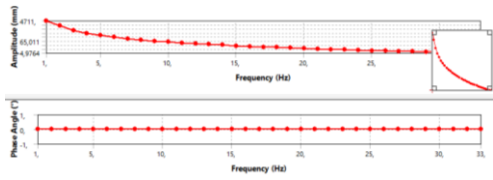
EVA-D50 / PU-2		
Hoja de cálculo	Resultados iniciales A_0	Resultados finales A_f
	4711 mm	4,9764 mm

Tabla 61: Respuesta a la frecuencia de la empuñadura "R1" materiales Caucho negro/EVA-D50

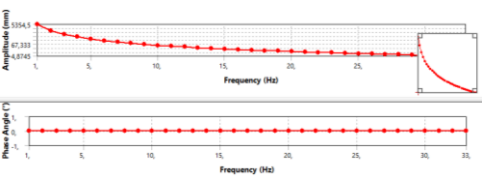
Caucho negro / EVA-D50		
Hoja de cálculo	Resultados iniciales A_0	Resultados finales A_f
	5354,5 mm	4,8745 mm

Tabla 62: Respuesta a la frecuencia de la empuñadura "R1" materiales Caucho negro/EVA-D30

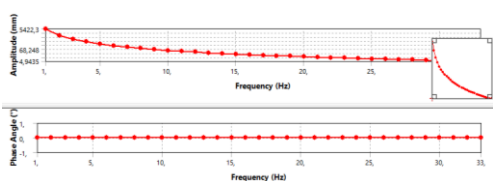
Caucho negro / EVA-D30		
Hoja de cálculo	Resultados iniciales A_0	Resultados finales A_f
	5422,3 mm	4,9435 mm

Tabla 63: Respuesta a la frecuencia de la empuñadura "R1" materiales Caucho negro/Caucho natural

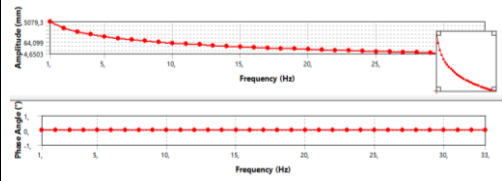
Caucho negro / Caucho natural		
Hoja de cálculo	Resultados iniciales A_0	Resultados finales A_f
	5079,3 mm	4,6503 mm

Tabla 64: Respuesta a la frecuencia de la empuñadura "R1" materiales Caucho negro/PU-1

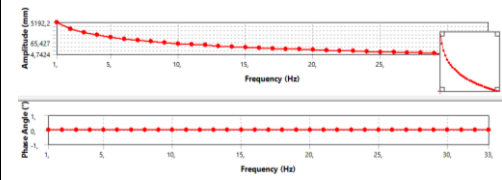
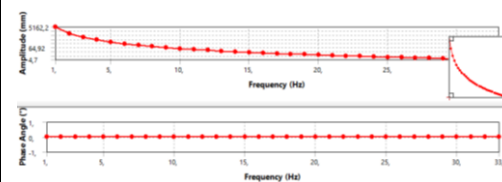
Caucho negro / PU-1		
Hoja de cálculo	Resultados iniciales A_0	Resultados finales A_f
	5192,2 mm	4,7424 mm

Tabla 65: Respuesta a la frecuencia de la empuñadura "R1" materiales Caucho negro/PU-2

Caucho negro / PU-2		
Hoja de cálculo	Resultados iniciales A_0	Resultados finales A_f
	5162,2 mm	4,7 mm

Los resultados de la respuesta a la frecuencia de la empuñadura "R2" son los que se presentan a continuación.

Tabla 66: Respuesta a la frecuencia de la empuñadura "R2" materiales PU-2

PU-2		
Hoja de cálculo	Resultados iniciales A_0	Resultados finales A_f
	4808,5 mm	4,7558 mm

Tabla 67: Respuesta a la frecuencia de la empuñadura "R2" materiales Caucho negro

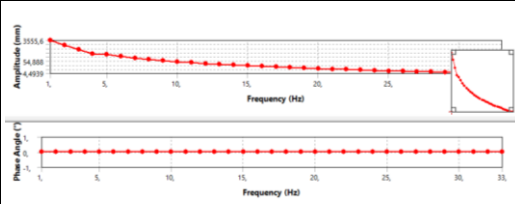
Caucho negro		
Hoja de cálculo	Resultados iniciales A_0	Resultados finales A_f
	5052,1 mm	4,6126 mm

Tabla 68: Respuesta a la frecuencia de la empuñadura "R2" materiales EVA-D50

EVA-D50		
Hoja de cálculo	Resultados iniciales A_0	Resultados finales A_f
	4991,3 mm	5,1231 mm

Por último, para la empuñadura “Segeda original”.

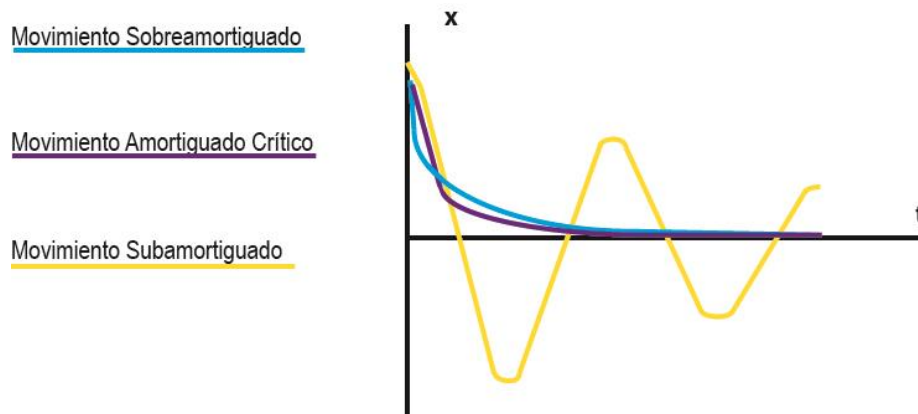
Tabla 69: Respuesta a la frecuencia de la empuñadura "Segeda original" material Caucho negro

Caucho negro		
Hoja de cálculo	Resultados iniciales A_0	Resultados finales A_f
	3555,6 mm	4,4939 mm

Del análisis se extrae que, para todas las empuñaduras, las gráficas de amplitud/frecuencias obtenidas con Ansys se corresponden con un sistema sobreamortiguado, donde no se producen oscilaciones.

En un movimiento armónico simple amortiguado hay tres tipos de amortiguamiento, movimiento sobreamortiguado, movimiento amortiguado crítico y movimiento subamortiguado. El movimiento sobreamortiguado es aquel en el cual el coeficiente de amortiguamiento, β , es mayor que la frecuencia angular sin amortiguamiento, W_0 , donde la masa no llega a oscilar, es decir, no sobrepasa la línea de equilibrio. En cambio, el movimiento amortiguado crítico se da cuando el coeficiente de amortiguamiento, β , es igual a la frecuencia angular sin amortiguamiento, W_0 , en este caso la masa llega de la forma más rápida a la posición de equilibrio sin llegar a oscilar. Por último, el movimiento subamortiguado se caracteriza cuando el coeficiente de amortiguamiento, β , es menor que la frecuencia angular sin amortiguamiento, W_0 (Candelas Valiente, 2019).

Figura 112: Tipos de movimientos amortiguados



Como se ha indicado al principio, se supone que el tiempo que tarda en alcanzar la frecuencia de trabajo es de 33 s. En este sentido, se detecta que al inicio del encendido la amplitud inicial o deformación inicial, A_0 , de todas las empuñaduras analizadas, es muy grande, rozando los 4 m. Estos valores tan elevados permiten determinar que en la realidad la máquina no tardaría 33 s en alcanzar los 33 Hz, sino que tardaría mucho menos. Por lo tanto, aunque el valor de la amplitud inicial, A_0 , fuera el mismo, a pesar de reducir el tiempo para alcanzar la frecuencia de trabajo, este valor sería insignificante, ya que el espacio de tiempo sería muy corto y no se apreciaría esa deformación tan grande en la mano ni en la máquina. En definitiva, la premisa del valor del tiempo de trabajo de 33 s a los 33 Hz de frecuencia de trabajo a los que opera el martillo, permite conocer verdaderamente la amplitud final o deformación máxima, A_f , de esta herramienta, observándose que la vibración se mitiga y por ende la deformación.

5.3.2.6.1.2.1.4 Cálculo del porcentaje de amortiguación

Para obtener el porcentaje de amortiguamiento en 33 Hz, frecuencia a la cual trabaja la máquina a los 33 s, se debe emplear la ecuación de movimiento de un movimiento amortiguado.

Ecuación 13: Ecuación de movimiento de un movimiento amortiguado

$$A_f(t) = A_0 \cdot e^{-\beta \cdot t} \cdot \cos (w' t + \varphi)$$

Sustituyendo el coeficiente de amortiguamiento, β , en la ecuación, quedaría de la siguiente manera:

$$\beta = \frac{b}{2 \cdot m}$$

$$A_f(t) = A_o \cdot e^{\frac{-b \cdot t}{2 \cdot m}} \cdot \cos (w' t + \varphi)$$

A fin de calcular dicho porcentaje sólo se requiere la amplitud de un movimiento amortiguado, no es necesario conocer la frecuencia angular amortiguada, w' , ni el ángulo de fase inicial, φ , aun siendo 0.

De esta manera la expresión que se utilizará es la siguiente:

Ecuación 14: Ecuación de amplitud de un movimiento amortiguado

$$A_f(t) = A_o \cdot e^{\frac{-b \cdot t}{2 \cdot m}}$$

$b =$ constante amortiguación

$m =$ masa del cuerpo que está en movimiento

Para el cálculo del porcentaje de amortiguación se parte de la gráfica obtenida en Ansys, de la cual se sacan los datos mostrados en la tabla anterior.

A continuación, se detallará el proceso del cálculo del porcentaje de amortiguación de la empuñadura “Segeda original”. El resto de las empuñaduras seguirá el mismo procedimiento y se presentarán sus resultados finales.

En la empuñadura “Segeda original” se obtienen $A_0 = 3555,6 \text{ mm}$, $A_f = 4,4939 \text{ mm}$, el peso o valor de la masa de la empuñadura, m , facilitada por Ansys, es de $0,55 \text{ kg}$ y el tiempo, t , introducido en el sistema como intervalos es de 33 s .

El valor de “ A_f ” es la deformación máxima que se producirá a los 33 Hz y donde se produce la máxima amortiguación. El tiempo en “ A_f ” es 33 s igual a los 33 Hz que es la frecuencia a la que trabaja la máquina. Esta igualdad nos permite obtener los mismos intervalos que se han establecido en Ansys para la generación de la gráfica.

De la expresión anterior obtenemos en primer lugar la “ b ” como constante de amortiguación de esta forma:

Ecuación 15: Cálculo de la constante de amortiguación

$$A_f(t) = A_0 e^{\frac{-b \cdot t}{2 \cdot (m)}}$$

Y aplicando los datos obtenidos de A_f , A_0 , m y t para la empuñadura “Segeda original” obtenemos inmediatamente el valor de b , que es:

$$b = 0,2224 \text{ kg/s}$$

Una vez conocida “ b ” tenemos que conocer en qué porcentaje disminuye la amplitud de la oscilación en el ciclo de 33 Hz . Para ello, tenemos que conocer el periodo de amortiguamiento (t') donde (f') es la frecuencia de oscilación amortiguada.

La frecuencia de oscilación amortiguada, (f'), tiene un valor de 33 Hz ya que es la frecuencia a la cual trabaja el martillo y también es la frecuencia a la cual se produce la amortiguación. Por tanto, la expresión del periodo amortiguado quedaría de la siguiente manera:

Ecuación 16: Cálculo del periodo amortiguado

$$(t') = \frac{1}{f'}$$

$$(t') = \frac{1}{33} = 0,030 \text{ s}$$

Después, se procede a calcular el porcentaje de amortiguación partiendo de la expresión de la amplitud de un movimiento amortiguado.

Ecuación 17: Cálculo del porcentaje de amortiguación

$$A_f(t') = A_0 e^{\frac{-b \cdot t'}{2 \cdot (m)}}$$

$$A_f(t') = A_0 e^{\frac{-0,2224 \cdot 0,03}{2 \cdot (0,55)}}$$

$$A_f(t') = 99,395 \cdot A_0$$

Por lo que la reducción de la amortiguación será:

$$100 - 99,395 = 0,605 \% \text{ en } 33 \text{ s}$$

En un periodo de oscilación amortiguada, $f' = 1 \text{ s}$ con $t' = 1 \text{ s}$. El porcentaje de amortiguación quedaría de la siguiente manera.

$$A_f(t') = A_0 e^{\frac{-0,2224 \cdot 1}{2 \cdot (0,55)}}$$

$$A_f(t') = 0,81694 \cdot A_0$$

Por lo que la reducción de la amortiguación será:

$$100 - 81,694 = 18,306 \% \text{ en } 1 \text{ s}$$

En la tabla siguiente se recogen los resultados obtenidos siguiendo el proceso descrito previamente para cada una de las empuñaduras y sus combinaciones de materiales.

Tabla 70: Resultado de los cálculos de las empuñaduras "R1", "R2" y "Segeda original"

Empuñadura "R1"		$b \text{ (kg/s)}$	$t = 33 \text{ s}$	$t = 1 \text{ s}$	$m \text{ (kg)}$
PU-2 / Caucho Negro	$A_f = 4,7074 \text{ mm}$ $A_0 = 4634,8 \text{ mm}$	0,2213	0,6244 %	18,8422 %	0,53
PU-2 / EVA-D30	$A_f = 5,033 \text{ mm}$ $A_0 = 4903,3 \text{ mm}$	0,2085	0,624 %	18,82 %	0,50
PU-2 / PU-1	$A_f = 4,8241 \text{ mm}$ $A_0 = 4731,5 \text{ mm}$	0,2170	0,6241 %	18,8324 %	0,52
PU-2 / Caucho natural	$A_f = 4,7286 \text{ mm}$	0,2213	0,6244 %	18,8422 %	0,53

	$A_0 = 4649,2 \text{ mm}$				
PU-2 / EVA-D50	$A_f = 4,9617 \text{ mm}$ $A_0 = 4878,2 \text{ mm}$	0,2088	0,624 %	18,845%	0,50
EVA-D50 / Caucho natural	$A_f = 4,9198 \text{ mm}$ $A_0 = 1875,5 \text{ mm}$	0,1837	0,5389 %	16,4812 %	0,51
EVA D50 / EVA D30	$A_f = 5,2415 \text{ mm}$ $A_0 = 4212,4 \text{ mm}$	0,1945	0,606 %	18,3399 %	0,48
EVA-D50 / PU-1	$A_f = 5,0236 \text{ mm}$ $A_0 = 3458,4 \text{ mm}$	0,1980	0,593%	17,964%	0,50
EVA-D50 / PU-2	$A_f = 4,9764 \text{ mm}$ $A_0 = 4711 \text{ mm}$	0,2076	0,621%	18,747 %	0,50
EVA-D50 / Caucho negro	$A_f = 4,8968 \text{ mm}$ $A_0 = 2483,5 \text{ mm}$	0,1925	0,5646 %	17,1987 %	0,51
Caucho negro / EVA D50	$A_f = 4,8745 \text{ mm}$ $A_0 = 5354,5 \text{ mm}$	0,2164	0,6345%	19,1163 %	0,51
Caucho negro / EVA-D30	$A_f = 4,9435 \text{ mm}$ $A_0 = 5422,3 \text{ mm}$	0,2163	0,6342%	19,1083%	0,51
Caucho negro / PU-1	$A_f = 4,7424 \text{ mm}$ $A_0 = 5192,2 \text{ mm}$	0,2205	0,6341%	19,1051 %	0,52
Caucho negro / PU-2	$A_f = 4,7 \text{ mm}$ $A_0 = 5162,2 \text{ mm}$	0,2248	0,6343 %	19,1097 %	0,53
Caucho negro / Caucho natural	$A_f = 4,6503 \text{ mm}$ $A_0 = 5079,3 \text{ mm}$	0,2247	0,634 %	19,1021 %	0,53
Empuñadura "R2"					
PU-2	$A_f = 4,7558 \text{ mm}$ $A_0 = 4808,5 \text{ mm}$	0,2180	0,6269 %	18,9104 %	0,52

Caucho negro	$A_f = 4,6126 \text{ mm}$ $A_0 = 5052,1 \text{ mm}$	0,2248	0,6343 %	19,1097 %	0,53
EVA-D50	$A_f = 5,1231 \text{ mm}$ $A_0 = 4991,3 \text{ mm}$	0,2043	0,6235 %	18,8175 %	0,49
Empuñadura "Segeda original"					
Caucho negro	$A_f = 4,4939 \text{ mm}$ $A_0 = 3555,6 \text{ mm}$	0,2224	0,605 %	18,306 %	0,55

A partir de los resultados anteriores, en la siguiente tabla vamos a recoger las empuñaduras seleccionadas que presentan mejores porcentajes de amortiguación, para posteriormente compararlos con los de la empuñadura de "Segeda original".

Tabla 71: Empuñadura con mejores porcentajes de amortiguación

Empuñaduras	$b \text{ (kg/s)}$	$t = 33s$	$t = 1s$	$m \text{ (kg)}$
"R2" Caucho Negro	0,2248	0,6343 %	19,1097 %	0,53
"R1" Caucho Negro / EVA D50	0,2164	0,6345 %	19,1163 %	0,51
"R1" Caucho Negro / PU-2	0,2248	0,6343 %	19,1097 %	0,53
"Segeda original"	0,2224	0,605 %	18,306 %	0,55

Al examinar y comparar los cálculos obtenidos por cada empuñadura se constata que, la empuñadura "R1" fabricada con Caucho negro / EVA-D50 genera la mayor amortiguación (0,6345 % a los 33 s) frente a la empuñadura "Segeda original" (0,605 % a los 33 s).

Como se aprecia en la tabla, los porcentajes de amortiguación son cercanos debido a los elastómeros empleados. No obstante, la diferencia sí que es significativa para evitar enfermedades profesionales en el sistema mano-brazo causadas por el uso de este tipo de máquinas.

Además, el grado de mejora relativa del porcentaje de amortiguamiento para 1 s respecto al original sería en el caso de la empuñadura "R1" fabricada con Caucho Negro / EVA-D50 del 4,43 %. Para la empuñadura "R1" con Caucho Negro / PU-2 y para la "R2" fabricada con Caucho Negro, se alcanza el mismo porcentaje del 4,39 %. Todos estos datos se recogen en la siguiente tabla.

Tabla 72: Grado de mejora relativa respecto a la empuñadura "Segeda original"

Empuñaduras	Grado de mejora relativa respecto a la empuñadura "Segeda original"
"R1" Caucho Negro / EVA-D50	4,43 %
"R1" Caucho Negro / PU-2	4,39 %
"R2" Caucho Negro	4,39 %

No obstante, la mejora relativa de estos porcentajes respecto a la empuñadura "Segeda original" necesitan ser comprobados en la realidad, puesto que existe controversia entre investigadores sobre cuál es el rango de frecuencia en el que se produce resonancia sobre el sistema mano-brazo.

Como se ha citado en el punto 2.1, los modelos mecánicos indican que los rangos de frecuencia en los que existe resonancia en la mano son de 30 a 50 *Hz* y en el antebrazo entre 16 a 30 *Hz*, según Álvarez Bayona, T. y Centro Nacional de Nuevas Tecnologías (INSST) (2014). Sin embargo, Bovenzi (2001) reconoce que se observa resonancia en los dedos, la mano y el brazo entre 80 y 300 *Hz*.

En cambio, con valores mayores, comprendidos entre 150 a 200 *Hz*, la mayoría de la energía de vibración se disipa en los tejidos de la mano y los dedos, destacando, como ya se ha dicho, que las altas frecuencias pueden afectar a las estructuras blandas de los dedos y manos, las bajas frecuencias y con gran amplitud pueden causar lesiones de muñeca, codo y hombro. Además, se ha de tener en cuenta que la posición del brazo para realizar el trabajo puede

incluso mitigar las vibraciones en el codo puesto que la transmisión de la vibración tiende a reducir a medida que aumenta el ángulo de flexión en la articulación del codo (Bovenzi, 2001).

5.3.2.6.2. Resumen

En el proceso metodológico del diseño de detalle para verificar los rediseños se emplea técnicas computacionales como los modelos numéricos. Para comprender la respuesta a las vibraciones del diseño, en primer lugar, es fundamental conocer la frecuencia natural del sistema, para posteriormente comprobar si las frecuencias externas se encuentran por debajo de las frecuencias naturales y el sistema no entre en resonancia. Para ello, empleamos el análisis modal que está presente en los programas de análisis de elementos finitos, como en Ansys.

El proceso llevado a cabo en Ansys se ha basado en el trabajo de Ramesha, Abhijith, Sigh, Raj y Naik (2015).

Las empuñaduras se han diseñado en *Workbench*. Para la empuñadura "R1" el análisis tuvo por objeto el elemento interno, el elemento externo y el vástago de acero. Para la empuñadura "R2", se consideraron el elemento interno y el vástago de acero. Por último, se analizó la empuñadura "Segeda original" de caucho negro y el vástago de acero.

Para el análisis modal de cada una de las empuñaduras se han empleado respectivamente el elemento interno PU-2, el caucho negro y el EVA D-50, combinados con los siguientes elementos externos: EVA-D50; EVA-D30; PU-1; caucho negro; caucho natural.

Las frecuencias naturales de las empuñaduras de cada combinación de materiales se han determinado para estudiar las formas de modo, con el objetivo de someter a las empuñaduras a una carga armónica, que es la misma que genera la propia máquina, y cuya frecuencia varía de 0 a 33 *Hz*. De esta forma, se busca estudiar su respuesta en términos de desplazamiento y tensión.

Para conocer las frecuencias naturales de los materiales, de acuerdo con las empuñaduras, se introduce en Ansys el módulo de Young, la densidad, el coeficiente de Poisson y el límite elástico. Como resultado, Ansys mostrará las frecuencias naturales y la deformación.

De las frecuencias naturales obtenidas de los materiales analizados se puede afirmar que, en ningún momento va a existir resonancia si se le aplica una frecuencia externa a la empuñadura de 0 a 33 Hz ya que, las frecuencias naturales del producto son muy altas respecto a la frecuencia externa de 33 Hz . Para que exista resonancia, han de coincidir las frecuencias. Si coincidieran la frecuencia de trabajo y la frecuencia natural del material se producirá resonancia aumentando la vibración, generando mayor deformación.

La respuesta armónica permite conocer la respuesta que presenta un objeto ante una frecuencia externa y, aunque para conocer la frecuencia natural de los materiales no es necesario aplicar restricciones, para el análisis de respuesta armónica sí lo es. Todas las empuñaduras se encuentran en voladizo y por lo tanto se obtendrán distintas frecuencias naturales debido a la restricción a la que se les somete y a las características de los materiales. Este estudio se ha ejecutado sobre los tres diseños aplicándose una fuerza máxima de 100 N en dirección $-Y$ como fuerza ejercida por la dirección de la mano y siendo el tiempo introducido en el sistema como intervalos de 33 s . Para este caso se ha supuesto que tarda en alcanzar la frecuencia de trabajo de 33 Hz , los 33 s indicados.

Del análisis se extrae que las gráficas de amplitud/frecuencia que representa Ansys, para todas las empuñaduras, son gráficas que corresponden con un sistema sobreamortiguado, donde no se producen oscilaciones.

Al suponer que el tiempo que tarda en alcanzar la frecuencia de trabajo es de 33 s , se detecta, para todas las empuñaduras analizadas, que al inicio del encendido la amplitud inicial o deformación inicial, A_0 , es muy grande, rozando los 4 m . Estos valores tan elevados permiten determinar que en realidad la máquina no tardaría 33 s en alcanzar los 33 Hz , si no que tardaría mucho menos. Por lo tanto, aunque el valor de la amplitud inicial, A_0 , fuera el mismo a pesar de reducir el tiempo para alcanzar la frecuencia de trabajo, este valor sería insignificante, ya que el espacio de tiempo sería muy corto y no se apreciaría esa deformación tan grande ni en la mano ni en la máquina.

En definitiva, la premisa del valor del tiempo de trabajo de 33 s a los 33 Hz de frecuencia de trabajo a los que opera el martillo, permite conocer verdaderamente la amplitud final o deformación máxima, A_f , de esta herramienta, observándose que la vibración se mitiga y por ende la deformación.

Posteriormente, empleando la ecuación de un movimiento amortiguado se obtiene el porcentaje de amortiguación a partir de la gráfica obtenida en Ansys para cada una de las empuñaduras.

Examinando y comparando los cálculos obtenidos por cada empuñadura se constata que, la empuñadura “R1” fabricada con Caucho negro / EVA-D50 genera la mayor amortiguación (0,6345 % a los 33 s) frente a la empuñadura “Segeda original” (0,605 % a los 33 s). Además, el grado de mejora relativa del porcentaje de amortiguamiento para 1 s respecto al original sería en el caso de la empuñadura “R1” fabricada con Caucho Negro / EVA-D50 del 4,43 %. Para la empuñadura “R1” con Caucho Negro / PU-2 y para la “R2” fabricada con Caucho Negro, se alcanza el mismo porcentaje del 4,39 %.

Estos valores de porcentaje de mejora relativa respecto a la empuñadura “Segeda original” necesitan ser comprobados en la realidad, puesto que existe controversia entre investigadores sobre cuál es el rango de frecuencia en el que se produce resonancia sobre el sistema mano-brazo.

5.3.2.7 Render con KeyShot

Una vez finalizada la simulación por elementos finitos y haber alcanzado los resultados, se procede a renderizar mediante el programa KeyShot las empuñaduras “R1” y “R2” con sus respectivas combinaciones de materiales.

En la primera parte de los renders se muestran los detalles de las empuñaduras “R1” y “R2” en los que se destacan el diseño y la forma de los elementos que las componen. En la segunda parte se presenta los renders de las empuñaduras “R1” y “R2” y la combinación de materiales más óptimos que se han determinado en el modelo numérico.

En la figura 113 muestra la unión entre el casquillo, el pasador elástico y el vástago de acero. Estos tres productos se encuentran tanto en la empuñadura “R1” como en la empuñadura “R2”.

Figura 113: Unión entre el vástago, el casquillo y el pasador elástico



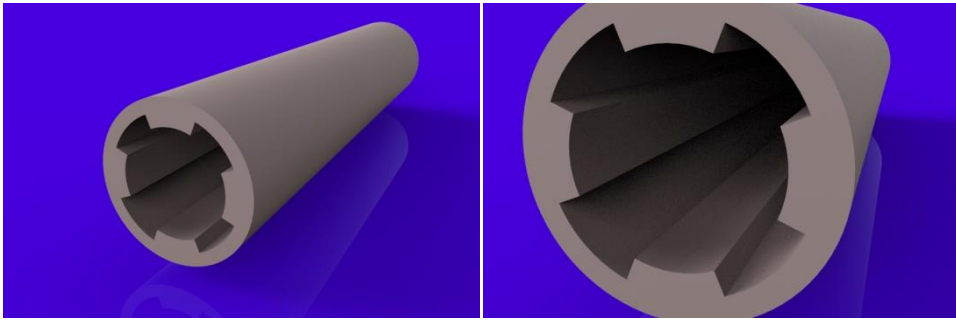
Las siguientes imágenes destacan la unión del elemento interno y el vástago de acero.

