

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía



**Influencia de la combinación de impurezas
(Fe, Si) en las propiedades mecánicas de la
aleación AA5754.**

TESIS DOCTORAL

Presentada para optar al título de Doctor por:

Mateo María Vicent Fanconi

Ingeniero de Minas

Madrid, 2025



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía

**Doctorado en Investigación, Modelización y Análisis del Riesgo
Medioambiental**

**Influencia de la combinación de impurezas
(Fe, Si) en las propiedades mecánicas de la
aleación AA5754.**

TESIS DOCTORAL

Presentada para optar al título de Doctor por:

Mateo María Vicent Fanconi

Ingeniero de Minas

Bajo la dirección de:

Dr. Íñigo Ruiz Bustinza

Dra. Catalina Fernández Rivera

Madrid, 2025

Título: Influencia de la combinación de impurezas (Fe, Si) en las propiedades mecánicas de la aleación AA5754.

Autor: Mateo María Vicent Fanconi

Programa de Doctorado: Doctorado en Investigación, Modelización y Análisis del Riesgo Medioambiental

Dirección de Tesis:

Dr. Íñigo Ruiz Bustinza, Profesor Ayudante Doctor, ETSIME, UPM

Dra. Catalina Fernández Rivera, Directora del Centro de Investigación del Aluminio, Aludium, Transformación de Productos

Tutor de Tesis:

D. Ignacio Gil Fernández-Marcote Tecnólogo Senior del Centro de Investigación del Aluminio, Aludium, Transformación de Productos

Dra. Ana María Méndez Lázaro, Catedrática, ETSIME, UPM

Revisores externos:

Tribunal de Tesis:

Fecha de defensa:

A mi Mujer y a nuestros hijos.

Agradecimientos

Esta tesis existió como proyecto gracias a la Dra. Catalina Fernández Rivera, el Dr. Íñigo Ruiz Bustinza y la Dra. Ana María Méndez Lázaro, que gracias a los lazos que establece el mundo de la minería fueron los puentes que me llevaron a Cindal. Los dos primeros han sido mis directores.

Catalina defendió esta tesis desde el principio hasta el final (y han sido más de tres años) asegurándose de que contase con todos los medios necesarios.

Íñigo ha hecho posible hacer desde Alicante una tesis en la UPM, una y otra vez, con constante disponibilidad, guiándome en todas las cuestiones académicas que yo desconocía por completo.

Pero quien ha conducido este proyecto en su día a día ha sido mi tutor, Ignacio Gil Fernández-Marcote, un extraordinario conocedor de todo lo que incumbe a la industria del aluminio, desde en qué medida una variación de diez grados puede afectar a la orientación de los granos hasta que ha pasado en el parque de chatarra para que de repente el Zn y el Cu estén tan altos. Él ha sido quien desde la mesa de enfrente conversación a conversación me ha convertido en el investigador que ha hecho esta tesis. En las escaleras de Cindal se han resuelto la mitad de los dilemas de esta investigación, siempre animándome a ir más allá, pero sin dejar de advertirme de cuando me estaba embarrancando.

Por supuesto, la tesis habría sido imposible sin el resto del equipo de Cindal.

Sergio, cuya precisión como analista me dio la primera pista de esta tesis, todos los días con más trabajo del que humanamente puede hacer una persona, pero siempre con un momento para enseñarme a hacer un ensayo, un proceso, un corte o para resolverme una duda. Y siempre con una sonrisa.

Eloy, más experto de lo que quiere admitir, al que siempre consideraré una autoridad en la preparación de probetas metalográficas y que logró que mis cien errores de novato y mis mil despistes, muchos de los cuales le han ocasionado grandes quebraderos de cabeza, nunca fueran motivo de crispación sino una nueva oportunidad para sonreír y hacerme un poco más fáciles las cosas.

David, que me ha asistido pacientemente en una parte imprescindible de la tesis, buscando un hueco en su tiempo, dispuesto a pasar conmigo dos horas más con el microscopio electrónico con tal de que los datos de esta investigación fueran suficientemente seguros y precisos.

Raquel que me guío con entusiasmo por la selva incomprensible de las bases de datos, dispuesta a repetirme mil veces la misma información o a participar en cualquier cruzada que se me ocurriese por la obtención de tal o tal dato, o para explicarme las diferencias entre la 60 y la 95.

Carlos y Marta, capaces de sacar una composición química de trozos ridículamente pequeños de aluminio y siempre amables a la hora de responder todas las preguntas que les hacía desde la más completa ignorancia.

Segundo que me enseñó cómo se escribe un artículo científico y porque no debería fiarme demasiado de lo que ponga en ninguno.

Y Víctor de quien aprendí entre muchas otras cosas a no quedarme sin dedos en la planta piloto.

Y también están Antonio, José y Ana Belén y otras tantas personas más que me ayudaron poco o mucho estos años.

La verdad es que el cariño, la amabilidad y la generosidad con la que he sido recibido en Cindal solo las puedo explicar como un regalo del Cielo.

Tengo que agradecer también una vez más al equipo administrativo de la Escuela de Minas y Energía. A cuanta más gente le cuento lo que hacen más gente me dice que no es normal. Si esta tesis se llega a defender será gracias a todo lo que no tenían por qué hacer y, sin embargo, hicieron.

A mis padres que me dieron todo enterrándose en nuestra familia.

A mis hermanos que siempre me han sabido escuchar y aconsejar, y que sobre todo me han enriquecido con su extraordinario ejemplo.

A todos los que han colaborado en las interminables revisiones.

A esa joven que con ojos marrón escondido supo ver en mí más de lo que yo mismo veía, y que junto a mí ha construido una preciosa familia con tres preciosos niños. Esta tesis no existiría sin ella. No solo porque sin ella no me la habrían encargado. Sino porque sin ella no habría pasado de la introducción y gracias a ella la estoy acabando con una sonrisa.

A Santa Bárbara Bendita que sabe perfectamente porqué.

Y a Dios que me sostiene.

Gracias a todos.

Abstract

The aluminum industry due to the concern for its environmental impact, the awareness that it operates in a planet of finite resources, and the economic benefit of a circular economy has dramatically increased the use of scrap for the development of its products, going from less than 20% of the raw material to more than 70% in many cases. This due to the current conditions of the scrap market and the technical limitations of its segregation and purification leads to a considerable increase in the impurity content of the final products, which in some cases has doubled, with Si and Fe being two prominent cases in this increase.

This change in the composition of the metal could have a significant effect on its properties that would compromise its performance in terms of customer requirements; that being the case, if one does not want to reduce or limit recycling to return to the previous situation of intensive use of primary aluminum it is necessary to know what this effect is in order to be able to optimize the composition without compromising its capabilities.

One of the products that has been most affected by this change in recycling policy is alloy AA5754, one of the most widely produced alloys for rolled aluminum products in the fully annealed state. For this reason, it was decided to study the effect of Si and Fe on the mechanical stress limits of this alloy.

For this purpose, analyses of mechanical characteristics and chemical composition have been conducted by Aludium Transformación de Productos S.L. R&D Center. This combined with other tests has allowed us to establish that Si has a softening effect by causing a deficit of Mg in the matrix by precipitation of Mg; while Fe, enhanced by the reduction prior to total annealing, gives rise to a finer grain size which hardens the metal, making it possible to establish two equations for estimating the mechanical strength and yield strength based on the contents of Mg, Si and Fe contents and the percentage reduction of the initial thickness, during cold rolling prior to the final total annealing, providing in the last section of the discussions an example of how the application of these findings can lead to important economic and environmental benefits, and indicating the relevance that this research has had in Aludium's production.

Resumen

La industria del aluminio debido a la preocupación por su impacto ambiental, la conciencia de que opera en un planeta de recursos finitos y los beneficios económicos de la economía circular, ha aumentado significativamente el uso de chatarra como materia prima para el desarrollo de sus productos, pasando de porcentajes de utilización menores del 20% a más de 70% en numerosos casos. Sin embargo, debido a las condiciones actuales del mercado de la chatarra y a las limitaciones técnicas de su segregación y purificación, se ha provocado un considerable aumento en el contenido de impurezas de los productos finales, duplicándose en algunos casos. Entre dichas impurezas, el Si y el Fe son los dos principales elementos responsables de este incremento.

El cambio en la composición química del metal conlleva modificaciones en sus propiedades, lo que puede llegar a comprometer su comportamiento en cuanto a los requisitos del cliente. De ser así, y si no se quiere reducir o limitar la utilización del material reciclado, lo que implicaría volver a la situación previa de uso intensivo de aluminio primario, es necesario realizar un análisis exhaustivo del material con la finalidad de optimizar tanto su composición química como su microestructura, para definir debidamente sus aplicaciones industriales.

Uno de los productos más afectado por la utilización de materia prima reciclada es la aleación AA5754, ampliamente utilizada en la fabricación de productos laminados de aluminio en el estado recocido total.

Estas circunstancias hacen necesario estudiar en profundidad el efecto de los altos contenidos de Si y Fe en estas aleaciones, determinando su influencia en las prestaciones del metal.

Los estudios se han llevado a cabo en el centro de investigación de Aludium Transformación de Productos S.L. La campaña de ensayos de los diferentes grupos de muestras ha permitido determinar las propiedades químicas, mecánicas y microestructurales de la aleación, su composición microestructural y los valores de Límite Elástico y Resistencia Mecánica.

La investigación ha permitido determinar cómo el Si tiene un efecto de ablandamiento al causar, por la precipitación del Mg, un déficit de este en la matriz, mientras que el Fe, potenciado por la reducción previa al recocido total, contribuye a un endurecimiento del material provocado por la disminución del tamaño de grano.

A continuación, se modelizan dos ecuaciones que permiten estimar los valores de Resistencia Mecánica y límite elástico en función de los contenidos de Mg, Si y Fe, así como de la reducción del espesor inicial (expresada en %) durante la laminación en frío previa al recocido final.

Finalmente, los resultados obtenidos en este trabajo de investigación se aplican a un caso hipotético, evidenciando la posibilidad de alcanzar significativos beneficios económicos y medioambientales, indicando, por último, la relevancia de esta investigación en la producción de Aludium.

Tabla de Contenido

<i>Agradecimientos</i>	iii
<i>Abstract</i>	v
<i>Resumen</i>	vi
<i>Lista de Figuras</i>	x
<i>Lista de Tablas</i>	xiv
1. Introducción	1
1.1. Fundamentos teóricos	2
1.1.1. Producción Industrial	2
1.1.2. Reciclaje del aluminio	3
1.1.3. Aleaciones de aluminio	3
1.1.4. Contaminaciones	4
1.1.5. Aleación AA5754	6
1.1.6. Características mecánicas de la aleación AA5754	18
1.2. Objetivos de esta investigación	22
2. Estado de la cuestión	24
2.1. Factores de la composición	24
2.1.1. Magnesio	24
2.1.2. Manganeso y Cromo	26
2.1.3. Impurezas (Fe y Si)	26
2.1.4. Conductividad eléctrica - Composición	28
2.2. Factores del proceso de fabricación	31
2.2.1. Colada	31
2.2.2. Laminación en caliente	32
2.2.3. Laminación en frío	32
2.2.4. Recocido Total	33
2.2.5. Recocido Parcial	33
2.2.6. Espesor final	34
3. Material y Métodos	35
3.1. Factores	35
3.1.1. Obtención de los datos	36
3.2. Métodos de análisis estadístico	37
3.3. Otros Análisis	40
3.3.1. Análisis Metalográfico	40
3.3.2. Análisis de dureza	41
3.3.3. Análisis de conductividad	42

3.4.	Muestras	43
3.4.1.	Grupo de Muestras A	43
3.4.2.	Grupo de Muestras B	43
3.4.3.	Grupo de Muestras C	43
3.4.4.	Grupo de Muestras D	43
3.4.5.	Grupo de Muestras E	44
4.	Resultados	45
4.1.	Relación individual entre las variables dependientes e independientes	45
4.2.	Efecto del Fe en relación con la Reducción Previa	50
4.2.1.	Análisis Metalográfico y de Dureza del efecto del Fe	54
4.3.	Efecto del Si	64
4.3.1.	Comprobación de la pérdida de Mg en solución sólida	64
4.3.2.	Microestructura	69
4.3.3.	Conductividad	71
4.4.	Imprecisión en la estimación del Límite Elástico	72
5.	Discusión	76
5.1.	Efecto del Si	76
5.2.	Efecto del Fe*RedP	78
5.3.	Imprecisión del Límite Elástico	80
5.4.	Multidependencia del Rm y el Rp_{0.2}	80
5.5.	Contradicción con otros estudios	82
5.5.1.	Aproximación Teórica	82
5.5.2.	Análisis estadístico	84
5.5.3.	Mejor precisión de esta tesis	85
5.5.4.	Otras investigaciones	85
5.6.	Propuestas finales	85
5.6.1.	Resistencia Mecánica	86
5.6.2.	Límite Elástico	86
5.6.3.	Otros factores	86
5.6.4.	Otras propiedades	87
5.6.5.	Beneficios económicos y Medioambientales	87
6.	Conclusiones	91
	Referencias	94
	Anexos	98
	Anexo A	99
	Tabla A1	99
	Anexo B	123

Tabla B1	123
Anexo C	138
Tabla C1	138
Anexo D	139
Anexo E	154
Tabla E1	154

Lista de Figuras

Figura 1: Micrografía de FESEM (400 aumentos) con detector de electrones retrodispersados (ABS) de una muestra de AA5754 en estado recocido total (Izquierda) donde se pueden observar siliciuros de magnesio (Mg_2Si) de color negro y fase α (Al-Fe-Mn-Si) de color blanco, junto a los microanálisis EDX de un Mg_2Si (Arriba Derecha) y un constituyente de la fase α (Abajo Derecha). (Vicent Fanconi, Gil Fernández-Marcote, & Ruiz-Bustanza, 2023).....	13
Figura 2: Micrografías ópticas (18 aumentos) mostrando la microestructura de grano (izq.) y de la distribución de segundas fases (dcha.) de un corte de la sección de la placa denominada corteza con un ataque electroquímico y un ataque de HF respectivamente donde se observa el efecto de la velocidad de solidificación, desde la superficie (arriba) hasta el comienzo de la zona equiaxial terminada la zona cortical (abajo). Cortesía de Cindal.	14
Figura 3: Micrografía óptica (20 Aumentos) en la que se observa la estructura de grano de la sección longitudinal de una bobina de aluminio tras la laminación en caliente con un ataque electroquímico. Cortesía de Cindal.....	15
Figura 4: Micrografías ópticas (175 aumentos) donde se observa la estructura de grano de la sección transversal de una muestra de aluminio en estado recocido total (izquierda), con una reducción intermedia (centro), y con una gran reducción (derecha) con un ataque electroquímico. Cortesía de Cindal.....	15
Figura 5: Micrografías ópticas (150 aumentos) donde se observa la estructura de grano de una sección longitudinal de un estado deformado, un estado que ha comenzado la recrystalización, un estado con una recrystalización avanzada y un estado totalmente recrystalizado con ataque electroquímico. (De izq. a derecha. de arr. abaj.) Cortesía de Cindal.....	16
Figura 6: Crecimiento de un núcleo dentro de una zona de deformación. (Humphreys & Hatherly, 1995)	17
Figura 7: Formación y crecimiento de grano por PSN según la cantidad de reducción de espesor en la laminación previa al recocido y el tamaño de partícula que estimula la nucleación. (Humphreys & Hatherly, 1995).....	18
Figura 8: Relación del grado de Deformación con la Resistencia Mecánica y el Límite Elástico en la aleación AA5754.	19
Figura 9: Relación orientativa entre el coeficiente de endurecimiento por deformación, n, y el Límite Elástico en la aleación AA5754 (Keeler, 2002).	20
Figura 10: Relación entre el diámetro medio de grano y la resistencia.	21
Figura 11: Relación entre Límite Elástico, Alargamiento y contenido de Mg en ciertas aleaciones. (Hatch, 1984).....	25
Figura 12: Densidad de dislocación por cm^2 vs cantidad de deformación en tres aleaciones de Al con distinto contenido de Mg. (Guyot & Raynaud, 1991).....	25
Figura 13: Variaciones de la resistividad del aluminio según el contenido de impurezas con aluminio a 20 K. (Dosdale & Morgan, 1974).....	29

