



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y DISEÑO INDUSTRIAL

Graduada en Ingeniería Mecánica

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Ensayo de Templabilidad (Jominy)
Verificación Equivalencias entre Valores de Dureza
Rockwell y Vickers, Aceros no-Aleados C55

Autora: María Villanueva Martínez

Co-tutor:

Ricardo García Ledesma

Departamento de Ingeniería Mecánica,
Química y Diseño Industrial

Tutor:

Roberto D'Amato

Departamento de Ingeniería Mecánica,
Química y Diseño Industria

Madrid, junio, 2024



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y DISEÑO INDUSTRIAL

Graduada en Ingeniería Mecánica

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Ensayo de Templabilidad (Jominy) Verificación Equivalencias entre Valores de Dureza Rockwell y Vickers, Aceros no-Aleados C55

Autora: María Villanueva Martínez

Co-tutor:

Ricardo García Ledesma

Departamento de Ingeniería Mecánica,
Química y Diseño Industrial

Tutor:

Roberto D'Amato

Departamento de Ingeniería Mecánica,
Química y Diseño Industria

Madrid, junio, 2024

Agradecimientos

A mi familia, cuyo apoyo incondicional me ha ayudado para llegar hasta aquí. A mis padres, por creer en mí en todo momento y enseñarme que con esfuerzo y perseverancia puedes llegar tan lejos como quieras. A mi hermana, que siempre puedo contar con ella y me alienta en las dificultades.

A Roberto, que ha sido mi guía en este proyecto. Gracias por tu dedicación, por tu experiencia y por transmitirme tus conocimientos, que me han permitido culminar con éxito este trabajo.

A mis amigos, Chus, Alberto, Diego, Adri, Sofía, Marcos, Bertiño, Jorge y Fernando, por acompañarme en esta etapa de mi vida y hacerla un poco más amena.

Resumen (Abstract)

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado (TFG) es la comparación de los resultados obtenidos mediante una prueba de templabilidad de unas probetas de acero no aleado C55E frente a los resultados teóricos esperables. Para la realización de los ensayos se ha seguido la metodología del ensayo Jominy y se ha comparado con la base teórica que sustenta los resultados. En los ensayos que se han realizado se ha tenido en cuenta dos temperaturas de templado para ver el efecto que tiene sobre el comportamiento frente a la templabilidad del acero.

Se ha analizado también la correlación entre las medidas de dureza hechas con la escala Rockwell C y con la escala Vickers 10, viendo como se comportan los resultados experimentales con las conversiones dadas en la normativa internacional de conversión.

Para completar el análisis de los resultados se han realizado micrografías a las probetas ensayadas para comprobar el estado metalográfico final y compararlo con los resultados teóricos esperables.

The main objective of this TFG is the comparison of the results obtained through a hardenability test of some C55E non-alloy steel specimens against the expected theoretical results. To carry out the tests, the methodology of the Jominy test has been followed and it has been compared with the theoretical basis that supports the results. In the tests that have been carried out, two hardening temperatures have been considered to see the effect they have on the hardenability behavior of the steel.

The correlation between the hardness measurements made with the Rockwell C scale and the Vickers 10 scale has also been analyzed, to see how the experimental results behave with the conversions given in the international conversion regulations.

To complete the analysis of the results, micrographs have been taken of the tested specimens to check the final metallographic state and compare it with the expected theoretical results.

Palabras clave (Keywords)

Temple, templabilidad, dureza, Jominy, Rockwell, Vickers, ensayo, micrografía

Hardening, hardenability, hardness, Jominy, Rockwell, Vickers, test, micrograph

Índice

OBJETIVOS Y ALCANCE	1
INTRODUCCIÓN	2
Ciencia e Ingeniería de Materiales	2
Acero y ensayo Jominy	3
Diagrama Hierro-Carbono	5
Transformación de la austenita	7
Diagramas Transformación, Temperatura y Tiempo	11
Tratamientos térmicos	14
Templabilidad	19
Ensayo Jominy	29
Dureza Rockwell	34
Dureza Vickers	37
Comparación entre medidas de dureza	40
METODOLOGÍA Y MATERIALES	43
Material utilizado	43
Preparación de la muestra	46
Tratamiento térmico: temple	51
Medida de la dureza en HRC y HV10	56
Curva Jominy experimental	61
Determinación teórica de la curva Jominy	62
Cálculo del tamaño de grano	63
Metalografía	64
RESULTADOS	67
Preparación de la muestra	67
Tratamiento térmico: temple	72
Medida de la dureza en HRC y HV10	74
Curva Jominy experimental	78
Determinación teórica de la curva Jominy	83
Cálculo del tamaño de grano	85
Metalografía	93
Medida dureza en la sección de la longitud crítica	96
DISCUSIÓN	97
Probeta mal templada a 805 °C	97
Validación del tamaño de grano del Certificado de Calidad	100

Actualización de la Curva Jominy Teórica	103
Análisis probetas templadas a 805 °C.....	105
Análisis probetas templadas a 830 °C.....	110
Análisis de la conversión de durezas según UNE-EN ISO 18265	113
Comparación de las curvas Jominy	114
CONCLUSIONES	117
Debilidades y trabajos futuros	118
BIBLIOGRAFÍA.....	120
Anexo I.....	124
Anexo II.....	126

Nomenclatura

α	Ángulo entre las caras de la pirámide, ensayo de dureza Vickers
Φ_c	Diámetro crítico
Φ_{Ci}	Diámetro crítico ideal
a	Diámetro interior del orificio de salida del agua
ASM	American Society for Metals
D	Diámetro de la probeta
d	Distancia, en milímetros, de los puntos en que se mide la dureza al extremo templado
d	Media aritmética de dos longitudes de diagonal d1 y d2, ensayo dureza Vickers
e	Profundidad de los semiplanos (rebajos) para medida de la dureza
ETSIDI	Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial
F	Fuerza Total
F_0	Fuerza Preliminar
F_1	Fuerza Adicional
h	Altura del chorro de agua en ausencia de la probeta, ensayo Jominy
h	Profundidad permanente de penetración, ensayo de dureza Rockwell
H	Severidad del temple
HRC	Dureza Rockwell C
HV	Dureza Vickers
HV10	Dureza Vickers 10
JHV_{xx-d}	Índice de templabilidad Jominy a la distancia d, en Vickers HV30-mm
J_{xx-d}	Índice de templabilidad Jominy a la distancia d, en Rockwell HRC-mm
K	Conductividad calorífica del acero
kgf	Kilogramos fuerza
l	Distancia de la cara inferior de la probeta al orificio de salida
L	Longitud total de la probeta
l_c	Longitud crítica
M	Coefficiente de película de refrigeración
min	Minuto
mm	Milímetro
N	Constante de fondo de escala, específica para la escala
S	Constante de escala, específica para la escala
s	Segundo
T	Temperatura

t	Tiempo
T_c	Temperatura crítica
TFG	Trabajo Fin de Grado
t_m	Tiempo máximo
T_p	Temperatura precipitación
T_s	Temperatura austenización
TTT	Transformación, Temperatura y Tiempo
UPM	Universidad Politécnica de Madrid

Índice de Figuras

Figura 1 Walter E. Jominy y su ensayo	4
Figura 2 Diagrama Hierro-Carbono	6
Figura 3 Estructura cristalina de la austenita	8
Figura 4 Estructura de la perlita	8
Figura 5 Estructura martensita.....	9
Figura 6 Estructuras derivadas de la transformación de la austenita.....	9
Figura 7 Transformación de austenita en perlita o martensita en función del tiempo y temperatura	10
Figura 8 Estructura cristalina de la martensita	11
Figura 9 Celdas unitarias de austenita y martensita mostrando la posición del átomo de carbono.	11
Figura 10 Método de obtención de las curvas TTT	12
Figura 11 Diagrama TTT y los microconstituyentes que se originan al enfriar	13
Figura 12 Tratamientos térmicos de los metales.....	14
Figura 13 Ciclo térmico del recocido	16
Figura 14 Ciclo térmico del temple	17
Figura 15 Ciclo térmico del revenido	18
Figura 16 Ciclo térmico del normalizado.....	19
Figura 17 Diagrama alta-baja templabilidad	20
Figura 18 Posición de las curvas de las “S”	20
Figura 19 Tamaño de las piezas	21
Figura 20 Velocidad de enfriamiento.....	21
Figura 21 Severidad de temple en medios refrigerantes.....	22
Figura 22 Etapas del proceso de enfriamiento de una pieza	23
Figura 23 Velocidades de enfriamiento en cada etapa.....	24
Figura 24 Velocidad crítica de temple.....	25
Figura 25 Diámetro crítico.....	26
Figura 26 Diámetro crítico ideal.....	26
Figura 27 Dureza crítica.....	27
Figura 28 Proceso de refrigeración en método de las curvas U	27
Figura 29 Medición de durezas en el método de las curvas U.....	28
Figura 30 Curvas en U obtenidas tras el ensayo	28
Figura 31 Banda de templabilidad	29
Figura 32 Probeta ensayo Jominy	29

Figura 33 Tobera de proyección.....	31
Figura 34 Esquema de un dispositivo de temple	32
Figura 35 Preparación de la probeta para la medición de la dureza y emplazamiento de los puntos de medida	33
Figura 36 Esquema del principio Rockwell.....	35
Figura 37 Principio del ensayo, geometría del penetrador y huella Vickers.....	38
Figura 38 Banda de dispersión para la conversión dureza-dureza (esquemático)	42
Figura 39 Esquema probeta para ensayo Jominy	46
Figura 40 Sierra de vaivén	47
Figura 41 Torno paralelo	47
Figura 42 Roscado con macho de roscar.....	48
Figura 43 Fresadora universal de tres ejes.....	48
Figura 44 Sección transversal probeta para ensayo Jominy	49
Figura 45 Papeles de lija de varias granulometrías.....	49
Figura 46 Máquina lijadora eléctrica.....	49
Figura 47 Máquina pulidora	50
Figura 48 Alúmina para pulir	50
Figura 49 Horno para el templado	52
Figura 50 Unidad de control del horno	52
Figura 51 Colocación de la probeta en el horno	53
Figura 52 Guantes de protección térmica.....	54
Figura 53 Pinzas para manipulación.....	54
Figura 54 Horno calentado.....	54
Figura 55 Equipo de templado Jominy.....	55
Figura 56 Equipo de templado Jominy, detalle del soporte de la probeta.....	55
Figura 57 Equipo de templado Jominy, colocación de la probeta	56
Figura 58 Equipo de templado Jominy, momento del temple.....	56
Figura 59 Equipo de medida dureza Rockwell	58
Figura 60 Equipo de medida dureza Rockwell, detalle pantalla	58
Figura 61 Equipo de medida dureza Vickers	60
Figura 62 Equipo de medida dureza Vickers, detalle pantalla	60
Figura 63 Imagen del proceso de medida de la dureza Vickers.....	60
Figura 64 Microscopio ZEISS para toma de micrografías.....	65
Figura 65 Corte de la materia prima con sierra de vaivén	67
Figura 66 Procesado de la pieza en torno paralelo.....	68
Figura 67 Mecanizado de los rebajes en fresa universal	68

Figura 68	Probeta mecanizada.....	69
Figura 69	Detalle de los mecanizados antes del lijado y pulido.....	69
Figura 70	Lijado manual de la probeta.....	69
Figura 71	Lijado mediante lijadora eléctrica.....	70
Figura 72	Detalle de las probetas tras el lijado de los rebajes.....	70
Figura 73	Pulido de las probetas.....	71
Figura 74	Detalle de la probeta tras el pulido a espejo.....	71
Figura 75	Probeta tras el montaje para templado.....	71
Figura 76	Extracción de la probeta del horno.....	72
Figura 77	Colocación de la probeta en el equipo de templado Jominy.....	72
Figura 78	Imagen térmica de la colocación de la probeta en el equipo de templado Jominy ...	73
Figura 79	Probeta durante el proceso de templado en el equipo Jominy.....	73
Figura 80	Imagen térmica durante el proceso de templado en el equipo Jominy.....	74
Figura 81	Detalle de la probeta tras el tratamiento térmico con la escoria.....	74
Figura 82	Detalle medición dureza Rockwell de la probeta.....	75
Figura 83	Detalle medición dureza Vickers de la probeta.....	75
Figura 84	Micrografía probeta P805-1, hecha con Nital 4 y 1000X.....	93
Figura 85	Micrografía probeta P805-2, hecha con Nital 4 y 1000X.....	94
Figura 86	Micrografía probeta P830-1, hecha con Nital 4 y 500X.....	95
Figura 87	Micrografía probeta P830-2, hecha con Nital 4 y 1000X.....	95
Figura 88	Micrografía probeta P830-1, hecha con Vilella y 1000X.....	96
Figura 89	Esquema de montaje de la probeta mal templada, P805-fallo.....	97

Índice de Tablas

Tabla 1 Características estado Cristalino frente al estado Amorfo.....	3
Tabla 2 Severidad del temple en función del medio refrigerante y su agitación.	22
Tabla 3 Símbolos y designaciones utilizados en UNE-EN ISO 642:2000.....	30
Tabla 4 Escalas de dureza Rockwell normales	36
Tabla 5 Escalas de dureza Rockwell superficiales	36
Tabla 6 Símbolos y términos abreviados utilizados en método Rockwell	37
Tabla 7 Fuerzas de ensayo comunes para la determinación de la dureza Vickers	39
Tabla 8 Conversión de valores dureza-dureza o dureza-resistencia a la tracción para aceros no aleados o débilmente aleados, y acero fundido.	40
Tabla 9 Composición química colada C55E	44
Tabla 10 Características mecánicas colada C55E	44
Tabla 11 Valores Curva Jominy de la colada C55E	45
Tabla 12 Factores correctores del Φ_{CI}	62
Tabla 13 Determinación de los valores HRC de la curva Jominy teórica	63
Tabla 14 Resultados de medición de dureza en probeta P805-1.....	76
Tabla 15 Resultados de medición de dureza en probeta P805-2.....	76
Tabla 16 Resultados de medición de dureza en probeta P830-1.....	77
Tabla 17 Resultados de medición de dureza en probeta P830-2.....	77
Tabla 18 Datos dureza HRC de las probetas templadas a 805 °C y la media de ambas	85
Tabla 19 Datos dureza HRC de las probetas templadas a 830 °C y la media de ambas	90
Tabla 20 Medidas de dureza HRC y HV10 en la sección de la longitud crítica.....	96
Tabla 21 Resultados de medición de dureza en probeta P805-fallo	98
Tabla 22 Determinación de los valores HRC de la curva Jominy teórica con el tamaño de grano actualizado	103
Tabla 23 Resumen durezas probetas templadas a 805 °C.....	106
Tabla 24 Resumen durezas probetas templadas a 830 °C.....	111
Tabla 25 Comparación de los principales valores extraídos de la curva Jominy de los experimentos y el Certificado de Calidad	115

Índice de Gráficos

Gráfica 1 Relación entre dureza Vickers (HV10) y dureza Rockwell (HRC)	41
Gráfica 2 Curva Jominy de la colada C55E.....	45
Gráfica 3 Ciclo de calentamiento de las probetas en el horno de templado.....	52
Gráfica 4 Plantilla para realización de curva Jominy con durezas en escala Rockwell C	61
Gráfica 5 Plantilla para realización de curva Jominy con durezas en escala Vickers 10	61
Gráfica 6 Curva Jominy experimental de la probeta P805-1 en dureza HRC.....	78
Gráfica 7 Curva Jominy experimental de la probeta P805-1 en dureza HV10.....	78
Gráfica 8 Comparativa curvas Jominy experimentales probeta P805-1 HRC vs HV10	79
Gráfica 9 Curva Jominy experimental de la probeta P805-2 en dureza HRC.....	79
Gráfica 10 Curva Jominy experimental de la probeta P805-2 en dureza HV10.....	80
Gráfica 11 Comparativa curvas Jominy experimentales probeta P805-2 HRC vs HV10	80
Gráfica 12 Curva Jominy experimental de la probeta P830-1 en dureza HRC.....	81
Gráfica 13 Curva Jominy experimental de la probeta P830-1 en dureza HV10.....	81
Gráfica 14 Comparativa curvas Jominy experimentales probeta P830-1 HRC vs HV10	82
Gráfica 15 Curva Jominy experimental de la probeta P830-2 en dureza HRC.....	82
Gráfica 16 Curva Jominy experimental de la probeta P830-1 en dureza HV10.....	83
Gráfica 17 Comparativa curvas Jominy experimentales probeta P830-2 HRC vs HV10	83
Gráfica 18 Curva Jominy teórica acero C55E.....	84
Gráfica 19 Determinación de la dureza crítica teórica.....	84
Gráfica 20 Curva Jominy experimental media de las probetas templadas a 805 °C	86
Gráfica 21 Curva Jominy experimental media reducida de las probetas templadas a 805 °C ...	86
Gráfica 22 Influencia del tamaño de grano en el diámetro crítico ideal en función del % de carbono	88
Gráfica 23 Relación entre el Diámetro crítico ideal y el tamaño de grano ASTM.....	89
Gráfica 24 Influencia del tamaño de grano en el diámetro crítico ideal en función del % de carbono, M. A. Grossmann	89
Gráfica 25 Curva Jominy experimental media de las probetas templadas a 830 °C	91
Gráfica 26 Curva Jominy experimental media reducida de las probetas templadas a 830 °C ...	91
Gráfica 27 Curva Jominy experimental de la probeta P805-fallo en dureza HRC.....	98
Gráfica 28 Curva Jominy experimental de la probeta P805-fallo en dureza HV10.....	99
Gráfica 29 Comparativa curvas Jominy experimentales probeta P805-Fallo HRC vs HV10.....	99
Gráfica 30 Comparación de las equivalencias de durezas en probeta P805-Fallo frente a la norma UNE-EN ISO 18265.....	100
Gráfica 31 Curva Jominy Certificado con línea de tendencia.....	101

Gráfica 32 Curva Jominy Certificado reducida con línea de tendencia.....	101
Gráfica 33 Curva Jominy teórica acero C55E con tamaño de grano actualizado.....	104
Gráfica 34 Comparación de las equivalencias de durezas en probeta P805-1 frente a la norma UNE-EN ISO 18265.....	105
Gráfica 35 Comparación de las equivalencias de durezas en probeta P805-2 frente a la norma UNE-EN ISO 18265.....	105
Gráfica 36 Comparación de las equivalencias de durezas en probetas templadas a 805 °C frente a la norma UNE-EN ISO 18265	106
Gráfica 37 Comparación de curvas Jominy de los ensayos a 805 °C	107
Gráfica 38 Comparación de curvas Jominy del ensayo a 805 °C con la teórica y la del control de calidad.	108
Gráfica 39 Comparación de las equivalencias de durezas en probeta P830-1 frente a la norma UNE-EN ISO 18265.....	110
Gráfica 40 Comparación de las equivalencias de durezas en probeta P830-2 frente a la norma UNE-EN ISO 18265.....	110
Gráfica 41 Comparación de las equivalencias de durezas en probetas templadas a 830 °C frente a la norma UNE-EN ISO 18265	111
Gráfica 42 Comparación de curvas Jominy de los ensayos a 830 °C	112
Gráfica 43 Comparación de curvas Jominy del ensayo a 830 °C con la teórica y la del control de calidad.	113
Gráfica 44 Comparación durezas medias frente a la conversión de durezas de la norma UNE-EN ISO 18265	114
Gráfica 45 Comparación de las curvas Jominy Media ensayadas con la curva Jominy del Certificado de Calidad	115

OBJETIVOS Y ALCANCE

El objetivo de este Trabajo Fin de Grado (TFG) es la caracterización mediante el ensayo de templabilidad, conocido como Jominy, descrito en la norma UNE-EN ISO 642:2000 de varias probetas de acero no aleado C55E. Tras la realización de los ensayos de templabilidad se procederá a la medición de las durezas en las probetas tanto en la escala *Vickers* como en la *Rockwell*. Con los datos medidos de las probetas se procederá a la verificación de equivalencias entre escalas experimental y su posterior comparación con las equivalencias de durezas que se describen en la norma UNE-EN ISO 18265:2014.

El objetivo descrito en el párrafo anterior se alcanzará mediante la adecuación de las probetas de ensayo a los requisitos descritos en la norma UNE-EN ISO 642:2000 en termino de características geométricas. También se describe el proceso que hay que seguir para el temple y la adecuación de la muestra para la toma de las medidas, lo que incluye la preparación superficial y el procedimiento experimental.

Una vez realizado el ensayo de templabilidad se procederá a realizar estudios metalográficos a una distancia característica del extremo templado mediante la técnica de ataque químico e inspección óptica. Se emplearán como reactivos Nital o Vilella y se caracterizará la microestructura resultante del temple mediante observación al microscopio.

La preparación de las probetas, el temple de estas y las posteriores medidas de dureza se han realizado en el laboratorio de ensayos destructivos, en laboratorio de ensayos no destructivos y en el de metodología dimensional de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial (ETSIDI) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Se han empleado los medios de la ETSIDI para la preparación de las probetas, el temple de estas y la posterior toma de medidas de la dureza *Vickers* y *Rockwell*, para lo cual se han seguido las indicaciones de las normas UNE-EN ISO 6507-1:2018 y UNE-EN ISO 6508-1:2016 respectivamente.

INTRODUCCIÓN

Ciencia e Ingeniería de Materiales

La influencia de los materiales en nuestro día a día es mayor de lo que la gente pueda pensar ya que gran parte de nuestro entorno está condicionado en mayor o menor medida por los materiales que se utilizan.

La evolución y desarrollo de la humanidad ha estado muy condicionada por la capacidad tecnológica relativa a la producción y conformado de materiales que se utilizan. Muestra de ello es que una de las formas de clasificación histórica de las sociedades ha sido mediante la denominación del material predominante en aquella época: Edad de Piedra, Edad de Bronce, Edad de Hierro, ...

En su inicio, los materiales utilizados para la fabricación de herramientas fueron los encontrados directamente en la naturaleza y de fácil acceso, como son: la madera, los huesos, la piedra, ...

Posteriormente se empezaron a producir herramientas de metales blandos, como el bronce, y más adelante se emplearon metales más duros y aleaciones, como el hierro y los aceros. Y no sólo se empezaron a utilizar nuevos materiales, en particular los metálicos, sino que se fueron conociendo propiedades de estos y de sus aleaciones, se inició el desarrollo de las aleaciones y los tratamientos térmicos para adaptar las características de los metales a las necesidades de la sociedad.

La Ciencia de los Materiales tiene como objetivo el estudio de la relación entre la estructura y las propiedades de los materiales, así como su composición. Por otra parte, la Ingeniería de Materiales se encarga de la búsqueda de propiedades específicas de los materiales. Esto se consigue mediante el diseño de aleaciones, tanto por la mezcla de componentes como por su estructura de ordenación de átomos o moléculas, que proporcionan propiedades a los nuevos materiales que los optimizan para ser utilizados en aplicaciones específicas.

La primera gran caracterización de los materiales sólidos se puede realizar entre los que tienen una estructura cristalina y los que su estructura es amorfa. Los materiales con estructura cristalina son los que tienen un orden regular de sus constituyentes, átomos, iones o moléculas. Por su parte, los materiales amorfos son los que no presentan ningún orden en su estructura. En la Tabla 1 se muestran las principales características de cada uno de los estados de ordenación en los sólidos.

Los materiales se dividen en cinco grandes grupos: metales, cerámicos, polímeros, semiconductores y compuestos. Las características que definen cada uno de estos grupos vienen dadas por su estructura atómica, la cual determinará sus propiedades.

Tabla 1 Características estado Cristalino frente al estado Amorfo
Fuente: Libro Ciencia de Materiales – Curso 2021/22 (Ricardo García Ledesma, 2000a)

Estado Cristalino	Estado Amorfo
Átomos, iones o moléculas ordenados	Desorden de átomos, iones o moléculas
Forma geométrica exterior creando caras	Sin forma geométrica exterior definida
Anisotropía de propiedades	Isotropía de propiedades
Temperatura de fusión constante	Solidificación con temperatura progresiva descendiente
El estado de agregación va ligado a un cambio de fase	Puede haber cambio de estado de agregación sin cambio de fase
Gran estabilidad de permanecer como están	Poca estabilidad
Ejemplos: Diamante o hierro (Fe)	Ejemplo: Arcilla

Las propiedades más relevantes de los materiales, cada una tiene un tipo específico de estímulo y genera respuestas diferenciadas, son las que siguen:

- **Mecánicas.** Las propiedades mecánicas relacionan las deformaciones que experimenta el material en función de la carga que se le aplica. Algunas propiedades mecánicas son el módulo de Young, la resistencia o la fragilidad.
- **Eléctricas.** El estímulo que se presenta en las propiedades eléctricas es un campo eléctrico y algunos ejemplos de esta propiedad son la conductividad eléctrica o la constante dieléctrica.
- **Térmicas.** En cuanto al comportamiento térmico de los materiales, este está influido por la capacidad calorífica y la conductividad térmica.
- **Magnéticas.** La respuesta a un material frente a la influencia de un campo magnético es un estímulo de las propiedades magnéticas.
- **Ópticas.** El incentivo de las propiedades ópticas es la radiación electromagnética o lumínica, algunas propiedades ópticas significativas son el índice de refracción y la reflectividad.
- **Químicas.** Las propiedades químicas indica la reactividad química de un material.

Acero y ensayo Jominy

Este trabajo se basa en el análisis de la templabilidad de un acero no aleado C-55E (F-1150) mediante la realización de ensayos tipo Jominy a varias probetas según la norma UNE-EN ISO 642:2000. Se realizará el análisis sobre probetas templadas a diferentes temperaturas para comprobar el efecto de la temperatura en la templabilidad del acero, con las limitaciones

propias del tamaño de muestra utilizado, y la comparación de los resultados obtenidos frente a los valores que da la literatura para el tipo de acero empleado.

El acero es uno de los materiales más empleados hoy en día en una gran cantidad de aplicaciones como pueden ser: la construcción de edificios e infraestructuras, la fabricación de maquinaria, vehículos o envases. Uno de los motivos por lo que el acero es tan ampliamente utilizado es por su versatilidad y adaptabilidad gracias a las posibilidades que ofrecen sus aleaciones y sus tratamientos térmicos. Más adelante se verán con más detalle las características de los tratamientos térmicos.

De entre los tratamientos térmicos que se le pueden hacer a los aceros uno de los más empleados, por el cambio en el comportamiento del acero que produce, es el temple. Durante la historia de manipulación del acero han sido muchos los procedimientos que se han empleado para cuantificar cómo se caracteriza un acero templado, pero en la actualidad uno de los métodos más empleados que se utiliza es el ensayo Jominy para el análisis de los procesos de templeado.

El ensayo Jominy (Figura 1) le debe su nombre a uno de sus desarrolladores.

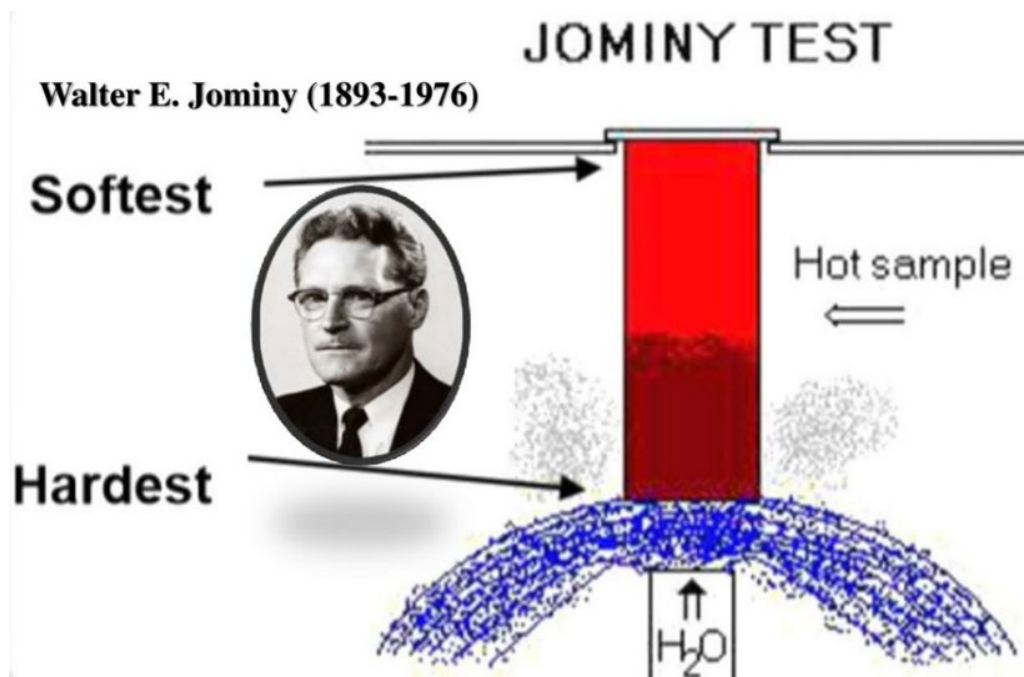


Figura 1 Walter E. Jominy y su ensayo
Fuente: (<https://en.ppt-online.org/>, 2024)

El ensayo fue descrito por primera vez por Walter E. Jominy (1893-1976) y A.L. Boegehold en 1937, quienes trabajaban como metalúrgicos en la División de Laboratorios de Investigación de *General Motors Corp.* Gracias al desarrollo de este método, Walter E. Jominy recibió en 1944 el premio *Albert Sauveur Achievement Award* habiendo sido propuesto por la *American Society for Metals (ASM)*. Posteriormente, Walter E. Jominy fue presidente de esta sociedad en 1951.

El ensayo Jominy, regido por la norma UNE-EN ISO 642:2000, se emplea para la medida de la templabilidad de un acero. Con él se estudia la capacidad que tiene la transformación martensítica de penetrar en el núcleo de la probeta, mediante la medida de la dureza. Gracias a ello se puede conocer el comportamiento del acero frente a los tratamientos térmicos y se tiene una herramienta muy útil para poder decidir cuál es el mejor acero para cada aplicación.

Diagrama Hierro-Carbono

La gran mayoría de aleaciones en su fase líquida forman una solución homogénea, independientemente de la concentración de los componentes que la integran. En cambio, al pasar de estado líquido a sólido, solidificarse, es frecuente que se produzcan heterogeneidades dentro de la aleación, es decir, que se concentren los distintos componentes y no haya una mezcla perfecta entre ellos. En parte, estas heterogeneidades se producen porque al enfriarse las aleaciones se originan variaciones de solubilidad, transformaciones alotrópicas y reacciones químicas entre los distintos elementos que constituyen la aleación. Estos fenómenos pueden resultar en la aparición y desaparición de fases, compuestos, soluciones o metales puros. En consecuencia, las aleaciones en estado sólido pueden presentar diversas fases, las cuales vienen caracterizadas por la composición química y la temperatura a la que se encuentran.

Es importante estudiar la naturaleza de las fases, su proporción y distribución de constituyentes estructurales. Para ello, se pueden emplear las siguientes herramientas:

- Examen microscópico
- Análisis por difracción de rayos X
- Diagramas de equilibrio. Calentamientos y enfriamientos.

Se profundizará, a continuación, en este último punto.

Se denomina diagrama de equilibrio al conjunto de líneas que representan los puntos de transformación de fases, en función de la temperatura y de la concentración de los elementos químicos que forman la aleación, y que separan los distintos estados en los que se puede encontrar una aleación.

Uno de los diagramas de equilibrio más estudiados, y el que se va a usar en este TFG, es el diagrama Hierro-Carbono, Figura 2. Este diagrama analiza las fases presentes en las aleaciones Hierro-Carbono, así como su proporción y distribución en forma de los distintos constituyentes.

Se conoce con el nombre de aleaciones Hierro-Carbono a todas aquellas cuya composición principal está formada por estos dos elementos; sin embargo, se pueden encontrar otros materiales en pequeñas proporciones, alguno de ellos beneficiosos, como el Silicio o el Manganeso, y otros perjudiciales para estas aleaciones, como pueden ser el Azufre y el Fósforo. Para que se denominen aleaciones Hierro-Carbono es necesario que los elementos

anteriormente indicados como beneficiosos o perjudiciales se encuentren en pequeñas proporciones; si lo hicieran en proporciones que modifiquen notablemente las propiedades de las aleaciones sería cubierto por otro ámbito de estudio y las aleaciones se denominarían atendiendo a los elementos que la componen (como son los Aceros al cromo vanadio, aceros al boro, aceros al cromo-molibdeno, etc.). Habitualmente, algunos de los elementos de aleación de bajo porcentaje se encuentran ya combinados con el hierro en la naturaleza y su eliminación es costosa por lo que, viendo que las propiedades de la aleación no se ven afectadas, no se eliminan durante el proceso de producción por cuestiones de eficiencia económica.

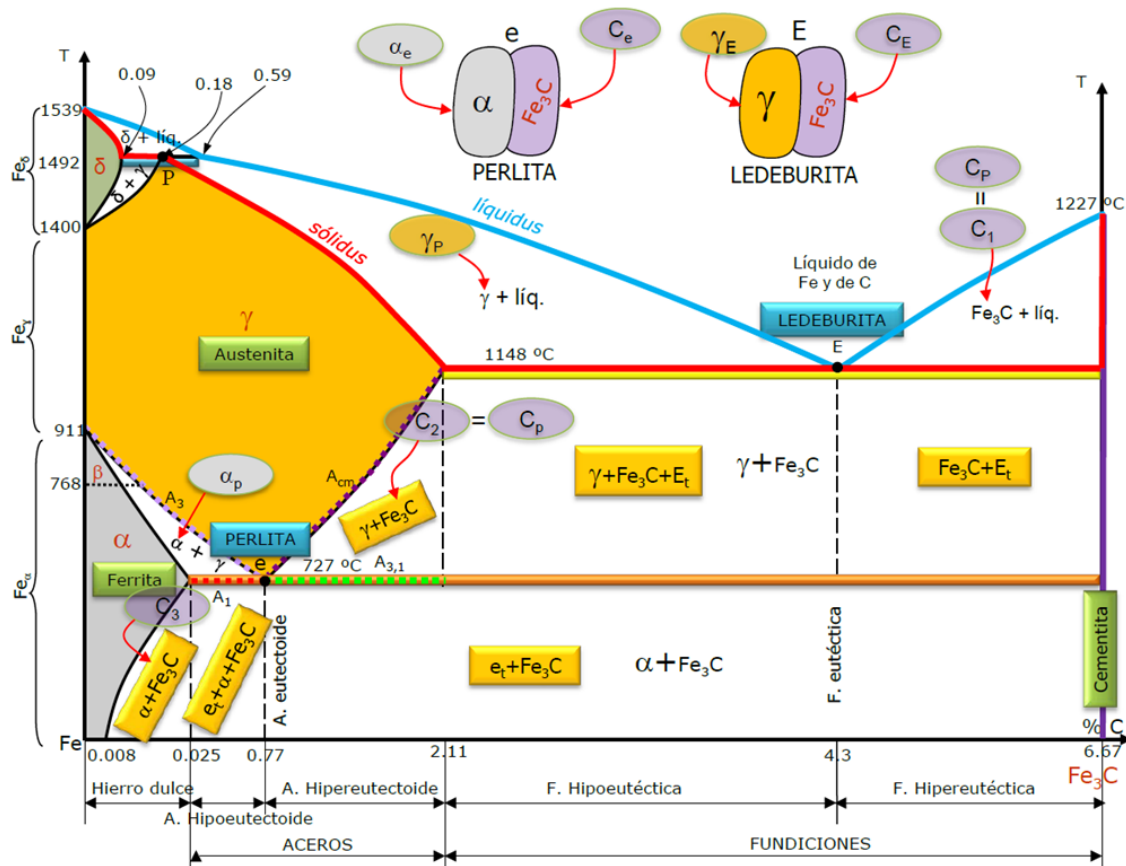


Figura 2 Diagrama Hierro-Carbono
Fuente: Libro Ciencia de Materiales – Curso 2021/22 (Ricardo García Ledesma, 2000a)

El diagrama Hierro-Carbono permite conocer las distintas fases en las que la aleación se puede encontrar en función del porcentaje de carbono presente en el hierro y de la temperatura a la que está la mezcla.

El porcentaje máximo de carbono que se considera en una aleación Hierro-Carbono es del 6,67%. Si se atiende al porcentaje de carbono presente en la aleación, las mezclas se pueden clasificar como sigue:

- **Hierro dulce**, si presenta menos de un 0,1% de carbono.
- **Aceros**, cuando el porcentaje de carbono se encuentra entre 0,1% y 2,11%.

- **Fundiciones**, si el porcentaje se encuentra por encima del 2,11%.

Hay una estrecha relación entre las fases del hierro puro, la forma en la que cristaliza el hierro puro, y las características del diagrama Hierro-Carbono. Las características de las fases de la aleación presentarán similitudes con las distintas fases de cristalización del hierro puro que corresponda. Las fases del hierro puro son las siguientes:

- **Hierro Alfa**. Cuando la temperatura es inferior a 910°C. Presenta una estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo cuya distancia entre átomos es de 2,86Å.
- **Hierro Gamma**. Cuando la temperatura se encuentra entre 910 y 1130° C. Su estructura cristalina es cúbica centrada en las caras.
- **Hierro Delta**. Cuando la temperatura es superior a 1130° C e inferior a la temperatura de fusión del hierro, 1539° C. Su estructura cristalina es ortorrómbica centrada en el cuerpo.

El límite de solubilidad del carbono en su aleación con el hierro viene fijado por la fase de hierro en la que se lleve a cabo la aleación. La mayor solubilidad del carbono se obtiene en la fase gamma, siendo el máximo 2,11% a 1148° C. Las fases del diagrama Hierro-Carbono son las que siguen:

- **Acero líquido**. Se da a temperaturas superiores a 1500° C, que es la temperatura de fusión del acero.
- **Ferrita**. Se forma al agregar carbono al hierro alfa. Se trata de una aleación intersticial con estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo. Presenta una solubilidad máxima de 0,025% de Carbono a 723° C. Se la puede considerar casi hierro puro y es la fase más blanda y dúctil de los aceros.
- **Austenita**. Se forma al agregar carbono al hierro gamma. Se trata de una solución sólida con estructura cristalina cúbica centrada en las caras. Admite la mayor solubilidad de carbono (2,11%). Se trata del constituyente más denso de los aceros, pero no es estable a temperatura ambiente.
- **Cementita (Fe₃C)**. Formado por un 6,67% de carbono y el resto hierro, presenta una estructura cristalina ortorrómbica. Su temperatura de fusión es de 1250° C y se trata de un compuesto termodinámicamente inestable. Además, se trata de un compuesto duro y frágil.

Transformación de la austenita

La austenita es una solución sólida intersticial de carbono en hierro gamma cuya estructura cristalina es del tipo cúbica centrada en las caras (Figura 3) y que se da cuando la temperatura

de la mezcla es superior a 723 °C. El porcentaje de carbono en la aleación para que haya austenita no debe de ser superior al 1,7%.

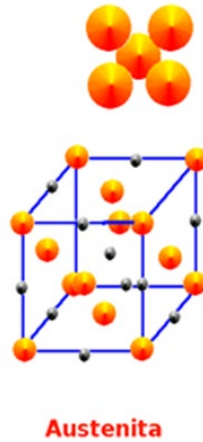


Figura 3 Estructura cristalina de la austenita

Fuente: (<https://www.juntadeandalucia.es/>, 2024b)

A temperatura ambiente la austenita no es estable por lo que al bajar la temperatura de la aleación tiende a transformarse a alguna de las formas que se indican a continuación.

Dependiendo de la forma en que se produzca el enfriamiento de la mezcla, en termino de velocidad de enfriamiento, la austenita sufrirá una transformación u otra y esto condicionará las características de la estructura final de la aleación a temperatura ambiente.

Si la velocidad de enfriamiento es lenta, se produce una difusión de los átomos dentro de la estructura cristalina. Mediante este proceso de difusión lo que se obtiene en la estructura final es perlita (Figura 4). La perlita es una estructura metaestable bifásica compuesta por una fase de granos alargados de cementita incrustados en una matriz de ferrita o Fe_{α} . Si las láminas de perlita son delgadas, o finas, el grano se muestra negro en las micrografías, si las láminas son más anchas los granos se observan más claros. En este último caso se denomina perlita gruesa, o basta.

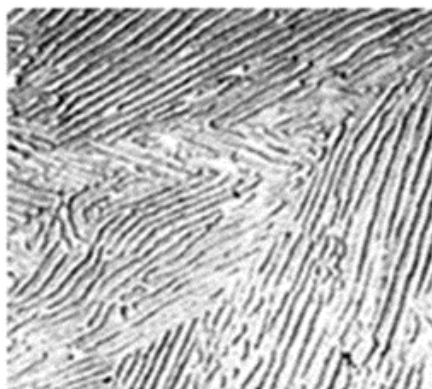


Figura 4 Estructura de la perlita

Fuente: (<https://www.juntadeandalucia.es/>, 2024b)

Si, por el contrario, la velocidad de enfriamiento es rápida, la difusión de los átomos dentro de la estructura se ve paralizada, ya que no hay tiempo para realizarse, y la estructura atómica que se obtiene en este caso sería la martensita (Figura 5).

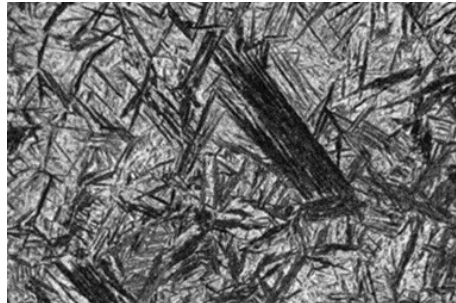


Figura 5 Estructura martensita
 Fuente: (Laboratorio de Forja, 2024b)

En la Figura 6 se muestran de forma esquemática los procesos de transformación de la austenita en perlita o martensita en función de la velocidad de enfriamiento, es decir, del cambio de temperatura que se produzca en la aleación en función del tiempo. Como se observa en la Figura 7, la temperatura M_s es la que condiciona el proceso de transformación de la austenita en martensita. Por encima de la temperatura M_s la transformación de la austenita en martensita no es posible y lo que se produce es una transformación en perlita. Sin embargo, cuando la temperatura baja de M_s , la austenita se empieza a transformar en martensita y ya no se produce transformación en perlita por dificultarse la difusión atómica dentro de la estructura de la aleación.

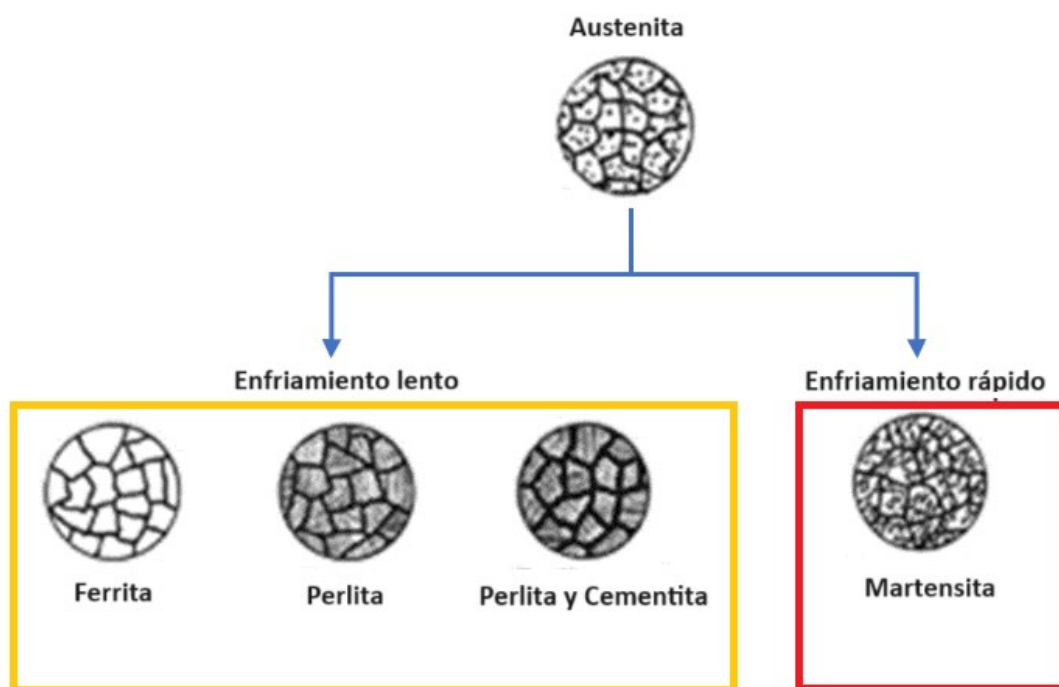


Figura 6 Estructuras derivadas de la transformación de la austenita
 Fuente: Basada en (<https://gomez2010.weebly.com/>, 2017)

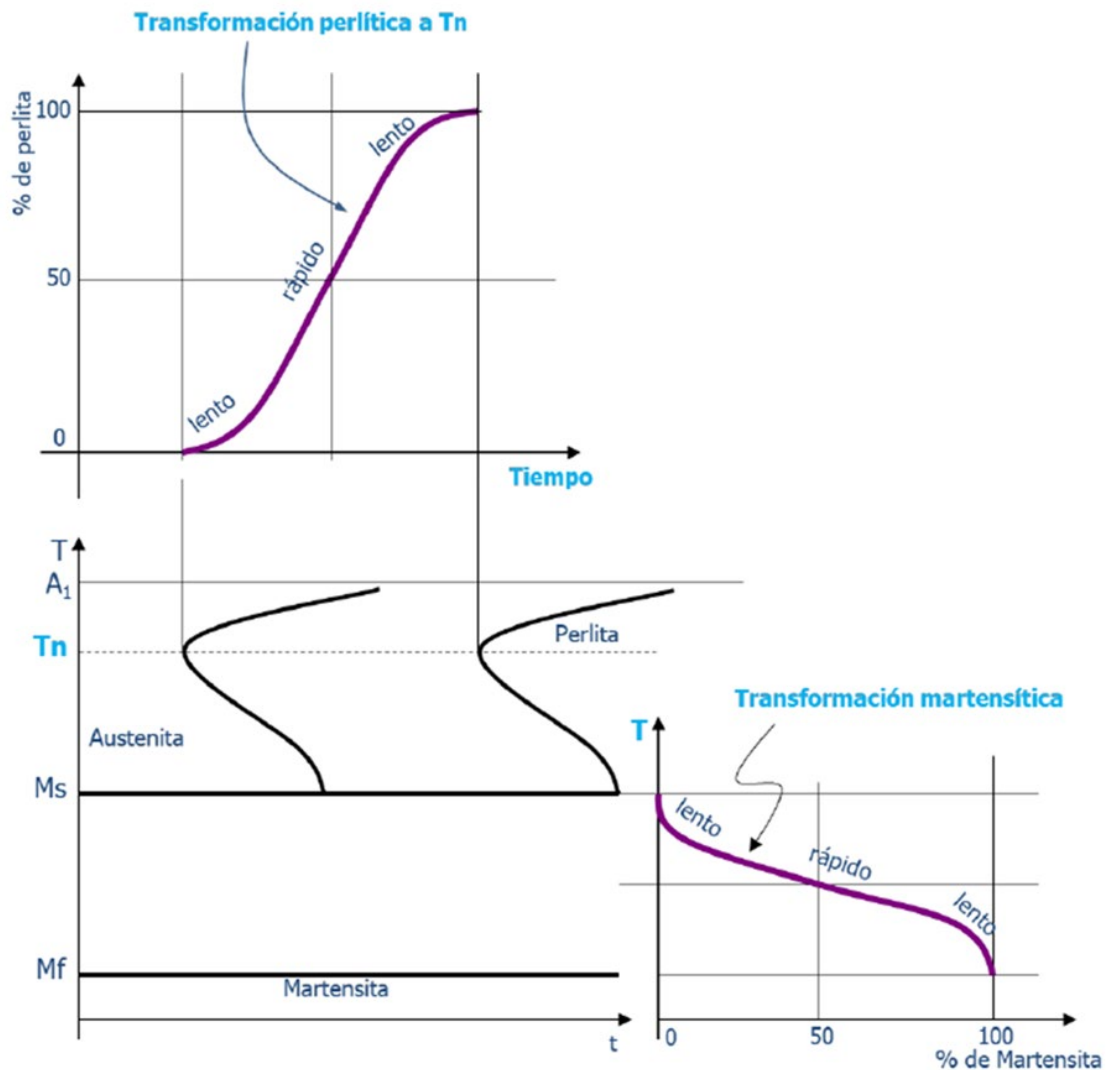


Figura 7 Transformación de austenita en perlita o martensita en función del tiempo y temperatura
 Fuente: Libro Ingeniería de Materiales – Curso 2022/23 (Ricardo García Ledesma, 2000b)

Cuando el enfriamiento es lento primero se forman dos productos a partir de la austenita: ferrita y cementita. La posterior combinación de estos dos productos es lo que da lugar a la tercera fase, la perlita. Los átomos de carbono disueltos en la aleación se distribuyen aleatoriamente por la red, haciendo que la cementita nucleee en las regiones ricas en carbono y la ferrita en las que no tienen casi carbono, o que directamente no tienen. Dicha distribución viene en función de la temperatura y el tiempo de la solidificación. En cuanto a las propiedades mecánicas del acero en estas condiciones, aunque pueden diferir debido a la composición específica y al proceso de enfriamiento, destacan por su comportamiento como material blando, dúctil, maleable, poco frágil, menos resistente que otras aleaciones y con un límite elástico más reducido que otras familias de aceros o tratamientos térmicos.

Por otro lado, cuando el enfriamiento es rápido (lo que se conoce como temple), el rápido enfriamiento de la aleación hace que la red cristalina se rigidice, restringiendo así la movilidad

atómica e impidiendo que se realicen las transformaciones del diagrama de equilibrio. La mayoría de los átomos se mueven en este caso de forma cooperativa, produciendo pequeños desplazamientos de un átomo con respecto a sus vecinos. Esto hace que se produzca una transformación polimórfica de una estructura cristalina de austenítica cúbica centrada en las caras a una estructura tetragonal centrada en el cuerpo, característica de la martensita (Figura 8 y Figura 9).

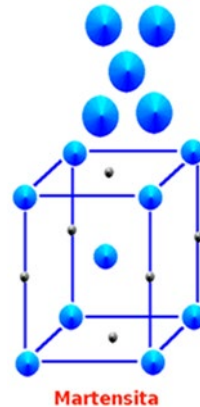


Figura 8 Estructura cristalina de la martensita
 Fuente: (Laboratorio de Forja, 2024b)

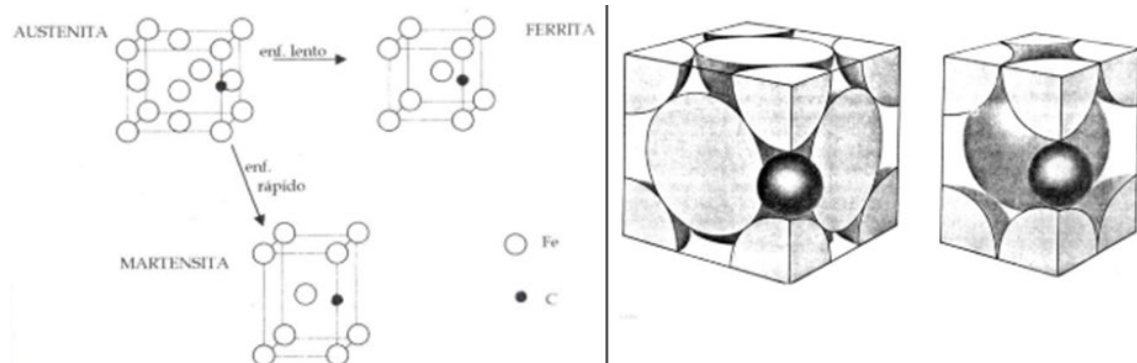


Figura 9 Celdas unitarias de austenita y martensita mostrando la posición del átomo de carbono.
 Fuente: (Facultad Regional Rosario, 2013)

Diagramas Transformación, Temperatura y Tiempo

Se trata de un gráfico en el que se relacionan tres variables: Transformación, Temperatura y Tiempo (TTT), también es conocida como curvas de las S puesto que presentan una forma similar a dicha letra. Mediante el uso de estos diagramas se puede estudiar las transformaciones que sufre el acero según se va enfriando.