Figura 114: Detalle de la unión entre el vástago y el elemento interno

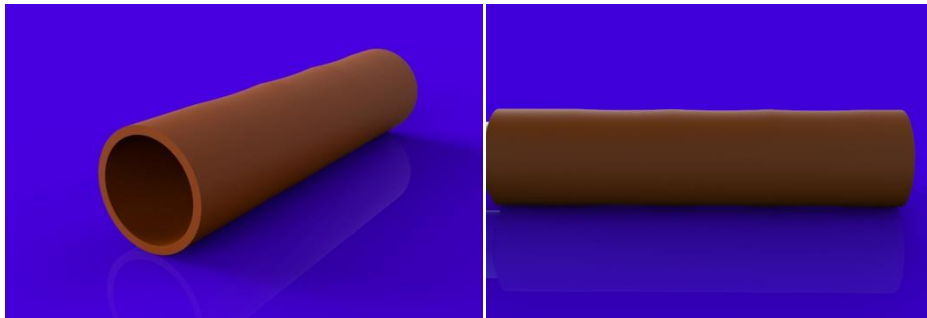


De estas dos figuras anteriores se ha de señalar el acople de los dientes del elemento interno con el vástago de acero. Estos dientes se prolongan a lo largo del producto para proporcionar mayor sujeción entre el vástago y el elemento interno, en el interior se ha diseñado un pivote a fin de crear un espacio entre el vástago y el producto interno. Este sistema se ha diseñado específicamente permitiendo que la empuñadura se encuentre parcialmente en suspensión del tal modo que no cree contacto en toda la superficie.

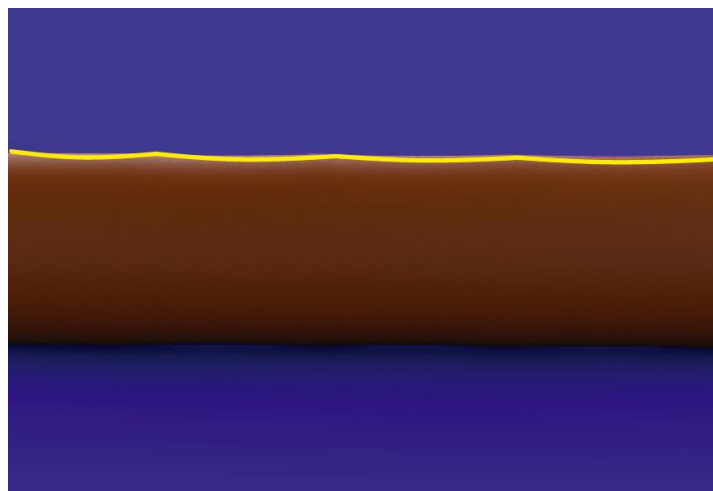
En la siguiente figura 115 se observan en detalle los dientes, antes citados, diseñados para el elemento interno.

Figura 115: Detalle dientes elemento interno

A continuación, se exponen las imágenes del elemento externo destacando la forma ergonómica del producto que permite un buen agarre.

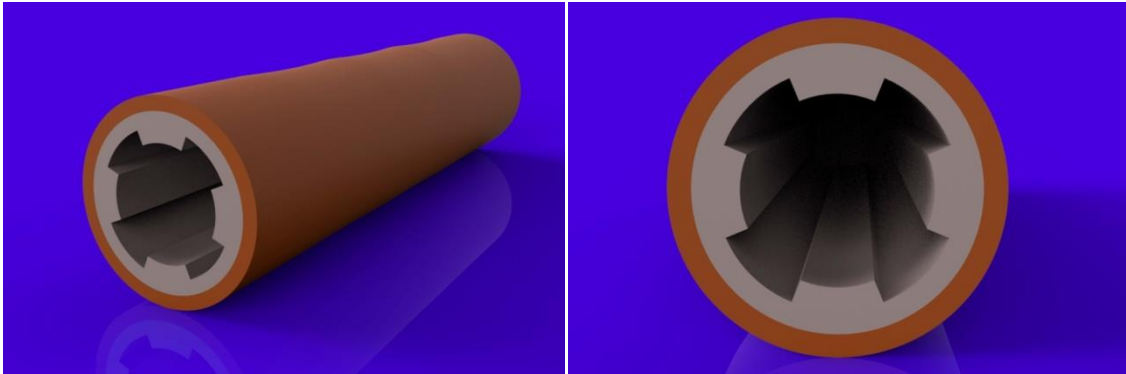
Figura 116: Detalle del elemento externo

La figura 117 muestra en color naranja el detalle del producto externo que ha sido diseñado con formas cóncavas para adaptar la mano.

Figura 117: Empuñadura en forma de la mano

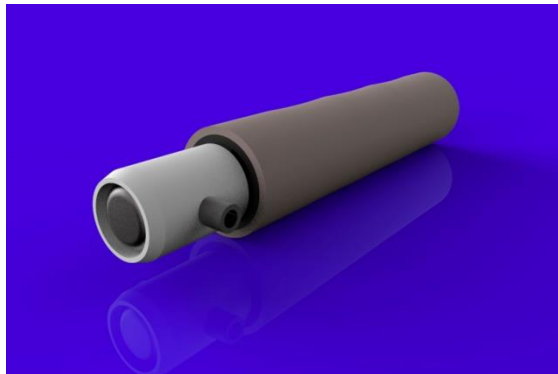
Por último, se muestra la unión del elemento externo e interno de la empuñadura “R1” con dos productos.

Figura 118: Unión del elemento interno con el externo



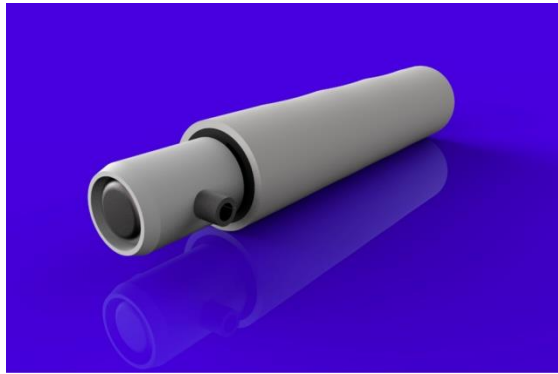
Finalmente, de acuerdo a los porcentajes de amortiguación y el grado de mejora relativa respecto a la empuñadura “Segeda original”, se muestran los renders de las empuñaduras definitivas. En la imagen siguiente se presenta la empuñadura “R1” con combinación de material Caucho Negro / EVA-D50.

Figura 119: Render “R1” Caucho negro/EVA-D50



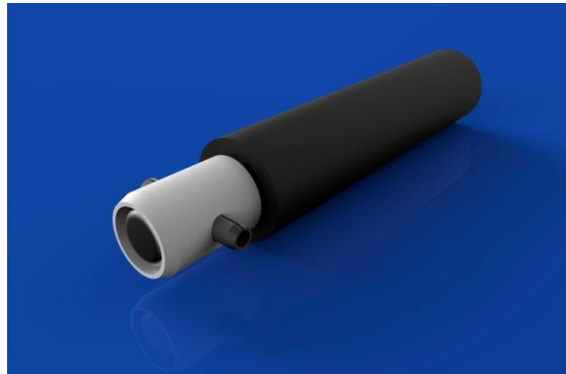
En el caso de la empuñadura “R1” con combinación de material Caucho Negro / PU-2.

Figura 120: Render "R1" Caucho negro/PU-2



Por último, la empuñadura "R2" con material de Caucho Negro.

Figura 121: Render "R2" Caucho negro



5.3.2.7.1 Resumen

En el último proceso del diseño de detalle se presenta los renders, es decir, imágenes digitales mediante el programa *Keyshot* de las empuñaduras "R1" y "R2" con las combinaciones de materiales, determinados en el análisis de elementos finitos, de acuerdo al grado de mejora relativa respecto a la empuñadura "Segeda original".

CONCLUSIONES CAPÍTULO 5

La recopilación de estudios de mercados de empuñaduras auxiliares de máquinas manuales vibratorias, tanto eléctricas como neumáticas y otras máquinas, así como el estudio de mercado de las empuñaduras de martillos neumáticos y eléctricos, junto con el estudio de mercado realizado de empuñaduras de bicis, forman parte del proceso metodológico de diseño que se desarrolla a lo largo de este capítulo.

Este proceso metodológico se produce en fases en las cuales también se han estudiado las propuestas de diseño conceptual y de detalle de las empuñaduras, aplicando las dimensiones y medidas antropométricas y combinando los materiales resultantes del capítulo 4. Una vez determinados los diseños definitivos, se procede al modelaje de esos diseños conceptuales en 3D como parte del proceso metodológico de diseño mediante el programa Catia V5.

A continuación, se procede al análisis de elementos finitos, como técnica en el análisis mecánico, mediante el software Ansys, el más empleado en ingeniería asistida por ordenador, en concreto el módulo ANSYS® Workbench. Gracias al diseño en 3D que permite crear se han podido ajustar los materiales y simular los esfuerzos. Este procedimiento tiene como objetivo conocer y comprobar si todo el proceso metodológico que se ha llevado a cabo en este capítulo es el adecuado tras aplicar las geometrías y diseños correspondientes a las nuevas empuñaduras.

Como resultados se ha obtenido que los diseños propuestos son adecuados, dado que se ha observado que el grado de mejora relativa del porcentaje de amortiguamiento para 1 s respecto al original sería la combinación de la empuñadura "R1" fabricada con Caucho Negro / EVA-D50 del 4,43 %. En la empuñadura "R1" con Caucho Negro / PU-2 y en la "R2" fabricada con Caucho Negro, se alcanza el mismo porcentaje del 4,39 %. Finalmente, se han mostrado los renders de las empuñaduras "R1" y "R2" con las combinaciones de materiales resultantes para visualizarlas como propuestas reales futuras.

CONCLUSIONES MARCO PRÁCTICO

El marco práctico, que engloba los capítulos 4 y 5, lo hemos centrado en el estudio de la empuñadura del martillo neumático rotopercutor modelo MS-76, especie cedida por la empresa Segeda. En una primera fase, los ensayos reales se han dirigido a determinar cuáles son los materiales más adecuados para amortiguar la vibración. Los materiales más adecuados han resultado ser el EVA D50 y el PU-2, procediéndose después al diseño de las propuestas de empuñadura, para lo que se ha tenido en cuenta todo lo analizado en el marco teórico y parte del práctico, siguiendo una metodología de diseño y modelado en 3D con Catia V5.

Después, se ha procedido al análisis de elementos finitos mediante el programa Ansys, con objeto de conocer y comprobar si todo el proceso metodológico que se ha llevado a cabo ha sido el adecuado. Los resultados obtenidos del grado de mejora con respecto a la empuñadura “Segeda Original” han sido los siguientes: para “R1” fabricado con caucho negro/EVA D50 el 4,43 %, para “R1” de caucho negro/ PU-2 el 4,39 % y para “R2” de caucho negro el 4,39 %.

Asimismo, se ha podido establecer una nueva metodología de trabajo que puede extrapolarse al estudio de más combinaciones de diseños y materiales para optimizar el amortiguamiento de las empuñaduras de otros modelos de martillos neumáticos rotopercutores, así como de otras máquinas vibratorias.

En conclusión, los pasos seguidos en esta investigación han pretendido alcanzar los objetivos generales y particulares que nos habíamos propuesto al inicio de esta memoria de tesis doctoral.

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

Una vez completado todo lo relativo al marco teórico, que engloban los capítulos 1, 2 y 3, así como parte del marco práctico, que reúnen los capítulos 4 y 5, el capítulo 6 se va a destinar a destacar las conclusiones más importantes. En este capítulo retomaremos los objetivos generales y específicos definidos al inicio de la tesis, y que se habían expuesto en el punto 1.4 Objetivos. Asimismo, analizaremos la validación de las hipótesis, destacaremos las aportaciones realizadas en la presente tesis y, por último, nos referiremos a los trabajos futuros que a partir de esta memoria de tesis se podrían realizar.

Este capítulo recoge las conclusiones generales obtenidas a partir del desarrollo de la presente Tesis doctoral.

6.1 Cumplimiento de Objetivos

A continuación, se detallan los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación doctoral, de acuerdo con los objetivos propuestos:

Objetivo general:

- **Comprobar que el rediseño de la empuñadura propuesto reduce las vibraciones mecánicas**

Hoy en día persiste el problema de salud provocado por el uso de máquinas vibratorias manuales, produciendo enfermedades profesionales al sistema mano-brazo. Entre las máquinas más perjudiciales y teniendo en cuenta los sectores en los que más se emplean, el martillo neumático se constata como una de las principales. La comparación de diferentes diseños de empuñaduras con el modelo MS76 de Segeda (Segeda Original), a través de ensayos reales y el uso de un modelo numérico, se ha logrado optimizar su empuñadura en términos de amortiguación, obteniendo unos grados de mejora relativa del porcentaje de amortiguamiento con respecto al diseño comercial.

Objetivos específicos:

- **Estudiar los efectos de la exposición de vibraciones en el sistema mano-brazo, así como la evaluación del riesgo asociado al uso del martillo neumático.**

En el capítulo 2 se ha realizado un recorrido histórico sobre los efectos en el sistema mano-brazo que sufren los trabajadores ante la exposición a las vibraciones mecánicas por el empleo de máquinas vibratorias como los martillos neumáticos. Los estudios realizados han demostrado la existencia de una relación directa entre la aparición de determinadas sintomatologías y patologías y el uso de herramientas manuales vibratorias.

La exposición a vibraciones mecánicas genera diferentes dolencias que han sido catalogadas como enfermedades profesionales causadas por agentes físicos. Actualmente es un problema persistente y que todavía no se ha podido resolver.

Las normas de prevención y evaluación a la exposición de las vibraciones mecánicas regulan cómo actuar para prevenir, controlar y detectar futuras enfermedades profesionales. En el desarrollo de un producto es esencial tomar en consideración sus efectos sobre la salud y la seguridad de los trabajadores, así como conocer los agentes que intervienen.

- **Estudiar la ergonomía y la respuesta biomecánica y biodinámica del sistema mano-brazo frente a la vibración.**

La recopilación de estudios, abordada en el capítulo 3, deja patente que el estudio de la biomecánica, la biodinámica y la ergonomía son necesarias e imprescindibles para el desarrollo de producto.

El análisis de la biomecánica y la biodinámica permiten conocer las respuestas del cuerpo humano ante las vibraciones, haciendo posible realizar las mediciones y evaluaciones necesarias para conocer la exposición a la vibración transmitida a la mano por el uso de martillos neumáticos. La biomecánica y la biodinámica ofrecen la oportunidad de desarrollar métodos inéditos de medición, ayudando al progreso de nuevas y mejores herramientas, así como a crear e investigar en nuevos dispositivos antivibratorios.

Por otro lado, la ergonomía es un factor esencial en el diseño y optimización de producto. Realizar un análisis ergonómico de las máquinas vibratorias y en concreto en las empuñaduras, ayudará a atenuar la transmisión de la vibración a los operarios y, por lo tanto, mejorará directamente la prevención frente a enfermedades profesionales. Los mangos son aquellos elementos que están en contacto directo con la mano y es ésta quien hace que se transmita la vibración al resto del cuerpo, por lo que un diseño ergonómico de este producto favorece la reducción de la emisión vibracional de la herramienta.

- **Estudiar los materiales que generan amortiguación y condicionan el diseño optimizado.**

A lo largo de la tesis, se ha comprobado que, para el desarrollo del nuevo producto, resulta imprescindible emplear materiales que amortigüen la vibración para minimizar su transmisión.

En el capítulo 3 se ha demostrado que los elastómeros termoestables son los más idóneos para reducir la transmisión de la vibración mecánica, puesto que presentan características recuperadoras y tienen alta capacidad de disipación de la energía. Por ello, aunque el caucho es el más usado, se han realizado ensayos reales de materiales distintos a los comúnmente empleados.

En el capítulo 4, se han llevado a cabo ensayos de diferentes materiales: dos tipos de etilvinilacetato, EVA, dos tipos de poliuretano, PU, un caucho natural y un caucho negro, todos ellos orientados a estudiar sus propiedades mecánicas y su resiliencia e histéresis elástica, obteniéndose que a menores valores de resiliencia la vibración transmitida es menor y, por lo tanto, la energía que retorna es menor. Por su parte, cuanto mayor histéresis elástica tenga un material, tanto más apropiado será para absorber las vibraciones mecánicas.

El resultado que se obtiene es que el EVA D50 presenta un valor de resiliencia de 40,4838 %, menor que el resto de los materiales y un valor de histéresis elástica de 59,5161 %, mayor que el resto de los materiales. El segundo material adecuado, el PU-2, tiene un valor de resiliencia de 49,9383 % y un valor de histéresis elástica de 50,06167 %.

Por su parte, los valores obtenidos para el caucho negro (que es un material similar al empleado en la empuñadura de Segeda) son: 63,4583 % de resiliencia y 36,5417 % de histéresis elástica.

- **Estudiar la amortiguación del diseño optimizado mediante un modelo numérico.**

Utilizando un modelo numérico, basado en el método de elementos finitos, MEF, hemos estudiado la amortiguación de las empuñaduras diseñadas sometidas a vibración, completando así el proceso de diseño de producto.

Aplicando el programa Ansys a cada una de las empuñaduras, con sus correspondientes combinaciones de materiales, hemos realizado un análisis modal, un análisis de respuesta armónica y de respuesta a la frecuencia, obteniendo las gráficas de un sistema sobreamortiguado.

Una vez calculados los porcentajes de amortiguamiento de las empuñaduras seleccionadas se obtiene el grado de mejora relativa de cada una de ellas con respecto a la empuñadura “Segeda Original”, lo que nos permite seleccionar aquella empuñadura que contenga la combinación de materiales que genere la mayor amortiguación.

6.1.1 Validación de la hipótesis

Hipótesis:

- **El rediseño de la empuñadura del martillo neumático rotopercutor reduce las vibraciones mecánicas**

En esta memoria se ha demostrado que los rediseños de las empuñaduras con los materiales seleccionados para el martillo neumático rotopercutor modelo MS-76 de la empresa Segeda son mejores que los de la empuñadura original, ya que amortiguan más la vibración mecánica. Esta afirmación se sustenta en los cálculos realizados al aplicar el modelo

numérico, los cuales ponen de manifiesto una mejora en la empuñadura de aproximadamente un 4,40 % respecto a la comercial.

6.2 Aportaciones

Las aportaciones derivadas de la investigación doctoral son las siguientes:

- **Propuesta de dos innovadoras empuñaduras “R1” y “R2” que, combinando el diseño y los materiales, amortiguan las vibraciones mecánicas**

Se presentan dos innovadoras empuñaduras “R1” y “R2” que optimizan la original mediante la mejora del diseño, la incorporación de nuevos materiales y la mejora de la ergonomía.

Los resultados de los ensayos realizados han constatado una mejora relativa del amortiguamiento de la empuñadura “R1” fabricada con caucho negro / EVA-D50 del 4,43 %, una mejora de la empuñadura “R1” con caucho negro / PU-2 del 4,39 % y una mejora de la empuñadura “R2” fabricada con caucho negro también del 4,39 %.

- **Establecer una metodología de trabajo que pueda extrapolarse al estudio de más combinaciones de diseños y materiales para optimizar el amortiguamiento de las empuñaduras de otros modelos de martillos neumáticos rotopercutores, así como de otras máquinas vibratorias.**

La creación de un modelo numérico en concreto en el capítulo 5 ha permitido sentar las bases de una metodología de trabajo que puede extrapolarse al estudio de más combinaciones de diseños y materiales para optimizar el amortiguamiento de las empuñaduras de otros modelos de martillos neumáticos, así como de otras máquinas vibratorias.

- **El peso y el diseño como factores importantes en la transmisión de la vibración**

En los ensayos realizados se comprueba que, el peso es un factor importante en la transmisión de la vibración, ya que las empuñaduras diseñadas, “R1” y “R2” tienen un peso comprendido entre 0,51 *kg* y 0,53 *kg*, algo más ligeras que la de “Segeda original” con un valor de 0,55 *kg*. En este sentido se puede fundamentar que el diseño es un factor decisivo, tanto para la amortiguación de la vibración como para el peso.

- **Se afianza la existencia del problema de salud provocado por las vibraciones mecánicas**

Se verifica en el capítulo 2 que actualmente persiste un problema de salud que afecta a los trabajadores por el uso de máquinas vibratorias, como los martillos neumáticos. Estas vibraciones pueden ocasionarles determinadas patologías vasculares y neuromusculares en el sistema mano-brazo, malestar general y deterioro de las habilidades propias de la actividad realizada por el trabajador.

6.3 Trabajos futuros

En base al trabajo realizado en esta tesis, existen varias líneas de actuación que pueden ser interesantes para el futuro.

Las líneas de trabajo futuras que se van a proponer van a ir dirigidas a impulsar el desarrollo de nuevos productos que minimicen la transmisión de la vibración y contribuyan a proteger la salud de los trabajadores, evitando, así, las enfermedades profesionales derivadas del empleo de máquinas vibratorias manuales.

En este sentido las líneas de investigación que se proponen son:

Ampliar el rango de materiales de estudio, incluso no solo el empleo de materiales termoestables, sino también estudios con termoplásticos vulcanizados, TPV, porque, a día de

hoy, existen pocos estudios sobre el diseño de estos materiales, especialmente en aplicaciones para amortiguar la vibración.

Estudiar la biodinámica del sistema mano-brazo sobre el martillo neumático rotopercurtor modelo MS-76, realizando nuevas mediciones de la vibración, para conocer la exposición de los trabajadores a la vibración en las diferentes zonas de la estructura mano-brazo.

Implementar el diseño optimizado, realizando la comprobación de la efectividad de dichos diseños mediante ensayos reales, que contemplen su fabricación, y su evaluación, midiendo su exposición a vibraciones mecánicas, contrastando los valores efectivos del porcentaje de amortiguación con los obtenidos en esta memoria de tesis.

Estudiar la efectividad de los guantes como equipos de protección individual, ya que no hay evidencias concluyentes sobre su efectividad.

BIBLIOGRAFÍA

- Abasolo Bilbao, M., Coria Martínez, I., & Heras Miguel, I. (2019a). Análisis modal. *Diseño Mecánico Mediante Elementos Finitos-OCW 2019*, 1–60.
- Abasolo Bilbao, M., Coria Martínez, I., & Heras Miguel, I. (2019b). Tema 1: Introducción. *Universidad Del País Vasco*, 2(1992), 1–12.
- Abasolo, M., Navalpotro, S., Iriondo, E., & Corral, J. (2017). Introducción al método de los elementos finitos. *Universidad Del País Vasco*, 339.
<https://elibro.net/es/lc/epoch/titulos/48773>
- Activa Mutua. (2008). *Prevención de Riesgos Laborales. FEB:3.08 Carga de trabajo-Carga Física. Ergonomía y psicología aplicada*.
- Adewusi, S. A., Rakheja, S., Marcotte, P., & Boileau, P. E. (2008). On the discrepancies in the reported human hand-arm impedance at higher frequencies. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 38(9–10), 703–714. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2007.12.004>
- AENOR. (1997). *UNE-CR 1030-1. Vibraciones mano-brazo Directrices para la reducción de los riesgos por vibraciones Parte 1: Métodos de ingeniería para el diseño de máquinas*. 00(91).
- AENOR. (2002). *UNE-EN ISO 5349-1. Vibraciones mecánicas. Medición y evaluación de la exposición humana a las vibraciones transmitidas por la mano. Parte 1: Requisitos generales*. 34.
- AENOR. (2008). *UNE-EN 614-2:2001+A1: Seguridad de las máquinas. Principios de diseño ergonómico. Parte 2: Interacciones entre el diseño de las máquinas y las tareas de trabajo*.
- AENOR. (2009a). *UNE-EN 1005-3:2002 + A1: Seguridad de las máquinas. Comportamiento físico del ser humano. Parte 3: Límites de fuerza recomendados para la utilización de máquinas*.
- AENOR. (2009b). *UNE-EN 1299:1997+A1 Vibraciones y choque smecánicos. Aislamiento de las vibraicones de las máquinas. Información para la aplicación del aislamient en la fuente*.
- AENOR. (2011). *UNE-ISO 4664-1: Caucho, vulcanizado o termoplástico. Determinación de las propiedades dinámicas. Parte 1: Directrices generales*.
- AENOR. (2012a). *UNE-EN ISO 12100 Seguridad de las máquinas. Principios generales para el diseño. Evaluación del riesgo y reducción del riesgo*. 88.
- AENOR. (2012b). *UNE-EN ISO 527-1. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 1: Principios generales*. 34.
- AENOR. (2013a). *UNE-CEN/TR 15350 IN. Vibraciones mecánicas. Directrices para la evaluación de la exposición a las vibraciones transmitidas por la mano usando la información disponible incluyendo la información proporcionada por los fabricantes de maquinaria*. 54.
- AENOR. (2013b). *UNE-ISO 37: Elastómeros. Caucho, vulcanizados o termoplásticos. Determinación de las propiedades de esfuerzo-deformación en tracción*.
- AENOR. (2013c). *UNE-ISO 4662: Caucho, vulcanizado o termoplástico. Determinación de la resiliencia por rebote*.
- AENOR. (2019a). *UNE-EN ISO 527-3. Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 3: Condiciones de ensayo para películas y hojas*.
- AENOR. (2019b). *UNE-ISO 2285: Caucho, vulcanizado o termoplástico Determinación de la deformación remanente por tensión bajo alargamiento constante, y de la deformación remantes por tensión, alargamiento y fluencia bajo carga de tracción constante*.
- Ágila Soto, A. (2019). *Procedimiento de Evaluación de Riesgos Ergonómicos y Psicosociales*. 94.
- Aixia. (2022). *Herramienta neumática AIXIA*. <https://www.aixia.es/>
- Aldien, Y., Marcotte, P., Rakheja, S., & Boileau, P. E. (2006). Influence of hand-arm posture on

- biodynamic response of the human hand-arm exposed to zh-axis vibration. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 36(1), 45–59.
<https://doi.org/10.1016/j.ergon.2005.07.001>
- Aldien, Y., Welcome, D., Rakheja, S., Dong, R., & Boileau, P. E. (2005). Contact pressure distribution at hand-handle interface: Role of hand forces and handle size. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35(3), 267–286.
<https://doi.org/10.1016/j.ergon.2004.09.005>
- Alfonso Los Santos, F. (2011). *El negro de humo en líneas de mezclas de caucho - Química*.
<https://www.interempresas.net/Quimica/Articulos/47327-El-negro-de-humo-en-lineas-de-mezclas-de-caucho.html>
- Almagirby, A., Rongong, J. A., & Carré, M. J. (2018). The development of a new artificial model of a finger for assessing transmitted vibrations. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 78, 20–27. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2017.11.005>
- Álvarez-Martínez, H., & Pérez-Campos, E. (2004). *Historia y filosofía de la medicina. Causalidad en medicina*. 140(4). <http://www.scielo.org.mx/pdf/gmm/v140n4/v140n4a18.pdf>
- Álvarez Bayona, T., Sánchez Villar, C., Merayo Sánchez, A., Centro Nacional de Nuevas Tecnologías, C., & Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, I. (2016). Herramientas manuales: Criterios ergonómicos y de seguridad para su selección. *Instituto Nacional de Seguridad e Higiene En El Trabajo. Ministerio de Empleo y Seguridad Social*, 79.
- Álvarez Bayona, T., Tecnologías, C. N. de N., & Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, I. (2014). *Aspectos ergonómicos de las vibraciones*. c, 26.
<https://doi.org/10.15713/ins.mmj.3>
- Armstrong, J. R., & Menon, R. (2001). Minas y canteras. *Enciclopedia de Seguridad y Salud En El Trabajo*, 3, 35–40.
<http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo3/74.pdf>
- Aníbal Rodríguez, C. (2009). *Los convenios de la OIT sobre seguridad y salud en el trabajo: una oportunidad para mejorar las condiciones y el medio ambiente de trabajo*.
- Arjona Ballesteros, D. (2014). Diseño del puesto de conducción de un automóvil basado en la ergonomía. *PFC Ingeniería Industrial Universidad Carlos III de Madrid*, 499.
- Asociación Española de Pediatría, A. (1965). Criterios de causalidad. Criterios de Bradford Hill (1965). *Asociación de Formación de La AEP. Asociación Española de Pediatría.*, 8–9.
- Atlas Copco. (2007). El arte de la ergonomía. *Atlas Copco*, 36.
<https://books.google.es/books?hl=ca&lr=&id=qbfjn5VtQqgC&oi=fnd&pg=PA15&dq=asia+oriental&ots=s3U-qwnz0j&sig=kdZDQ36ITgXgynkzqEzjllHANtC>
- Atlas Copco. (2015). *Perforadoras de roca neumáticas*. 1–19.
<http://lazarushn.com/descargas/equipos/Perforadoras-Neumaticas-Atlas-Copco.pdf>
- Atlas Copco. (2017). *Rompedores neumáticos TEX Cuando la calidad cuenta La gama TEX*. 16.
- Ayo Calvo, F. (2013). Evaluación por estimación del riesgo por vibraciones mecánicas. base de datos del insht. *Centro Nacional de Verificación de Maquinaria. INSHT*, 8, 1–13.
- Ayo, F. (2009). Evaluación de las vibraciones mecánicas. *Centro Nacional de Verificación de Maquinaria*.
- Balar Gimeno, R. (2011). *Modelo de Kelvin-Voigt de Comportamiento Viscoelástico | 40/93 | UPV - YouTube*. <https://www.youtube.com/watch?v=FQwdnGV9r-M>
- Bast-Pettersen, R., Ulvestad, B., Færden, K., Clemm, T. A. C., Olsen, R., Ellingsen, D. G., & Nordby, K. C. (2016). Tremor and hand-arm vibration syndrome (HAVS) in road maintenance workers. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 90(1), 93–106. <https://doi.org/10.1007/s00420-016-1175-x>
- Benito Muñoz, J. J., Álvarez Cabal, Ureña Prieto, F., Saleté Casino, E., & Aranda Ortega, E. (2014). *Introducción al Método de Los Elementos Finitos PDF | PDF | Conceptos matemáticos | Objetos matemáticos*.