Figura 14: Contribución de los átomos en solución sólida de cada elemento a la disminución de la conductividad de aluminio. (Karabay, 2008)	30
Figura 15: Solubilidad en solución sólida de varios elementos en el aluminio según la temperatura. (Davis, y otros, 1993).....	30
Figura 16: Imagen de una máquina de ensayos universales modelo Instron 5985.	36
Figura 17: Imagen de un equipo de preparación de muestras metalográficas.	40
Figura 18: Imagen de un Microscopio Óptico Leica Reichert Jung MEF3 A equipado con software LAS-X.	40
Figura 19: Imagen de un microscopio electrónico de Thermofisher FESEM modelo APREO 2.	41
Figura 20: Imagen de un microdurómetro Shimadzu HMV-2T.	42
Figura 21: Imagen de la medida mediante el software del microdurómetro Shimadzu HMV-2T (500 aumentos) del tamaño de una huella dejada por el punzón en una muestra de AA5754.	42
Figura 22: Imagen de un medidor de conductividad Foerster modelo Sigmatest D 2.068.	42
Figura 23: Datos de Resistencia Mecánica y Límite Elástico medidos frente a datos predichos mediante las regresiones individuales en el Grupo de Muestras A.....	47
Figura 24: Relación del contenido de Fe con la Resistencia Mecánica y el Límite Elástico en los datos del Grupo de Muestras A.	48
Figura 25: Datos de Resistencia Mecánica y Límite Elástico medidos frente a datos predichos por la regresión con Mg y Si.	49
Figura 26: Datos de Resistencia Mecánica y Límite Elástico medidos frente a datos predichos por la regresión con Mg, Si y Fe.	50
Figura 27: Relación entre la cantidad de reducción previa al recocido y el efecto del Fe en la Resistencia Mecánica y el Límite Elástico.	52
Figura 28: Datos de Resistencia Mecánica y Límite Elástico medidos frente a datos predichos por la regresión con Fe*RedP como variable independiente.	53
Figura 29: Datos de Resistencia Mecánica y Límite Elástico medidos frente a datos predichos por la regresión con Si, Mg y Fe*RedP como variables independientes.	54
Figura 30: Micrografías ópticas de la Muestra L con un 0,26% de Fe (izq.) y la Muestra H con un 0,36% de Fe (dcha.), arriba a 100 aumentos y debajo a 250 aumentos, ataque con ácido fluorhídrico.....	55
Figura 31, Micrografías ópticas (170 aumentos) mostrando la estructura de grano de la sección longitudinal de cada una de las reducciones de las muestras L (izquierda) y H (Derecha). Desde arriba hasta abajo 7, 6, 4'5, 3, 1 y 0'1 mm de espesor.....	57
Figura 32: Relación entre el volumen de grano y la Crudeza en el Grupo de Muestras D.	58

Figura 33: Relación entre la inversa de la raíz cuadrada del diámetro equivalente medio de grano con Fe*RedP en el Grupo de Muestras D.....	59
Figura 34: Relación entre la inversa de la raíz cuadrada del diámetro longitudinal medio de grano con Fe*RedP en el Grupo de Muestras D.....	60
Figura 35: Relación entre la inversa de la raíz cuadrada del diámetro equivalente medio de grano con Fe*(RedP-20%) en el Grupo de Muestras D.....	60
Figura 36: Dureza vs Crudeza Previa al recocido total final para los dos contenidos de Fe de las muestras L (0,36%) y H (0,26%).	61
Figura 37: Relación entre la dureza y la inversa del diámetro longitudinal medio en las muestras analizadas.	62
Figura 38: Relación entre la dureza y la Fe*RedP en las muestras analizadas.....	62
Figura 39: Relación entre la dureza y la Fe*(RedP-20%) en las muestras analizadas.....	63
Figura 40: Datos de Resistencia Mecánica y Límite Elástico medidos frente a datos predichos por la regresión con Si, Mg y Fe*(RedP-20%) como variables independientes.	64
Figura 41: Micrografía de FESEM (3000 aumentos) con detector de electrones retrodispersados (ABS) de la muestra E2 (arriba), junto a un microanálisis EDX de una sección de la matriz de la muestra E2 (abajo).	65
Figura 42: Déficit de Mg en matriz vs contenido de Si en el grupo de muestras E, con los datos del artículo previo representados con un círculo vacío.....	67
Figura 43: Esquema de las zonas analizadas en la muestra E11.....	68
Figura 44: Contenido de Mg en matriz a distintas profundidades del espesor de la muestra E11, asignando una profundidad de 0 mm al centro de la sección.	68
Figura 45: Relación entre el contenido de Si y la fracción en volumen media de Mg ₂ Si en el grupo de muestras E.	70
Figura 46: Relación entre el déficit de Mg en matriz y la fracción en volumen de Mg ₂ Si en el grupo de muestras E.	70
Figura 47: Conductividad vs contenido de Si en las muestras del Anexo C.	71
Figura 48: Conductividad vs Resistencia Mecánica (izq.) y contenido de Si vs a la Resistencia Mecánica en las muestras del Anexo C.	72
Figura 49: Conductividad vs Resistencia Mecánica (izq.) y contenido de Si vs a la Resistencia Mecánica en las muestras del Anexo C.	72
Figura 50: La Resistencia Mecánica (izq.) y el Límite Elástico (dcha.) frente al coeficiente de endurecimiento por deformación, en las muestras del anexo B.	73

Figura 51: Datos del coeficiente de endurecimiento por deformación n medidos frente a datos predichos por la regresión con R_m y $R_{p0.2}$ como variables independientes en el Grupo de Muestras B.....74

Figura 52: Datos de Límite Elástico medidos frente a datos predichos por la regresión con Si, Mg y Fe (izq.) como variables independientes y añadiendo n a las variables independientes (dcha.) en el Grupo de Muestras B.....75

Lista de Tablas

Tabla 1: Composición AA5754 según Norma EN573-3 (AENOR, 2023).	7
Tabla 2: Estados AA5754. Norma EN (AENOR, 2017).....	12
Tabla 3: Matriz de correlación (R) de las variables estudiadas con los datos del Anexo A.....	45
Tabla 4: Coeficientes de las regresiones lineales entre los factores y las variables dependientes.	46
Tabla 5: Resultado de la Regresión con los contenidos de Si y Mg como variables independientes. ...	48
Tabla 6: Resultado de la Regresión con los contenidos de Si, Mg y Fe como variables independientes.	49
Tabla 7: Correlación del contenido de Fe con la Resistencia Mecánica y el Límite de Elástico en cada uno de los Grupos del Anexo D.....	50
Tabla 8: Datos sobre el efecto del Fe en la Resistencia Mecánica y el Límite Elástico según la regresión en cada uno de los grupos del Anexo D.	51
Tabla 9: Datos sobre el efecto de Fe*RedP en la Resistencia Mecánica y el Límite Elástico según la regresión realizada.	52
Tabla 10: Resultado de la Regresión con los contenidos de Si, Mg y Fe*RedP como variables independientes.	54
Tabla 11: Datos estadísticos de las partículas en las muestras metalográficas L y H.	56
Tabla 12: Datos estadísticos de las partículas de fase α en las muestras metalográficas L y H.	56
Tabla 13: Datos del tamaño de grano medido para cada uno de los espesores finales de las dos muestras analizadas.	58
Tabla 14: Medidas de dureza media para cada uno de los espesores finales de las dos muestras analizadas.	61
Tabla 15: Resultado de la Regresión con los contenidos de Si, Mg y (Fe*RedP-20%) como variables independientes en el Grupo de Muestras A.....	63
Tabla 16: Contenidos de Mg detectados en la matriz de las muestras que constan en el anexo E.	66
Tabla 17: Contenido de Mg en matriz detectado en cada zona, asignando una profundidad de 0 mm al centro de la sección.....	68
Tabla 18: Conductividad y propiedades mecánicas del Grupo de Muestras C.....	71
Tabla 19: Resultados de la regresión realizada para el Límite Elástico con el Si, Fe y Mg como únicas variables independientes y añadiendo n.	74
Tabla 20: Ajuste (R^2) y desviación típica (σ) de las regresiones realizadas en el Grupo de Muestras A para la Resistencia Mecánica y el Límite Elástico.....	81

Tabla 21: Donde el Escenario 1 se refiere a la situación inicial con un 20% de reciclaje, el Escenario 2 con un 80% de reciclaje sin medidas correctoras y el Escenario 3 con un 80% de reciclaje con medidas correctoras.90

1. Introducción

La industria de la transformación del aluminio produce aleaciones que deben cumplir con ciertas características mecánicas, metalúrgicas, químicas, superficiales y dimensionales, para su posterior procesamiento por la industria de acabados de productos de aluminio.

Esta industria obtiene su materia prima de dos fuentes; la industria extractiva que proporciona aluminio primario y el reciclaje que proporciona aluminio secundario.

La producción de aluminio primario requiere una gran cantidad de energía, genera residuos y emisiones, y tiene un impacto medioambiental elevado, fundamentalmente derivado de la extracción de la bauxita (movimiento de tierras, molienda, transporte, etc.), la producción de alúmina (generación de barros rojos) y la electrólisis ígnea final que es un proceso intensivo en el consumo de energía, todo ello acarrea un elevado coste económico. Por el contrario, la obtención de aluminio secundario supone un gran ahorro en el consumo energético (aproximadamente un 95%), así como una reducción de residuos, emisiones y, por tanto, de costes medioambientales.

Estas ventajas, sumadas a la creciente demanda de aluminio, la limitación de los recursos naturales, el impulso hacia una economía circular (Naciones Unidas, 2019) y la lucha contra el cambio climático, han llevado tanto a la industria de transformación como a distintas administraciones a promover un mayor uso de aluminio reciclado, pasando de menos de un 30% a valores cercanos al 90% en numerosos casos (Raabe, y otros, 2022) (Modaresi, Løvik, & Müller, 2014) (Naciones Unidas, 2019) (Dai, Wang, Chen, & Liu, 2019).

Sin embargo, como ocurre con cualquier material reciclado, el aluminio secundario presenta contaminaciones que alejan su composición de los niveles de pureza del aluminio primario. De este modo, el aumento del uso de aluminio reciclado ha conllevado un aumento del contenido de impurezas hasta niveles desconocidos anteriormente.

En este contexto, comprender en qué medida afectan dichas impurezas a las propiedades de los productos de aluminio se ha convertido en una tarea fundamental para garantizar la calidad del material transformado.

Para poder analizar cómo influye este efecto, es necesario, entender en primer lugar algunos fundamentos básicos de la metalurgia del aluminio.

1.1. Fundamentos teóricos

En este apartado se introducirán los conceptos básicos de la producción de aleaciones de aluminio, sus características, propiedades y mecanismos que sean relevantes para esta investigación.

1.1.1. Producción Industrial

El Aluminio se extrae de la Bauxita mediante el proceso Bayer en forma de alúmina (Al_2O_3), este proceso tiene un fuerte impacto medioambiental por la gran cantidad de residuos contaminantes que genera bajo la forma de “Barros Rojos”. A continuación, la alúmina se transforma en aluminio mediante el proceso Hall-Heroult que implica un gran coste energético. Con este proceso para obtener 1 tonelada de aluminio primario se necesitan aproximadamente dos toneladas de alúmina, obtenidas previamente a partir de cuatro de bauxita (con los costes mineros que implican) y 20 MWh (la gran mayoría en la extracción del aluminio de la alúmina), generando 15 toneladas de emisiones equivalentes de CO_2 (International Aluminium Institute, 2024) y más de 2 toneladas de barros rojos (Agrawal & Dhawan, 2021).

Teniendo en cuenta que el International Aluminum Institute estima en 70 millones de toneladas la producción mundial de aluminio primario en el año 2023 (International Aluminium Institute, 2024), se puede aproximar que se extrajeron 280 millones de toneladas de bauxita, se consumieron más de 1.400 TWh de energía, se depositaron más de 140 millones de toneladas de barros rojos y se emitieron más de 1.000 millones de toneladas equivalentes de CO_2 . La masa anual de barros rojos equivaldría a 100 pirámides de Guiza de estos residuos contaminantes (Handwerk, 2022), la energía alimentaría energéticamente España durante más de 5 años (Red Eléctrica de España, 2024), y las emisiones supusieron el 4%¹ de las emisiones vinculadas a la energía a nivel mundial de CO_2 en ese año, el 93%² de la emisiones totales de la industria del aluminio (Statista GmbH, 2024) (International Energy Agency, 2024) (International Aluminium Institute, 2024).

El aluminio secundario, sin embargo, al obtenerse por fusión de chatarra en un horno, tiene un coste energético al menos 20 veces menor, no genera barros rojos (sus otros residuos son mucho menores) y tiene unas emisiones menores a dos toneladas de CO_2 equivalente por tonelada de aluminio. (International Aluminium Institute, 2024) (Li, Zhang, Niu, & Yue, 2021)

Debido a este ahorro se están haciendo grandes esfuerzos por sustituir el aluminio primario por secundario en la producción industrial, pasando el reciclaje de un 9% en 1960 a un 67% en

¹ Porcentaje calculado sobre un total de emisiones vinculadas a la energía en 2023 de 37,7 Gt. (International Energy Agency, 2024)

² El International Aluminum Institute estimó que en el año 2023 la industria del aluminio emitió 1116 millones de toneladas de CO_2 equiv. siendo responsable de 1033 millones la producción de aluminio primario.

2021 del aluminio utilizado (International Aluminium Institute, 2023) (Constellium, 2022) (Norsk Hydro ASA, 2021) (Novelis, 2022). Hoy en día el aluminio reciclado alcanza el 100% en algunas empresas (Grupo Baux, 2024)³.

Este reciclaje, como el de toda materia secundaria, compromete la pureza de la composición.

A continuación, se explica como el reciclaje del aluminio puede dar lugar a contaminaciones.

1.1.2. Reciclaje del aluminio

La chatarra se divide en primer lugar, en chatarra interna y externa. La chatarra interna es el rechazo del proceso de la propia planta, por ejemplo, el recorte. La chatarra externa procede del exterior de la planta y se divide en preconsumo (*pre-consumer*) y posconsumo (*post-consumer*) dependiendo de si ha llegado o no a su uso final (ASERAL, 2012).

Las contaminaciones pueden proceder de la mezcla de la chatarra de aluminio con otros residuos (esto es especialmente relevante en la chatarra posconsumo), de elementos que se adicionan físicamente al aluminio transformado para conseguir las características deseadas del producto final, elementos como la pintura en el aluminio pintado que se encuentran tanto en la chatarra pre como posconsumo, y también de los aleantes e impurezas que tenía esa aleación de aluminio en su composición al salir de la fundición.

De este último grupo proceden la mayor parte de las contaminaciones objeto de esta tesis. Para tratar de conocer su influencia se han de entender los diferentes tipos de aleaciones de aluminio que existen.

1.1.3. Aleaciones de aluminio

Las aleaciones del aluminio se dividen en dos grupos según su proceso de fabricación: las aleaciones de Moldeo y las aleaciones de Forja.

1.1.3.1. Aleaciones de Moldeo

Las aleaciones de moldeo están destinadas a la fabricación de productos cuya forma final se obtiene en el molde de fundición, en su mayoría tienen un alto contenido en aleantes (en algunos casos por encima del 20%), entre los que destaca el Si (Altenpohl, 1982) (Modaresi, Løvik, & Müller, 2014). La American Aluminum Association (AAA)⁴ las denomina con un formato: XXX.X donde cada carácter es un dígito (Altenpohl, 1982).

³ Se entiende que se excluyen los aleantes en este 100%.

⁴ En este estudio se utilizará la nomenclatura de la Aluminum Association (AAA).