Estos gráficos se construyen de forma experimental obteniéndose las curvas como las que se muestran en la Figura 10. Para la realización de estas gráficas se calientan a una temperatura superior a la de austenización varias probetas de chapa delgada. Se utilizan probetas de chapa

delgada para que sean más sensibles a los enfriamientos bruscos. Tras calentarlas, se introducen en un baño de sales fundidas a temperatura constante, T_1 . Las probetas se van sacando con un intervalo de tiempo establecido para enfriarlas en agua fría de forma brusca. Este proceso se repite para otras temperaturas, T_i . Una vez enfriadas todas las probetas se analiza la estructura de estas para ver la concentración de martensita y perlita generándose con la información los gráficos TTT correspondientes a esa aleación. Las líneas M_s y M_f se determinan observando a que temperatura empieza y termina, respectivamente, la transformación de la austenita en martensita por enfriamiento brusco.

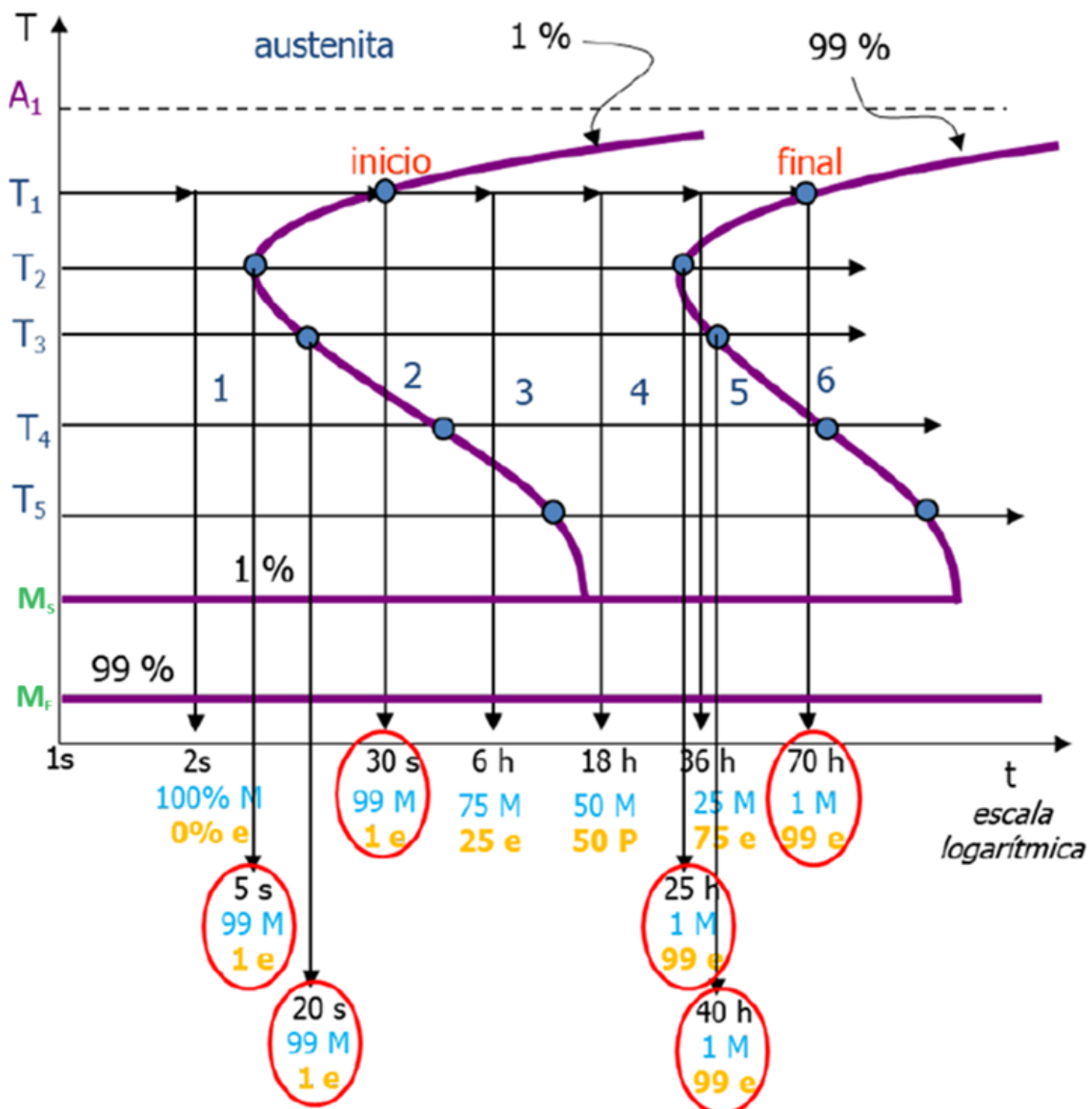


Figura 10 Método de obtención de las curvas TTT
Fuente: Libro Ingeniería de Materiales – Curso 2022/23 (Ricardo García Ledesma, 2000b)

En la Figura 11 se muestra en el eje de abscisas el tiempo en escala logarítmica, y en el ordenadas la temperatura. Las curvas, con forma de "S", representan las transformaciones

isotérmicas que pueden tener lugar durante el proceso de enfriamiento de un acero desde las temperaturas en las que se ha producido la austenita hasta la temperatura ambiente.

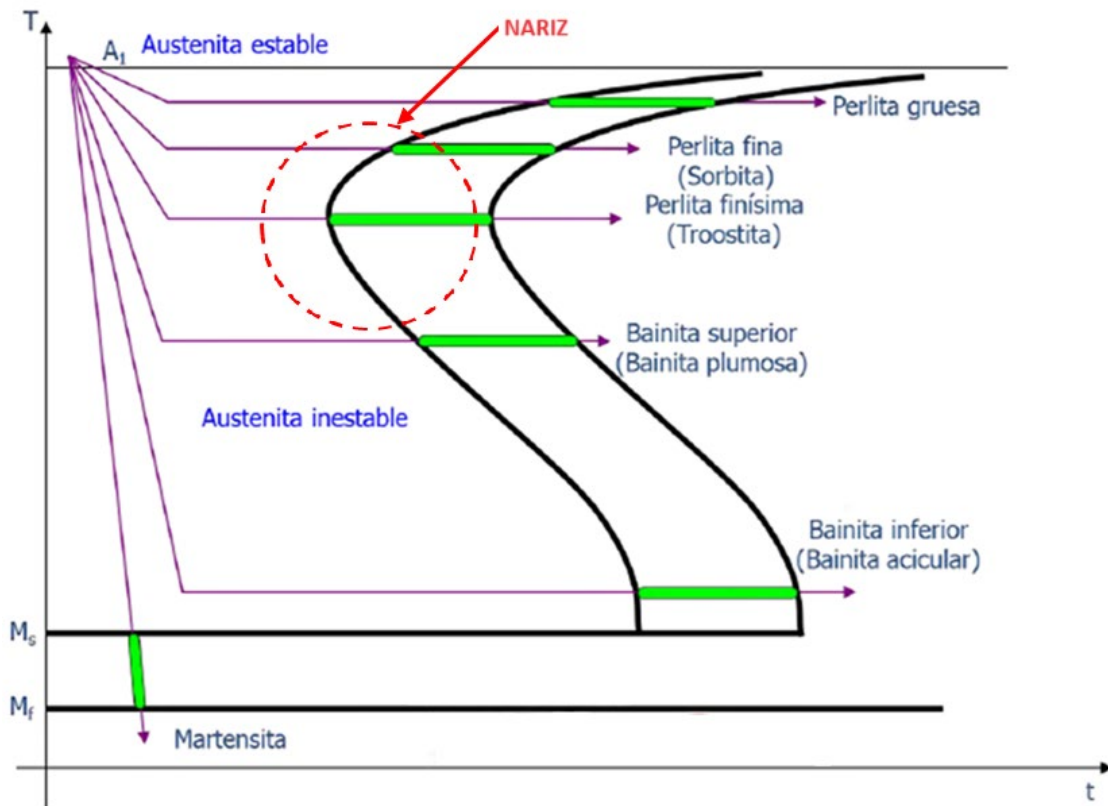


Figura 11 Diagrama TTT y los microconstituyentes que se originan al enfriar
Fuente: Libro Ingeniería de Materiales – Curso 2022/23 (Ricardo García Ledesma, 2000b)

Dependiendo del tipo de enfriamiento al que se someta a la aleación se obtendrán diversos tipos de microconstituyentes. Los enfriamientos que tienen lugar a temperaturas elevadas, superiores a las que se dan en la zona de la nariz de la curva, producen una nucleación térmica y dan lugar a transformaciones completas de la austenita, obteniéndose así perlita. Hay tres tipos de perlita: perlita gruesa, perlita fina o sorbita y perlita finísima o troostita. La perlita gruesa es la que se obtiene cuando se produce la transformación a una mayor temperatura. Según disminuye la temperatura de transformación, siempre por encima de la que marca la nariz de la curva, se obtienen las perlitas finas y finísimas. Cuanto mayor sea el tamaño de la perlita, mayor será el espesor de las plaquitas de cementita y su tamaño de grano; esto es debido a que el grado de subenfriamiento es menor.

Por otro lado, cuando la transformación isotérmica se produce a temperaturas inferiores a la de la nariz de la curva, la austenita se transforma en bainita. Esto se debe a que prevalece la rigidez de la red ante la fuerza de transformación, haciendo así que las estructuras obtenidas en esta región sean más finas, tengan forma de cristales alargados, que parten de la ferrita y se quedan formando ángulos de 60°. La curva de transformación también se desplaza hacia la

derecha por efecto de que prevalece la rigidez de la red ante la fuerza de transformación. Dentro de las bainitas hay dos tipos: la bainita superior o plumosa, que es la que se obtiene a mayor temperatura, y la bainita inferior o acicular. Las bainitas se identifican porque en ellas se observan zonas donde hay cristales alargados en forma de agujas, compuestos por ferrita y cementita.

Cuando se tiene una transformación realizada mediante una disminución progresiva de la temperatura, que no es una transformación isotérmica, se produce lo que se conoce como nucleación atérmica. Cuando se está produciendo una nucleación atérmica, el producto que se obtiene es la martensita. En la martensita la rigidez de la red cristalina impide que se desarrolle la transformación perlítica. La martensita presenta una estructura formada por agujas colocadas en agrupaciones, formando ángulos de 60° entre ellas.

Tratamientos térmicos

Los tratamientos térmicos en los metales son el conjunto de procesos térmicos de calentamiento y enfriamiento controlados que tienden a cambiar su estructura atómica interna sin producir cambios en la composición química de la aleación. Estos procesos han de realizarse con un control sobre la temperatura, la presión, el tiempo y la velocidad de calentamiento y enfriamiento del proceso. La finalidad de los tratamientos térmicos es el cambio de las propiedades mecánicas y estructurales del material sobre el que se realizan afectando, sobre todo, a la dureza, la resistencia, la tenacidad y la elasticidad. Un mismo material, con la misma composición química, tendrá distintas estas propiedades en función del tratamiento térmico que haya recibido (Figura 12).

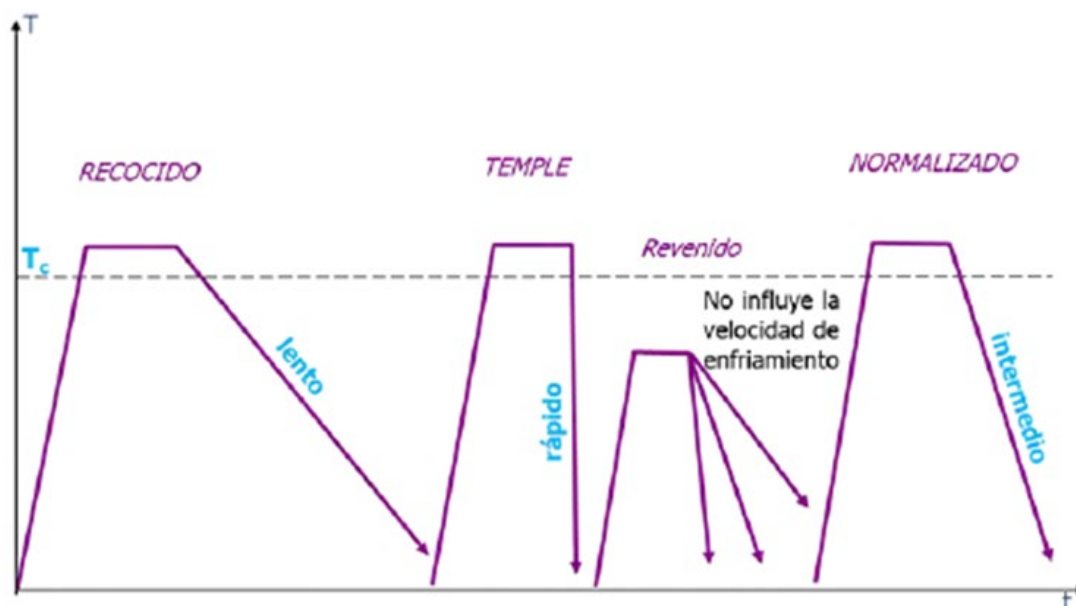


Figura 12 Tratamientos térmicos de los metales

Fuente: Libro Ingeniería de Materiales – Curso 2022/23 (Ricardo García Ledesma, 2000b)

Para que un tratamiento térmico tenga efecto sobre las propiedades mecánicas es necesario que se produzca movilidad atómica o difusión además de que se deje el tiempo necesario para que esto ocurra. Para conseguir que haya movilidad atómica es necesario que la aleación se encuentre a una temperatura superior a una temperatura crítica, T_c (Figura 12). El otro factor que influye para que haya movilidad atómica es el tiempo de cambio de temperatura. Con calentamientos y enfriamientos lentos se consigue que los átomos tengan el tiempo necesario para que puedan ocupar sus posiciones de equilibrio dentro de la red estructural, permitiendo de esta forma que la transformación sea plena. Por otra parte, si los calentamientos y enfriamientos son rápidos se dificulta la movilidad de los átomos dentro de la estructura cristalina y, con ello, se obtienen estructuras finales con propiedades muy diferentes a las que se obtendrían con los enfriamientos lentos que permiten las estructuras más estables.

En los tratamientos térmicos se suele aprovechar los cambios de solubilidad o transformaciones eutéctoides ya que facilitan la movilidad atómica dentro de la estructura. Los tratamientos térmicos se realizan aumentando la temperatura de la pieza por encima de la temperatura crítica del metal, T_c , pero sin llegar a la temperatura de fusión de este. Esto es así pues en caso de superar la temperatura de fusión del metal se produciría un cambio de fase, a líquido, que cambiaría la forma geométrica de la pieza y no es este el objetivo de un tratamiento térmico. En los tratamientos térmicos no se busca un cambio geométrico de la pieza sino un cambio en las propiedades del material que constituyen la pieza sin producirse cambios en la composición.

Cuando se realiza un tratamiento térmico hay que tener un control tanto en la velocidad de enfriamiento como en la de calentamiento de la pieza. El calentamiento de la pieza es tan importante como el enfriamiento pues es el responsable de que se produzca una correcta movilidad atómica que facilite la recolocación de los átomos dentro de la estructura. La práctica habitual es la colocación de las piezas dentro del horno apagado para que, de esta forma, se vayan calentando de forma simultánea y se pueda controlar correctamente la velocidad de calentamiento de la pieza.

Recocido

El recocido (Figura 13) es un tratamiento térmico que se realiza para transformar la austenita en unos constituyentes más estables, como son la perlita, ferrita y cementita. Para conseguir esta transformación de la austenita en los componentes más estables hay que controlar la velocidad de enfriamiento para que los átomos tengan tiempo de colocarse en las posiciones de equilibrio. Para ello hay que asegurar que el enfriamiento de la pieza una vez superada la temperatura crítica, y mantenida el tiempo necesario para dar movilidad a los átomos, se produzca de forma controlada y lenta.

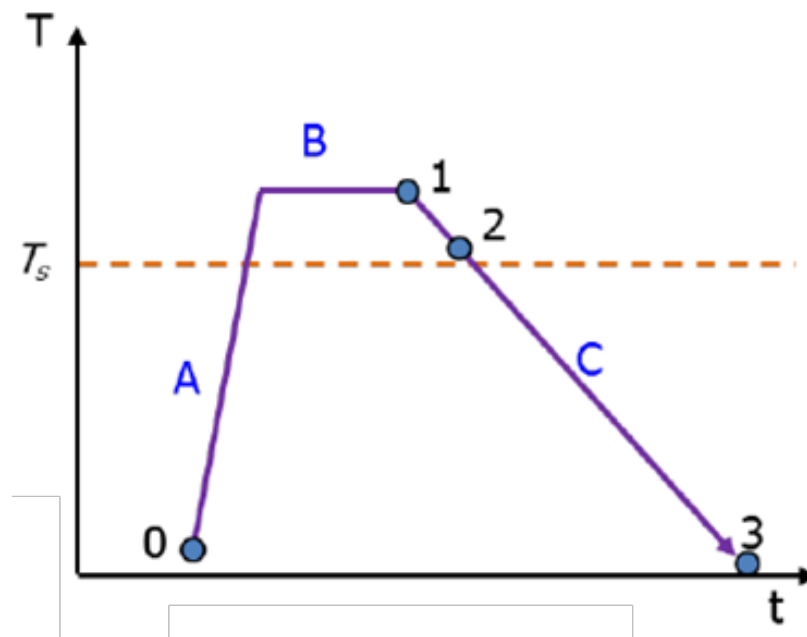


Figura 13 Ciclo térmico del recocido

Fuente: Libro Ingeniería de Materiales – Curso 2022/23 (Ricardo García Ledesma, 2000b)

La Figura 13 muestra el ciclo Temperatura/tiempo del recocido y cómo desde el estado inicial, temperatura ambiente, se calienta la pieza hasta superar la temperatura crítica (T_s en la figura), que es por lo general superior a la temperatura de austenización del material. Esta subida de temperatura se ha de hacer de una forma controlada y no muy brusca para que no haya grandes diferencias entre la temperatura de la superficie de la pieza y su interior. Para tratar de evitar estos gradientes de temperatura tan elevados se emplea un aumento controlado evitando, así, la aparición de grietas por diferencias de dilatación entre las distintas partes de la pieza. Tras alcanzar la temperatura máxima del ciclo hay que mantenerla constante durante un tiempo determinado para que se produzca una buena movilidad atómica dentro de la estructura, zona B de la figura. Con este tiempo a la temperatura máxima del ciclo se consigue que la transformación en austenita sea completa. La siguiente fase del ciclo de recocido es el enfriamiento de la pieza de forma controlada, zona C. En esta fase se realiza un enfriamiento controlado de la pieza para conseguir que se produzcan de forma completa las transformaciones de la austenita en perlita, ferrita y cementita. Con este proceso se consigue que la estructura final sea más estable.

Para realizar el proceso de enfriamiento lento se suelen dejar las piezas en el horno con las puertas abiertas o se introducen en unos baños de arena o ceniza calientes.

Temple

El temple (Figura 14) es un tratamiento térmico que se realiza para que la austenita se transforme en martensita. Para conseguir esta transformación en martensita se tiene que producir un enfriamiento rápido de la pieza para evitar que haya una gran movilidad atómica.

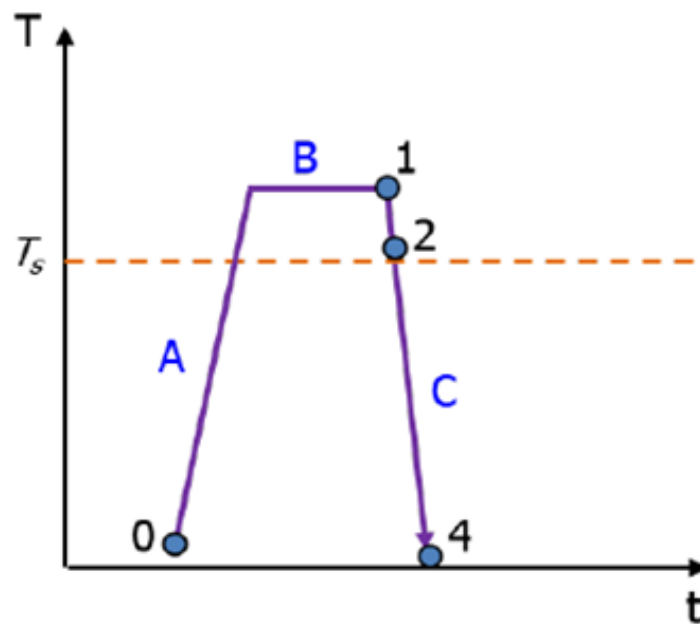


Figura 14 Ciclo térmico del temple

Fuente: Libro Ingeniería de Materiales – Curso 2022/23 (Ricardo García Ledesma, 2000b)

De forma similar al recocido, se debe elevar la temperatura por encima de la crítica del material, T_s en la Figura 14. Las primeras dos fases del ciclo del temple y del recocido son similares, zona A y B. Se ha de producir un calentamiento lento y controlado y una estancia a la temperatura máxima del ciclo que permita la formación de la austenita. Como en el recocido, se ha de superar la temperatura crítica (de formación de la austenita) pero con unas diferencias que se detallan a continuación. En los aceros hipoeutectoides se debe calentar 50°C por encima de la temperatura crítica, T_s , para evitar que queden rastros de ferrita en la estructura final. Sin embargo, en los hipereutectoides con que la temperatura sea superior a T_s es suficiente, puesto que la cementita sin transformar no ejerce influencia en las propiedades de la martensita. Hay que mantener la temperatura máxima del ciclo, zona B, el tiempo necesario para que toda la transformación en austenita se desarrolle por completo y haya una distribución homogénea dentro de la pieza. La última parte del ciclo, zona C, es el enfriamiento brusco de la pieza. Con este enfriamiento brusco se va a conseguir que la estructura, que se encontraba en una organización cristalina estable a una temperatura elevada, no tenga la posibilidad de reorganizarse y se evite la transformación en estructuras estables a bajas temperaturas. El proceso mediante el que se producen los cambios bruscos de temperatura es por la sumersión de las piezas en baños de refrigerante. Estos baños de refrigerante pueden ser el agua, petróleo, aceite o también mediante corrientes de aire frío.

Revenido

El revenido (Figura 15) es un tratamiento térmico que va asociado al temple y cuya finalidad es reducir lo máximo posible, e incluso eliminar, los efectos adversos que se producen durante

la aplicación del temple. Siempre se debería realizar después de un temple. Los efectos adversos que se trata de evitar mediante la aplicación del revenido son las tensiones internas y la fragilidad que se producen tras la aplicación de un temple. Sin embargo, durante el revenido se producen transformaciones estructurales que dan lugar a pérdidas de dureza, resistencia y bajadas del límite elástico.

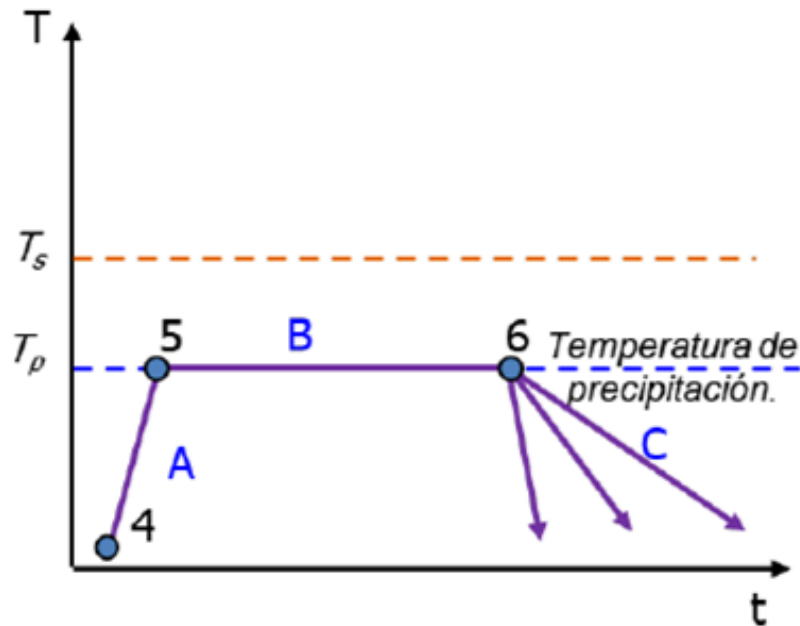


Figura 15 Ciclo térmico del revenido

Fuente: Libro Ingeniería de Materiales – Curso 2022/23 (Ricardo García Ledesma, 2000b)

El ciclo del revenido, Figura 15, se realiza a una temperatura máxima menor que la crítica, de austenización (T_s). Se aumenta la temperatura de forma controlada hasta la temperatura de precipitación (T_p). Una vez alcanzada esta temperatura se mantiene durante el tiempo necesario para la eliminación de los efectos adversos indicados anteriormente. Una vez pasado el tiempo establecido se realiza un enfriamiento controlado. La velocidad a la que se realiza el enfriamiento no es tan crítica como en otros procesos de tratamientos térmicos ya que no se ha producido difusión de los átomos dentro de la estructura.

Normalizado

El normalizado (Figura 16) es un tratamiento térmico en el cual se busca la formación de estructuras de perlita y martensita. Con este tratamiento térmico se consiguen unas propiedades mecánicas intermedias entre las que se obtendrían con un recocido y un temple.

El ciclo del normalizado en los procesos de calentamiento y mantenimiento de la temperatura máxima es similar a los analizados en el recocido y el temple. La temperatura máxima en este ciclo tiene las siguientes características: para los aceros hipoeutectoides la temperatura máxima ha de ser 50 °C superior a la " A_3 " indicada en la Figura 2; para los aceros hipereutectoides ha de estar en el rango de temperaturas entre " A_1 - A_{cm} " de la citada figura.

Como en los otros tratamientos térmicos, la temperatura máxima ha de mantenerse durante el tiempo necesario para que se produzca la transformación de la estructura cristalográfica. Para finalizar el ciclo se enfría a una velocidad intermedia entre la que se tiene en un recocido y un temple, por lo que se obtienen propiedades intermedias entre ambos tratamientos.

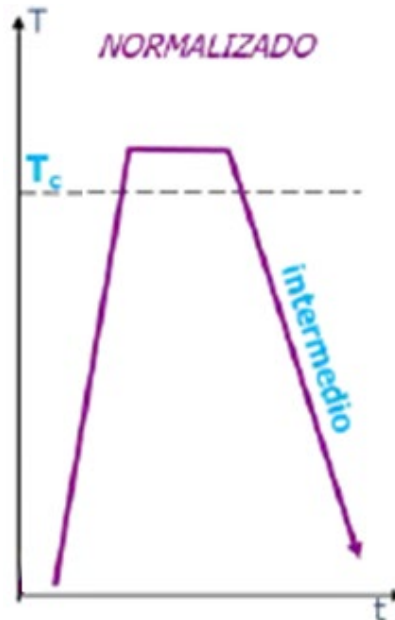


Figura 16 Ciclo térmico del normalizado

Fuente: Libro Ingeniería de Materiales – Curso 2022/23 (Ricardo García Ledesma, 2000b)

Templabilidad

La templabilidad en los aceros es una característica o propiedad que tiene en cuenta hasta qué profundidad y de qué forma se distribuye la dureza inducida durante el tratamiento térmico del temple. Durante el proceso de templado de los aceros se produce una transformación de las estructuras austeníticas en martensíticas y, debido a esa transformación, se cambian las propiedades de dureza de la aleación, la dureza inducida. La templabilidad es una forma de cuantificar cómo se produce esa transformación en un acero concreto, dando una idea de cómo se distribuye el cambio de la dureza inducida en la sección de la pieza. Los aceros que presentan una mayor penetración de la transformación martensítica hacia el núcleo son denominados de alta templabilidad, en caso contrario se denominan de baja templabilidad (Figura 17).

De entre los factores que afectan a la templabilidad de los aceros, el principal es la composición química. La composición química tiene efecto directo en la templabilidad, pero también indirecto ya que afecta a otros factores que condicionan la misma. Otro de los factores que influye en la templabilidad es la posición de las curvas S de la aleación, que a su vez están influenciadas por el porcentaje de carbono que presente el acero. También se ve influido por el tamaño de grano de la aleación y por el porcentaje de elementos aleantes. Estos últimos

determinan la velocidad crítica de temple, cuanto mayor sea el porcentaje de aleantes mayor será la velocidad crítica de temple. También influyen en la templabilidad el tamaño y forma de la pieza a templar, así como la velocidad de enfriamiento que se aplique.

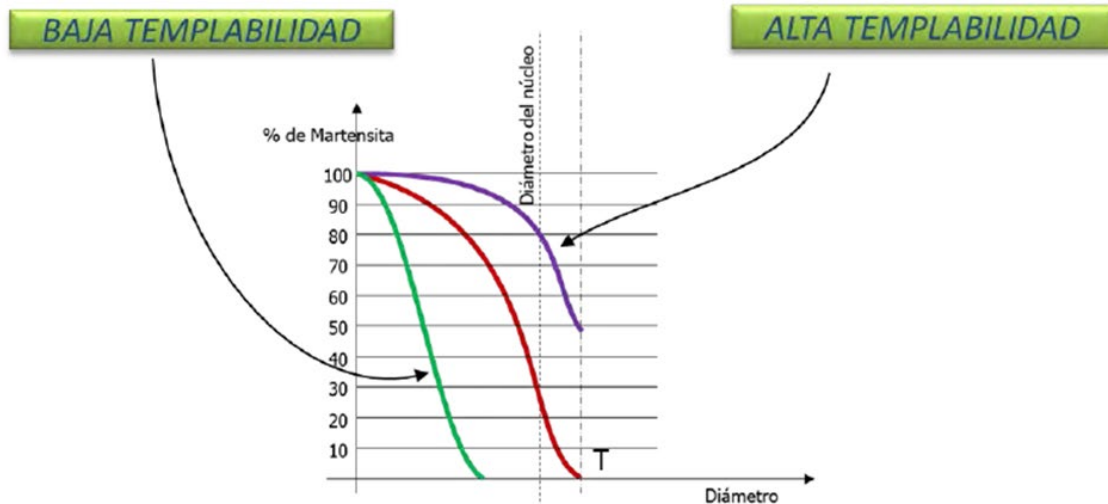


Figura 17 Diagrama alta-baja templabilidad

Fuente: Libro Ingeniería de Materiales – Curso 2022/23 (Ricardo García Ledesma, 2000b)

La templabilidad de un acero puede variar, aumentando o disminuyendo, si se varían los siguientes parámetros:

- Cuanto más desplazadas a la derecha estén las curvas S (Figura 18) mayor será la templabilidad del acero, el tiempo de templado hasta que se cruzan las curvas será mayor. Para desplazar las curvas S a la derecha se puede aumentar el porcentaje de carbono de la aleación, se puede cambiar el tamaño de grano y/o se pueden modificar los elementos aleantes.

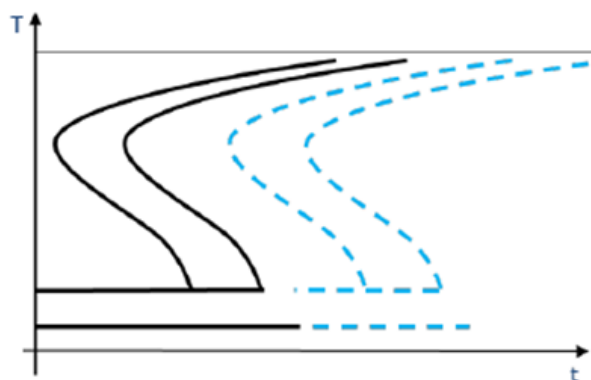


Figura 18 Posición de las curvas de las "S"

Fuente: Libro Ingeniería de Materiales – Curso 2022/23 (Ricardo García Ledesma, 2000b)

- El tamaño de la pieza que se vaya a templar (Figura 19). Las piezas grandes o con unos espesores mayores son menos templables por lo que en caso de necesitar unas propiedades particulares en el producto final puede que sea necesario rediseñar la pieza para mejorar su templabilidad por cuestiones geométricas.

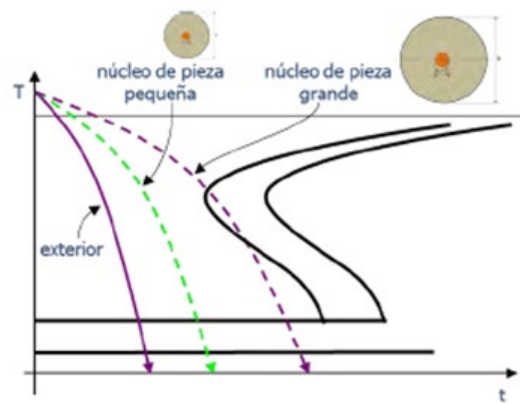


Figura 19 Tamaño de las piezas

Fuente: Libro Ingeniería de Materiales – Curso 2022/23 (Ricardo García Ledesma, 2000b)

- Modificando la velocidad de enfriamiento (Figura 20). Cuanto mayor sea esta, mayor será la templabilidad.

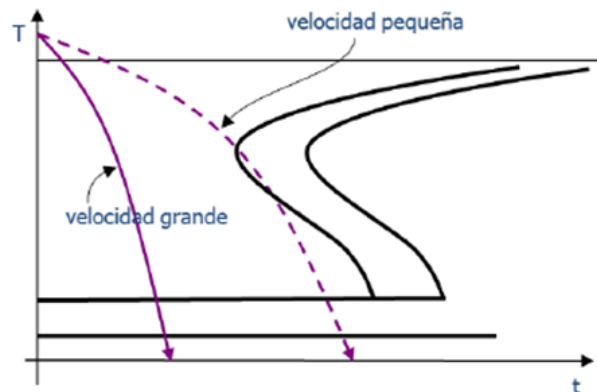


Figura 20 Velocidad de enfriamiento

Fuente: Libro Ingeniería de Materiales – Curso 2022/23 (Ricardo García Ledesma, 2000b)

Cuando se modifica alguno de los parámetros indicados anteriormente se produce un cambio en la templabilidad del acero y la pieza. Este cambio de templabilidad trae asociado unos inconvenientes y limitaciones al proceso que hay que tener en consideración a la hora de definirlo.

Severidad de temple y medios refrigerantes

La severidad de temple es la capacidad del medio refrigerante para eliminar la mayor cantidad de calor en el menor tiempo posible (Figura 21). A esta capacidad se la denomina con la letra H y sus unidades pueden ser $[H] = \text{cm}^{-1}$ o $[H] = \text{pg}^{-1}$.

Se dice que un refrigerante presenta capacidad de temple infinita ($H = \infty$) cuando al ponerlo en contacto con la pieza esta adquiere su temperatura instantáneamente. No hay ningún refrigerante que cumpla con esta definición, pero con este criterio es posible asignar valores a cada refrigerante teniendo como referencia este refrigerante ideal y así caracterizar su severidad de temple.

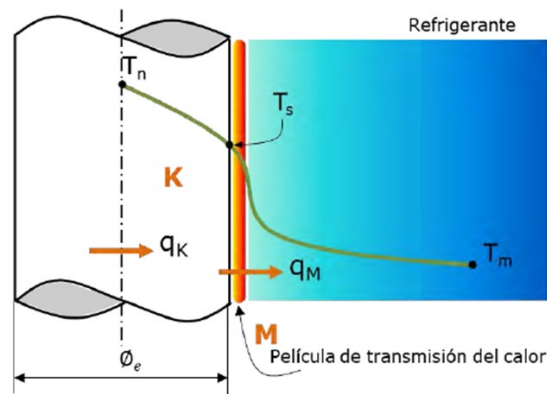


Figura 21 Severidad de temple en medios refrigerantes

Fuente: Libro Ingeniería de Materiales – Curso 2022/23 (Ricardo García Ledesma, 2000b)

El valor de la severidad del temple se define en función del coeficiente de película de refrigeración M , medido en cal/C , y de la conductividad calorífica del acero K , cuyas unidades son $\text{cal}\cdot\text{cm}/\text{C}$. La expresión utilizada para calcular la severidad del temple es:

$$H = \frac{M}{2 \cdot K} \quad (1)$$

Al ser la conductividad calorífica una constante de los aceros, la severidad del temple dependerá de la variación del coeficiente de película. Por lo que a valores de coeficiente de película grandes corresponderán valores de severidad de temple grandes, lo que se traduce en una mayor extracción de calorías por grado centígrado.

Otro factor que influye en la severidad de temple es la agitación del medio refrigerante (Tabla 2). Los medios refrigerantes en reposo presentan una menor severidad de temple que los medios agitados. Esto es debido a que al producirse la agitación se facilita la transmisión de calor dentro del medio refrigerante por lo que, en consecuencia, aumenta la capacidad de refrigeración y con ello la severidad de temple.

Tabla 2 Severidad del temple en función del medio refrigerante y su agitación.

Fuente: (Jorge Martínez, 2012)

Agitación	Aire	Sales	Aceite	Agua	Agua salada
Sin agitación	0,02	0,25-0,30	0,25-0,30	0,90-1,00	2,00
Agitación débil	-	0,30-0,35	0,30-0,35	1,00-1,10	2,00-2,20
Agitación moderada	-	0,35-0,40	0,35-0,40	1,20-1,30	-
Agitación media	-	0,40-0,50	0,40-0,50	1,40-1,50	-
Agitación fuerte	-	0,50-0,80	0,50-0,80	1,60-2,00	-
Agitación muy fuerte	-	0,08	0,80-1,10	4,00	5,00

Durante el proceso de enfriamiento de las piezas en los medios refrigerantes se dan diferentes etapas que afectan al coeficiente de película, la velocidad y los mecanismos de transmisión de calor que se producen. En la Figura 22 se muestran las distintas etapas y los mecanismos de enfriamiento que se dan en cada una de ellas.

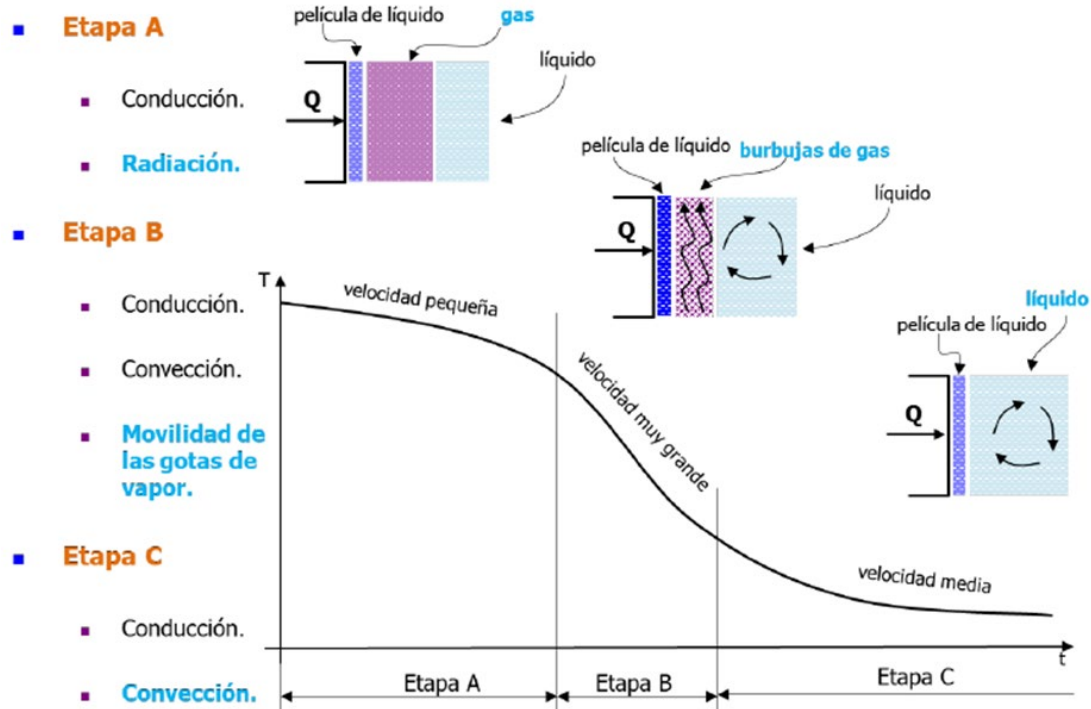


Figura 22 Etapas del proceso de enfriamiento de una pieza
Fuente: Libro Ingeniería de Materiales – Curso 2022/23 (Ricardo García Ledesma, 2000b)

La Etapa A es la denominada etapa de vapor. Es el momento inicial en el que se pone en contacto la pieza a templar con el medio refrigerante. Durante esta etapa inicial se produce la evaporización de las moléculas de refrigerante situadas en contacto con las paredes de la pieza debido a las altas temperaturas a las que se produce el contacto entre ambos elementos. La evaporización del medio refrigerante hace que se produzca una capa de vapor que rodea a la pieza durante el tiempo que la temperatura es elevada. Durante esta etapa la transmisión de calor se produce, fundamentalmente, por radiación y en menor medida por conducción, lo que se traduce en una velocidad de enfriamiento muy baja.

La siguiente etapa, Etapa B, se denomina etapa Vapor-Líquido. Una vez va disminuyendo la temperatura en la superficie de la pieza se va produciendo una disminución del espesor de la capa de gas que la rodea, lo que da lugar a la aparición de burbujas grandes de vapor próximas a la superficie. Estas burbujas se elevan bruscamente, por la diferencia de densidades con el medio refrigerante, produciendo una gran agitación en esa región debidas al movimiento ascendente de las burbujas de vapor. Cuando se produce este fenómeno hace que se aumente mucho la velocidad de enfriamiento, adquiriendo en esta etapa su valor máximo. Durante esta

etapa, la transmisión de calor es principalmente debida al movimiento ascendente de las burbujas de vapor, aunque también se produce cierta cantidad de transmisión por conducción y convección.

Por último, Etapa C, cuando en el contorno de la pieza se baja de la temperatura de ebullición del medio refrigerante produciéndose así un contacto íntimo entre la pieza y el medio refrigerante (capa liquido). En esta fase cesa la producción de vapor y la transmisión de calor se realiza, principalmente, por convección y conducción. La velocidad de enfriamiento va disminuyendo progresivamente a medida que lo hace la diferencia de temperatura entre la pieza y el medio refrigerante.

La secuencia descrita, Figura 23, es la que se produce cuando el medio refrigerante está en reposo. En el caso en el que el medio refrigerante tenga un estado de agitación inducido por medios externos, la velocidad de enfriamiento aumentará significativamente en la primera y última etapa del proceso de enfriamiento. La velocidad de enfriamiento en la segunda etapa se verá menos afectada, aunque también aumentará. En el caso de que el medio refrigerante no esté en reposo, la velocidad de enfriamiento será mucho mayor que la que se produce cuando la agitación se produce de forma natural por la convección.

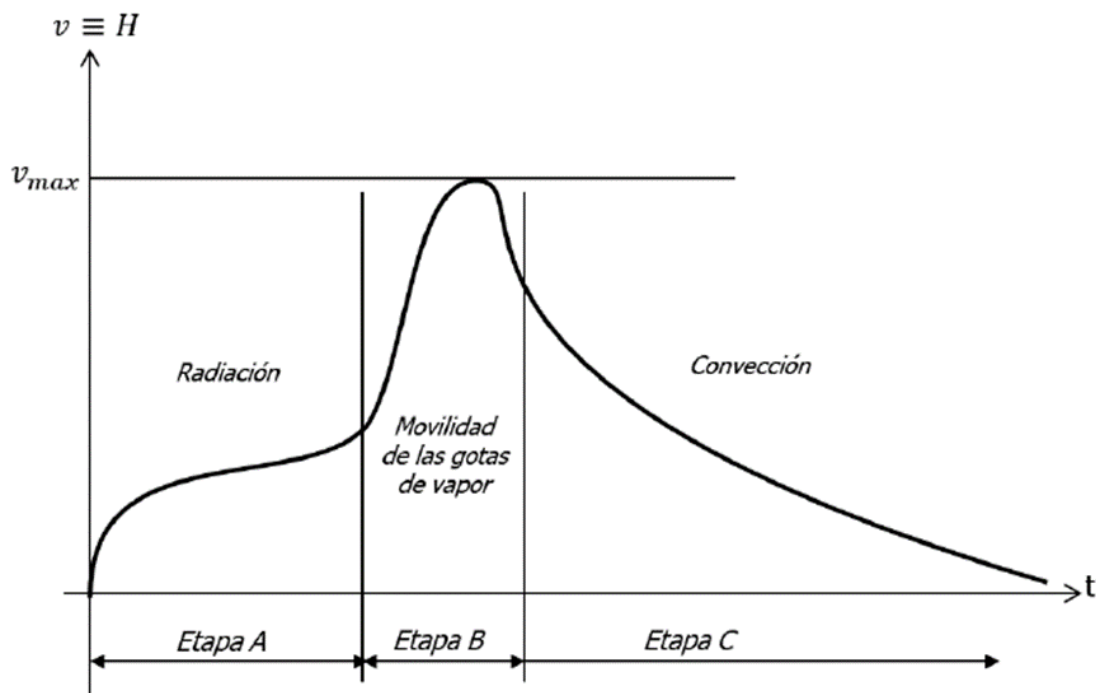


Figura 23 Velocidades de enfriamiento en cada etapa
 Fuente: Libro Ingeniería de Materiales – Curso 2022/23 (Ricardo García Ledesma, 2000b)

Parámetros que caracterizan la templabilidad

Los factores que permiten dar un valor a la templabilidad son: la velocidad crítica de temple, el diámetro de la pieza y la dureza críticos. A continuación, se explicará el impacto de cada uno de ellos.

Velocidad crítica de temple

Se define la velocidad crítica de temple como la velocidad mínima de enfriamiento requerida para que una pieza cuyo núcleo está compuesto por un 50% de martensita y un 50% de perlita se transforme en el tratamiento térmico y se consiga un 100% de martensita (Figura 24). Teniendo en cuenta esta definición se puede garantizar que cualquier velocidad de enfriamiento que sea superior a la crítica garantiza que en el núcleo se va a obtener al menos un 50% de martensita.

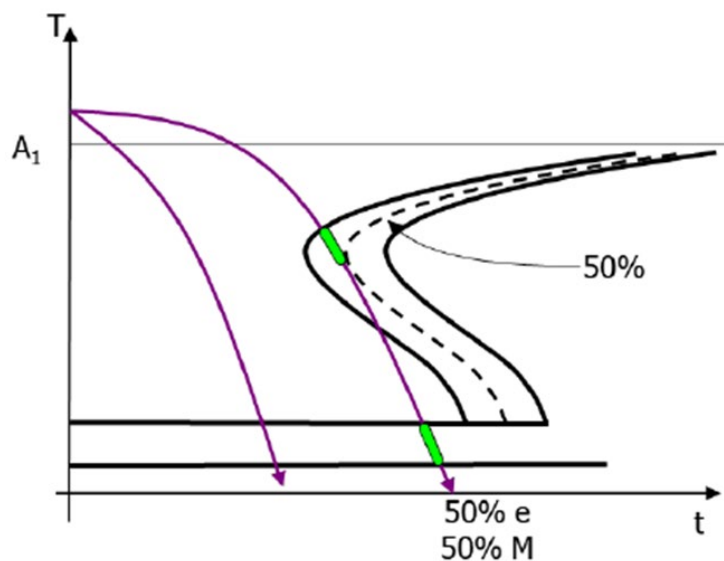


Figura 24 Velocidad crítica de temple

Fuente: Libro Ingeniería de Materiales – Curso 2022/23 (Ricardo García Ledesma, 2000b)

La velocidad crítica de temple está condicionada por la posición de las curvas S. La curva de la velocidad crítica de temple es tangente a la nariz de la curva S. Es por ello por lo que, cuanto más a la derecha esté desplazada la curva S, menor será la velocidad crítica de temple, por lo que el acero se templará con mayor facilidad ya que no se requerirá tanto al medio refrigerante.

Diámetro crítico

Hay que hacer una distinción entre el diámetro crítico (Φ_c) y el diámetro crítico ideal (Φ_{ci}).

El diámetro crítico (Φ_c) se refiere al diámetro de una pieza de acero cilíndrica que, al ser enfriada en un medio refrigerante, con una severidad de temple H, se obtiene en su núcleo un 50% de martensita y un 50% de perlita (Figura 25). Un acero tendrá mayor templabilidad cuanto mayor sea su diámetro crítico.

Por otro lado, el diámetro crítico ideal (Φ_{ci}) es aquel que al templar una pieza de acero cilíndrica en un medio refrigerante con severidad de temple infinita se obtiene en su núcleo un 50% de martensita y un 50% de perlita (Figura 26). Este diámetro es un indicador de la templabilidad de un acero en condiciones ideales y da una idea de las capacidades del proceso de temple para ese acero.

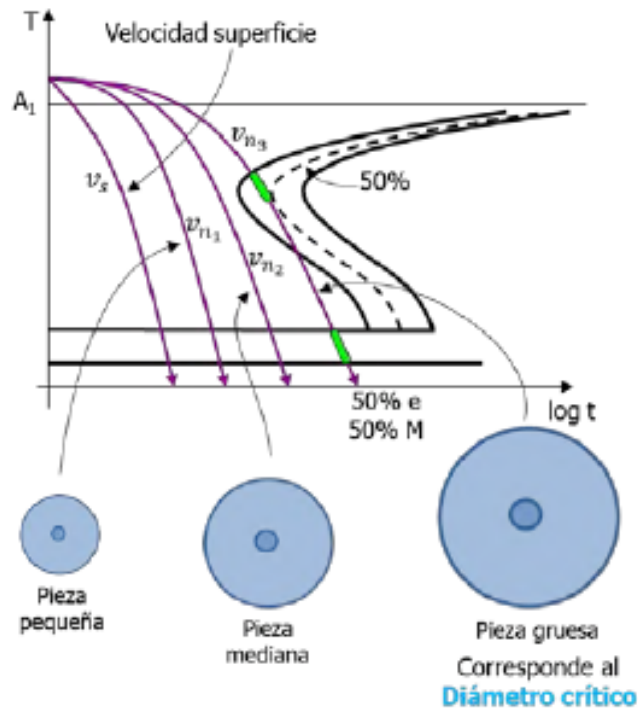


Figura 25 Diámetro crítico
Fuente: Libro Ingeniería de Materiales – Curso 2022/23 (Ricardo García Ledesma, 2000b)

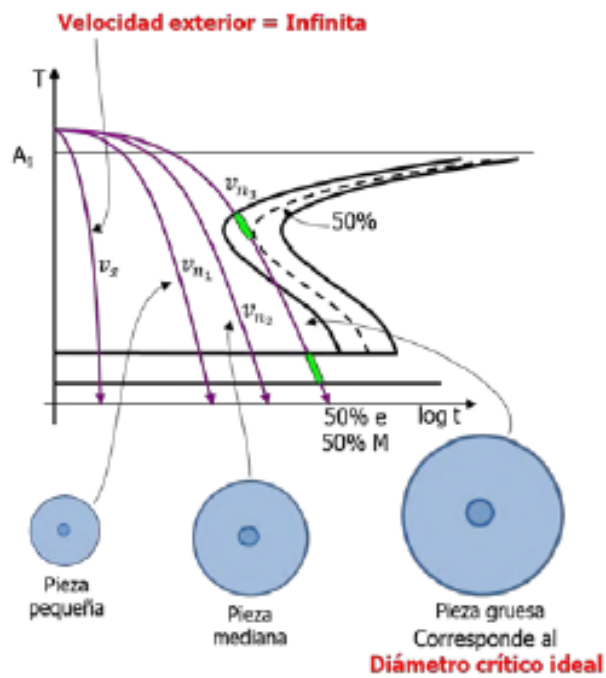


Figura 26 Diámetro crítico ideal
Fuente: Libro Ingeniería de Materiales – Curso 2022/23 (Ricardo García Ledesma, 2000b)

Dureza crítica

La dureza crítica es la que presenta un acero cuya estructura está compuesta por 50% martensita y 50% perlita en su núcleo (Figura 27).