- <https://es.scribd.com/document/407203359/Introduccion-al-metodo-de-los-elementos-finitos-pdf>
- Boletín Oficial del Estado, B. (2008). *Real Decreto 1644/2008, de 10 de octubre, por el que se establecen las normas para la comercialización y puesta en servicio de las máquinas*. 40995–41030.
- Bosch-vibration. (2019). Vibraciones en manos y brazos. *Bosch*, 1–31.
- Bosch. (2022a). *Martillo demoledor GSH 11 E 1500 W 25 J Bosch- Plataforma de la construcción*. <https://www.bigmatlaplataforma.es/es/b2c/p/tienda-de-la-construccion/martillo-demoledor-gsh-11-e-1500-w-25-j-bosch-84547>
- Bosch. (2022b). *Martillo demoledor GSH 16-30 1750 W 45 J Bosch-Plataforma de la construcción*. <https://www.bigmatlaplataforma.es/es/b2c/p/tienda-de-la-construccion/martillo-demoledor-gsh-16-30-1750-w-45-j-bosch-84548>
- Bovenzi, M., Pinto, I., Picciolo, F., Mauro, M., & Ronchese, F. (2011). Frequency weightings of hand-transmitted vibration for predicting vibration-induced white finger. *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health*, 37(3), 244–252. <https://doi.org/10.5271/sjweh.3129>
- Brammer, A. J., Taylor, W., & Lundborg, G. (1987). Sensorineural stages of the hand-arm vibration syndrome. *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health*, 13(4), 279–283. <https://doi.org/10.5271/sjweh.2050>
- Burgoa Beitia, A. (2020). Design and development of high- performance thermoplastic vulcanizates with vibration damping properties. In *Memoria para optar al Grado de Doctor por la Universidad del País Vasco (UPV/EHU)*.
- Burström, L., Lundström, R., Hagberg, M., & Nilsson, T. (1998). Comparison of different measures for hand-arm vibration exposure. *Safety Science*, 28(1), 3–14. [https://doi.org/10.1016/S0925-7535\(97\)00059-3](https://doi.org/10.1016/S0925-7535(97)00059-3)
- Candelas Valiente, P. (2019). *M.A.S. amortiguado*. <https://www.youtube.com/watch?v=dzBcG9Jq-48>
- Carmona Benjumea, A. (2001). Datos antropométricos de la población laboral española. *CNMP Sevilla. INSHT*, 1997(3), 22.
- Caruel, É., & Donati, M. (2013). Comment mesurer les vibrations émises par les machines percutantes ? *Notes Techiques. InrS, Département Ingénierie Des Équipements de Travail*, 46–52.
- Cavas Martínez, F., Fernández Collados, M. B., Ferrando García, F., García Romero, B., González Díaz, F., López Anierte, M. D. C., Rodríguez Iniesta, G., Sánchez Trigueros, C., & Selma Penalva, A. (2007). *Las enfermedades profesionales desde la perspectiva de la seguridad social*. 508. <http://www.seg-social.es/prdi00/groups/public/documents/binario/115799.pdf>
- Centro Nacional de Verificación de la Maquinaria, C., & Órganos Técnicos de Comunidades Autónomas, O. (2011). Estudio del nivel de exposición a vibraciones mecánicas en los puestos de trabajo. *Instituto Nacional de Seguridad e Higiene En El Trabajo*.
- Chigaco Pheumatic. (2012). *Pneumatic Breakers*. 12.
- Chigaco Pheumatic. (2014). *Handheld Pneumatic Hammers*. 20.
- Chung, D. D. L. (2001). Review: Materials for vibration damping. *Journal of Materials Science*, 36(24), 5733–5737. <https://doi.org/10.1023/A:1012999616049>
- Clarke, J. B., Dalby, W., & Gunn, J. F. (1986). Chipping hammer vibration. *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health*, 12(4), 351–354. <https://doi.org/10.5271/sjweh.2130>
- Coggins, M. A., Van Lente, E., McCallig, M., Paddan, G., & Moore, K. (2010). Evaluation of hand-arm and whole-body vibrations in construction and property management. *Annals of Occupational Hygiene*, 54(8), 904–914. <https://doi.org/10.1093/annhyg/meq064>
- Cooke, R. A. (2003). Hypothenar hammer syndrome: A discrete syndrome to be distinguished from hand-arm vibration syndrome. *Occupational Medicine*, 53(5), 320–324. <https://doi.org/10.1093/occmed/kqg071>

- Darina Peycheva, Wetzels, R., Parent-Thirion, A., & Houten, G. van. (2014). Occupational profiles in working conditions: Identification of groups with multiple disadvantages. *Eurofound*.
http://www.eurofound.europa.eu/sites/default/files/ef_files/pubdocs/2014/13/en/1/EF1413EN.pdf
- Dasgupta, A. K., & Harrison, J. (1996). Effects of vibration on the hand-arm system of miners in India. *Occupational Medicine*, 46(1), 71–78. <https://doi.org/10.1093/occmed/46.1.71>
- Derler, S., Schrade, U., & Gerhardt, L. C. (2006). Tribology of human skin and mechanical skin equivalents in contact with textiles. *EMPA Activities*, 263(2006), 45.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.11.031>
- Devine, R. (2015). Hand-arm Vibration Exposure in Warm Climates: Promoting Awareness of Health Effects and Controls to Employees, Management and Contractors. *Acoustics Australia*, 44(1), 107–112. <https://doi.org/10.1007/s40857-015-0033-4>
- Dewalt. (2022). *Martillo demoledor SDS-MAX 1500 W D25899K Dewalt*. Plataforma de La Construcción. <https://www.bigmatlaplataforma.es/es/b2c/p/tienda-de-la-construccion/martillo-demoledor-sds-max-1500-w-d25899k-dewalt-78878>
- Diario Oficial de la Unión Europea, D. (2006). *Directiva 2006/42/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 17 de mayo de 2006 relativa a las máquinas y por la que se modifica la Directiva 95/16/CE (refundición)*. 2006, 24–86.
- Diego, S., Casado, J. A., Carrascal, I., Ferreño, D., Cardona, J., & Arcos, R. (2016). Numerical and experimental characterization of the mechanical behavior of a new recycled elastomer for vibration isolation in railway applications. *Construction and Building Materials*, 134, 18–31. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.115>
- Dong, R. G., Mcdowell, T. W., & Welcome, D. E. (2004). Biodynamic Response at the Palm of the Human Hand Subjected to a Random Vibration. *Industrial Health*, 43(1), 241–255. <https://doi.org/10.2486/indhealth.43.241>
- Dong, R. G., Wu, J. Z., & Welcome, D. E. (2005). Recent Advances in Biodynamics of Human Hand-Arm System. *Industrial Health*, 43(3), 449–471. <https://doi.org/10.2486/indhealth.43.449>
- Einhell. (2014). *BT-DH 1600 Demolition Hammer Article number : 4139067 Identify number : 01019 Spare parts*. 5.
- Einhell. (2015). *Manual de Instrucciones TE-DH 1027*. 1–56.
- European Commission. (2009). Information notices on occupational diseases: a guide to diagnosis. In *Luxembourg: European Communities*. <https://doi.org/10.2767/38249>
- Flexicon. (2020). *Negro de Humo - Materiales Manejados - Flexicon Corporation*. <https://www.flexicon.es/Materiales-Manejados/Negro-de-Humo.html>
- Fundación laboral de la construcción, Confederación nacional de la construcción, CCOO fecoma, UGT MCA, & Fundación para la prevención de riesgos laborales. (2007). Ergonomía en el sector de la construcción. Martillo neumático. *Revista de Biomecánica*, 47, 47–53.
- Futatsuka, M., Shono, M., Sakakibara, H., & Quan, P. Q. (2005). Hand arm vibration syndrome among quarry workers in Vietnam. *Journal of Occupational Health*, 47(2), 165–170. <https://doi.org/10.1539/joh.47.165>
- García García, F. (2006). Las vibraciones mecánicas en el ambiente laboral. *Comunidad Autónoma de La Región de Murcia, Consejería de Trabajo y Política Social Instituto de Seguridad y Salud Laboral*, 2(4), 72. <https://doi.org/10.15713/ins.mmj.3>
- García Quesada, J. C. (2008). Tema 3. Viscoelasticidad lineal. *Universidad de Alicante. Departamento de Ingeniería Química*, 33. <http://hdl.handle.net/10045/3624>
- Gómez Etxebarria, G. (2008). *Todo prevención de riesgos laborales. Medio Ambiente y Seguridad Industrial*.
- González Hernández, L. (2004). Tema 22: Ensayos de elastómeros. Departamento de Química y Tecnología de Elastómeros. In *Ciencia y tecnología de materiales poliméricos. (Volumen*

- II). Tema 22: Ensayos de elastómeros. Instituto de Ciencia y Tecnología de Polímeros. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (p. 467).
- Griffin, M. J. (1997). Measurement, evaluation, and assessment of occupational exposures to hand-transmitted vibration. *Occupational and Environmental Medicine*, 54(2), 73–89. <https://doi.org/10.1136/oem.54.2.73>
- Griffin, M. J. (2001). Vibraciones 50. Riesgos Generales. Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo. *Enciclopedia de Salud y Seguridad En El Trabajo, II*. http://www.cso.go.cr/tematicas/higiene/agentes/fisico/00_vibraciones.pdf
- Hamouda, K., Rakheja, S., Dewangan, K. N., & Marcotte, P. (2017). Fingers' vibration transmission and grip strength preservation performance of vibration reducing gloves. *Applied Ergonomics*, 66, 121–138. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.08.005>
- Hamouda, K., Rakheja, S., Marcotte, P., & Dewangan, K. N. (2016). Fingers vibration transmission performance of vibration reducing gloves. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 62, 55–69. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2016.11.012>
- Hernández, J. D. (2022). *Guía para comprar tus próximos puños | MTB Pro*. <https://www.mtbpro.es/afondo/guia-para-comprar-tus-proximos-punos>
- Hernández, L. G. (2004). Tema 11. Elastómeros termoestables y termoplásticos. In *Ciencia y tecnología de materiales poliméricos. (Volumen II). Tema 22: Ensayos de elastómeros. Instituto de Ciencia y Tecnología de Polímeros. Consejo Superior de Investigaciones Científicas*.
- Hewitt, S., Dong, R. G., Welcome, D. E., & McDowell, T. W. (2014). Anti-vibration gloves? *Annals of Occupational Hygiene*, 59(2), 127–141. <https://doi.org/10.1093/annhyg/meu089>
- Hikoki. (2018). *Hikoki Martillo demoledor Des. Esp. H65SB3. 1*.
- Hilti. (2022). *TE 800-AVR - Martillos rompedores a batería/con cable - Hilti Española*. <https://www.hilti.es/?itemCode=2113614>
- Hitachi. (2018a). *Hitachi Martillo demoledor Des Esp. H65SB2 Hex 30 mm (p. 1)*.
- Hitachi. (2018b). *Hitachi Martillo demoledor Des. Esp. H90SC Hex. 31,7mm. 1*.
- Ibarra Rueda, L. M. (2004). 16. Ingredientes de mezclas de caucho. In *Ciencia y tecnología de materiales poliméricos. (Volumen II). Tema 16: Ingredientes de mezclas de caucho (p. 467)*.
- Ideara-SL. (2014). Título: Vibraciones mecánicas. Factores relacionados con la fuente y medidas de control. *Confederación de Empresarios de Pontevedra (CEP) y La Fundación Para La Prevención de Riesgos Laborales*, 11.
- Imcoinsa. (2019). *Martillo rompedor. 2671*.
- INE. (2009). Clasificación Nacional de Actividades. CNAE-2009. *INE*, 4.
- INE. (2013). *Clasificación Nacional de Ocupaciones, CNO-11. 3*. http://repositorio.sena.edu.co/bitstream/11404/1754/1/clasificacion_nacional_ocupaciones_2013.pdf
- Ingeniería del diseño. (2023). *Diseño conceptual*. <https://sites.google.com/site/ingenieriadeldiseno/diseno-conceptual#:~:text=El proceso de diseño conceptual,especificaciones%2C requisitos y necesidades planteadas>
- Ingersoll Rand. (2022). *Power Tools: Industrial-Grade Cordless & Air Tools*. <https://www.ingersollrand.com/en-in/power-tools>
- Instituto Nacional de Estadística. (2017). *CNAE-2009 INE*. 278.
- Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo. (2023). *Riesgos físicos*. <https://www.insst.es/materias/riesgos/riesgos-fisicos>
- Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST), O.A., M. . (2012). Guía Técnica para la utilización por los trabajadores de equipos de protección individual. *Catálogo General de Publicaciones Oficiales Del INSST*.
- Jaureguiberry, M. (2000). *Vibraciones. 7*. https://books.google.com.mx/books?id=Zs4cO_QLpZ4C&pg=PA51&hl=es&source=gbs_se

- lected_pages&cad=2#v=onepage&q&f=false
- Jing, X., Zhang, L., Feng, X., Sun, B., & Li, Q. (2018). A novel bio-inspired anti-vibration structure for operating hand-held jackhammers. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 118, 317–339. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.09.004>
- Joshi, A., Leu, M., & Murray, S. (2012). Ergonomic analysis of fastening vibration based on ISO Standard 5349 (2001). *Applied Ergonomics*, 43(6), 1051–1057. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2012.03.005>
- Juan y Seva, B. (2005). Exposición laboral a vibraciones mecánicas RD 1311 / 2005 Obligaciones del empresario. *Centro Nacional de Verificación de Maquinaria*.
- Juan y Seva Guevara, B., Sánchez-Guardamino Elorriaga, R., & Sánchez Villar, C. (2014). Alternativas y herramientas para evaluar el riesgo de vibraciones mecánicas. *Instituto Nacional de Seguridad e Higiene En El Trabajo. Centro Nacional de Verificación de Maquinaria*. CNVM-INSHT., 8, 1.
- Kalra, M., Rakheja, S., Marcotte, P., Dewangan, K. N., & Adewusi, S. (2015). Measurement of coupling forces at the power tool handle-hand interface. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 50, 105–120. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2015.09.013>
- Kamalakar, G. B., & Mitra, A. C. (2018). Development and Analysis of Human Hand-Arm System Model for Anti-Vibration Isolators. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 3943–3952. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.651>
- Karacol Sport. (2022). *Puños bicicletas: Cube, El Gallo, Esigrips, Ritchey, KTM, Eltin, Ges, Pro, Ergon, MSC, Supacaz, Velo* | Karacol Sport. <https://www.karacol.es/>
- Kihlberg, S. (1995). Biodynamic response of the hand-arm system to vibration from an impact hammer and a grinder. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 16(1), 1–8. [https://doi.org/10.1016/0169-8141\(94\)00060-G](https://doi.org/10.1016/0169-8141(94)00060-G)
- Ko, Y. H., Ean, O. L., & Ripin, Z. M. (2011). The design and development of suspended handles for reducing hand-arm vibration in petrol driven grass trimmer. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 41(5), 459–470. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2011.04.004>
- La+ Emisa equipos industriales S.A. (2022). *Martillos neumáticos LA+ (LA CRUZ)*. <http://www.emisalacruz.com/>
- Labrador, I. (2022). *Guía para entender los tipos de bicicletas de montaña-Tuvalum*. <https://tuvalum.com/blog/diferentes-tipos-de-mountain-bike/>
- Larwind. (2022). *Larwind | Herramienta neumática*. <http://www.larwind.com/es/>
- Lawrance, G., Sam Paul, P., Varadarajan, A. S., Paul Praveen, A., & Ajay Vasanth, X. (2015). Attenuation of vibration in boring tool using spring controlled impact damper. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 11(4), 903–915. <https://doi.org/10.1007/s12008-015-0292-1>
- López Soto, J., Toledo Gandarias, N., Jimbert Lacha, P., Herrero Bengoechea, M. ., & Caro Rodríguez, J. . (2013). *El diseño industrial y desarrollo de producto*. 1–12. https://ocw.ehu.eus/file.php/272/3-Proceso_de_diseno.pdf
- Mammoth. (2022). *Puños de bicicleta: Pro, Brooks, Crankbrothers, Esigrips, Lizard skins, Race face, Specialized, el gallo, Syncros, Renthal, Ergon, Onoff, Giant, Odi, | Mammoth*. <https://www.mammothbikes.com/punos-bicicleta/c-1800>
- Marchetti, E., Sisto, R., Lunghi, A., Sacco, F., Sanjust, F., Di Giovanni, R., Botti, T., Morgia, F., & Tirabasso, A. (2017). An investigation on the vibration transmissibility of the human elbow subjected to hand-transmitted vibration. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 62, 82–89. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2017.04.001>
- Marqués Marqués, F., Rodríguez Morales, D., García Cubero, M. del C., Mena Mateo, J., Silió Villamil, F., Maqueda Blasco, J., Guillén Subirán, C., Jardón Dato, E., Hermosa Hernán, J. C., & Tejedor Varillas, A. (2012). Directrices para la decisión clínica en Enfermedades profesioanles relacionadas con los trastornos musculoesqueléticos. Afectación osteoarticular por vibraciones mano-brazo. *Instituto Nacional de Seguridad e Higiene En El Trabajo, INSHT*, 10.

- Melo, J. L. (2009). Ergonomía Práctica. Guía para la evaluación ergnómica de un puesto de trabajo. *Fundación MapFRE*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Meseguer-Valdenebro, J. L., Portoles, A., & Martínez-Conesa, E. (2020). Revisión de los principales tipos de elastómeros y ensayos normalizados. *Revista Iberoamerica de Polímeros*, 21(2), 75–95. <https://reviberpol.org/2020/03/01/revision-de-los-principales-tipos-de-elastomeros-y-ensayos-normalizados/>
- Mexpolímeros. (2023). *Red de polímeros interpenetrantes - Polímeros termoplásticos, elastómeros y aditivos*. <https://www.mexpolimeros.com/poly/ipn.html>
- Mezghani, F., Del Rincón, A. F., Souf, M. A. Ben, Fernandez, P. G., Chaari, F., Viadero Rueda, F., & Haddar, M. (2017). Identification of nonlinear anti-vibration isolator properties. *Comptes Rendus - Mecanique*, 345(6), 386–398. <https://doi.org/10.1016/j.crme.2017.03.004>
- Milwaukee. (2022). *Martillo demoledor SDS-MAX 1600 W 20 J EPTA K900S Milwaukee-Plataforma de la construcción*. <https://www.bigmatlaplataforma.es/es/b2c/p/tienda-de-la-construccion/martillo-demoledor-sds-max-1600-w-20-j-epta-k900s-milwaukee-84567>
- Ministerio de Trabajo y Seguridad Social. (2015). Real Decreto Legislativo 8/2015, de 30 de octubre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley General de la Seguridad Social. *Boletín Oficial Del Estado*, 1–157. <http://www.boe.es/boe/dias/1994/06/29/pdfs/A20658-20708.pdf>
- Mitra, A. C., Desai, A., Bharate, A., Rane, V., & Gholap, S. (2017). Experimental Vibration Analysis of Isolator Material on Hand-Handle Interface for CHOPSAW Machine. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 5438–5444. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.131>
- Miyara, F. (2005). Contaminantes físicos-Vibraciones. *Universidad Nacional Del Rosario*, 17.
- Monfort i Signes, J., Fuentes Giner, B., & Oliver Faubel, I. (2016). Equipos de Obra en Edificación : Máquinas-Herramientas. *ETSIE. Universitat Politècnica de València*, 1, 10. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/37876/Máquinas-Herramientas.pdf?sequence=1>
- NyS, N. y S. C.-P. S. (2022). *Ansys Software de Simulación | Partner Oficial en España*. <https://www.nysplm.com/ansys/>
- OIT. (1980). *Convenio 148 de la OIT, sobre la Protección de los trabajadores contra los riesgos profesionales debidos a la contaminación del aire, el ruido y las vibraciones en el lugar de trabajo*. 7.
- Orquin Casas, J. M. (2018). *Ingeniería estructural.Cálculo plástico,dinámico y sísmico de estructuras*.
- Parent-Thirion, A., Biletta, I., Cabrita, J., Vargas, O., Vermeyley, G., Wilczynska, A., & Wilkens, M. (2017). *6th European Working Conditions Survey*.
- Pascual Lizana, C. (2005). Para la Evaluación y prevención de los riesgos relacionados con las Vibraciones Mecánicas. *Instituto Nacional de Seguridad e Higiene En El Trabajo*, 55.
- Peralta, J. A., Reyes Lopez, P., & Godínez Muñoz, A. (2009). *El fenómeno de la resonancia*. 3(1), 618. <http://www.journal.lapen.org.mx>
- Piedrabuena Cuesta, A. I., & Palomares Olivares, N. I. (2012). Buenas practicas para la mejora de las condiciones ergonomicas del trabajo en el sector cementero. *Fundación Laboral Del Cemento y El Medio Ambiente*, 84(954), 52–63.
- Pinilla García, J., Almodóvar Molina, A., Galiana Blanco, M. L., Hervás Rivero, P., & Zimmermann Verdejo, M. (2015). Encuesta Nacional de Condiciones de Trabajo 6ª EWCS-España. *Instituto Nacional de Seguridad e Higiene En Trabajo*, 134.
- Ponsoda Acedo, J. (2019). Caracterización y simulación del comportamiento viscoelástico de materiales plásticos mediante el Método de Elementos Finitos. *Universidad Politècnica de Valencia, Campus de Alcoy*.
- Puños para MTB. (2023). *¿Cuáles son los mejores puños de MTB? Análisis y recopilación de ofertas*. <https://www.chollodeportes.com/mejores-punos->

- mtb/#129300_Coacutemo_elegir_unos_buenos_puntildeos_de_MTB
- Ramesha, C. M., Abhijith, K. G., Singh, A., Raj, A., & Naik, C. S. (2015). Modal Analysis and Harmonic Response Analysis of a Crankshaft. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 5(6), 323–327.
- Real Academia Española. (2022a). *biodinámico, biodinámica* | Definición | Diccionario de la lengua española | RAE - ASALE. <https://dle.rae.es/biodinámico>
- Real Academia Española. (2022b). *biomecánico, biomecánica* | Definición | Diccionario de la lengua española | RAE - ASALE. <https://dle.rae.es/biomecánico>
- Rebecca, A., Campbell, B., Matthew, R., Janko, M., Robert, I., & Hacker, M. (2017). Hand-arm vibration syndrome: A rarely seen diagnosis. *Journal of Vascular Surgery Cases and Innovative Techniques*, 3(2), 60–62. <https://doi.org/10.1016/j.jvscit.2017.01.002>
- Revgrrips. (2021). *Williams Formula One – Revolution Suspension Grips*. <https://revgrrips.com/pages/williams-f1>
- Ringen, K., Segal, J. L., & Weeks, J. L. (2001). Construcción 93. *Enciclopedia de Salud y Seguridad En El Trabajo, II, Parte*.
- Ros Martín, M. (2019). Análisis mediante elementos finitos de estructuras de acero con uniones semirrígidas. *Universidad de Sevilla*.
- Rosel Ajamil, L., Jiménez Cortés, B., González López, J., Martín Moreno, A., Santander Íñigo, A., Vargas Llave, Ó., Ferreras Remesal, A., Piedrabuena Cuesta, A., & García Molina, C. (2005). *Fundación Laboral de la Construcción*.
- Royo, D. J. (1989). *Manual de Tecnología de Caucho. Consorcio Nacional de Industriales del Caucho*.
- Rui, F., D'Agostin, F., Negro, C., & Bovenzi, M. (2008). A prospective cohort study of manipulative dexterity in vibration-exposed workers. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 81(5), 545–551. <https://doi.org/10.1007/s00420-007-0256-2>
- Sam, B., & Kathirvel, K. (2009). Development and evaluation of vibration isolators for reducing hand transmitted vibration of walking and riding type power tillers. *Biosystems Engineering*, 103(4), 427–437. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.04.012>
- Santurio Díaz, J. M., Rodríguez Carballido, J., & Argüelles Bayón, E. (2006). Proyecto SV-PA-04-09. Estudio de la Exposición a vibraciones mano-brazo en el trabajo con máquinas-herramienta portátiles. *Instituto Asturiano de Prevención de Riesgos Laborales y La Universidad de Oviedo*, 135.
- Sauni, R., Toivio, P., Pääkkönen, R., Malmström, J., & Uitti, J. (2015). Work disability after diagnosis of hand-arm vibration syndrome. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 88(8), 1061–1068. <https://doi.org/10.1007/s00420-015-1034-1>
- Secretaría de estado de la seguridad social-Dirección general de ordenación de la seguridad social. (2023). Observatorio de enfermedades profesionales (CEPROSS) y de enfermedades causadas o agravadas por el trabajo (PANOTRATSS). Informe Anual 2022. *Artículo Original*, 1(01), 94. <http://www.seg-social.es/prdi00/groups/public/documents/binario/145097.pdf>
- Segarra Larrosa, J. V. (2016). Evaluación de riesgos por vibraciones mano-brazo de herramientas motorizadas. TFM. *Universidad Miguel Hernández*, 69.
- Segeda. (2018). *MARTILLOS2-n9.pdf*.
- Segeda. (2020). *Fotos despiece*. 1–10.
- Segeda. (2022a). *Datos básicos de acuerdo al manual de instrucciones del Martillo MS-76*.
- Segeda. (2022b). Martillo MS-76. In *Manual de instrucciones, mantenimiento y repuestos*.
- Segeda. (2022c). *Segeda punteros*.
- Segeda. (2022d). *Conózcanos:Segeda*. <https://www.segeda.com/conozcanos/>
- Senovilla, L. P. (2009). Exposición a vibraciones mecánicas . Evaluación del riesgo. *Instituto Nacional de Seguridad e Higiene En El Trabajo*, 6.
- Serrano Gisbert, M. ., & Gómez Conesa, A. (2003). Alteraciones de la mano por traumas