1.1.3.2. Aleaciones de Forja

Las aleaciones de forja son aquellas que se venden como chapas o bobinas y que alcanzan esta forma mediante un esfuerzo mecánico. Se denominan con un formato XXXX según la AAA. Las aleaciones se agrupan en *series* y estas se designan con el primer dígito, habiendo 8 series relevantes para este estudio:

1xxx: *miles*, aleaciones de pureza con un mínimo de aluminio del 99% en peso.

2xxx: *dos miles*, con Cu como aleante principal.

3xxx: *tres miles*, con Mn.

4xxx: *cuatro miles*, con Si.

5xxx: *cinco miles*, con Mg.

6xxx: *seis miles*, con Si y Mg.

7xxx: *siete miles*, con Zn.

8xxx: *ocho miles*, con otros elementos no incluidos en los grupos anteriores, como el Fe y el Li.

1.1.4. Contaminaciones

Como se citó previamente, las contaminaciones pueden proceder de tres diferentes fuentes de impurezas:

- Los residuos que no son de aluminio y que se han mezclado con los residuos de aluminio y que pueden aportar cualquier tipo de elemento a la composición de la chatarra.
- La transformación de los productos semielaborados de aluminio después de que estos hayan salido de la fundición a los que se adicionan otros elementos, como por ejemplo los recubrimientos.
- Las impurezas y aleantes que ya estuvieran presentes en el metal desde su solidificación, destacando los aleantes principales: Cu, Mn, Si, Mg, Zn, Fe y Li. En el caso del Fe y el Si también se encuentran como impurezas en el aluminio primario al estar presentes en la bauxita. La influencia del Li, debido a las dinámicas del mercado del aluminio y los flujos de chatarra, se ha considerado despreciable. (Modaresi, Løvik, & Müller, 2014)

En el reciclaje se eliminan las contaminaciones de la chatarra mediante dos procesos: la Segregación y la Purificación.

1.1.4.1. Segregación

La segregación consiste en la separación física de las contaminaciones presentes en la chatarra.

La segregación ideal sería aquella que permitiera utilizar una chatarra compuesta exclusivamente por la aleación deseada. Sin embargo, este escenario es poco común debido a la limitada disponibilidad de chatarra clasificada en el mercado y a la falta de sistemas industriales ampliamente implementados que permitan separar por tipo de aleación. Aunque existen tecnologías modernas, como el sistema LIBS (espectroscopía de descomposición inducida por láser), capaces de clasificar por series de aleación (Brooks, Gaustad, Gesing, Mortvedt, & Freire, 2019), la separación suele realizarse según el tipo de chatarra (UBC, perfil, chapa, moldeo, litografía y, especialmente, chatarra interna y preconsumo). Esta clasificación permite estimar la composición química al conocer las aleaciones utilizadas en los productos originales, pero no garantiza una separación por aleación específica. Por tanto, este ideal rara vez se alcanza en la práctica industrial.⁵

Por ello, a pesar de los numerosos desarrollos recientes que se están llevando a cabo, y que se espera que en un futuro próximo permitan estimar la composición química con mayor precisión (Brooks, Gaustad, Gesing, Mortvedt, & Freire, 2019), en la actualidad, la chatarra que se envía a fundición suele contener una cantidad no despreciable de aleaciones distintas a la que se desea fabricar. Esto convierte a los elementos aleantes presentes en dichas aleaciones en las principales impurezas del nuevo producto.

Cabe destacar, sin embargo, que mediante la segregación es posible eliminar con gran eficacia la chatarra que no es de aluminio.

1.1.4.2. Purificación

La purificación consiste en la separación física y/o química de los elementos indeseables presentes en la mezcla en estado líquido o semisólido. Algunos componentes, como los que provienen de pinturas o los óxidos de aluminio, se eliminan en gran medida junto con la escoria y los gases durante las reacciones que acompañan al proceso de fundición del aluminio. Sin embargo, otros elementos son extremadamente difíciles de separar del metal fundido, ya que no existen métodos ni económica ni industrialmente viables para su eliminación. Este es el caso, en particular, del Si. (Brooks, Gaustad, Gesing, Mortvedt, & Freire, 2019) (Curtolo, Rodríguez-Rojas, Friedrich, & Friedrich, 2021) (Kieft, y otros, 2004)

⁵ Un caso paradigmático de segregación ideal es el UBC. (Paraskevas, Kellens, Dewulf, & Duflou, 2015)

1.1.4.3. Mercado de Chatarra

Por último, es importante tener en cuenta que una de las causas fundamentales de la contaminación del metal proviene de la disponibilidad y el precio de la chatarra en el mercado. Incluso si se dispusiera de un sistema de segregación perfecto, si el mercado solo ofrece, al precio considerado aceptable por el departamento de adquisición, chatarra de una determinada aleación, será esta la que finalmente se utilice en el horno de fundición, por inadecuada que pueda ser su composición química.

Así, las dificultades asociadas a la segregación y la purificación, junto con el creciente uso de chatarra y su disponibilidad limitada (Modaresi, Løvik, & Müller, 2014), hacen prever que los altos niveles de impurezas continuarán, de forma inevitable, a corto y medio plazo en la mayoría de las aleaciones de aluminio. Esto, a su vez, implicará que la chatarra del futuro esté aún más contaminada que la actual, al estar compuesta por productos que hoy en día salen de las fundiciones, lo que agravará aún más la situación. (Van den Eynde, y otros, 2022)

A continuación, se analiza el caso específico de la aleación objeto de este estudio.

1.1.5. Aleación AA5754

La AA5754 es una aleación de la serie 5xxx y supone más del 10% de la producción de aluminio laminado de España⁶. Fue registrada en 1970 en los Estados Unidos de América, como una aleación con un contenido máximo en peso⁷ de 0,40% de Si, 0,40% de Fe, 0,10 % de Cu, 0,50% de Mn, 0,30% de Cr, 0,20% de Zn, 0,15% de Ti y 0,05% como máximo de cualquier otra impureza, además, la suma de todas las demás impurezas debe ser inferior a un 0,15% del contenido en peso. La suma de los contenidos de Cr y Mn debe encontrarse entre el 0,10% y el 0,60%, y el contenido en Mg entre el 2,60% y el 3,60%. Siendo el contenido mínimo de aluminio un 94,40% en peso (The Aluminum Association, 2009). Todo esto puede apreciarse en la Tabla 1.

En este trabajo se la denominará aleación AA5754, que es como esta aleación está registrada en la Aluminum Association (AAA), pero también recibe otras denominaciones como EN AW-AA5754 en la norma europea, que químicamente también la designa AlMg3, en el sistema unificado de numeración de Metales y Aleaciones (UNS) es A9AA5754, y en la norma francesa AFNOR se conoce como A-G3M.

⁶ Aludium produce más de 50000 toneladas de AA5754 al año, y según Aselam, la Asociación de Empresas Laminadoras de Aluminio de España la capacidad de producción de aluminio laminado nacional es de 500000 toneladas. (El Economista, 2024)

⁷ A partir de aquí siempre que se indique un porcentaje de un elemento se referirá a su contenido en peso.

Como todas las aleaciones de la serie 5xxx se distingue por su buena resistencia a corrosión y soldabilidad, con unas altas propiedades mecánicas (Resistencia Mecánica y Límite Elástico) y una considerable ductilidad.

Tabla 1: Composición AA5754 según Norma EN573-3 (AENOR, 2023).

Aleación	Aleantes e impurezas principales									Otras impurezas		Al
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Mn+Cr	Cada una	Todas	
5754	≤0,40	≤0,40	≤0,10	≤0,50	2,6-3,6	≤0,30	≤0,20	≤0,15	0,10-0,60	≤0,05	≤0,15	Resto

1.1.5.1. Impurezas en la Aleación AA5754

Al tener unos límites de impurezas relativamente altos se puede utilizar una gran cantidad de chatarra en su producción, llegando a producirse en algunas fundiciones con contenidos de reciclaje superiores al 75% (Aludium, 2023).

Esta aleación, según continúen los ciclos de reciclaje, más cargada estará de impurezas, tendiendo hacia el límite que describe la Ecuación 1 si suponemos que la chatarra externa tiene un contenido de impurezas constante. (Vicent Fanconi, Gil Fernández-Marcote, & Ruiz-Bustanza, 2023)

$$%I \approx \frac{\%I_{CE} * \%CE + \%I_{Prim} * \%Prim}{1 - \%CI}$$

Ecuación 1: Progresión del contenido de impurezas por el Reciclaje.
(Vicent Fanconi, Gil Fernández-Marcote, & Ruiz-Bustanza, 2023)

%I es el contenido de la impureza al que tenderá la producción, *%I CE* es el contenido medio de la impureza presente en la chatarra externa utilizada, *%CE* es el porcentaje medio de chatarra externa utilizada para la fabricación de la aleación, *%I Prim* es el contenido medio de la impureza presente en el aluminio primario utilizado, *%Prim* es el porcentaje medio de primario utilizado y *%CI* el de la chatarra interna.

En este estudio tomaré como referencia los datos de la empresa Aludium que produce anualmente alrededor de 50.000 toneladas de esta aleación y es representativa del resto de empresas del sector que producen esta aleación para productos laminados con un alto contenido de reciclaje.

Los principales contaminantes presentes en esta aleación son el Si, Fe, Cu y Zn, (en tanto en cuanto el Mg es el aleante principal, y el Mn se utiliza a menudo como aleante secundario).

1.1.5.1.1. Cu y Zn

El Cu y el Zn pueden proceder del reciclaje de chatarras de las series 2xxx y 7xxx, aleaciones con altos contenidos de estos y de aleaciones de Zn. Debido a que la disponibilidad de las series 2xxx y 7xxx en chatarra para productos laminados es muy limitada, y a que la cantidad de estos elementos presente en otras aleaciones es muy baja (excepto en el caso de las aleaciones de moldeo), las principales fuentes de Cu y Zn son las aleaciones de moldeo y las aleaciones de Zn; por lo que una buena segregación logra mantener bajos los contenidos de ambos elementos.

1.1.5.1.2. Si

El Si se encuentra como impureza ya en el aluminio primario, la calidad industrial de primario más popular, el P1020 (ISO, 2003), tiene hasta un 0,10% de Si. Sin embargo, el Si también se encuentra en contaminaciones de chatarras de otros metales, en aleaciones de moldeo, en aleaciones de la serie 4xxx y, principalmente, de la serie 6xxx. (Capuzzi & Timelli, 2018)

Mientras que todos los demás son evitables por una segregación ideal y la serie 4xxx es minoritaria, la serie 6xxx por su gran disponibilidad en el mercado de la chatarra es uno de los aportes principales de chatarra externa para la fabricación de la aleación AA5754. (Modaresi, Løvik, & Müller, 2014)

Como la chatarra de esta serie tiene un contenido medio de Si cercano al 0,60% y actualmente no existen métodos industrial y económicamente viables para reducir su contenido, los niveles de Si en la AA5754 están aumentando conforme aumenta el reciclaje siguiendo la Ecuación 1, tal como se ve en el caso concreto de la empresa Aludium, donde los contenidos de Si pasaron debido al aumento del reciclaje de un 0,05%-0,10% a un 0,25%-0,30% en parte de su producción de AA5754 en menos de 4 años. (Vicent Fanconi, Gil Fernández-Marcote, & Ruiz-Bustinza, 2023)

1.1.5.1.3. Fe

El Fe también se encuentra en el aluminio primario, hasta un 0,20% en la calidad P1020 (ISO, 2003), además de encontrarse en otras aleaciones y en contaminaciones con piezas de metales férricos de modo que su contenido ha ido subiendo con el aumento del reciclaje, como se ve en el caso concreto de la empresa Aludium donde en el mismo periodo pasó de contenidos entre 0,23%-0,26% a 0,32%-0,34% en los mismos productos de la aleación AA5754 (Vicent Fanconi, Gil Fernández-Marcote, & Ruiz-Bustinza, 2023). Este incremento es debido a que aún no se han extendido los sistemas de purificación del Fe, por lo que estos altos niveles no disminuirán a corto plazo (MIMITech, 2023).

1.1.5.1.4. Si y Fe, impurezas inevitables en la AA5754

El Si y el Fe son las dos impurezas cuya concentración ha aumentado más significativamente en la aleación AA5754, y no se espera que disminuyan a corto plazo debido a la actual ausencia de sistemas efectivos de purificación en la industria. Además, ambos elementos constituyen las principales impurezas del aluminio primario, por lo que, incluso si se produjeran cambios radicales en la disponibilidad y composición de la chatarra, seguirán estando presentes en esta aleación.

El continuo aumento de estas dos impurezas, junto con su influencia en las propiedades mecánicas del material, ha sido el principal motivo de la investigación desarrollada en este trabajo. Para comprender dicho efecto, se describirá en primer lugar el producto específico de la aleación AA5754 que ha sido objeto de estudio.

1.1.5.2. *Proceso de producción de la aleación AA5754*

La aleación AA5754 pertenece a las aleaciones conocidas como de forja no tratables. Las aleaciones de forja se dividen en aleaciones Tratables y No Tratables, según si son susceptibles de endurecerse por precipitación mediante un tratamiento térmico o no. (Hatch, 1984)

El proceso de producción varía en función del estado de dureza que se desee obtener. Los estados de dureza hacen referencia al conjunto de tratamientos termomecánicos finales que se le dan al metal, con el objetivo de alcanzar determinadas propiedades mediante la modificación de la forma, el tamaño y la disposición de su microestructura.

A continuación, se esbozará el proceso de fabricación de aleaciones no tratables tal como se lleva a cabo en la empresa Aludium y en gran parte del sector.

El metal fundido se cuela por colada vertical (Direct Chill Casting) como una placa con forma de prisma rectangular de aproximadamente medio metro de espesor, a continuación se calienta el metal por encima de 500 °C (precaldeo) para poder laminar en caliente, este calentamiento también puede servir para mejorar la microestructura de la placa, cuando el metal ha alcanzado la temperatura suficiente en todo el volumen de la placa se procede a laminar hasta que se aproxima al espesor del producto final (a menos de 12 mm), pasando de una placa de, aproximadamente, seis metros de longitud a una bobina de medio kilómetro. Durante esta laminación en caliente, al realizarse a una temperatura superior a la de recristalización, las dislocaciones⁸ producidas en la red de átomos por la deformación se han recuperado casi por completo, produciéndose una recristalización dinámica.

En este momento el metal se encontraría en estado recocido total (O) estando completamente recristalizado. El metal está recristalizado cuando ha sido sometido a una temperatura tal que

⁸ Se entiende por dislocación una discontinuidad en la estructura de un cristal.

ha permitido generar nuevos granos libres de deformación, minimizando su energía libre con una forma equiaxial o próxima. El estado de recocido total también se define por ser aquel en el que el metal tiene una menor Resistencia Mecánica, un menor Límite Elástico y un mayor Alargamiento.

A continuación, se procede a la laminación en frío, muy por debajo de la temperatura de recristalización. El objetivo de esta laminación no es solo conseguir el espesor final del producto, sino principalmente crear dislocaciones en la red que no se puedan recuperar por la baja temperatura y dar lugar a un grano alargado. Con esto aumenta la resistencia y se reduce el Alargamiento, por ello se dice que se endurece el metal.

Si el proceso acaba en un laminado en frío, el producto estaría en un estado no recristalizado o estado duro, H1X, el segundo dígito indicaría el grado de endurecimiento producido por la laminación en frío desde la última recristalización, por ejemplo, H18 sería el máximo posible; H14 la mitad del endurecimiento del H18, H12 un cuarto, existiendo un estado H19 que corresponde a un estado extra-duro. Cuanto más duro sea el estado alcanzado, mayores serán su Resistencia Mecánica y Límite Elástico, y menor su Alargamiento. (Altenpohl, 1982) (Hatch, 1984)

A continuación, se puede conducir la bobina a un horno, donde si alcanza de nuevo la temperatura de recristalización durante el tiempo suficiente, se produce un recocido total, obteniéndose así el estado O (estado completamente recocido).

Pero si se somete a una temperatura inferior a la de recristalización, pero suficiente como para que se recuperen las dislocaciones intragranulares, el recocido solo sería parcial, denominado estado H2X, donde el segundo dígito también significa el grado de endurecimiento (H22 sería un cuarto del endurecimiento máximo posible.). En este caso, aunque este recocido parcial no disminuya sensiblemente la Resistencia Mecánica o la resistencia a la rotura, sí que afecta de manera considerable al Límite Elástico y al Alargamiento: el primero disminuye y el segundo aumenta en comparación con los estados endurecidos.