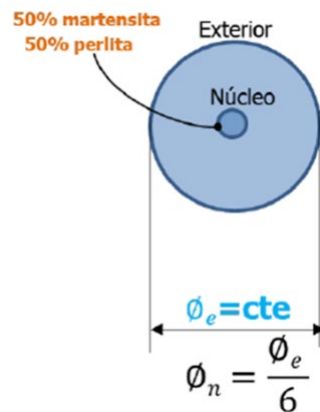


Figura 27 Dureza crítica

Fuente: Libro Ingeniería de Materiales – Curso 2022/23 (Ricardo García Ledesma, 2000b)

Medida de la templabilidad

Para realizar la medida de la templabilidad de los aceros se pueden realizar uno de los dos métodos siguientes: el método de las curvas en U, o el método del ensayo Jominy. El más utilizado es el método del ensayo Jominy, que es el que se utilizará en este TFG, por lo que se expondrá con más detalle en otros apartados.

Ambos métodos están basados en la representación gráfica de la dureza adquirida por un acero templado en función de la distancia a la zona de enfriamiento. De la representación gráfica de las curvas de dureza obtenidas con ambos métodos se puede deducir el diámetro crítico en función de la dureza crítica o viceversa.

Método de las curvas en U

Este método se basa en ensayar varias probetas cilíndricas de diferentes diámetros y del mismo acero. Las probetas se han de calentar hasta que se alcanza la temperatura de austenización y, posteriormente, se introducen en un medio refrigerante con severidad de temple H. Cuando se introducen las probetas en el medio refrigerante (Figura 28) se han de proteger las caras planas mediante el uso de un cuerpo aislante térmico, como puede ser un material refractario. La protección de las caras planas con el material aislante se hace para que el enfriamiento de la probeta se haga únicamente en la dirección radial y no en la axial.

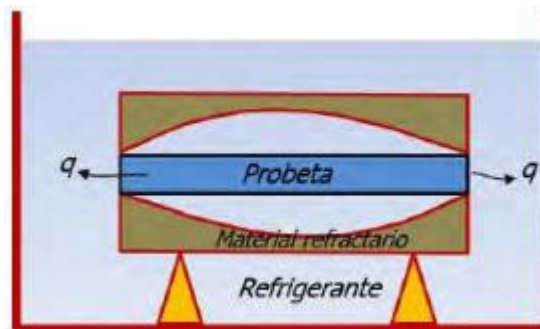


Figura 28 Proceso de refrigeración en método de las curvas U

Fuente: Libro Ingeniería de Materiales – Curso 2022/23 (Ricardo García Ledesma, 2000b)

Después de enfriadas las piezas se pasa a la fase de medición de la dureza. Las mediciones de dureza se hacen a lo largo de uno de los radios a distancias establecidas (Figura 29). Se representa gráficamente la dureza de cada una de las probetas en función de la distancia al borde para cada una de las probetas ensayadas (Figura 30).

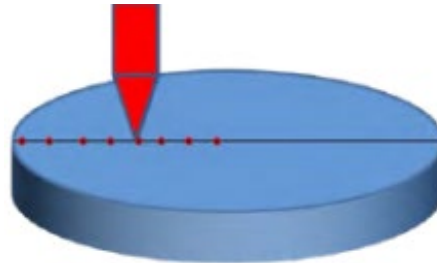


Figura 29 Medición de durezas en el método de las curvas U
 Fuente: Libro Ingeniería de Materiales – Curso 2022/23 (Ricardo García Ledesma, 2000b)

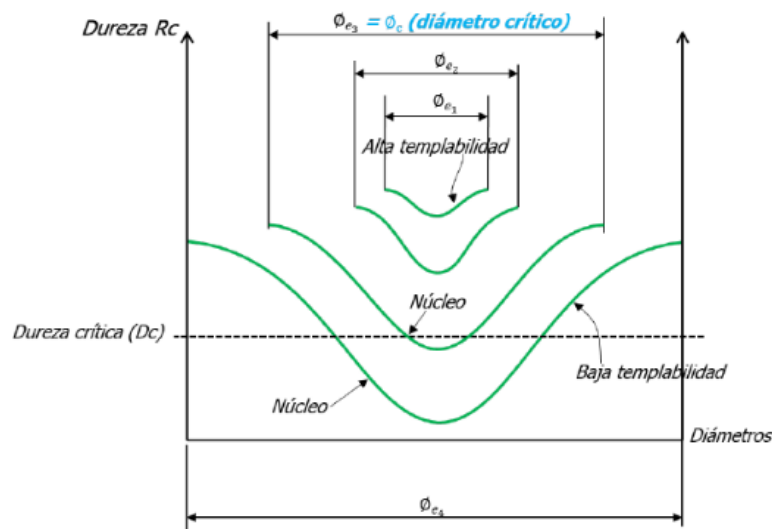


Figura 30 Curvas en U obtenidas tras el ensayo
 Fuente: Libro Ingeniería de Materiales – Curso 2022/23 (Ricardo García Ledesma, 2000b)

El método de las curvas en U es un proceso difícil de ejecutar correctamente y de un coste elevado. El hecho de tener que proteger las caras durante el proceso de enfriamiento hace que haya muchas probabilidades de que el ensayo no salga bien si no se ha protegido adecuadamente. Es por esto por lo que no se emplea con frecuencia ya que el método Jominy es más sencillo y barato.

Banda de templabilidad

Con pequeñas variaciones del tamaño de grano o de la composición química del acero, entre otros, se producen curvas de templabilidad diferentes. Es por ello por lo que se ha introducido un concepto para clasificar los aceros por similitud de templabilidad, este concepto es la banda de templabilidad. La banda de templabilidad se define como una región colindante a la curva de Jominy de un acero (Figura 31) que engloba a otros aceros (con sus curvas de Jominy correspondientes) que se consideran equivalentes en lo que a templabilidad se refiere.

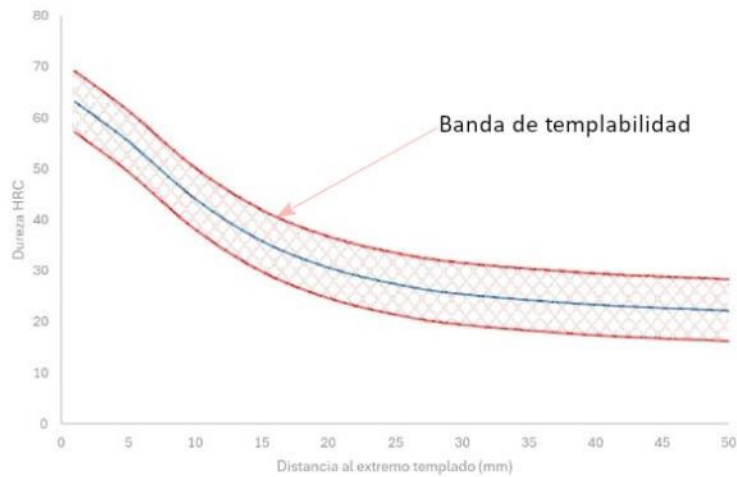


Figura 31 Banda de templabilidad
 Fuente: Elaboración propia

Ensayo Jominy

El Ensayo Jominy es otro de los métodos desarrollados para conocer la templabilidad de los aceros. Desarrollado originalmente por Walter E. Jominy y A.L. Boegehold ha sido adoptado por la comunidad metalúrgica y se ha estandarizado a través de la norma internacional UNE EN-ISO 642:2000. Esta norma fija el procedimiento que hay que seguir para la realización del ensayo Jominy, ensayo de templabilidad del acero por templado final, de forma que se obtengan resultados comparables.

La norma fija las dimensiones de la probeta a utilizar para la realización del ensayo. La probeta tiene unas dimensiones establecidas de 100 milímetros de longitud y 25 milímetros de diámetro, tal y como se muestra en la Figura 32.

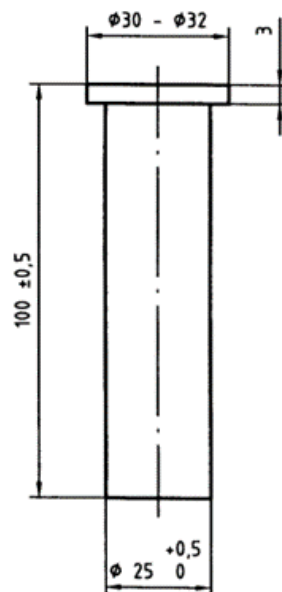


Figura 32 Probeta ensayo Jominy
 Fuente: (UNE-EN ISO 642, 2000)

Para la realización del ensayo la norma define dimensiones y parámetros de la probeta y de los medios de ensayo que han de ser controlados para que los resultados obtenidos sean comparables. Entre los valores que define la norma para la realización del ensayo se encuentran: las dimensiones y tolerancias de la probeta a ensayar; la temperatura del refrigerante, en el caso del ensayo normalizado se trata de agua; las condiciones de calentamiento de la probeta, tanto el tiempo como la temperatura, y otros valores. En la Tabla 3 se muestran resumidos los principales valores que hay que tener en cuenta para la realización del ensayo según la norma.

Tabla 3 Símbolos y designaciones utilizados en UNE-EN ISO 642:2000

Fuente: (UNE-EN ISO 642, 2000)

Símbolo	Designación	Valor
L	Longitud total de la probeta	$(100 \pm 0,5)$ mm
D	Diámetro de la probeta	$(25_0^{+0,5})$ mm
t	Tiempo que la probeta se mantiene a la temperatura de calentamiento	(30_0^{+5}) min
t_m	Tiempo máximo transcurrido entre la salida de la probeta del horno al principio del temple	5 s
T	Temperatura del agua de enfriamiento	$(20 \pm 0,5)$ °C
a	Diámetro interior del orificio de salida del agua	$(12,5 \pm 0,5)$ mm
h	Altura del chorro de agua en ausencia de la probeta	(60 ± 10) mm
l	Distancia de la cara inferior de la probeta al orificio de salida	$(12,5 \pm 0,5)$ mm
e	Profundidad de los semiplanos (rebajos) para medida de la dureza	(0,4 a 0,5) mm
d	Distancia, en milímetros, de los puntos en que se mide la dureza al extremo templado	
J_{xx-d}	Índice de templabilidad Jominy a la distancia d, en Rockwell HRC-mm	
JHV_{xx-d}	Índice de templabilidad Jominy a la distancia d, en Vickers HV30-mm	

Una vez realizada la preparación de la probeta los pasos a seguir para la realización del ensayo según la norma son los siguientes:

1. Calentar la probeta y mantenerla a temperatura durante los tiempos que indica la norma. Se debe realizar un calentamiento de la probeta de forma uniforme durante al menos 20 minutos. La temperatura hasta la que hay que llevar la probeta es la que establezca la norma del acero correspondiente. La temperatura ha de ser superior a la temperatura austenítica. Después hay que mantener esa temperatura durante 30 minutos (con un margen de 5 minutos extra) para asegurar que se produzca la transformación completa a fase austenítica.

2. Una vez completado el ciclo de calentamiento en el horno, la probeta se debe extraer y colocar sobre el equipo de templado. Se colocará la probeta y se asegurará en el equipo de templado y se procederá a realizar el mismo según las especificaciones dadas por la norma. El templado se realizará por el extremo contrario al mecanizado para sujetarla al equipo de templado.
3. Acabado el proceso de templado y tras realizar la preparación superficial de la probeta, se procederá a la toma de la dureza en los puntos especificados en la norma. La medida de las durezas se realiza en una zona de la probeta que se mecaniza previamente para asegurar una correcta toma de las medidas. Las medidas realizadas se registran para la posterior evaluación de la templabilidad del acero ensayado.

Para la realización del temple se utiliza un equipo que consta de una tobera de proyección del medio refrigerante, en el caso de este ensayo normalizado este medio refrigerante es el agua, que proyectará el agua sobre uno de los extremos de la probeta. Durante la proyección del agua hay que garantizar que el flujo que se produce es un flujo sin turbulencias. La tobera de proyección ha de tener las dimensiones de la Figura 33, donde también se define la altura hasta la que debe de llegar el chorro de agua cuando se proyecta sin la probeta.

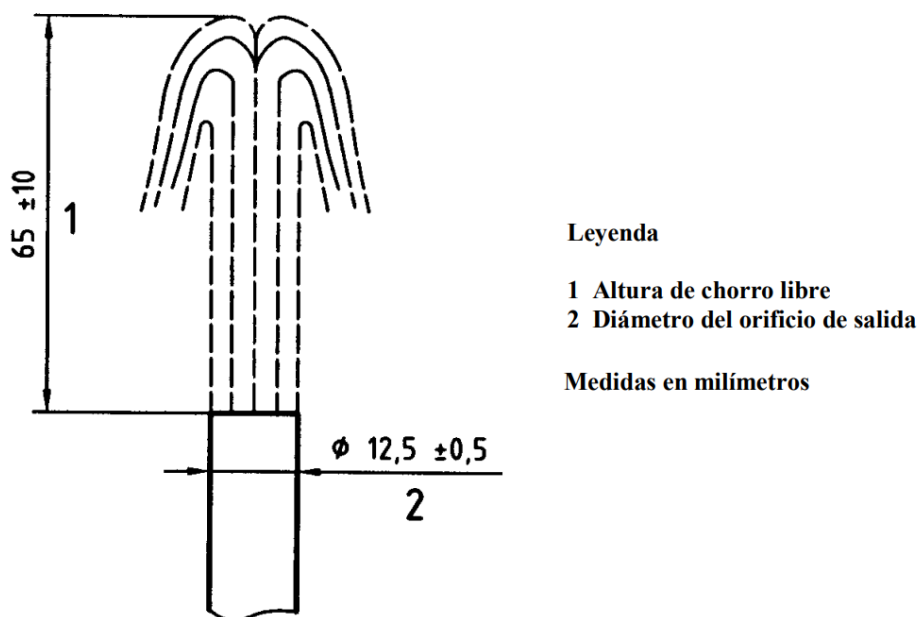


Figura 33 Tobera de proyección
Fuente: (UNE-EN ISO 642, 2000)

En la Figura 34 se muestra cómo ha de quedar colocada la probeta en el dispositivo de temple para la realización del tratamiento térmico según la norma. La probeta debe quedar colocada sobre la tobera de forma que entre el extremo de esta y la cara de la probeta que va a recibir el chorro de agua haya una distancia de 12,5 mm ($\pm 0,5$). El dispositivo de fijación de la probeta tiene que permitir la alineación de esta para que el chorro de agua incida sobre el centro de la

cara y así garantizar un correcto templado de la pieza. La válvula de control de flujo de agua debe ser capaz de producir una apertura y cierre del flujo de agua rápidos, de forma que no se produzcan efectos no deseados durante el proceso de enfriamiento de la probeta. Se busca que el inicio de enfriamiento sea brusco, no progresivo. La tubería después de la válvula debe tener al menos 50 mm de longitud para garantizar que el flujo de agua no sea turbulento.

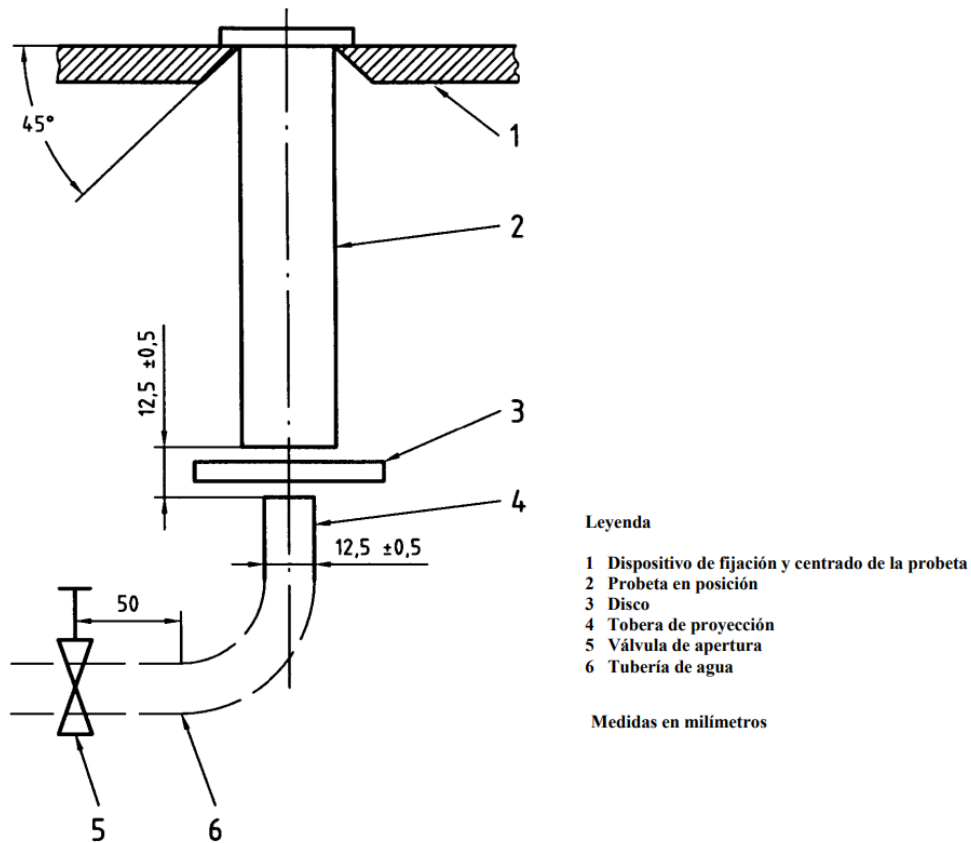


Figura 34 Esquema de un dispositivo de temple
Fuente: (UNE-EN ISO 642, 2000)

La probeta ha de ser calentada hasta la temperatura especificada en la norma de producto del acero, que debe ser superior a la temperatura de austenización. El proceso de calentamiento ha de ser uniforme y no debe durar menos de 20 minutos. Se ha de mantener la probeta a esta temperatura durante 30_0^{+5} minutos para asegurar que se ha producido una austenización completa del acero. Una vez completado el ciclo de calentamiento hay que extraer la probeta del horno y colocarla en el dispositivo de temple para iniciar el ciclo de enfriamiento. Esta operación, sacar la pieza del horno, colocarla y empezar la proyección del medio refrigerante, se debe realizar en un máximo de 5 segundos. La proyección de agua se debe realizar durante al menos 10 minutos para asegurar que el tratamiento térmico se realiza completamente.

Una vez se ha realizado este proceso, no deben transcurrir más de 5 segundos entre la salida de la probeta del horno y el inicio de la proyección. La proyección de agua debe ser al menos 10 minutos para que el temple se realice completamente.

Tras el templeado de la probeta se procederá a la realización de los ensayos de dureza. Para ello hay que preparar las probetas realizando dos rebajes opuestos a lo largo de la misma, paralelos al eje, con unas dimensiones de entre 0,4 y 0,5mm. Se realizarán mediante un rectificado superficial, teniendo la precaución de no aumentar la temperatura durante el proceso de mecanizado para no modificar la microestructura de la probeta. En la Figura 35 se muestra la definición de los rebajes a realizar en la probeta, así como la posiciones en las que se deben realizar las medidas de dureza.

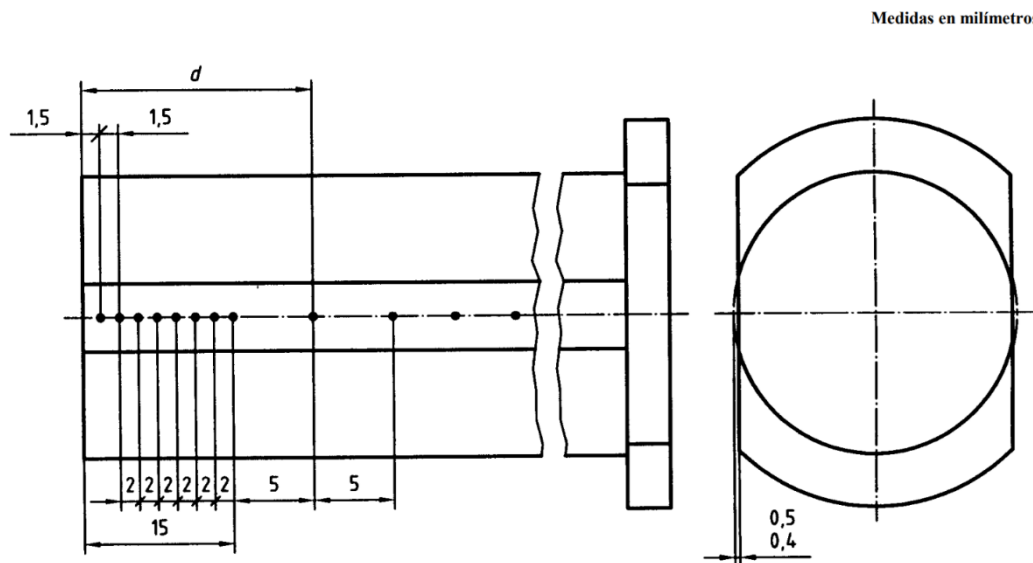


Figura 35 Preparación de la probeta para la medición de la dureza y emplazamiento de los puntos de medida
Fuente: (UNE-EN ISO 642, 2000)

La toma de las medidas se puede realizar tanto en la escala Rockwell como en la Vickers, la norma da la opción de tomarlas en cualquiera de las dos. La forma en la que se toma la dureza en ambas escalas es similar. Hay que prestar especial atención en la forma en la que se coloca la probeta durante la medición de la dureza. Se debe garantizar que la probeta esté bien apoyada y rígidamente sujeta durante el proceso de toma de la dureza para no inducir errores de medida que puedan desvirtuar los resultados del ensayo de templabilidad.

La elección de los puntos de medida de la dureza se debe elegir de forma que se permita una de las dos comprobaciones siguientes:

- Construcción de la curva representativa de las variaciones de la dureza. En este caso, el general en los aceros, se medirán los 8 primeros puntos a las distancias de 1,5/3/5/7/9/11/15 mm del extremo templeado y se espaciarán los siguientes puntos 5 milímetros. Si se ensaya un acero de baja templabilidad se medirá el primer punto a 1 mm del extremo templeado y se espaciarán los siguientes puntos 1 mm hasta llegar a la distancia de 11 mm del extremo templeado, los siguientes puntos estarán a 13/15/20/25/30 mm.

- Determinación de la dureza en uno o varios puntos prefijados dentro de la probeta. La medida de la dureza se realizará en uno o varios puntos de los definidos en el punto anterior. Este método se utiliza más como medio de control que como determinación de la templabilidad del acero.

Dureza Rockwell

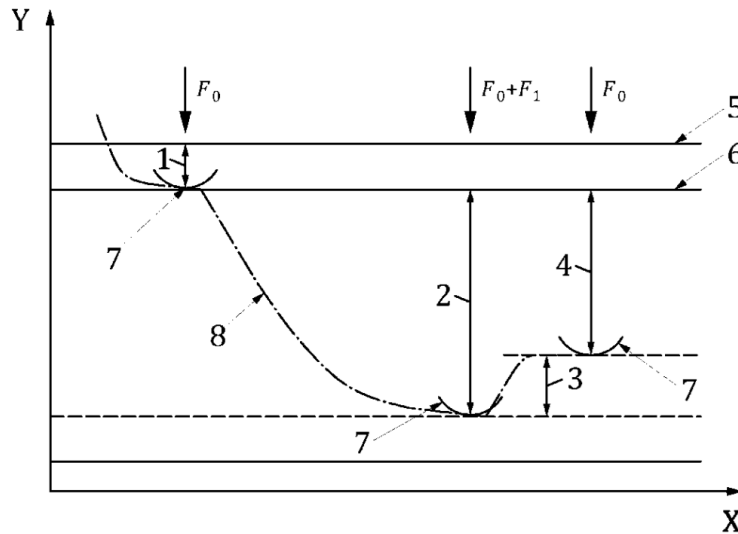
El ensayo de dureza Rockwell se emplea para la determinación de la dureza relativa de un material metálico. Este ensayo fue originalmente concebido por el austriaco Paul Ludwik en 1908 aunque no se empezó a emplear de forma generalizada hasta que los hermanos Hugh y Stanley Rockwell desarrollaron el primer equipo probador en 1914. Este proceso se ha estandarizado y en la actualidad se realiza según la norma UNE-EN ISO 6508-1.

Para la realización de la medida de la dureza se emplea un indentador o penetrador definido según la norma UNE-EN ISO 6508-2. El penetrador puede tener dos formas distintas: un cono de diamante de ángulo 120° y radio de punta 0,2 milímetros; una bola de carburo de tungsteno con un diámetro de 1,5875 mm o 3,175 mm.

El proceso de toma de la medida de la dureza, una vez colocada la pieza en un soporte rígido y apoyado de forma que la superficie sobre la que se va a realizar la medición esté en un plano perpendicular al eje del penetrador, es el siguiente (Figura 36):

- Se coloca el penetrador en contacto con la superficie a la que se le va a realizar la prueba de dureza sin chocar, asegurando que no se producen vibraciones, oscilaciones o sobrecargas. Se aplica la carga correspondiente a la fuerza preliminar (F_0). El tiempo de aplicación de esta fuerza no debe ser superior a 2 s. La fuerza preliminar ha de estar aplicada durante un tiempo de $3 \pm \frac{1}{2}$ s
- Se realiza la medición de la profundidad inicial. La toma de esta medida se realizará dependiendo del tipo de máquina que se emplee en la realización del ensayo, hay máquinas manuales y automáticas.
- A continuación, se aplica la fuerza adicional (F_1), aplicándola sin choques, vibraciones, oscilaciones ni sobrecargas. La fuerza adicional junto con la fuerza preliminar da lugar a la fuerza total (F) aplicada durante el ensayo. La aplicación de la fuerza adicional se ha de realizar en un intervalo de tiempo máximo, dependiendo del tipo de escala Rockwell que se emplee:
 - Escala Rockwell normal: F_1 se aplicará en un intervalo de 1 s a 8 s máximo.
 - Escala Rockwell superficial: F_1 se aplicará en un intervalo máximo de 4 s.
- La fuerza total se mantendrá aplicada durante un tiempo de $5 \pm \frac{1}{3}$ s. Después se retirará la fuerza adicional (F_1) y se mantendrá la fuerza preliminar de ensayo (F_0). Transcurridos

4_{-3}^{+1} s desde que se retiró la fuerza adicional (F_1) se realizará la lectura final de la profundidad de la marca del penetrador.



Leyenda

X	Tiempo	4	Profundidad permanente de penetración, h
Y	Posición del penetrador	5	Superficie de la muestra
1	Profundidad de penetración por la fuerza preliminar, F_0	6	Plano de referencia para las mediciones
2	Profundidad de penetración por la fuerza adicional de ensayo, F_1	7	Posición del penetrador
3	Recuperación elástica justo después de la retirada de la fuerza adicional de ensayo, F_1	8	Curva de profundidad de penetración en función del tiempo

Figura 36 Esquema del principio Rockwell

Fuente: (UNE-EN ISO 6508-1, 2017)

Tras concluir el procedimiento anterior y una vez realizadas las medidas de la profundidad de las huellas del penetrador con la fuerza preliminar y tras aplicar la fuerza total y relajar la presión, se procederá al cálculo de la dureza utilizando la expresión (2). Para realizar los cálculos se necesita la información facilitada, según sea el caso, en las tablas siguientes: Tabla 4, Tabla 5 y Tabla 6

$$\text{Dureza Rockwell} = N - \frac{h}{S} \quad (2)$$

La profundidad permanente de penetración, h , se obtiene según se indica en la Figura 36. Los valores de la constante de fondo de escala (N) y de la constante de escala (S) son los dados en la Tabla 4 o la Tabla 5 dependiendo de si se emplean escalas de dureza Rockwell normales o superficiales respectivamente.

Dada la gran variedad de materiales metálicos que pueden ser objeto de la medida de la dureza mediante el método Rockwell y de que las propiedades mecánicas difieren mucho de unos a otros, el método define varias escalas diferentes para tener una mayor flexibilidad. Cada una de las escalas definidas en el método está caracterizada por un tipo de penetrador, una fuerza preliminar y una fuerza total diferentes. De los dos tipos de escalas definidos, escalas de

dureza Rockwell normales y escalas de dureza Rockwell superficiales, los segundos se emplean en aplicaciones en las que los espesores son pequeños.

Tabla 4 Escalas de dureza Rockwell normales

Fuente: (UNE-EN ISO 6508-1, 2017)

Escala de dureza Rockwell normal	Símbolo de dureza Unidad	Tipo de penetrador	Fuerza preliminar F_0	Fuerza total F	Constante de escala S	Fondo de escala Constante N	Rango correspondiente de aplicación (escalas de dureza de Rockwell normales)
A	HRA	Cono de diamante	98,07 N	588,4 N	0,002 mm	100	20 HRA a 95 HRA
B	HRBW	Bola 1,587 5 mm	98,07 N	980,7 N	0,002 mm	130	10 HRBW a 100 HRBW
C	HRC	Cono de diamante	98,07 N	1,471 kN	0,002 mm	100	20 HRC ^a a 70 HRC
D	HRD	Cono de diamante	98,07 N	980,7 N	0,002 mm	100	40 HRC a 77 HRD
E	HREW	Bola 3,175 mm	98,07 N	980,7 N	0,002 mm	130	70 HREW a 100 HREW
F	HRFW	Bola 1,587 5 mm	98,07 N	588,4 N	0,002 mm	130	60 HRFW a 100 HRFW
G	HRGW	Bola 1,587 5 mm	98,07 N	1,471 kN	0,002 mm	130	30 HRGW a 94 HRGW
H	HRHW	Bola 3,175 mm	98,07 N	588,4 N	0,002 mm	130	80 HRHW a 100 HRHW
K	HRKW	Bola 3,175 mm	98,07 N	1,471 kN	0,002 mm	130	40 HRKW a 100 HRKW

^a El rango correspondiente de aplicación se puede extender a 10 HRC si las superficies del cono de diamante y de la punta esférica están pulidas para una profundidad de penetración de al menos 0,4 mm.

Tabla 5 Escalas de dureza Rockwell superficiales

Fuente: (UNE-EN ISO 6508-1, 2017)

Escala de dureza Rockwell superficial	Símbolo de dureza Unidad	Tipo de penetrador	Fuerza preliminar F_0	Fuerza total F	Constante de escala S	Fondo de escala Constante N	Rango correspondiente de aplicación (escalas de dureza de Rockwell superficiales)
15N	HR15N	Cono de diamante	29,42 N	147,1 N	0,001 mm	100	70 HR15N a 94 HR15N
30N	HR30N	Cono de diamante	29,42 N	294,2 N	0,001 mm	100	42 HR30N a 86 HR30N
45N	HR45N	Cono de diamante	29,42 N	441,3 N	0,001 mm	100	20 HR45N a 77 HR45N
15T	HR15TW	Bola 1,587 5 mm	29,42 N	147,1 N	0,001 mm	100	67 HR15TW a 93 HR15TW
30T	HR30TW	Bola 1,587 5 mm	29,42 N	294,2 N	0,001 mm	100	29 HR30TW a 82 HR30TW
45T	HR45TW	Bola 1,587 5 mm	29,42 N	441,3 N	0,001 mm	100	10 HR45TW a 72 HR45TW

Tabla 6 Símbolos y términos abreviados utilizados en método Rockwell
Fuente: (UNE-EN ISO 6508-1, 2017)

Símbolo/término abreviado	Definición	Unidad
F_0	Fuerza preliminar de ensayo	N
F_1	Fuerza adicional de ensayo (fuerza total menos fuerza preliminar)	N
F	Fuerza total de ensayo	N
S	Constante de escala, específica para la escala	mm
N	Constante de fondo de escala, específica para la escala	-
h	Profundidad permanente de penetración bajo fuerza preliminar de ensayo después de la retirada de la fuerza adicional de ensayo (profundidad permanente de penetración)	mm
HRA HRC HRD	Dureza Rockwell normal = $100 - \frac{h}{0,002}$	
HRBW HREW HRFW HRGW HRHW HRKW	Dureza Rockwell normal = $130 - \frac{h}{0,002}$	
HRN HRTW	Dureza Rockwell superficial = $100 - \frac{h}{0,001}$	

Dureza Vickers

El ensayo de dureza Vickers es otro método de medida de la dureza en materiales metálicos.

Fue desarrollado en 1924 por los ingleses Smith y Sandland en Vickers Ltd. como alternativa al ensayo de dureza Brinell o al Rockwell. Desde su desarrollo se ha convertido en uno de los métodos experimentales para la medida de dureza más confiables y precisos.

El ensayo de dureza Vickers y el Brinell emplean el mismo principio, el de la medida de la huella que deja un penetrador en el material al aplicarle una fuerza determinada. La diferencia entre el método Vickers y el Brinell es que el ensayo de dureza Vickers utiliza un penetrador de diamante con la punta piramidal y el método Brinell utiliza un penetrador de bola.

El ensayo de dureza Vickers utiliza un penetrador de diamante con forma de pirámide recta de base cuadrada. El ángulo entre las caras opuestas de la pirámide, α , es de 136° (Figura 37)

Para la realización del ensayo la medida se ha de realizar en una superficie lisa y plana, libre de cualquier tipo de óxido, materias extrañas y, especialmente de lubricantes. El acabado superficial de la pieza debe ser tal que permita la determinación de la medida de las diagonales de forma precisa sin posibilidad de que se induzca a error en la medida. En la preparación de las probetas de los metales duros se ha de asegurar que se ha retirado una capa de material no menor de 0,2 mm.

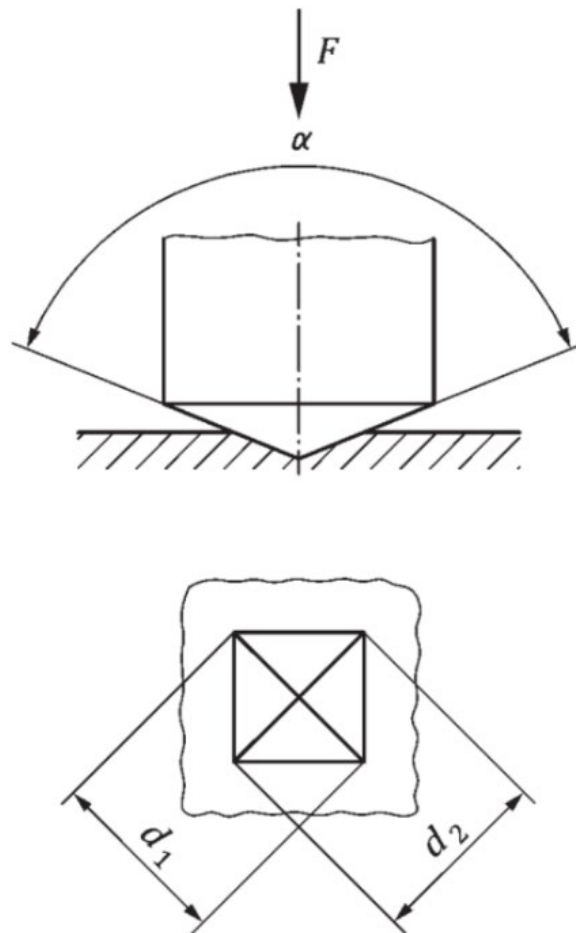


Figura 37 Principio del ensayo, geometría del penetrador y huella Vickers.
 Fuente: (UNE-EN ISO 6507-1, 2018)

La preparación de las superficies antes de la medida se debe realizar por medios mecánicos, asegurando que no se alcanzan temperaturas elevadas que pudieran afectar al tratamiento térmico y falsear la medida.

La pieza por ensayar se debe colocar en el aparato de medición sobre un apoyo rígido y de tal forma que se eviten desplazamientos durante la aplicación de la fuerza que pudieran afectar a los resultados. La cara sobre la que se vaya a realizar la medida debe de situarse perpendicular al eje del penetrador. Durante la colocación de la pieza se debe tener en cuenta que el sistema microscópico utilizado para la medición de la diagonal debe enfocarse de tal manera que se pueda observar la superficie de la probeta de forma correcta, esto dependerá mucho del equipo utilizado y de sus requerimientos.

Una vez preparada la muestra para realizar la medición de dureza se ha de poner en contacto el penetrador con la superficie de esta. La fuerza del ensayo ha de ser aplicada en la dirección perpendicular a la superficie, sin dar golpes, sin que se produzcan vibraciones o sobrecargas, hasta que se alcance el valor de la fuerza especificado. Los valores de la fuerza que hay que aplicar durante el ensayo dependerán del material que se esté ensayando y de la escala Vickers

que se aplique. En la Tabla 7 se muestran los valores más comunes que se aplican durante el ensayo de dureza Vickers. La aplicación de la fuerza, desde el inicio de la presión hasta que se alcanza el valor de la fuerza completa, debe ser de 7_{-5}^{+1} s. Por lo general, la fuerza de ensayo debe permanecer aplicada sobre la probeta durante 14_{-4}^{+1} s

Tabla 7 Fuerzas de ensayo comunes para la determinación de la dureza Vickers
Fuente: (UNE-EN ISO 6507-1, 2018)

Ensayo de dureza ^a		Ensayo de dureza a baja fuerza		Ensayo de microdureza	
Símbolo de dureza	Valor nominal de la fuerza de ensayo, F N	Símbolo de dureza	Valor nominal de la fuerza de ensayo, F N	Símbolo de dureza	Valor nominal de la fuerza de ensayo, F N
-	-	-	-	HV 0,001	0,009 807
-	-	-	-	HV 0,002	0,019 61
-	-	-	-	HV 0,003	0,029 42
-	-	-	-	HV 0,005	0,049 03
HV 5	49,03	HV 0,2	1,961	HV 0,01	0,098 07
HV 10	98,07	HV 0,3	2,942	HV 0,015	0,147 1
HV 20	196,1	HV 0,5	4,903	HV 0,02	0,196 1
HV 30	294,2	HV 1	9,807	HV 0,025	0,245 2
HV 50	490,3	HV 2	19,61	HV 0,05	0,490 3
HV 100 ^a	980,7	HV 3	29,42	HV 0,1	0,980 7

^a Se pueden aplicar fuerzas de ensayo nominales mayores a 980,7 N.

Una vez retirada la fuerza aplicada sobre el penetrador se procede a la medición de las diagonales de la huella que ha quedado marcada en la superficie de la pieza. La medición se realiza con equipos ópticos que tienen aumentos para facilitar la medida. Los aumentos del equipo óptico dependerán de la huella que se esté midiendo y se ajustarán para que la diagonal se encuentre comprendida entre un 25% y un 75% del campo óptico de visión.

Tras realizar la medida de las diagonales se procederá a calcular la dureza Vickers mediante la expresión (3).

$$HV = \frac{F_{ensayo}}{A_{huella}} = \frac{F_{ensayo}}{\frac{d^2}{2 \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}} = \frac{2 \cdot F_{ensayo} \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} \approx 0,1891 \cdot \frac{F_{ensayo}}{d^2} \quad (3)$$

Siendo:

- F la carga del ensayo en kilogramos fuerza (Tabla 7)
- A el área de la huella en milímetros cuadrados
- d la media aritmética de las dos diagonales de la huella (d_1 y d_2) en milímetros
- α , cuyo valor normalmente, y el empleado en este TFG, será de 136°

Comparación entre medidas de dureza

Para la realización de las mediciones de dureza en el ensayo Jominy se pueden emplear varios métodos de ensayo, entre ellos el de la dureza Rockwell y el de la dureza Vickers. Las medidas en cada uno de los métodos de medida de la dureza son diferentes y la relación entre ellas no es lineal. La norma UNE-EN ISO 18265 da los criterios de conversión entre los valores de dureza de materiales metálicos medidos con distintos métodos.

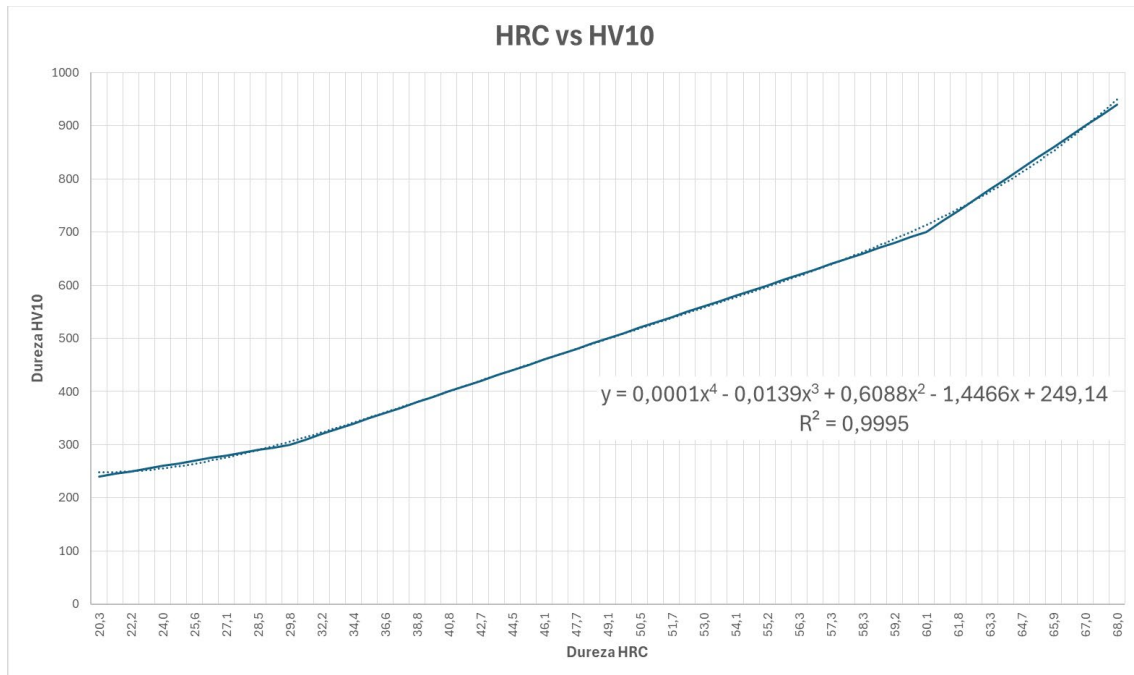
Las equivalencias entre los distintos métodos de medida se han realizado de forma experimental con condiciones de reproducibilidad, de forma que se garantiza que los valores calculados con los métodos de conversión de la norma son equivalentes. La Tabla 8 muestra un extracto de la tabla de conversión que se ha determinado en la norma UNE-EN ISO 18265 para aceros no aleados o débilmente aleados, y aceros de fundición.

Tabla 8 Conversión de valores dureza-dureza o dureza-resistencia a la tracción para aceros no aleados o débilmente aleados, y acero fundido.

Fuente: (UNE-EN ISO 18265, 2014)

Resistencia a la tracción	Dureza Vickers	Dureza Brinell	Dureza Rockwell							
			HRB	HRF	HRC	HRA	HRD	HR15N	HR30N	HR45N
820	255	242			23,1	62,0	42,2	71,1	44,2	23,2
835	260	247	(101)		24,0	62,4	43,1	71,6	45,0	24,3
850	265	252			24,8	62,7	43,7	72,1	45,7	25,2
865	270	257	(102)		25,6	63,1	44,3	72,6	46,4	26,2
880	275	261			26,4	63,5	44,9	73,0	47,2	27,1
900	280	266	(104)		27,1	63,8	45,3	73,4	47,8	27,9
915	285	271			27,8	64,2	46,0	73,8	48,4	28,7
930	290	276	(105)		28,5	64,5	46,5	74,2	49,0	29,5
950	295	280			29,2	64,8	47,1	74,6	49,7	30,4
965	300	285			29,8	65,2	47,5	74,9	50,2	31,1
995	310	295			31,0	65,8	48,4	75,6	51,3	32,5
1 030	320	304			32,2	66,4	49,4	76,2	52,3	33,9
1 060	330	314			33,3	67,0	50,2	76,8	53,6	35,2
1 095	340	323			34,4	67,6	51,1	77,4	54,4	36,5
1 125	350	333			35,5	68,1	51,9	78,0	55,4	37,8
1 155	360	342			36,6	68,7	52,8	78,6	56,4	39,1
1 190	370	352			37,7	69,2	53,6	79,2	57,4	40,4
1 220	380	361			38,8	69,8	54,4	79,8	58,4	41,7
1 255	390	371			39,8	70,3	55,3	80,3	59,3	42,9
1 290	400	380			40,8	70,8	56,0	80,8	60,2	44,1
1 320	410	390			41,8	71,4	56,8	81,4	61,1	45,3
1 350	420	399			42,7	71,8	57,5	81,8	61,9	46,4
1 385	430	409			43,6	72,3	58,2	82,3	62,7	47,4
1 420	440	418			44,5	72,8	58,8	82,8	63,5	48,4
1 455	450	428			45,3	73,3	59,4	83,2	64,3	49,4
1 485	460	437			46,1	73,6	60,1	83,6	64,9	50,4
1 520	470	447			46,9	74,1	60,7	83,9	65,7	51,3
1 555	480	456			47,7	74,5	61,3	84,3	66,4	52,2
1 595	490	466			48,4	74,9	61,6	84,7	67,1	53,1
1 630	500	475			49,1	75,3	62,2	85,0	67,7	53,9
1 665	510	485			49,8	75,7	62,9	85,4	68,3	54,7
1 700	520	494			50,5	76,1	63,5	85,7	69,0	55,6
1 740	530	504			51,1	76,4	63,9	86,0	69,5	56,2
1 775	540	513			51,7	76,7	64,4	86,3	70,0	57,0
1 810	550	523			52,3	77,0	64,8	86,6	70,5	57,8

La Gráfica 1 muestra la representación del valor de la dureza Vickers (HV10) frente a la dureza Rockwell (HRC). Se ha incluido en la gráfica la línea de tendencia polinómica de grado 4 (Línea discontinua), que es una buena aproximación a la curva, aunque no define exactamente la equivalencia entre ambas escalas de dureza.



Gráfica 1 Relación entre dureza Vickers (HV10) y dureza Rockwell (HRC)
 Fuente: Elaboración propia basada en datos de UNE-EN ISO 18265

En las probetas que se van a templar con motivo de la realización de este TFG se van a medir las durezas en las dos escalas indicadas hasta el momento, dureza Vickers (HV10) y dureza Rockwell (HRC), para su posterior comparación y análisis. Las probetas, tal y como se indicará más adelante, se van a mecanizar con dos caras planas simétricas y se tomarán en cada una de las caras un tipo de dureza. De esta forma se podrán comparar los valores medidos con las conversiones correspondientes a la otra cara.

A la hora de hacer las conversiones hay que tener en cuenta el nivel de confianza que se va a requerir en los valores convertidos. En la Figura 38 se muestra lo que se denomina Banda de Dispersión. En la figura se representa la curva a , que es la relación de conversión media entre las durezas que relaciona la gráfica correspondiente. Las curvas b_1 y b_2 delimitan una región, denominada *banda de dispersión*, que tiene en cuenta las distintas elasticidades que pueden tener los aceros ensayados. Estas diferencias pueden ser debidas a muchos factores que son poco controlables. En una conversión ideal el valor de la dureza x_0 se convierte en y_0 , pero teniendo en cuenta el efecto de la banda de dispersión el valor de la dureza se puede encontrar entre y_{01} e y_{02} . Además, no hay que olvidar que el valor de la dureza inicial, x_0 , está asociado a una incertidumbre correspondiente al método de ensayo empleado. La dureza real podría variar

entre los valores x_1 y x_2 y, por lo tanto, el valor convertido de la dureza se podría encontrar entre y_{11} e y_{22} . El cálculo de los valores de las incertidumbres de las medidas iniciales, así como de la banda de dispersión, salen del alcance de este TFG ya que no se podrán realizar las medidas necesarias para acotarlos correctamente. Es por ello por lo que para el caso práctico de los cálculos de las conversiones de durezas en este TFG se va a aplicar la conversión directa entre las durezas según las tablas indicadas en la norma UNE-EN ISO 18265, sin realizar correcciones por incertidumbre de las medidas ni por la banda de dispersión.

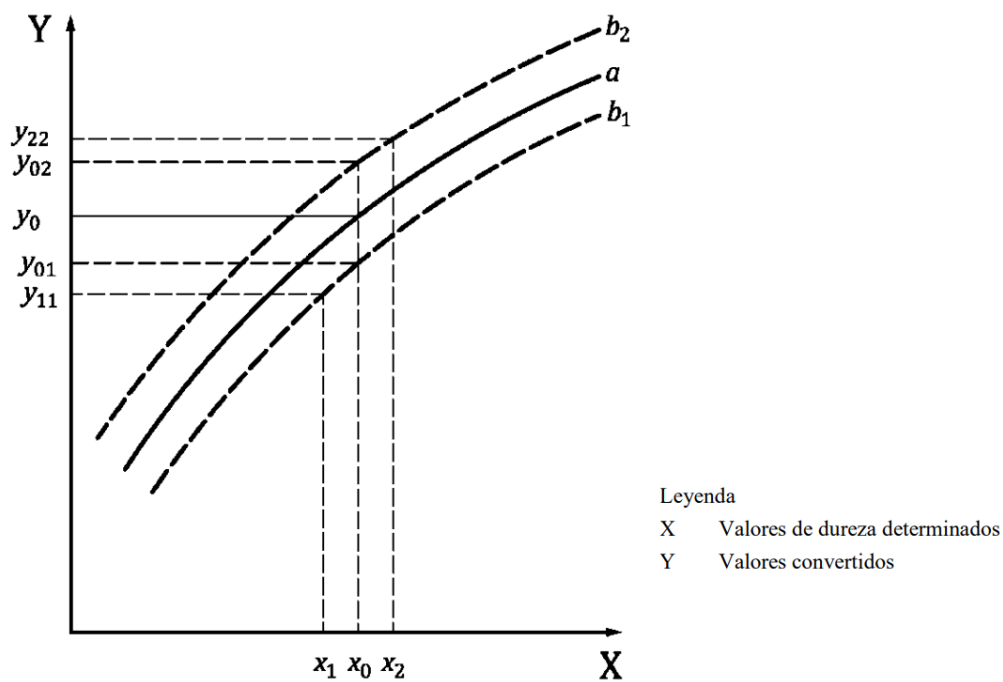


Figura 38 Banda de dispersión para la conversión dureza-dureza (esquemático)
 Fuente: (UNE-EN ISO 18265, 2014)

METODOLOGÍA Y MATERIALES

En este capítulo se detallarán y expondrán los procedimientos que se han seguido para el ensayo de templabilidad Jominy de unas probetas de acero y el análisis de los resultados en termino de dureza, microestructura y verificación de equivalencia con respecto a los valores proporcionados por la norma internacional utilizada.

La preparación de las probetas, el templado de las mismas, los ensayos de dureza y las micrografías se han realizado en los laboratorios de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial (ETSIDI), perteneciente a la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Las instalaciones de la ETSIDI de las que se ha dispuesto para la realización de los ensayos de este TFG han sido el taller de mecanizados, el laboratorio de ensayos no destructivos y, por último, el laboratorio de ensayos destructivos.

Se han ensayado, en condiciones de reproducibilidad, varias probetas del mismo material, un acero hipoeutectoide. Se han seguido los mismos procedimientos y se han utilizado los mismos equipos para la realización de todas las probetas y los ensayos.

En los próximos apartados se van a describir el material utilizado para la realización de los ensayos, así como los procedimientos y equipos empleados durante el proceso.

Las fases que se han seguido para la obtención de los datos que se analizan en este TFG se resumen en:

- Acopio del material
- Preparación de las probetas, que consta del mecanizado, pulido y limpieza superficial
- Tratamiento térmico, templado mediante el procedimiento Jominy
- Medida de la dureza, que consiste en la preparación de las muestras para la medida de la dureza y la realización de los ensayos de dureza Rockwell C y Vickers 10.
- Cálculo de las curvas teóricas Jominy para las muestras
- Ataque químico
- Micrografías de las probetas en la sección correspondiente a la longitud crítica.

Material utilizado

Para la realización de los ensayos se ha empleado una muestra de acero hipoeutectoide C55E suministrado en barra de 25 mm de diámetro y 6 m de largo.

Este acero, según la norma UNE-EN 10027-1:2017 en su Tabla 12, se trata de un acero no aleado con contenido medio de magnesio menor del 1%. Se trata de un acero al carbono, con

un 0,55% de contenido en Carbono en la aleación, y cuyo contenido máximo en azufre está especificado.