- acumulativos en el trabajo. *Departamento de Fisioterapia. Facultad de Medicina. Universidad de Murcia.*, 7(1), 41–61.
- Serrano Tomás, S. (2020). Tecnología y equipamiento para las obras públicas 223. *Interempresas*.
- Shao, F., Childs, T. H. C., & Henson, B. (2009). Developing an artificial fingertip with human friction properties. *Tribology International*, 42(11–12), 1575–1581. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2009.02.005>
- Shibata, N., & Maeda, S. (2008). Effect of tool handle diameter on temporary threshold shift (TTS) of vibrotactile perception. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 38(9–10), 697–702. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2007.10.006>
- Singh, J., & Khan, A. A. (2013). Effect of coating over the handle of a drill machine on vibration transmissibility. *Applied Ergonomics*, 45(2 PB), 239–246. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2013.04.007>
- Sorbothane, I. (2023). *About Sorbothane, Inc. - Shock & Vibrations Solution Provider*. <https://www.sorbothane.com/about-us/>
- Soria Herrera, J. M. (2019). *Dynamic analysis and control of broadband frequency harmonic vibrations in lightweight pedestrian structures*.
- Stahl, S., Santos Stahl, A., Meisner, C., Rahmanian-Schwarz, A., Schaller, H.-E., & Lotter, O. (2012). A systematic review of the etiopathogenesis of Kienböck's disease and a critical appraisal of its recognition as an occupational disease related to hand-arm vibration. *Plastic and Reconstructive Surgery*, 132(6), 1479–1491. <https://doi.org/10.1097/01.prs.0000434409.32594.1b>
- Stayer. (2018). *Catálogo general. High-end power tools*. 104. http://issuu.com/contrinexag/docs/cat._2016-2017_complet_esp?e=26986549/40803442
- Sullair. (2008). *Herramienta neumática*.
- Sullair. (2016). *Sullair Air Tools*. 16.
- Synthelast. S.A. (2022). *Synthelast - Synthelast*. <http://www.synthelast.es/es/synthelast>
- Synthelast s.a. (2022). *SEBS - Synthelast*. <http://www.synthelast.es/es/productos/23-materiales-para-el-calzado/sebs>
- The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). (2020). *Vibration Syndrome (83-110) | NIOSH | CDC*. <https://www.cdc.gov/niosh/docs/83-110/>
- Tobajas Alonso, R. (2019). Desarrollo de modelos de fatiga para materiales elastómeros. Aplicación a componentes de automoción. *Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Zaragoza*.
- Universidad Pública de Navarra, I. industrial. (1993). Control de vibraciones. *Departamento de Ingeniería Mecánica, Energética y de Materiales*, 1–18.
- Utracki, L. A. (2002). Compatibilization of polymer blends. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 80(6), 1008–1016. <https://doi.org/10.1002/cjce.5450800601>
- Valero Cabello, E. (2013). Antropometría. *Centro Nacional de Nuevas Tecnologías. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene En El Trabajo*, 1–21.
- Valiente Cancho, A. (2018). *Comportamiento mecánico de materiales. Elasticidad y viscoelasticidad. Tercera parte. Comportamiento viscoelastico.pdf*.
- Welcome, D. E., Dong, R. G., Xu, X. S., Warren, C., & McDowell, T. W. (2014). The effects of vibration-reducing gloves on finger vibration. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 44(1), 45–59. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2013.10.003>
- Welcome, D. E., Dong, R. G., Xu, X. S., Warren, C., & McDowell, T. W. (2016). Tool-specific performance of vibration-reducing gloves for attenuating fingers-transmitted vibration. *Occupational Ergonomics*, 13(1), 23–44. <https://doi.org/10.3233/OER-160235>
- Welcome, D., Rakheja, S., Dong, R., Wu, J. Z., & Schopper, A. W. (2004). An investigation on the relationship between grip, push and contact forces applied to a tool handle. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 34(6), 507–518.

- <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2004.06.005>
- White, C. R., Haidekker, M. A., Stevens, H. Y., & Frangos, J. A. (2004). *Extracellular signal-regulated kinase activation and endothelin-1 production in human endothelial cells exposed to vibration*. 565–572. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2003.059899>
- White, G. (2010). *Introducción al análisis de vibraciones*.
- Xu, X. S., Dong, R. G., Welcome, D. E., Warren, C., Mcdowell, T. W., & Wu, J. Z. (2017). Vibrations transmitted from human hands to upper arm , shoulder , back , neck , and head. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 62, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2016.07.001>
- Ye, Y., Mauro, M., Bovenzi, M., & Griffin, M. J. (2015). Reduction in finger blood flow induced by hand-transmitted vibration: effect of hand elevation. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 88(7), 981–992. <https://doi.org/10.1007/s00420-015-1027-0>
- Youn, S. H., Jang, Y. S., & Han, J. H. (2011). Development of a three-axis hybrid mesh isolator using the pseudoelasticity of a shape memory alloy. *Smart Materials and Structures*, 20(7). <https://doi.org/10.1088/0964-1726/20/7/075017>

ANEXOS

Anexo A: Normativas adicionales a la evaluación de vibraciones mecánicas

Se aporta la relación de todos los comités técnicos actuales de AENOR que tienen relación con la tesis y cuyo objetivo es analizar las normativas que puedan estar implicadas tanto para la evaluación de vibraciones mecánicas, como para el diseño de martillos neumáticos.

Tabla 73: Comités técnicos

COMITÉS TÉCNICOS	RESULTADO
CTN 81 – SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO	
CTN 81/SC 2 – MEDIOS DE PROTECCIÓN COLECTIVA EN EL TRABAJO	Nada relacionado con el objetivo de este estudio
CTN 81/SC 1- PROTECCIÓN INDIVIDUAL	
CTN 81/SC 1/GT 2 – PROTECCIÓN DE LOS OJOS	No existe normativas dentro de este comité
CTN 81/SC 1/GT 4 – GUANTES Y ROPA DE PROTECCIÓN	No existe normativas dentro de este comité
CTN 81/SC 1/GT 6 – PROTECCIÓN DE PIES Y PIERNAS	No existe normativas dentro de este comité
CTN 81/SC 3-SEGURIDAD DE LAS MÁQUINAS	
CTN 81/SC 5 – ERGONOMÍA Y PSICOSOCIOLOGÍA	
CTN 81/SC 5/GT 1 – PRINCIPIOS ERGONÓMICOS	No existe normativas dentro de este comité
CTN 81/SC 5/GT 2 – ANTROPOMETRÍA Y BIOMECÁNICA	No existe normativas dentro de este comité
CTN 81/SC 5/GT 5 – AGENTES FÍSICOS	No existe normativas dentro de este comité
CTN 81/SC 6 – VIBRACIONES Y CHOQUES MECÁNICOS	
CTN 15 – MÁQUINAS-HERRAMIENTA	Nada relacionado con el objetivo de este estudio
CTN 15/SC 4 – ASPECTOS DE ECO-DISEÑO	No existe normativas dentro de este comité
CTN 27 – INDUSTRIA DE CONSTRUCCIÓN Y REPARACIÓN NAVAL, ARTEFACTOS Y TECNOLOGÍA MARINA	Nada que me pueda interesar
CTN 41 – CONTRUCCIÓN	Nada que me pueda interesar
CTN 171/SC 4/GT 1 – DISEÑO Y VALIDACIÓN	No existe normativas dentro de este comité
CTN 180 – EQUIPAMIENTO PARA TRABAJOS TEMPORALES EN OBRA	No existe normativas dentro de este comité
CTN 16 – HERRAMIENTAS	
CTN 1/SC 2 – DIBUJOS TÉCNICOS	

A continuación, se muestra una tabla de las normativas de interés dentro de cada comité. Cabe destacar que, muchas de ellas se pueden encontrar en varios comités técnicos y además se emplean para la evaluación de vibraciones mecánicas.

Tabla 74: Comités técnicos y normativas de interés

COMITÉS TÉCNICOS	NORMATIVAS
-CTN 81 - SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO -CTN 81/SC 6 - VIBRACIONES Y CHOQUES MECÁNICOS	-UNE-EN 1032:2004+A1:2009: Vibraciones mecánicas. Ensayos de maquinaria móvil a fin de determinar el valor de emisión de las vibraciones.
-CTN 81 - SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO -CTN 81/SC 6 - VIBRACIONES Y CHOQUES MECÁNICOS	-UNE-EN 12096:1998: Vibraciones mecánicas. Declaración y verificación de los valores de emisión vibratoria.
-CTN 81 - SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO -CTN 81/SC 6 - VIBRACIONES Y CHOQUES MECÁNICOS	-UNE-CEN/TR 1030-2:2016: Vibración mano-brazo. Directrices para la reducción de riesgos de vibración. Parte 2: Medidas de gestión en el lugar de trabajo.

	(Ratificada por la Asociación Española de Normalización en abril de 2017.) - UNE-CR 1030-1:1997: Vibraciones mano-brazo. Directrices para la reducción de los riesgos por vibraciones. Parte 1: Métodos de ingeniería para el diseño de máquinas.
CTN 81 - SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO	-UNE-EN 547-3:1997+A1:2008: Seguridad de las máquinas. Medidas del cuerpo humano. Parte 3: Datos antropométricos. -UNE-EN 547-2:1997+A1:2009: Seguridad de las máquinas. Medidas del cuerpo humano. Parte 2: Principios para la determinación de las dimensiones requeridas para las aberturas de acceso.
-CTN 81 - SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO -CTN 81/SC 6 - VIBRACIONES Y CHOQUES MECÁNICOS	-UNE-CEN/TR 15350:2013 IN: Vibraciones mecánicas. Directrices para la evaluación de la exposición a las vibraciones transmitidas por la mano usando la información disponible incluyendo la información proporcionada por los fabricantes de maquinaria.
-CTN 81/SC 6 - VIBRACIONES Y CHOQUES MECÁNICOS	- UNE-EN ISO 8041:2006/AC: 2009: Respuesta humana a las vibraciones. Instrumentos de medida. (ISO 8041:2005/Cor 1:2007)
-CTN 81/SC 6 - VIBRACIONES Y CHOQUES MECÁNICOS	- UNE-EN ISO 5349-1:2002: Vibraciones mecánicas. Medición y evaluación de la exposición humana a las vibraciones transmitidas por la mano. Parte 1: Requisitos generales. (ISO 5349-1:2001). - UNE-EN ISO 5349-2:2002/A1:2016: Vibraciones mecánicas. Medición y evaluación de la exposición humana a las vibraciones transmitidas por la mano. Parte 2: Guía práctica para la medición en el lugar de trabajo. (ISO 5349-2:2001/Amd 1:2015). -ISO 5349 (todas las partes) Vibraciones mecánicas. Directrices para la medida y evaluación de la exposición humana a las vibraciones transmitidas por la mano.
-CTN 81/SC 6 - VIBRACIONES Y CHOQUES MECÁNICOS	-ISO 2041, Vibraciones, choques y condiciones de monitorización. Vocabulario.
-CTN 81/SC 6 - VIBRACIONES Y CHOQUES MECÁNICOS	-EN 1296 Vibraciones mecánicas. Declaración y verificación de los valores de emisión vibratoria.
-CTN 81/SC 6 - VIBRACIONES Y CHOQUES MECÁNICOS	-ENV 28041 Respuesta humana a las vibraciones. Instrumentación de medida (ISO 8041:1990)
-CTN 81/SC 6 - VIBRACIONES Y CHOQUES MECÁNICOS, -CTN 81 - SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO	-UNE-ISO 5805:2017: Vibraciones y choques mecánicos. Exposición humana. Vocabulario.
-CTN 16 – HERRAMIENTAS	-UNE-EN ISO 11148-4:2012: Herramientas portátiles de accionamiento no eléctrico. Requisitos de seguridad. Parte 4: Herramientas portátiles percutoras no rotativas (ISO 11148-4:2012) (Ratificada por AENOR en febrero de 2013.) - UNE-EN ISO 11148-5:2011: Herramientas portátiles de accionamiento no eléctrico. Requisitos de seguridad. Parte 5: Taladradoras percutoras rotativas (ISO 11148-5:2011) (Ratificada por AENOR en enero de 2012.)
-CTN 81 - SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO	-UNE-EN 1540:2012: Exposición en el lugar de trabajo. Terminología.
-CTN 81 - SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO -CTN 81/SC 1 - PROTECCIÓN INDIVIDUAL	-UNE-EN 388:2016: Guantes de protección contra riesgos mecánicos. (Ratificada por la Asociación Española de Normalización en agosto de 2017.)
-CTN 81 - SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO -CTN 81/SC 5 - ERGONOMÍA Y PSICOSOCIOLOGÍA	-UNE-EN 614-1:2006+A1:2009: Seguridad de las máquinas. Principios de diseño ergonómico. Parte 1: Terminología y principios generales

	-UNE-EN 614-2:2001+A1:2008: Seguridad de las máquinas. Principios de diseño ergonómico. Parte 2: Interacciones entre el diseño de las máquinas y las tareas de trabajo.
-CTN 81/SC 5 - ERGONOMÍA Y PSICOSOCIOLOGÍA -CTN 81/SC 6 - VIBRACIONES Y CHOQUES MECÁNICOS -CTN 81 - SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO	-EN 1005-1: 2001 Seguridad de las máquinas. Comportamiento físico del ser humano. Parte 1: Términos y definiciones. -EN 1005-3:2002 Seguridad de las máquinas. Comportamiento físico del ser humano. Parte 3: Límites de fuerza recomendados para la utilización de máquinas. -UNE-EN 1005-2:2004+A1:2009: Seguridad de las máquinas. Comportamiento físico del ser humano. Parte 2: Manejo de máquinas y de sus partes componentes. -UNE-EN 1005-5:2007: Seguridad de las máquinas. Comportamiento físico del ser humano. Parte 5: Evaluación del riesgo por manipulación repetitiva de alta frecuencia. -UNE-EN 1005-4:2005+A1:2009: Seguridad de las máquinas. Comportamiento físico del ser humano. Parte 4: Evaluación de las posturas y movimientos de trabajo en relación con las máquinas.
-CTN 81 - SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO	-UNE-EN 13921:2007: Equipos de protección individual. Principios ergonómicos.
-CTN 81 - SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO -CTN 81/SC 6 - VIBRACIONES Y CHOQUES MECÁNICOS	-UNE-EN ISO 28927-5:2010/A1:2015: Herramientas a motor portátiles. Métodos de ensayo para la evaluación de las emisiones de vibraciones. Parte 5: Taladradoras y taladradoras de impacto. (ISO 28927-5:2009/Amd 1:2015). -UNE-EN ISO 28927-10:2011: Herramientas a motor portátiles. Métodos de ensayo para la evaluación de las emisiones de vibraciones. Parte 10: Martillos de percusión, perforación y demolición. (ISO 28927-10:2011). -UNE-EN ISO 28927-11:2011: Herramientas a motor portátiles. Métodos de ensayo para la evaluación de las emisiones de vibraciones. Parte 11: Martillos de piedra. (ISO 28927-11:2011). -UNE-EN ISO 28927-9:2010: Herramientas a motor portátiles. Métodos de ensayo para la evaluación de las emisiones de vibraciones. Parte 9: Martillos decapadores y martillos de agujas. (ISO 28927-9:2009).
-CTN 81 - SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO	-UNE-EN ISO 11161:2009/A1:2010: Seguridad de las máquinas. Sistemas de fabricación integrados. Requisitos fundamentales. (ISO 11161:2007/Amd 1:2010).
-CTN 81 - SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO -CTN 81/SC 6 - VIBRACIONES Y CHOQUES MECÁNICOS	-UNE-EN ISO 20643:2008/A1:2012: Vibraciones mecánicas. Maquinaria sujeta y guiada con la mano. Principios para la evaluación de la emisión de las vibraciones. Modificación 1: Posiciones del acelerómetro. (ISO 20643:2005/Amd 1:2012).
-CTN 81 - SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO -CTN 81/SC 3 - SEGURIDAD DE LAS MÁQUINAS	-UNE-EN ISO 4414:2011: Transmisiones neumáticas. Reglas generales y requisitos de seguridad para los sistemas y sus componentes. (ISO 4414:2010).
-CTN 81 - SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO -CTN 81/SC 6 - VIBRACIONES Y CHOQUES MECÁNICOS	-UNE-CEN ISO/TS 15694:2013 EX: Vibraciones y choques mecánicos. Medición y evaluación de choques simples transmitidos por las máquinas portátiles y las máquinas guiadas manualmente al sistema mano-brazo. (ISO/TS 15694:2004).
-CTN 81 - SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO -CTN 81/SC 3 - SEGURIDAD DE LAS MÁQUINAS	-UNE-EN ISO 4414:2011: Transmisiones neumáticas. Reglas generales y requisitos de seguridad para los sistemas y sus componentes. (ISO 4414:2010).

-CTN 81 - SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO -CTN 81/SC 3 - SEGURIDAD DE LAS MÁQUINAS	-UNE-EN ISO 14159:2008: Seguridad de las máquinas. Requisitos de higiene para el diseño de las máquinas. (ISO 14159:2002)
-CTN 81/SC 1 - PROTECCIÓN INDIVIDUAL	- UNE-EN 407:2005: Guantes de protección contra riesgos térmicos (calor y/o fuego).
-CTN 81/SC 1 - PROTECCIÓN INDIVIDUAL -CTN 81/SC 6 - VIBRACIONES Y CHOQUES MECÁNICOS	-EN 420-Guantes de protección. Requisitos generales y métodos de ensayo.
-CTN 81/SC 5 - ERGONOMÍA Y PSICOSOCIOLOGÍA	-UNE-EN ISO 9241-420:2011: Ergonomía de la interacción hombre-sistema. Parte 420: Selección de los dispositivos de entrada físicos (ISO 9241-420:2011) (Ratificada por AENOR en septiembre de 2011.)
-CTN 81/SC 3 - SEGURIDAD DE LAS MÁQUINAS -CTN 81/SC 5 - ERGONOMÍA Y PSICOSOCIOLOGÍA	-UNE-EN ISO 12100:2012: Seguridad de las máquinas. Principios generales para el diseño. Evaluación del riesgo y reducción del riesgo. (ISO 12100:2010) EN ISO 12100-2 Seguridad de las máquinas. Conceptos básicos, principios generales para el diseño. Parte 2: Principios técnicos. (ISO 121100-2:2003) -EN ISO 12100-1 Seguridad de las máquinas. Conceptos básicos, principios generales para el diseño. Parte 1: Terminología básica, metodología. (ISO 12100-1:2003)
-CTN 81/SC 3 - SEGURIDAD DE LAS MÁQUINAS	-ISO 13849-2:2012, Seguridad de las máquinas. Partes de los sistemas de mando relativas a la seguridad. Parte 2: Validación.
-CTN 81/SC 5 - ERGONOMÍA Y PSICOSOCIOLOGÍA	-UNE-EN ISO 7250-1:2017: Definiciones de las medidas básicas del cuerpo humano para el diseño tecnológico. Parte 1: Definiciones de las medidas del cuerpo y referencias (ISO 7250-1:2017) (Ratificada por la Asociación Española de Normalización en diciembre de 2017.)
-CTN 81/SC 5 - ERGONOMÍA Y PSICOSOCIOLOGÍA	-UNE-EN 13861:2011: Seguridad de las máquinas. Guía para la aplicación de las normas sobre ergonomía al diseño de máquinas. (Ratificada por AENOR en marzo de 2012.)
-CTN 81/SC 5 - ERGONOMÍA Y PSICOSOCIOLOGÍA	-EN 1070 Seguridad de las máquinas. Terminología.
-CTN 81/SC 5 - ERGONOMÍA Y PSICOSOCIOLOGÍA	-EN 1050 Seguridad de las máquinas. Principios para la evaluación del riesgo.
-CTN 81/SC 5 - ERGONOMÍA Y PSICOSOCIOLOGÍA	-UNE-EN ISO 14738:2010: Seguridad de las máquinas. Requisitos antropométricos para el diseño de puestos de trabajo asociados a máquinas. (ISO 14738:2002 incluyendo Cor 1:2003 y Cor 2:2005).
-CTN 81/SC 5 - ERGONOMÍA Y PSICOSOCIOLOGÍA	-UNE-EN ISO 9241-420:2011: Ergonomía de la interacción hombre-sistema. Parte 420: Selección de los dispositivos de entrada físicos (ISO 9241-420:2011) (Ratificada por AENOR en septiembre de 2011.)
-CTN 81/SC 5 - ERGONOMÍA Y PSICOSOCIOLOGÍA	-ISO 13852 Seguridad de las máquinas. Distancias de seguridad para impedir que se alcancen zonas peligrosas con los miembros superiores.
-CTN 81/SC 5 - ERGONOMÍA Y PSICOSOCIOLOGÍA	-ISO 15534-3- Diseño ergonómico para la seguridad de las máquinas. Parte3: Datos antropométricos.
-CTN 81/SC 5 - ERGONOMÍA Y PSICOSOCIOLOGÍA	-UNE-EN ISO 15831:2004: Ropa. Efectos fisiológicos. Medida del aislamiento térmico mediante un maniquí térmico (ISO 15831:2004).
-CTN 81/SC 6 - VIBRACIONES Y CHOQUES MECÁNICOS	-IEC 61260:1995 Electroacústica. Filtros de bandas de octava y de bandas de una fracción de octava
-CTN 81/SC 6 - VIBRACIONES Y CHOQUES MECÁNICOS	-ISO 5347 (todas las partes) Métodos para la calibración de las vibraciones y choques.
-CTN 81/SC 6 - VIBRACIONES Y CHOQUES MECÁNICOS	ISO 5348 Vibraciones mecánicas y choques. Montaje mecánico de los acelerómetros.
-CTN 81/SC 6 - VIBRACIONES Y CHOQUES MECÁNICOS	-ISO 16063 (todas las partes) Métodos para la calibración de los transductores de choque y vibraciones.

-CTN 81/SC 6 - VIBRACIONES Y CHOQUES MECÁNICOS -CTN 81 - SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO	UNE-EN 1299:1997+A1:2009: Vibraciones y choques mecánicos. Aislamiento de las vibraciones de las máquinas. Información para la aplicación del aislamiento en la fuente.
-CTN 81/SC 6 - VIBRACIONES Y CHOQUES MECÁNICOS	-ISO 7626-1:1986 Vibraciones y choques. Determinación experimental de la movilidad mecánica. Parte 1: Definiciones básicas y transductores.
-CTN 81/SC 6 - VIBRACIONES Y CHOQUES MECÁNICOS	ISO 22867, Maquinaria forestal y de jardinería. Código de ensayo de vibraciones para máquinas portátiles con motor de combustión interna. Vibración en las empuñaduras.
-CTN 81/SC 6 - VIBRACIONES Y CHOQUES MECÁNICOS -CTN 81 - SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO	- UNE-EN ISO 10819:2014: Vibraciones mecánicas y choques. Vibraciones transmitidas a la mano. Medición y evaluación de la transmisibilidad de la vibración por los guantes a la palma de la mano. (ISO 10819:2013).
-CTN 81/SC 6 - VIBRACIONES Y CHOQUES MECÁNICOS	- UNE-ISO 5805:2017: Vibraciones y choques mecánicos. Exposición humana. Vocabulario.
-CTN 81/SC 6 - VIBRACIONES Y CHOQUES MECÁNICOS	-EN 1033 Vibraciones mano-brazo. Medida en laboratorio de las vibraciones en la superficie de las empuñaduras de las máquinas guiadas manualmente. Generalidades.
-CTN 81/SC 6 - VIBRACIONES Y CHOQUES MECÁNICOS	-CEN/TS ISO 8662-11 Herramientas a motor portátiles. Medición de las vibraciones en la empuñadura. Parte 11: Herramientas para clavar elementos de fijación. (ISO 8662-11:1999+ Amd 1: 2001) -ISO 8662 (todas las partes) – Herramientas a motor portátiles. Medidas de las vibraciones en la empuñadura.
-CTN 81/SC 6 - VIBRACIONES Y CHOQUES MECÁNICOS	- UNE-CEN/TR 16391:2013 IN: Vibraciones y choques mecánicos. Vibración transmitida a la mano. Influencia de las fuerzas de acoplamiento en el interfaz mano-máquina en la evaluación de la exposición.
-CTN 81/SC 6 - VIBRACIONES Y CHOQUES MECÁNICOS	-ISO 15230:2007 Vibraciones y choques mecánicos. Fuerzas de acoplamiento en el interfaz hombre-máquina para la vibración transmitida a la mano.
-CTN 81/SC 6 - VIBRACIONES Y CHOQUES MECÁNICOS	-ISO 2787:1984 Herramientas neumáticas rotativas y de percusión. Ensayos de comportamiento.
-CTN 81/SC 6 - VIBRACIONES Y CHOQUES MECÁNICOS	-ISO 5391:2003 Herramientas y máquinas neumáticas. Vocabulario.
-CTN 81/SC 6 - VIBRACIONES Y CHOQUES MECÁNICOS	-ISO 17066 Herramientas hidráulicas. Vocabulario. - ISO 17066:2007 Herramientas hidráulicas. Vocabulario.
-CTN 81/SC 6 - VIBRACIONES Y CHOQUES MECÁNICOS	-ISO 679:2009 Cemento. Métodos de ensayo. Determinación de la resistencia.
-CTN 81/SC 6 - VIBRACIONES Y CHOQUES MECÁNICOS	- UNE-EN 12096:1998: Vibraciones mecánicas. Declaración y verificación de los valores de emisión vibratoria.
-CTN 81/SC 6 - VIBRACIONES Y CHOQUES MECÁNICOS	-ISO 2631-1 Vibraciones mecánicas y choques. Evaluación de la exposición humana a vibraciones globales. Parte 1: Requisitos generales.
-CTN 81/SC 6 - VIBRACIONES Y CHOQUES MECÁNICOS	-CEI 61260- Electroacústica. Filtros de bandas de octava y de bandas de una fracción de octava.
-CTN 81 - SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO	-UNE-EN ISO 15537:2005: Principios para la selección y empleo de personas en el ensayo de aspectos antropométricos de productos y diseños industriales (ISO 15537:2004).
-CTN 81 - SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO	-UNE-EN ISO 15536-1:2008: Ergonomía. Maniqués informatizados y plantillas del cuerpo humano. Parte 1: Requisitos generales. (ISO 15536-1:2005).
-CTN 81 - SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO	-UNE-EN ISO 13753:2008: Vibraciones mecánicas y choques. Vibración mano-brazo. Método para medir la