Esto se debe a que en una primera deformación se abandona la deformación elástica cuando la tensión aplicada consigue producir dislocaciones permanentes. Una vez alcanzado este punto, el Límite Elástico se eleva hasta la tensión necesaria para producir nuevas dislocaciones permanentes. Cuando se realiza un recocido parcial se proporciona la energía necesaria para que algunas de estas dislocaciones se reordenen, por lo que el Límite Elástico disminuye, ya que ahora se necesita una tensión menor que antes para generar de nuevo dislocaciones permanentes.

Si en el horno, en vez de alcanzar la temperatura del recocido parcial, el metal se calienta sensiblemente por debajo de esta (100-200 °C), se trata de una estabilización que busca liberar tensiones intragranulares dando lugar a una dureza ligeramente inferior a la del estado duro. El

resultado es el denominado estado estabilizado o H3X, donde el segundo dígito indica el grado de endurecimiento (H32 sería un cuarto del endurecimiento total posible). (Altenpohl, 1982) (Hatch, 1984)

1.1.5.3. Estados de la Aleación AA5754

Este es el esquema básico de producción, que puede presentar variaciones dependiendo de las necesidades específicas del proceso o los requisitos del producto final. Por ejemplo, es común realizar un recocido intermedio para facilitar el laminado en frío de un metal que, debido a una deformación previa, se haya vuelto excesivamente duro.

Cada planta industrial tiene sus propias variantes de cada proceso y en ocasiones les asigna denominaciones internas. A nivel general, puede afirmarse que una aleación de forja no tratable térmicamente, como la AA5754, puede encontrarse en los estados O, H1X, H2X o H3X.

Los estados se definen según norma por las propiedades que dan al producto como se muestra para el caso de la aleación AA5754 en la Tabla 2.

En esta Tesis se estudiará el estado recocido total (O) de la aleación AA5754.

Tabla 2: Estados AA5754. Norma EN (AENOR, 2017)

Estado de Tratamiento	Espesor Nominal (mm)		Resistencia a tracción R_m (MPa)		Límite Elástico $R_{p0,2}$ (MPa)	Alargamiento A_{50} (%)
	Desde	Hasta	Mín.	Max.	Mín.	Mín.
O	0,2	0,5	190	240	80	12
	0,5	1,5				14
	1,5	3				16
	3	6				18
	6	12,5				18
H12	0,2	0,5	220	270	170	4
	1,5	3				6
	6	12,5				9
H14	0,2	0,5	240	280	190	3
	1,5	3				4
	6	12,5				5
H16	0,2	0,5	265	305	220	2
	0,5	1,5				2
	3	6				3
H18	0,2	0,5	290	-	250	1
	0,5	1,5				2
	1,5	3				2
H22	0,2	0,5	220	270	130	7
	1,5	3				10
	6	12,5				10
H24	0,2	0,5	240	280	160	6
	1,5	3				7
	6	12,5				10
H26	0,2	0,5	265	305	190	4
	0,5	1,5				4
	3	6				6
H28	0,2	0,5	290	-	230	3
	0,5	1,5				3
	1,5	3				4
H32	0,2	0,5	220	270	130	7
	1,5	3				10
	6	12,5				10
H34	0,2	0,5	240	280	160	6
	1,5	3				7
	6	12,5				10
H36	0,2	0,5	265	305	190	4
	1,5	3				5
	3	6				6
H38	0,2	0,5	290	-	230	3
	0,5	1,5				3
	1,5	3				4

1.1.5.4. Microestructura de la aleación AA5754

La composición química del metal y el proceso de fabricación empleado están relacionados con las propiedades mecánicas del producto a través de las modificaciones que llevan a cabo en su microestructura. Así, para comprender el efecto del Si y el Fe en la aleación AA5754, es necesario explicar primero los aspectos fundamentales de su microestructura.

La microestructura de esta aleación consiste en una matriz de aluminio con un alto porcentaje de Mg en solución sólida y precipitados intergranulares e intragranulares.

Los precipitados son principalmente constituyentes de hierro-manganeso (fase α : Al-(Fe,Mn)-Si), siliciuros de magnesio (Mg_2Si) y precipitación fina y dispersoides de Fe-Mn (Al_6FeMn , Al_3FeMn) y que pueden estar acompañados de precipitados y dispersoides de fase α , siendo la fase α la que tiene la mayor temperatura de precipitación y los precipitados Fe-Mn la menor. En cuanto al tamaño, los precipitados de mayor tamaño suelen ser los constituyentes de la fase α seguidos de los siliciuros de magnesio y los más pequeños los precipitados de Fe y Mn. (Mondolfo, 1976)

La presencia de otros elementos como el Cu y el Cr da lugar a otras fases, pero la microestructura anterior sería la más representativa de esta aleación.

En la Figura 1, se muestra una micrografía típica de la aleación AA5754 en estado recocido total.

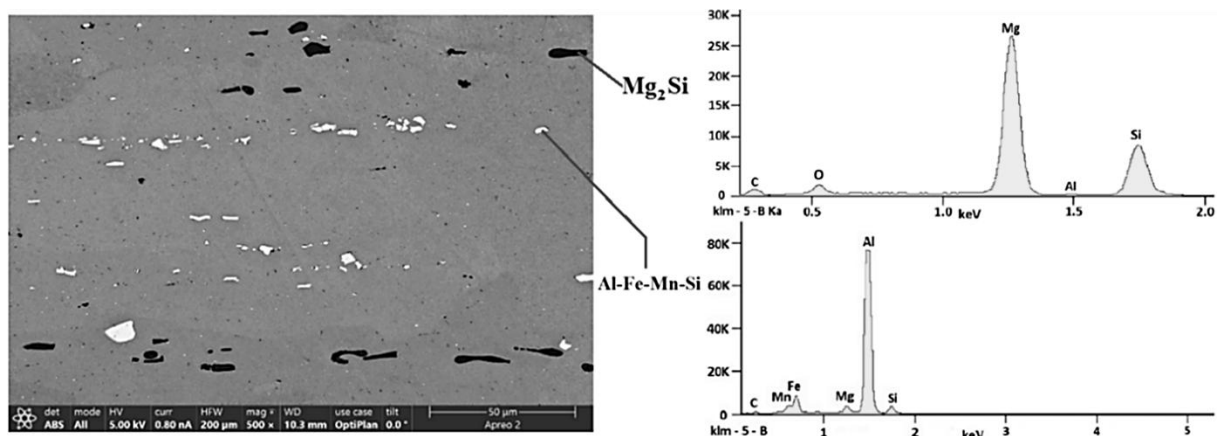


Figura 1: Micrografía de FESEM (400 aumentos) con detector de electrones retrodispersados (ABS) de una muestra de AA5754 en estado recocido total (Izquierda) donde se pueden observar siliciuros de magnesio (Mg_2Si) de color negro y fase α (Al-Fe-Mn-Si) de color blanco, junto a los microanálisis EDX de un Mg_2Si (Arriba Derecha) y un constituyente de la fase α (Abajo Derecha). (Vicent Fanconi, Gil Fernández-Marcote, & Ruiz-Bustinza, 2023)

El metal al salir de la colada contiene numerosos defectos entre los que destacan las segregaciones, otro es la gran heterogeneidad del tamaño de grano que varía mucho en toda la sección de la placa de colada, tal y como se observa en la Figura 2, esto se debe a la diferente velocidad de solidificación a lo largo del espesor de la placa. Mediante los tratamientos térmicos posteriores (homogeneización y precaldeo), la laminación y el saneamiento se logra tanto homogeneizar el tamaño de grano como reducir las segregaciones.

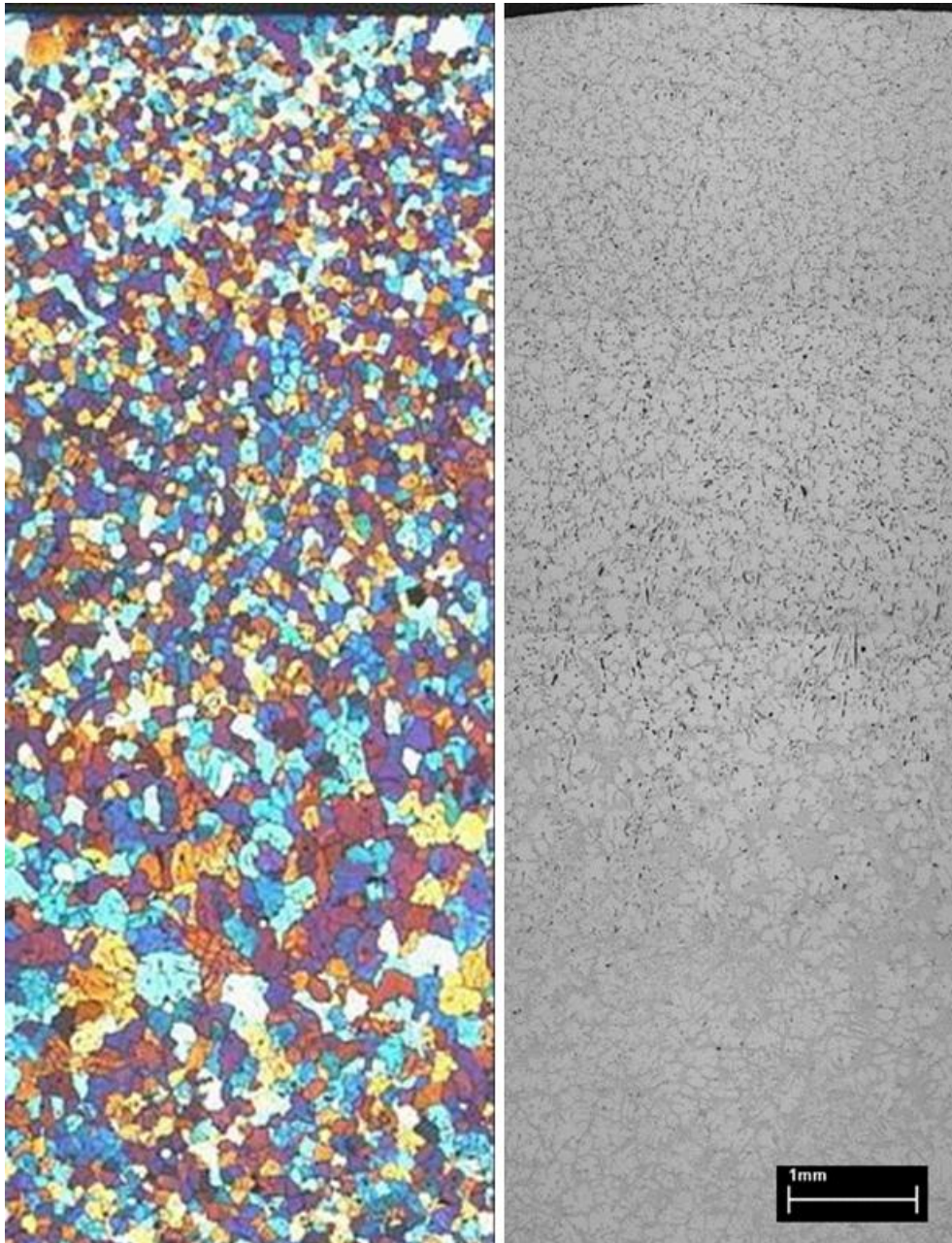


Figura 2: Micrografías ópticas (18 aumentos) mostrando la microestructura de grano (izq.) y de la distribución de segundas fases (dcha.) de un corte de la sección de la placa denominada corteza con un ataque electroquímico y un ataque de HF respectivamente donde se observa el efecto de la velocidad de solidificación, desde la superficie (arriba) hasta el comienzo de la zona equiaxial terminada la zona cortical (abajo). Cortesía de Cindal.

Tras la laminación en caliente el metal, mucho más homogéneo que después de la colada, presenta una estructura de grano heterogénea a lo largo de su espesor debido a los distintos gradientes de temperatura tras la última pasada del laminador en caliente, dando lugar a lo que se conoce como una estructura “sándwich” (Figura 3). Se puede observar un grano pequeño y equiaxial en la superficie, que se ha enfriado a gran velocidad desde una temperatura muy alta, y un grano más grande y alargado en el centro, siguiendo la dirección de laminación, que se ha enfriado más lentamente y ha alcanzado un pico de temperatura más bajo que en la superficie.



Figura 3: Micrografía óptica (20 Aumentos) en la que se observa la estructura de grano de la sección longitudinal de una bobina de aluminio tras la laminación en caliente con un ataque electroquímico. Cortesía de Cindal.

En la Figura 4 se puede observar cómo varía la estructura de grano del aluminio según se va deformando en frío, desde un estado recocido total o recristalizado (O) hasta un estado duro (H1X).

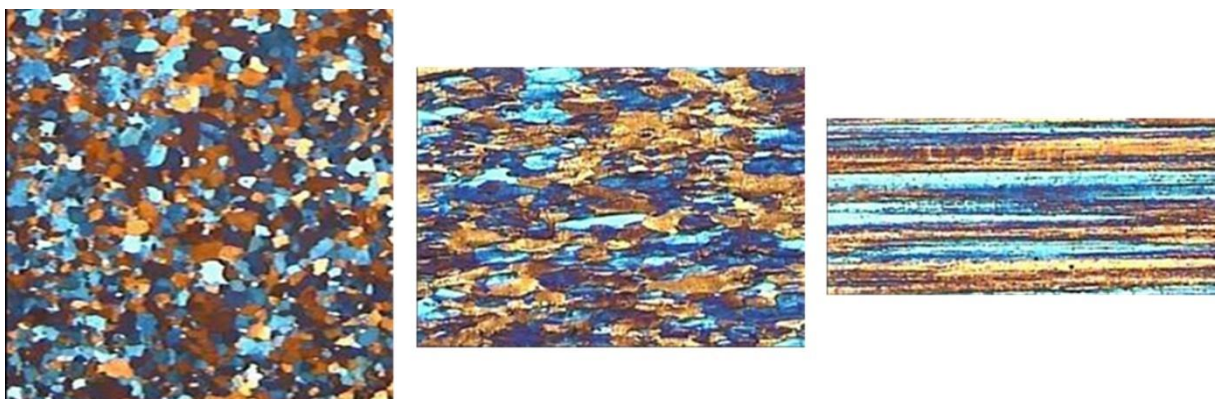


Figura 4: Micrografías ópticas (175 aumentos) donde se observa la estructura de grano de la sección transversal de una muestra de aluminio en estado recocido total (izquierda), con una reducción intermedia (centro), y con una gran reducción (derecha) con un ataque electroquímico. Cortesía de Cindal.

En la Figura 5 se muestra cómo se produce el fenómeno de la recrystalización desde un estado duro hasta un estado recrystalizado mediante un recocido total.