Según el certificado de calidad que se recibió con el pedido, ver Anexo I, la composición química de la colada del lote con que se fabricaron las barras con las que se han realizado las probetas es la que se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9 Composición química colada C55E

Fuente: Certificado Calidad Anexo I

ALEANTES	PORCENTAJE (%)
Carbono	0,525
Manganeso	0,800
Silicio	0,300
Fósforo	0,013
Azufre	0,020
Cromo	0,200
Molibdeno	0,020
Níquel	0,070
Cobre	0,180
Aluminio	0,021
Vanadio	0,002
Titanio	0,018
Niobio	0,001
Estaño	0,007

Los valores de las características mecánicas que aparecen en el Certificado de Calidad con el acero en condiciones de Normalizado son las que se muestran en la Tabla 10. El tamaño de grano del lote es de 6 micras. En el lote se ha realizado un ensayo Jominy con los resultados que se muestran en la Tabla 11 y la Gráfica 2.

Tabla 10 Características mecánicas colada C55E

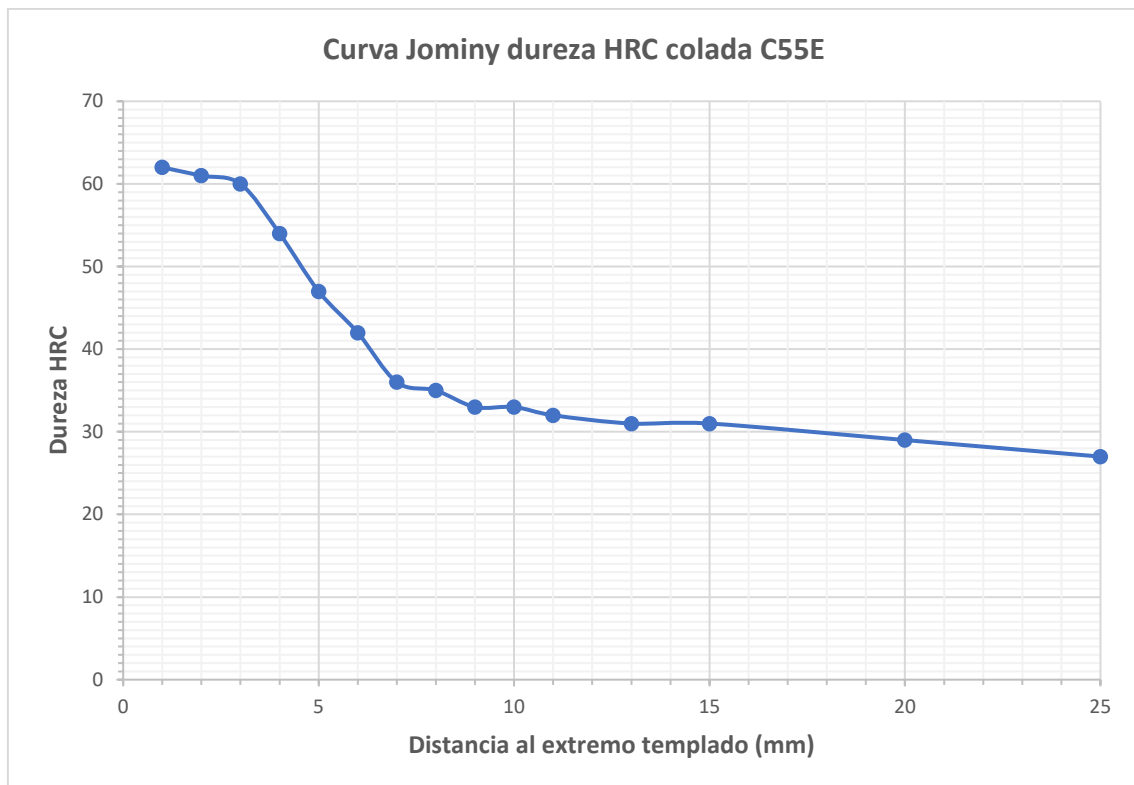
Fuente: Certificado Calidad Anexo I

RM (N/mm²)	746,00
RE (N/mm²)	457,00
A (%)	19,50
Z (%)	45,80

Tabla 11 Valores Curva Jominy de la colada C55E

Fuente: Certificado Calidad Anexo I

Distancia (mm)	Dureza HRC
1	62
2	61
3	60
4	54
5	47
6	42
7	36
8	35
9	33
10	33
11	32
13	31
15	31
20	29
25	27



Gráfica 2 Curva Jominy de la colada C55E

Fuente: Certificado Calidad Anexo I

Preparación de la muestra

Para la realización de los ensayos Jominy se han de preparar las probetas de acuerdo con la Figura 32. Como se parte de material de barra de diámetro 25 mm no es posible hacer el mecanizado como indica la norma y se ha optado por adaptar la configuración de la probeta. En la Figura 39 se muestra el esquema utilizado para la elaboración de las probetas utilizado en el ensayo.

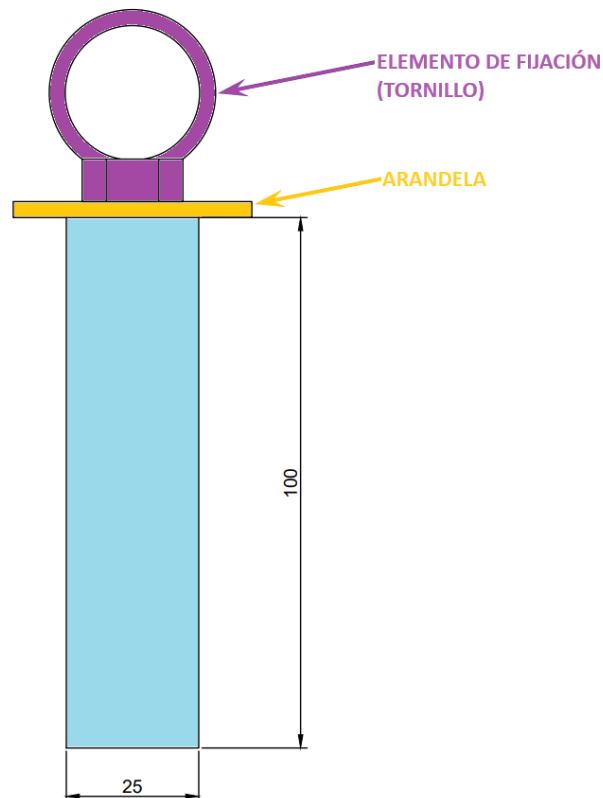


Figura 39 Esquema probeta para ensayo Jominy
Fuente: Elaboración Propia

Las dimensiones y tolerancias de la parte cilíndrica de la probeta son las mismas que las que indica la norma UNE-EN ISO 642:2000, siendo las diferencias las que se indican a continuación. Se ha modificado la forma en la que la probeta se sujeta al equipo de temple, se ha añadido una arandela en el extremo opuesto a la zona de temple de la probeta. Para sujetar la arandela, y facilitar la manipulación de la probeta entre el horno y el equipo de temple, se ha realizado un taladro roscado de métrica 8 en la probeta y se ha añadido un tornillo al que se le ha soldado una anilla.

Partiendo de las barras compradas, de longitud 6 metros, se han cortado con una sierra de vaivén, como la de la Figura 40, piezas a una longitud de algo más de 100 mm para su posterior mecanizado a cotas finales. Para el corte con la sierra se ha utilizado refrigerante, taladrina, para

evitar que el material se sobrecaliente y cambie las propiedades mecánicas antes de realizar el tratamiento térmico.



Figura 40 Sierra de vaivén
Fuente: Elaboración Propia

Durante los procesos de mecanizado que se realizarán a las probetas, torneado y fresado, es importante evitar que las piezas se sobrecalienten en las zonas de contacto con la herramienta. Para ello se utilizarán velocidades y profundidades de corte que minimicen el aumento de temperatura local. Esto se realiza para evitar que los aumentos de temperatura puedan afectar a los tratamientos térmicos locales de la pieza y afectar a las medidas de dureza que se realizarán posteriormente. A continuación, en un torno paralelo (Figura 41), se mecaniza la pieza para darle las dimensiones finales según la especificación de la norma, Figura 32. En este paso se realiza una de las operaciones que plantean las modificaciones con respecto a la definición de la norma, el taladrado en el extremo opuesto a la cara de templado para la posterior realización de la rosca de sujeción del elemento de fijación. Fuera del torno se realizó la rosca de métrica 8 con machos de roscar manuales (Figura 42)



Figura 41 Torno paralelo
Fuente: Elaboración Propia



Figura 42 Roscado con macho de roscar
Fuente: Elaboración Propia

El siguiente paso de la preparación de las probetas es la realización, mediante una fresadora universal (Figura 43), de dos planos paralelos en la parte cilíndrica de la probeta (Figura 44). Las caras son paralelas al eje de la probeta y tienen una profundidad de 0,5 mm. El mecanizado se realizará en dos pasadas. Una primera de desbaste y una segunda de acabado.

Estas caras se emplearán para la toma de durezas durante la realización del ensayo.



Figura 43 Fresadora universal de tres ejes
Fuente: Elaboración Propia

Tras el mecanizado de las piezas según las cotas de la norma UNE-EN ISO 642:2000 se ha de proceder a la preparación superficial de las caras donde se van a realizar las medidas de dureza.

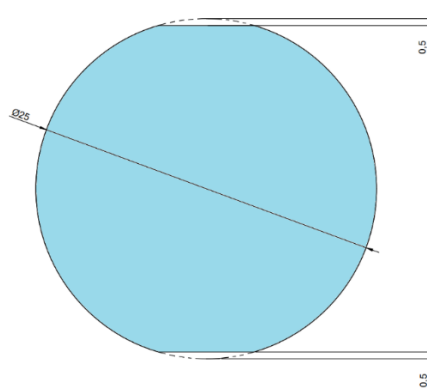


Figura 44 Sección transversal probeta para ensayo Jominy
 Fuente: Elaboración Propia

La preparación de las caras se realiza antes del templado para facilitar el trabajo, ya que una vez realizado el tratamiento térmico la dureza superficial aumentará y será muy difícil realizarla.

El proceso de lijado se ha realizado en tres fases:

- Lijado mediante papel de lija de grano basto para quitar las marcas de mecanizado de los procesos anteriores.
- Lijado mediante máquina de lijado eléctrica con lijas de grano medio/fino para la obtención de un mejor acabado superficial.
- Lijado mediante papel de lija fino para conseguir el acabado definitivo.

Los procesos de lijado manual se han realizado utilizando papel de lija de varias granulometrías, Figura 45. Para el lijado eléctrico se han utilizado los equipos del laboratorio de ensayos no destructivos de la ETSIDI, Figura 46. Cuando se ha realizado el lijado con la máquina eléctrica se ha comprobado que quedaban marcas de lijado circunferenciales, es por ello por lo que ha sido necesario realizar el último proceso de lijado manual con lija fina para eliminarlas.



Figura 45 Papeles de lija de varias granulometrías
 Fuente: Elaboración Propia



Figura 46 Máquina lijadora eléctrica
 Fuente: Elaboración Propia

Tras el proceso de lijado de las probetas el siguiente paso es el pulido de las caras donde se realizarán las medidas de durezas. Para ello se han utilizado, de nuevo, las máquinas del laboratorio de ensayos no destructivos de la ETSIDI, Figura 47.

Durante el proceso de pulido de las piezas en la pulidora eléctrica (Figura 47) se ha utilizado micro pulimento de alúmina de $0,05 \mu\text{m}$ (Figura 48). El proceso de pulido se ha realizado hasta que las caras de la pieza que se están trabajando han tenido un acabado superficial de espejo.

El proceso de pulido se realiza con refrigeración de la pieza para evitar sobrecalentamientos de la superficie. Durante el proceso de pulido se vierte agua sobre la lija de forma continua, mediante goteo del grifo del que dispone la máquina, para la refrigeración de la pieza.



Figura 47 Máquina pulidora
Fuente: Elaboración Propia



Figura 48 Alúmina para pulir
Fuente: Elaboración Propia

Una vez concluido el proceso de pulido de las probetas se procede a su ensamblado según el esquema de la Figura 39. Con este último paso las probetas quedan preparadas para la realización del tratamiento térmico.

Tratamiento térmico: temple

Una vez concluida la preparación de las probetas el siguiente paso es la realización del tratamiento térmico. A las probetas se les realizará un temple para la determinación de la templabilidad según el ensayo de Jominy, según se indica en la norma UNE-EN ISO 642:2000.

En la norma se indica que para la realización del tratamiento térmico hay que alcanzar una temperatura tal que supere la temperatura de austenización del material a ensayar, se recomienda que sean unos 50 °C. En el certificado de calidad suministrado con el lote de acero, Anexo I, se indica que el tamaño de grano de la colada es de 6 μm . No queda claro en el certificado si este valor del tamaño de grano es en la condición de entrega del material, normalizado, o una vez hecho el tratamiento térmico de temple que se ha realizado durante el control de calidad. Es por ello por lo que no se tiene claro cuál es la temperatura de austenización que hay que considerar en este caso. Por ello se ha decidido realizar los ensayos de templabilidad con dos temperaturas distintas y, posteriormente, comparar los resultados obtenidos con los teóricos y con los suministrados con el lote de acero. Los ensayos se van a realizar con una temperatura de 25 °C y 50 °C por encima de la temperatura de austenización teórica.

Para la determinación de la temperatura de austenización del acero C55E se ha tenido en cuenta el diagrama hierro-carbono, Figura 2. La intersección entre la línea de cambio de fase, de la fase austenítica y ferrítica a la austenítica, con el porcentaje de carbono de la aleación, en este caso 0,55 %, da una temperatura teórica de austenización de 780 °C. Tomando esta temperatura como base, se van a realizar los tratamientos térmicos a las dos muestras con un aumento de temperatura de 25 °C y 50 °C respectivamente, es decir, se van a realizar los procesos con una temperatura de 805 °C y de 830 °C.

Para la realización del temple se han utilizado los hornos del laboratorio de ensayos destructivos de la ETSIDI, Figura 49. Este horno tiene una velocidad de calentamiento de unos 6 °C/min por lo que los tiempos para alcanzar las temperaturas que se utilizarán en el ciclo de temple son de 131 min y 135 min respectivamente. En la Gráfica 3 se muestra cómo serán los ciclos de calentamiento de las probetas en el horno.

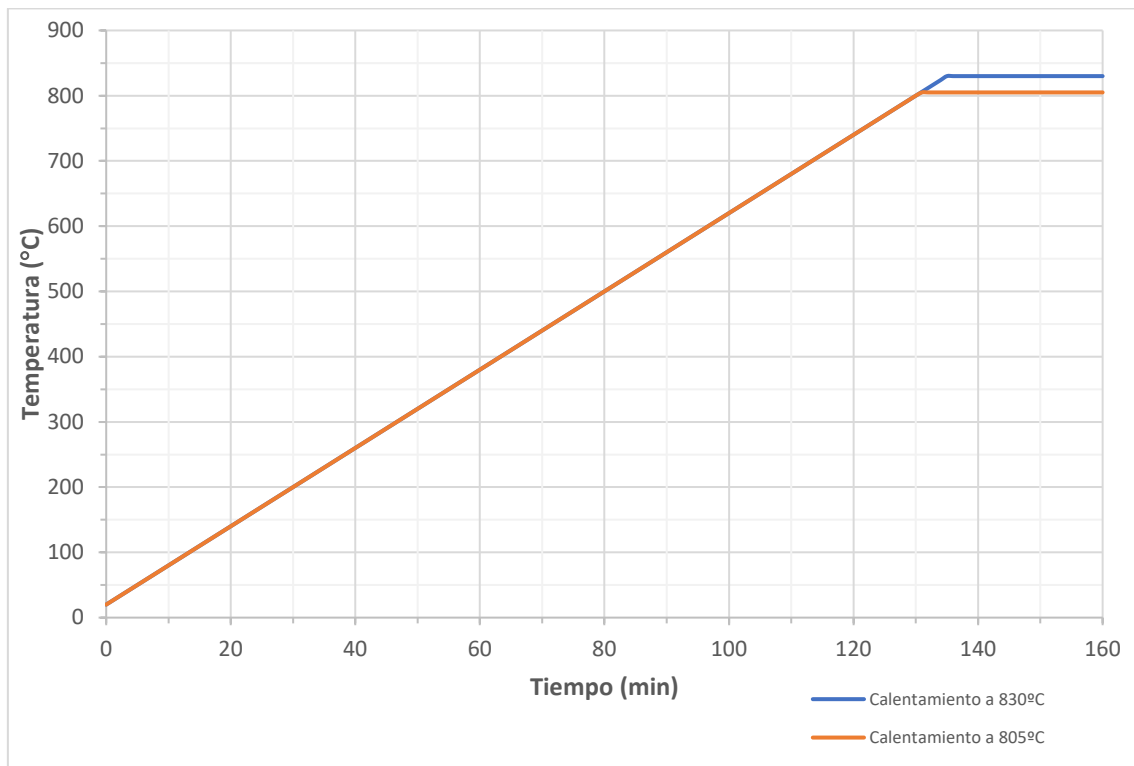
Una vez alcanzada la temperatura máxima del ciclo esta se ha de mantener durante, al menos, 30 minutos para conseguir que la probeta se caliente de forma uniforme y se produzca el cambio de fase a austenítico de forma completa y uniforme. En el controlador del horno, Figura 50, se programarán los ciclos de calentamiento y permanencia en la temperatura máxima para tener un control sobre el ciclo que garantice la repetitividad entre los ciclos que se realizarán en cada una de las probetas.



Figura 49 Horno para el templado
Fuente: Elaboración Propia



Figura 50 Unidad de control del horno
Fuente: Elaboración Propia



Gráfica 3 Ciclo de calentamiento de las probetas en el horno de templado
Fuente: Elaboración Propia

La colocación de la probeta en el horno se realizará sobre dos elementos de material refractario, que se apoyarán en la zona cilíndrica de la probeta y no en las caras que han sido preparadas para la toma de las durezas (Figura 51). El colocar la probeta de esta forma es para que haya un calentamiento uniforme de todas las partes de la probeta y garantizar que la transformación se hace en todas las partes por igual.



Figura 51 Colocación de la probeta en el horno
Fuente: Elaboración Propia

Tras la realización del ciclo de calentamiento, llegada a la temperatura máxima se mantiene a esa temperatura durante 30 min. Después, es el momento de la extracción de la probeta del horno para realizar el enfriamiento controlado bajo chorro de agua. Para la extracción de la probeta del horno es necesario utilizar guantes de protección (Figura 52), de forma que se eviten quemaduras durante la manipulación de los especímenes de ensayo. La extracción del horno y manipulación de las probetas para colocarlas en el equipo de templado se deberá realizar con la ayuda de las pinzas (Figura 53). Hay que extremar la precaución durante esta fase del proceso, ya que se están manipulando probetas a altas temperaturas y se pueden sufrir accidentes si no se aplican todas las medidas de precaución. Una vez extraída la probeta del horno se debe cerrar ya que la temperatura remanente es alta y se podrían sufrir daños personales si no se toman las debidas precauciones (Figura 54).

El tiempo máximo entre la extracción de la pieza del horno y el inicio del proceso de templado, según la norma, no tiene que superar los 5s. Por ello es necesario que todo el material esté preparado y se practique la extracción y colocación de la probeta en el equipo de templado para garantizar este requerimiento de la norma.



Figura 52 Guantes de protección térmica
Fuente: Elaboración Propia



Figura 53 Pinzas para manipulación
Fuente: Elaboración Propia

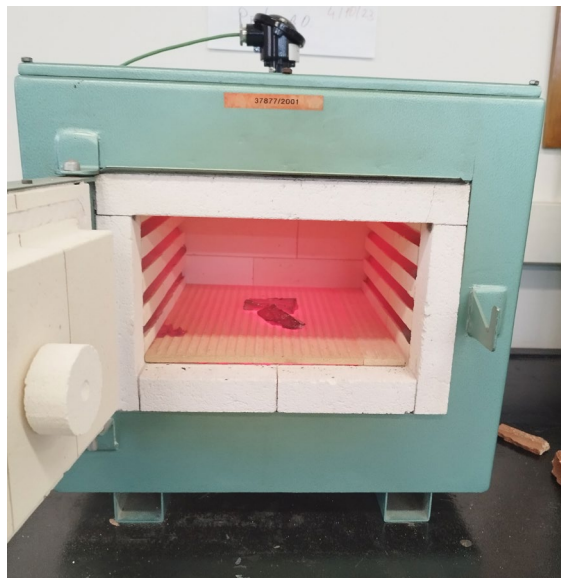


Figura 54 Horno calentado
Fuente: Elaboración Propia

El proceso de templado de la pieza se realizará en un equipo de templado Jominy disponible en el laboratorio de ensayos no destructivos de la ETSIDI (Figura 55). La probeta se deberá colocar en el soporte que tiene el equipo (Figura 56) que está definido de tal forma que se

cumplen los requerimientos de la norma del ensayo Jominy. En la norma se especifica que la distancia entre la tobera de salida de agua y la cara de la probeta debe de ser de 12,5 mm.



Figura 55 Equipo de templado Jominy
Fuente: Elaboración Propia



Figura 56 Equipo de templado Jominy, detalle del soporte de la probeta
Fuente: Elaboración Propia

La probeta se debe colocar según se muestra en la Figura 57 y se abrirá la válvula del medio refrigerante (agua) antes de que pasen los 5 s que indica la norma. Una vez abierta la válvula del medio refrigerante (Figura 58) se debe mantener el flujo de agua durante mínimo 10 min para completar el proceso de templado. Una vez completado el enfriamiento con el medio refrigerante se deja la probeta a temperatura ambiente antes del siguiente paso para que llegue a temperatura ambiente.



Figura 57 Equipo de templado Jominy, colocación de la probeta
Fuente: Elaboración Propia



Figura 58 Equipo de templado Jominy, momento del temple
Fuente: Elaboración Propia

Medida de la dureza en HRC y HV10

Tras el templado de las probetas se procede a la preparación para la medida de la dureza. Durante el proceso de templado se produce una acumulación de escoria en las caras de las muestras y es necesario retirarla para realizar correctamente el proceso de medida de la dureza.

La forma en la que se preparan la probeta para la medida de la dureza es mediante el lijado y pulido de las caras mecanizadas de la probeta. Tanto el lijado como el pulido se ha realizado de la misma forma que se hizo en los pasos anteriores por lo que no es necesario volver a describirlos de nuevo.

Se van a realizar medidas de la dureza mediante el ensayo de dureza Rockwell C y el ensayo de dureza Vickers 10. Se realizará cada uno de los ensayos de dureza en una de las caras longitudinales mecanizada de la probeta para analizar y comparar los resultados. Las medidas de dureza se realizarán en los puntos estipulados por la norma. Para los aceros de baja templabilidad las distancias al extremo donde se produce la incidencia del medio refrigerante que hay que considerar son (expresadas en mm): 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 15, 20, 25 y 30.

Las medidas se realizarán en el laboratorio de ensayos no destructivos de la ETSIDI utilizando los equipos de medida de la dureza Rockwell C (Figura 59, Figura 60) y Vickers (Figura 61, Figura 62). Para la realización de las medidas de la dureza se colocará la probeta en un soporte sobre una de las caras rebajadas, asegurando la estabilidad de la probeta durante la realización de la medida, dejando la otra al descubierto para la realización de la medida. El soporte dispone de un tornillo de paso 2 mm que permite el desplazamiento de la probeta de forma controlada para la realización de las distintas medidas en las posiciones indicadas anteriormente. Con un paso de 2 mm es posible un control preciso de la posición de medida. Para los desplazamientos de 1 mm en la posición de las medidas se dará media vuelta al tornillo, para el resto de las posiciones se darán las vueltas necesarias al tornillo. Los equipos de medida permiten la regulación en altura de las piezas a medir, mediante sendos tornillos roscados, de forma que se puede posicionar las probetas en la posición de medida sin dificultad. Se puede hacer una regulación de altura aproximada de forma que el penetrador y la probeta queden cerca del contacto. En el caso del equipo de medida de dureza Rockwell hay, además, un ajuste de altura adicional mediante una rueda situada en un lateral. Este sistema permite ajustar la altura con mayor precisión para llevar la pieza hasta hacer contacto con el indentador de forma que la medida de dureza se haga con mayor exactitud.

Las medidas de la dureza en la escala Rockwell C se realizarán con un penetrador cónico de diamante. Para las medidas, según se indica en la norma UNE-EN ISO 6508-1, se deberá aplicar una carga de 150 kgf. El proceso de medida es el que se indicó en el apartado Dureza Rockwell y, en resumen, es el siguiente: se aproxima la probeta al penetrador con el tornillo de aproximación y con la rueda de ajuste fino, de forma que haya un contacto entre ambas sin introducción de carga. Se posiciona la probeta para cada una de las posiciones mediante el tornillo del soporte, se irá desplazando la pieza a las distintas posiciones de medida según se vayan realizando las medidas. Una vez situada la probeta en la posición de medida, tanto en posición vertical como en la posición axial de medida, se aplicará la fuerza preliminar.

La fuerza preliminar se irá aplicando de forma progresiva durante un tiempo no superior a los 2 s. Se mantendrá aplicada la fuerza preliminar durante 3 s y al finalizar este tiempo de aplicación se realizará la medida de la profundidad inicial.

Una vez realizada la medida de la profundidad inicial se procederá a la aplicación de la fuerza total (150 kgf) de forma progresiva y en un tiempo entre 1 y 8 s. Se mantendrá aplicada la fuerza total durante 5s y se retirará la fuerza total dejando aplicada sólo la fuerza preliminar.

Tras esperar 4s desde que se ha retirado la fuerza total y se ha dejado sólo la fuerza preliminar se procederá a hacer la lectura final de la profundidad de marca del penetrador. Con los dos valores de las profundidades de la marca del penetrador se calculará la dureza Rockwell C según se indica en la norma y se registrará la medida.

Se repetirá la medida para cada una de las posiciones longitudinales indicadas al principio del apartado terminando con ello el proceso de medida de la dureza Rockwell C para la probeta.



Figura 59 Equipo de medida dureza Rockwell
Fuente: Elaboración Propia

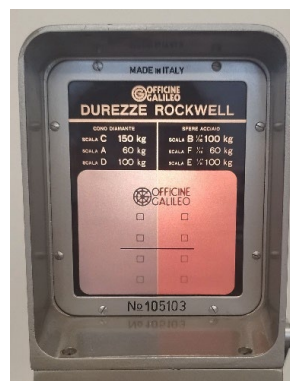


Figura 60 Equipo de medida dureza Rockwell, detalle pantalla
Fuente: Elaboración Propia

Una vez realizadas las medidas de dureza Rockwell C se procederá a la medida de durezas Vickers, según el método de ensayo definido en la norma UNE-EN ISO 6507-1. Para la medición de la dureza, teniendo en cuenta el material a ensayar, la norma da como valor de la carga a emplear 10 kgf.

La probeta se sujetará al equipo de medida con el mismo soporte que en caso anterior. Este soporte permite el ajuste en posición longitudinal de forma precisa y facilita el movimiento de la probeta para la realización de las medidas en las posiciones indicadas al principio del apartado.

Para el correcto posicionamiento de la pieza antes de la realización de la medida se hace uso de la lente del aparato de medida. Una vez posicionada la probeta y programado el equipo de medida con la carga a aplicar se procede a la realización de la medida.

El equipo de medida realiza el proceso de aplicación de la carga de forma automática. El equipo tiene programada la secuencia de aplicación de la carga que indica la norma UNE-EN ISO 6507-1, asegurando de esta forma que el nivel de carga aplicada y los tiempos de aplicación son repetitivos y exactos.

Una vez acabado el ciclo de carga el equipo retira de forma automática el indentador y coloca la lente sobre la marca realizada para poder realizar la medida de las diagonales. La medida de las diagonales se realiza de forma óptica con ayuda de los aumentos ópticos que tiene el equipo de medida.

A través de la lente se observará la marca realizada por el indentador durante la fase anterior y unas marcas paralelas que servirán para la realización de la medida (Figura 63). Estas marcas paralelas son las que se deberán ajustar, con ayuda de unas ruedas situadas en el lateral de la máquina, para colocarlas en los límites diagonales de la marca realizada por el penetrador. Se colocarán las marcas en los vértices del cuadrado dejado por el penetrador.

Una vez colocadas las marcas paralelas en los vértices del cuadrado se procederá a la lectura de la dureza en la pantalla del equipo. El equipo de medida de la dureza Vickers muestra en la pantalla (Figura 62) tanto los valores de las diagonales en micrómetros como el cálculo de la dureza en escala Vickers que realiza.

Tras finalizar el proceso de medida de la dureza Vickers para una de las posiciones, se registrarán los valores. A continuación, se procederá a mover la probeta a la siguiente posición requerida para completar la curva de templabilidad Jominy. Las posiciones necesarias son las que se indicaron al principio del apartado. La forma en la que se moverá la probeta es la misma que la que se indicó en el ensayo de dureza Rockwell C.

Una vez concluidas todas las medidas de dureza se procederá a la realización de la curva Jominy como se indicará en el apartado siguiente.



Figura 61 Equipo de medida dureza Vickers
Fuente: Elaboración Propia



Figura 62 Equipo de medida dureza Vickers, detalle pantalla
Fuente: Elaboración Propia

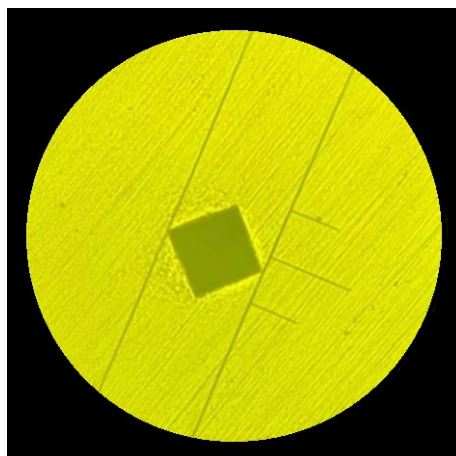
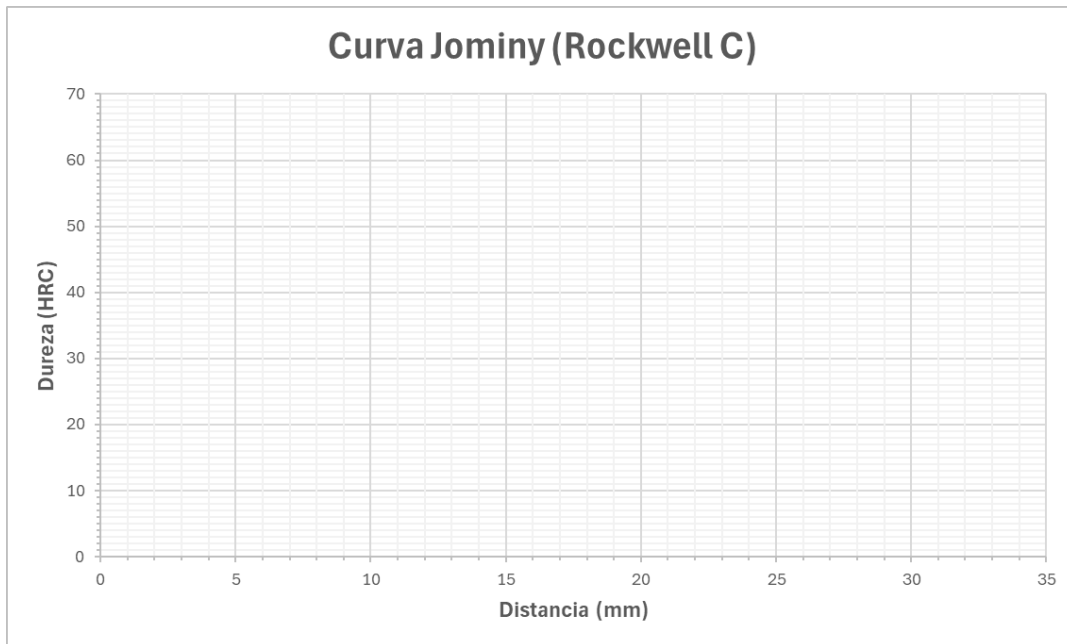


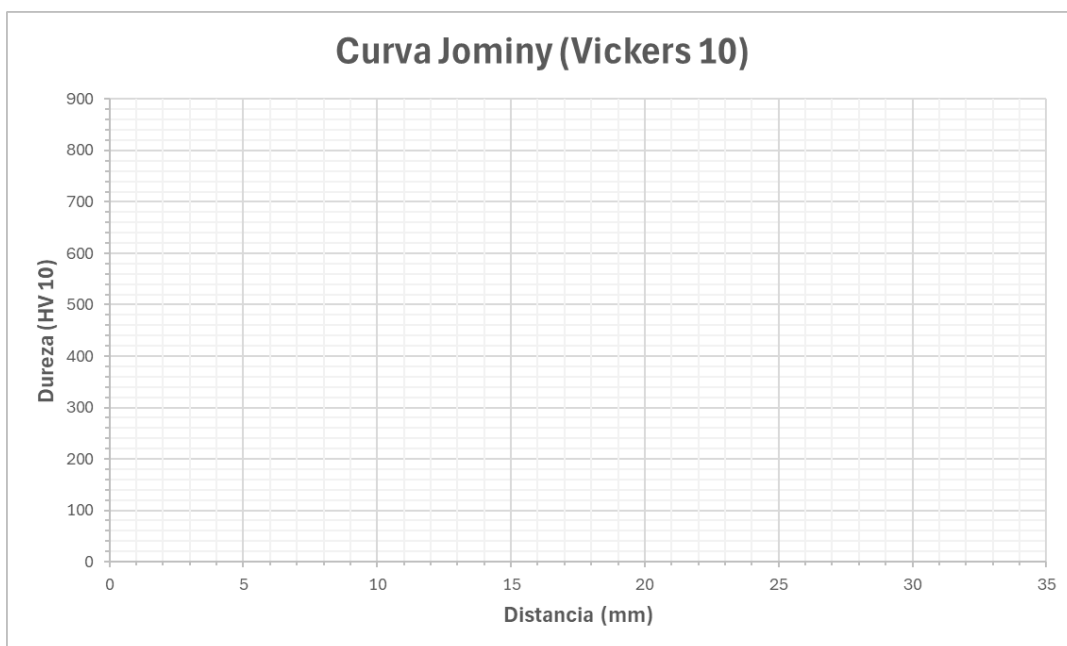
Figura 63 Imagen del proceso de medida de la dureza Vickers
Fuente: Elaboración Propia

Curva Jominy experimental

Tras la medida de las durezas, tanto en escala de dureza Rockwell C como en Vickers 10, descritas en el punto anterior se procederá al registro de los valores y la elaboración de las curvas Jominy correspondientes. La elaboración de las curvas Jominy se realizará en unas gráficas cuya plantilla será similar a la de la Gráfica 4 o la Gráfica 5, dependiendo de la escala de dureza que se represente.



Gráfica 4 Plantilla para realización de curva Jominy con durezas en escala Rockwell C
Fuente: Elaboración Propia



Gráfica 5 Plantilla para realización de curva Jominy con durezas en escala Vickers 10
Fuente: Elaboración Propia

Determinación teórica de la curva Jominy

En este apartado se van a realizar los análisis teóricos de la determinación de la curva Jominy teórica del acero que se va a ensayar en este TFG. Estos resultados teóricos se utilizarán para compararlos con los datos que se midan durante la realización de los ensayos en el laboratorio. Para la determinación de la curva Jominy teórica se van a seguir los pasos que se explicaron en la asignatura de Ingeniería de Materiales de tercer curso del Grado de Ingeniería Mecánica de la ETSIDI. En esta metodología es necesario el uso de las gráficas que se adjuntan en el Anexo II.

El primer paso para la determinación de la curva Jominy es el cálculo de la dureza en el extremo de la probeta, para ello se recurre a la gráfica G1 del Anexo II. Entrando en la gráfica con el porcentaje de carbono del acero, 0,525% (Tabla 9), se obtiene una dureza teórica aproximada de 63,2 HRC.

El segundo paso del proceso es la determinación del diámetro crítico ideal (Φ_{Ci}). Para ello se recurre a la gráfica G2. Entrando de nuevo con el porcentaje de carbono y utilizando el valor del tamaño de grano del certificado de calidad, 6 μm (Anexo I), el valor Φ_{Ci} sin aleantes (Φ_{Ci0}) que se obtiene es de 7,17 mm.

A continuación, hay que calcular el valor del Φ_{Ci} con aleantes para lo que se necesita conocer los porcentajes de Manganeso, Silicio, Fósforo, Azufre, Níquel, Cromo, Vanadio y Molibdeno de la aleación. Dichos valores se han obtenido del Certificado de Calidad (Anexo I) y se han extraído en la Tabla 9. Con los valores de los porcentajes de los aleantes se entra en las gráficas G3 y se obtienen los factores correctores (f_i) del Φ_{Ci} . En la Tabla 12 se muestran los factores correctores obtenidos de las gráficas G3 y se emplearán en el cálculo del Φ_{Ci} con aleantes.

Tabla 12 Factores correctores del Φ_{Ci}
Fuente: Elaboración Propia

Mn	Si	P	S	Ni	Cr	V	Mo
0,8	0,3	0,013	0,02	0,07	0,2	0,002	0,02
f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8
3,75	1,33	1,035	0,988	1,025	1,45	1,015	1,05

La expresión que permite determinar el valor del Φ_{Ci} con aleantes es la expresión (4):

$$\Phi_{Ci} = \Phi_{Ci0} \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4 \cdot f_5 \cdot f_6 \cdot f_7 \cdot f_8 \quad (4)$$

Tomando en cuenta el valor del diámetro crítico ideal sin aleantes y los factores correctores debidos a la presencia de aleantes, Tabla 12, se ha calculado el valor del diámetro crítico ideal siendo de 57,92 mm.

A continuación, se va a realizar el cálculo de la dureza teórica del material en los siguientes puntos de la probeta, referenciados al extremo templado, y expresados en mm: 1 / 5 / 10 / 15 /

20 / 25 / 30 / 40 / 50. Con el valor del diámetro crítico con aleantes calculado se entra en la gráfica G4 y para cada una de las curvas se obtiene un valor de divisor de dureza. Para cada una de las posiciones se divide el valor de la dureza en el extremo de la probeta, determinada al principio del apartado, y se obtiene el valor de la dureza en esa posición. Los valores de los divisores determinados y de las durezas en cada una de las posiciones son los que se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13 Determinación de los valores HRC de la curva Jominy teórica
Fuente: Elaboración Propia

Distancia (mm)	1	5	10	15	20	25	30	40	50
Divisores	1	1,14	1,43	1,76	2,06	2,3	2,48	2,7	2,84
Durezas (HRC)	63,2	55,4	44,2	35,9	30,7	27,5	25,5	23,4	22,3

Cálculo del tamaño de grano

Para la determinación del tamaño de grano hay que seguir el siguiente método:

- Hay que determinar la dureza en el extremo de la probeta y en el núcleo de esta. El valor de la dureza en el extremo se obtiene del ensayo Jominy siendo este el de la cara de templado. Para la determinación de la dureza en el núcleo hay que calcular el punto dónde la curva Jominy pasa de convexa a cóncava. Se puede identificar este punto de forma gráfica o de forma analítica. De forma gráfica se identifica como el punto dónde la representación de la curva Jominy cambia de curvatura. De forma analítica se determinará mediante la aproximación de la curva a una función y determinando el punto dónde su segunda derivada se iguala a cero.
- El siguiente paso es el cálculo del divisor de dureza. El divisor de dureza se define como la relación entre la dureza en el extremo y la dureza en el núcleo, expresión (5).

$$Div = \frac{D_e}{D_n} \quad (5)$$

- Con el valor del diámetro de la probeta y la severidad de temple del agua, que es $H=1 \text{ cm}^{-1}$, hay que buscar en la gráfica G5 del Anexo II el diámetro crítico ideal modificado.
- En la gráfica G6 del mencionado Anexo, se obtiene la longitud crítica modificada.
- Con la longitud crítica modificada y el divisor calculado se obtiene en la gráfica G4 el valor del diámetro crítico ideal.

6. El diámetro crítico ideal sin aleantes se obtendrá dividiendo el valor obtenido en 5 por los factores correctores de la aleación (Tabla 12). Para ello se empleará la expresión (6) que se obtiene a partir de la expresión (4).

$$\Phi_{ci0} = \frac{\Phi_{ci}}{f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4 \cdot f_5 \cdot f_6 \cdot f_7 \cdot f_8} \quad (6)$$

7. El tamaño de grano se calculará a través de la gráfica G2 del Anexo utilizando el valor obtenido en 6 y el porcentaje de carbono de la aleación.

Metalografía

La metalografía es la parte de la ciencia que estudia la estructura microscópica y macroscópica de los metales y sus aleaciones. El objetivo de esta ciencia es el análisis y determinación de la estructura, la composición y la distribución de los diferentes elementos que forman el metal o la aleación y como se ordenan en el espacio. Gracias a la metalografía es posible la observación y caracterización de las fases, los granos y las inclusiones de los distintos elementos microscópicos que forman parte de la microestructura del material. Con este análisis se puede realizar una estimación de las propiedades mecánicas y físicas del material.

Mediante el análisis metalográfico de las muestras se puede evaluar la calidad del material que se estudia. Se pueden detectar defectos derivados de los procesos de fundición y solidificación del metal o aleación tales como porosidades, inclusiones o segregaciones. También es posible con el análisis metalográfico conocer la microestructura de un material y determinar las fases en las que se encuentra y su distribución, el tamaño de grano o las posibles transformaciones de base. Al conocer la microestructura del material se puede relacionar de manera directa las propiedades mecánicas que podría tener el material estudiado comparándolas con muestras conocidas del mismo material.

De los distintos procedimientos que existen para la realización de los ensayos metalográficos el que se va a seguir en este TFG es el de ataque químico de la superficie a analizar. La realización de las micrografías se realizará en el laboratorio de metodología dimensional de la ETSIDI.

Para la realización de la caracterización metalográfica de las probetas tras los ensayos de templabilidad se utilizará un microscopio invertido de la marca ZEISS, Figura 64. Este microscopio tiene distintas configuraciones de luz reflectante que se utiliza para la inspección de las superficies a ensayar. La lente del microscopio tiene un aumento de 10X aunque, por medio de los elementos adicionales de aumento que dispone, se tiene la posibilidad de obtener relaciones de aumento de 10X, 20X, 50X y 100X. El equipo dispone de una cámara digital conectada al sistema óptico que permite la captura y procesamiento de las imágenes durante el proceso de inspección de las muestras. El software asociado al equipo ZEISS es capaz de

renderizar y mejorar las imágenes captadas durante la inspección, modificando el contraste de luz y aplicando filtros ópticos virtuales seleccionables por el usuario, con lo que se facilita el análisis de la microestructura de la muestra.

Antes de la toma de las imágenes de las probetas es necesaria la preparación de las muestras para la realización de las micrografías hay que preparar las superficies a analizar. Las micrografías se van a realizar en las superficies a la altura de la longitud crítica calculada numéricamente a partir de las curvas Jominy experimentales tras el templeado.



Figura 64 Microscopio ZEISS para toma de micrografías.
Fuente: Elaboración Propia

Una vez identificada la longitud crítica de la probeta los pasos a seguir son los que se indican a continuación:

1. Corte de la probeta en la sierra de vaivén a una longitud con creces que permita la realización de las siguientes operaciones. Se utiliza la misma sierra que en operaciones anteriores, Figura 40. El corte se realiza en dirección normal a la probeta, asegurando que hay material para realizar las siguientes operaciones. Se emplea un refrigerante, taladrina, para evitar que se produzca un sobrecalentamiento de la pieza que pudiera afectar a la estructura de la probeta.
2. Fresado de la probeta hasta la posición final, la de la longitud crítica. El fresado se realiza con una fresadora universal, Figura 43. Esta operación se hace en varios pasos, unos de desbaste y otro final de afinado. Se ha realizado el proceso de fresado refrigerando con taladrina para evitar sobrecalentamientos, para no afectar a la estructura microscópica de la muestra. Con el fresado se ha mecanizado la probeta hasta la posición de la longitud crítica tras el proceso de temple.
3. Lijado de la cara mecanizada. El lijado se ha realizado de forma manual con papeles de lija de distinta granulometría, Figura 45. Se han lijado las probetas controlando la temperatura para evitar el sobrecalentamiento de la superficie.

4. Pulido de la cara de la probeta a analizar. Se ha pulido utilizando la pulidora eléctrica (Figura 47) y usando alúmina (Figura 48). Durante el pulido se ha refrigerado la probeta para controlar la temperatura que se alcanza en la superficie y no afectar a la estructura metalográfica.

Tras la preparación mecánica de las caras se procede al ataque químico de las superficies para el revelado de las estructuras de la aleación para su posterior micrografía. El ataque químico se podrá realizar con Nital⁴ o con Vilella (agua fuerte glicerinada), dependerá de la disponibilidad en el laboratorio en el momento de realizar la prueba. En función del reactivo que se utilice durante la realización del ataque químico el proceso difiere. Las particularidades de cada uno de ellos se indican a continuación:

- **Nital.** El ataque con Nital se realiza aplicando directamente el producto sobre la superficie de la muestra. La aplicación se realiza en frío. La concentración del producto afecta al grado de ataque sobre la superficie, que aumenta, y a la selectividad del ataque, que disminuye. Una vez transcurrido el tiempo de exposición al compuesto, que variará entre los 10 segundos y los 2 minutos dependiendo del material, se eliminará el producto mediante un lavado con alcohol etílico y posterior aclarado con agua cálida y secado mediante un paño suave sin frotar.
- **Vilella, agua fuerte glicerinada.** El reactivo se obtiene con la mezcla de varios constituyentes en una solución. La composición del reactivo es un gramo de ácido pícrico, 5 mililitros de ácido clorhídrico y 100 mililitros de etanol (Sol A). Antes de la aplicación de la mezcla sobre la probeta hay que hacer una limpieza de la superficie para eliminar posibles sustancias procedentes del proceso de pulido. Se aplicará la Sol A del reactivo Vilella durante un periodo de dos minutos y medio. Tras este periodo se detiene el ataque químico secando la superficie con un algodón, a base de suaves golpecitos para evitar rayar la probeta. Después de la limpieza se aplica la Sol B (solución de ácido clorhídrico al 5%) y se deja sobre la superficie otros dos minutos y medio. Se seca la probeta de la misma forma que con la Sol A para detener el ataque químico

Tras la realización del ataque químico y limpieza de la probeta, con el fin de interrumpir el efecto de los reactivos sobre la superficie metálica, se procede a la observación microscópica de la superficie y la toma de las micrografías. La observación y realización de las micrografías se realizarán mediante el microscopio ZEISS aplicando los aumentos necesarios para la identificación de las características generales del metal de la probeta. Se procederá a la identificación de los granos y la distribución de las fases y los posibles defectos que pudieran existir en las muestras analizadas.

RESULTADOS

Como se indicó en el apartado “Metodología y materiales”, en el subapartado “Tratamiento térmico: temple”, se van a realizar los ensayos de dureza en dos muestras que se calentarán a 805 °C y 830°C respectivamente. De cada una de las temperaturas se van a realizar dos probetas.

En el caso de la temperatura de 805 °C hubo un problema con la primera probeta durante el proceso de templado, por lo que fue necesario rechazar los resultados y fabricar una nueva. Se explicará en detalle en el apartado de “*Discusión*”.

Se van a denominar a las probetas con la siguiente nomenclatura:

- Muestra de 805 °C: P805-1 y P805-2
- Muestra de 830°C: P8030-1 y P805-2

La probeta de la muestra a 805 °C que salió mal se la denomina P805-fallo.

Preparación de la muestra

Para la preparación de las muestras se utilizó barra de diámetro 25 mm de acero C55E, perteneciente al lote que se muestra en el Anexo I.

El proceso de preparación de las muestras se inició con el corte de las barras mediante el uso de la sierra de vaivén (Figura 65) a una longitud algo mayor que la de la probeta final. Durante el proceso de corte se ha refrigerado la pieza con taladrina para evitar sobrecalentamientos en la pieza que puedan afectar a su tratamiento térmico.



Figura 65 Corte de la materia prima con sierra de vaivén
Fuente: Elaboración Propia

El siguiente paso fue el rectificado de los extremos de la probeta para dejarla con la longitud final, según la especificación de la norma (Figura 32), y la realización del taladro para el roscado del alojamiento del tornillo de sujeción en el torno paralelo, Figura 66. En este proceso se ha

tenido cuidado con las velocidades y avances para que la temperatura de la pieza no aumente en exceso.



Figura 66 Procesado de la pieza en torno paralelo
Fuente: Elaboración Propia

Posteriormente se realizó la rosca de M8 mediante un macho de roscar manual, Figura 42.

El siguiente paso fue la realización de los rebajes de la probeta, las caras paralelas sobre la parte cilíndrica de la probeta para la realización de las medidas de dureza, mediante el uso de la fresa universal, Figura 67. Se ha tenido cuidado con la velocidad de corte para evitar sobrecalentamientos de la pieza.



Figura 67 Mecanizado de los rebajes en fresa universal
Fuente: Elaboración Propia

Con esta operación se completan los mecanizados de la probeta antes de las operaciones de lijado y pulido. En la Figura 68 se muestra el estado final de las probetas después del proceso de mecanizado, torneado y fresado. En la Figura 69 se ve el detalle de los rebajes fresados, se aprecian las marcas de mecanizado que habrá que quitar en los siguientes procesos de preparación de las probetas.



Figura 68 Probeta mecanizada
Fuente: Elaboración Propia



Figura 69 Detalle de los mecanizados antes del lijado y pulido
Fuente: Elaboración Propia

Para quitar las marcas de mecanizado y realizar una correcta preparación de la superficie para la toma de las medidas de dureza, el siguiente paso es el lijado manual de las piezas, Figura 70. En una primera fase se realiza un lijado manual con lija de grano grueso para quitar las marcas más profundas.



Figura 70 Lijado manual de la probeta
Fuente: Elaboración Propia

El siguiente paso es el lijado mediante la lijadora eléctrica, Figura 71, para acelerar el proceso. La lijadora eléctrica, aun utilizando lijas de grano fino, deja marcas circulares en las probetas por

lo que se decidió hacer un segundo proceso de lijado manual con lija de grano muy fino para quitar estas marcas.



Figura 71 Lijado mediante lijadora eléctrica
Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 72 se muestran ejemplos de las probetas después del proceso de lijado y antes del de pulido. Se puede apreciar cómo las marcas de lijado de la lijadora eléctrica han desaparecido en su práctica totalidad.



Figura 72 Detalle de las probetas tras el lijado de los rebajes
Fuente: Elaboración Propia

Para finalizar el proceso de preparación superficial de las probetas, se ha procedido al pulido mediante pulidora eléctrica, Figura 73. En el proceso se ha utilizado alúmina para mejorar los resultados del pulido. Para evitar calentamientos de la superficie de la pieza se ha refrigerado con agua durante el proceso de pulido.



Figura 73 Pulido de las probetas
Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 74 se muestra un ejemplo del estado final de la probeta una vez pulidas las caras donde se van a realizar las medidas de dureza tras el tratamiento térmico.

El último paso de la preparación de las probetas ha sido el ensamblado de acuerdo con el esquema mostrado en la Figura 39. El montaje del tornillo de sujeción de la arandela se ha hecho a mano, no se ha aplicado par de apriete específico, para evitar que se pudieran introducir cargas de montaje que pudieran afectar al tratamiento térmico. La probeta antes del tratamiento térmico quedó como se muestra en la Figura 75.



Figura 74 Detalle de la probeta tras el pulido a espejo
Fuente: Elaboración Propia



Figura 75 Probeta tras el montaje para templado
Fuente: Elaboración Propia

Tratamiento térmico: temple

Para la realización del temple de las probetas se ha programado el ciclo específico (Gráfica 3) de cada una de las probetas en el controlador del horno (Figura 50). En el caso de este TFG se han realizado dos ciclos de calentamiento distintos, uno hasta los 805 °C y otro hasta los 830 °C.

Tras introducir las probetas en el horno sobre los elementos refractarios, tal y como se muestra en la Figura 51, se inicia el ciclo de calentamiento de las piezas.