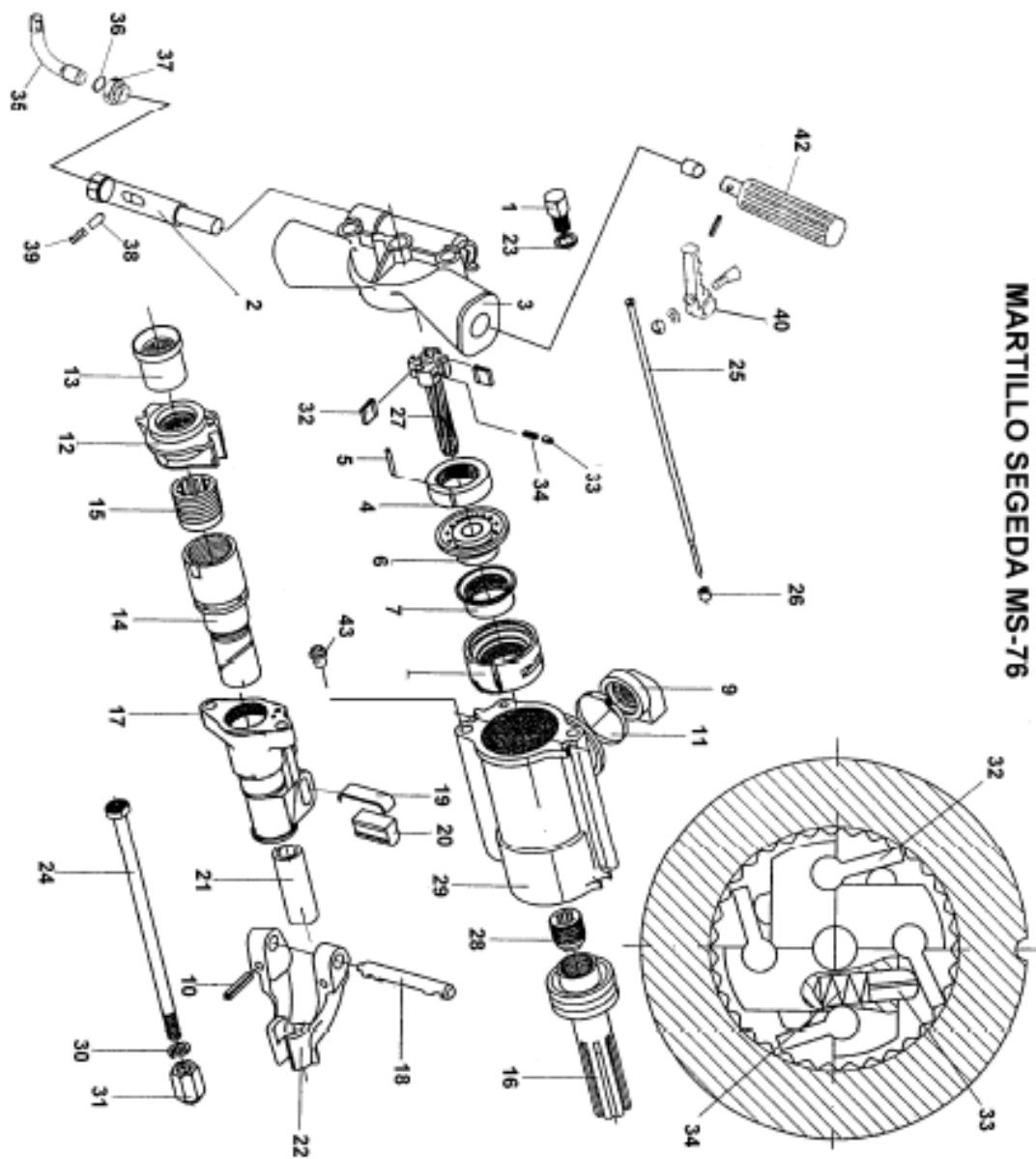
	transmisibilidad de la vibración de los materiales resilientes cargados por el sistema mano-brazo. (ISO 13753:1998).
-CTN 81 - SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO	-UNE-CR 12349:1996: Vibraciones mecánicas. Guía relativa a los efectos de las vibraciones sobre la salud del cuerpo humano.
-CTN 81/SC 1 - PROTECCIÓN INDIVIDUAL	-UNE-EN 511:2006: Guantes de protección contra el frío.
-CTN 81/SC 1 - PROTECCIÓN INDIVIDUAL	-EN ISO 7854:1997 Tejidos recubiertos de caucho o plástico. Determinación de la resistencia a la flexión. (ISO 7854:1995)
-CTN 81/SC 1 - PROTECCIÓN INDIVIDUAL	-ISO 4675 Tejidos recubiertos de caucho o plástico. Ensayo de flexión a baja temperatura.
-CTN 81/SC 5 - ERGONOMÍA Y PSICOSOCIOLOGÍA	-UNE-EN ISO 20685-2:2017: Ergonomía. Metodología de exploración tridimensional para establecer bases de datos antropométricos compatibles de ámbito internacional. Parte 2: Protocolo de evaluación de la forma exterior y de la repetibilidad de las posiciones relativas de puntos de referencia (ISO 20685-2:2015) (Ratificada por la Asociación Española de Normalización en mayo de 2017.)
-CTN 81/SC 5 - ERGONOMÍA Y PSICOSOCIOLOGÍA	-ISO 11226:2000 Ergonomics. Evaluation of static working postures.
-CTN 81/SC 5 - ERGONOMÍA Y PSICOSOCIOLOGÍA	-ISO 15534-3 Diseño ergonómico para la seguridad de las máquinas. Parte 3: Datos antropométricos.
-CTN 81/SC 6 - VIBRACIONES Y CHOQUES MECÁNICOS	-ISO 2631-1 Vibraciones mecánicas y choques. Evaluación de la exposición humana a vibraciones globales. Parte 1: Requisitos generales.
-CTN 81/SC 6 - VIBRACIONES Y CHOQUES MECÁNICOS	-ISO 16063 (todas las partes) Métodos para calibración de los transductores de las vibraciones y choques.
-CTN 81/SC 6 - VIBRACIONES Y CHOQUES MECÁNICOS	-ISO 10068: -1) Vibraciones mecánicas y choques. Impedancia mecánica libre en el punto de accionamiento del sistema mano-brazo.
-CTN 81/SC 6 - VIBRACIONES Y CHOQUES MECÁNICOS	-ISO 8662 (todas las partes) – Herramientas a motor portátiles. Medidas de las vibraciones en la empuñadura.

Algunas de estas normas han sido citadas a lo largo de esta tesis, como la UNE-EN ISO 5349-1:2002: Vibraciones mecánicas. También a lo largo de este epígrafe: medición y evaluación de la exposición humana a las vibraciones transmitidas por la mano. Parte 1: Requisitos generales (ISO 5349-1:2001) o la UNE-EN ISO 5349-2:2002/A1:2016: Vibraciones mecánicas. Medición y evaluación de la exposición humana a las vibraciones transmitidas por la mano. Parte 2: Guía práctica para la medición en el lugar de trabajo (ISO 5349-2:2001/Amd 1:2015).

Anexo B: Despiece del martillo neumático rotopercutor

Martillo Segeda MS-76

Figura 122: Despiece Martillo neumático rotopercutor MS76 Segeda



Nota: Adaptado de Segeda (2020, p.1)

Tabla 75: Referencias piezas martillo neumático rotopercutor MS76 Segeda

Marca	Refcia.	Unid.	PIEZA
1	030028	1	MS76 TAPON 1 DE CABEZA AIRE
	070018	1	MS RACOR BARRIDO AGUA/AIRE
2	030018	1	MS76 EJE REPARTIDOR Y MS85 MANO
3	030013	1	MS76 CABEZA
4	030006	1	MS76 CORONA
5	070005	1	MS ESPIGA CORONA
6	030032	1	MS76 VALVULA PERFORADA
7	030009	1	MS76 CASQUILLO VALVULA
8	030031	1	MS76 CUERPO VALVULA
9	070004	1	MS DEFLECTOR
10	070007	2	MS PASADOR ELASTICO RETENEDOR
11	070001	1	MS ABRAZADERA DEFLECTOR
12	030011	1	MS76 CUERPO INTERMEDIO
13	030007	1	MS76 CASQUILLO GUIA
14	030005	1	MS76 BUCHA
15	030027	1	MS76 TUERCA BUCHA
16	030023	1	MS76 PISTON
17	030010	1	MS76 CUERPO BUCHA R/C
	030038	1	MS76 CUERPO BUCHA R/R
18	070025	1	MS EJE RETENEDOR CUADRADO
	070015	1	MS EJE RETENEDOR REDONDO
19	070003	1	MS CHAPA RETENEDOR
20	070024	1	MS AMORTIGUADOR RETENEDOR CUADRADO
	070022	1	MS AMORTIGUADOR RETENEDOR REDONDO
21	030003	1	MS76-85 BUJE 7/8"
22	070019	1	MS RETENEDOR CUADRADO
22	070016	1	MS RETENEDOR REDONDO
23	070013	1	MS JUNTA METALBUNA RACOR BARRIDO 1/2"
24	030017	2	MS76 ESPARRAGO
25	030033	1	MS76 AGUJA AGUA
	030001	1	MS76 AGUJA AIRE
26	070009	1	MS GOMA AGUJA AIRE/AGUA
	070008	1	MS GOMA AGUJA AGUA
27	030002	1	MS76 BARRA ROTACION
28	030026	1	MS76 TUERCA ROTACION
29	030012	1	MS76 CUERPO PISTON
30	070002	2	MS ARANDELA ESPARRAGO GROVER M16
31	070023	2	MS TUERCA ESPARRAGO
32	070021	4	MS TRINQUETE
33	070006	4	MS PIVOTE TRINQUETE
34	070014	4	MS MUELLE TRINQUETE
35	030014	1	MS76 CODO ALIMENTACION
36	030020	1	MS76 JUNTA TORICA CODO
37	030029	1	MS76 TUERCA CODO ALIMENTACION
38	030030	1	MS76 TRINQUETE/EMBOLO MANILLA CABEZA
39	030022	1	MS76 MUELLE EJE REPARTIDOR

40	030021	1	MS76 MANILLA
	030008	1	MS76 CUÑA ROSCADA MANILLA
	030016	1	MS76 TUERCA CUÑA MANILLA
	110008	1	ARANDELA GROVER M10
41	030039	1	MS76 ARANDELA COBRE CODO ALIMENTACION Ø40
42	030024	2	MS76 EMPUÑADURA
	030025	2	MS76 PASADOR 42 ELASTICO PUÑO
	030015	2	MS76 CASQUILLO PUÑO TEFLON
43	070010	1	MS CASQUILLO SELLADO

Nota: Adaptado de Segeda (2020, p.1)

El martillo fue recibido en la universidad envuelto, como se puede observar en la imagen siguiente.

Figura 123: Embalaje martillo neumático MS76 Segeda



Nota: Adaptado de Segeda (2020, p.1-10)

Tras retirar el empaquetado el martillo se presentaba de esta forma:

Figura 124: Imágenes martillo neumático rotopercutor real





Nota: Adaptado de Segeda (2020, p.1-10)

A continuación, se presenta fotos de detalle del martillo neumático rotopercutor.

Figura 125: Imágenes detalle martillo neumático rotopercutor MS76 Segeda



Nota: Adaptado de Segeda (2020, p.1-10)

En las siguientes figuras se presentan algunas fotos del martillo neumático rotopercutor. Aproximadamente tiene una longitud entorno a 50 *cm* y un ancho, tomando la referencia de mango a mango, alrededor de 50 *cm*.

Figura 126: Dimensiones generales



Nota: Adaptado de Segeda (2020, p.1-10)

Durante el proceso del despiece se emplearon distintas herramientas, entre ellas la llave inglesa, el martillo y el punzón.

En primer lugar, se desenroscó, mediante una llave inglesa, la TUERCA ESPARRAGO (31) que une por medio de un ESPARRAGO (24) el cuerpo entero. Para dañar lo mínimo posible la máquina se empleó un trapo rodeando la tuerca. Se desenroscó las dos TUERCA ESPARRAGO (31) a la vez para poder sacar los dos ESPARRAGOS (24).

Figura 127: 1 despiece: Tuerca esparrago y espárrago



Nota: Adaptado de Segeda (2020, p.1-10)

Antes de separar las piezas principales CABEZA (3), CUERPO BUCHA (17), CUERPO PISTON (29) y RETENEDOR CUADRADO/RETENEDOR REDONDEO (22), se retiró el DEFLECTOR (9) empleando un destornillador.

Figura 128: 2 despiece: cabeza, cuerpo bucha, cuerpo pistón, retenedor cuadrado, deflector



Nota: Adaptado de Segeda (2020, p.1-10)

A continuación, se presenta las piezas DEFLECTOR (9) y la ABRAZADERA DEFLECTOR (11).

Figura 129: 3 despiece: deflector y abrazadera deflector



Nota: Adaptado de Segeda (2020, p.1-10)

Finalmente, se separó la CABEZA (3), el CUERPO BUCHA (17) y el CUERPO PISTON (29) desenroscando las dos TUERCA ESPARRAGO (31) y sacando por arriba los dos ESPARRAGO (24) que une el cuerpo.

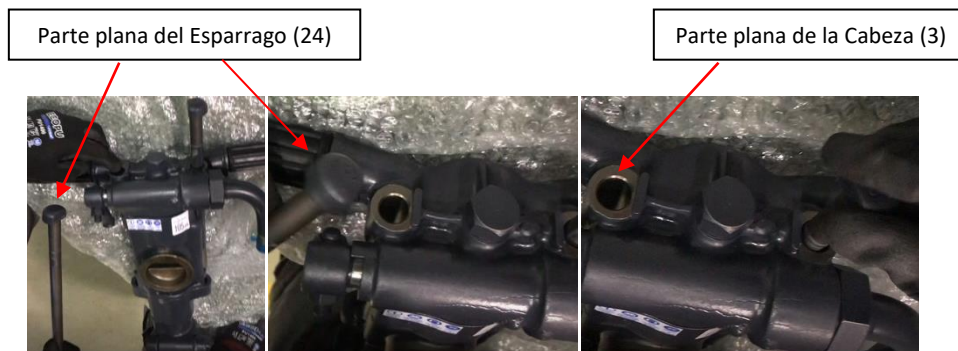
Figura 130: 4 despiece: cabeza, cuerpo bucha, cuerpo pistón, tuerca esparrago



Nota: Adaptado de Segeda (2020, p.1-10)

Para que no gire, el ESPARRAGO (24) está diseñado de tal manera que bloquea el giro con una parte plana. Igualmente sucede con la CABEZA (3) de la máquina, que tiene dispuesta una parte plana o rebaje para que se bloquee y no gire.

Figura 131: 5 despiece: esparrago y cabeza



Nota: Adaptado de Segeda (2020, p.1-10).

De esta forma se presenta las primeras piezas: los dos ESPARRAGO (24), la ARANDELA ESPARRAGO GROVER M16, las TUERCA ESPARRAGO (31), el DEFLECTOR (9) y la ABRAZADERA DEFLECTOR (11).

Figura 132: 6 despiece: esparrago, arandela esparrago grover M16, tuerca esparrago, deflector y abrazadera deflector



Nota: Adaptado de Segeda (2020, p.1-10)

Tras retirar los dos ESPARRAGO (24) se pudieron separar fácilmente las piezas CABEZA (3), CUERPO BUCHA (17) y CUERPO PISTON (29).

Figura 133: 7 despiece: esparrago, cabeza, cuerpo bucha y cuerpo pistón



Nota: Adaptado de Segeda (2020, p.1-10)

Seguidamente, se extrajo el CUERPO INTERMEDIO (12) que se encuentra entre el CUERPO PISTON (29) y CUERPO BUCHA (17). Después el CUERPO PISTON (29) y el resto de piezas, el TRINQUETE (32), la BARRA ROTACION (27), el MUELLE TRINQUETE (34), el PIVOTE TRINQUETE (33), la ESPIGA CORONA (5), la CORONA (4), la VALVULA PERFORADA (6), el CASQUILLO VALVULA (7) y el CUERPO VALVULA (8).

Figura 134: 8 despiece: trinquete, barra rotación, muelle trinquete, pivote trinquete, espiga corona, corona válvula perforadora, casquillo válvula, cuerpo válvula, cuerpo pistón, cuerpo intermedio y cuerpo bucha.

Funcionamiento interno para extraer



Cuerpo intermedio (12)



Nota: Adaptado de Segeda (2020, p.1-10)

Al sustraer el CUERPO INTERMEDIO (12) se pudo separar el CUERPO PISTON (29).

Figura 135: 9 despiece: cuerpo intermedio y cuerpo pistón



Nota: Adaptado de Segeda (2020, p.1-10)

En el interior del CUERPO PISTON (29) se encuentran las piezas siguientes: el conjunto de TRINQUETE (32), BARRA ROTACION (27), MUELLE TRINQUETE (34) y PIVOTE TRINQUETE (33). Asimismo, la ESPIGA CORONA (5) y la CORONA (4) que hacen otro conjunto, la VALVULA PERFORADA (6), CASQUILLO VALVULA (7) y CUERPO VALVULA (8) que también forman otro.

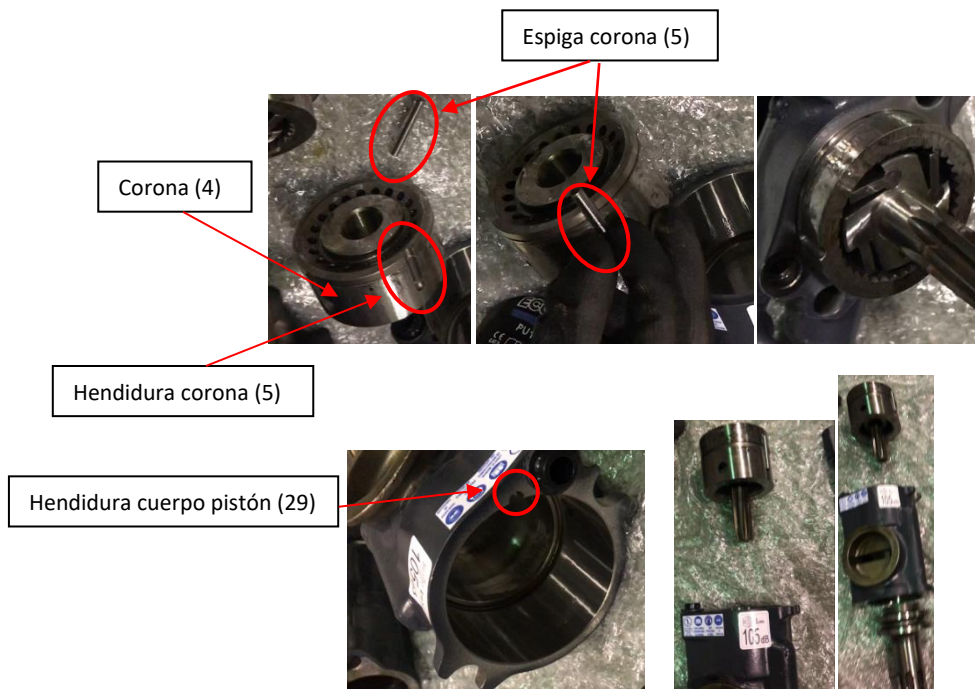
Figura 136: 10 despiece: Primer subconjunto compuesto de cuerpo pistón, trinquete, barra rotación, muelle trinquete y pivote trinquete. Segundo subconjunto compuesto de espiga corona, corona, válvula perforada, casquillo válvula y cuerpo válvula



Nota: Adaptado de Segeda (2020, p.1-10)

La ESPIGA CORONA (5) sirve como guía para insertar la pieza CORONA (4), en cuyo interior se encuentran las piezas VALVULA PERFORADA (6) y CASQUILLO VALVULA (7) con la pieza CUERPO VALVULA (8). A su vez encaja con la pieza CUERPO PISTON (29) ya que se observa una hendidura en la pieza. Cabe citar que no desgranamos la pieza CUERPO VALVULA (8) es decir su interior, en el que tiene interna las piezas VALVULA PERFORADA (6) y CASQUILLO VALVULA (7).

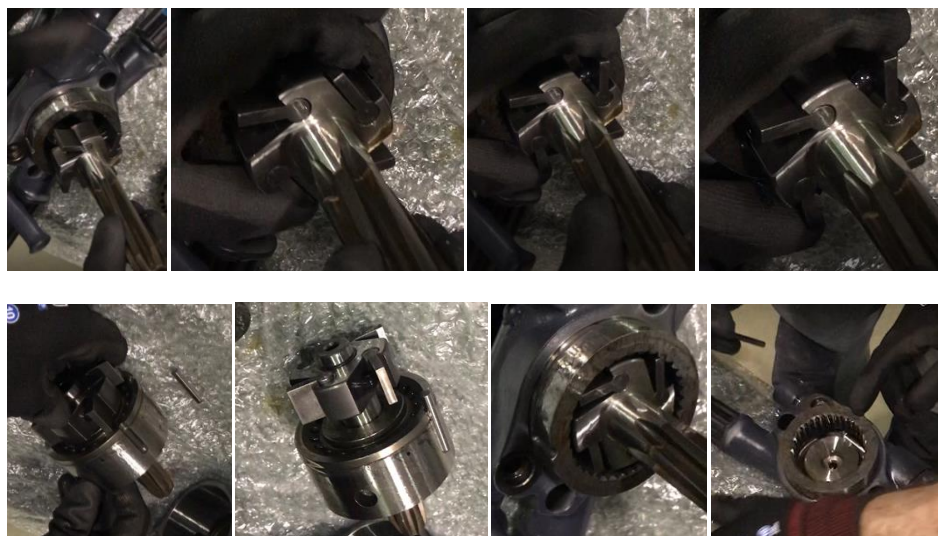
Figura 137: 11 despiece: espiga corona, corona, válvula perforada, casquillo válvula, cuerpo válvula y cuerpo pistón



Nota: Adaptado de Segeda (2020, p.1-10)

El conjunto de piezas que se encuentran próximas a la CABEZA (3) tienen forma de carraca y están compuestas por el TRINQUETE (32), BARRA ROTACION (27), MUELLE TRINQUETE (34) y PIVOTE TRINQUETE (33). Este mecanismo facilita el giro haciendo que la máquina no solo percuta, sino que también rote a la vez que golpea.

Figura 138: 12 despiece: cabeza, trinquete, barra rotación, muelle trinquete, pivote trinquete

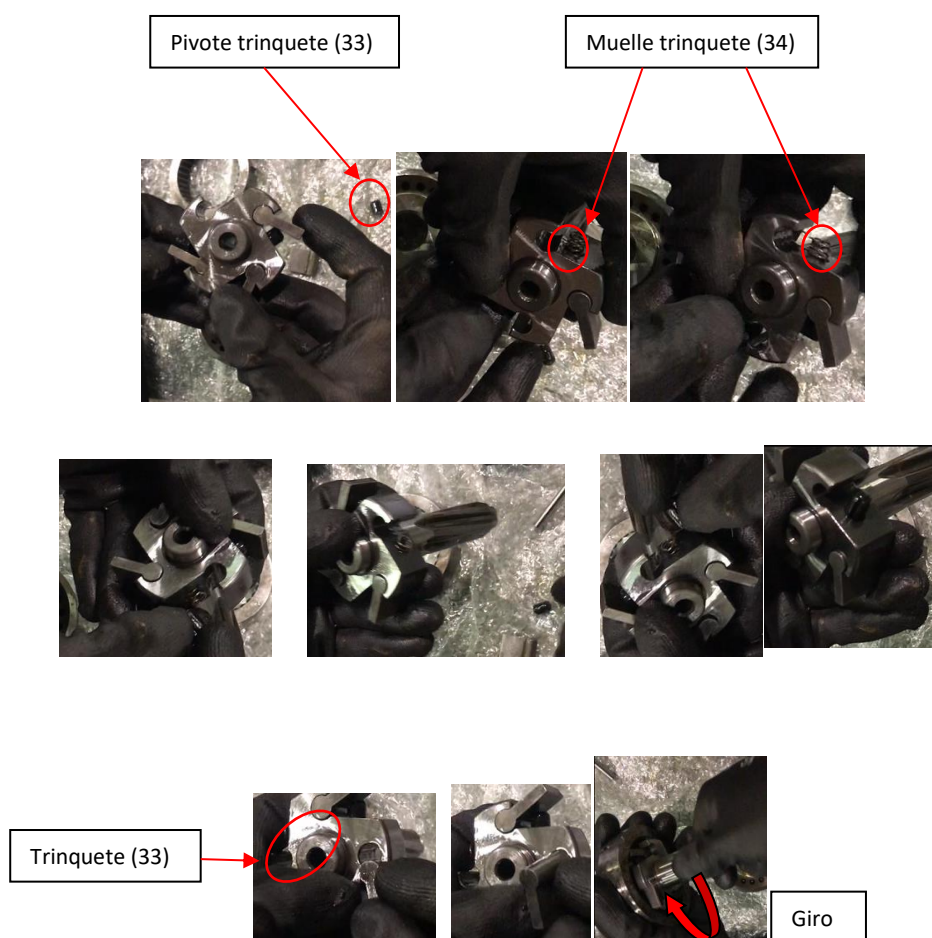




Nota: Adaptado de Segeda (2020, p.1-10)

El mecanismo que hace que el TRINQUETE (32) vuelva a la posición inicial, facilitando también el giro, se encuentra formado por PIVOTE TRINQUETE (33) y MUELLE TRINQUETE (34)

Figura 139: 13 despiece: trinquete, pivote trinquete y muelle trinquete



Nota: Adaptado de Segeda (2020, p.1-10)

La AGUJA AGUA (25) /AGUJA AIRE (25) se encuentra unida a través del TAPON DE CABEZA AIRE (1) /RACOR BARRIDO AGUA/AIRE (1) y JUNTA METALBUNA RACOR BARRIDO 1/2 "(23). Para extraer el TAPON DE CABEZA DE AIRE (1) /RACOR BARRIDO AGUA/AIRE (1) se empleó una llave inglesa.

Figura 140: 14 despiece aguja agua/aire, tapón de cabeza aire/racor barrido aguja/aire y junta metalbuna racor barrido 1/2



Nota: Adaptado de Segeda (2020, p.1-10)

Tras extraer el TAPON DE CABEZA AIRE (1) /RACOR BARRIDO AGUA/AIRE (1) que se encuentra compuesto además por una JUNTA METALBUNA RACOR BARRIDO 1/2 “, se pudo proceder a la extracción de la AGUJA AGUA (25) /AGUJA AIRE (25).

La AGUJA AGUA (25) /AGUJA AIRE (25) se extraer por arriba de la CABEZA (3) del martillo neumático rotopercutor. Se encuentra compuesto por otra pieza GOMA AGUJA AIRE/AGUA (26).

Figura 141: 15 despiece: aguja agua/ aguja aire, cabeza, goma aguja aire/aguja



Nota: Adaptado de Segeda (2020, p.1-10)

Se comprobó que la MANILLA (40) sirve para regular el aire y también como método de seguridad. Se encuentra compuesta por CUÑA ROSCADA MANILLA (40), TUERCA CUÑA MANILLA (40) y ARANDELA GROVER M10 (40).

Figura 142: 16 despiece: manilla, cuña roscada manilla, tuerca cuña manilla y arandela grover M10



Nota: Adaptado de “Fotos despiece” (p.1-10), por Segeda, 2020,(Segeda, 2020, pp. 1–10)

Después, se intentó retirar el acceso del aire del martillo neumático, es decir, el CODO ALIMENTACIÓN (35) del martillo neumático rotopercutor, pero era complicado ya que la TUERCA CODO ALIMENTACIÓN (37) estaba muy dura. Por ese motivo se empleó otro tipo de llave inglesa, más grande.