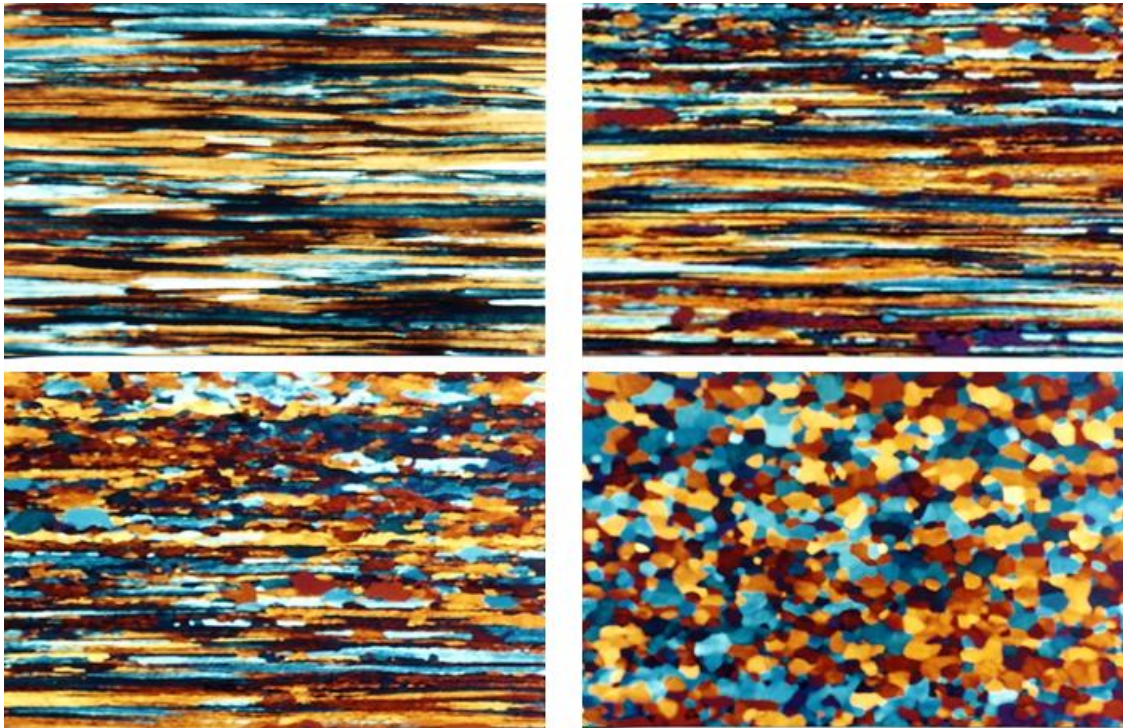


Figura 5: Micrografías ópticas (150 aumentos) donde se observa la estructura de grano de una sección longitudinal de un estado deformado, un estado que ha comenzado la recrystalización, un estado con una recrystalización avanzada y un estado totalmente recrystalizado con ataque electroquímico. (De izq. a derecha, de arr. abaj.) Cortesía de Cindal.

En cuanto a la estructura, al laminar el metal los precipitados se fragmentan, dando lugar a partículas más finas que tienden a alinearse según la dirección de laminación. Estas partículas, cuando llegan al recocido total con el suficiente tamaño, desempeñan un papel clave en uno de los fenómenos microestructurales de la recrystalización más relevante para esta investigación, la Nucleación Estimulada por Partículas (PSN por sus siglas en inglés: *Particle Stimulated Nucleation*).

1.1.5.4.1. Nucleación Estimulada por Partículas (PSN)

Como se ha indicado anteriormente, la microestructura de la aleación AA5754 incluye la presencia de partículas de segundas fases.

Cuando una laminación en frío acumula una gran deformación se generan zonas con una alta densidad de dislocaciones rodeando a las partículas de segundas fases cuyo diámetro supera a

una micra aproximadamente. Estas zonas se conocen como zonas de deformación de partículas, “Particle deformation zones”. (Humphreys & Hatherly, 1995) (Pérez Prado, 1998)

La PSN es un mecanismo de recristalización que se origina en el subgrano preexistente en la zona de deformación de una partícula de segunda fase, pudiendo ocurrir en la superficie de la partícula, aunque no necesariamente. Como se aprecia en la Figura 6, este núcleo inicial crece a gran velocidad hasta que se agota la zona de deformación (zona C), momento en el que seguirá el mecanismo de crecimiento de grano de una recristalización.

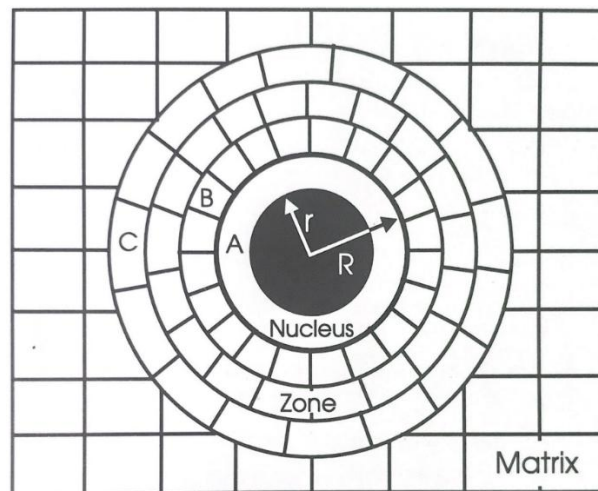


Figura 6: Crecimiento de un núcleo dentro de una zona de deformación. (Humphreys & Hatherly, 1995)

El tamaño mínimo que debe tener una partícula para dar lugar a un núcleo depende del grado de deformación acumulada, a más deformación previa, menor podrá ser el tamaño requerido de la partícula para inducir la nucleación.

Para una misma microestructura, a mayor deformación previa a la recristalización se generarán una mayor cantidad de núcleos y, por lo tanto, un tamaño de grano más fino tras la recristalización. Por el mismo motivo, cuanto mayor sea el número de partículas con el tamaño suficiente para generar un núcleo, menor será el tamaño de grano resultante.

Este comportamiento se observa en la Figura 7, donde se puede apreciar que, al igual que existe un tamaño mínimo de partícula necesario para activar el mecanismo PSN, también parece haber una cantidad mínima de reducción, que en la gráfica se encontraría cerca de un 20%.

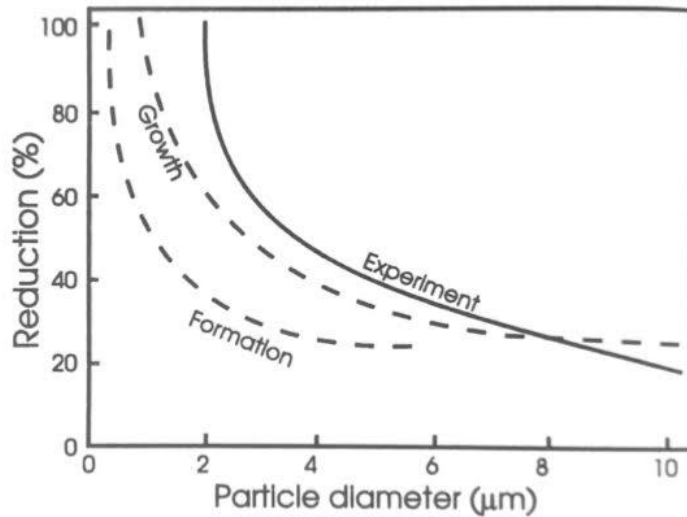


Figura 7: Formación y crecimiento de grano por PSN según la cantidad de reducción de espesor en la laminación previa al recocido y el tamaño de partícula que estimula la nucleación. (Humphreys & Hatherly, 1995)

El tamaño mínimo que necesita la partícula para conseguir un núcleo también depende inversamente de la fracción en volumen que ocupen las partículas presentes en el metal. Es importante tener en cuenta que en la mayoría de los casos una partícula da lugar a un único grano. (Humphreys & Hatherly, 1995)

1.1.6. Características mecánicas de la aleación AA5754

Las características mecánicas analizadas en este estudio son:

La Resistencia Mecánica (R_m): obtenida de un ensayo a tracción a temperatura ambiente y velocidad constante, se define como la mayor carga unitaria que soporta la probeta durante el ensayo después del comienzo del endurecimiento por deformación uniforme.

El Límite Elástico ($R_{p0,2}$): se define como la carga unitaria que provoca una deformación no proporcional igual al 0,2% de la longitud base del extensómetro, en un ensayo de tracción a temperatura ambiente y velocidad constante. (Organización Internacional de Normalización (ISO), 2020)

En el caso particular de esta aleación en el estado recocido total (O), estos dos parámetros se encuentran en los rangos establecidos en la Tabla 2:

$$190 \text{ MPa} \leq \text{Resistencia Mecánica} \leq 240 \text{ MPa}$$

$$80 \text{ MPa} \leq \text{Límite Elástico} < \text{Resistencia Mecánica}^9$$

⁹ Por su misma naturaleza el Límite Elástico siempre debe ser menor que la Resistencia Mecánica.

1.1.6.1. Mecanismos de endurecimiento

Los mecanismos de endurecimiento son aquellos fenómenos que alteran la Resistencia Mecánica y el Límite Elástico. Los más relevantes en el aluminio y sus aleaciones son: el endurecimiento por deformación, el endurecimiento por solución sólida, el endurecimiento por tamaño de grano y el endurecimiento por precipitación.

1.1.6.1.1. Endurecimiento por deformación

El endurecimiento por deformación, también conocido como endurecimiento por acritud, es un mecanismo fundamental en la fabricación de aleaciones no tratables, y se origina durante el proceso de laminación en frío.

La deformación del aluminio y sus aleaciones se produce por mecanismos de deslizamiento cristalográfico dando lugar a dislocaciones. A mayor deformación, mayor es la densidad de dislocaciones. La distorsión debida a esta estructura defectuosa en la malla atómica dificulta el movimiento de las dislocaciones y por lo tanto la deformación, aumentando la resistencia, es decir, endureciendo el metal (Figura 8).

El aumento de la superficie de frontera de grano que se produce durante la deformación también genera puntos de anclaje de las dislocaciones que dificultan la deformación.

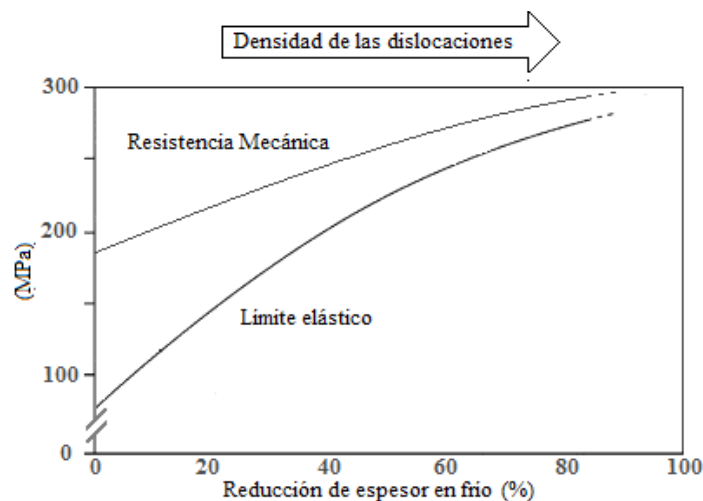


Figura 8: Relación del grado de Deformación con la Resistencia Mecánica y el Límite Elástico en la aleación AA5754.¹⁰

Para conocer el grado de endurecimiento por deformación que puede adquirir una pieza metálica, es de gran utilidad el coeficiente de endurecimiento por deformación, n . Este

¹⁰ A no ser que se indique lo contrario, todas las figuras, tablas y ecuaciones de esta tesis han sido obtenidas y/o elaboradas por el autor.

parámetro puede aproximarse a partir de la curva obtenida en un ensayo de tracción, de modo que, a mayor n , mayor es la capacidad de endurecimiento que puede alcanzar el material mediante la laminación en frío.

En general, un producto metálico tendrá un mayor n en estado recocido total que en un estado duro o deformado. Esta relación tiene una correlación significativa con el Límite Elástico, como puede observarse en la Figura 9.

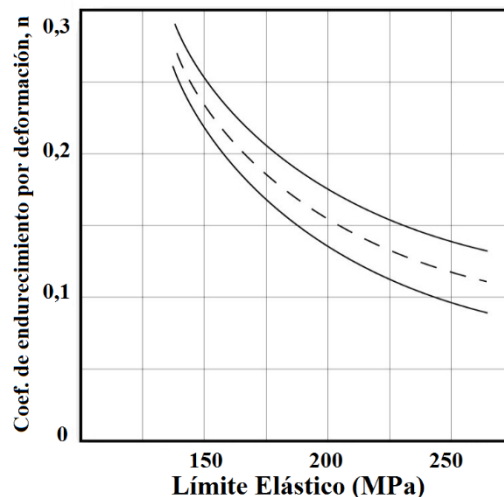


Figura 9: Relación orientativa entre el coeficiente de endurecimiento por deformación, n , y el Límite Elástico en la aleación AA5754 (Keeler, 2002).

1.1.6.1.2. Endurecimiento por solución sólida

El endurecimiento por solución sólida se debe a que aquellos átomos que no son de aluminio no precipitan fuera de la matriz al producirse la solidificación, permaneciendo atrapados por la red atómica del aluminio (en solución sólida) dando lugar a una distorsión de la red, al tener estos átomos un tamaño atómico distinto al del aluminio, lo que dificulta el deslizamiento y por lo tanto proporciona una mayor Resistencia Mecánica al metal.

1.1.6.1.3. Endurecimiento por tamaño de grano

Un menor tamaño de grano implica una mayor superficie de frontera de grano que genera puntos de anclaje para las dislocaciones, lo que contribuye al endurecimiento del material. La relación entre el tamaño de grano y el endurecimiento del metal para estados recocidos fue formulada por Hall-Petch mediante la Ecuación 2 para tamaños de grano superiores a 10 nanómetros, como se puede advertir en la Figura 10. (Zhang & Shibuta, 2020)

$$\text{Límite elástico } (\sigma) = \sigma_0 + K * d^{-0,5}$$

Ecuación 2: Ecuación de Hall-Petch (*Smith & Hashemi, 2006*)

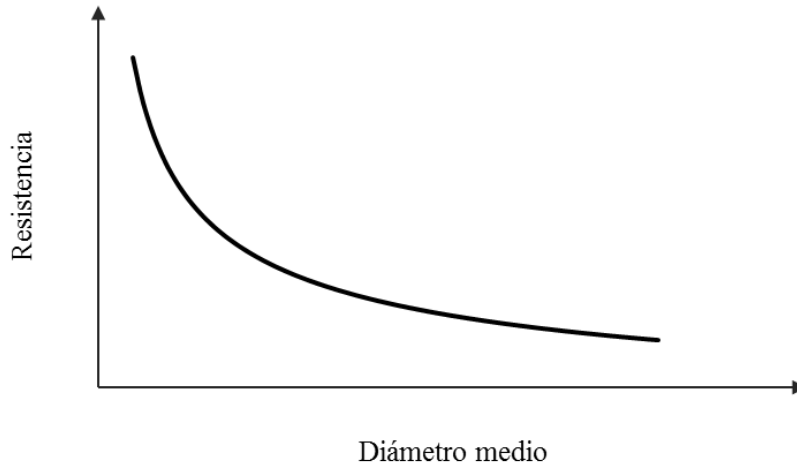


Figura 10: Relación entre el diámetro medio de grano y la resistencia.

1.1.6.1.4. Endurecimiento por precipitación

El endurecimiento por precipitación es el principal mecanismo de endurecimiento de las aleaciones tratables, las cuales no son objeto de estudio en este trabajo. Este tipo de endurecimiento se logra mediante tratamientos térmicos que dan lugar a precipitados finos y uniformemente distribuidos.

Los únicos precipitados que trata esta investigación (siliciuros de magnesio y fase α), sometidos a un tratamiento de recocido total, alcanzan un tamaño tal, que les impide dar lugar al endurecimiento por precipitación. (Alcan International Limited, 1972)

1.2. Objetivos de esta investigación

A continuación, se declaran los siguientes objetivos de esta tesis:

En relación con la Resistencia Mecánica de la aleación AA5754 en estado recocido total:

1. Determinar y probar cuantitativamente el efecto del Mg como aleante principal sobre la Resistencia Mecánica, comparando los resultados obtenidos con los establecidos en investigaciones previas.
2. Determinar y cuantificar la relevancia del efecto del Si en la Resistencia Mecánica, confirmando el mecanismo mediante el que la afecta, utilizando lo establecido por investigaciones previas y ampliándolo con una mayor base empírica.
3. Determinar y cuantificar la importancia del efecto del Fe en la Resistencia Mecánica, identificando el mecanismo que la afecta y en qué medida se relaciona con el proceso de fabricación.
4. Proponer una ecuación que mediante el contenido de Mg como aleante principal y el contenido de Si y Fe como impurezas, permita estimar, con un margen de error aceptable, la Resistencia Mecánica de la aleación AA5754 en estado recocido total¹¹.