Una vez completado el tiempo de permanencia en el horno, el de calentamiento más los 30 minutos a la temperatura programada, se procede a la extracción de las probetas del horno para su colocación en el equipo de templeado (Figura 76)

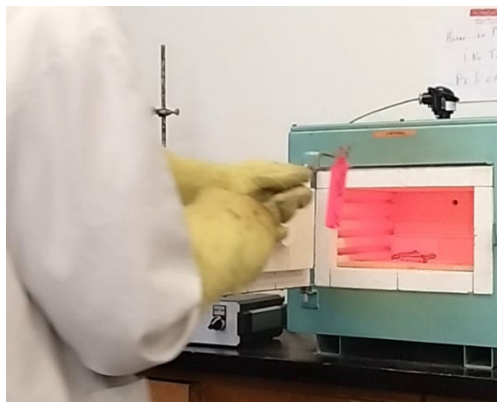


Figura 76 Extracción de la probeta del horno
Fuente: Elaboración Propia

Se controló la extracción de las probetas asegurando que se realizaban de forma segura, usando las medidas de protección adecuadas, y en el tiempo máximo que estipula la norma, 5 s. Una vez sacadas del horno las probetas se colocan en el equipo de templeado, Figura 77, y se procede a la apertura de la válvula del medio refrigerante (agua), Figura 79. En la Figura 78 se muestra una imagen tomada con cámara térmica de la colocación de la probeta en el equipo de templeado. La cámara térmica tiene una resolución máxima de 400 °C por lo que la parte de imagen térmica de la probeta no es representativa.



Figura 77 Colocación de la probeta en el equipo de templeado Jominy
Fuente: Elaboración Propia



Figura 78 Imagen térmica de la colocación de la probeta en el equipo de templado Jominy
Fuente: Elaboración Propia

Una vez abierta la válvula del agua se dejó fluyendo durante un tiempo superior al mínimo establecido por la norma, que son 10 minutos. Las probetas se dejaron en el equipo de templado durante 12 minutos con el agua fluyendo y, posteriormente, se dejaron en el mismo equipo a temperatura ambiente hasta su completo enfriamiento.

En la Figura 80 se muestra una imagen térmica tomada durante el proceso de temple en la que se aprecia cómo el equipo se calienta por conducción del calor de la probeta.



Figura 79 Probeta durante el proceso de templado en el equipo Jominy
Fuente: Elaboración Propia

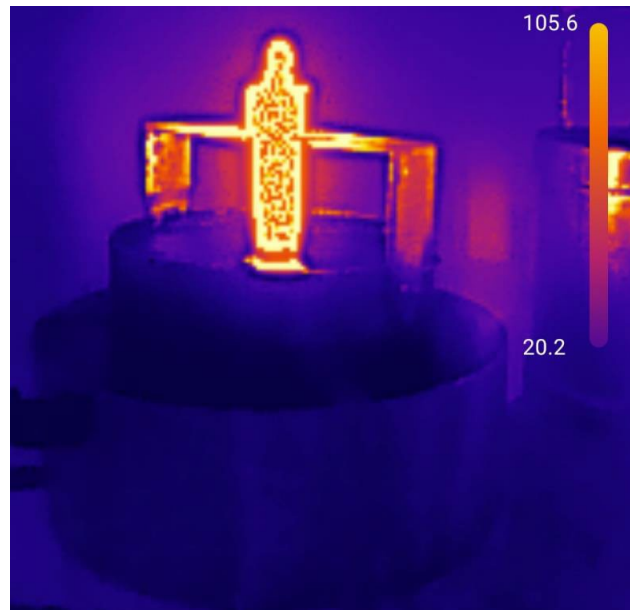


Figura 80 Imagen térmica durante el proceso de templado en el equipo Jominy
Fuente: Elaboración Propia

La Figura 81 muestra cómo quedan las probetas después de realizado el tratamiento térmico. Se aprecia cómo la probeta queda cubierta por escoria como consecuencia del paso por el horno. Esta escoria tiene que ser retirada antes de la realización de las medidas de la dureza para que la misma se realice con exactitud.



Figura 81 Detalle de la probeta tras el tratamiento térmico con la escoria
Fuente: Elaboración Propia

Medida de la dureza en HRC y HV10

Antes de la realización de los ensayos de medida de dureza es necesario realizar la preparación de las superficies donde se van a tomar las medidas, ya que por el proceso térmico se quedan cubiertas de escoria. La forma en la que se realiza la preparación de las superficies es

la misma que se siguió para la preparación inicial de las probetas, lijado y pulido de las caras. Los pasos son los mismos que se dieron en el apartado “Preparación de la muestra”.

Tras tener preparada la muestra se procede a la toma de medidas en las posiciones que se indicaron en el apartado “Medida de la dureza en HRC y HV10”.

La toma de las medidas por el ensayo Rockwell C se realizaron como se muestra en la Figura 82. De experiencias de medidas anteriores con el equipo de sujeción se sabe que el asiento de la probeta no es estable, es por ello por lo que el tutor del TFG, el Doctor Roberto D’Amato, sugirió que se utilizara una brida para mejorar la estabilidad de la probeta durante el proceso de toma de medidas de dureza. Se ha comprobado durante el proceso de medida de las durezas que la probeta quedaba muy estable y no se veían afectadas las medidas por movimientos de esta.

En la Figura 83 se muestra cómo se realizaron las medidas de dureza de las probetas con la escala Vickers. En este caso también se utilizó la brida para aumentar la estabilidad de la probeta durante la toma de las medidas de dureza.



Figura 82 Detalle medición dureza Rockwell de la probeta
Fuente: Elaboración Propia



Figura 83 Detalle medición dureza Vickers de la probeta
Fuente: Elaboración Propia

Resultados de temple a 805 °C

Los resultados de la medición de la dureza tras el temple a 805 °C de las probetas P805-1 y P805-2 se muestran en la Tabla 14 y la Tabla 15 respectivamente.

Tabla 14 Resultados de medición de dureza en probeta P805-1

Fuente: Elaboración Propia

Distancia al extremo templado (mm)	Dureza HRC	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	Dureza HV10
1	60,0	163,0	163,3	696,6
2	60,0	163,8	163,2	693,6
3	59,8	165,7	166,2	673,3
4	57,0	170,6	169,8	640,1
5	49,2	192,3	192,9	499,9
6	39,2	219,6	218,8	385,4
7	36,0	230,5	229,2	351,0
8	35,0	232,5	233,1	342,1
9	34,2	234,9	233,9	337,5
10	34,0	236,4	235,3	333,3
11	33,1	238,5	237,8	326,9
13	32,9	239,7	240,6	321,5
15	32,0	242,5	241,8	316,2
20	28,0	255,3	254,5	285,4
25	25,5	264,7	263,6	265,7
30	22,0	276,7	277,7	241,3

Tabla 15 Resultados de medición de dureza en probeta P805-2

Fuente: Elaboración Propia

Distancia al extremo templado (mm)	Dureza HRC	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	Dureza HV10
1	63,5	153,3	154,0	785,4
2	62,8	155,3	155,1	769,8
3	61,0	160,4	160,2	721,6
4	51,0	185,7	186,7	534,8
5	44,0	207,1	207,7	431,1
6	38,0	221,7	221,6	377,4
7	35,5	231,2	232,1	345,5
8	34,0	236,7	235,9	332,1
9	33,0	238,2	238,6	326,2
10	32,0	240,8	241,3	319,1
11	31,0	246,9	246,1	305,1
13	30,0	249,5	248,9	298,6
15	29,0	251,7	252,5	291,7
20	28,5	253,7	252,9	289,0
25	28,0	256,1	255,3	283,6
30	26,0	262,0	261,4	270,7

Resultados de temple a 830 °C

Los resultados de la medición de la dureza tras el temple a 830 °C de las probetas P830-1 y P830-2 se muestran en la Tabla 16 y la Tabla 17 respectivamente.

Tabla 16 Resultados de medición de dureza en probeta P830-1

Fuente: Elaboración Propia

Distancia al extremo templado (mm)	Dureza HRC	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	Dureza HV10
1	64,0	151,8	152,1	803,1
2	61,0	159,5	160,4	724,8
3	60,0	163,7	163,5	692,8
4	57,2	170,5	170,8	636,7
5	52,0	189,0	188,8	519,6
6	41,0	213,0	213,5	407,7
7	36,5	232,3	232,6	343,1
8	35,0	233,9	234,0	338,8
9	33,5	237,4	237,6	328,7
10	33,0	237,7	238,0	327,7
11	32,0	242,8	242,6	314,8
13	32,0	242,9	242,8	314,4
15	31,5	247,9	247,7	302,1
20	31,0	248,9	249,2	298,9
25	31,0	249,4	249,6	297,8
30	28,5	261,4	260,9	271,9

Tabla 17 Resultados de medición de dureza en probeta P830-2

Fuente: Elaboración Propia

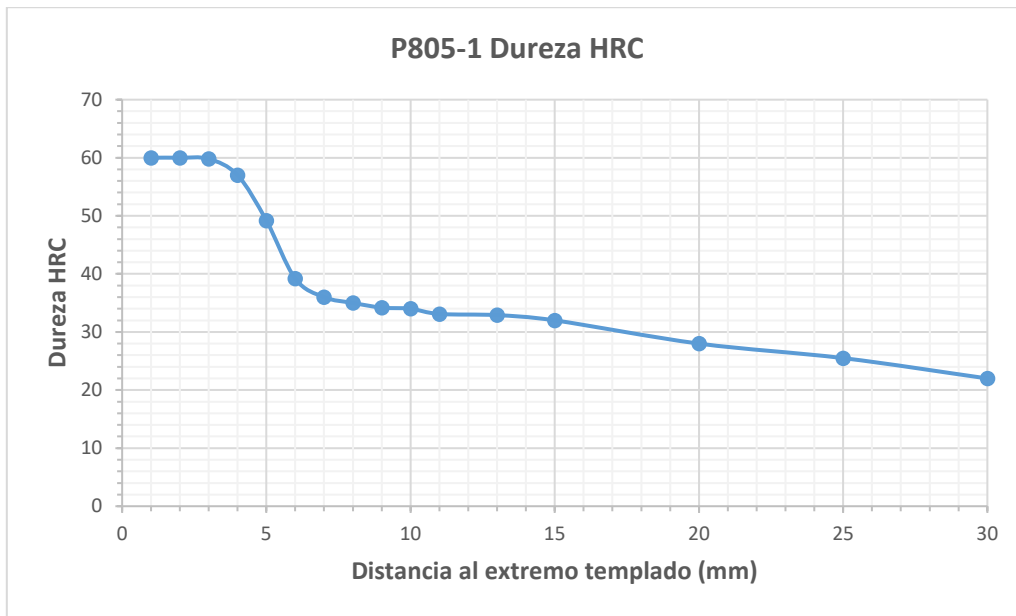
Distancia al extremo templado (mm)	Dureza HRC	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	Dureza HV10
1	63,0	154,1	153,9	781,9
2	60,8	163,2	163	697,1
3	59,2	165,4	165,6	677,0
4	55,8	178,5	178,1	583,3
5	51,0	189,7	190,1	514,2
6	41,0	213,5	213,6	406,2
7	35,2	232,5	231,3	344,8
8	35,0	234,4	234,2	337,7
9	34,5	234,5	234,3	337,5
10	34,2	235,7	235,9	333,5
11	34,0	236,7	236,2	331,6
13	33,0	239,7	240,1	322,2
15	33,0	243,7	244,2	311,6
20	31,0	244,9	245,2	308,8
25	30,0	248,4	248,9	299,9
30	28,0	256,7	256,4	281,7

Curva Jominy experimental

Una vez realizadas las medidas de las durezas de las probetas en el apartado “Medida de la dureza en HRC y HV10” se va a representar gráficamente las curvas Jominy de las probetas ensayadas, obteniendo de esta forma las curvas Jominy experimentales de las probetas.

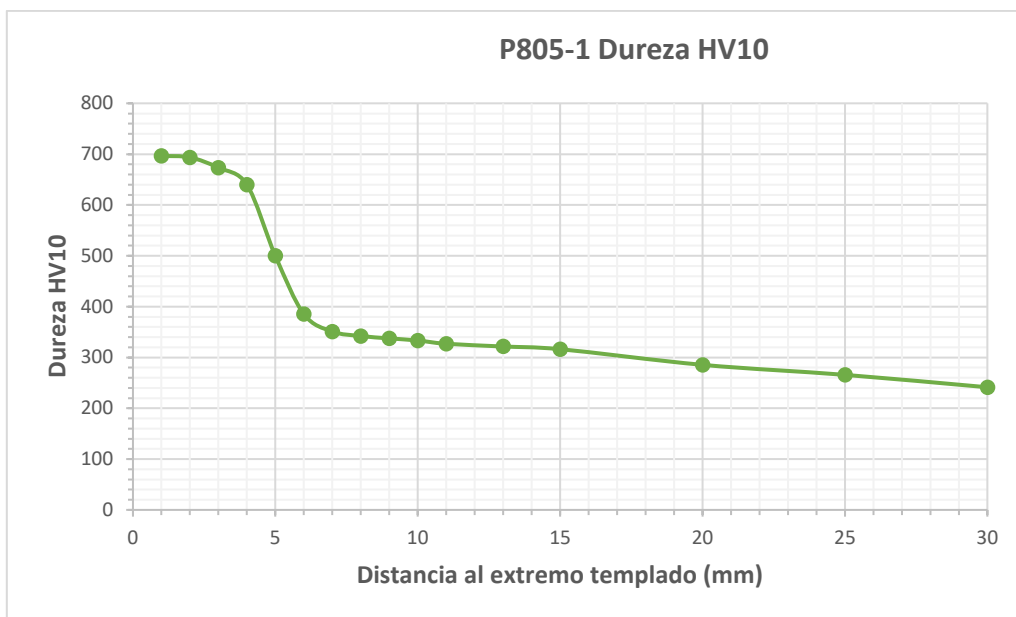
Curvas Jominy templado a 805 °C

Las curvas Jominy experimentales de la probeta P805-1 se obtienen representando los valores de la Tabla 14 (Gráfica 6, Gráfica 7 y Gráfica 8).



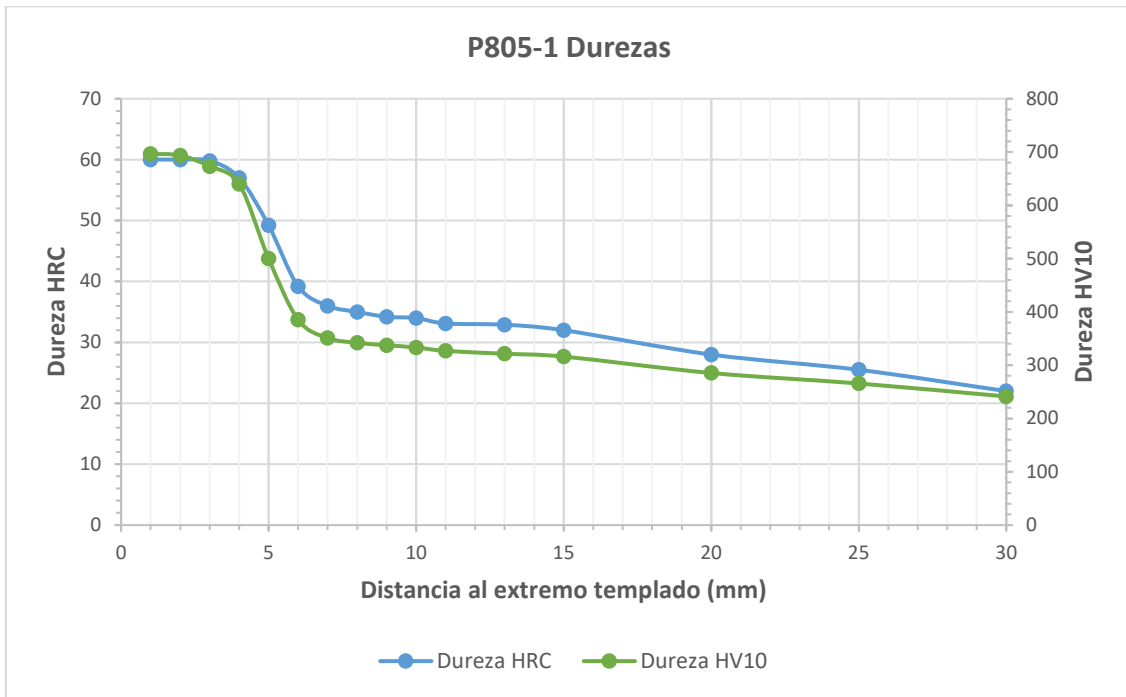
Gráfica 6 Curva Jominy experimental de la probeta P805-1 en dureza HRC

Fuente: Elaboración Propia



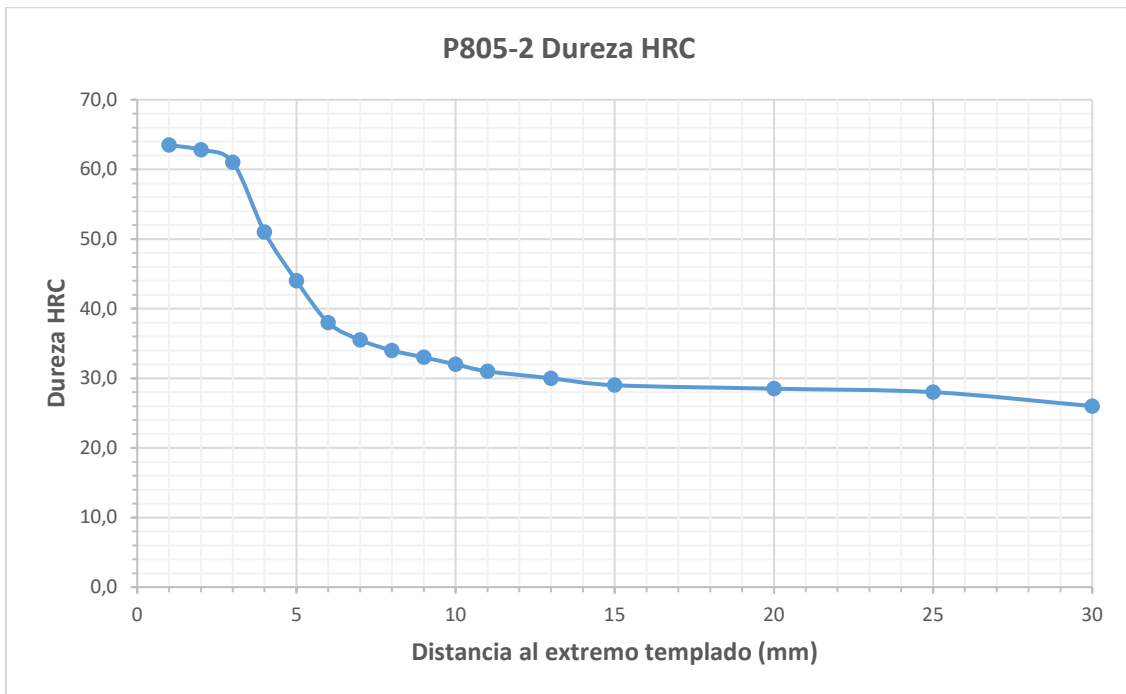
Gráfica 7 Curva Jominy experimental de la probeta P805-1 en dureza HV10

Fuente: Elaboración Propia

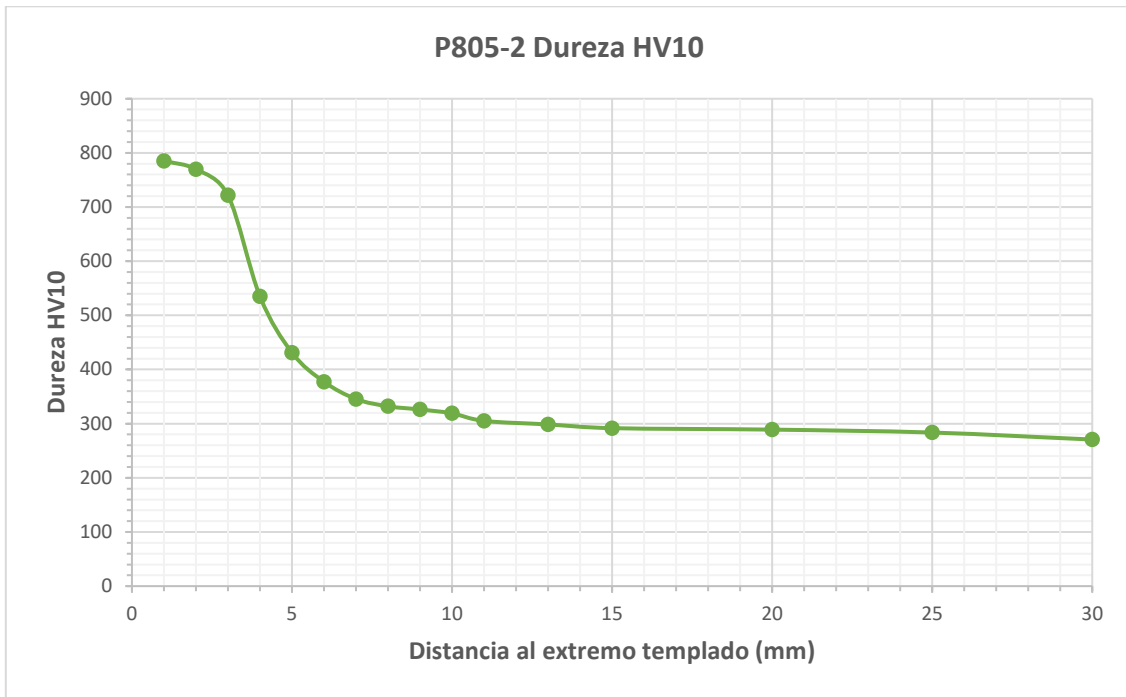


Gráfica 8 Comparativa curvas Jominy experimentales probeta P805-1 HRC vs HV10
Fuente: Elaboración Propia

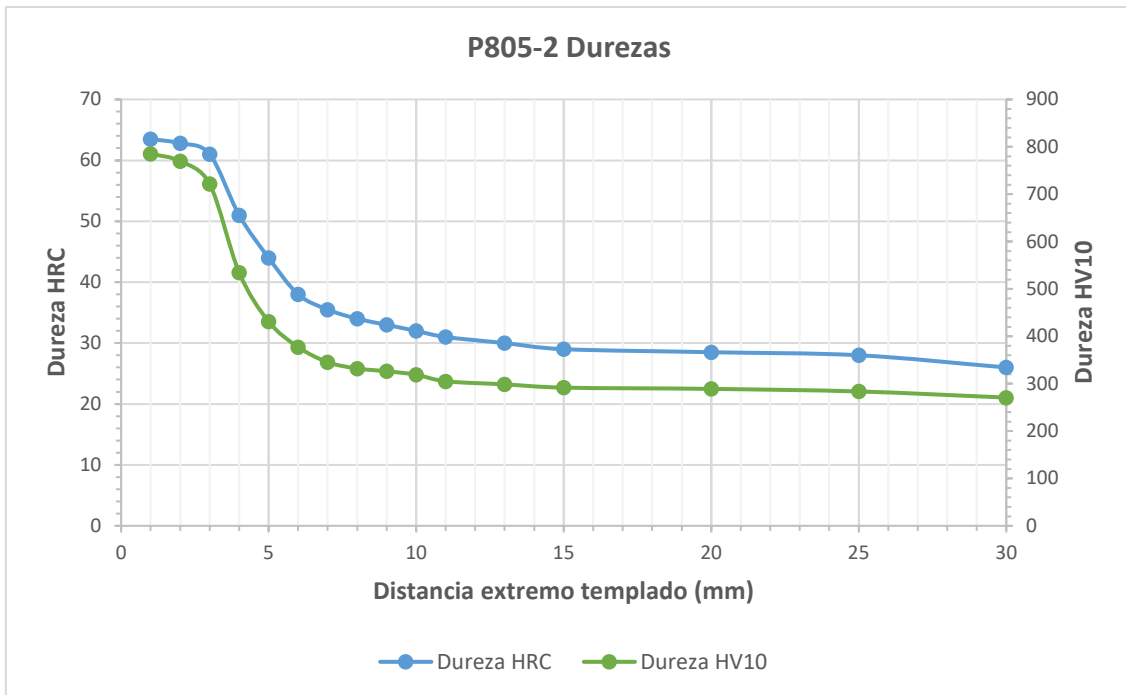
Las curvas Jominy experimentales de la probeta P805-2 se obtienen representando los valores de la Tabla 15 (Gráfica 9, Gráfica 10 y Gráfica 11).



Gráfica 9 Curva Jominy experimental de la probeta P805-2 en dureza HRC
Fuente: Elaboración Propia



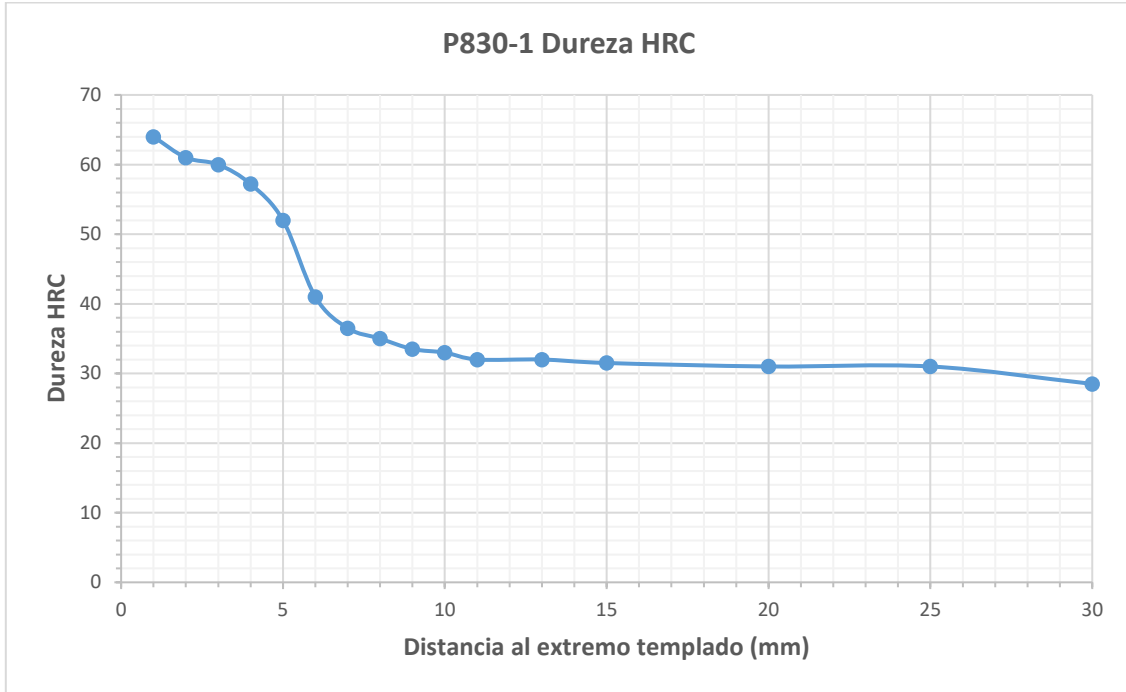
Gráfica 10 Curva Jominy experimental de la probeta P805-2 en dureza HV10
Fuente: Elaboración Propia



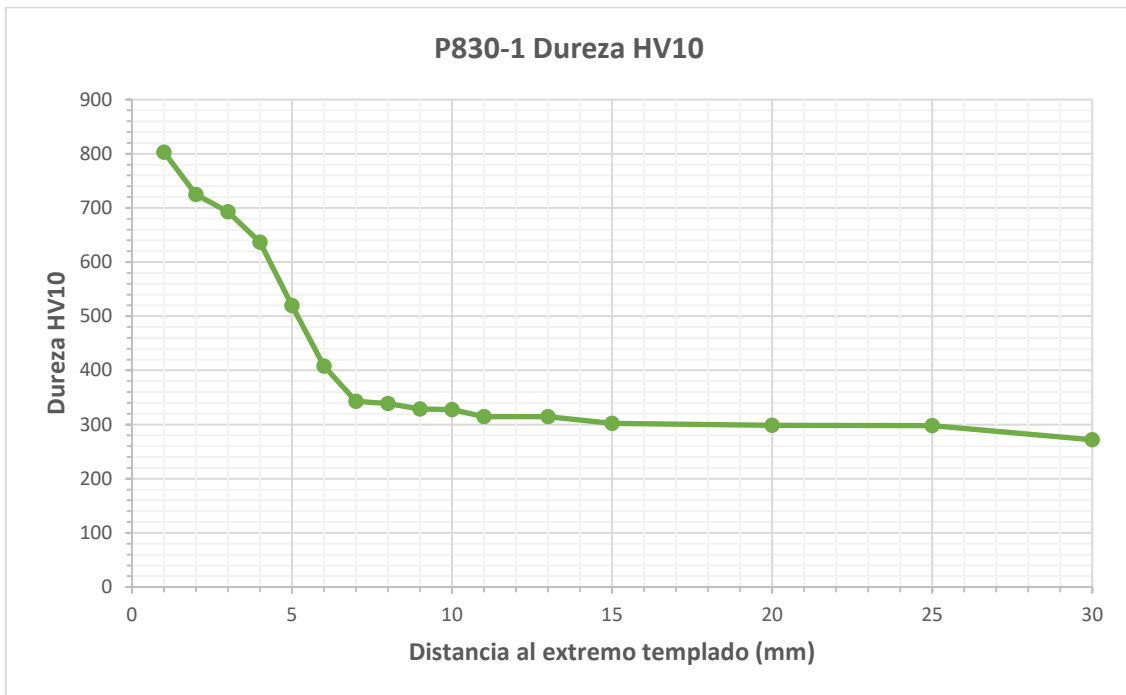
Gráfica 11 Comparativa curvas Jominy experimentales probeta P805-2 HRC vs HV10
Fuente: Elaboración Propia

Curvas Jominy templado a 830 °C

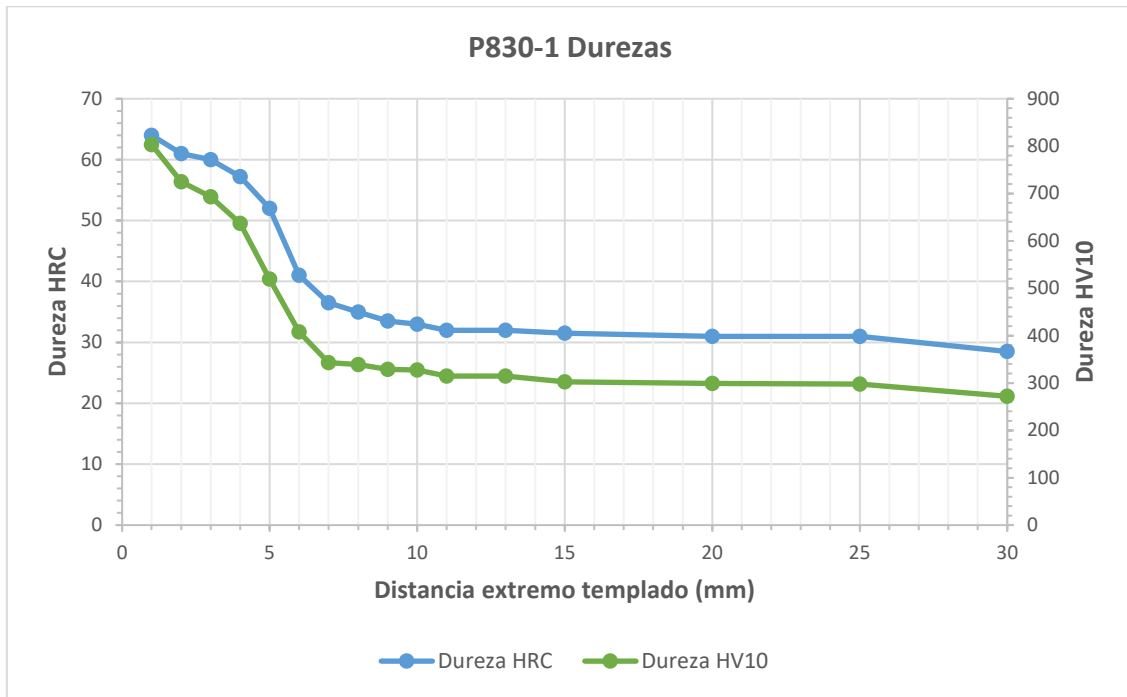
Las curvas Jominy experimentales de la probeta P830-1 se obtienen representando los valores de la Tabla 16 (Gráfica 12, Gráfica 13 y Gráfica 14).



Gráfica 12 Curva Jominy experimental de la probeta P830-1 en dureza HRC
 Fuente: Elaboración Propia

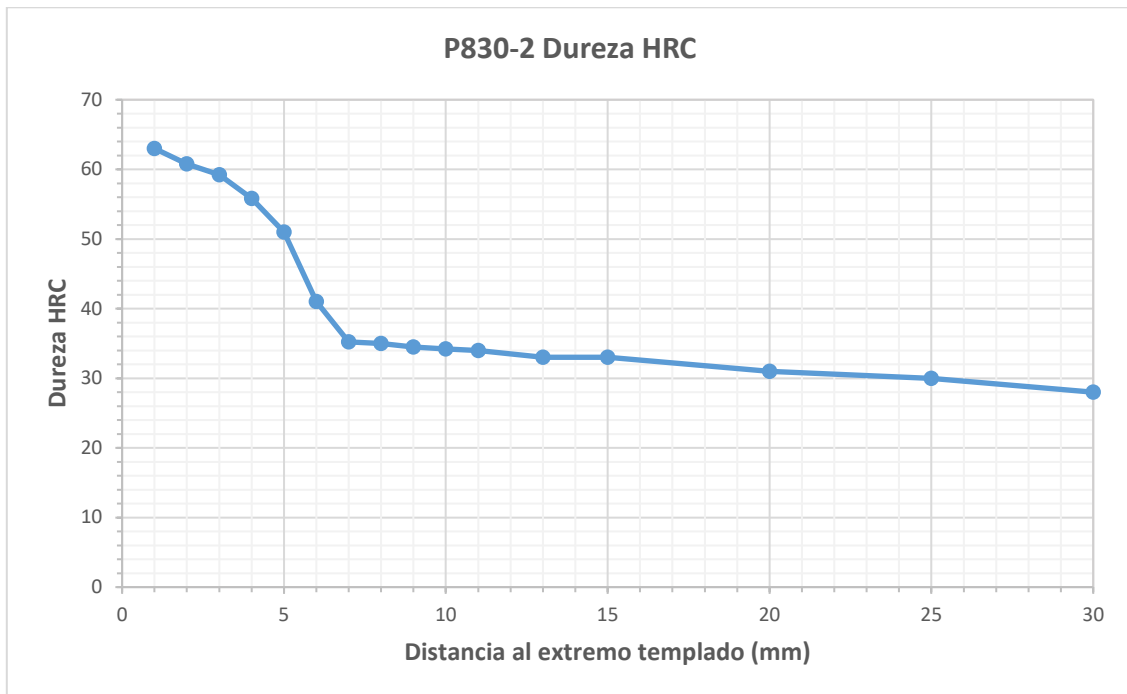


Gráfica 13 Curva Jominy experimental de la probeta P830-1 en dureza HV10
 Fuente: Elaboración Propia

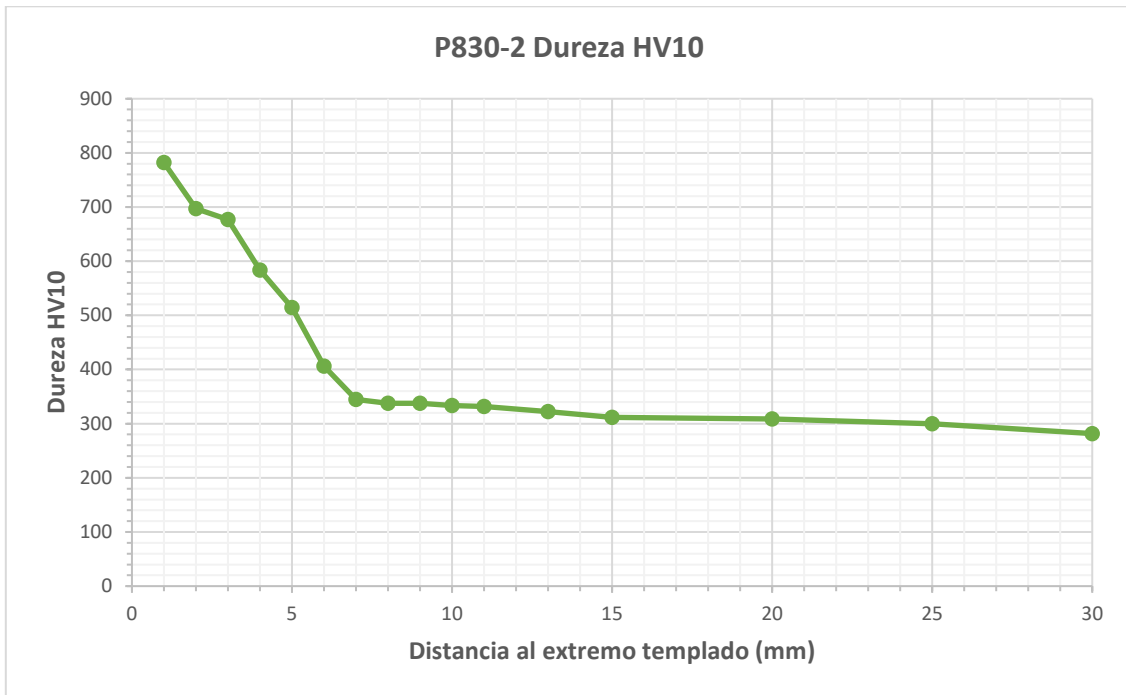


Gráfica 14 Comparativa curvas Jominy experimentales probeta P830-1 HRC vs HV10
Fuente: Elaboración Propia

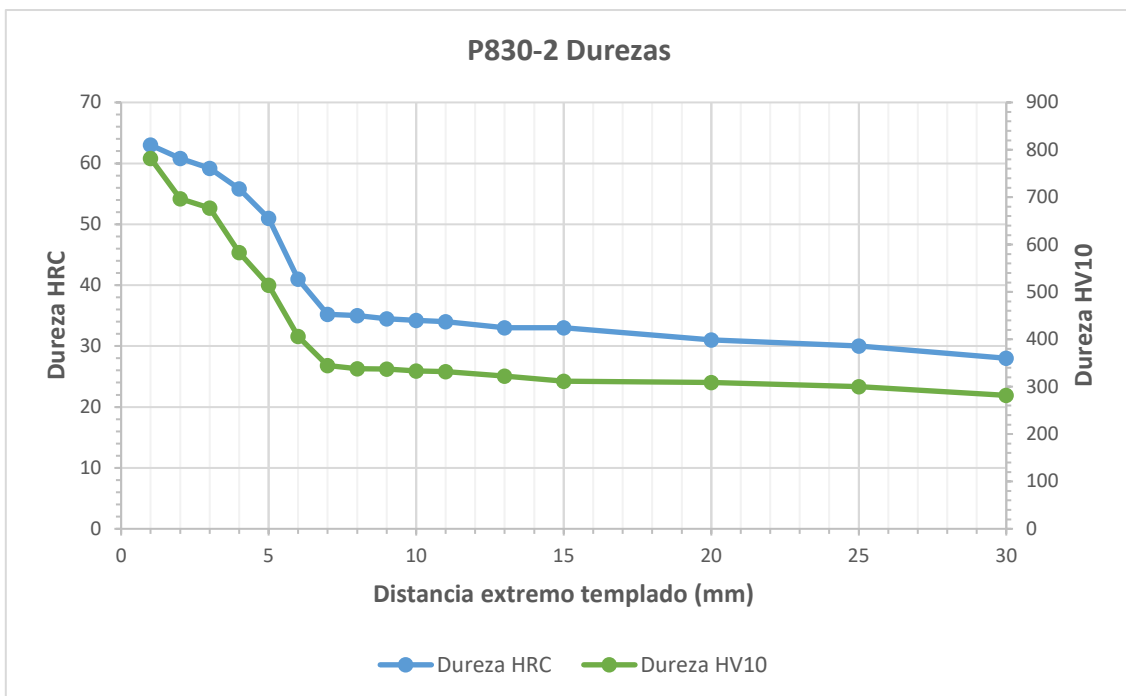
Las curvas Jominy experimentales de la probeta P830-2 se obtienen representando los valores de la Tabla 17 (Gráfica 15, Gráfica 16 y Gráfica 17).



Gráfica 15 Curva Jominy experimental de la probeta P830-2 en dureza HRC
Fuente: Elaboración Propia



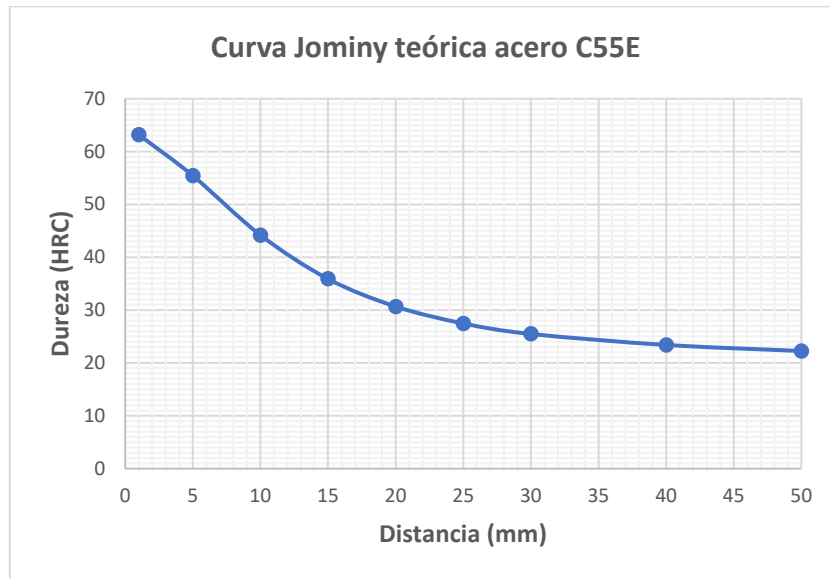
Gráfica 16 Curva Jominy experimental de la probeta P830-1 en dureza HV10
Fuente: Elaboración Propia



Gráfica 17 Comparativa curvas Jominy experimentales probeta P830-2 HRC vs HV10
Fuente: Elaboración Propia

Determinación teórica de la curva Jominy

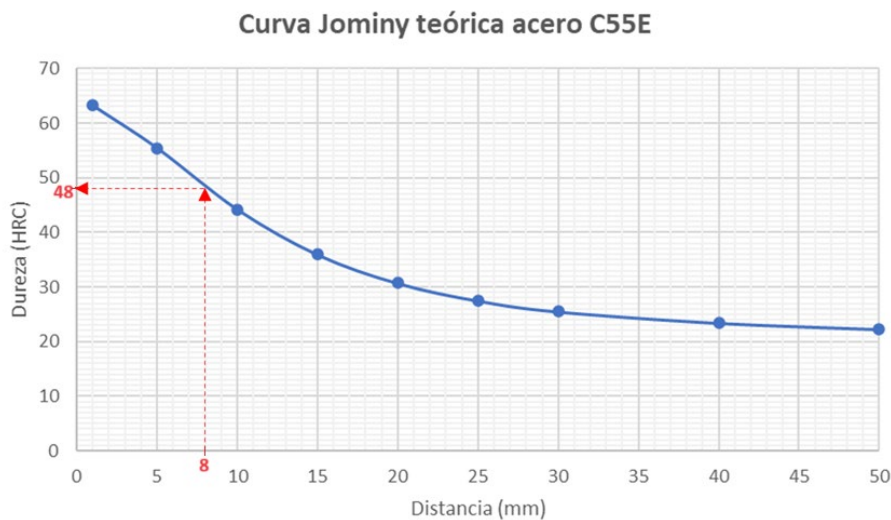
Con los valores que se han obtenido en el apartado de “Metodología y materiales”, Tabla 13, se ha generado la Gráfica 18



Gráfica 18 Curva Jominy teórica acero C55E
 Fuente: Elaboración Propia

Para la determinación de la longitud crítica (l_c) se tiene que determinar el cambio de curvatura de la curva Jominy, cuando pasa de cóncava a convexa. Se puede hacer de forma gráfica, mediante el uso de la curva representada en la Gráfica 18, o mediante el uso de la gráfica G6 del Anexo II. Se va a calcular la l_c mediante el segundo de los métodos. Para ello se entra en la gráfica G6 con el valor del diámetro crítico ideal y se obtiene el valor de la longitud crítica. En este caso, el valor de la longitud crítica que se obtiene es de 8 mm, que observando la Gráfica 18 se comprueba que es el punto donde se produce el cambio de curvatura.

Con este último valor es posible obtener el valor de la dureza crítica, que se da en la longitud crítica. Para ello se entra en la Gráfica 18 con el valor de la l_c y se obtiene la dureza crítica. El resultado se muestra en la Gráfica 19 y el valor obtenido es de 48 HRC.



Gráfica 19 Determinación de la dureza crítica teórica
 Fuente: Elaboración Propia

Cálculo del tamaño de grano

El cálculo del tamaño de grano se va a realizar utilizando el valor medio de la dureza HRC de cada una de las temperaturas de templado. No se va a utilizar el valor de la dureza HV10 ya que el resultado debería ser el mismo y las tablas disponibles están en dureza HRC y los cálculos teóricos realizados anteriormente se hicieron con la dureza HRC. El proceso que se va a seguir, la determinación del punto de inflexión de la curva Jominy va a ser analítico en lugar de determinarlo como se hizo en el apartado “*Determinación teórica de la curva Jominy*”.

Se van a generar las gráficas de las curvas Jominy partiendo de los valores medios de la dureza por cada una de las temperaturas de temple. Posteriormente se va a determinar, utilizando la función línea de tendencia de Excel, la ecuación de la curva que más se aproxima a esa representación gráfica de la curva. Para determinar el punto de inflexión de esa curva aproximada se va a proceder al análisis de la ecuación, es decir, se va a buscar la condición necesaria para que un punto se considere que es punto de inflexión de una curva: $f''(x) = 0$

Cálculo del tamaño de grano del temple a 805 °C

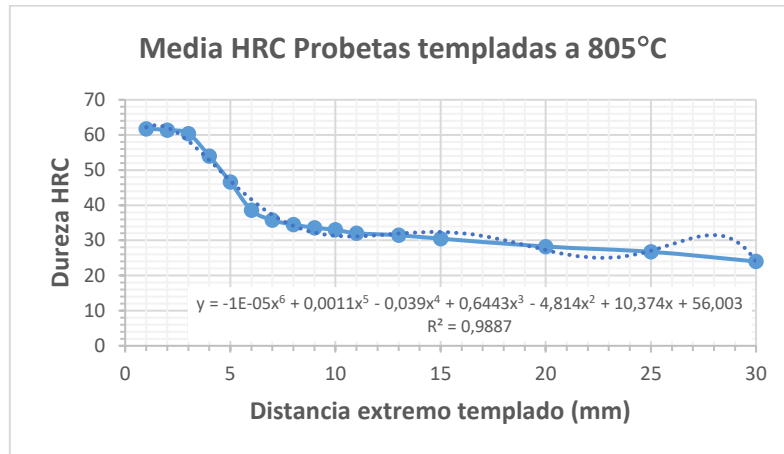
Los valores de la dureza que se van a utilizar para el cálculo del tamaño del grano son los que se muestran en la Tabla 18, los valores medios de las dos probetas.

Tabla 18 Datos dureza HRC de las probetas templadas a 805 °C y la media de ambas
Fuente: Elaboración Propia

Distancia al extremo templado (mm)	Dureza HRC P805-1	Dureza HRC P805-2	Dureza HRC Media
1	60,0	63,5	61,75
2	60,0	62,8	61,40
3	59,8	61,0	60,40
4	57,0	51,0	54,00
5	49,2	44,0	46,60
6	39,2	38,0	38,60
7	36,0	35,5	35,75
8	35,0	34,0	34,50
9	34,2	33,0	33,60
10	34,0	32,0	33,00
11	33,1	31,0	32,05
13	32,9	30,0	31,45
15	32,0	29,0	30,50
20	28,0	28,5	28,25
25	25,5	28,0	26,75
30	22,0	26,0	24,00

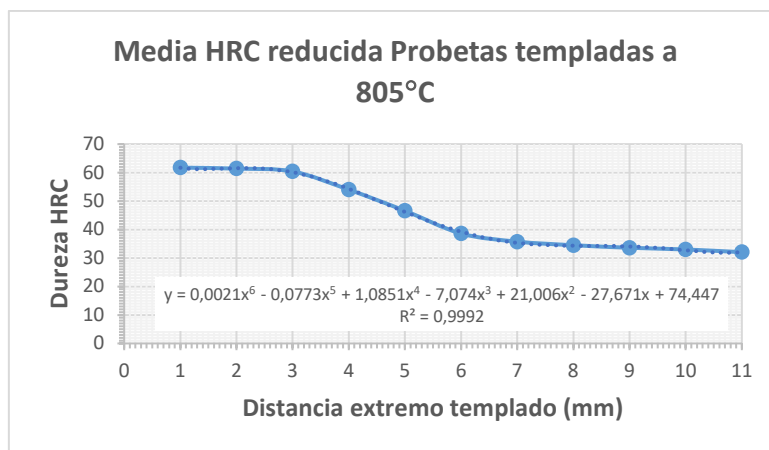
El valor de la dureza en el extremo templado es, según se muestra en los datos de la tabla, **61,75 HRC**. Para la determinación del valor de la dureza en el núcleo hay que empezar obteniendo el valor de la longitud crítica. La longitud crítica, como se ha indicado anteriormente,

se da en el punto de inflexión de la gráfica de la curva Jominy. En la Gráfica 20 se muestra la curva Jominy con los valores medios de las probetas templadas a 805 °C, también se ha añadido la línea de tendencia, en este caso una polinómica de grado 6. Esta es la mejor aproximación de la curva completa, pero, como se ve en la gráfica, hay diferencias notables en el comportamiento de la línea de tendencia con respecto a la curva experimental



Gráfica 20 Curva Jominy experimental media de las probetas templadas a 805 °C
 Fuente: Elaboración Propia

Para minimizar estas desviaciones, teniendo en cuenta que el valor del punto de inflexión no se produce en la zona de la curva donde más discrepancias hay, se ha decidido hacer el análisis de la curva de forma analítica en un intervalo menor para que la aproximación entre la línea de tendencia y los valores experimentales sea mejor. Analizando la gráfica se ha decidido que la línea de tendencia se calcule sólo para el intervalo entre 1 y 11 mm. Esta gráfica acotada y la nueva línea de tendencia calculada se muestran en el Gráfica 21. Como se puede ver en la gráfica, la nueva línea de tendencia representa con gran exactitud la curva de Jominy local. Viendo esta gran aproximación, la confianza en la obtención del valor del punto de inflexión de forma analítica es muy alta.



Gráfica 21 Curva Jominy experimental media reducida de las probetas templadas a 805 °C
 Fuente: Elaboración Propia

Para la determinación del punto de inflexión hay que analizar la gráfica representada por la curva dada en la expresión (7).

$$y = 0,0021x^6 - 0,0773x^5 + 1,0851x^4 - 7,074x^3 + 21,006x^2 - 27,671x + 74,447 \quad (7)$$

La primera derivada de la expresión (7) se muestra en la expresión (8):

$$y' = 0,0126x^5 - 0,3865x^4 + 4,3404x^3 - 21,222x^2 + 42,012x - 27,671 \quad (8)$$

Y la segunda derivada de la expresión (7) viene dada por la expresión (9):

$$y'' = 0,063x^4 - 1,546x^3 + 13,0212x^2 - 42,444x + 42,012 \quad (9)$$

Igualando la expresión (9) a cero y resolviéndola se obtiene el punto de inflexión, expresión (10). El punto de inflexión se encuentra a **4,59 mm** del extremo templado de la probeta.

$$0,063x^4 - 1,546x^3 + 13,0212x^2 - 42,444x + 42,012 = 0 \rightarrow x = \mathbf{4,59} \quad (10)$$

Sustituyendo este valor en la ecuación de la curva, expresión (7), se obtiene el valor de la dureza en el núcleo. El valor que se obtiene para la dureza en el núcleo es de **49,71 HRC**.

Con este valor se procede a calcular el valor del divisor, que viene dado por la expresión (11), y que da un valor de **1,24**.

$$Div = \frac{D_e}{D_n} = \frac{61,75}{49,71} = 1,24 \quad (11)$$

A partir del diámetro de la probeta se obtiene el diámetro crítico ideal modificado para lo que se usa la gráfica G5 del Anexo II. Con el diámetro de la probeta, 25 mm, y la severidad del temple del agua, que es $H=1 \text{ cm}^{-1}$, se obtiene un valor de **44 mm**.