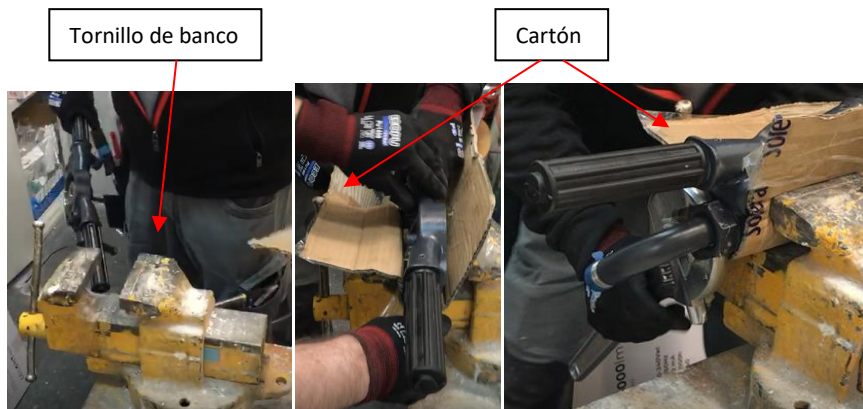
Figura 143: 17 despiece: codo alimentación, tuerca codo alimentación



Nota: Adaptado de Segeda (2020, p.1-10)

Así, mediante un tornillo de banco se sujetó la cabeza del martillo para que no se moviera y poder extraer el resto de piezas, siendo estas: la TUERCA CODO ALIMENTACIÓN (37) y la JUNTA TORICA CODO (36).

Figura 144: 18 despiece: tuerca codo alimentación y junta tórica codo



Nota: Adaptado de Segeda (2020, p.1-10)

El CODO ALIMENTACIÓN (35) se encuentra compuesto por la JUNTA TORICA CODO (36) y la TUERCA CODO ALIMENTACION (37).

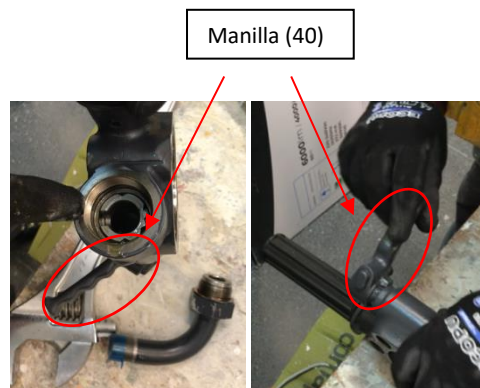
Figura 145: 19 despiece: codo alimentación, junta tórica codo y tuerca codo alimentación



Nota: Adaptado de Segeda (2020, p.1-10)

Al extraer el CODO ALIMENTACIÓN (35) se observó que tenía en la CABEZA (3) de la máquina un agujero que conectaba con el otro lado de la MANILLA (40).

Figura 146: 20 despiece: codo alimentación, cabeza y manilla



Nota: Adaptado de Segeda (2020, p.1-10)

Para extraer la MANILLA (40) se procedió a desenroscar la TUERCA CUÑA MANILLA (40) mediante una llave inglesa.

Figura 147: 21 despiece: manilla, tuerca cuña manilla



Nota: Adaptado de Segeda (2020, p.1-10)

Seguidamente se pudo extraer la CUÑA ROSCADA MANILLA (40), especialmente diseñada que hacía a la vez de pasador y la ARANDELA GROVER M10 (40).

Figura 148: 22 despiece: cuña roscada manilla y arandela grover M10



Nota: Adaptado de Segeda (2020, p.1-10)

Se intentó con una llave allen separar la MANILLA (40) porque aun habiendo extraído las piezas anteriores la MANILLA (40) continuaba encajada.

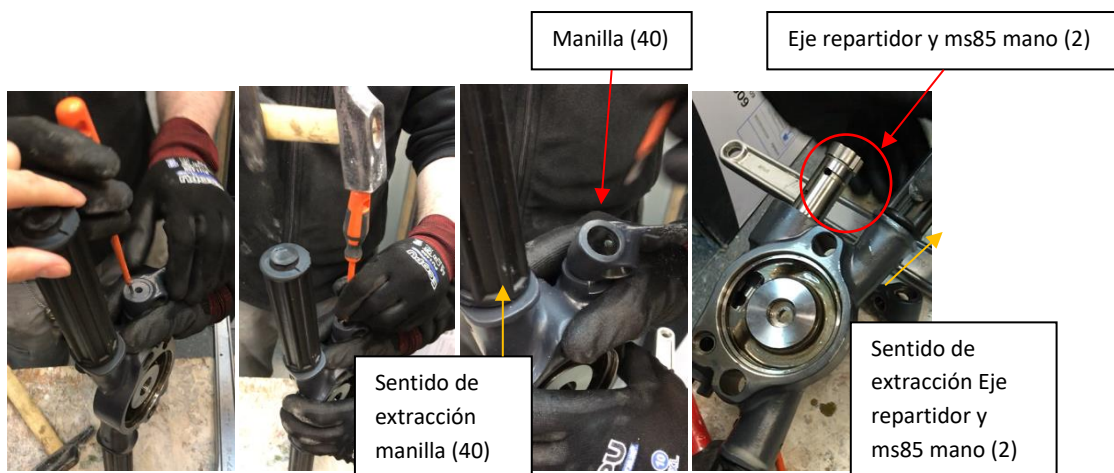
Figura 149: 23 despiece: manilla



Nota: Adaptado de Segeda (2020, p.1-10)

Sin embargo, se observó que para poder separar la MANILLA (40) no se podía realizar mediante una llave allen, sino que tenía otro tipo de sistema de extracción. Por ello, se empleó un punzón y un martillo. Aunque finalmente se pudo separar la MANILLA (40), la piza EJE REPARTIDOR Y MS85 MANO (2) que se encontraba unida a la MANILLA (40) salía en sentido contrario.

Figura 150: 24 despiece: manilla, eje repartidor y MS85 mano



Nota: Adaptado de Segeda (2020, p.1-10)

Fotos detalle de la MANILLA (40).

Figura 151: Manilla detalle



Nota: Adaptado de Segeda (2020, p.1-10)

Al intentar extraer el EJE REPARTIDOR Y MS85 MANO (2) quedó encajado, al principio se creía que se extraía con un giro específico, pero no fue así. Se estuvo estudiando como poder extraerlo hasta que finalmente se observó que en su interior tenía un TRINQUETE/EMBOLO MANILLA CABEZA (38) y un MUELLE EJE REPARTIDOR (39) que impedía la extracción de EJE REPARTIDOR Y MS85 MANO (2). Se creyó que si se aplicaba presión sobre el TRINQUETE/EMBOLO MANILLA CABEZA (38) podría extraerse fácilmente el EJE REPARTIDOR Y MS85 MANO (2).

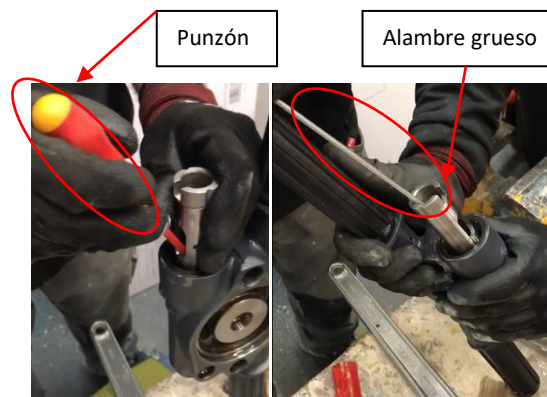
Figura 152: Detalle trinquete/embolo manilla cabeza



Nota: Adaptado de Segeda (2020, p.1-10).

Para poder realizar presión sobre el TRINQUETE/EMBOLO MANILLA CABEZA (38) se empleó un punzón. No obstante, era demasiado corto y no alcanzaba al TRINQUETE/EMBOLO MANILLA CABEZA (38) para realizar presión, por lo que se intentó realizar un útil o emplear otro tipo de herramientas como alambres gruesos. Sin embargo, con el alambre grueso tampoco se pudo realizar la suficiente presión como para poder girar el EJE REPARTIDOR Y MS85 MANO (2) y así poder extraerlo.

Figura 153: 25 despiece: trinquete/embolo manilla cabeza



Nota: Adaptado de Segeda (2020, p.1-10)

Después de varios intentos, no se pudo realizar la extracción del EJE REPARTIDOR Y MS85 MANO (2) por no tener utensilios necesarios. Además, no se pudo separar la CABEZA (3) de la EMPUÑADURA (42) por estar insertado a presión y tener un CASQUILLO PUÑO TEFLON (42) y un PASADOR ELASTICO PUÑO (42) que impedía su extracción.

Anexo C: Informes de ensayos mecánicos tracción uniaxial

Informe de ensayos

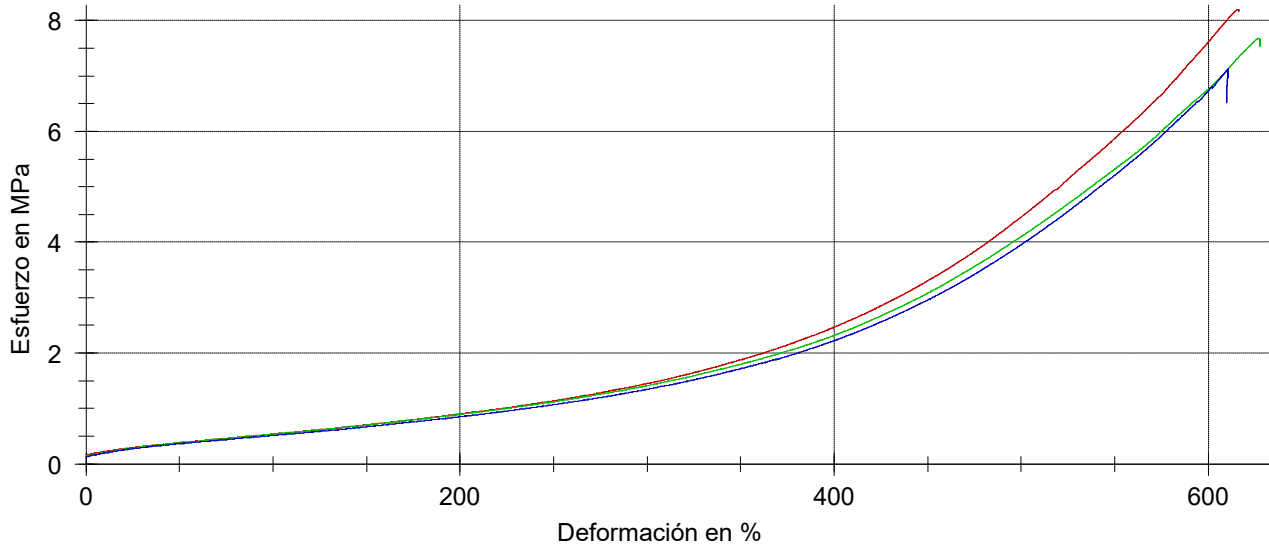
Cliente : SYNTHELAST
 Orden-Nº :
 Norma de ensayo : DIN EN 12803
 Material : Caucho tipo A
 Toma de la muestra : Tª=25,3°C HR=32,3%
 Analista : Virginia Mayor
 Observación : P 3,4,5 y 11 RM. 9,10 escape
 Datos máquina : Dinamómetro 10110, pie de rey 10115, micrómetro cod.:11019

Precarga : 3 N
 Velocidad módulo de tracción : 1 mm/min
 Velocidad de ensayo : 100 mm/min
 Longitud de sujeción en posición de inicio : 50,00 mm
 Longitud inicial recorrido estándar : 20 mm

Resultados de ensayo:

Nº	Curva	E _t MPa	σ _m MPa	ε _m %	b mm	h mm	A ₀ mm ²
‡ 3	Tipo d	-0,00936	4,05	536,93	3,677	4,713	17,3
‡ 4	Tipo d	-0,443	5,64	545,80	3,673	4,59	16,9
‡ 5	Tipo c (σ _y : Comprobar resultados)	0,989	5,22	523,22	3,657	4,65	17,0
6	Tipo c (σ _y : Comprobar resultados)	-1,43	8,20	615,57	3,673	4,41	16,2
7	Tipo c (σ _y : Comprobar resultados)	0,444	7,68	626,80	4,513	4,05	18,3
8	Tipo c (σ _y : Comprobar resultados)	1,10	7,13	610,70	4,31	4,63	20,0
‡ 9	Tipo c (σ _y : Comprobar resultados)	-0,0913	6,47	613,57	4,48	5,02	22,5
‡ 10	Tipo c (σ _y : Comprobar resultados)	0,573	6,28	557,27	4,58	4,03	18,5
‡ 11	Tipo c (σ _y : Comprobar resultados)	1,86	4,35	481,88	4,48	4,02	18,0

Gráfico Serie:



Estadística:

Serie	E_t	σ_m	ϵ_m	b	h	A_0
n = 3	MPa	MPa	%	mm	mm	mm ²
\bar{x}	0,0381	7,67	617,69	4,166	4,363	18,1
s	1,31	0,538	8,2561	0,4382	0,2928	1,9
v [%]	-	7,02	1,34	10,52	6,71	10,37

Informe de ensayos

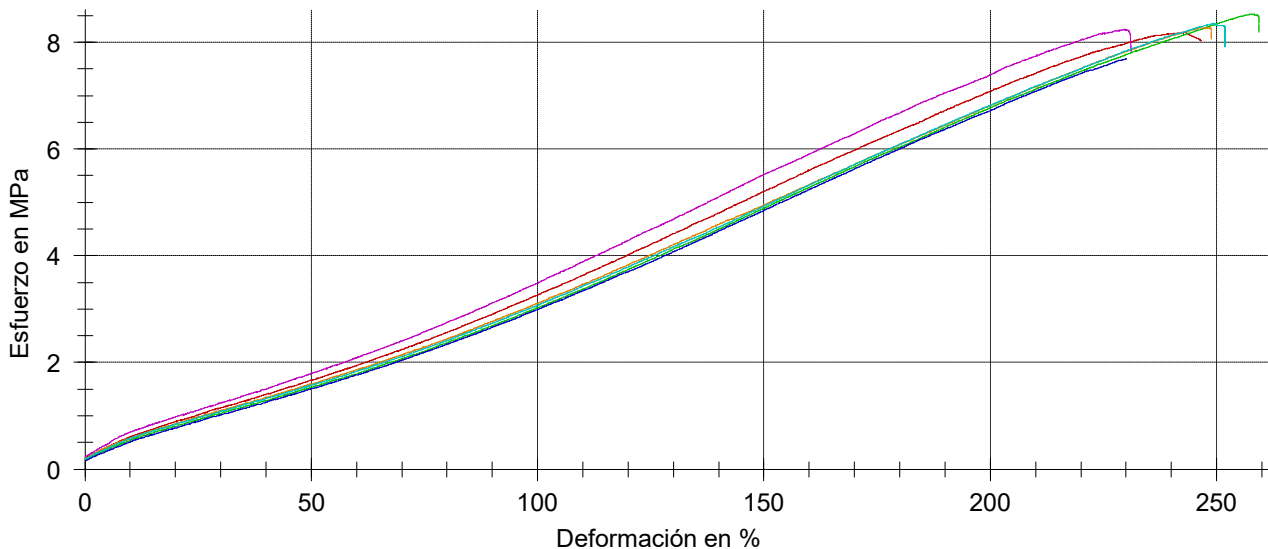
Cliente : SYNTHELAST
 Orden-Nº :
 Norma de ensayo : DIN EN 12803
 Material : Caucho tipo A
 Toma de la muestra : Tª=25,3°C HR=32,3%
 Analista : Virginia Mayor
 Observación : P 3,4,5 y 11 RM. 9,10 escape
 Datos máquina : Dinamómetro 10110, pie de rey 10115, micrómetro cod.:11019

Precarga : 2 N
 Velocidad módulo de tracción : 1 mm/min
 Velocidad de ensayo : 100 mm/min
 Longitud de sujeción en posición de inicio : 50,00 mm
 Longitud inicial recorrido estándar : 20 mm

Resultados de ensayo:

Nº	Curva	E _t MPa	σ _m MPa	ε _m %	b mm	h mm	A ₀ mm ²
1	Tipo c (σ _y : Comprobar resultados)	0,425	8,19	243,00	4,05	1,99	8,1
2	Tipo c (σ _y : Comprobar resultados)	-0,971	8,53	257,75	4,04	2,22	9,0
3	Tipo d	0,567	7,69	229,92	4,05	2,51	10,2
4	Tipo c (σ _y : Comprobar resultados)	-1,55	8,27	246,85	4,08	1,95	8,0
5	Tipo c (σ _y : Comprobar resultados)	0,428	8,24	229,52	4,06	2,04	8,3
6	Tipo c (σ _y : Comprobar resultados)	1,91	8,35	249,17	4,04	2,15	8,7

Gráfico Serie:



Estadística:

Serie	E_t	σ_m	ϵ_m	b	h	A_0
n = 6	MPa	MPa	%	mm	mm	mm ²
\bar{x}	0,134	8,21	242,70	4,053	2,143	8,7
s	1,23	0,284	11,158	0,01506	0,2059	0,8
v [%]	-	3,46	4,60	0,37	9,61	9,43

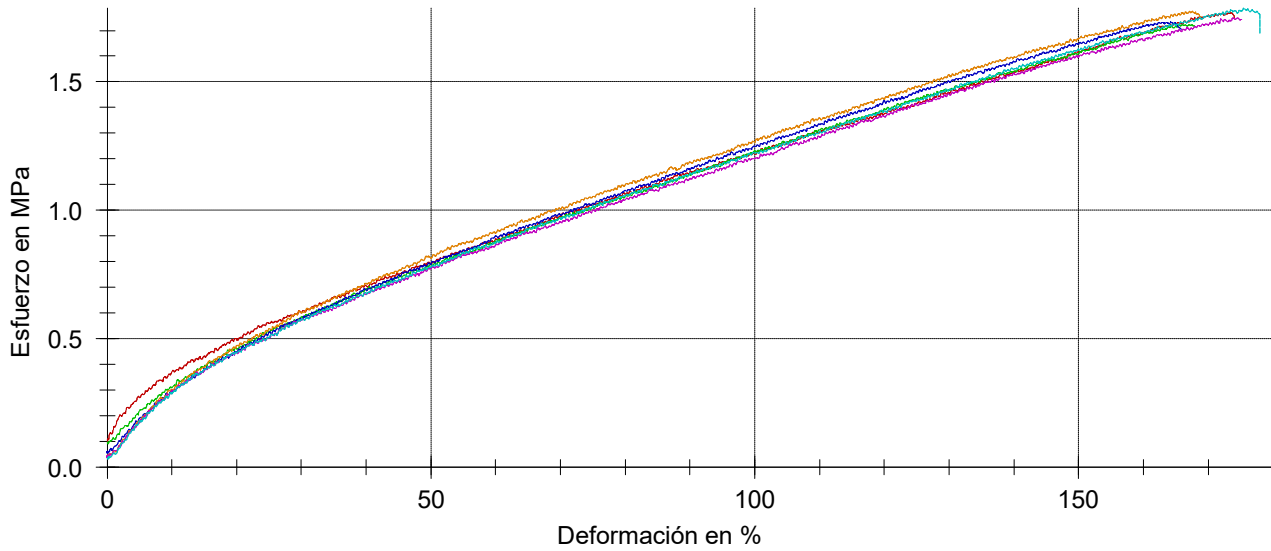
Informe de ensayos

Cliente : SYNTHELAST
 Orden-Nº :
 Norma de ensayo : DIN EN 12803
 Material : EVA D30
 Toma de la muestra : Tª=25,3°C HR=32,3%
 Tipo de probeta : Halterio tipo 5A troquel cod.:10016/04
 Analista : Virginia Mayor
 Observación :
 Datos máquina : Dinamómetro 10110, pie de rey 10115, micrómetro cod.:11019
 Precarga : 0,5 N
 Velocidad módulo de tracción : 1 mm/min
 Velocidad de ensayo : 100 mm/min
 Longitud de sujeción en posición de inicio : 50,00 mm
 Longitud inicial recorrido estándar : 20 mm

Resultados de ensayo:

Nº	Curva	E _t MPa	σ _m MPa	ε _m %	b mm	h mm	A ₀ mm ²
3	Tipo d	1,86	1,77	173,55	2,01	4,15	8,3
4	Tipo c (σ _y : Comprobar resultados)	0,890	1,72	167,40	2,107	4,19	8,8
5	Tipo c (σ _y : Comprobar resultados)	0,125	1,73	164,20	2,073	4,17	8,6
7	Tipo c (σ _y : Comprobar resultados)	2,14	1,77	167,55	2,03	4,2	8,5
8	Tipo c (σ _y : Comprobar resultados)	1,14	1,75	174,60	2,04	4,21	8,6
9	Tipo c (σ _y : Comprobar resultados)	0,673	1,79	175,45	2,037	4,19	8,5

Gráfico Serie:



Estadística:

Serie	E_t	σ_m	ϵ_m	b	h	A_0
n = 6	MPa	MPa	%	mm	mm	mm ²
\bar{x}	1,14	1,76	170,46	2,049	4,185	8,6
s	0,753	0,0246	4,6606	0,03473	0,02168	0,2
v [%]	66,13	1,40	2,73	1,69	0,52	1,86

Informe de ensayos

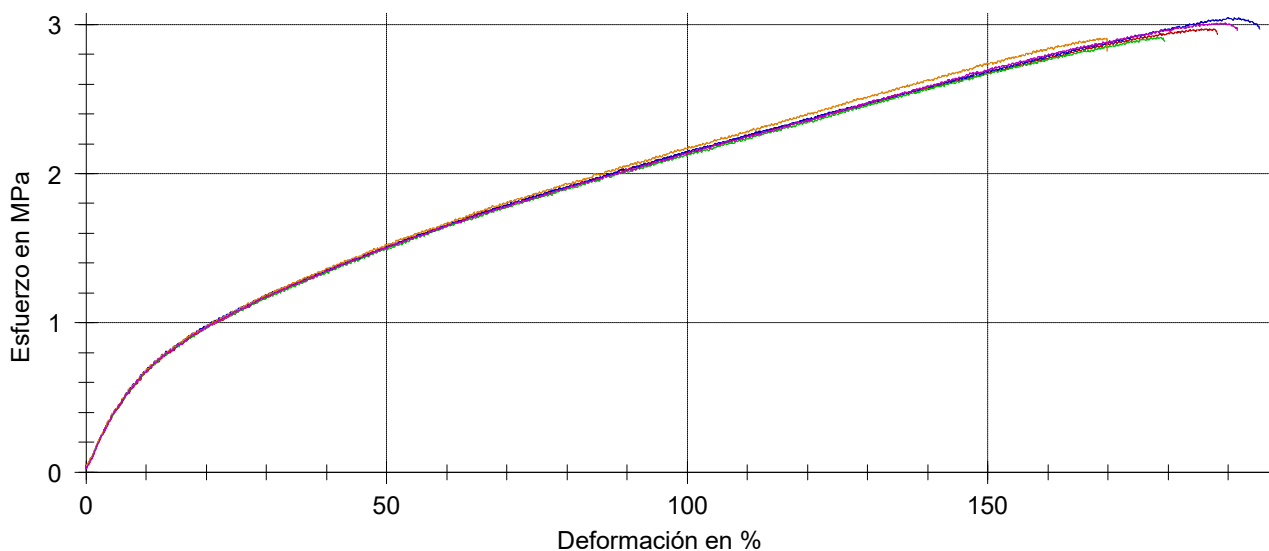
Cliente : SYNTHELAST
 Orden-Nº :
 Norma de ensayo : DIN EN 12803
 Material : EVA D50
 Toma de la muestra : Tª=25,3°C HR=32,3%
 Analista : Virginia Mayor
 Observación :
 Datos máquina : Dinamómetro 10110, pie de rey 10115, micrómetro cod.:11019

Precarga : 0,5 N
 Velocidad módulo de tracción : 1 mm/min
 Velocidad de ensayo : 100 mm/min
 Longitud de sujeción en posición de inicio : 50,00 mm
 Longitud inicial recorrido estándar : 20 mm

Resultados de ensayo:

Nº	Curva	E _t MPa	σ _m MPa	ε _m %	b mm	h mm	A ₀ mm ²
1	Tipo c (σ _y : Comprobar resultados)	4,27	2,97	186,15	1,767	4,273	7,5
2	Tipo c (σ _y : Comprobar resultados)	5,74	2,91	178,17	1,857	4,3	8,0
3	Tipo c (σ _y : Comprobar resultados)	4,97	3,05	189,77	1,793	4,253	7,6
4	Tipo c (σ _y : Comprobar resultados)	4,81	2,91	168,67	1,757	4,233	7,4
5	Tipo c (σ _y : Comprobar resultados)	5,09	3,01	188,70	1,863	4,253	7,9

Gráfico Serie:



Estadística:

Serie	E_t	σ_m	ϵ_m	b	h	A_0
n = 5	MPa	MPa	%	mm	mm	mm ²
\bar{x}	4,98	2,97	182,29	1,807	4,263	7,7
s	0,530	0,0607	8,8645	0,04997	0,02521	0,2
v [%]	10,66	2,04	4,86	2,76	0,59	3,10

Informe de ensayos

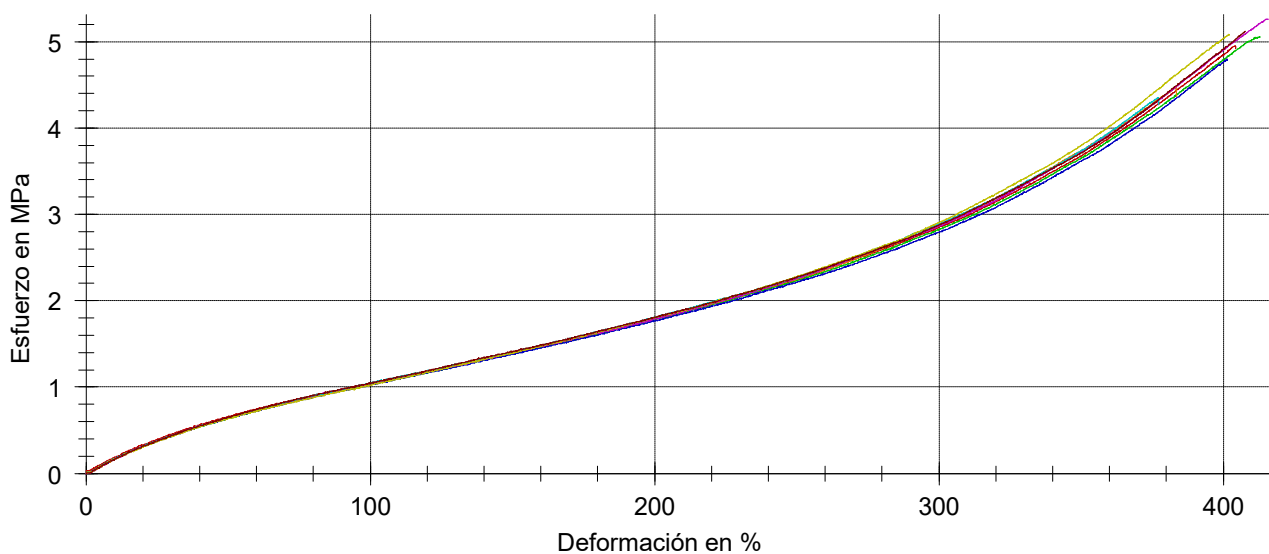
Cliente : SYNTHELAST
 Orden-Nº :
 Norma de ensayo : DIN EN 12803
 Material : PU tipo A
 Toma de la muestra : Tª=25,3°C HR=32,3%
 Analista : Virginia Mayor
 Observación :
 Datos máquina : Dinamómetro 10110, pie de rey 10115, micrómetro cod.:11019