En relación con el Límite Elástico de la aleación AA5754 en estado recocido total:

1. Determinar y cuantificar el efecto del Mg como aleante principal sobre el Límite Elástico, contrastando los resultados con los establecidos en investigaciones previas.
2. Determinar y cuantificar la relevancia del efecto del Si en el Límite Elástico y confirmar el mecanismo mediante el que lo afecta utilizando lo establecido por investigaciones previas y ampliándolo con una mayor base empírica.
3. Determinar y cuantificar la importancia del efecto del Fe en el Límite Elástico estableciendo mediante qué mecanismo lo afecta y en qué medida se relaciona con el proceso de fabricación.

¹¹ Estimación válida cuando la composición de la aleación se encuentre dentro de unos rangos definidos.

4. Proponer una ecuación predictiva que, en función de los contenidos de Mg como aleante principal y de Si y Fe como impurezas, permita estimar el Límite Elástico de la aleación AA5754 en estado recocido total, con un error asumible, y en caso de que exceda los límites deseados, analizar las posibles causas.

En cuanto a la mitigación o la optimización de los efectos de los altos contenidos de Si y Fe en la aleación AA5754 en estado recocido total:

1. Identificar el procedimiento que permita compensar u optimizar el efecto del Si sobre la Resistencia Mecánica y el Límite Elástico.
2. Identificar el procedimiento que permita compensar u optimizar el efecto del Fe sobre la Resistencia Mecánica y el Límite Elástico.

2. Estado de la cuestión

Desde que en 1894 Ludwig Mach registrara una aleación de aluminio magnesio bajo el nombre de Magnalium¹² se han hecho numerosos estudios sobre la familia de las aleaciones cinco miles. Debido a que el aluminio durante décadas fue utilizado casi exclusivamente como un material estructural y que el estado recocido total es el más común, ha habido un gran número de investigaciones que se han centrado en qué factores influyen en las propiedades mecánicas del estado recristalizado de esta serie y también, más concretamente, de la aleación AA5754.

Los factores que identifica toda esta bibliografía se pueden clasificar en dos categorías: de composición y de proceso.

2.1. Factores de la composición

En la composición se encuentran referencias al Mg, al Mn, al Cr y a las impurezas como grupo general.

2.1.1. Magnesio

El Mg es el factor composicional más conocido y su efecto tanto en la Resistencia Mecánica (R_m) como en el Límite Elástico ($R_{p0,2}$) está ampliamente estudiado desde mediados del siglo XX.

Uno de los resultados más conocidos de estos estudios se puede encontrar en la Figura 11, donde se ve que un mayor contenido de Mg aumenta el Límite Elástico (y la Resistencia Mecánica) de forma lineal en todo el arco de las aleaciones 5xxx a razón de, aproximadamente, 30 MPa por punto porcentual de Mg, y aunque un pequeño porcentaje de Mg disminuye rápidamente el Alargamiento, este permanece relativamente inalterado una vez que se supera el 1% de Mg. (Hatch, 1984)

¹² Algunos autores como R.H. Thurston reclaman que mucho antes de que el Dr. Mach registrara su patente se habían publicado varias investigaciones sobre las aleaciones Aluminio-Magnesio. (Thurston, 1900)

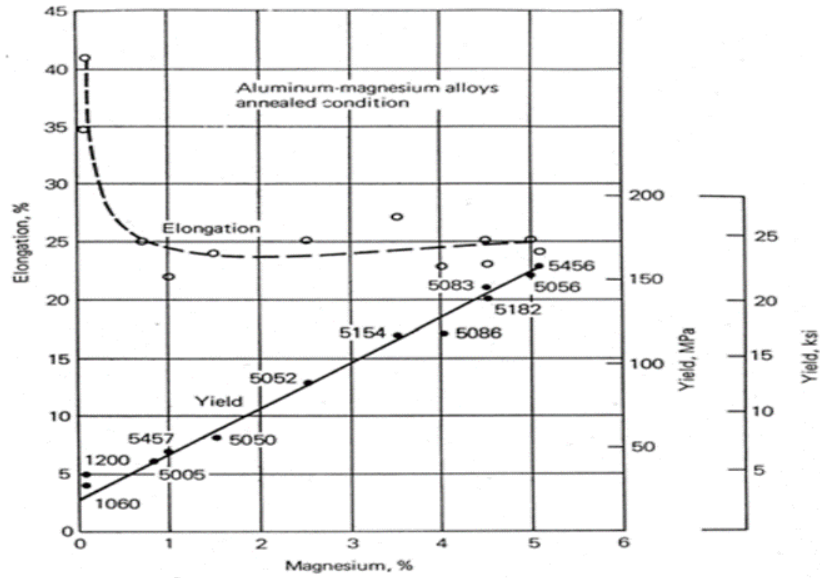


Figura 11: Relación entre Límite Elástico, Alargamiento y contenido de Mg en ciertas aleaciones. (Hatch, 1984)

Cómo se ha indicado, en la aleación AA5754 el Mg aparece en dos formas, la mayoría se disuelve en la matriz debido a su alta solubilidad en el aluminio, y por la presencia de Si, una pequeña parte forma siliciuros de magnesio (Mg_2Si).

Se ha estudiado que el Mg participa fuertemente del endurecimiento por solución sólida, y que, además, la presencia de Mg en la matriz aumenta el número de dislocaciones creadas durante la laminación, potenciando el endurecimiento por deformación (Figura 12), de modo que el Mg aumenta la resistencia y el coeficiente de endurecimiento por deformación, (coeficiente n). (Hatch, 1984) (Lee, Kim, Park, Kim, & Lee, 2016)

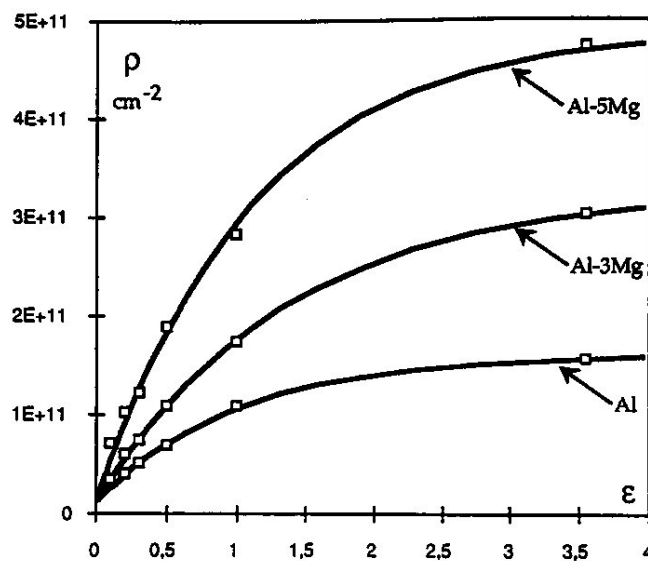


Figura 12: Densidad de dislocación por cm^2 vs cantidad de deformación en tres aleaciones de Al con distinto contenido de Mg. (Guyot & Raynaud, 1991)

2.1.2. Manganeso y Cromo

Los efectos del Mn y el Cr han sido ampliamente tratados en diversos estudios científicos. Al ser considerados aleantes en la aleación AA5754, no tienen relevancia para el objeto de esta Tesis que se circunscribe específicamente a los efectos del Fe y el Si, elementos que no interactúan en gran medida con una variación de contenido (dentro de los límites de la aleación) del manganeso o del cromo.¹³

2.1.3. Impurezas (Fe y Si)

El estado de la investigación de los efectos de las impurezas (incluidos el Fe y el Si) en las propiedades mecánicas de la aleación AA5754 o en el conjunto de la serie 5xxx no han sido estudiados en profundidad hasta hace relativamente poco tiempo, al contrario que con los efectos en otras propiedades como la corrosión o la maquinabilidad que sí han captado la atención de una mayor cantidad de estudios. (Bell, Davis, Javaid, & Essadiqi, 2006)

En palabras de un informe encargado en 2006 por el gobierno canadiense sobre el efecto de las impurezas en el aluminio:

“Comparatively little has been written on the quantitative effect of impurities on the mechanical properties of aluminum and its alloys. The results from the researchers are inconsistent and contain little quality information.” (Bell, Davis, Javaid, & Essadiqi, 2006)

Los pocos estudios que sí han tratado la influencia de las impurezas en las propiedades mecánicas, tradicionalmente las han considerado en su conjunto, describiéndolas solo como responsables de cargar la aleación, aumentando la fracción en solución sólida o el tamaño y número de precipitados, esto aumentaría la Resistencia Mecánica y el Límite Elástico, y los precipitados al ser más y más grandes aumentarían los puntos de generación de grieta reduciendo la elongación y la formabilidad. (Bell, Davis, Javaid, & Essadiqi, 2006) (Altenpohl, 1982) (Hatch, 1984) (Davis, y otros, 1993) (Bjurenstedt, Seifeddine, & Jarfors, 2016)

¹³ El Mn también puede encontrarse en solución sólida aumentando la resistencia (Altenpohl, 1982), pero además puede precipitar en la precipitación fina antes descrita (Al₂FeMn, y Al-(Fe,Mn)-Si) que aumenta la resistencia al dificultar la deformación y movimiento de los granos y retrasando además la recristalización (Davis, y otros, 1993). Algunas investigaciones han señalado un efecto endurecedor del Cr que no se encuentra en solución sólida a temperatura ambiente. (Davis, y otros, 1993)

En otras series de aleaciones el efecto del Si y el Fe si ha sido más estudiado por ser aleantes, como es el caso del efecto del Si en las aleaciones 4xxx (aleadas con Si) o en las aleaciones 6xxx (aleadas con Si y Mg) y el del Fe en algunas aleaciones de la serie 8xxx, como la 8011 que está aleada con Fe. (The Aluminum Association, 2009) (Santora, Berneder, Simetsberger, & Doberer, 2019)

En la serie 6xxx el Si genera mediante un tratamiento térmico siliciuros de magnesio de un tamaño suficientemente fino como para dar lugar al mecanismo de endurecimiento por precipitación, en la serie 4xxx una parte del Si se encuentra en solución sólida ocasionando un endurecimiento por solución sólida. (Hatch, 1984)

En algunas aleaciones de la serie 8xxx (como la 8011) se logra introducir una pequeña cantidad de Fe en solución sólida logrando un notable endurecimiento, en otras (como la 8021) se ha observado un endurecimiento aleando con Fe por reducción del tamaño de grano. (Hatch, 1984) (Raabe, y otros, 2022)

2.1.3.1. Investigaciones recientes del efecto de las impurezas

Esto era así hasta que comenzado el siglo XXI se realizó una novedosa investigación que buscaba obtener una relación entre la composición y el proceso de producción y las propiedades mecánicas en aleaciones no tratables, concretamente de las series 1xxx, 3xxx y 5xxx en varios estados mediante métodos estadísticos. Para ello se utilizaron análisis estadísticos combinados con teorías que explicaban las propiedades mecánicas para a partir de los datos de la base pública Aluselect obtener una fórmula que permitiese saber que propiedades mecánicas se obtendrían a partir de cierta composición y estado de dureza. (Zander, Sandström, & Vitos, 2007)

Desde hace décadas la norma ya establece que límites de propiedades mecánicas tiene para cada estado una aleación (cuya composición también está acotada por la norma), pero esta fórmula permitiría conocer el efecto concreto de cada constituyente (Si, Fe, Mn, Mg, Cr, Cu y Zn) en relación con el estado de dureza en cada una de las características mecánicas, obteniendo además una mayor precisión en la predicción de las propiedades finales.

El impacto que algo así tendría es extraordinario, estas fórmulas serían utilizadas en el día a día por todos los departamentos de calidad y de investigación y desarrollo de toda la industria a parte del impacto que tendría en la academia.

Los mecanismos de endurecimiento que contemplaba esta investigación eran: El endurecimiento por solución sólida y acritud basándose en el modelo Labusch-Nabarro y el endurecimiento por precipitación basado en el efecto Orowan. (Zander, Sandström, & Vitos, 2007) (Nabarro, 1977) (Humphreys & Hatherly, 1995)

En sus resultados obtuvieron que el Fe no tendría ningún efecto relevante en la resistencia de ninguna aleación no tratable (incluida la AA5754) debido a su baja solubilidad en estado sólido en el aluminio y a que las partículas que forma son demasiado grandes como para dar lugar a un endurecimiento por partículas. Por otro lado, el Si al tener una alta solubilidad aumentaría la Resistencia Mecánica por solución sólida en 20 MPA por cada punto porcentual de contenido en peso, aunque ya en sus resultados aparecía que esta cifra no tenía una fuerte evidencia estadística. (Zander, Sandström, & Vitos, 2007)

En cuanto al Límite Elástico concluyeron que ninguna de las dos impurezas tendría el más mínimo efecto.

Sin embargo, esta investigación tan ambiciosa no ha tenido el impacto que se le supondría y el uso que se hace en la industria de sus conclusiones es inapreciable.

Posteriormente ha habido otras investigaciones sobre la influencia de las impurezas en las propiedades mecánicas de los productos laminados de aluminio o de todos los productos de aluminio en general (Jarfors, Du, Yu, Zheng, & Wang, 2020 (12)) (Fu, y otros, 2023 (16)) pero sus conclusiones son contradictorias entre sí y han tenido el mismo impacto en la industria que el estudio de Zander et al.

Esta carencia es la que aspira a suplir esta investigación en la pequeña parte que se corresponde con la influencia del Fe y el Si en las propiedades mecánicas de la aleación AA5754 en el estado recristalizado.

2.1.4. Conductividad eléctrica - Composición

Una propiedad en la que influye la composición y que resulta relevante para comprender los resultados de este trabajo es la relación entre los átomos en solución sólida en una pieza de aluminio y su conductividad.

Es conocido que la distorsión en la matriz generada por los átomos disueltos en ella genera una resistencia al paso de los electrones tal como se muestra en la Figura 13.

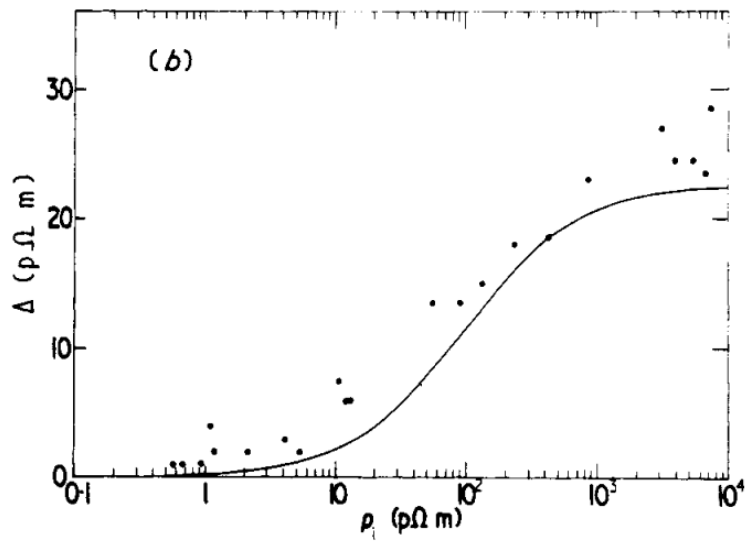


Figura 13: Variaciones de la resistividad del aluminio según el contenido de impurezas con aluminio a 20 K.
(*Dosdale & Morgan, 1974*)

De modo que una mayor cantidad de impurezas en solución sólida da lugar a una menor conductividad eléctrica. Pero es importante resaltar que este efecto se circunscribe a aquella cantidad de las impurezas que se encuentre disuelta en la matriz y no a la que esté presente en forma de precipitados.