Con este último dato se puede obtener la longitud crítica modificada utilizando la gráfica G6. El valor que se obtiene de la longitud crítica es aproximadamente de **4,8 mm**.

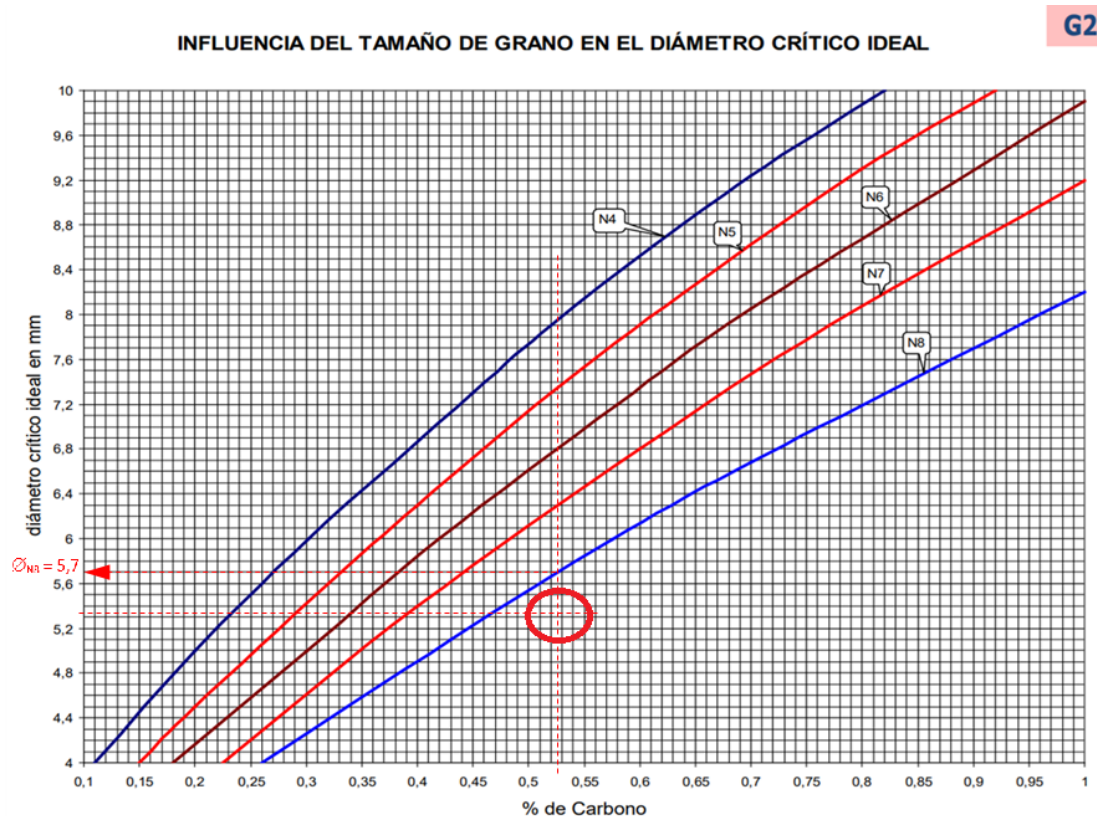
Con el valor del divisor, expresión (11), y de la longitud crítica modificada se obtiene, mediante la gráfica G4, el valor del diámetro crítico ideal. Se ha interpolado en la gráfica y se ha obtenido un valor de la longitud crítica modificada de **43,13 mm**.

Una vez se ha calculado el valor del diámetro crítico se ha de calcular el diámetro crítico sin aleantes. Para ello se han de utilizar los valores de los factores correctores que se determinaron en el apartado “*Determinación teórica de la curva Jominy*”, los valores se muestran en la Tabla 12. Para calcular el valor del diámetro crítico sin aleantes se utilizará la expresión (6), que se obtiene de la expresión (4).

De la expresión (6), reemplazando los valores correspondientes, se obtiene el valor del diámetro crítico sin aleantes que es de **5,34 mm**. Con este valor y el valor del porcentaje de carbono de la aleación se debería obtener el valor del tamaño del grano haciendo uso de la

gráfica G2. La gráfica G2 está limitada a tamaños de grano ASTM comprendidos entre 4 y 8. En este caso, con el valor del porcentaje de carbono (0,525%) y el valor del tamaño crítico ideal que se ha obtenido antes, la gráfica no muestra ninguna curva que se adapte a la zona donde queda la intersección de estos valores, Gráfica 22. El valor de grano es mayor que N8, pero no se puede determinar con exactitud qué valor asignar.

Una de las opciones podría ser la estimación de un valor de forma gráfica, pero se podría cometer un error considerable en la asignación del tamaño de grano después del temple.



Gráfica 22 Influencia del tamaño de grano en el diámetro crítico ideal en función del % de carbono
Fuente: (Ricardo García Ledesma, 2000b)

Analizando la bibliografía se comprueba que M.A. Grossmann, en su publicación de 1952 “*Elements of Hardenability*” (Grossmann, 1952), indica que (página 117) “...no importa cuál sea la templabilidad del acero, un aumento de un número de tamaño de grano siempre implica el mismo aumento proporcional en la templabilidad (en realidad, un poco más del 8% para cada número de tamaño de grano)”. El *ASM Handbook Volume 1, Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys* (ASM Handbook Volume 1, 1990), cuando hace referencia a los estudios de M.A. Grossmann, muestra que el valor de proporcionalidad que hay que utilizar para pasar de un tamaño de grano a otro es de 1,083 (Gráfica 23).

Teniendo en cuenta este valor, se ha analizado la gráfica G2 y la que muestra M.A. Grossman en su publicación, Gráfica 24. Se ha comprobado para varios porcentajes de carbono que los

saltos entre valores del tamaño de grano ASTM corresponden con incrementos proporcionales al citado valor 1,083.

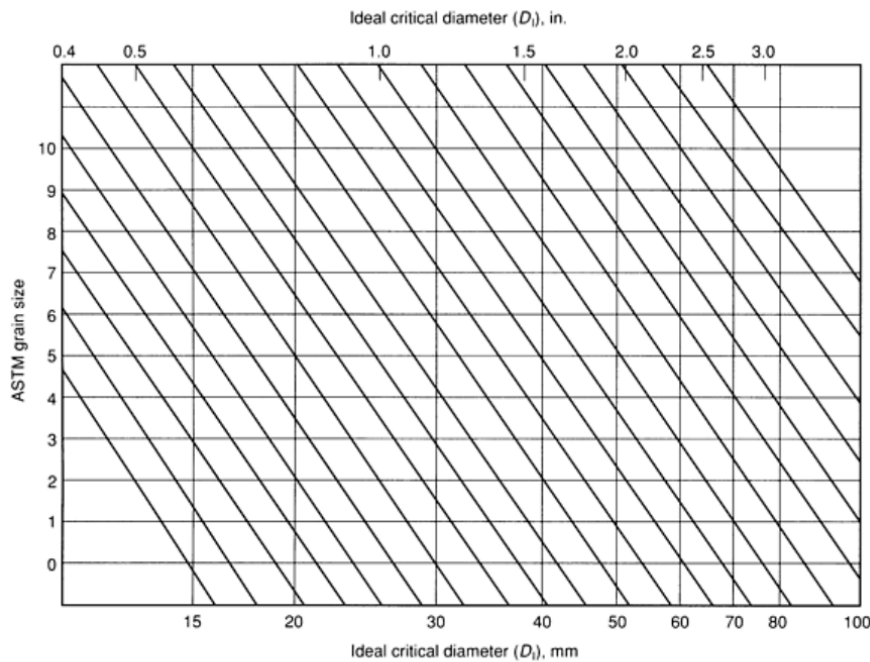
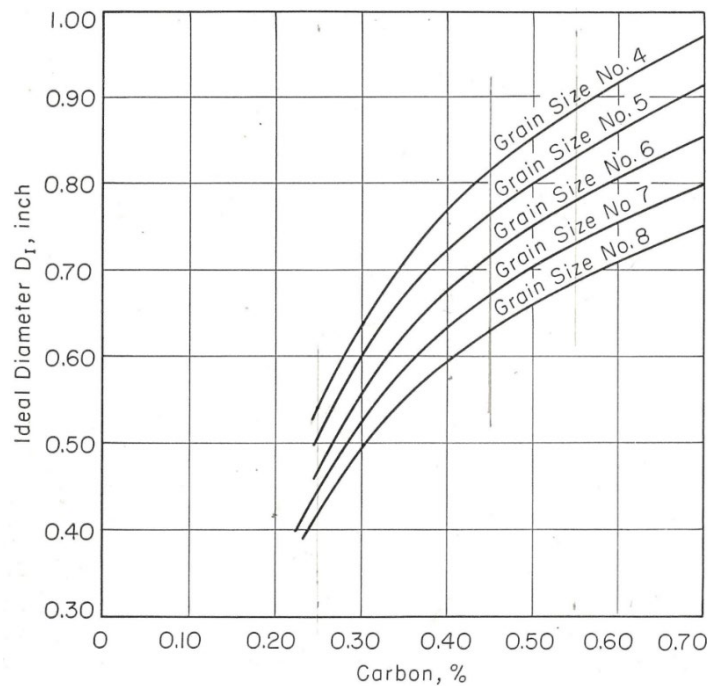


Fig. 3(a) Diagram showing direct relationship between ASTM grain size number and hardenability. For a grain size increment of one ASTM grain size number, multiply by 1.083. For a grain size increase of two ASTM size numbers, multiply by 1.172. For an increased grain size of three ASTM size numbers, multiply by 1.270. Source: Ref 1

Gráfica 23 Relación entre el Diámetro crítico ideal y el tamaño de grano ASTM
 Fuente: (ASM Handbook Volume 1, 1990)



Gráfica 24 Influencia del tamaño de grano en el diámetro crítico ideal en función del % de carbono, M. A. Grossmann
 Fuente: (Grossmann, 1952)

Es por ello, por lo que se ha considerado que la forma en la que se puede determinar el tamaño de grano para tamaños superiores a los que aparecen en la gráfica es la aplicación de la expresión (12):

$$\phi_{N8} = 1.083^x \cdot \phi_{calculado} \quad (12)$$

En esta ecuación se ha considerado como referencia el tamaño de grano N8 para realizar la traslación de la gráfica; se podría haber utilizado otro valor, pero este es el más cercano a la zona donde se intersecan el porcentaje de carbono y el diámetro ideal de los casos de este TFG.

Teniendo en cuenta esta expresión, para determinar el número de pasos de tamaño de grano ASTM que hay que añadir al tamaño de grano de referencia se utilizará la expresión (13):

$$x = \frac{\ln \frac{\phi_{N8}}{\phi_{calculado}}}{\ln 1,083} \quad (13)$$

Con los datos que se tienen, siendo $\phi_{N8} = 5,7$ y el $\phi_{calculado} = 5,34$, el valor que se obtiene de x es 0,818. Por lo tanto, el valor del tamaño de grano ASTM que se obtendría sería de 8,82 que se va a aproximar a un valor de **N9**.

Cálculo del tamaño de grano del temple a 830 °C

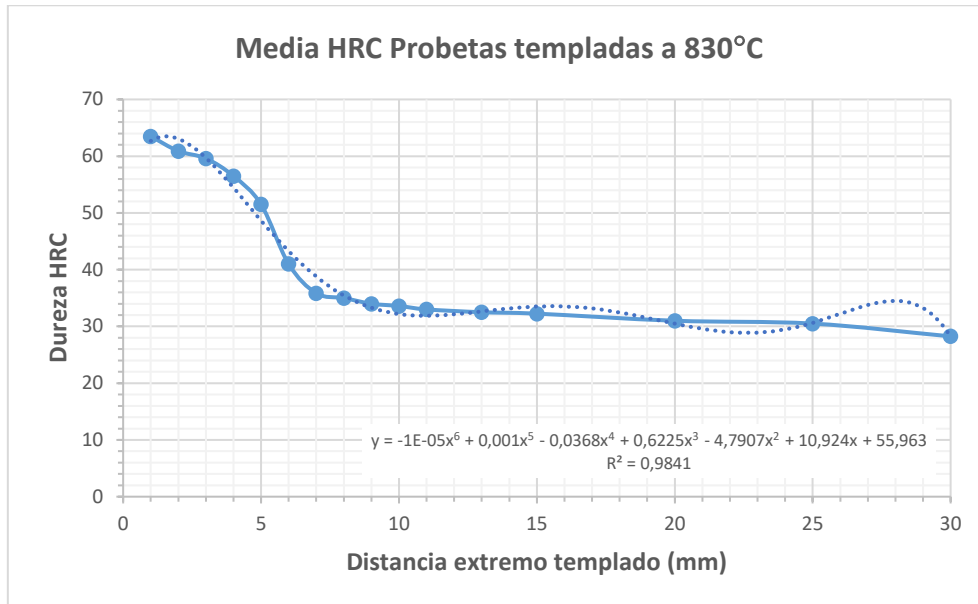
Los valores de la dureza que se van a utilizar para el cálculo del tamaño del grano son los que se muestran en la Tabla 19

Tabla 19 Datos dureza HRC de las probetas templadas a 830 °C y la media de ambas
Fuente: Elaboración Propia

Distancia al extremo templado (mm)	Dureza HRC P830-1	Dureza HRC P830-2	Dureza HRC Media
1	64,0	63,0	63,5
2	61,0	60,8	60,9
3	60,0	59,2	59,6
4	57,2	55,8	56,5
5	52,0	51,0	51,5
6	41,0	41,0	41,0
7	36,5	35,2	35,9
8	35,0	35,0	35,0
9	33,5	34,5	34,0
10	33,0	34,2	33,6
11	32,0	34,0	33,0
13	32,0	33,0	32,5
15	31,5	33,0	32,3
20	31,0	31,0	31,0
25	31,0	30,0	30,5
30	28,5	28,0	28,3

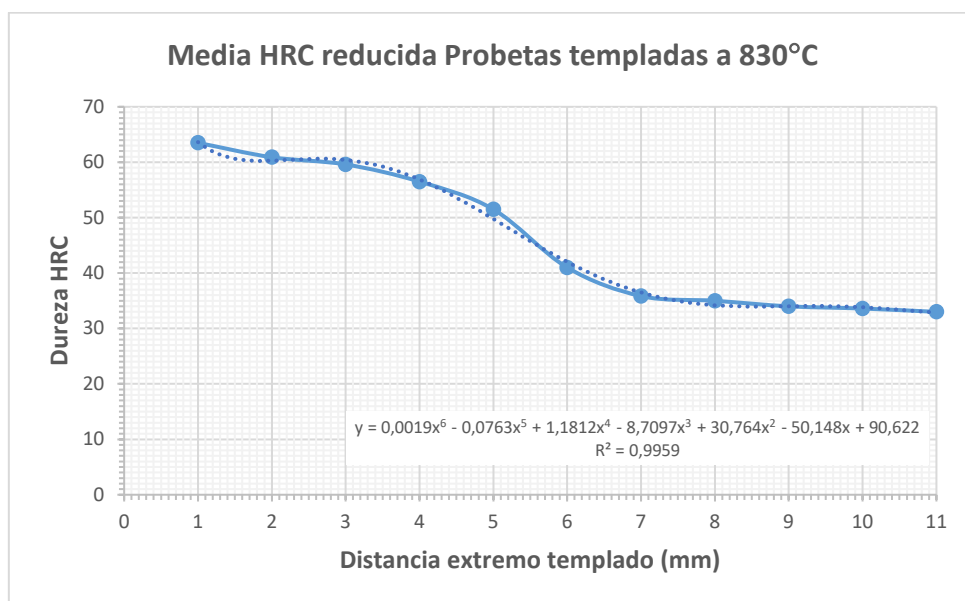
El valor de la dureza en el extremo templado es, según se muestra en la tabla, **63,5 HRC**.

En la Gráfica 25 se muestra la curva Jominy experimental con los valores medios de las probetas templadas a 830 °C. Se ha añadido la línea de tendencia, con la polinómica de grado 6, y se comprueba que ocurre lo mismo que en el caso de las probetas de templado a 805 °C. La curva de la línea de tendencia no se aproxima lo suficiente a lo largo de toda la curva Jominy experimental.



Gráfica 25 Curva Jominy experimental media de las probetas templadas a 830 °C
Fuente: Elaboración Propia

Se ha utilizado el mismo criterio que en las otras probetas, reducir el intervalo de estudio de rango entre 1 y 11 mm. En la Gráfica 26 se muestra la curva de Jominy reducida y la línea de tendencia ajustada a ese intervalo de estudio.



Gráfica 26 Curva Jominy experimental media reducida de las probetas templadas a 830 °C
Fuente: Elaboración Propia

Para la determinación del punto de inflexión hay que analizar la gráfica representada por la expresión (14).

$$y = 0,0019x^6 - 0,0763x^5 + 1,1812x^4 - 8,7097x^3 + 30,764x^2 - 50,148x + 90,622 \quad (14)$$

La primera derivada de la expresión (14) se muestra en la expresión (15).

$$y' = 0,0114x^5 - 0,3815x^4 + 4,7248x^3 - 26,1291x^2 + 61,528x - 50,148 \quad (15)$$

La segunda derivada de la expresión (15) viene dada por la expresión (16).

$$y'' = 0,057x^4 - 1,526x^3 + 14,1744x^2 - 52,2582x + 61,528 \quad (16)$$

Igualando la expresión (16) a cero y resolviéndola se obtiene el punto de inflexión, expresión (17). El punto de inflexión se encuentra a **5,15 mm** del extremo templado de la probeta.

$$0,057x^4 - 1,526x^3 + 14,1744x^2 - 52,2582x + 61,528 = 0 \rightarrow x = \mathbf{5,15} \quad (17)$$

Sustituyendo este valor en la ecuación de la curva, expresión (14), se obtiene el valor de la dureza en el núcleo. El valor que se obtiene para la dureza en el núcleo es de **48,57 HRC**.

Con este valor se procede a calcular el valor del divisor, que viene dado por la expresión (18), y que da un valor de **1,31**.

$$Div = \frac{D_e}{D_n} = \frac{63,5}{48,57} = 1,31 \quad (18)$$

A partir del diámetro de la probeta se obtiene el diámetro crítico ideal modificado para lo que se usa la gráfica G5 del Anexo II. Con el diámetro de la probeta, 25 mm, y la severidad del temple del agua, que es $H=1 \text{ cm}^{-1}$, se obtiene un valor de **44 mm**.

Con este último dato se puede obtener la longitud crítica modificada utilizando la gráfica G6. El valor que se obtiene de la longitud crítica es aproximadamente de **4,8 mm**.

Con el valor del divisor y de la longitud crítica modificada se obtiene, mediante la gráfica G4, el valor del diámetro crítico ideal. Se ha interpolado en la gráfica y se ha obtenido un valor de la longitud crítica modificada de **34,38 mm**.

Una vez se ha calculado el valor del diámetro crítico se ha de calcular el diámetro crítico sin aleantes. Para ello se han de utilizar los valores de los factores correctores que se determinaron en el apartado “*Determinación teórica de la curva Jominy*”, los valores se muestran en la Tabla 13. Para calcular el valor del diámetro crítico sin aleantes se utilizará la expresión (6).

De la expresión (6) se obtiene el valor del diámetro crítico sin aleantes que es de **4,26 mm**.

Con este valor del diámetro crítico ocurre lo mismo que con las probetas templadas a 805 °C, no hay curva representada en la gráfica G2 que pueda usarse para determinar el tamaño de grano. Se va a seguir la misma metodología que se explicó en el apartado anterior y con ello se

obtiene un valor de la x que es 3,652. Por lo tanto, el valor del tamaño de grano ASTM que se obtendría es de 11,62 que se va a aproximar a un valor de **N12**.

Metalografía

Tras la preparación de las probetas como se indicó en el apartado de “*Metodología y materiales*”, se han realizado los ataques químicos para la posterior captura de las micrografías a las cuatro probetas ensayadas. Todas las probetas se han atacado con Nital 4 y la probeta P830-1 ha sido atacada también con Vilella, para ver las diferencias en la representación de la estructura metalográfica que se observa.

Los ataques químicos y las posteriores inspecciones metalográficas se han realizado en el laboratorio de metodología dimensional de la ETSIDI.

Metalografía probetas templadas a 805 °C

En las Figura 84 y Figura 85 se muestran las micrografías realizadas a las probetas P805-1 y P805-2 respectivamente. En las imágenes se han marcado con círculos algunas de las estructuras martensíticas y con flechas las perlíticas.

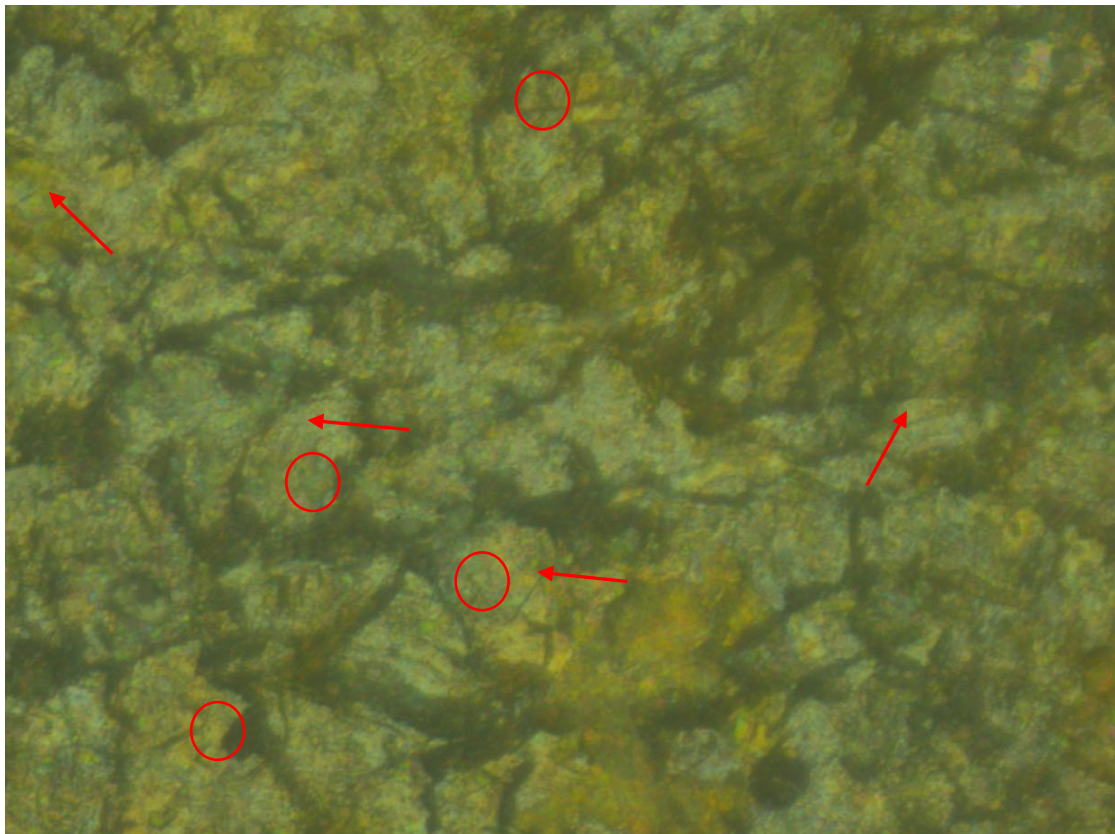


Figura 84 Micrografía probeta P805-1, hecha con Nital 4 y 1000X
Fuente: Elaboración Propia

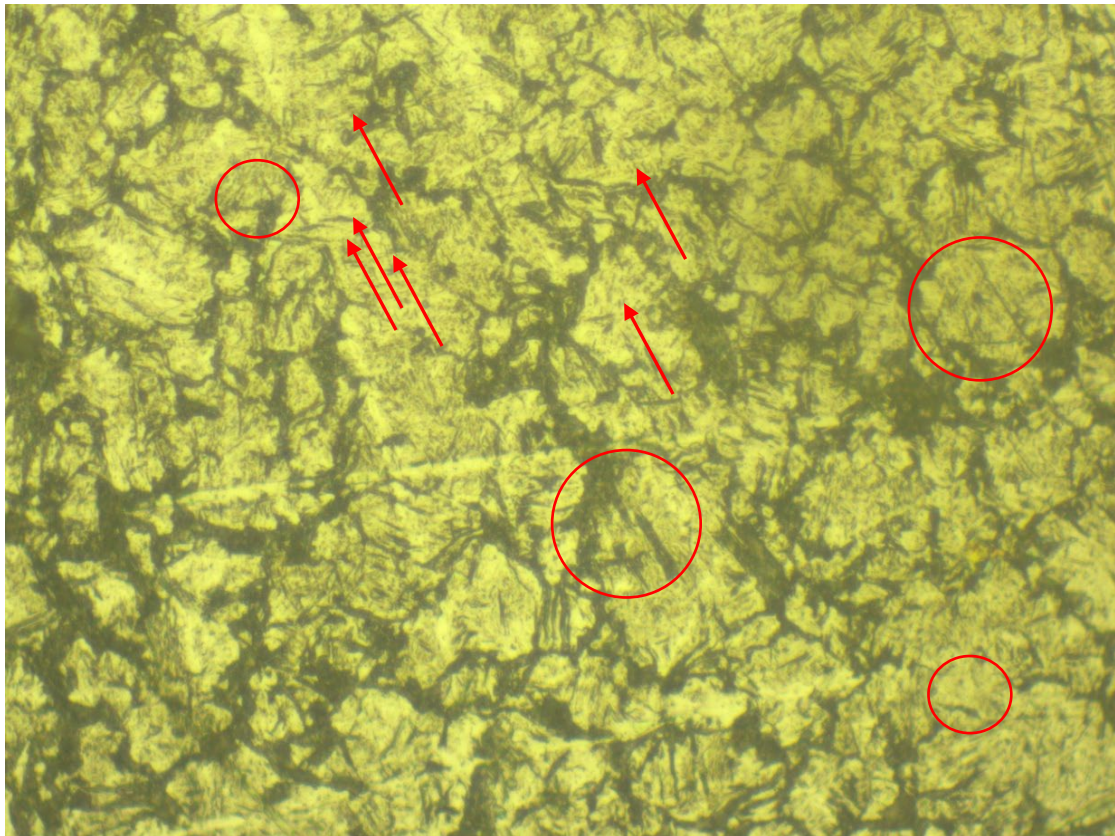


Figura 85 Micrografía probeta P805-2, hecha con Nital 4 y 1000X
Fuente: Elaboración Propia

Metalografía probetas templadas a 830 °C

En las Figura 86 y Figura 87 se muestran las micrografías realizadas a las probetas P830-1 y P830-2 mediante el ataque con Nital 4. Se han marcado con un círculo algunas de las estructuras martensíticas y con flechas las estructuras perlíticas.

La Figura 88 muestra la micrografía de la probeta P830-1 realizada con ataque químico con Vilella. A diferencia de los ataques con Nital, el ataque con Vilella muestra la estructura de una forma algo diferente. Los ataques con Nital muestran la perlita ennegrecida y la cementita blanca, con un mayor contraste en los contornos de los granos y las uniones de la ferrita. Con el ataque de Vilella no hay tanto contraste entre las estructuras y lo que más resalta en la perlita.

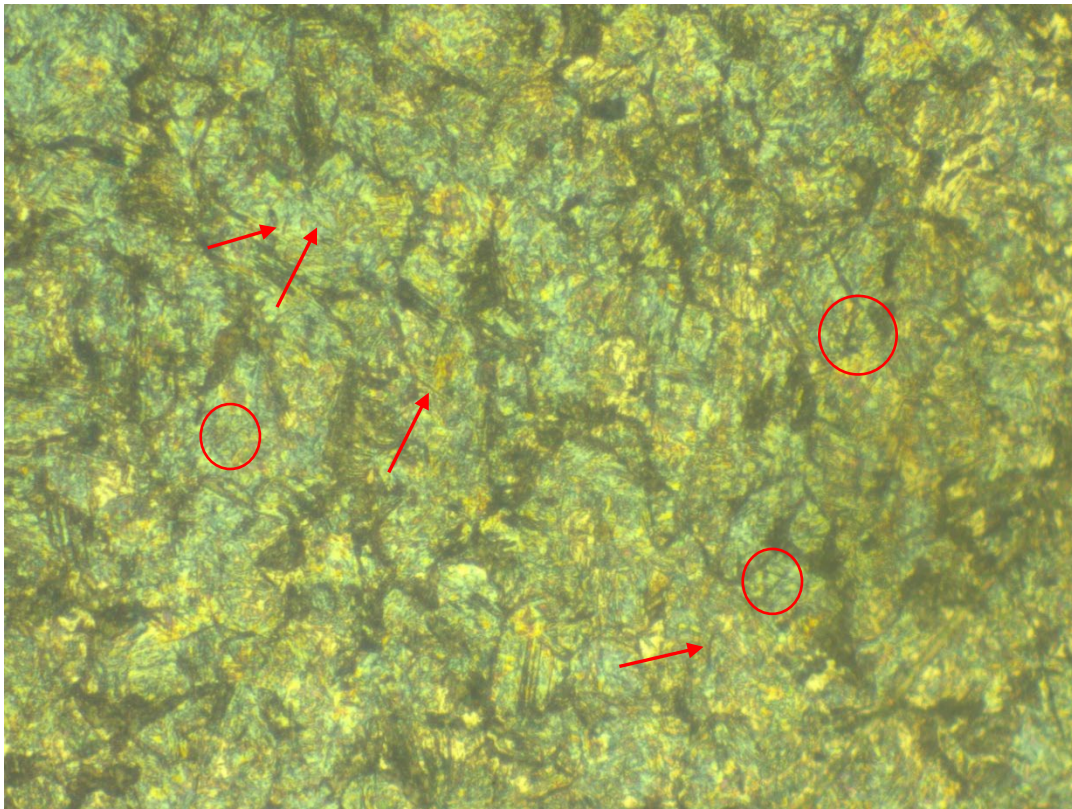


Figura 86 Micrografía probeta P830-1, hecha con Nital 4 y 500X
Fuente: Elaboración Propia

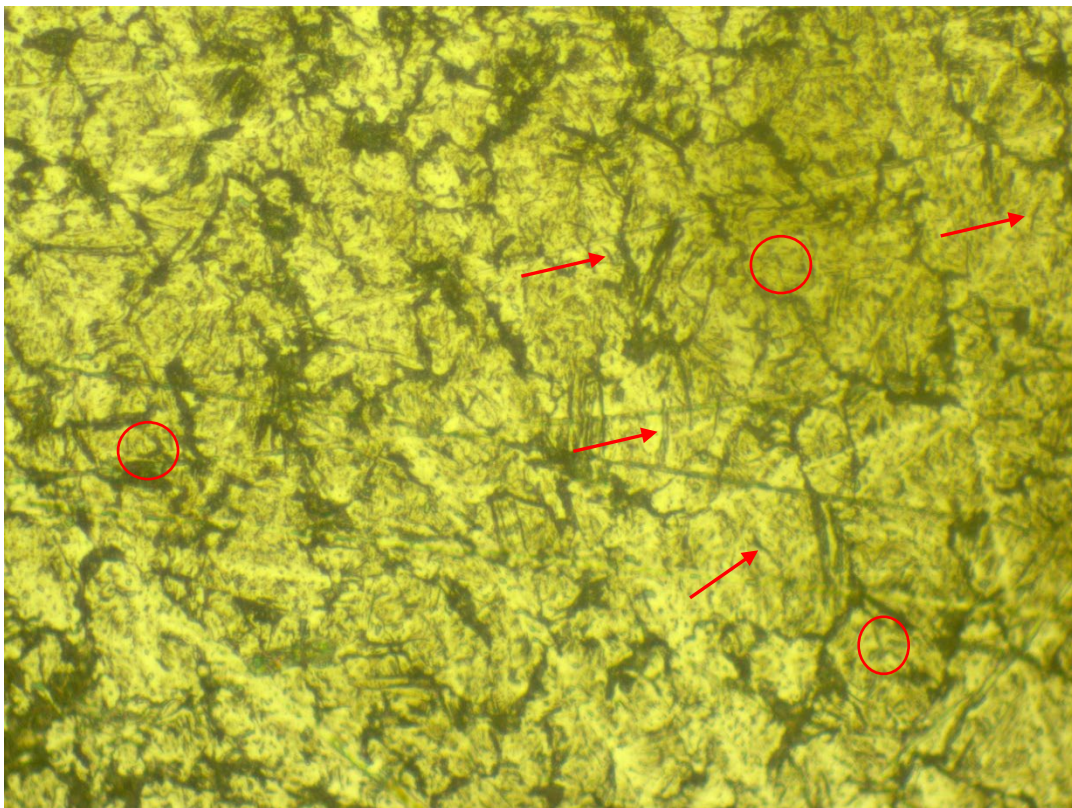


Figura 87 Micrografía probeta P830-2, hecha con Nital 4 y 1000X
Fuente: Elaboración Propia

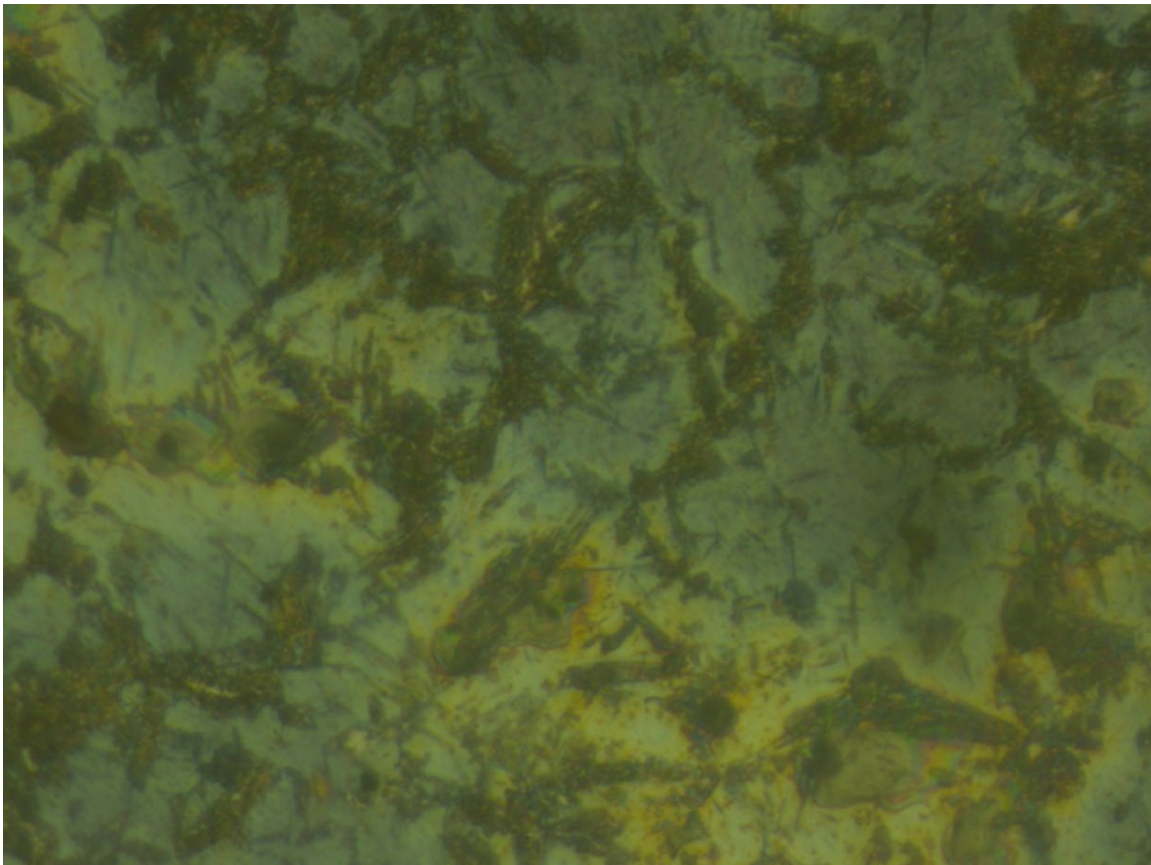


Figura 88 Micrografía probeta P830-1, hecha con Vilella y 1000X
Fuente: Elaboración Propia

Medida dureza en la sección de la longitud crítica

Después de realizadas las micrografías y aprovechando que las probetas están cortadas y preparadas se ha procedido a la medida de la dureza en la sección dónde se ha calculado la posición de la longitud crítica de cada temperatura. Comprobando así que la aproximación polinomial de la curva Jominy restituye valores de dureza en núcleo calculados teóricamente parecidos a lo medido experimentalmente. Se ha seguido el mismo proceso que en el apartado “Medida de la dureza en HRC y HV10”.

Se han medido las durezas en escala HRC y HV10 de las cuatro probetas. Los resultados se muestran en la Tabla 20.

Tabla 20 Medidas de dureza HRC y HV10 en la sección de la longitud crítica
Fuente: Elaboración Propia

	P805-1	P805-2	P805-Media	P830-1	P830-2	P830-Media
HRC	49,00	51,50	50,25	49,50	48,00	48,75
HV10	501,9	503,3	502,6	498,30	493,40	495,85

DISCUSIÓN

En este apartado se van a analizar los resultados obtenidos durante los ensayos realizados y descritos en el apartado “*Resultados*” comparándolos con la base teórica descrita en el apartado “*Metodología y materiales*”.

Probeta mal templada a 805 °C

Se realizó un ensayo de temple con una probeta a 805 °C y tras realizar el temple se comprobó que la probeta no se había montado de forma correcta. En vez de seguir el esquema de montaje indicado en la Figura 39 se montó sin la arandela entre el tornillo de fijación y la probeta, tal y como se muestra en la Figura 89.

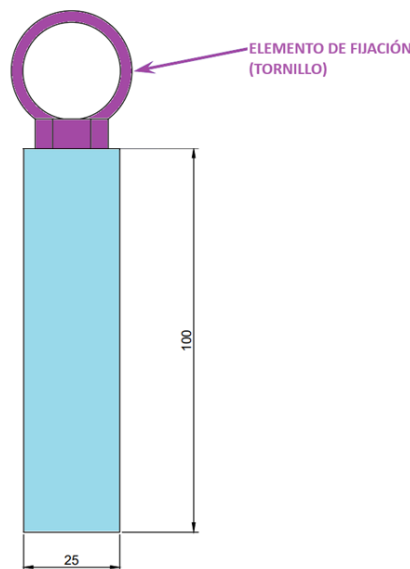


Figura 89 Esquema de montaje de la probeta mal templada, P805-fallo.
Fuente: Elaboración Propia

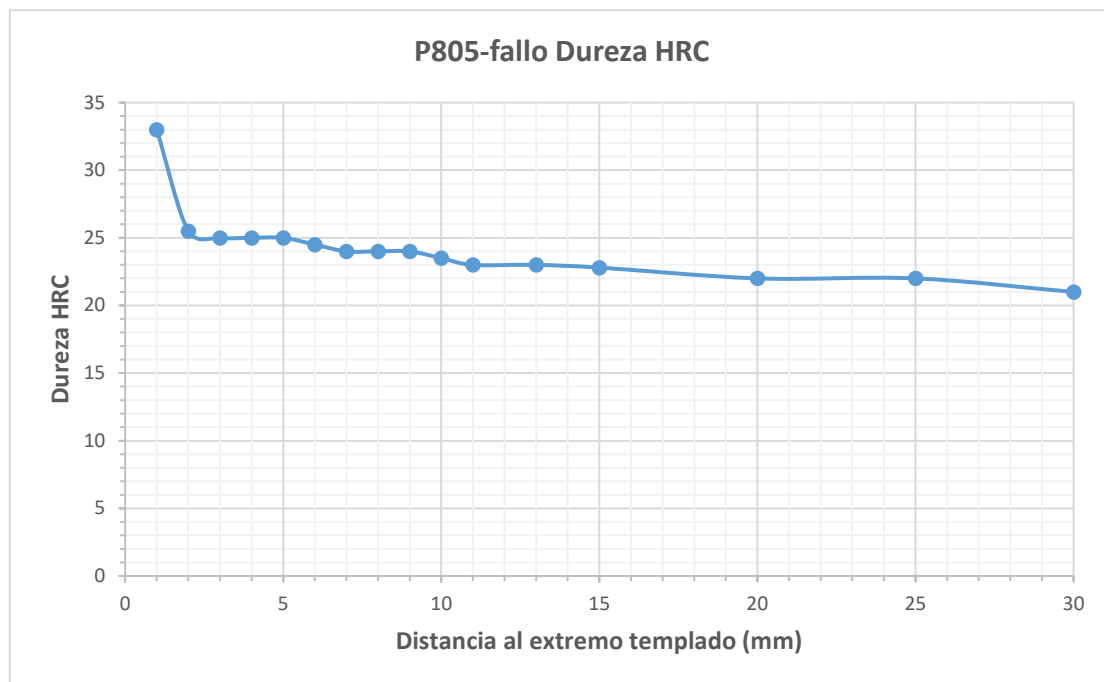
Debido a la falta de la arandela, la colocación de la probeta en el dispositivo de temple no fue realizada correctamente. La distancia entre la cara a templar de la probeta y la salida de la tobera de refrigeración no cumplía los requisitos del ensayo, ver Figura 34. El requisito para la correcta realización del ensayo de temple por el método Jominy es que la distancia entre la cara a templar de la probeta y la salida de la tobera sea de 12,5 mm. Al no tener la probeta ensayada la arandela no sólo se perdía el espesor de esta, sino que también se producía un desplazamiento mayor debido a que la anilla del tornillo de sujeción hizo tope en el dispositivo de temple varios milímetros más abajo.

A pesar de saber que la probeta se había templado de forma incorrecta se realizaron las medidas de la dureza para ver cuál es el efecto de una mala ejecución del ensayo Jominy en la templabilidad del acero.

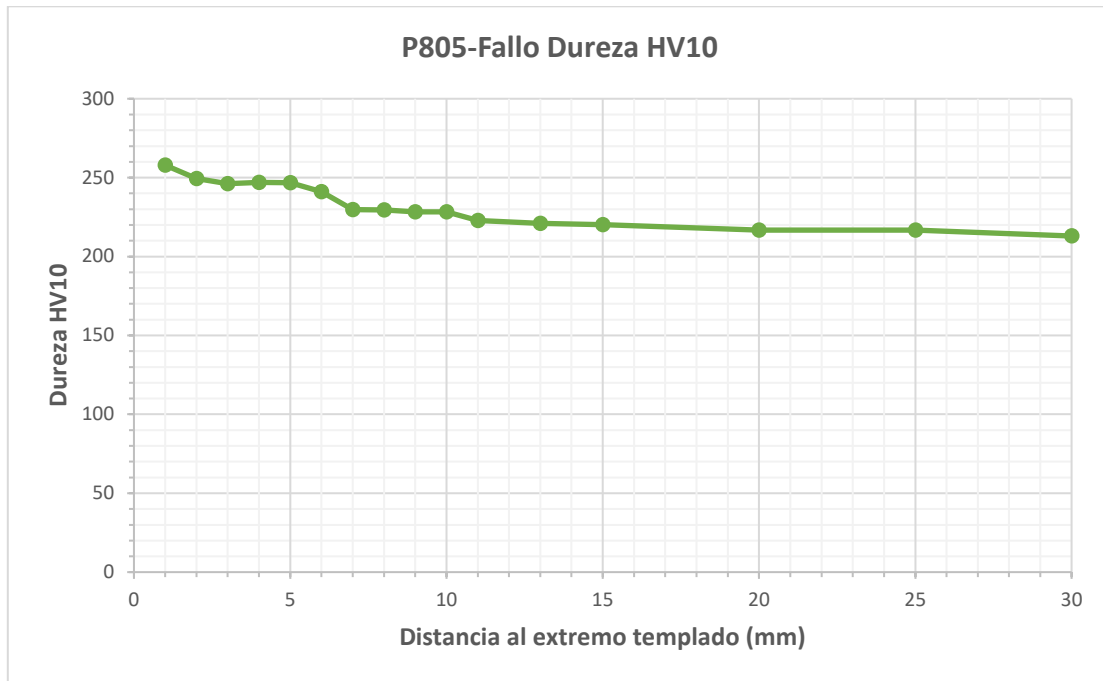
Los valores de la dureza medidos en la probeta mal templada, P805-fallo, son los que se muestran en la Tabla 21 y se representan en las Gráfica 27, Gráfica 28 y Gráfica 29.

Tabla 21 Resultados de medición de dureza en probeta P805-fallo
Fuente: Elaboración Propia

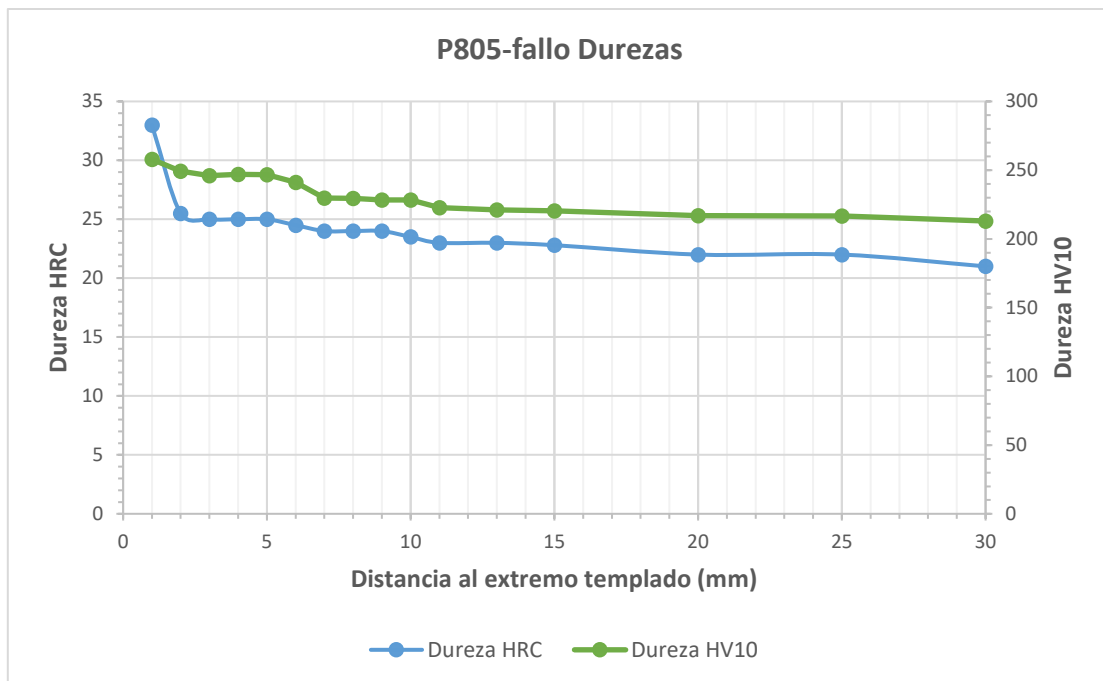
Distancia al extremo templado (mm)	Dureza HRC	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	Dureza HV10
1	33,0	268,4	268,4	257,9
2	25,5	271,4	273,9	249,4
3	25,0	271,1	277,9	246,1
4	25,0	272,6	275,4	247,0
5	25,0	274,9	273,4	246,7
6	24,5	276,8	277,8	241,1
7	24,0	282,6	285,6	229,7
8	24,0	282,0	286,3	229,6
9	24,0	283,1	286,7	228,4
10	23,5	284,6	284,6	228,4
11	23,0	288,5	288,4	222,8
13	23,0	289,1	290,2	221,0
15	22,8	291,1	289,1	220,3
20	22,0	292,9	291,9	216,8
25	22,0	292,1	292,9	216,7
30	21,0	294,8	295,3	213,0



Gráfica 27 Curva Jominy experimental de la probeta P805-fallo en dureza HRC
Fuente: Elaboración Propia



Gráfica 28 Curva Jominy experimental de la probeta P805-fallo en dureza HV10
Fuente: Elaboración Propia

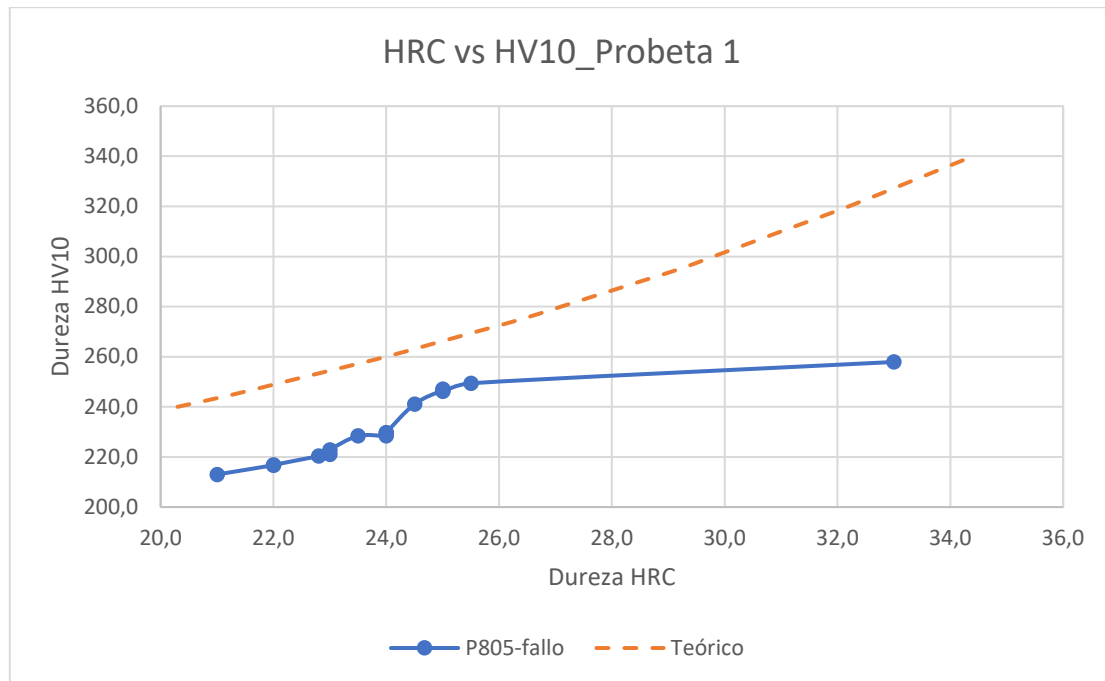


Gráfica 29 Comparativa curvas Jominy experimentales probeta P805-Fallo HRC vs HV10
Fuente: Elaboración Propia

Se ha representado también la relación entre las medidas de dureza en HRC y HV10 junto con la equivalencia teórica por la norma UNE-EN ISO 18265, representada en la Gráfica 30.

Viendo que la relación entre las medidas de dureza realizadas a la probeta P805-Fallo y lo que muestra la norma como conversión difieren mucho, surge la hipótesis de que la mala colocación de la probeta en el dispositivo de temple ha provocado que se produzca un temple

irregular. A la vista de los resultados se plantea la posibilidad de que, al no estar la probeta bien sujeta, y poder moverse en el alojamiento, la fuerza con la que incide el agua en la probeta hace que esta se mueva y se produzcan condiciones de asimetría en la proyección del agua sobre la cara de templado. Estas condiciones de asimetría darían lugar a un temple que producirá durezas diferentes en la misma referencia de distancia a la cara extrema, pero en distintas posiciones radiales de la probeta.