Precarga : 0,2 N
 Velocidad módulo de tracción : 1 mm/min
 Velocidad de ensayo : 100 mm/min
 Longitud de sujeción en posición de inicio : 50,00 mm
 Longitud inicial recorrido estándar : 20 mm

Resultados de ensayo:

Nº	Curva	E _t MPa	σ _m MPa	ε _m %	b mm	h mm	A ₀ mm ²
1	Tipo d	-0,301	4,95	404,15	2,22	4,673	10,4
2	Tipo d	1,16	5,06	412,62	2,187	4,73	10,3
3	Tipo d	-1,20	4,80	401,35	2,163	4,72	10,2
4	Tipo d	0,913	4,47	383,20	2,153	4,68	10,1
5	Tipo d	1,44	5,27	415,35	2,12	4,753	10,1
6	Tipo d	-0,170	4,35	377,22	2,23	4,79	10,7
7	Tipo d	-0,393	5,09	401,87	2,26	4,673	10,6
8	Tipo d	1,18	5,12	407,80	2,243	4,667	10,5

Gráfico Serie:



Estadística:

Serie	E_t	σ_m	ϵ_m	b	h	A_0
n = 8	MPa	MPa	%	mm	mm	mm ²
\bar{x}	0,328	4,89	400,45	2,197	4,711	10,3
s	0,962	0,325	13,511	0,049	0,0451	0,2
v [%]	-	6,65	3,37	2,23	0,96	2,12

Informe de ensayos

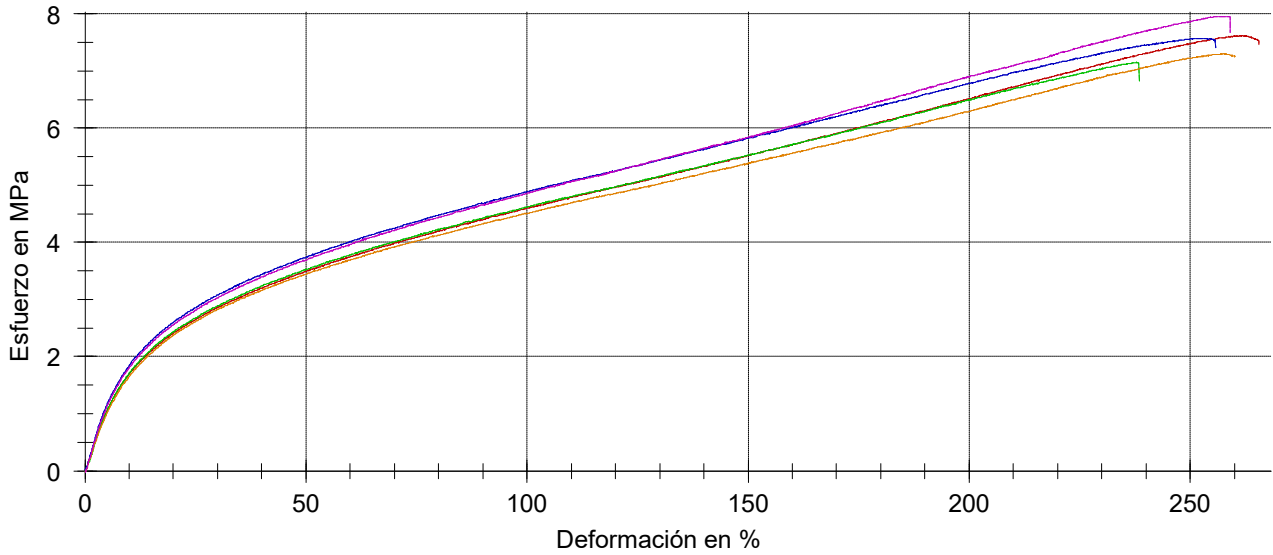
Cliente : SYNTHELAST
 Orden-Nº :
 Norma de ensayo : DIN EN 12803
 Material : PU tipo B
 Toma de la muestra : Tª=25,3°C HR=32,3%
 Analista : Virginia Mayor
 Observación :
 Datos máquina : Dinamómetro 10110, pie de rey 10115, micrómetro cod.:11019

Precarga : 0,5 N
 Velocidad módulo de tracción : 1 mm/min
 Velocidad de ensayo : 100 mm/min
 Longitud de sujeción en posición de inicio : 50,00 mm
 Longitud inicial recorrido estándar : 20 mm

Resultados de ensayo:

Nº	Curva	E _t MPa	σ _m MPa	ε _m %	b mm	h mm	A ₀ mm ²
1	Tipo c (σ _y : Comprobar resultados)	8,95	7,62	262,42	1,783	4,223	7,5
2	Tipo c (σ _y : Comprobar resultados)	10,4	7,15	237,90	1,817	4,227	7,7
‡ 3	Tipo c (σ _y : Comprobar resultados)	11,4	6,22	185,75	1,807	4,24	7,7
4	Tipo c (σ _y : Comprobar resultados)	12,4	7,57	252,27	1,72	4,217	7,3
5	Tipo c (σ _y : Comprobar resultados)	9,01	7,31	257,52	1,827	4,223	7,7
6	Tipo c (σ _y : Comprobar resultados)	12,8	7,96	257,25	1,727	4,233	7,3

Gráfico Serie:



Estadística:

Serie	E_t	σ_m	ϵ_m	b	h	A_0
n = 5	MPa	MPa	%	mm	mm	mm ²
\bar{x}	10,7	7,52	253,47	1,775	4,225	7,5
s	1,81	0,311	9,4177	0,04959	0,006055	0,2
v [%]	16,94	4,13	3,72	2,79	0,14	2,80

Anexo D: Informes de ensayos de histéresis elástica

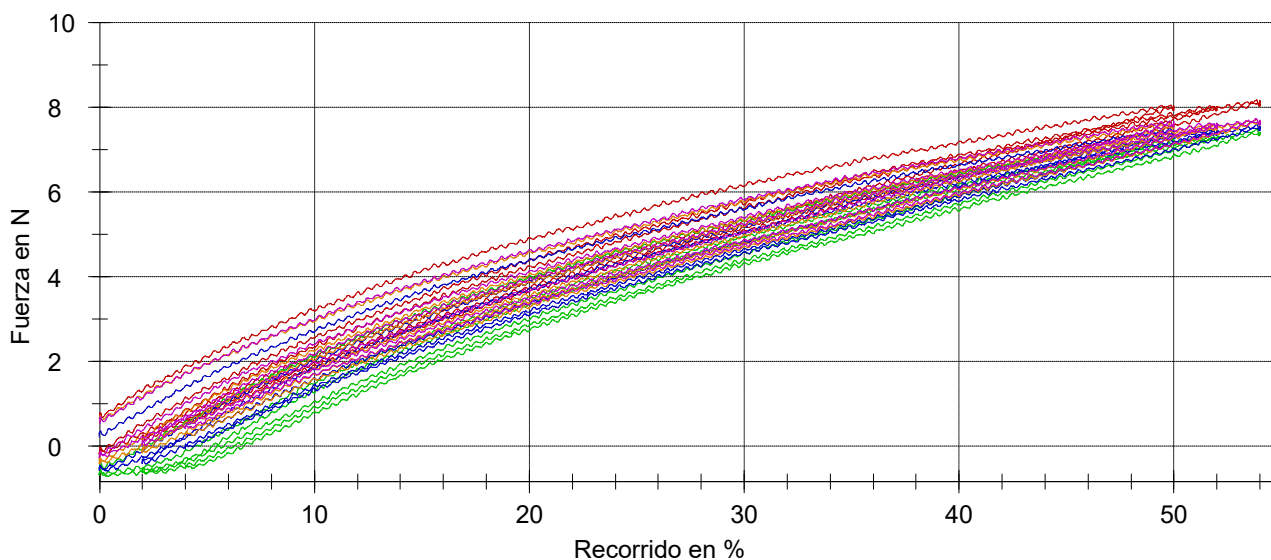
Informe de ensayos

Cliente : Synthelast
 Tipo e identificación : histéresis elástica_caucho tipo A
 Material : caucho
 Tipo de probeta : haltio tipo 2
 Analista : Virginia Mayor
 Observación :
 Datos máquina : Dinamómetro 10110, pie de rey 10115

Resultados de ensayo:

Nº	Índice	WiCar Nmm	WiDesc Nmm	Δ Wi Nmm	F _{max} N	a ₀ mm	b ₀ mm
1	1	129,83	109,67	20,17	8,17	4,22	4,47
	2	125,87	113,56	12,31			
	3	130,19	118,76	11,44			
2	1	106,94	88,08	18,86	7,47	4,37	4,44
	2	103,38	91,98	11,40			
	3	108,12	97,12	11,00			
3	1	117,01	96,33	20,68	7,59	4,11	4,55
	2	111,76	99,49	12,27			
	3	115,69	104,81	10,88			
4	1	121,62	101,07	20,55	7,71	4,1	4,52
	2	116,48	104,48	12,00			
	3	120,21	108,85	11,36			
5	1	122,54	103,58	18,97	7,72	4,14	4,52
	2	118,63	106,23	12,40			
	3	121,96	110,53	11,44			

Gráfico Serie:



Estadística:

Serie n = 5	F _{max} N	a ₀ mm	b ₀ mm
\bar{x}	7,73	4,188	4,5
s	0,266	0,1121	0,04416
v [%]	3,44	2,68	0,98

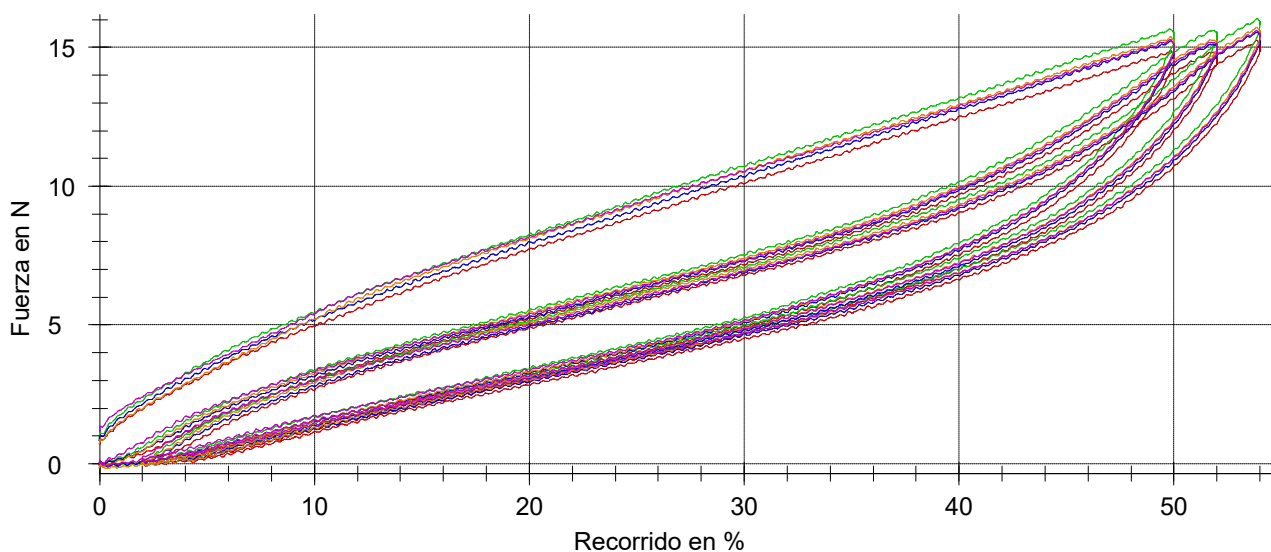
Informe de ensayos

Cliente : Synthelast
 Tipo e identificación : histéresis elástica_caucho tipo B
 Material : caucho
 Tipo de probeta : haltio tipo 2
 Analista : Virginia Mayor
 Observación :
 Datos máquina : Dinamómetro 10110, pie de rey 10115

Resultados de ensayo:

Nº	Índice	WiCar Nmm	WiDesc Nmm	Δ Wi Nmm	F _{max} N	a ₀ mm	b ₀ mm
1	1	217,12	115,25	101,88	15,3	1,86	4,63
	2	173,99	118,65	55,34			
	3	176,21	124,26	51,95			
2	1	231,81	123,53	108,28	16,0	1,88	4,7
	2	184,44	127,39	57,05			
	3	186,54	132,94	53,59			
3	1	223,47	118,64	104,83	15,6	1,86	4,66
	2	177,58	121,70	55,88			
	3	179,76	127,91	51,85			
4	1	226,27	119,63	106,64	15,7	1,88	4,69
	2	180,55	123,99	56,56			
	3	183,16	129,63	53,53			
5	1	227,85	121,50	106,35	15,6	1,82	4,71
	2	180,35	124,71	55,64			
	3	182,46	130,59	51,87			

Gráfico Serie:



Estadística:

Serie n = 5	F _{max} N	a ₀ mm	b ₀ mm
\bar{x}	15,6	1,86	4,678
s	0,281	0,02449	0,03271
v [%]	1,80	1,32	0,70

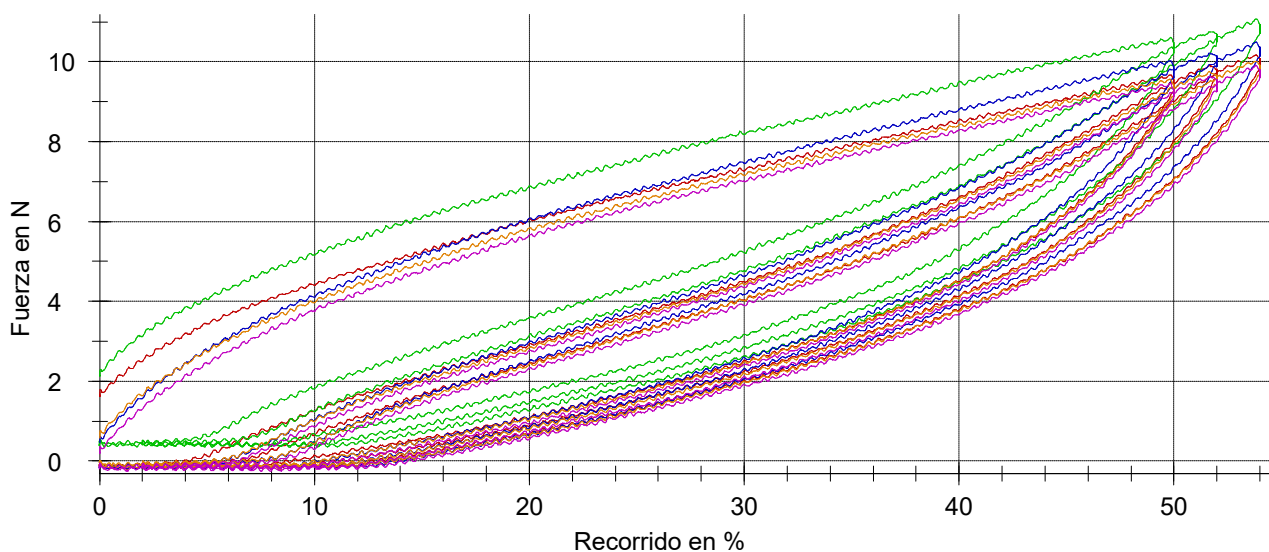
Informe de ensayos

Cliente : Synthelast
 Tipo e identificación : histéresis elástica_EVA D30
 Material : EVA D30
 Tipo de probeta : haltio tipo 2
 Analista : Virginia Mayor
 Observación :
 Datos máquina : Dinamómetro 10110, pie de rey 10115

Resultados de ensayo:

Nº	Índice	WiCar Nmm	WiDesc Nmm	Δ Wi Nmm	F _{max} N	a ₀ mm	b ₀ mm
1	1	161,16	60,37	100,80	10,2	2,05	4,77
	2	107,77	62,19	45,58			
	3	106,39	64,10	42,29			
2	1	182,22	77,29	104,93	11,1	2,1	4,85
	2	126,22	77,91	48,31			
	3	125,00	80,33	44,67			
3	1	160,66	62,17	98,49	10,5	2,14	4,82
	2	110,14	63,98	46,17			
	3	109,43	66,01	43,42			
4	1	154,32	59,51	94,81	10,0	2,14	4,86
	2	105,36	61,11	44,25			
	3	105,12	63,56	41,56			
5	1	149,73	57,51	92,21	9,90	2,1	4,79
	2	102,75	58,80	43,95			
	3	102,03	61,46	40,57			

Gráfico Serie:



Estadística:

Serie n = 5	F _{max} N	a ₀ mm	b ₀ mm
\bar{x}	10,3	2,106	4,818
s	0,472	0,03715	0,03834
v [%]	4,57	1,76	0,80

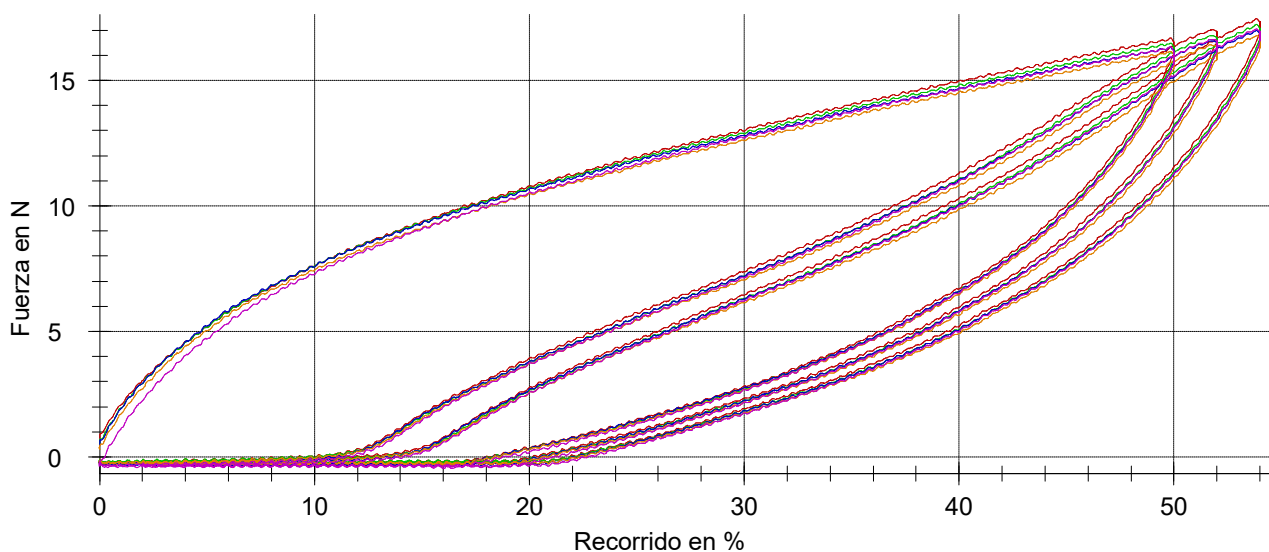
Informe de ensayos

Cliente : Synthelast
 Tipo e identificación : histéresis elástica_EVA D50
 Material : EVA D50
 Tipo de probeta : haltio tipo 2
 Analista : Virginia Mayor
 Observación :
 Datos máquina : Dinamómetro 10110, pie de rey 10115

Resultados de ensayo:

Nº	Índice	WiCar Nmm	WiDesc Nmm	Δ Wi Nmm	F _{max} N	a ₀ mm	b ₀ mm
1	1	280,04	80,64	199,40	17,5	1,88	4,98
	2	168,60	83,87	84,74			
	3	165,49	86,82	78,67			
2	1	277,63	79,04	198,59	17,2	1,84	4,86
	2	165,05	81,54	83,51			
	3	161,78	85,01	76,78			
3	1	275,93	78,35	197,58	17,0	1,85	5,01
	2	163,84	80,58	83,25			
	3	160,38	83,50	76,88			
4	1	271,28	77,14	194,14	16,8	1,87	4,92
	2	160,96	79,00	81,97			
	3	157,44	81,84	75,60			
5	1	271,22	76,51	194,71	17,1	1,89	4,97
	2	162,08	78,96	83,13			
	3	159,02	82,02	77,00			

Gráfico Serie:



Estadística:

Serie n = 5	F _{max} N	a ₀ mm	b ₀ mm
\bar{x}	17,1	1,866	4,948
s	0,252	0,02074	0,05891
v [%]	1,47	1,11	1,19

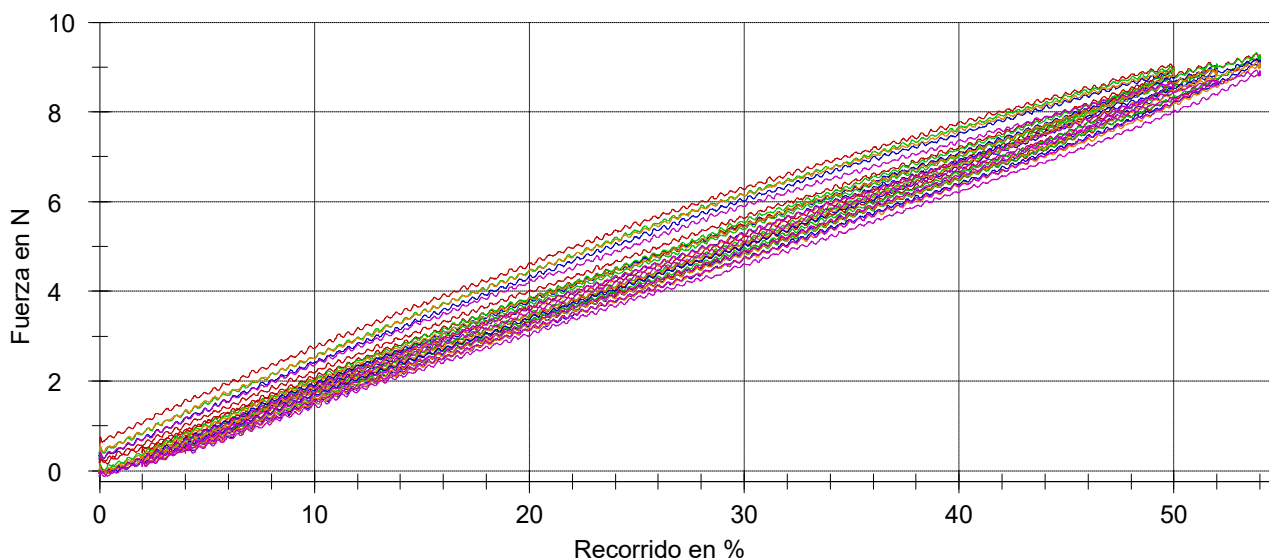
Informe de ensayos

Cliente : Synthelast
 Tipo e identificación : histéresis elástica_PU_tipo A
 Material : PU
 Tipo de probeta : haltio tipo 2
 Analista : Virginia Mayor
 Observación :
 Datos máquina : Dinamómetro 10110, pie de rey 10115

Resultados de ensayo:

Nº	Índice	WiCar Nmm	WiDesc Nmm	Δ Wi Nmm	F _{max} N	a ₀ mm	b ₀ mm
1	1	131,67	111,10	20,57	9,31	2,79	4,81
	2	127,09	114,90	12,19			
	3	132,01	119,91	12,10			
2	1	127,92	108,16	19,76	9,32	2,88	4,83
	2	124,01	112,75	11,25			
	3	129,50	118,50	11,01			
3	1	124,77	105,77	19,00	9,18	2,88	4,74
	2	121,74	110,30	11,44			
	3	126,89	115,82	11,07			
4	1	127,32	107,05	20,27	9,14	2,86	4,73
	2	122,06	110,14	11,92			
	3	126,57	115,16	11,41			
5	1	121,78	102,89	18,89	8,93	2,86	4,78
	2	118,07	107,25	10,82			
	3	123,39	112,40	10,99			

Gráfico Serie:



Estadística:

Serie n = 5	F _{max} N	a ₀ mm	b ₀ mm
\bar{x}	9,18	2,854	4,778
s	0,156	0,03715	0,04324
v [%]	1,70	1,30	0,91

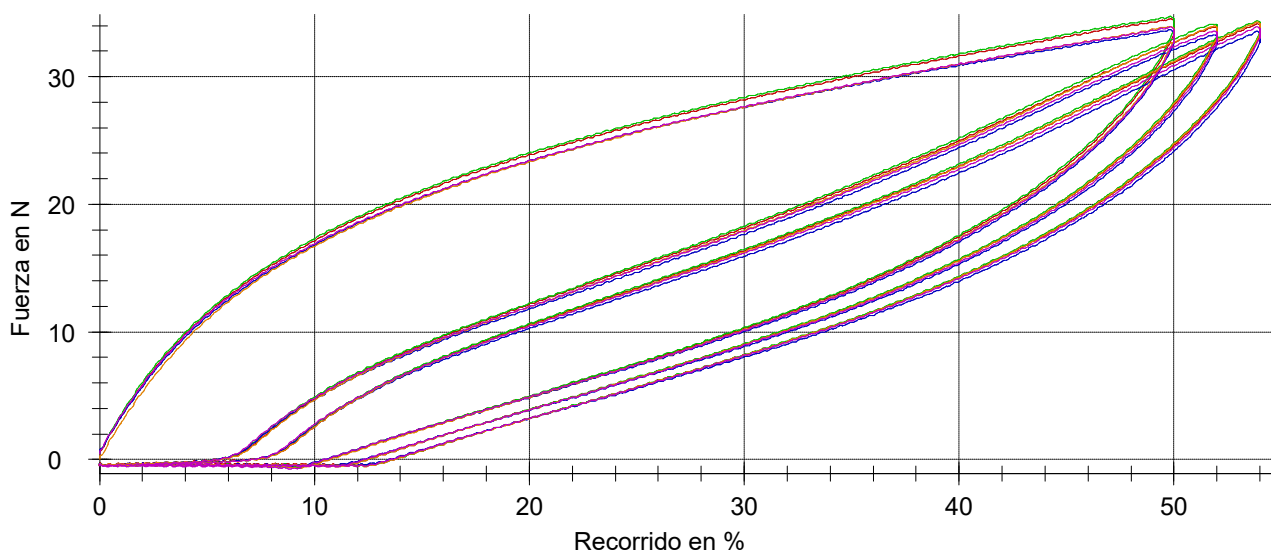
Informe de ensayos

Cliente : Synthelast
 Tipo e identificación : histéresis elástica_PU_tipo B
 Material : PU_tipo B
 Tipo de probeta : haltio tipo 2
 Analista : Virginia Mayor
 Observación :
 Datos máquina : Dinamómetro 10110, pie de rey 10115

Resultados de ensayo:

Nº	Índice	Wi _{Car}	Wi _{Desc}	Δ Wi	F _{max}	a ₀	b ₀
		Nmm	Nmm	Nmm	N	mm	mm
1	1	603,04	233,74	369,30	34,5	2,82	4,87
	2	408,62	232,30	176,32			
	3	401,42	237,93	163,49			
2	1	607,13	235,28	371,85	34,7	1,8	4,87
	2	412,14	233,66	178,48			
	3	404,22	239,05	165,17			
3	1	589,86	228,48	361,38	33,7	1,83	4,85
	2	399,20	228,28	170,91			
	3	392,15	233,39	158,76			
4	1	589,00	230,63	358,37	34,3	1,81	4,89
	2	405,57	231,98	173,59			
	3	400,35	237,89	162,46			
5	1	592,03	230,07	361,96	33,9	1,8	4,84
	2	403,98	230,01	173,98			
	3	397,48	236,08	161,40			