Esto significa que la capacidad de reducir la conductividad del aluminio está fuertemente ligada a la solubilidad en la matriz del elemento en cuestión, de modo que, aunque un tanto por ciento de Cr en solución sólida aumenta la resistividad del aluminio más que la misma cantidad de Mg (tal como se ve en la Figura 14), este, al poder disolverse en mayor medida en la matriz, conseguirá un efecto en la resistividad que el Cr no podrá lograr nunca en condiciones normales (Figura 15). (Mondolfo, 1976)

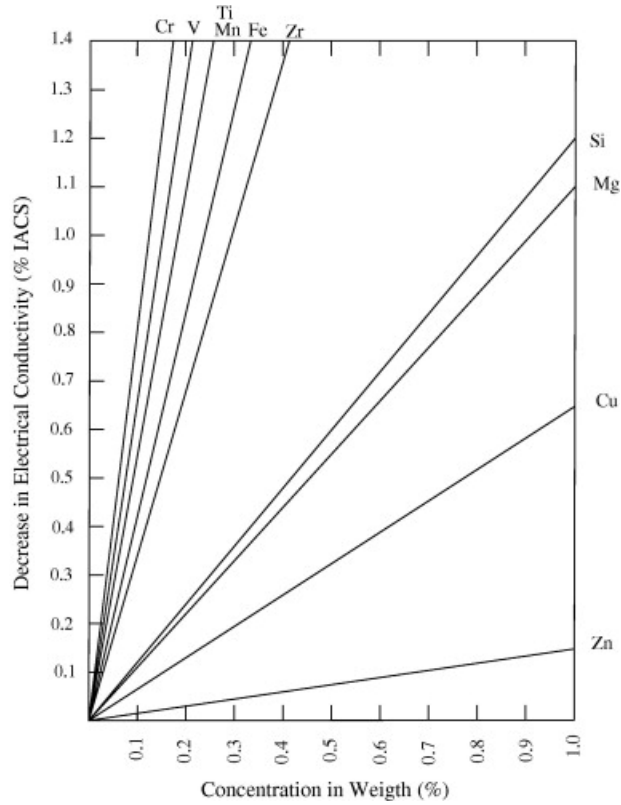


Figura 14: Contribución de los átomos en solución sólida de cada elemento a la disminución de la conductividad de aluminio. (Karabay, 2008)

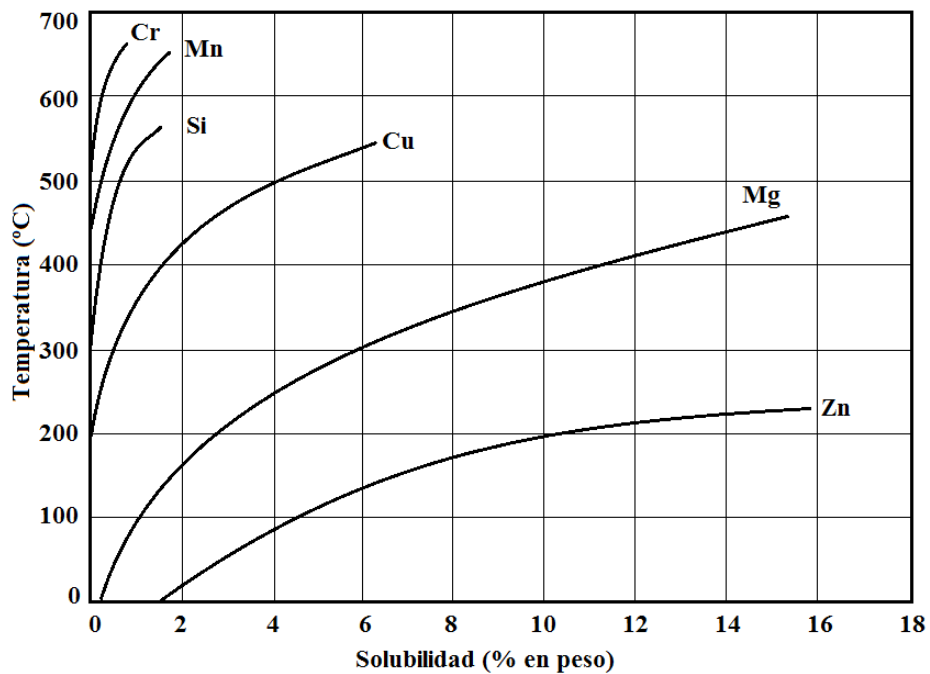


Figura 15: Solubilidad en solución sólida de varios elementos en el aluminio según la temperatura. (Davis, y otros, 1993)

2.2. Factores del proceso de fabricación

El proceso para fabricar un estado recocido total, como se indicó previamente, tiene cuatro fases fundamentales: Colada, Precaldeo, Laminación en caliente, Laminación en frío y Recocido Total Final. A estas puede añadirse un Recocido total intermedio que divida la laminación en frío en dos partes. También se puede fabricar un estado recocido total con el espesor que se obtiene de la laminación en caliente prescindiendo del resto del proceso, gracias al fenómeno conocido como auto-recocido por el que el metal aprovecha la alta temperatura de la laminación en caliente para recrystalizar sus granos tras la última pasada de esa laminación. Y aunque existen otras variaciones del proceso no las tendré en cuenta en este estudio.

2.2.1. Colada

En la Colada Vertical son muchos los factores que influyen como el flujo de aluminio líquido, el gradiente térmico, la geometría y tipo de molde de colada, la velocidad de colada, la velocidad de enfriamiento, la temperatura de entrada del metal líquido, etc., dependiendo el efecto que tiene cada uno de estos factores de otros ajenos al proceso como la composición y pureza del metal.

Es por esto por lo que cada fundición tiene su propio proceso de colada que no es trasladable a otra fundición diferente.

El objetivo principal de la colada es transformar el metal líquido en metal sólido con una microestructura y composición química lo más homogénea posible y un grano tan equiaxial, pequeño y uniformemente distribuido como se pueda conseguir, a cuanto más se acerque a este objetivo, mejores serán todas las propiedades mecánicas.

Tras la colada hay otros procesos intermedios como el precaldeo en el que la placa se calienta a la temperatura suficiente como poder laminar en caliente consiguiendo además eliminar microsegregaciones, transformar o disolver fases en no equilibrio que debido a las velocidades de enfriamiento y solidificación de la colada se encuentran presentes en la placa pero que con el suficiente tiempo a la temperatura adecuada se disolverán o transformarán consiguiendo una microestructura más limpia y homogénea con unas fases más pequeñas o disueltas por completo, mejorando todas las propiedades mecánicas y en especial el Alargamiento y la formabilidad al haber menos o menores precipitados y por lo tanto menos puntos de generación de grietas. En este proceso es de gran importancia el control de los tiempos y los gradientes térmicos para que la temperatura sea lo más homogénea posible en toda la placa, cuidando

especialmente no superar las temperaturas de formación de eutécticos que podrían obligar a refundir la placa.

2.2.2. Laminación en caliente

En la laminación en caliente la placa, a una temperatura superior a la de recristalización del metal, se somete a fuertes reducciones de espesor en varias pasadas por el laminador. No se considera que ni el número de las pasadas, ni la cantidad total de reducción tengan un gran efecto en las propiedades mecánicas del metal al estar a una temperatura tal que se recupera en poco tiempo cualquier deformación que sufran los granos, desapareciendo cualquier efecto en las propiedades que pudiera haber aparecido. La temperatura de la laminación debe ser lo suficientemente alta para que, combinada con la reducción de las pasadas de laminación, esta recuperación pueda producirse obteniendo un estado recocido total sin dar lugar a un crecimiento excesivo de los granos.

2.2.3. Laminación en frío

La laminación en frío genera un gran número de dislocaciones que no se recuperan en el metal dando lugar a una deformación del grano que se alarga siguiendo la dirección de laminación cambiando su orientación¹⁴ y abandonando la condición equiaxial del estado recocido, además, se rompen las fases presentes en el metal. Todo esto aumenta la superficie de borde de grano, dificulta el movimiento de las dislocaciones, da lugar a un mayor número de puntos de nucleación y genera puntos de generación de grieta.

Según la bibliografía su efecto consistiría en que a cuanto mayor sea la reducción en frío mayor serán la Resistencia Mecánica y el Límite Elástico (el Límite Elástico se acercará más a la Resistencia Mecánica cuanto mayor sea la reducción) y menor el Alargamiento y la Formabilidad, aunque su efecto, excepto en la reducción del espesor y en la orientación de los granos, sería totalmente eliminado (o casi totalmente borrado dependiendo de a que fuente bibliográfica se recurra) por un recocido total. (Hatch, 1984) (Humphreys & Hatherly, 1995)

Para la cuantificación de la reducción se utilizan dos parámetros: la reducción, que es igual a la diferencia entre el espesor inicial y final dividida entre el espesor inicial, y la crudeza que es igual a la diferencia entre los espesores inicial y final dividida entre el espesor final. Entendiendo espesor inicial como aquel previo a la laminación y el final como el posterior. Ambas definiciones se explicitan en las Ecuaciones 3 y 4.

¹⁴ La orientación de un grano es la alineación espacial de la red cristalina de ese grano en relación a otros granos o a la superficie del metal.

$$\text{Reducción (\%)} = \frac{\text{Espesor Inicial} - \text{Espesor Final}}{\text{Espesor Inicial}}$$

Ecuación 3: Fórmula de la Reducción.

$$\text{Crudeza (\%)} = \frac{\text{Espesor Inicial} - \text{Espesor Final}}{\text{Espesor Final}}$$

Ecuación 4: Fórmula de la Crudeza

2.2.4. Recocido Total

En los recocidos totales se aumenta la temperatura fomentando el movimiento de los átomos lo que da lugar a un aumento de movilidad de las dislocaciones potenciando su aniquilación y a que se creen nuevos granos en los puntos preferentes de nucleación de grano, los cuales generarán idealmente una estructura con forma equiaxial. Los granos crecerán con unas orientaciones preferentes por lo que la orientación también se ve afectada. Todo esto eliminará las barreras al movimiento de las dislocaciones y por lo tanto a la deformación reduciendo la Resistencia Mecánica y el Límite Elástico y aumentando el Alargamiento y la Formabilidad.

Para que el recocido total tenga lugar se ha de alcanzar y superar la temperatura de recristalización en todo el metal durante el tiempo suficiente, si no se alcanza será un recocido parcial. De lo anterior se entiende que el recocido total elimina el efecto de las etapas anteriores en la Resistencia Mecánica, Límite Elástico, Alargamiento y Formabilidad¹⁵. (Hatch, 1984) (Humphreys & Hatherly, 1995)

2.2.5. Recocido Parcial

En un Recocido Parcial al no llegarse a la temperatura de recristalización solo se produce el fenómeno de la restauración del metal, reorganizándose las dislocaciones internas de los granos dando lugar a subgranos sin que el tamaño de grano varíe, ni por lo tanto el área total de superficie de grano. Esto da lugar a que la Resistencia Mecánica permanezca constante mientras que el Límite Elástico disminuye y el Alargamiento y la Formabilidad aumentan.

En esta Tesis no se van a analizar estados recocidos parcialmente (H2X), pero es importante a la hora de considerar el error en los resultados ser conscientes de que entre un recocido total y un recocido parcial solo hay más tiempo y temperatura y que ambos estados se solapan, de modo que una pieza destinada a un estado recocido total que haya tenido un tiempo o una temperatura de recocido insuficientes por cualquier motivo, como por ejemplo, tener un tamaño

¹⁵ Entendiendo la Formabilidad como la capacidad del metal de deformarse sin romperse en un ensayo que no es únicamente uniaxial, como la flexión o la embutición.

superior al esperado y por lo tanto necesitar más tiempo de recocido, no alcanzará un estado recocido completo sino solo parcialmente. Esto necesariamente afectará a sus propiedades mecánicas reduciendo su Alargamiento y Formabilidad y aumentando su Resistencia Mecánica y su Límite Elástico. Otra propiedad que se verá notablemente afectada será el coeficiente de endurecimiento por deformación, n , de modo que cuanto menos completa sea la recristalización menor será n .

2.2.6. Espesor final

En cuanto al Alargamiento y la Formabilidad es de gran importancia el espesor del metal, porque a más espesor habrá un mayor volumen para deformar, y, por lo tanto, ambas propiedades serán mayores.

3. Material y Métodos

3.1. Factores

A partir de los fundamentos proporcionados por la bibliografía se decidió que para determinar el efecto del Fe y el Si en las características mecánicas de la aleación AA5754 en estado recocido total era necesario en primer lugar establecer que factores influían en las características mecánicas (CCMM), distinguiéndolos al igual que en la bibliografía entre factores composicionales y factores de proceso.

De la bibliografía se escogieron:

- Factores composicionales: los contenidos de manganeso, magnesio y cromo (%Mn, %Mg, %Cr)
- Factores de Proceso: al ser un estado recocido total, según la bibliografía el efecto del proceso queda borrado por el recocido y solo el espesor afecta a las CCMM, en concreto al Alargamiento y a la Formabilidad, pero no a la Resistencia Mecánica ni al Límite Elástico.

Como en este estudio se investigan los efectos del Si y el Fe, estos han sido añadidos a los factores composicionales a considerar. En cuanto a los factores de proceso, se ha decidido añadir la reducción en frío previa al recocido total final (RTF).

De modo que en principio tenemos seis factores: %Si, %Fe, %Mn, %Mg, %Cr y reducción previa (%).

Estos factores no son puramente independientes, sino que presentan algunas relaciones débiles y colinealidades. El Si y el Fe al ser dos impurezas se encontraran en mayor cantidad cuanto más chatarra con mayor contenido de estos se haya utilizado para elaborar el metal de estudio, por lo que presentan una cierta colinealidad entre sí.

El contenido máximo y mínimo de Mg está descrito para la aleación AA5754 y la relación entre este y los contenidos de los otros elementos tendrán unos valores máximos ($\% \text{ Si} / \% \text{ Mg} < 0,154$; $\% \text{ Fe} / \% \text{ Mg} < 0,154$; $\% \text{ Mn} / \% \text{ Mg} < 0,193$; $\% \text{ Cr} / \% \text{ Mg} < 0,12$).

Además, el comportamiento de cada elemento en la microestructura de la aleación no es independiente de los otros; el Si y el Mg forman precipitados de Mg_2Si y el Mn y el Fe pueden dar lugar a Al_6FeMn . El espesor final y la reducción previa al recocido total final también están relacionados, en tanto en cuanto, para un mismo espesor de salida del laminador en caliente, para lograr un cierto espesor final se necesita una cierta reducción previa al recocido total final.

En cuanto al contenido de Mn y Cr en esta investigación se ha decidido fijarlos en rangos estrechos y no se les tendrá en consideración. Quedando como variables a investigar: la reducción previa al recocido total final y los contenidos de Si, Fe y Mg.

3.1.1. Obtención de los datos

Para obtener la relación entre estos factores y las propiedades mencionadas se ha recurrido al análisis de datos en grandes poblaciones. Estos datos se han obtenido mediante el registro de los procesos realizados con cada producto, el análisis de su composición química y el ensayo de sus propiedades mecánicas.

El análisis de la composición química se obtiene con un espectrómetro de emisión óptica (Quantometer) modelos ARL 3460 y 3560 (ThermoFisher SARL, Ecublens, Suiza) de muestras tomadas del metal líquido (aluminio fundido) con una probeta de disco.

Los datos de la Resistencia Mecánica (R_m) y el Límite Elástico ($R_{p0,2}$) han sido medidos con una máquina de ensayos universales modelo Instron 5985 (Instron GmbH, Darmstadt, Germany) siguiendo la norma de ensayo ISO 6892 (Figura 16).



Figura 16: Imagen de una máquina de ensayos universales modelo Instron 5985.

A continuación, se han escogido grupos de datos en los que únicamente una variable de las cuatro estudiadas no se encontraba en un rango estrecho, quedando aislado el efecto de cada una.

3.1.1.1. *Coficiente de endurecimiento por deformación, n*

Para valorar el efecto de la variabilidad del proceso industrial en las propiedades mecánicas se ha utilizado el coeficiente de endurecimiento por deformación (n), calculándolo a partir del segmento de la curva de tracción entre el 4% y el 6% de deformación mediante la Ecuación 5 siguiendo la norma ISO 10275.

$$n = \frac{\ln(\sigma) - \ln(C)}{\ln(\epsilon_p)}$$

Ecuación 5: Fórmula del Coeficiente de endurecimiento por deformación, n.

Donde σ es el esfuerzo (o tensión) real (MPa), C es coeficiente de resistencia (MPa) y ϵ_p es la deformación plástica real.