Gráfica 30 Comparación de las equivalencias de durezas en probeta P805-Fallo frente a la norma UNE-EN ISO 18265
 Fuente: Elaboración Propia

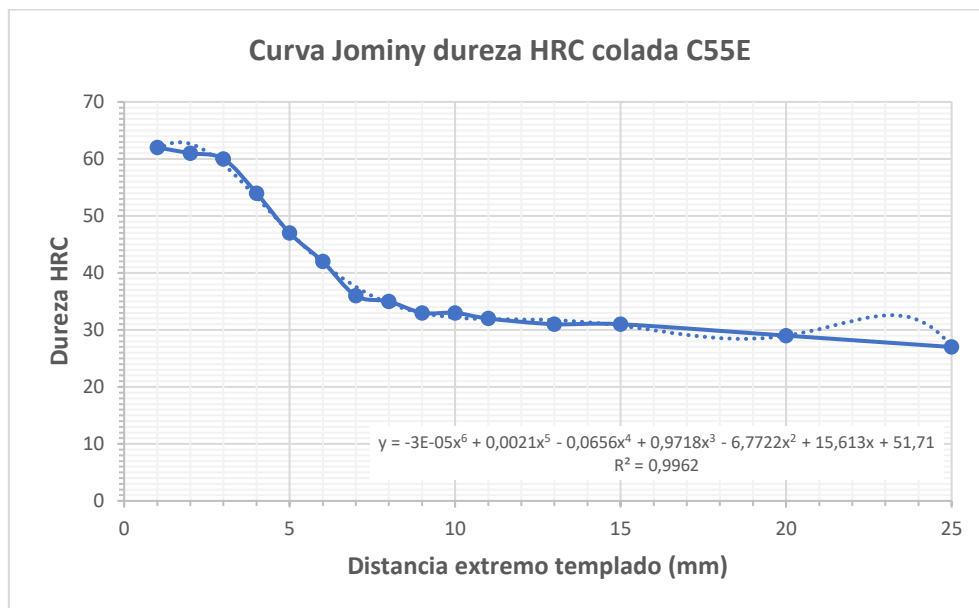
Viendo que se había producido este error durante la preparación y el temple de la probeta P805-Fallo se decidió no utilizar los resultados para el análisis de este TFG y producir una nueva probeta para completar el lote de 805 °C.

Validación del tamaño de grano del Certificado de Calidad

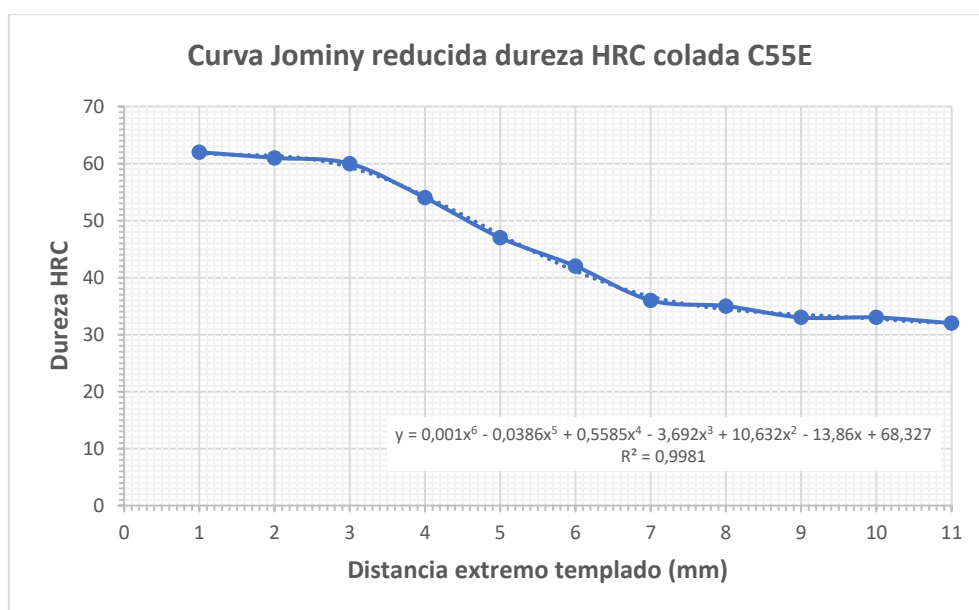
Se ha comprobado que el valor del tamaño de grano dado por el certificado de calidad, Anexo I, difiere en demasía de los valores del tamaño de grano calculados para los ensayos del TFG. Además, no es posible saber si se trata del valor del tamaño de grano del templado o del normalizado. Por ello, se ha decidido realizar el cálculo del tamaño de grano correspondiente a la curva Jominy suministrada en el certificado, Gráfica 2, y ver si el tamaño de grano que se indica (6 μm) corresponde al tratamiento térmico de normalizado o de templado.

Para el cálculo del tamaño de grano se va a seguir el mismo proceso que se ha seguido en el subapartado "Cálculo del tamaño de grano" del apartado "Resultados" para calcularlo en las probetas que se han ensayado. Los valores de la dureza para la generación de la curva Jominy

son los que se dan en el Certificado de Calidad y que se mostraron en la Tabla 11. De la tabla se comprueba que el valor de la dureza en el extremo templado es de **62 HRC**. En la Gráfica 31 se han representado los valores de la Tabla 11 junto con la línea de tendencia. Se puede ver que el comportamiento es similar al de las curvas de las probetas que se han templado por lo que se va a seguir el mismo criterio, se analizará sólo parte de la curva. En la Gráfica 32 se muestra la parte de la curva reducida que se va a analizar junto con la nueva línea de tendencia. La nueva línea de tendencia tiene una muy buena correlación con la curva experimental por lo que la confianza en la obtención del valor del punto de inflexión de forma analítica es muy alta



Gráfica 31 Curva Jominy Certificado con línea de tendencia
 Fuente: Elaboración Propia



Gráfica 32 Curva Jominy Certificado reducida con línea de tendencia
 Fuente: Elaboración Propia

Para la determinación del punto de inflexión hay que analizar la gráfica representada por la curva dada en la expresión (19). Hay que igualar su segunda derivada a 0 y resolver el valor de la "x" que hace que eso se produzca. En la expresión (20) se muestra esta condición y el valor de la "x" que hace que esto se produzca.

$$y = 0,001x^6 - 0,0386x^5 + 0,5585x^4 - 3,692x^3 + 10,632x^2 - 13,86x + 68,327 \quad (19)$$

$$0,03x^4 - 0,772x^3 + 6,702x^2 - 22,152x + 21,264 = 0 \rightarrow x = 4,85 \quad (20)$$

Sustituyendo este valor en la ecuación de la curva, expresión (19), se obtiene el valor de la dureza en el núcleo. El valor que se obtiene para la dureza en el núcleo es de **48,45 HRC**.

El siguiente paso es calcular con la expresión (21) el valor del divisor, que es **1,27**.

$$Div = \frac{D_e}{D_n} = \frac{62}{48,45} = 1,27 \quad (21)$$

A partir del diámetro de la probeta se obtiene el diámetro crítico ideal modificado para lo que se usa la gráfica G5 del Anexo II. Con el diámetro de la probeta, 25 mm, y la severidad del temple del agua, que es $H=1 \text{ cm}^{-1}$, se obtiene un valor de **44 mm**.

Con este último dato se puede obtener la longitud crítica modificada utilizando la gráfica G6. El calor que se obtiene de la longitud crítica es aproximadamente de **4,8 mm**.

Con el valor del divisor y de la longitud crítica modificada se obtiene, mediante la gráfica G4, el valor del diámetro crítico ideal. Se ha interpolado en la gráfica y se ha obtenido un valor de la longitud crítica modificada de **39,38 mm**.

Una vez se ha calculado el valor del diámetro crítico, se ha de calcular el diámetro crítico sin aleantes utilizando. Siguiendo el mismo proceso que en los apartados de referencia el diámetro crítico sin aleantes que se obtiene es de **4,87 mm**.

Como en el caso de las muestras realizadas, el valor del diámetro crítico obtenido no tiene una equivalencia en la gráfica G2 para obtener el tamaño de grano. Se va a seguir la metodología que se aplicó en el cálculo del tamaño de grano de las probetas que se han ensayado. Sustituyendo en la expresión (13) se obtiene un valor de $x = 1,973$. Por lo tanto, el valor del tamaño de grano ASTM sería de 9,97, que se va a aproximar a **N10**.

El valor del tamaño de grano difiere del indicado en el certificado de calidad, que tiene un valor de 6. Esto hace suponer que el valor que se indica en el certificado de calidad es el que corresponde con la condición de entrega del lote, el normalizado, y no con la condición después del ensayo Jominy. Además, hay que tener en cuenta que no se dispone de la información de

como se ha realizado el ensayo Jominy, la temperatura de temple utilizado, y que puede afectar al tamaño de grano.

Actualización de la Curva Jominy Teórica

En el apartado anterior se ha calculado el tamaño de grano de la probeta del ensayo Jominy que el fabricante realiza a la colada del material que se ha utilizado en la realización de los ensayos de este TFG. Cuando se calculó la curva Jominy Teórica se utilizó como valor del tamaño de grano el que venía reflejado en el certificado de calidad del lote, Anexo I, cuyo valor es 6. Este valor afecta al resultado de la curva Jominy Teórica y es por ello por lo que se va a recalcular esta para utilizarla como referencia en los análisis de resultados de los ensayos realizados en el TFG. El proceso que se va a seguir para la determinación de la curva Jominy Teórica será el mismo que se empleó anteriormente en el apartado “*Determinación teórica de la curva Jominy*” por lo que no se indicará de nuevo.

El primer paso para la determinación de la curva Jominy no varía con el cambio en el tamaño de grano, la dureza teórica aproximada es de **63,2 HRC**.

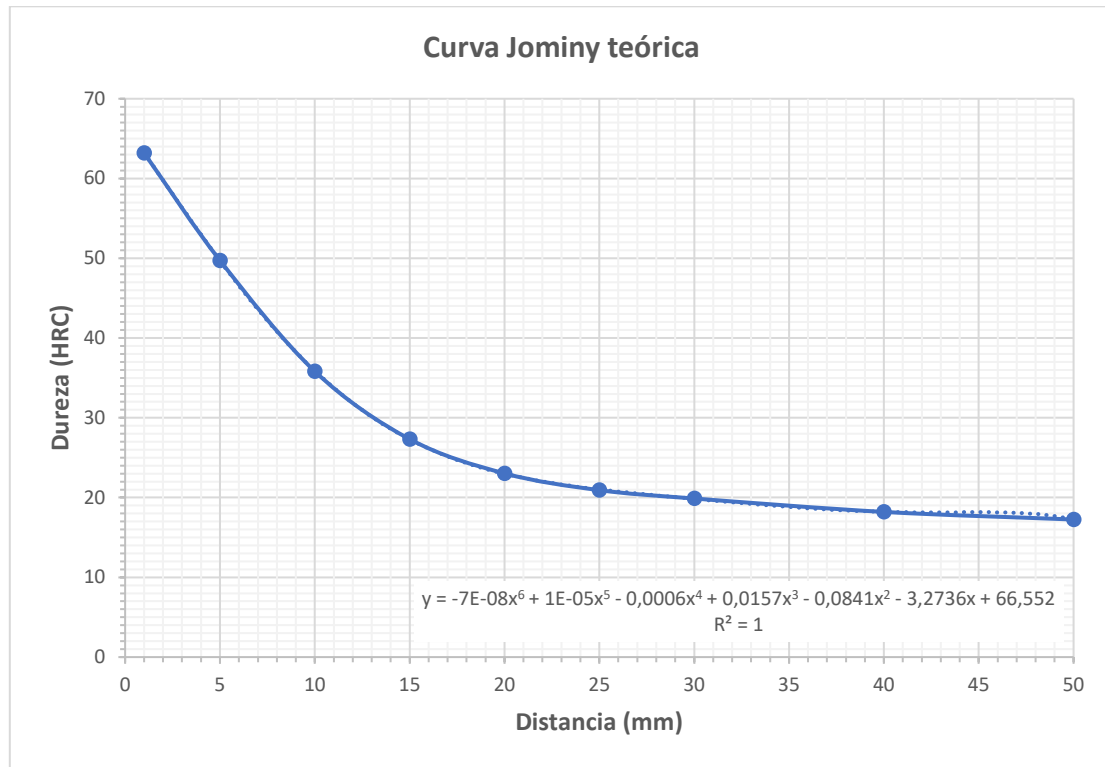
Para la determinación del diámetro crítico ideal se tiene en cuenta que la curva G2 no cubre el tamaño de grano N10 que se ha obtenido. Es por ello por lo que se va a proceder aplicando el mismo criterio que se ha seguido para el cálculo del tamaño de grano. Basándose en la expresión (12), tomando como valores el \varnothing_{N8} y el valor de la x (que se tomará como 2, al considerar que el tamaño de grano es N10 y la referencia es N8), se puede obtener el valor del $\varnothing_{\text{Calculado}}$, que es el valor del diámetro crítico sin aleantes para tamaño de grano y % de carbono. El resultado que da es **4,86 mm**.

Los factores correctores no van a verse afectados y se utilizarán los de la Tabla 12. Si se sustituye en la expresión (4) se obtendrá el valor del diámetro crítico con aleantes. Este valor es ahora **39,26 mm**.

Con estos valores se han vuelto a calcular las durezas y los divisores. Posteriormente se han calculado las durezas en cada una de las posiciones. Los valores se muestran en la Tabla 22 y se ha representado de forma gráfica en la Gráfica 33.

Tabla 22 Determinación de los valores HRC de la curva Jominy teórica con el tamaño de grano actualizado
Fuente: Elaboración Propia

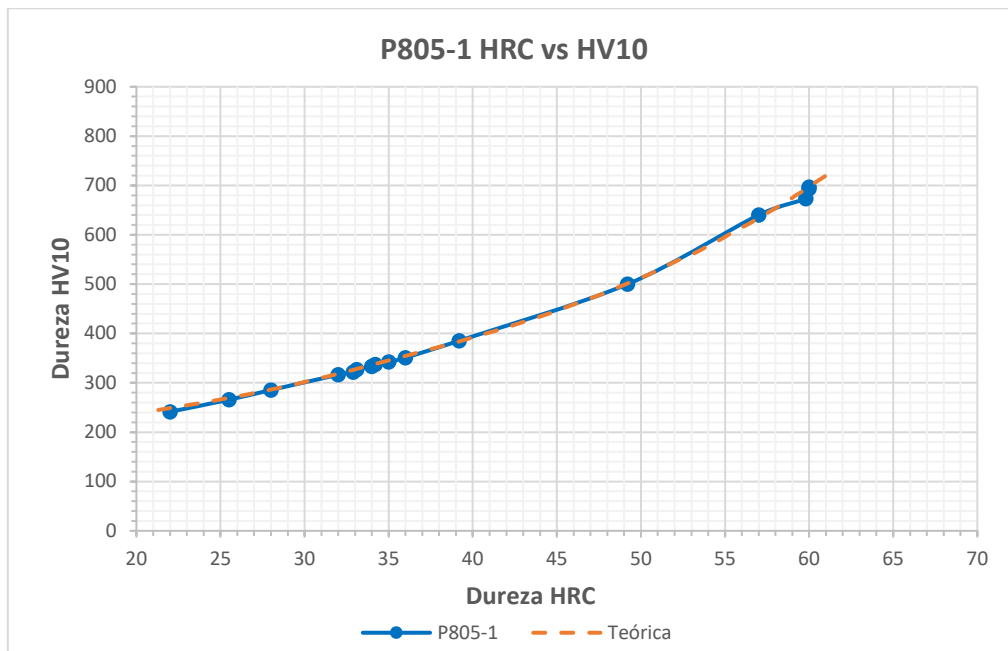
Distancia (mm)	1	5	10	15	20	25	30	40	50
Divisores	1,00	1,27	1,76	2,31	2,74	3,02	3,18	3,47	3,66
Durezas (HRC)	63,2	49,7	35,8	27,3	23,0	20,9	19,9	18,2	17,2



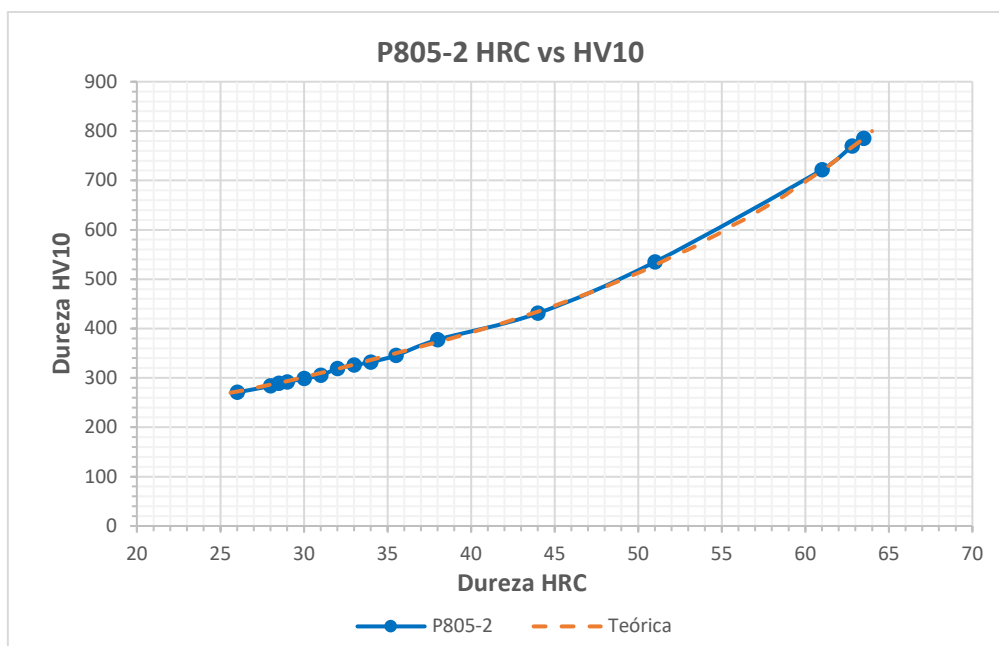
Gráfica 33 Curva Jominy teórica acero C55E con tamaño de grano actualizado
Fuente: Elaboración Propia

Análisis probetas templadas a 805 °C

El primer punto que se va a analizar es la correlación entre las medidas de dureza realizadas, tanto en HRC como en HV10, con la conversión de durezas que se hace mediante la norma UNE-EN ISO 18265. Para ello se han representado en sendos gráficos los valores de la curva de durezas obtenidas para cada punto de medida con la curva de equivalencias de durezas que se preparó en la Gráfica 1. Las Gráfica 34 y Gráfica 35 muestran las comparaciones.



Gráfica 34 Comparación de las equivalencias de durezas en probeta P805-1 frente a la norma UNE-EN ISO 18265
Fuente: Elaboración Propia

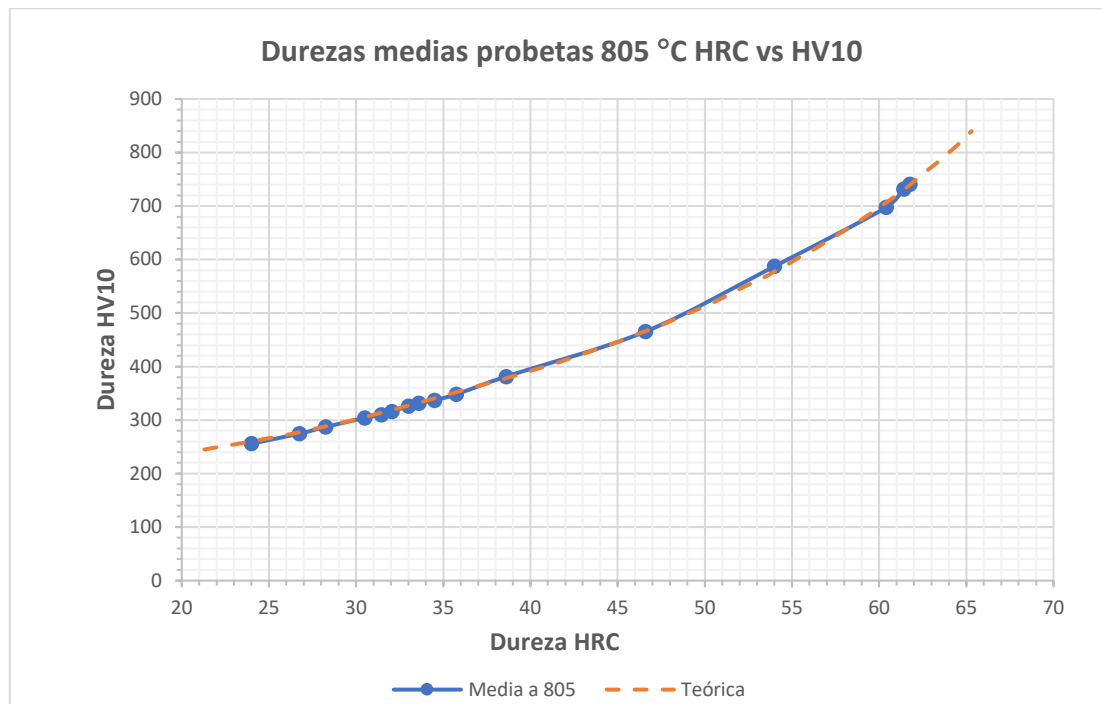


Gráfica 35 Comparación de las equivalencias de durezas en probeta P805-2 frente a la norma UNE-EN ISO 18265
Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 23 se muestran los valores medios de las durezas HRC y HRV10 de las probetas templadas a 805 °C. Estos valores medios se han representado en la Gráfica 36.

Tabla 23 Resumen durezas probetas templadas a 805 °C
Fuente: Elaboración Propia

Distancia (mm)	Dureza HRC			Dureza HV10		
	P805-1	P805-2	P805-Media	P805-1	P805-2	P805-Media
1	60,0	63,5	61,75	696,6	785,4	741,00
2	60,0	62,8	61,40	693,6	769,8	731,70
3	59,8	61,0	60,40	673,3	721,6	697,45
4	57,0	51,0	54,00	640,1	534,8	587,45
5	49,2	44,0	46,60	499,9	431,1	465,50
6	39,2	38,0	38,60	385,4	377,4	381,40
7	36,0	35,5	35,75	351,0	345,5	348,25
8	35,0	34,0	34,50	342,1	332,1	337,10
9	34,2	33,0	33,60	337,5	326,2	331,85
10	34,0	32,0	33,00	333,3	319,1	326,20
11	33,1	31,0	32,05	326,9	305,1	316,00
13	32,9	30,0	31,45	321,5	298,6	310,05
15	32,0	29,0	30,50	316,2	291,7	303,95
20	28,0	28,5	28,25	285,4	289,0	287,20
25	25,5	28,0	26,75	265,7	283,6	274,65
30	22,0	26,0	24,00	241,3	270,7	256,00



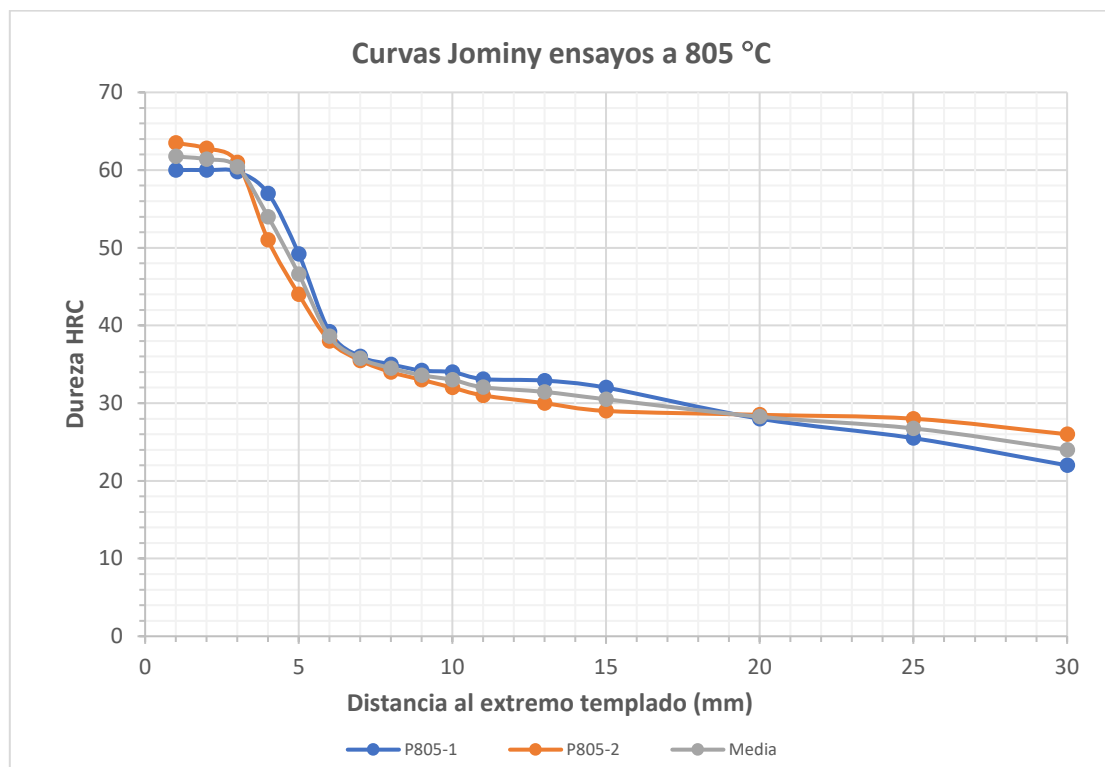
Gráfica 36 Comparación de las equivalencias de durezas en probetas templadas a 805 °C frente a la norma UNE-EN ISO 18265
Fuente: Elaboración Propia

En las gráficas se comprueba que la correlación entre los valores de medidas realizados mediante el método de ensayo Rockwell C y el Vickers 10 y las equivalencias que da la norma UNE-EN ISO 18265 es muy buena, tanto para los especímenes individuales como con la media de la serie. La conversión de las durezas teórica y las medidas experimentales realizadas para este TFG coinciden. Esto lleva a pensar que tanto la realización del temple de ambas probetas como el registro de las medidas de dureza por los dos métodos se han realizado de forma correcta.

Como se ha comprobado que la correlación entre las medidas HRC y HV10 es buena, a partir de ahora todos los análisis se realizarán únicamente en HRC, ya que de la curva teórica y de la referida en el Certificado de Calidad sólo se tiene información en esta escala de dureza. No se realiza transformación de dureza HRC a HV10 para no arrastrar errores de las conversiones.

Se van a comparar los resultados obtenidos en los ensayos con la curva Jominy teórica calculada y con la suministrada por el proveedor del acero. La curva Jominy teórica que se va a utilizar es la calculada con el tamaño de grano N11 y que se obtuvo en el apartado “Actualización de la Curva Jominy Teórica”.

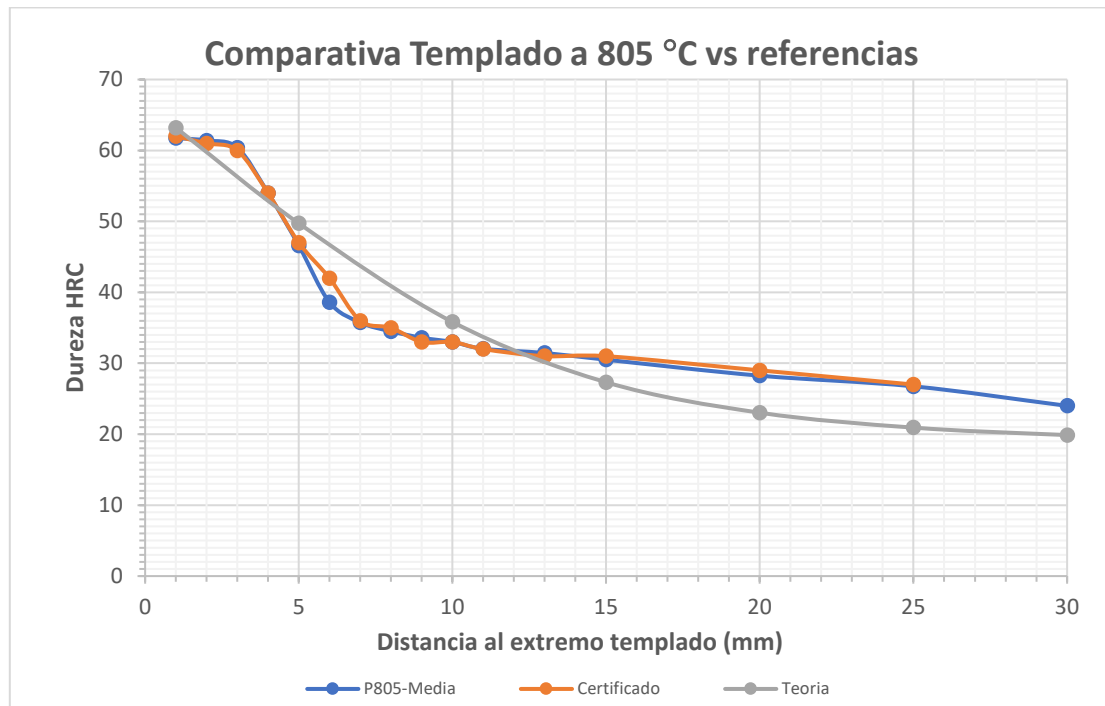
De los datos procedentes de las tablas Tabla 14, Tabla 15 y Tabla 18 se ha generado la Gráfica 37 que muestra una comparación de las curvas Jominy de cada una de las probetas templadas a 805 °C y la media de ambas.



Gráfica 37 Comparación de curvas Jominy de los ensayos a 805 °C
Fuente: Elaboración Propia

En dicha gráfica se ve que las curvas de las dos probetas templadas a 805 °C son muy similares y, por ello, la media de ambas curvas es representativa del lote. Por ello, se puede considerar que la curva de los valores medios es válida para continuar con los análisis que se van a realizar.

En la Gráfica 38 se ha representado la curva Jominy media de las probetas templadas a 805 °C junto con la curva Jominy teórica calculada y la procedente del certificado de calidad. Los valores para representar estas curvas se han sacado de las Tabla 11, Tabla 18 y Tabla 22.



Gráfica 38 Comparación de curvas Jominy del ensayo a 805 °C con la teórica y la del control de calidad.
Fuente: Elaboración Propia

A la vista de la representación de las tres curvas se puede ver cómo las curvas Jominy media y la curva Jominy procedente del Certificado de Calidad son muy iguales. La curva Jominy Teórica difiere bastante de las experimentales. Por una parte, el número de puntos de paso de la curva teórica es menor que en las experimentales, se utilizan puntos de paso más espaciados en la parte próxima de la probeta, lo que hace que la curva sea mucho más suave en esa zona.

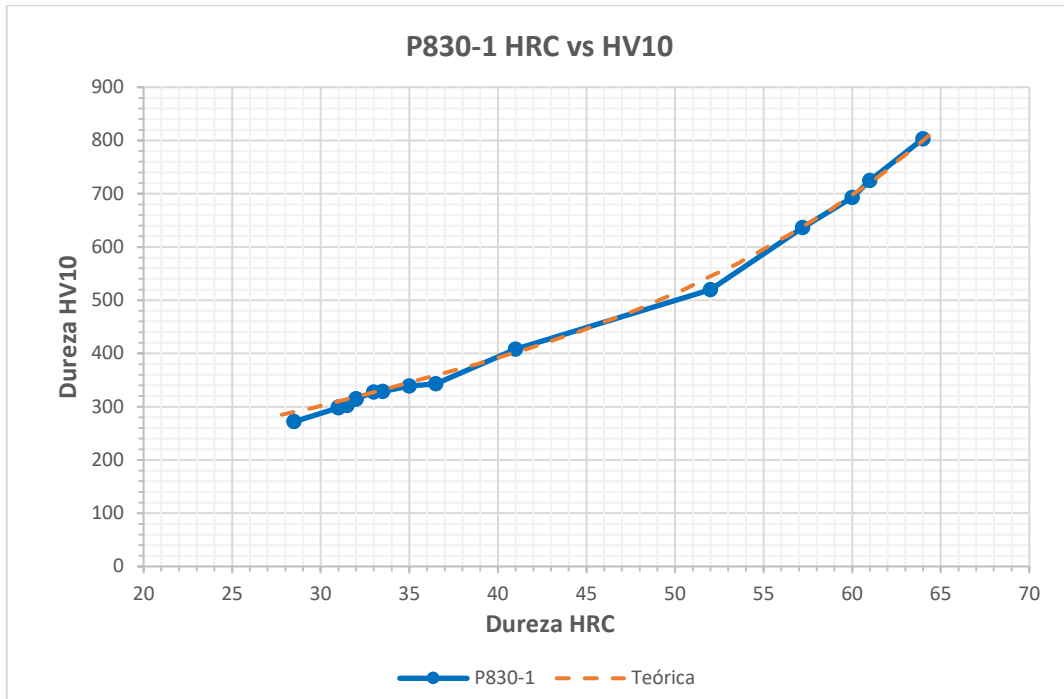
El punto de dureza máximo, en el extremo, tiene una buena correlación entre los casos experimentales y los teóricos. Los valores hasta una distancia de 10 mm también tienen una buena correlación en los tres casos siendo a partir de los 15 mm donde se produce una mayor diferencia entre los valores experimentales y los teóricos.

De las curvas se desprende que la templabilidad en los casos experimentales, cuando se trata de distancias más alejadas del extremo templado, es mayor que en la curva Jominy Teórica. Las dos curvas experimentales, la del ensayo a 805 °C y la del Certificado de Calidad, muestran un mismo comportamiento en todo el rango de distancias al extremo templado.

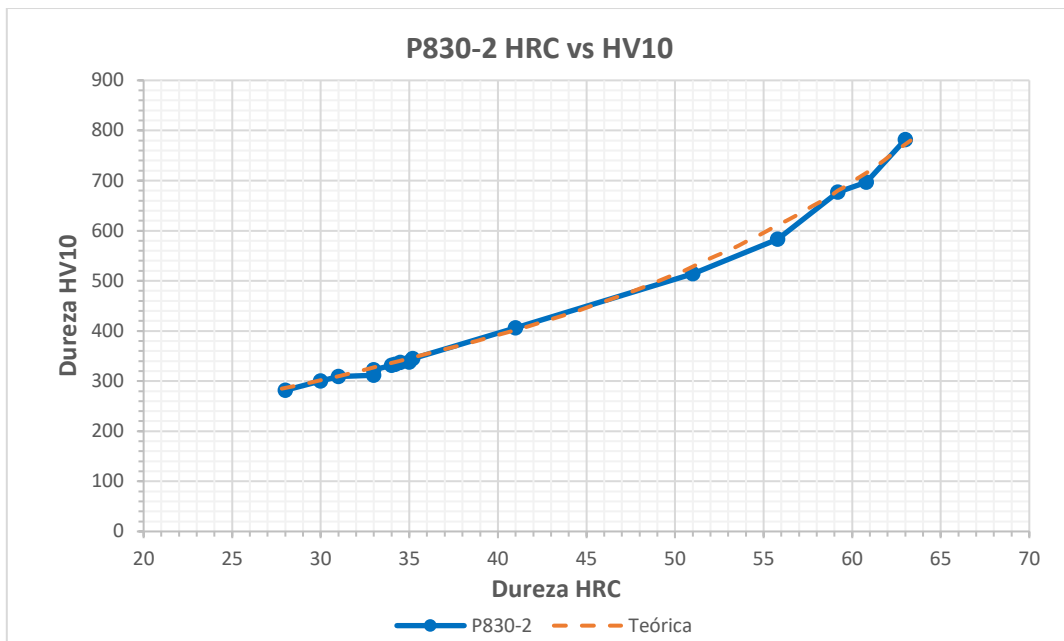
A la vista de la Gráfica 38, se puede desprender que la curva Jominy Teórica da buenos resultados de dureza máxima de la probeta y de templabilidad a distancias cercanas a la cara de temple. Sin embargo, la referencia de templabilidad a distancias mayores a los 10 o 15 mm desde el extremo templado son menores que en los ensayos realizados. Lo que es evidente, es que la curva experimental es, en esos rangos de medida, conservativa con respecto a los valores que se han alcanzado en los experimentos realizados (tanto en el templado hecho en este TFG como en el templado hecho por el Control de Calidad de la colada).

Análisis probetas templadas a 830 °C

Como en las probetas templadas a 805 °C, lo primero es comparar los resultados de durezas HRC y HV10 medidas en las probetas con relación a la equivalencia que da la norma UNE-EN ISO 18265. Las Gráfica 39 y Gráfica 40 muestran los resultados obtenidos para las probetas templadas a 830 °C.



Gráfica 39 Comparación de las equivalencias de durezas en probeta P830-1 frente a la norma UNE-EN ISO 18265
Fuente: Elaboración Propia

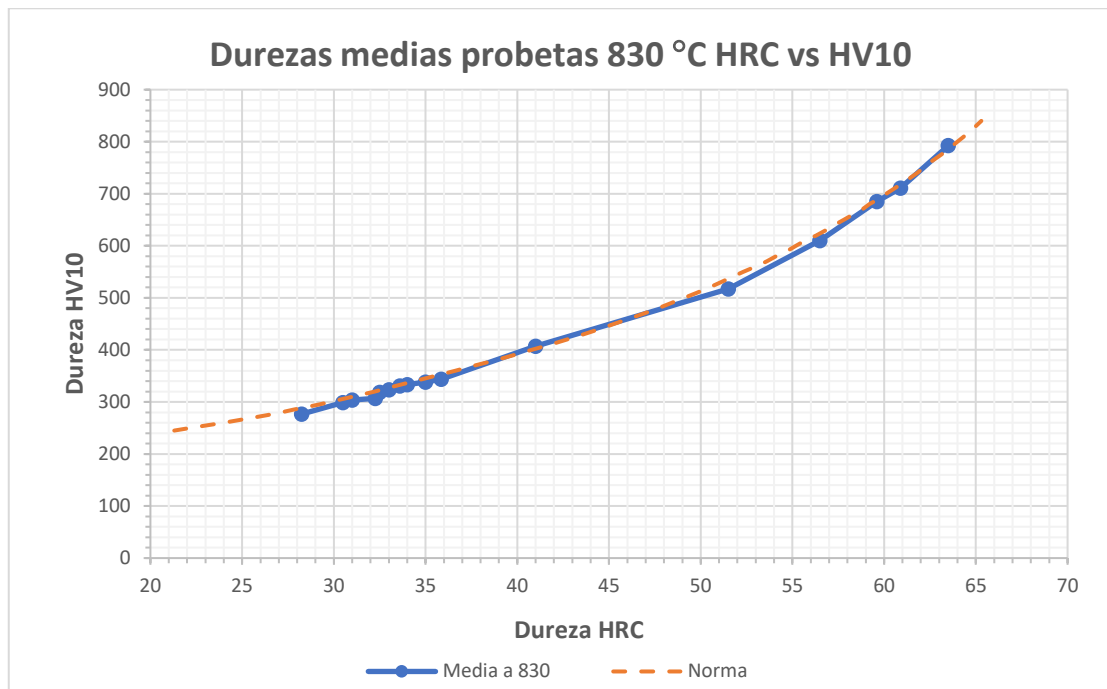


Gráfica 40 Comparación de las equivalencias de durezas en probeta P830-2 frente a la norma UNE-EN ISO 18265
Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 24 se muestran los valores medios de las durezas HRC y HV10 de las probetas templadas a 830 °C. Estos valores medios se han representado en la Gráfica 41.

Tabla 24 Resumen durezas probetas templadas a 830 °C
Fuente: Elaboración Propia

Distancia (mm)	Dureza HRC			Dureza HV10		
	P830-1	P830-2	P830-Media	P830-1	P830-2	P830-Media
1	64,0	63,0	63,5	803,1	781,9	792,5
2	61,0	60,8	60,9	724,8	697,1	711,0
3	60,0	59,2	59,6	692,8	677,0	684,9
4	57,2	55,8	56,5	636,7	583,3	610,0
5	52,0	51,0	51,5	519,6	514,2	516,9
6	41,0	41,0	41,0	407,7	406,2	407,0
7	36,5	35,2	35,9	343,1	344,8	344,0
8	35,0	35,0	35,0	338,8	337,7	338,3
9	33,5	34,5	34,0	328,7	337,5	333,1
10	33,0	34,2	33,6	327,7	333,5	330,6
11	32,0	34,0	33,0	314,8	331,6	323,2
13	32,0	33,0	32,5	314,4	322,2	318,3
15	31,5	33,0	32,3	302,1	311,6	306,9
20	31,0	31,0	31,0	298,9	308,8	303,9
25	31,0	30,0	30,5	297,8	299,9	298,9
30	28,5	28,0	28,3	271,9	281,7	276,8

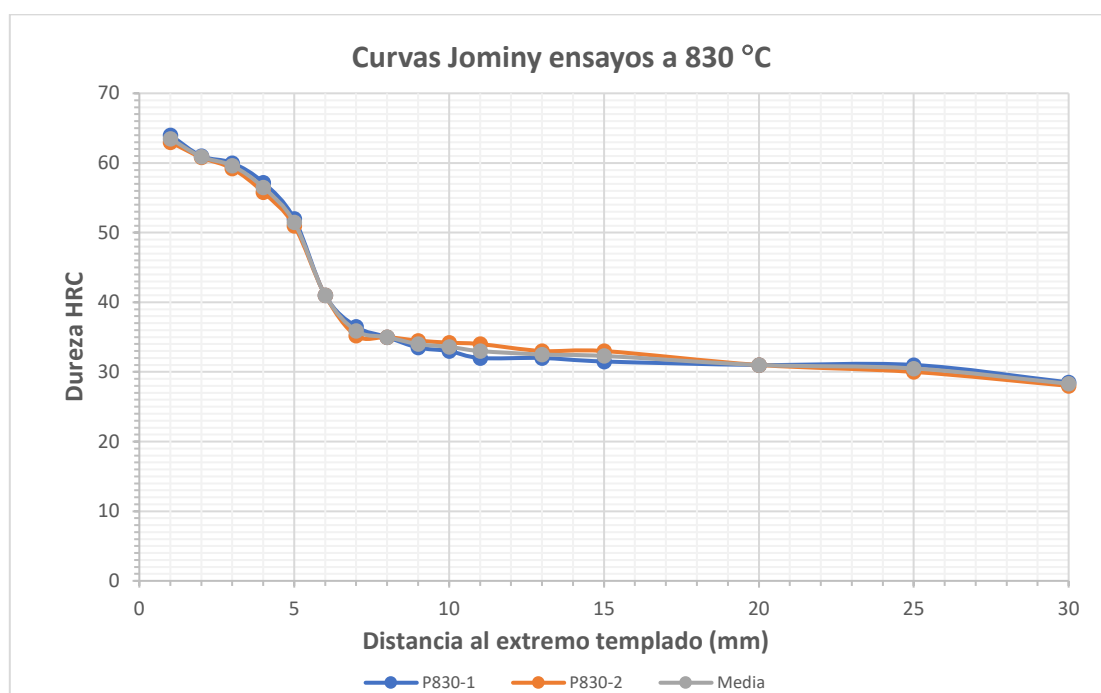


Gráfica 41 Comparación de las equivalencias de durezas en probetas templadas a 830 °C frente a la norma UNE-EN ISO 18265

Fuente: Elaboración Propia

Aunque en este caso hay una mayor diferencia entre los valores de los ensayos con los de la curva de equivalencia teórica, se pueden dar por buenos los resultados y se considera que tanto el templado de las probetas como la realización de las medidas de dureza se han realizado correctamente.

Se ha representado en la Gráfica 42 los valores de las curvas Jominy de las dos probetas junto con la media. Los valores para realizar las gráficas se han obtenido de las Tabla 16, Tabla 17 y Tabla 19



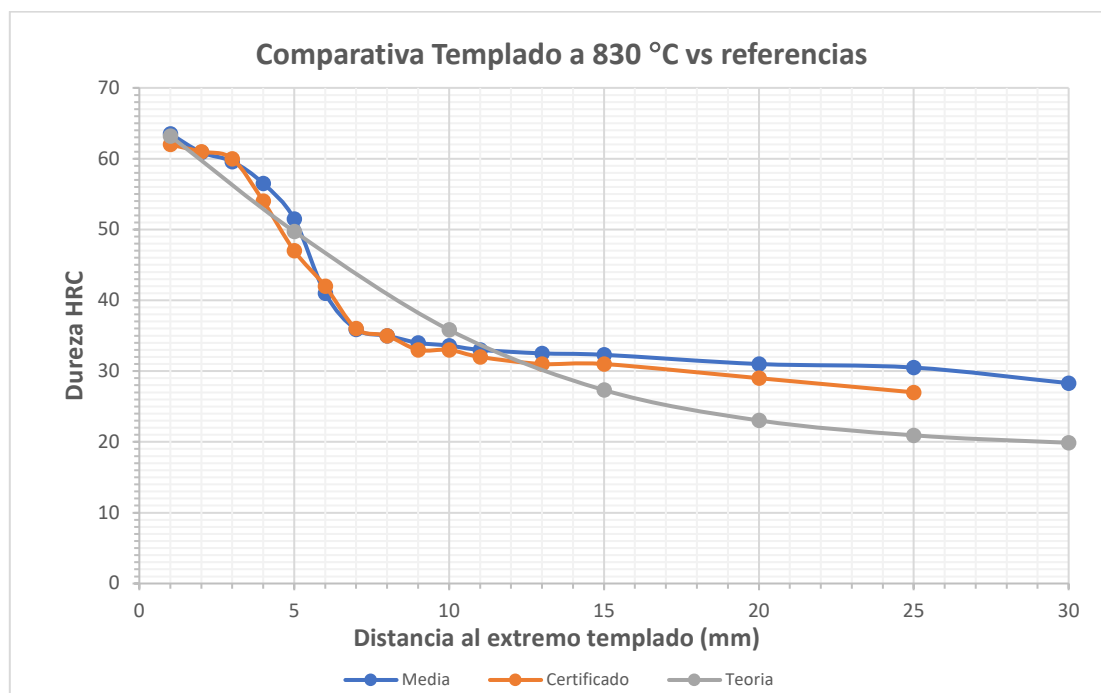
Gráfica 42 Comparación de curvas Jominy de los ensayos a 830 °C
Fuente: Elaboración Propia

En el caso de las probetas templadas a 830 °C las curvas Jominy son aún más similares que en las templadas a 805 °C, lo que muestra una correcta ejecución del temple y una buena repetitividad. La curva Jominy media es totalmente representativa del lote de templado.

Al igual que en el caso anterior, la Gráfica 43 muestra la comparación de la curva Jominy media del ensayo junto con la del Certificado de Calidad y la Teórica. Los datos para realizar estas gráficas se han obtenido de las Tabla 11, Tabla 19 y Tabla 22.

Analizando las curvas, se ve cómo la curva Jominy de templado a 830 °C tiene una mayor templabilidad que la dada en el Certificado de Calidad. Esta mayor templabilidad se muestra en que los valores de dureza obtenidos en los templados a 830 °C a partir de los 10mm de distancia a la cara templada son mayores que en la curva Jominy del certificado. También se produce este efecto en los valores comprendidos entre aproximadamente 3 y 6 mm. No se puede decir que

la diferencia sea excesiva, pero se ve una tendencia en el comportamiento de la probeta al templeado.



Gráfica 43 Comparación de curvas Jominy del ensayo a 830 °C con la teórica y la del control de calidad.
Fuente: Elaboración Propia

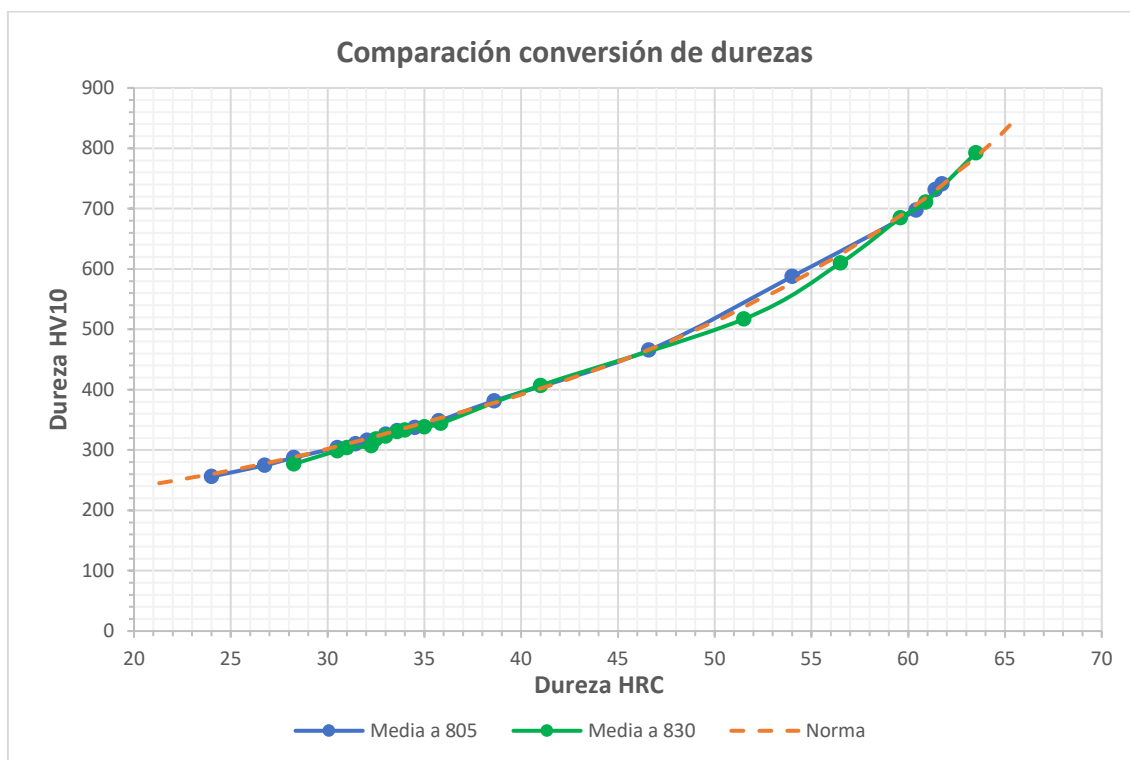
Como en el caso de las probetas templadas a 805 °C, la curva teórica muestra el mismo comportamiento relativo a las curvas experimentales. Las curvas experimentales tienen un comportamiento similar en todo el rango de distancias al extremo templado, pero muestran ligeras diferencias de templabilidad. En el caso de las probetas templadas a 830 °C la curva Jominy media tiene valores ligeramente superiores a la curva del Certificado de Calidad en gran parte de su trazado. Además, todas las curvas Jominy obtenidas muestran que el acero templado posee una alta capacidad de temple debido al alto valor de dureza en el extremo templado.

Análisis de la conversión de durezas según UNE-EN ISO 18265

De los valores de las Tabla 23 y Tabla 24, que muestran las equivalencias medias de las medidas realizadas en las probetas ensayadas, y la información de la Gráfica 1, se ha generado la Gráfica 44 que compara las equivalencias de durezas teóricas según la norma UNE-EN ISO 18265 frente a los resultados obtenidos experimentalmente en este TFG.

Como se indicó en el apartado anterior, las probetas templadas a 830 °C tienen un comportamiento ligeramente diferente al que se muestra en la conversión según la norma. Sin embargo, las equivalencias de medidas para las probetas templadas a 805 °C son prácticamente iguales a las de la norma.

Viendo los resultados, se podría pensar que hay cierta incertidumbre en el proceso de templeado a 830 °C o en la toma de las medidas de dureza en el entorno de los 2 mm y los 6 mm de la probeta. Para el resto de los valores la equivalencia de las medidas experimentales en esta probeta coincide con los de la norma.