Gráfico Serie:



Estadística:

Serie n = 5	F _{max} N	a ₀ mm	b ₀ mm
\bar{x}	34,2	2,012	4,864
s	0,430	0,4519	0,01949
v [%]	1,26	22,46	0,40

Anexo E: Planos

D

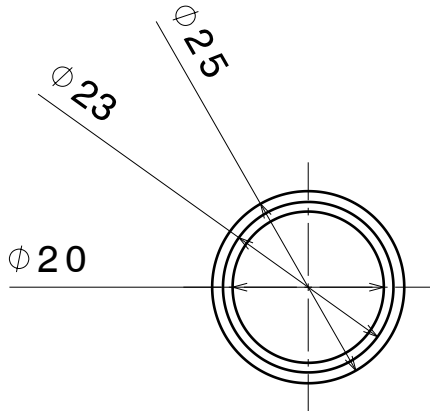
C

B

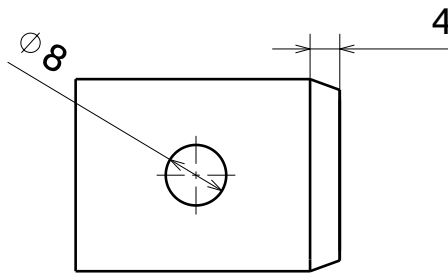
A

4

4



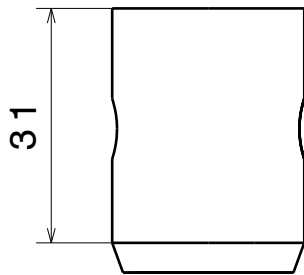
Front view
Scale: 1:1



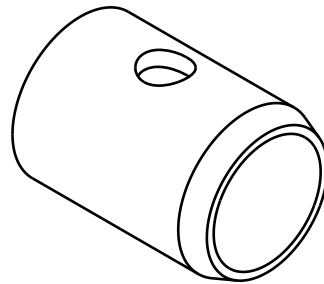
Left view
Scale: 1:1

3

3



Top view
Scale: 1:1



Isometric view
Scale: 1:1

2

2

DESIGNED BY:
Beatriz
DATE:
27/08/2021
CHECKED BY:
XXX
DATE:
XXX

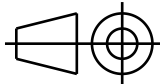
Casquillo

I	-
H	-
G	-
F	-
E	-
D	-
C	-
B	-
A	-

1

1

SIZE
A4



DASSAULT SYSTEMES

SCALE
1:1

WEIGHT (kg)
XXX

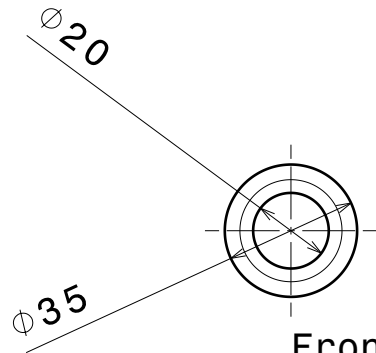
DRAWING NUMBER
XXX

SHEET
1 / 7

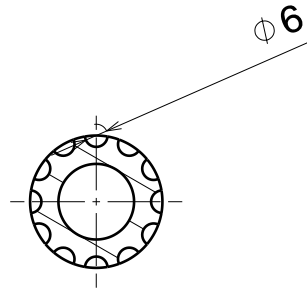
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

D

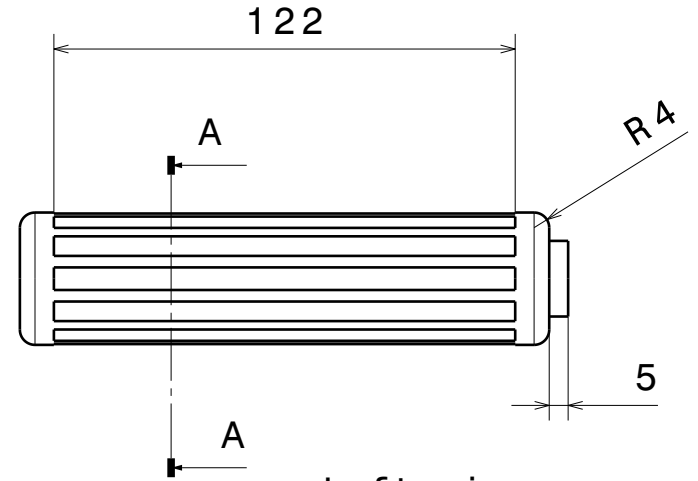
A



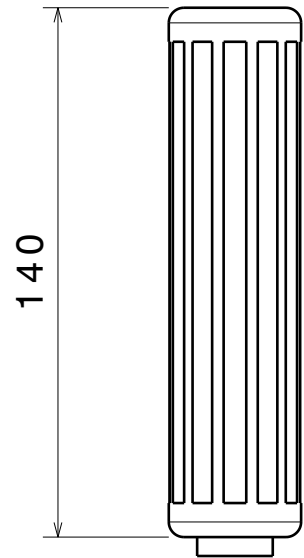
Front view
Scale: 1:2



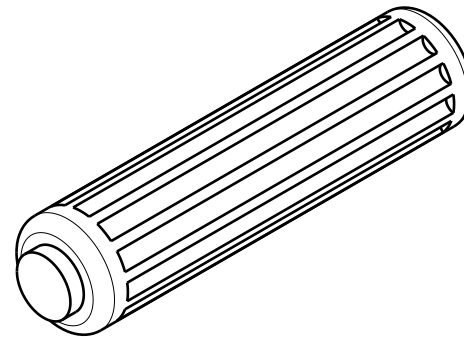
Section view A-A
Scale: 1:2



Left view
Scale: 1:2



Top view
Scale: 1:2



Isometric view
Scale: 1:2

DESIGNED BY: Beatriz		<h1>"Segeda original"</h1>		I	-
DATE: 27/08/2021				H	-
CHECKED BY: XXX		<h2>DASSAULT SYSTEMES</h2>		G	-
DATE: XXX				F	-
SIZE A4		<h3>DASSAULT SYSTEMES</h3>		E	-
SCALE 1:2	WEIGHT (kg) XXX			D	-
DRAWING NUMBER XXX		SHEET 2/7		C	-
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.				B	-
				A	-

D

C

B

A

D

A

4

4

3

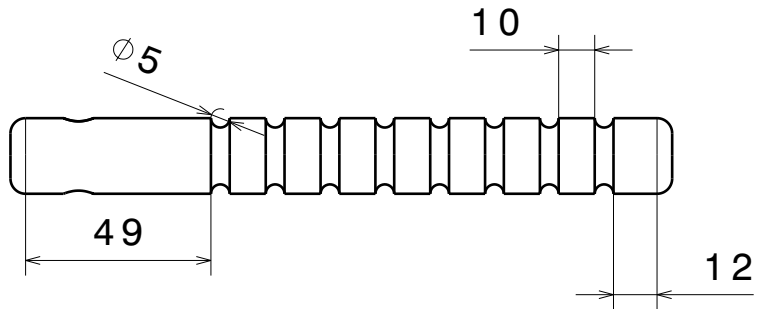
3

2

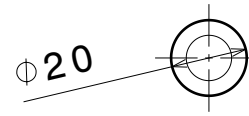
2

1

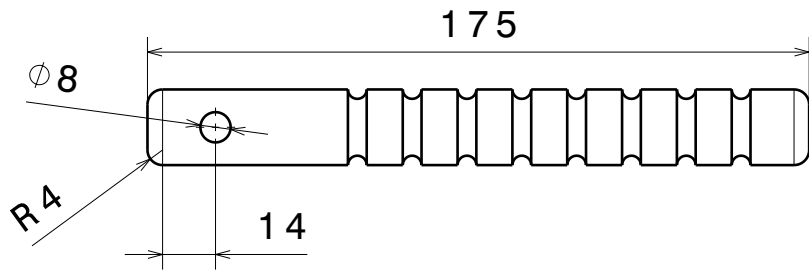
1



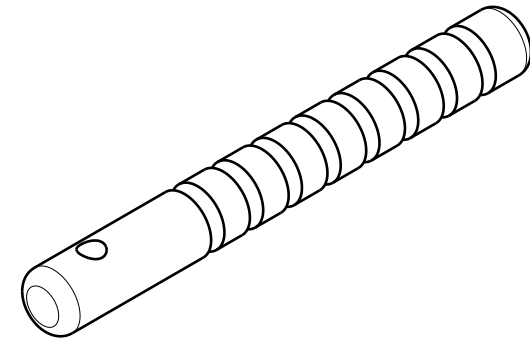
Front view
Scale: 1:2



Left view
Scale: 1:2



Top view
Scale: 1:2



Isometric view
Scale: 1:2

DESIGNED BY: Beatriz		<h1>Vástago de acero</h1>		I	-
DATE: 27/08/2021				H	-
CHECKED BY: XXX		<h2>DASSAULT SYSTEMES</h2>		G	-
DATE: XXX				F	-
SIZE A4		<h3>DASSAULT SYSTEMES</h3>		E	-
SCALE 1:2	WEIGHT (kg) XXX			D	-
DRAWING NUMBER XXX		<h3>DASSAULT SYSTEMES</h3>		C	-
SHEET 6/7				B	-
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.				A	-

D

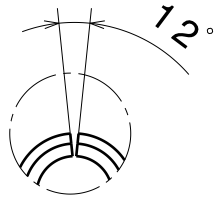
C

B

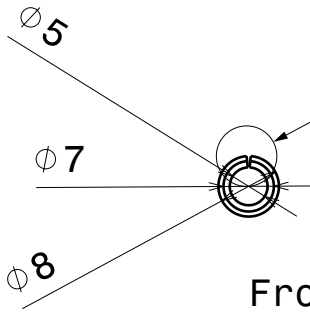
A

4

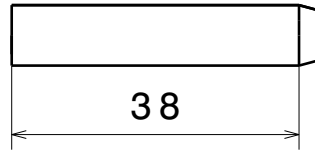
4



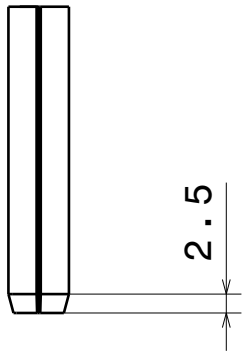
Detail A
Scale: 2:1



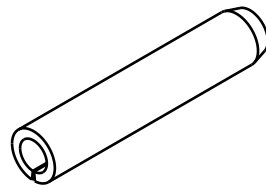
Front view
Scale: 1:1



Left view
Scale: 1:1



Top view
Scale: 1:1



Isometric view
Scale: 1:1

3

3

2

2

1

1

DESIGNED BY:
Beatriz

DATE:
27/08/2021

CHECKED BY:
XXX

DATE:
XXX

Pasador elástico

I	-
H	-
G	-
F	-
E	-
D	-
C	-
B	-
A	-

SIZE
A4

DASSAULT SYSTEMES

SCALE
1:1

WEIGHT (kg)
XXX

DRAWING NUMBER
XXX

SHEET
5/7

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

D

A

D

C

B

A

4

4

3

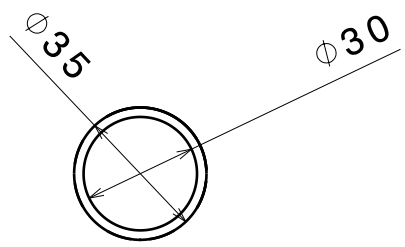
3

2

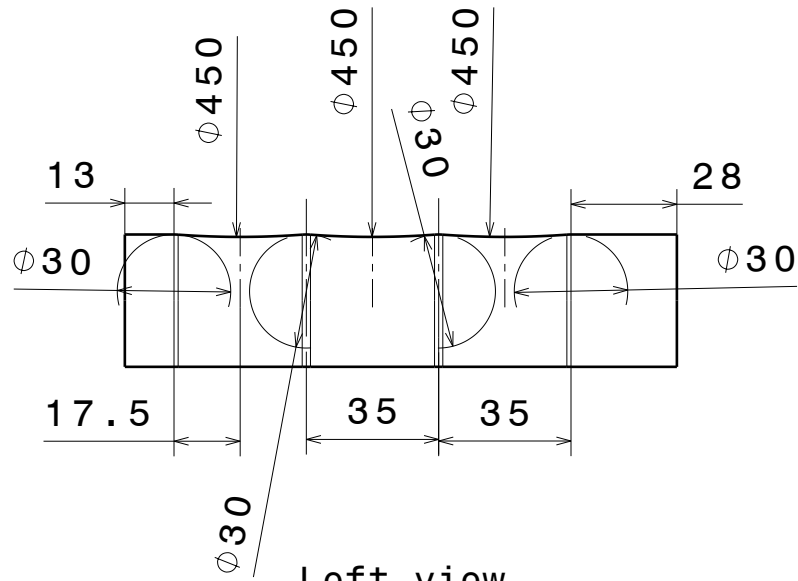
2

1

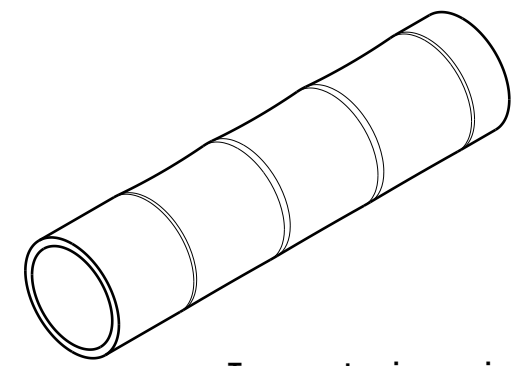
1



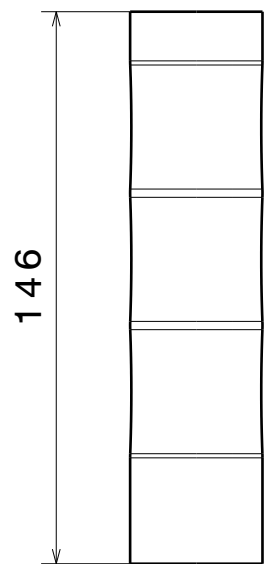
Front view
Scale: 1:2



Left view
Scale: 1:2



Isometric view
Scale: 1:2



Top view
Scale: 1:2

DESIGNED BY: Beatriz	
DATE: 24/09/2021	
CHECKED BY: XXX	
DATE: XXX	
SIZE A4	
SCALE 1:2	WEIGHT (kg) XXX

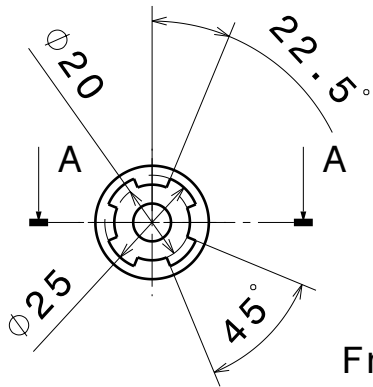
"R1" parte externa	
DRAWING NUMBER XXX	SHEET 3/7

I	-
H	-
G	-
F	-
E	-
D	-
C	-
B	-
A	-

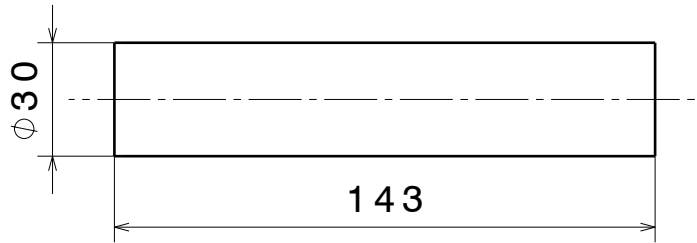
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

D

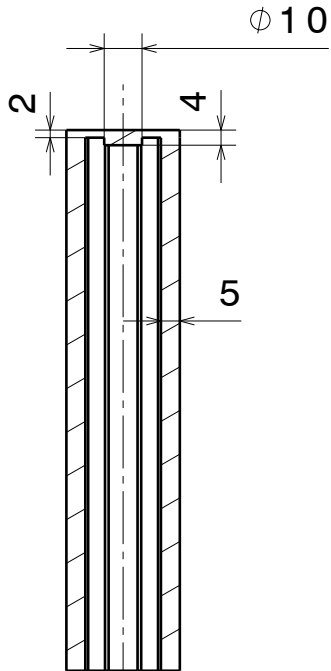
A



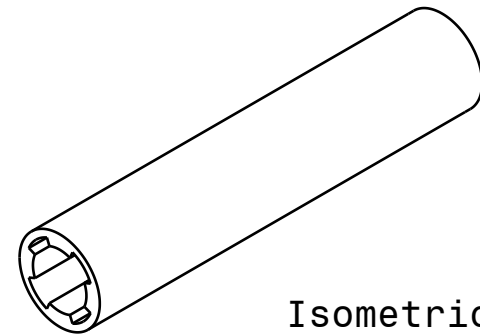
Front view
Scale: 1:2



Left view
Scale: 1:2



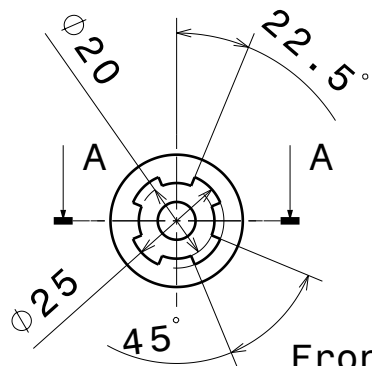
Section view A-A
Scale: 1:2



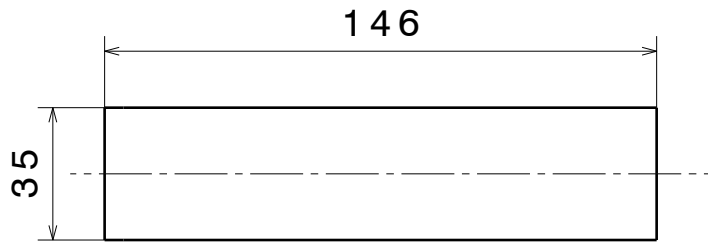
Isometric view
Scale: 1:2

DESIGNED BY: Beatriz		"R1" Parte interna		I	-
DATE: 27/09/2021				H	-
CHECKED BY: XXX		DASSAULT SYSTEMES		G	-
DATE: XXX				F	-
SIZE A4		DASSAULT SYSTEMES		E	-
SCALE 1:2	WEIGHT (kg) XXX			DRAWING NUMBER XXX	
		SHEET 4/7		C	-
				B	-
				A	-

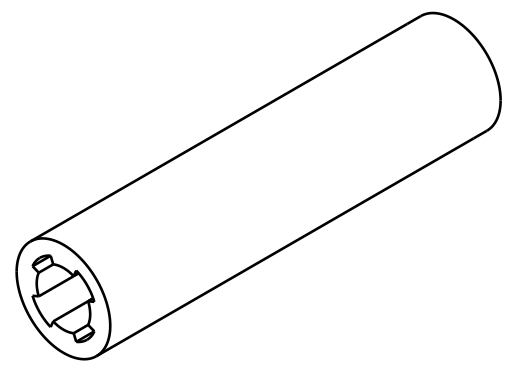
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.



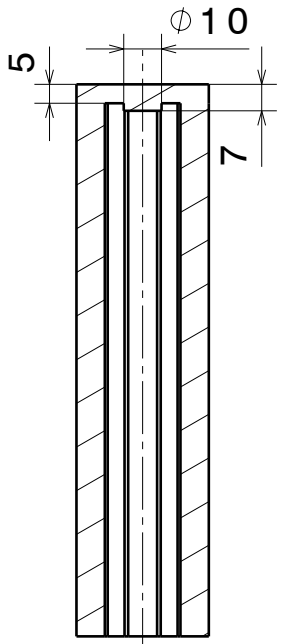
Front view
Scale: 1:2



Left view
Scale: 1:2



Isometric view
Scale: 1:2



Section view A-A
Scale: 1:2

DESIGNED BY: Beatriz		<h1>"R2" un elemento</h1>		I	-
DATE: 27/09/2021				H	-
CHECKED BY: XXX		<h2>DASSAULT SYSTEMES</h2>		G	-
DATE: XXX				F	-
SIZE A4		<h3>DASSAULT SYSTEMES</h3>		E	-
SCALE 1:2	WEIGHT (kg) XXX			D	-
DRAWING NUMBER XXX		<h3>7/7</h3>		C	-
SHEET 7/7				B	-
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.				A	-

4
3
2
1

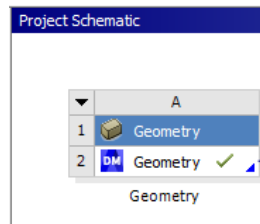
4
3
2
1

D C B A

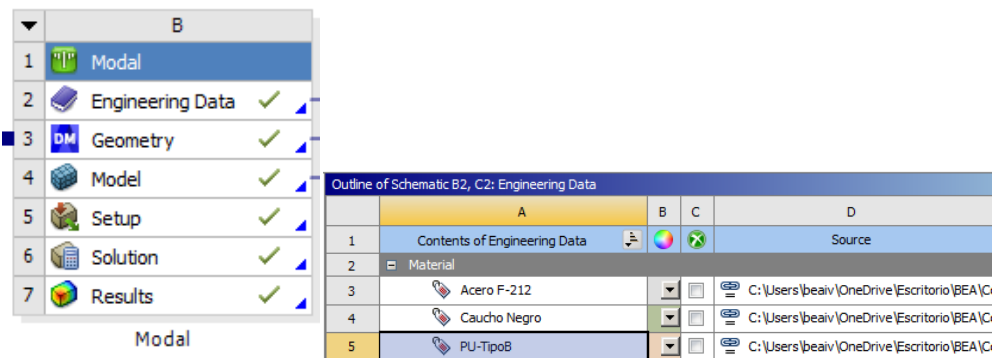
D A

Anexo F: Explicación detallada del proceso de Ansys

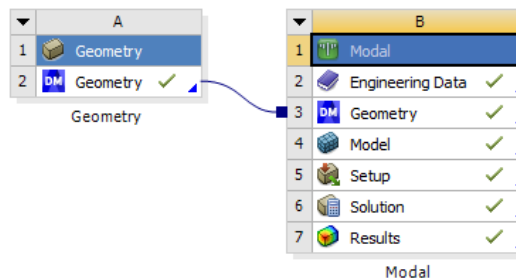
1º) En el *Project Schematic*, se selecciona el módulo de *Geometry* de *Workbench*, para dibujar la empuñadura.



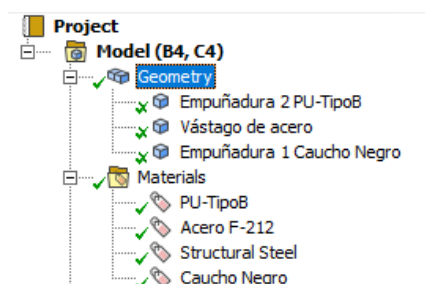
2º) Se introducen las propiedades de los materiales en el módulo de *Engineering Data*, abriendo previamente el módulo de *Modal Analysis*.



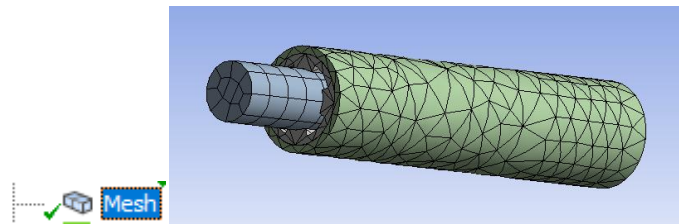
Se realiza conexión entre el módulo de *Geometry* de *Workbench* con el módulo de *Modal Analysis*.



3º) Se abre el proyecto *Multiple System-Mechanical* con objeto de asociar el material a la geometría.



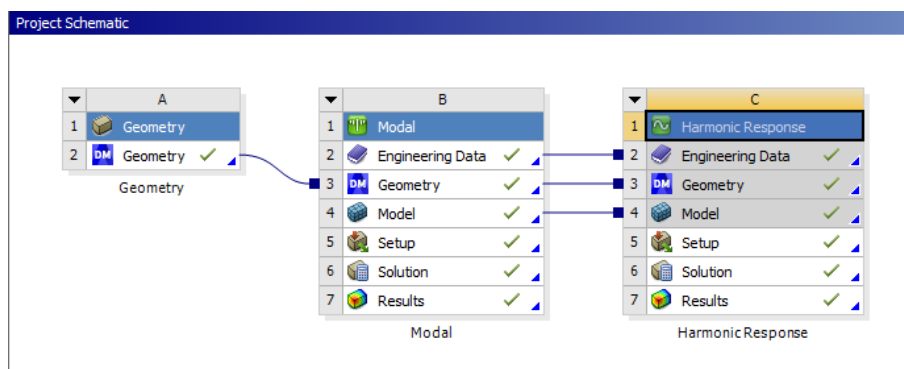
4º) Se realiza el mallado, *Mesh*, del producto



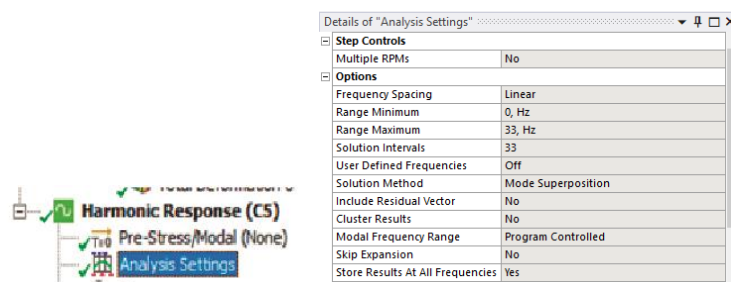
5º) Se realiza el *Modal Analysis*, introduciendo un anclaje, *Fixed Support*, para obtener las frecuencias naturales, se puede observar en el punto 5.3 las soluciones.



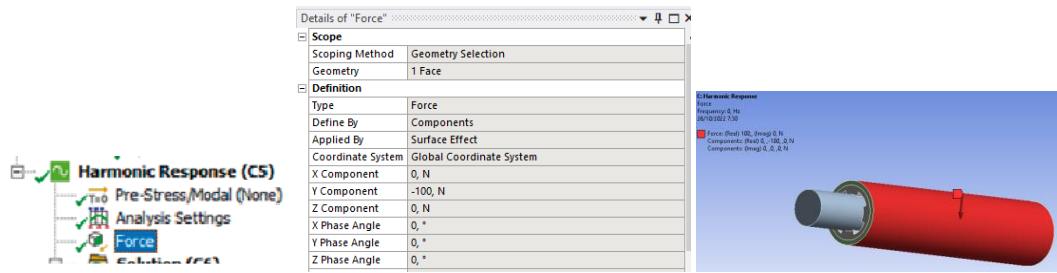
6º) En el módulo de *Project Schematic* se introduce el módulo *Harmonic Response*, con sus respectivas conexiones.



7º) Se introduce en el módulo de *Harmonic Response*, los datos del análisis, *Analysis Settings*.



8º) En el mismo módulo, se introducen los datos de la fuerza, *Force*, ejercida por la mano.



9º) Una vez introducidos todos los datos se obtiene la solución del módulo *Harmonic Response*.