Gráfica 44 Comparación durezas medias frente a la conversión de durezas de la norma UNE-EN ISO 18265
Fuente: Elaboración Propia

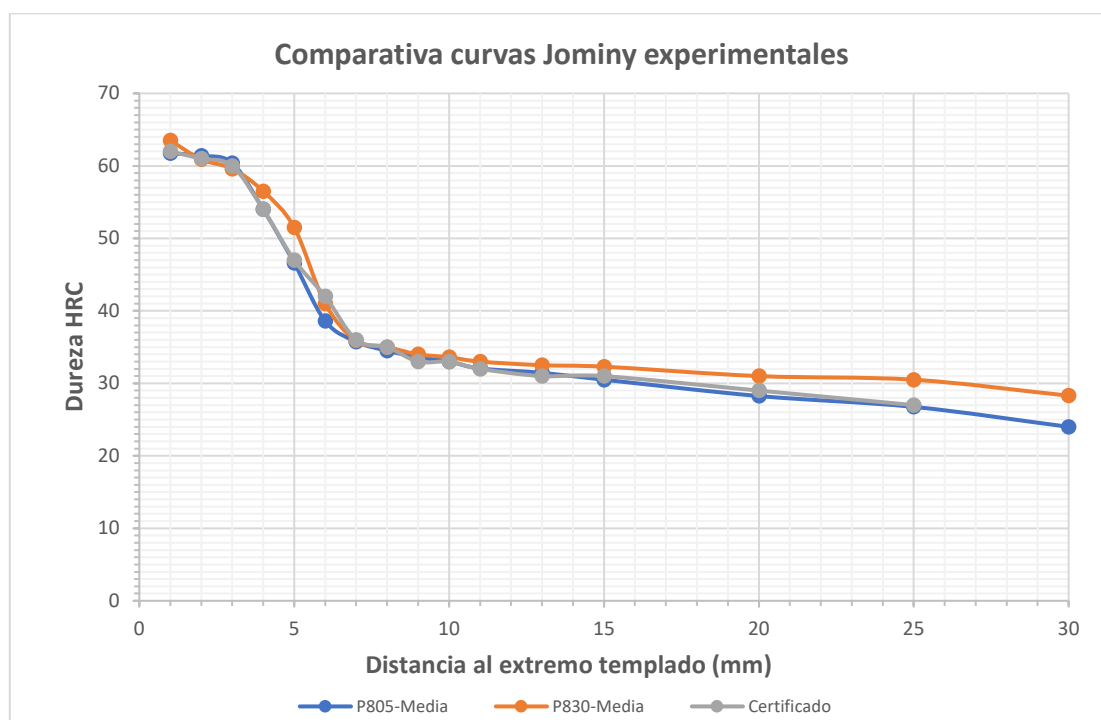
A parte de esa pequeña desviación en el caso de los valores de la probeta de 830 °C, se puede considerar que las equivalencias de medidas de dureza en las escalas Rockwell C y Vickers 10 tomadas durante la realización de los ensayos y las equivalencias dadas por la norma UNE-EN ISO 18265 con equivalentes.

Comparación de las curvas Jominy

Para la comparación de las curvas Jominy que se hará en este apartado se va a excluir la curva Jominy teórica, ya que se ha visto que sus valores no aportan información al análisis.

En la Gráfica 45 se muestra la comparación de las tres curvas Jominy experimentales, las obtenidas con la media de las probetas a cada temperatura de temple y la curva Jominy que proviene del Certificado de Calidad del lote del acero. Los valores utilizados para la realización de estas gráficas provienen de las tablas Tabla 11, Tabla 18 y Tabla 19.

En la Tabla 25 se muestran los valores principales que se obtienen de las curvas Jominy analizadas y de los valores de las durezas en la posición de la longitud crítica, Tabla 20.



Gráfica 45 Comparación de las curvas Jominy Media ensayadas con la curva Jominy del Certificado de Calidad
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 25 Comparación de los principales valores extraídos de la curva Jominy de los experimentos y el Certificado de Calidad

Fuente: Elaboración Propia

	P805-Media	P830-Media	Certificado
Dureza Extremo (HRC)	61,75	63,50	62,00
Dureza a 25 mm (HRC)	26,75	30,50	27,00
Longitud Crítica (mm)	4,59	5,15	4,85
Dureza en Longitud crítica (HRC) calculada	49,71	48,57	48,45
Dureza en Longitud crítica (HRC) medida	50,25	48,75	N/D
Tamaño de grano calculado	N9	N12	N10

Como se ha visto en los apartados anteriores, las curvas Jominy de las probetas templadas a 805 °C y la del Certificado de Calidad son prácticamente iguales. La curva Jominy de las probetas templadas a 830 °C muestra una mayor templabilidad que las anteriores, por lo que queda situada por encima de ellas.

En la Tabla 25 se comprueba que los valores medidos de las durezas en las probetas ensayadas y en las del certificado tienen una buena correlación. A su vez, vemos que los valores de la dureza en la posición de la longitud crítica que se ha calculado casi no difieren del valor de dureza medido en las probetas tras la realización de las micrografías. Esto da a entender que los ensayos realizados y los cálculos derivados de los mismos están en línea con la base teórico-experimental aplicada.

Las diferencias de templabilidad que se ven entre las probetas templadas a 805 °C y 830 °C podrían ser explicadas por la diferencia del valor del índice de grano, N9 y N12 respectivamente. Es decir, la diferencia de temperatura al que se realiza el tratamiento térmico del temple produce una diferencia substancial del tamaño de grano austenítico. Los ensayos realizados a 830°C permiten que la transformación austenítica ocurra a 50 grados por encima de la temperatura de máxima solubilidad, reduciendo así el tamaño de grano austenítico como era de esperarse según la teoría. Por el contrario, los ensayos realizados a 805 °C hacen que la transformación austenítica ocurra a solo 25 grados por encima de la temperatura de máxima solubilidad produciendo un tamaño de grano austenítico mayor que el caso anterior.

Además, entendiendo la templabilidad como el valor del diámetro crítico (profundidad hasta la cual se ha producido el efecto del temple llegando a formar un núcleo de 50% de perlita y 50% de martensita), las diferencias de templabilidad que se ven entre las probetas templadas a 805 °C y 830 °C podrían ser explicadas por el tiempo de transformación de la austenita en martensita, es decir, por el diferente grado de subenfriamiento que han recibido las probetas debido a la diferente temperatura de ensayo (805 °C y 830 °C). El enfriamiento rápido desde temperaturas más altas en el núcleo de las probetas produce una transformación 50% perlita y 50% martensita. La transformación de la austenita en perlita se produce por enfriamiento continuo. Si dicho enfriamiento se produce a temperatura mayores, como el caso de las probetas calentadas hasta los 830 °C, las curvas TTT de transformación sufren un desplazamiento hacia la derecha del diagrama, produciendo así el resultado que se ha comprobado experimentalmente de desplazamiento del diámetro crítico a distancias mayores de los extremos templados con respecto al caso de temperatura menor, 805 °C. Con los ensayos realizados, se ha podido demostrar que la curva de templabilidad para el acero ensayado presenta una sensibilidad con respecto a la temperatura de temple, pero no es posible cuantificar los beneficios debido a lo limitado de la muestra ensayada, tanto en cantidad de probetas como en temperaturas ensayadas.

CONCLUSIONES

Durante este Trabajo fin de Grado se ha realizado un estudio experimental de la templabilidad del acero C55E utilizando el método del ensayo Jominy según la UNE-EN ISO 642:2000 y se ha comparado con los resultados teóricos, así como los valores mostrados en el Certificado de Material de la muestra utilizada.

Para la realización de los ensayos ha sido necesario plantear un contexto y marco teórico previo que den luz sobre los trabajos que se desarrollan en el TFG. Se ha explicado la base teórica y la metodología que soportan los resultados prácticos conseguidos con la experimentación en el laboratorio. En base a esto, el TFG se puede dividir en tres bloques:

- Contexto teórico en el que se basan los ensayos, cubierto por el apartado de *“Introducción”*
- Desarrollo de la metodología y los materiales necesarios para la realización de los ensayos, cubierto por el apartado *“Metodología y materiales”*.
- Realización de los ensayos y análisis de los resultados, cubiertos por los apartados *“Resultados”* y *“Discusión”*

Una vez realizados los ensayos y presentados los resultados en los apartados anteriores de este TFG, las conclusiones que se sacan del análisis de los datos son las siguientes:

- Analizados los resultados de las durezas medidas en las escalas Rockwell C y Vickers 10 se ha comprobado que la equivalencia de los valores de durezas entre ambas escalas está de acuerdo con lo que indica la norma UNE-EN ISO 18265. Habiéndose tomado las medidas de cada una de las escalas en una cara opuesta de la probeta se puede concluir que el proceso de templado ha estado bien ejecutado. Se han conseguido durezas distribuidas homogéneamente en las probetas ensayadas. Como muestra de la validez de esta afirmación, en el caso de la probeta mal ensayada se aprecian grandes diferencias entre los valores medidos y las conversiones según la norma. Esto es debido a que el proceso de templado no cumplió con la condición de simetría axial que está definida en la base teórica del mismo.
- A la hora de realizar la curva Jominy Teórica para el acero ensayado se ha visto que los valores de dureza máxima en el extremo templado coinciden con los valores máximos medidos en las probetas. Esto viene a indicar que la metodología teórica tiene una buena correlación con los resultados experimentales.
- Analizada la curva Jominy Teórica a lo largo de la probeta, se ve que esta tiene una buena correlación con los valores de dureza de la parte más próxima al extremo templado. En las posiciones más alejadas a este extremo los valores de dureza teóricos son menores

que los medidos experimentalmente. Esto indica que el análisis que se pueda hacer con el estudio de la curva teórica es conservativo con respecto a lo obtenible experimentalmente. La curva teórica en las posiciones más alejadas de la cara de temple es conservativa, es decir, se obtienen valores de dureza menores que los que se van a obtener en la realidad. Este hecho no invalida el planteamiento teórico de obtención de la curva ya que se considera que el hecho de que sea conservativa es una forma de garantizar resultados en caso de variaciones en el proceso de temple que se pudieran hacer en piezas reales. Por esto se puede concluir que tanto las curvas teóricas como las curvas experimentales se sitúan dentro de la banda de templabilidad prevista para este tipo de aleación de acero.

- Las curvas Jominy resultado de los ensayos realizados en este TFG son, en la práctica, iguales a la que se ha suministrado en el Certificado de Calidad del lote de material utilizado para la fabricación de las probetas. La metodología y la ejecución de los ensayos realizados para este TFG son comparables a los que se han seguido en las instalaciones del proveedor del material.
- De las diferencias entre las curvas Jominy obtenidas experimentalmente para este TFG, probetas templadas a 805 °C y a 830 °C, la que más se aproxima a la del Certificado de Calidad es la de 805 °C. Eso hace pensar que el templado realizado durante el proceso de Calidad de la colada del acero utilizado en los ensayos estaba realizado a una temperatura más próxima a los 805 °C. Este razonamiento se ve avalado por el hecho de que los tamaños de grano calculados son más próximos entre la curva Jominy de 805 °C y la del Certificado de Calidad, N9 y N10 respectivamente, que el calculado para la curva Jominy de 830 °C, N12.
- Del análisis de las curvas Jominy de las probetas ensayadas se podría desprender que un aumento en la temperatura de temple mejoraría las características de templabilidad del acero. Esta afirmación no se puede sostener con los datos experimentales realizados pues los ensayos han sido limitados a únicamente dos temperaturas.

Debilidades y trabajos futuros

Con la metodología expuesta a lo largo del TFG ha sido posible la realización de los ensayos y la presentación de los resultados obtenidos que cumplen con los objetivos inicialmente marcados. Sin embargo, debido a las variables no controladas durante la preparación y realización de los ensayos habría una serie de factores que podrían mejorarse con el fin de obtener unos mejores resultados y llegar a unas conclusiones más completas. Entre estos factores se encuentran:

- A la hora de determinar el tamaño de grano resultante de forma analítica se ha detectado una falta de información gráfica para la realización de los cálculos, las curvas están limitadas a tamaños de grano de N4 a N8. Es por ello por lo que se ha desarrollado una alternativa basada en la base teórica disponible. Sería conveniente disponer de gráficas con mayor número de tamaño de grano ASTM o ratificar que el método empleado para la estimación del tamaño de grano es válido.
- Para asegurar los resultados, sería conveniente el aumento del tamaño de la muestra de los ensayos. De esta forma se garantiza que las medias obtenidas son mucho más representativas y que en caso de haber alguna ejecución mala es fácilmente descartable.
- Para hacer un análisis de los efectos de la temperatura del templado sobre la dureza sería conveniente realizar un estudio con más temperaturas de temple. Se han utilizado en este TFG temperaturas 25 °C y 50 °C superiores a la de austenización completa (Temperatura de solubilidad máxima de la austenita). Se podrían realizar ensayos con más diferencias de temperaturas para analizar el comportamiento de las curvas Jominy y ver la sensibilidad de estas frente a estas variaciones.
- Intentar repetir el ataque químico para el análisis metalográfico utilizando reactivos diferentes para una mejor inspección visual cualitativa y cuantitativa (Tamaño de grano real) de las superficies templadas.

BIBLIOGRAFÍA

- Alcántara, V. (2024). *Transformaciones de fases de la Austenita*.
<https://www.researchgate.net/publication/380149966>
- Ana Ramírez, Ángel Manzanillo, Wilfredo Estrada, Jorley López, & Daniel Bermúdez. (2024). *Diagramas de equilibrio*. <https://www.monografias.com/trabajos96/diagramas-equilibrio/diagramas-equilibrio>
- ASM Handbook Volume 1. (1990). *ASM Handbook Volume 1 Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys* (ASM Handbook Committee, Ed.). ASM International. The Materials Information Company.
- ASM Handbook Volume 4. (1991). *ASM Handbook Volume 4 Heat Treating* (ASM Handbook Committee, Ed.; Vol. 4). ASM International. The Materials Information Company.
- César Mariscal Hernández. (2018). *Efecto de las condiciones de enfriamiento en la distorsión de piezas de acero 51CrV4 durante el temple*. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Facultad de Ingeniería Química.
- Equipo editorial de Metalmeccanica. (2023). *Medición en escalas de dureza Rockwell*. <https://www.metalmeccanica.com/es/noticias/medicion-en-escalas-de-dureza-rockwell>
- Facultad Regional Rosario. (2013). *Metalografía y tratamientos térmicos. Transformaciones de la austenita fuera del equilibrio*.
- Grossmann, M. A. (1952). *Elements of Hardenability* (United States Steel Co. Pittsburgh, Ed.). American Society for Metals.
- <http://dbpedia.org/>. (2024). *Templabilidad*. <https://dbpedia.org/page/Hardenability>
- <https://en.ppt-online.org/>. (2024). *Steel hardenability capacity and hardenability*. <https://en.ppt-online.org/757723>
- <https://gc.scalahed.com/>. (2013). *Tipos de aceros comerciales, componentes principales y sus aplicaciones*. <https://gc.scalahed.com/recursos/files/r145r/w1364w/U4liga1.htm>
- <https://gomez2010.weebly.com/>. (2017). *AJUSTE, MONTAJE, VERIFICACIÓN Y CONTROL DE MÁQUINA/MECANISMO*.

<https://industrialphysics.com/>. (2024). *¿Qué es la dureza Rockwell?* - *Industrial Physics*.
<https://industrialphysics.com/es/base-de-conocimientos/articulos/prueba-de-dureza-rockwell/>

<https://innovatest-iberica.es/>. (2021). *Historia de la dureza*. <https://innovatest-iberica.es/?p=349>

<https://matchingmechanic.wordpress.com/>, Ingrid Natalia Díaz Novoa, Alvaro Augusto Hernandez Escobar, & Daniel Prisciliano Imbett Ortega. (2015). *Análisis de estructuras cristalinas*. <https://matchingmechanic.wordpress.com/z/>

<https://sebirsa.com/>. (2024). *Tratamiento térmico del acero: Qué es, Ventajas, Tipos*.
<https://sebirsa.com/blog/tratamiento-termico-acero/>

<https://tratamientostermicos1638.blogspot.com/>. (2011). *Tratamientos Térmicos: Medios de Temple*.
<https://tratamientostermicos1638.blogspot.com/2011/08/medios-de-temple.html>

<https://unita.unam.mx/>. (2022). *Aleaciones Fe-C*.

<https://www.aceromafe.com/>. (2024). *Tratamientos térmicos del acero: Tipos y Características*.
<https://www.aceromafe.com/tratamientos-termicos-del-acero/>

<https://www.buehler.com/>. (2024). *Historia de la dureza*.
<https://www.buehler.com/mx/blog/historia-de-la-dureza/>

<https://www.infinitiaresearch.com/>. (2021a). *Ensayo Vickers de dureza: ¿En qué consiste?*
<https://www.infinitiaresearch.com/noticias/ensayo-dureza-vickers/>

<https://www.infinitiaresearch.com/>. (2021b). *Ensayos de dureza Rockwell ¿En qué consiste?*
<https://www.infinitiaresearch.com/noticias/ensayos-de-dureza-rockwell-en-que-consiste/>

<https://www.juntadeandalucia.es/>. (2024a). *Diagrama hierro-carbono*.
<https://www.juntadeandalucia.es/averroes/centros-tic/21700290/helvia/aula/archivos/repositorio/0/42/html/diagrama.html>


<https://www.juntadeandalucia.es/>. (2024b). *Tratamientos térmicos*.
<https://www.juntadeandalucia.es/averroes/centros-tic/21700290/helvia/aula/archivos/repositorio/0/36/html/termicos.html>

- <https://www.quimica.es>. (2024). *Metalografía*.
<https://www.quimica.es/enciclopedia/Metalograf%C3%ADa.html>
- Jorge Martínez. (2012). *Tratamientos térmicos*. <https://es.slideshare.net/slideshow/materiales-ii-tratamientos-trmicossemana-12/13656885>
- José Miguel Cáceres Alvarado. (2007). *Ciencia y Tecnología de los Materiales: METALOGRAFÍA*.
https://jmcacer.webs.ull.es/CTMat/Practicas%20Laboratorio_archivos/metalografia.pdf
- Katty Enciso Quispe. (2018). *Templabilidad*.
<https://es.scribd.com/document/389763175/Templabilidad>
- Laboratorio de Forja. (2024a). *AUSTENITA*. <https://laboratoriodeforja.com/austenita/>
- Laboratorio de Forja. (2024b). *MARTENSITA*. <https://laboratoriodeforja.com/martensita/>
- Materiales Metálicos I (45000037). Universidad Politécnica de Madrid. (2018). *Templabilidad de Aceros - GUIA DEL ENSAYO JOMINY*.
<https://www.studocu.com/es/document/universidad-politecnica-de-madrid/materiales-metalicos-i/templabilidad-de-aceros/1399202>
- Molera Solá, P. (1991). *Tratamientos térmicos de los metales*. Marcombo, S.A.
https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=4W5--vnDlvgC&oi=fnd&pg=PA13&dq=tratamientos+t%C3%A9rmicos+de+los+aceros&ots=cN9yQ4wqQD&sig=hK76Zqg9_s_TBAGXhOxs1_MhqM#v=onepage&q=tratamientos%20t%C3%A9rmicos%20de%20los%20aceros&f=false
- Oscar Fabián HIGUERA COBO, Carlos Mauricio MORENO TELLEZ, & Carolina RAMIREZ MONTER. (2009). Efecto del precalentamiento y la severidad de temple sobre la resistencia al desgaste adhesivo del acero austenítico al Manganeso. In *Año* (Vol. 77).
- Pedro Coca Rebollero, & Juan Rosique Jimenez. (1985). *Ciencia de materiales*. Ediciones Pirámide, S.A.
- Ricardo García Ledesma. (2000a). *Ciencia de Materiales*. Fundación General de la Universidad Politécnica de Madrid.
- Ricardo García Ledesma. (2000b). *Ingeniería de Materiales*. Fundación General de la Universidad Politécnica de Madrid.
- UNE-EN 10020. (2001). *UNE-EN 10020 Definición y clasificación de los tipos de aceros*. AENOR. Asociación Española de Normalización y Certificación.

- UNE-EN 10027-1. (2017). *UNE-EN_10027-1, Sistemas de designación de aceros Parte 1: Designación simbólica*. AENOR. Asociación Española de Normalización y Certificación.
- UNE-EN 10027-2. (2016). *UNE-EN 10027-2 Sistemas de designación de aceros. Parte 2: Designación numérica*. AENOR. Asociación Española de Normalización y Certificación.
www.aenor.es
- UNE-EN ISO 642. (2000). *UNE-EN ISO 642 Acero. Ensayo de templabilidad por templado final (ensayo Jominy)*. AENOR. Asociación Española de Normalización y Certificación.
- UNE-EN ISO 6507-1. (2018). *UNE-EN ISO 6507-1 Materiales metálicos. Ensayo de dureza Vickers. Parte 1: Método de ensayo*. AENOR. Asociación Española de Normalización y Certificación.
- UNE-EN ISO 6508-1. (2017). *UNE-EN ISO 6508-1 Materiales metálicos. Ensayo de dureza Rockwell. Parte 1: Método de ensayo*. AENOR. Asociación Española de Normalización y Certificación.
- UNE-EN ISO 18265. (2014). *UNE-EN ISO 18265 Materiales metálicos. Conversión de valores de dureza*. AENOR. Asociación Española de Normalización y Certificación.
- Universidad de Málaga. Facultad de Ciencias. (2004). *Aleaciones Hierro-Carbono. Aceros y Fundiciones*. Universidad de Málaga. Facultad de Ciencias.

Anexo I

Certificado de calidad y albarán de entrega de material

CERTIFICADO DE CALIDAD QUALITY CERTIFICATE																			
CLIENTE / CUSTOMER ITURRINO SUMINISTROS IND.S.A. AVDA. VALDELAPARRA, 31 NAVE 8 28100 ALCOBENDAS MADRID								EXPEDICION / EXPEDITION ALBARAN / DELIVERY NOTE: 917319-1 Nº PEDIDO/ORDER Nº: FECHA / DATE: 05.05.23											
PRODUCTO SOLICITADO / REQUIRED PRODUCT																			
CALIDAD / GRADE		F-1150		C55E		COLADA / HEAT		20/78909		ESTADO / DELIVERY COND.		- SIN TRATAMIENTO TERM		PERFIL / SHAPE R		PESO (KG) / WEIGHT		121	
MEDIDA / SIZE		25		LONGITUD / LENGTH				Nº PIEZAS / Nº OF PIECES											
COMPOSICION QUIMICA DE LA COLADA / CHEMICAL COMPOSITION CAST ANALYSIS																			
C	MAN	SI	P	S	CR	MO	NI	CU	AL	V	TI	NB	SN						
0,525	0,800	0,300	0,013	0,020	0,200	0,020	0,070	0,180	0,021	0,002	0,018	0,001	0,007						
CARACTERISTICAS MECANICAS / MECHANICAL PROPERTIES																			
TRATAMIENTO TERMICO DE PROBETA SPECIMEN HEAT TREATMENT				RM N/mm2	RE N/mm2	A (%)	Z (%)	DUREZA HB HARDNESS		RESILIENCIA (J) RESILIENCE °C TIPO PROBETA / SAMPLE TYPE									
ENSAYOS EN NORMALIZADO				746,00	457,00	19,50	45,80												
OBSERVACIONES / REMARKS: VALORES DE RED.30mm y PROBETA DE 10mm																			
MICROINCLUSIONES / MICRO-INCLUSIONS																			
NORMA / NORM AFNOR NFA 04-106 S / JERNKONTORET												TAMAÑO GRANO / GRAIN SIZE							
A		B		C		D		MATERIAL LIBRE DE RADIOACTIVIDAD MATERIAL IS FREE OF RADIOACTIVITY				6							
F	G	F	G	F	G	F	G												
1,5	-	0,5	-	0,5	-	1	-												
OBSERVACIONES / REMARKS:																			
ENSAYOS JOMINY / JOMINY TEST																			
mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13	15	20	25				
HRC	62	61	60	54	47	42	36	35	33	33	32	31	31	29	27				
ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS / NON-DESTRUCTIVE TESTS																			
CONTROL ANTIMEZCLAS / ANTIMIXING CONTROL				100															
OBSERVACIONES / REMARKS: Los datos de este certificado son transcripción de los emitidos por el fabricante, cuyo original queda archivado en nuestro Departamento de Calidad. The content of this document is a transcription of the certificate issued by the manufacturer, whose original is recorded in our Quality Department.																			
TRANSCRIPCIÓN DEL CERTIFICADO DEL FABRICANTE / TRANSCRIPTION OF SUPPLIER'S CERTIFICATE																			
																			

ITURRINO
SUMINISTROS INDUSTRIALES, S.A.

Valdelaparra, 31 - Nave 8 - Poligono Industrial
Telef. 91 661 36 12 - Fax 91 661 86 36 - 28100 ALCOBENDAS (Madrid)

FACTURAR A:
UNIVERSIDAD POLI. MADRID
ESCUELA UNIVER. ING. TEC. IND.
RONDA DE VALENCIA, 3
28012 MADRID

ALBARAN

FECHA 10/05/23
Nº DOCUMENTO 47.426
Nº VENDEDOR 0

Nº CLIENTE 1582
N.I.F. Q2818015F

DESTINATARIO:

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	DT	CANT.	P. UNITARIO	IMPORTE
	Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial Departamento de Ingeniería Mecánica, Química y Diseño Indus. PROF.ROBERTO D AMATO				
	BARRA C-55 (F115- LAMINADO) DE DIAMETRO 25MM LARGO 6 METROS POR UD. 5 UDS, TOTAL 30 METROS PORTES SUS INSTALACIONES		30,00 1,00	10,5000 24,0000	315,00 24,00
	OFICINA CONTABLE:U02500067 ORGANO GESTOR:GE0002658 UNIDAD TRAMITADORA:U02500034				

S. IMPORTES	B. IMPONIBLE	I.V.A.	TOTAL
339,00	339,00	21% 71,19	EUR 410,19 PTS 410,19

FORMA DE PAGO	BANCO	VENCIMIENTOS	IMPORTES
CONTADO	BANKINTER	10/05/23	410,19
TRANSFERENCIA	ES60 **** * 1102		

Reg. Merc. Madrid 2. Tomo 956. General 910. Sección 3ª Libro de Sociedades. Folio 71. Hoja nº 68621-2. Inscripción 1ª. C.I.F. A-78168903

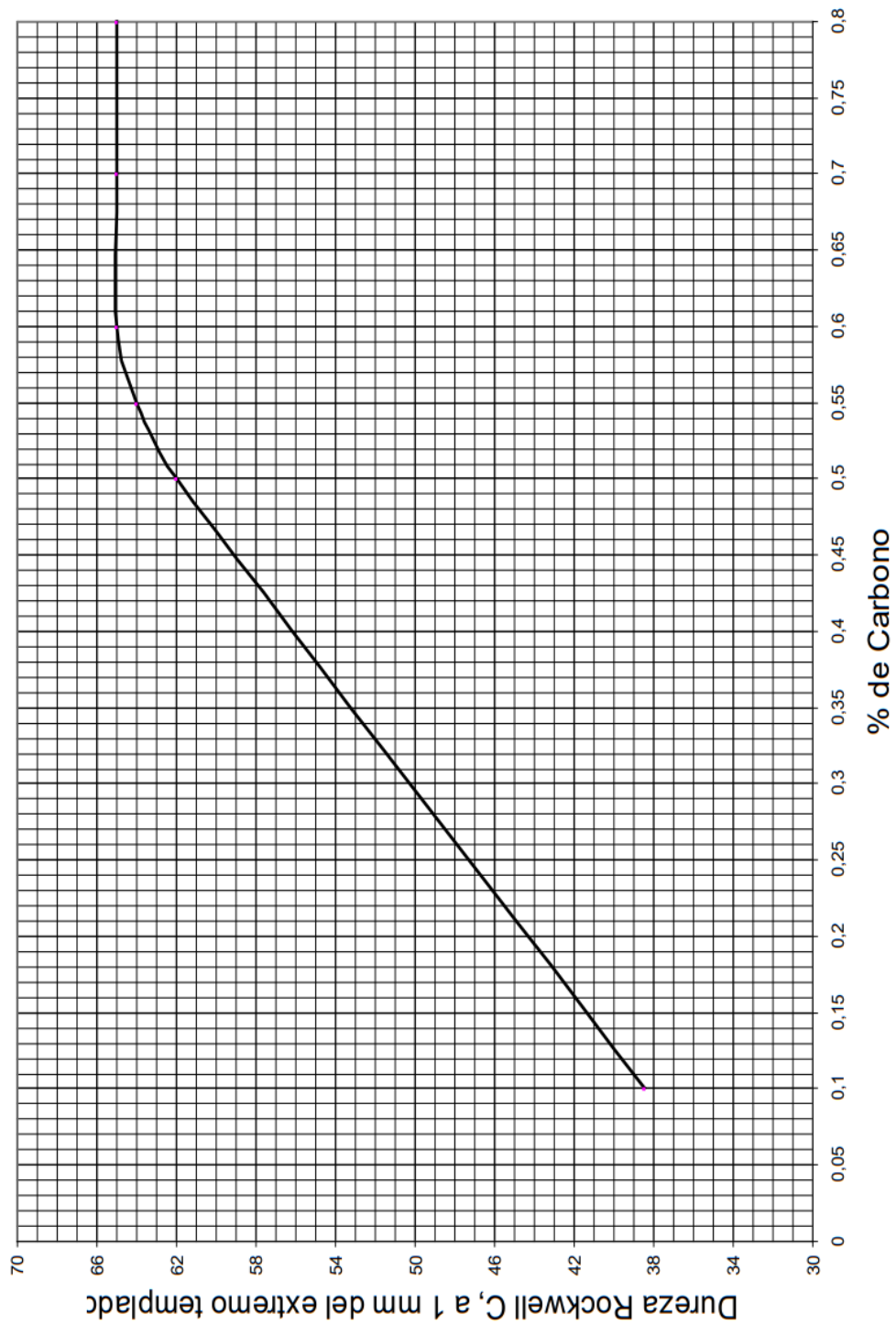
Anexo II

Gráficos para el cálculo teórico de la curva Jominy

Fuente: (Ricardo García Ledesma, 2000b)

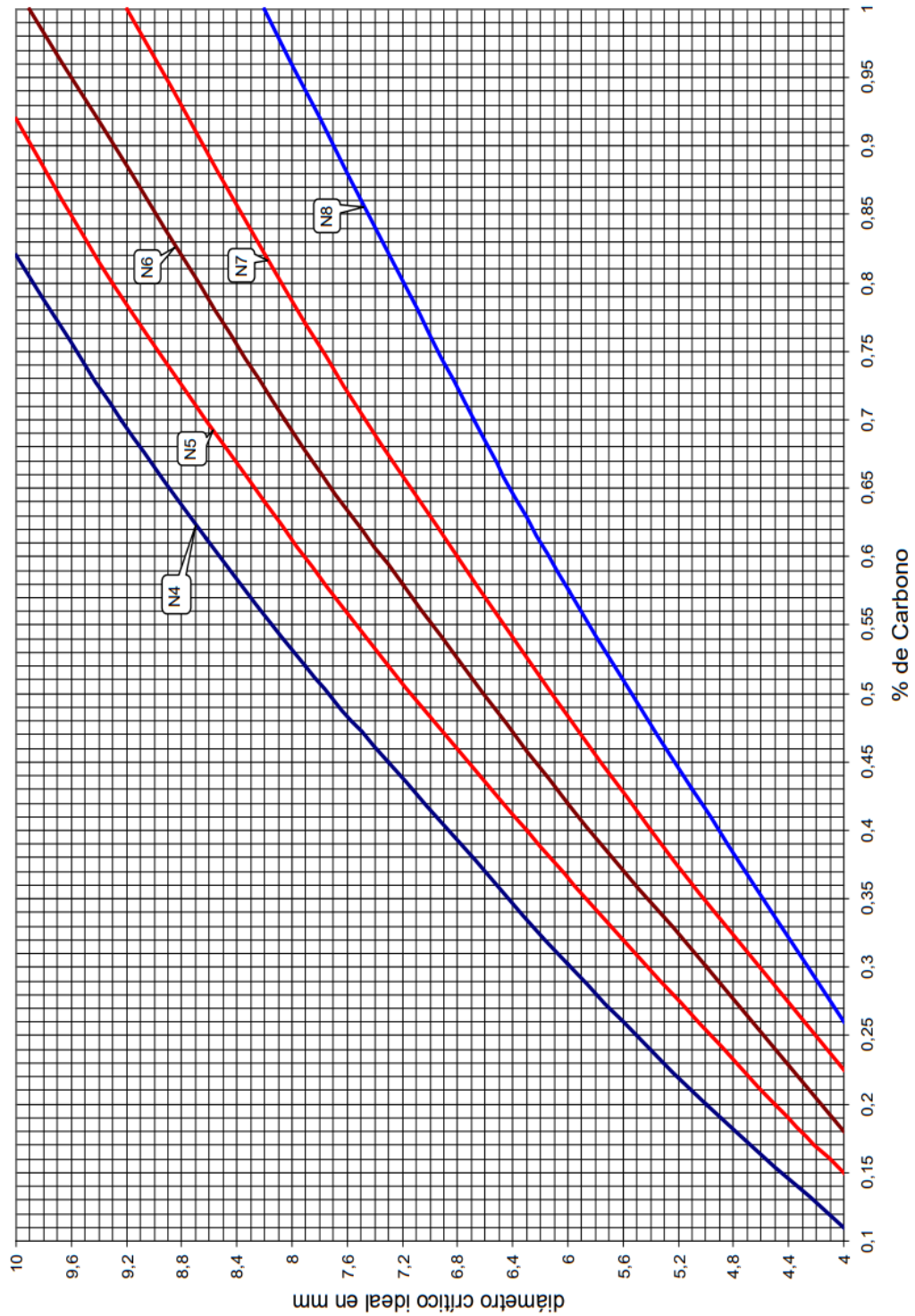
G1

INFLUENCIA DE LA CANTIDAD DE CARBONO EN LA DUREZA DE LA MARTENSITA



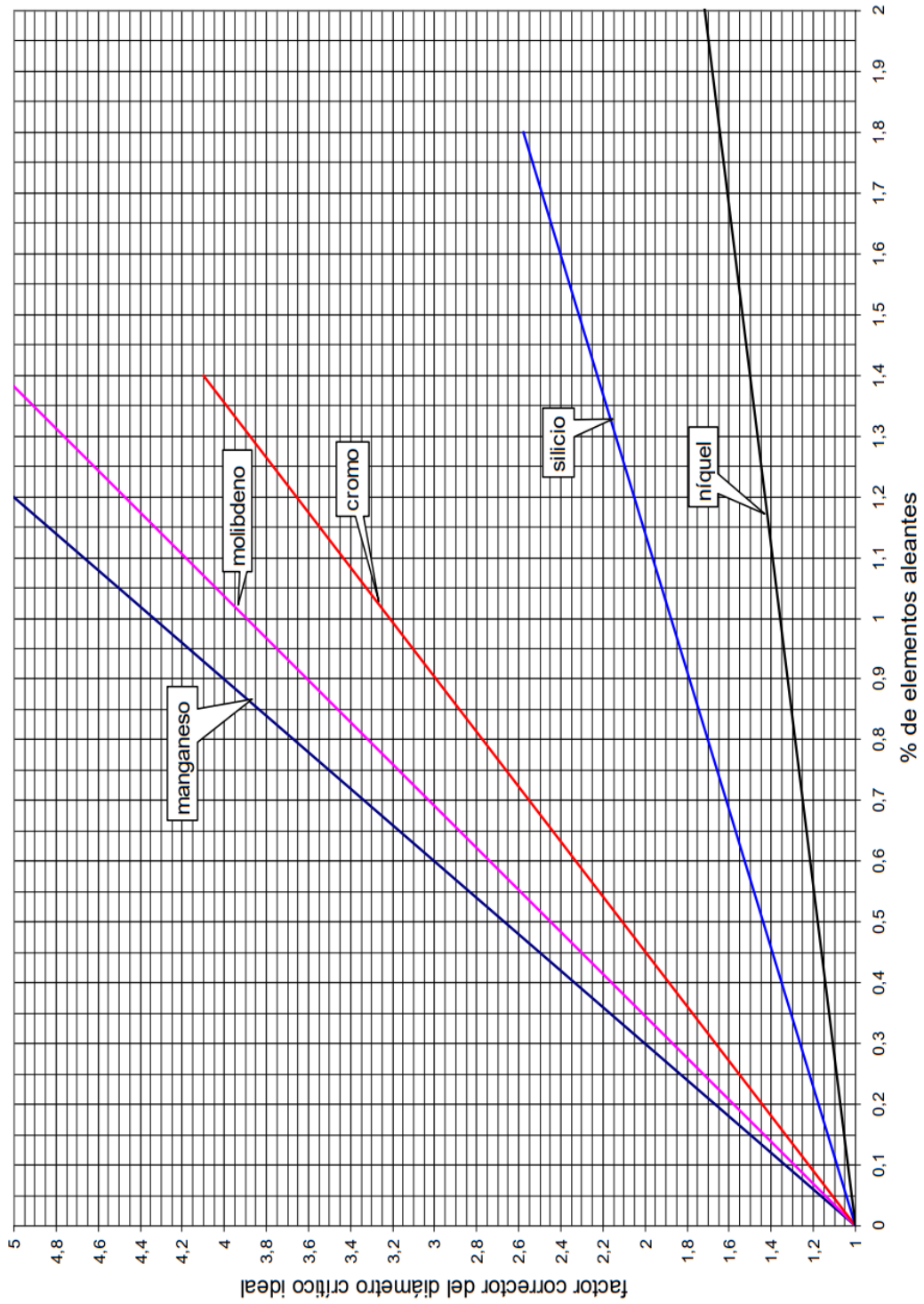
G2

INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE GRANO EN EL DIÁMETRO CRÍTICO IDEAL



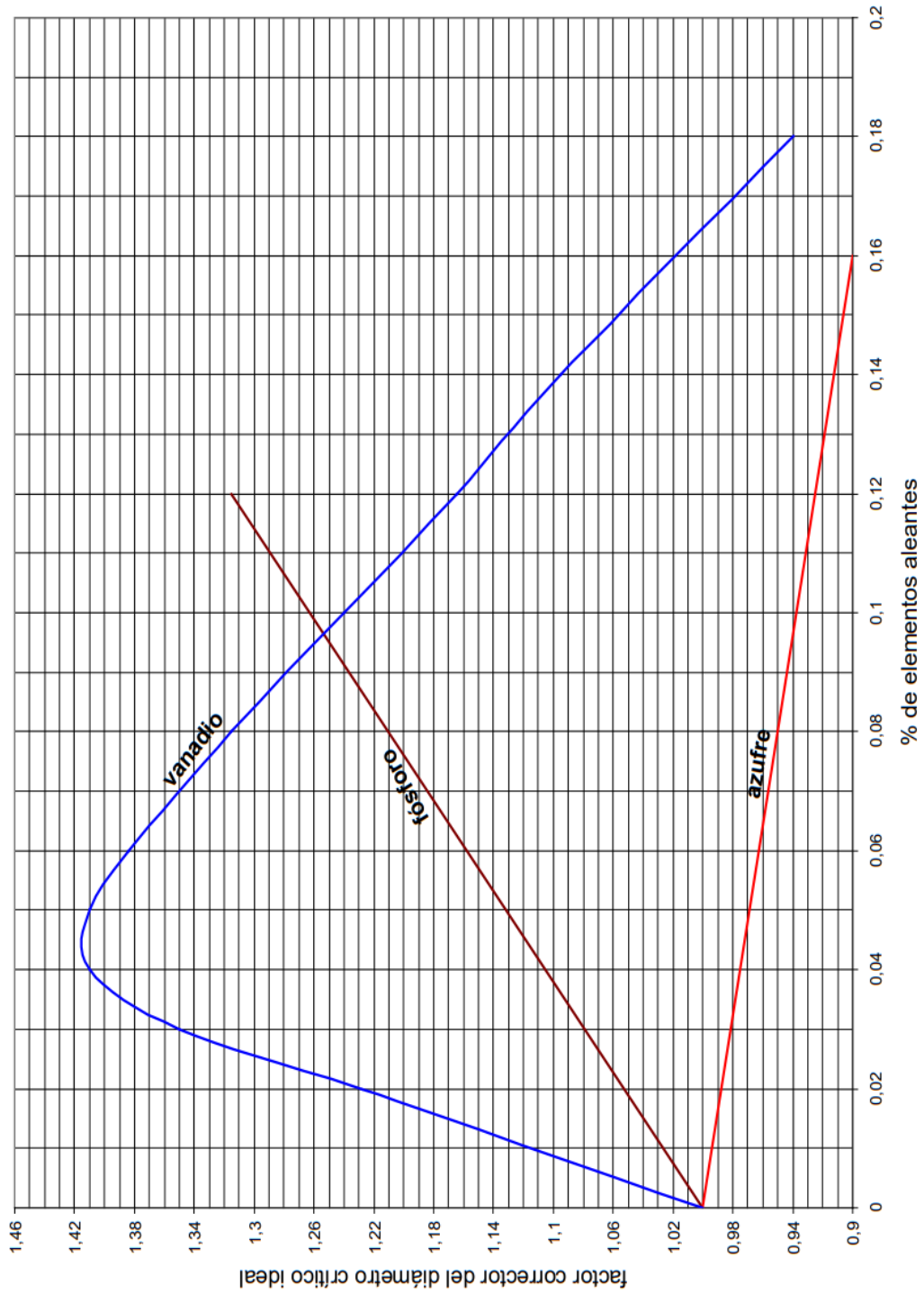
G3

INFLUENCIA DE LOS ELEMENTOS ALEANTES EN EL DIÁMETRO CRÍTICO IDEAL



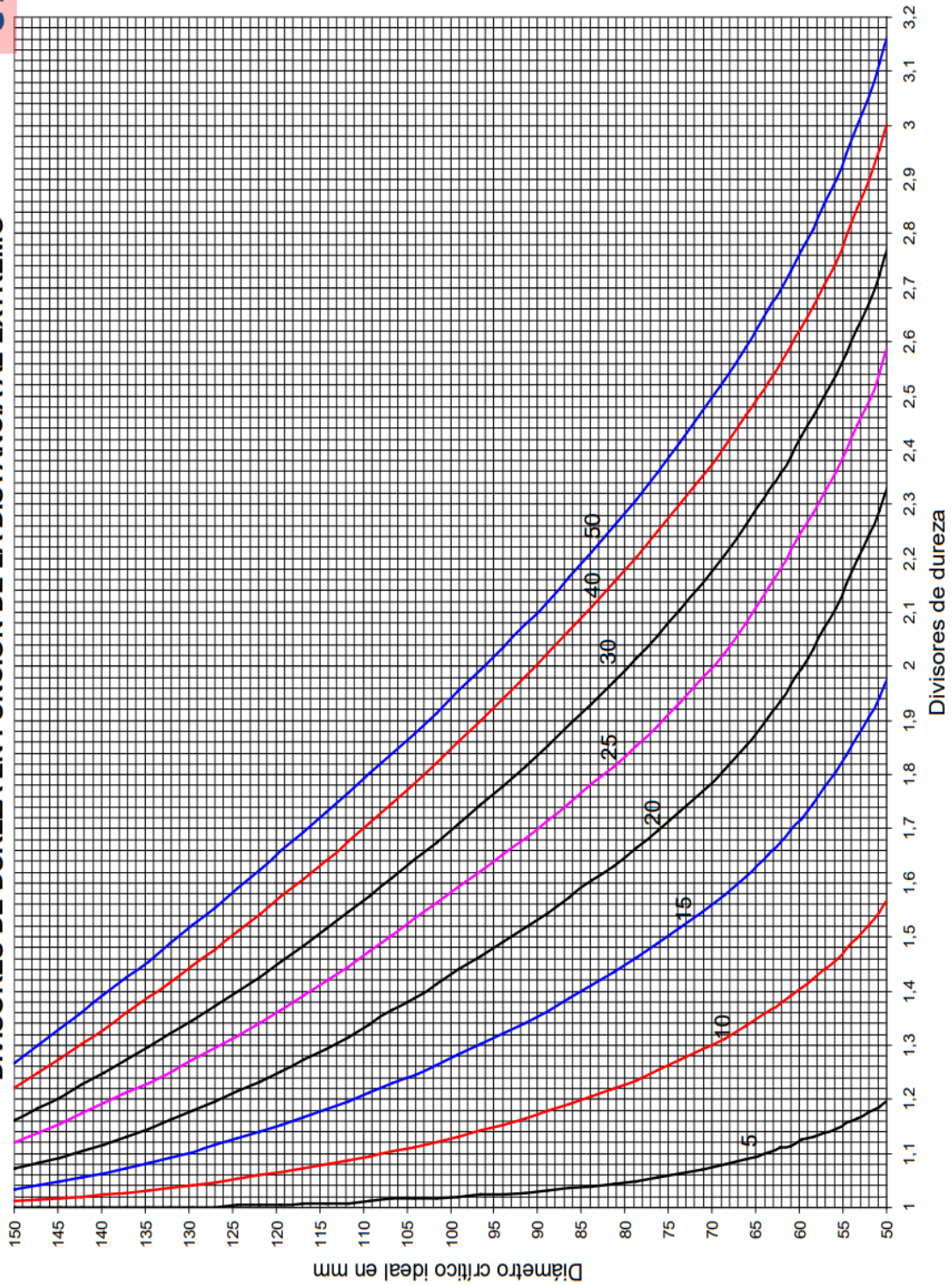
G3

INFLUENCIA DE LOS ELEMENTOS ALEANTES EN EL DIÁMETRO CRÍTICO IDEAL

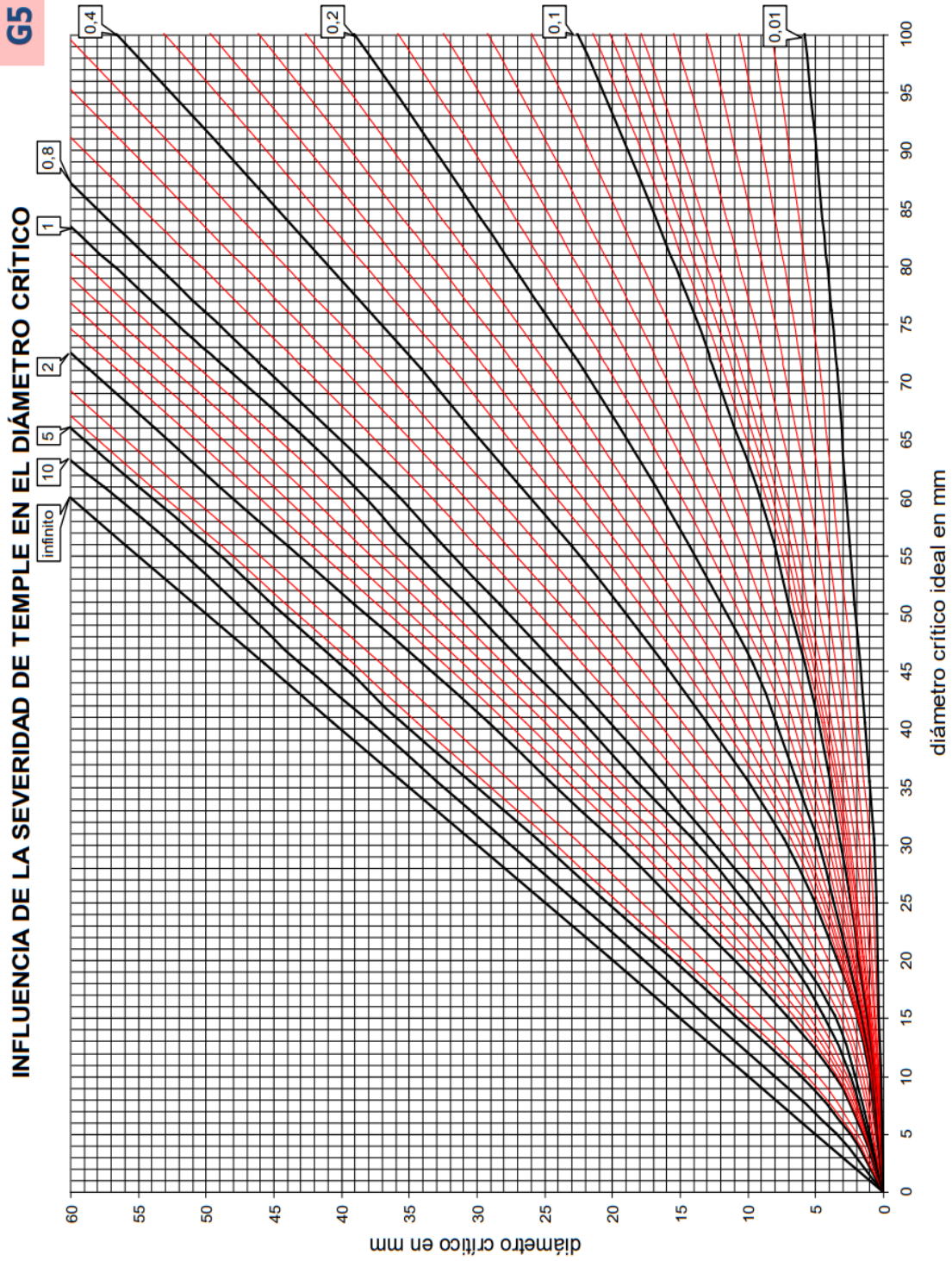


G4

DIVISORES DE DUREZA EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA AL EXTREMO

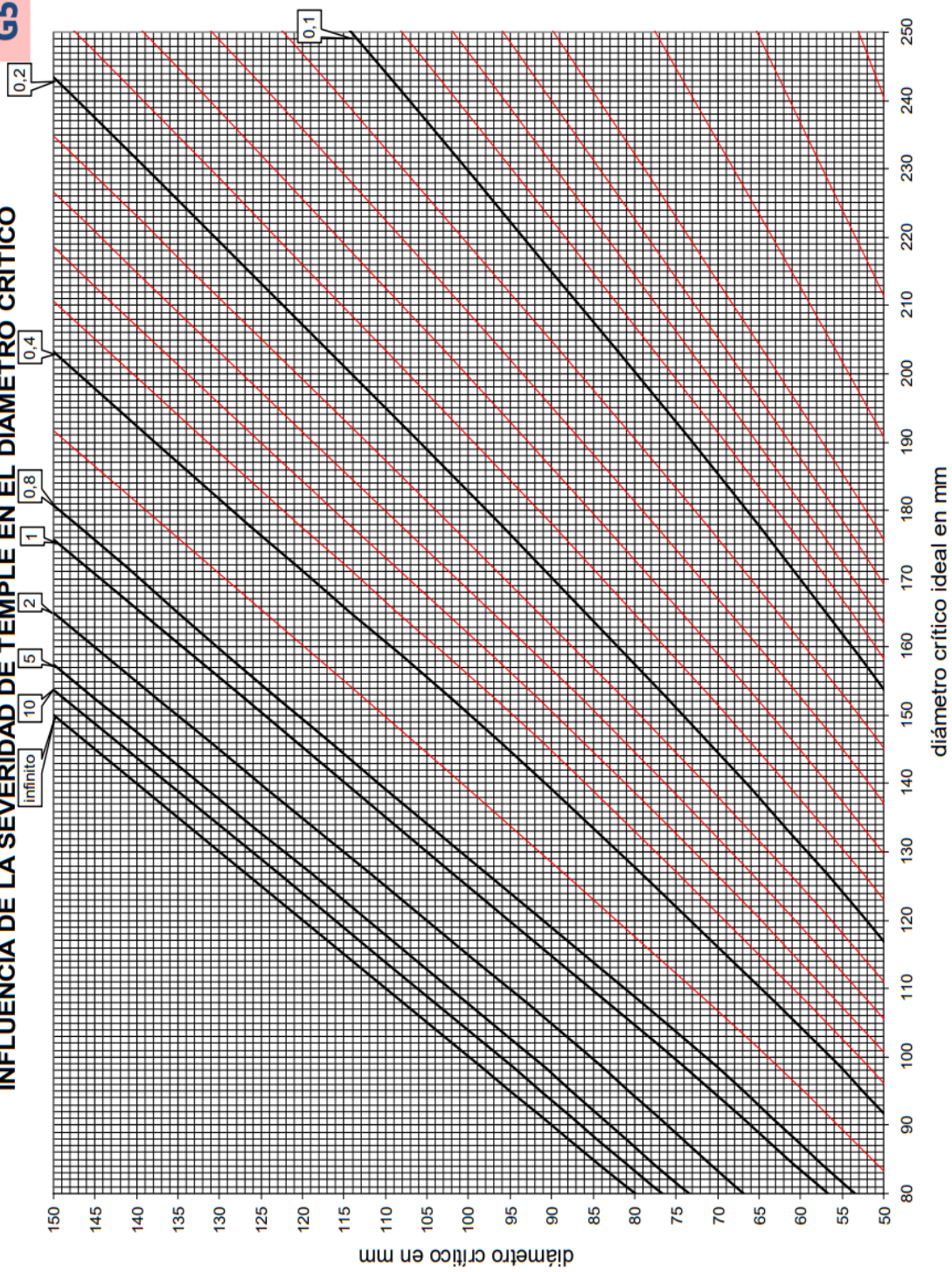


G5



G5

INFLUENCIA DE LA SEVERIDAD DE TEMPLE EN EL DIÁMETRO CRÍTICO



G6

EQUIVALENCIA ENTRE DIÁMETROS CRÍTICOS IDEALES Y DISTANCIAS JOMINY