3.2. Métodos de análisis estadístico

Para el análisis de datos de cada uno de los grupos se ha utilizado la fórmula de Pearson (o del coeficiente R^2) para establecer el grado de dependencia entre dos variables y el método de la regresión lineal múltiple para establecer la relación de varias variables con respecto a la propiedad investigada.

La regresión lineal es un método de análisis estadístico basado en la estimación por mínimos cuadrados ampliamente conocido desde que Gauss y Legendre lo utilizaran para la predicción del movimiento planetario y permite conocer como están asociadas de forma lineal una variable dependiente o respuesta con una variable independiente o predictora en el caso de la regresión lineal simple, o varias en el de la regresión lineal múltiple. Este método de análisis estadístico se ha utilizado desde hace más de doscientos años en una gran cantidad de investigaciones de diversos campos. (Pérez Hidalgo, Basulto Santos, & Camúñez Ruiz, 2019)

Para llevarlo a cabo se necesita una población de sujetos en los que se conozca el valor de cada una de las variables de estudio, en este caso, los productos finales fabricados (en forma de chapas o bobinas) de la aleación AA5754 en estado recocido total producidas por Aludium. De las se conocen las variables independientes o predictoras que son el contenido de Si, Mg, Fe y la cantidad de reducción previa llevada a cabo antes del recocido (Matriz $[X]$) y la variable dependiente o respuesta de la Resistencia Mecánica o el Límite Elástico (Matriz $[Y]$).

Al aplicar la fórmula de la regresión (Ecuación 6) se obtienen los factores de cada una de las variables (Matriz $[P]$) que a partir del valor de los predictores permiten estimar la respuesta, en este caso la Resistencia Mecánica o el Límite Elástico. La matriz de las variables independientes o predictora ($[X]$) tendrá tantas filas como sujetos formen la población de estudio y tantas columnas como variables independientes se estudien, la matriz de la variable dependiente o respuesta (la Resistencia Mecánica o el Límite Elástico) ($[Y]$) tendrá una única columna y tantas filas como sujetos tenga la población de estudio al igual que la matriz predictora. La matriz de los factores ($[P]$) tendrá una única columna y tantas filas como variables independientes se estudien. (Pérez Hidalgo, Basulto Santos, & Camúñez Ruiz, 2019)

Al realizar la regresión se ha supuesto que las propiedades mecánicas no dependen totalmente de las variables estudiadas (un 0% de Reducción Previa, Si, Fe y Mg no significa una

Resistencia Mecánica o un Límite Elástico nulos), dando lugar a una variable indeterminada de valor constante igual a 1.

$$[P] = ([X]^t * [X])^{-1} * [X]^t * [Y]$$

Ecuación 6: Fórmula de la Regresión Lineal Múltiple
(Pérez Hidalgo, Basulto Santos, & Camúñez Ruiz, 2019)

Así se logra obtener el siguiente algoritmo para estimar el valor de la Resistencia Mecánica o el Límite Elástico a partir de estos valores (Ecuación 7).

$$\tilde{Y}_i = \sum_{j=0}^n X_{ji} * P_j$$

Ecuación 7: Algoritmo de obtención de las variables respuesta por las predictoras.

Para valorar la precisión de la fórmula o relación obtenida se utiliza en primer lugar el coeficiente R^2 , que analiza el ajuste entre los datos reales y los estimados al aplicar la fórmula obtenida a la población de datos utilizada en la regresión, permitiendo conocer que cantidad de la variación de la variable dependiente presente en la población de estudio es explicable con el algoritmo desarrollado con la regresión.

Al ser esta una investigación basada en una producción industrial y no en productos simulados en un laboratorio se añade un gran nivel de error por diferencias en el proceso de fabricación entre un producto y otro. Se ha considerado que una relación de $R^2 > 0,45$ es fuerte, y una relación de $R^2 > 0,7$ muy fuerte.

Para determinar si una variable independiente escogida para la regresión es relevante para explicar el valor de la variable respuesta o no, existen varios métodos a parte del coeficiente de Pearson (R).

El primero de ellos es el error típico ($s\beta$) asociado al factor que multiplica esa variable en el algoritmo, este error se obtiene mediante la fórmula que se expone a continuación (Ecuación 8), donde s es la desviación típica de la diferencia entre el valor de la variable respuesta obtenido con el algoritmo de la regresión y el valor real en toda la población estudiada, n es el número de sujetos de la población, x es el valor de la variable independiente en cuestión y \bar{x} es la media del valor de esta variable en la población de estudio.

$$s_{\beta} = \frac{s}{\sqrt{\sum_i^n (x_i - \bar{x})^2}}$$

Ecuación 8: Cálculo del Error Típico.

Un error típico (s_{β}) de un factor demasiado grande en comparación con el valor de ese factor (β) implica una relevancia menor de esa variable independiente. Esto se aprecia fácilmente con el valor estadístico conocido como t de Student (Ecuación 9), en el que suponiendo que la hipótesis nula es que el valor de ese **factor** es 0, se calcula como el factor calculado por la regresión dividido entre su error típico.

$$t = \frac{\beta}{s_{\beta}}$$

Ecuación 9: Cálculo de la t de Student.

De modo que un mayor valor de t implica una mayor relevancia de esa variable. Para tener en cuenta en el cálculo de la relevancia de cada variable independiente el número de sujetos de la muestra y el número de variables en el cálculo se utiliza el *p-valor*.

Este coeficiente estima la probabilidad de la hipótesis nula para cada coeficiente, hallándolo como el área bajo la curva de densidad correspondiente a los grados de libertad de la regresión (grados de libertad = n - número de variables - 1), que no se encuentra entre $x = -t$ y $x = t$. Este valor se suele definir como *p-valor* de dos colas. Cuanto menor es el *p-valor* más relevante es la variable independiente y más fiable el valor del factor (β) calculado para ella. En este estudio se considerará que un *p-valor* menor de 0,001 indica una relevancia suficiente.

Para tener en cuenta el efecto de las colinealidades entre variables en la regresión se analizará la correlación entre ellas mediante el coeficiente de Pearson.

Tras encontrar una relación entre un factor y una propiedad se realiza una hipótesis que la explique, que a continuación, se pasa a probar con análisis metalográfico, ensayos mecánicos y nuevos análisis estadísticos.

Para la realización de los análisis estadísticos se utilizaron las funciones de análisis estadístico de Microsoft Excel y un programa para la realización y análisis de regresiones lineales de grandes poblaciones de datos divididas en subgrupos desarrollado en VBA por el autor.

3.3. Otros Análisis

3.3.1. Análisis Metalográfico

Para el análisis metalográfico, necesario para la comprobación de las hipótesis que explicasen las relaciones halladas entre las variables estudiadas y las propiedades mecánicas se han analizado las muestras en probetas metalográficas en sección y en superficie según ASTM E3-11(2017)¹⁶, atacadas con ácido fluorhídrico 0,5% para el análisis de la microestructura y electroquímicamente para el análisis del grano. (Figura 17)



Figura 17: Imagen de un equipo de preparación de muestras metalográficas.

Una vez atacadas las muestras son observadas en un Microscopio Óptico Leica Reichert Jung MEF3 A con el software LAS-X (Figura 18). Para medir la estructura se ha utilizado la media de la longitud y altura de los precipitados de mayor tamaño representativos de la probeta escogidos según el criterio del analista, y de forma complementaria a este método, por análisis digital de la imagen del microscopio con el programa ImageJ siguiendo la norma ASTM E1245-03¹⁷. Para la medida de grano se ha utilizado el método de interceptación según la norma ASTM E112-24¹⁸.



Figura 18: Imagen de un Microscopio Óptico Leica Reichert Jung MEF3 A equipado con software LAS-X.

¹⁶ (ASTM INTERNATIONAL, 2017)

¹⁷ (ASTM INTENATIONAL, 2003)

¹⁸ (ASTM INTERNATIONAL, 2024)

El tamaño de grano se aproxima como el volumen de un elipsoide cuyos tres ejes sean las direcciones: longitudinal, transversal larga y transversal corta.

Para conocer la composición de la microestructura se utiliza un microscopio electrónico de Thermofisher FESEM modelo APREO 2 que mediante SEM-EDX¹⁹ permite obtener imágenes de altísima resolución de la microestructura del metal e identificar y cuantificar los elementos presentes en una muestra. (Figura 19).



Figura 19: Imagen de un microscopio electrónico de Thermofisher FESEM modelo APREO 2.

3.3.2. Análisis de dureza

Para el análisis de la dureza se ha utilizado el ensayo Vickers con un microdurómetro Shimadzu HMV-2T (Figura 20), en la sección transversal a la dirección de laminación de las muestras, tomando tres medidas entre el centro y la superficie separadas a una distancia superior a dos veces la longitud de la diagonal de las micromarcas dejadas por el punzón (Figura 21).

¹⁹ Microscopía electrónica de barrido (Scanning Electron Microscopy, SEM) y Espectroscopía de Dispersión de Energía de Rayos X (Energy Dispersive X-ray spectroscopy, EDX).



Figura 20: Imagen de un microdurómetro Shimadzu HMV-2T.

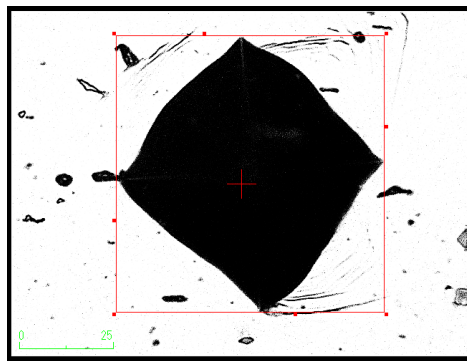


Figura 21: Imagen de la medida mediante el software del microdurómetro Shimadzu HMV-2T (500 aumentos) del tamaño de una huella dejada por el punzón en una muestra de AA5754.

3.3.3. Análisis de conductividad

Para este análisis se ha utilizado un medidor de conductividad Foerster modelo Sigmatest D 2.068 siguiendo la norma UNE-EN 2004-1:1996 (Figura 22).



Figura 22: Imagen de un medidor de conductividad Foerster modelo Sigmatest D 2.068.

3.4. Muestras

Para realizar los análisis se ha recurrido a cinco poblaciones de muestras: A, B, C, D y E.

3.4.1. Grupo de Muestras A

Se han seleccionado 1000 muestras extraídas de productos de Aludium de la aleación AA5754 en estado recocido total, con un contenido de Mn de $0,20 \pm 0,01\%$ y un contenido de Cr de $0,02\% \pm 0,01$. La lista de estos consta en la Tabla A1 del Anexo A, su contenido de Mg, su contenido Si, su contenido de Fe y la reducción que han sufrido previa al recocido total, junto a sus valores de Resistencia Mecánica y Límite Elástico.

3.4.2. Grupo de Muestras B

Selección de 629 muestras de 9 mm de espesor de Aludium de la aleación AA5754 en estado recocido total que no han sido sometidas a laminación en frío, habiendo sufrido todas el mismo proceso de fabricación. Aparecen en la Tabla B1 del Anexo B indicando su espesor, contenido de Mg, Si, Fe, su Resistencia Mecánica, su Límite Elástico y su coeficiente de endurecimiento por deformación, n.

3.4.3. Grupo de Muestras C

El grupo de muestras C consiste en 14 chapas de 9 mm de espesor de Aludium de la aleación AA5754 en estado recocido total que no han sido sometidas a laminación en frío previa, para analizar su conductividad. Su contenido de Fe, Si y Mg, junto a su conductividad, Resistencia Mecánica y Límite Elástico constan en la Tabla C1 del Anexo C.

3.4.4. Grupo de Muestras D

Se han seleccionado dos muestras de AA5754 laminadas en caliente hasta los 9 mm, es decir, en recocido total. La muestra L con 0,26% de contenido de Fe y la muestra H con un 0,36% de Fe²⁰. A continuación, se han laminado en frío seis secciones hasta 7, 6, 4'5, 3, 1 y 0'1 mm conservando una séptima en su espesor original, dándoles después un recocido total de 350 °C durante 2 horas con una rampa de 100 °C por hora. Teniendo así seis muestras con distintos niveles de reducción previa al recocido total para, a continuación, analizar su estructura de grano y su dureza.

²⁰ Los valores del contenido de Fe han sido obtenidos mediante un ensayo normalizado por los laboratorios normalizados del departamento de Calidad de Aludium.

3.4.5. Grupo de Muestras E

Para completar este estudio se han utilizado los análisis de un artículo anterior publicado por el autor (Vicent Fanconi, Gil Fernández-Marcote, & Ruiz-Bustinza, 2023) en el que se analizaba el contenido de Mg en la matriz de cinco muestras de AA5754 en relación con su contenido de Si (estas 5 constan con el nombre EP-X), para comprobar y dar más peso al análisis se han añadido otras 20 muestras (Estas constan como EX). Sus datos, tanto los que se obtuvieron en el primer artículo como los añadidos en esta investigación constan en la tabla E1 del anexo E.

4. Resultados

4.1. Relación individual entre las variables dependientes e independientes

Para conocer en qué medida están relacionadas las cuatro variables independientes escogidas (Si, Fe, Mg y RPrev) con las dos variables dependientes de estudio (Rm y Rp_{0,2}) y que posibles colinealidades hay entre estos factores, se ha analizado la base de datos del Anexo I obteniendo las siguientes correlaciones (Tabla 3):

Tabla 3: Matriz de correlación (R) de las variables estudiadas con los datos del Anexo A.

Variables	Rm	Rp _{0,2}	Mg	Si	Fe	Red.Prev.
Rm	1					
Rp _{0,2}	0,535	1				
Mg	0,351	0,081	1			
Si	-0,442	-0,220	0,226	1		
Fe	0,106	0,070	-0,001	0,079	1	
Red.Prev.	0,554	0,356	-0,050	-0,099	0,018	1

Se observa que las variables Rm - Rp_{0,2}, Rm - Mg, Rm - Red.Prev., Rp_{0,2} - Red.Prev. presentan cierta correlación positiva. Mientras que las variables Si y Rm presentan una correlación negativa. Al mismo tiempo se observa una correlación negativa débil entre el Rp_{0,2} y el Si. No se observan colinealidades de importancia entre las variables independientes, solo una colinealidad débil entre el Si y el Mg.

Una vez establecidas estas primeras relaciones se ha realizado una regresión lineal simple con cada una de las variables de estudio para obtener en qué medida afecta a la Resistencia Mecánica y al Límite Elástico, obteniendo el algoritmo predictor de la Ecuación 10 con los coeficientes de cada relación que constan en la Tabla 5 junto con sus estadísticos (R^2 , error típico, t y p-valor, Tabla 4) cuya correlación con los datos reales se puede observar en las siguientes gráficas (Figura 23).

$$\text{Variable de Estudio} = I + F * \text{Factor}$$

Ecuación 10: Ecuación matricial de obtención de variables de estudio a partir de las variables predictoras.

Tabla 4: Coeficientes de las regresiones lineales entre los factores y las variables dependientes.

Variable de estudio	Factor	I	F	Valores estadísticos del factor de la variable independiente		
				Error Típico (MPa/%)	T	P-valor
Resistencia Mecánica	Mg	133,1	24,75	2,09	11,86	1,97E-30
	Si	213,43	-42,97	2,76	-15,54	5,87E-49
	Fe	196,65	21,16	6,29	3,36	7,96E-04
	Red.Prev.	192,05	19,82	0,94	21,05	1,14E-81
Límite Elástico	Mg	66,83	15,41	5,97	2,58	1,00E-02
	Si	124,28	-57,66	8,08	-7,14	1,79E-12
	Fe	98,98	37,5	16,95	2,21	0,027
	Red.Prev.	91,35	34,2	2,84	12,04	2,92E-31

Es de destacar el alto P-valor del Fe que hace suponer que el contenido Fe no está relacionado ni con la Resistencia Mecánica ni con el Límite Elástico como se muestra mejor en la Figura 23, la relación negativa con ambas variables del Si y el bajo valor del coeficiente independiente (I) en la regresión del Mg para ambas variables.

En la Figura 24 se aprecia que ninguna de las variables independientes en las regresiones individuales explica un porcentaje relevante de la variación de las variables dependientes.

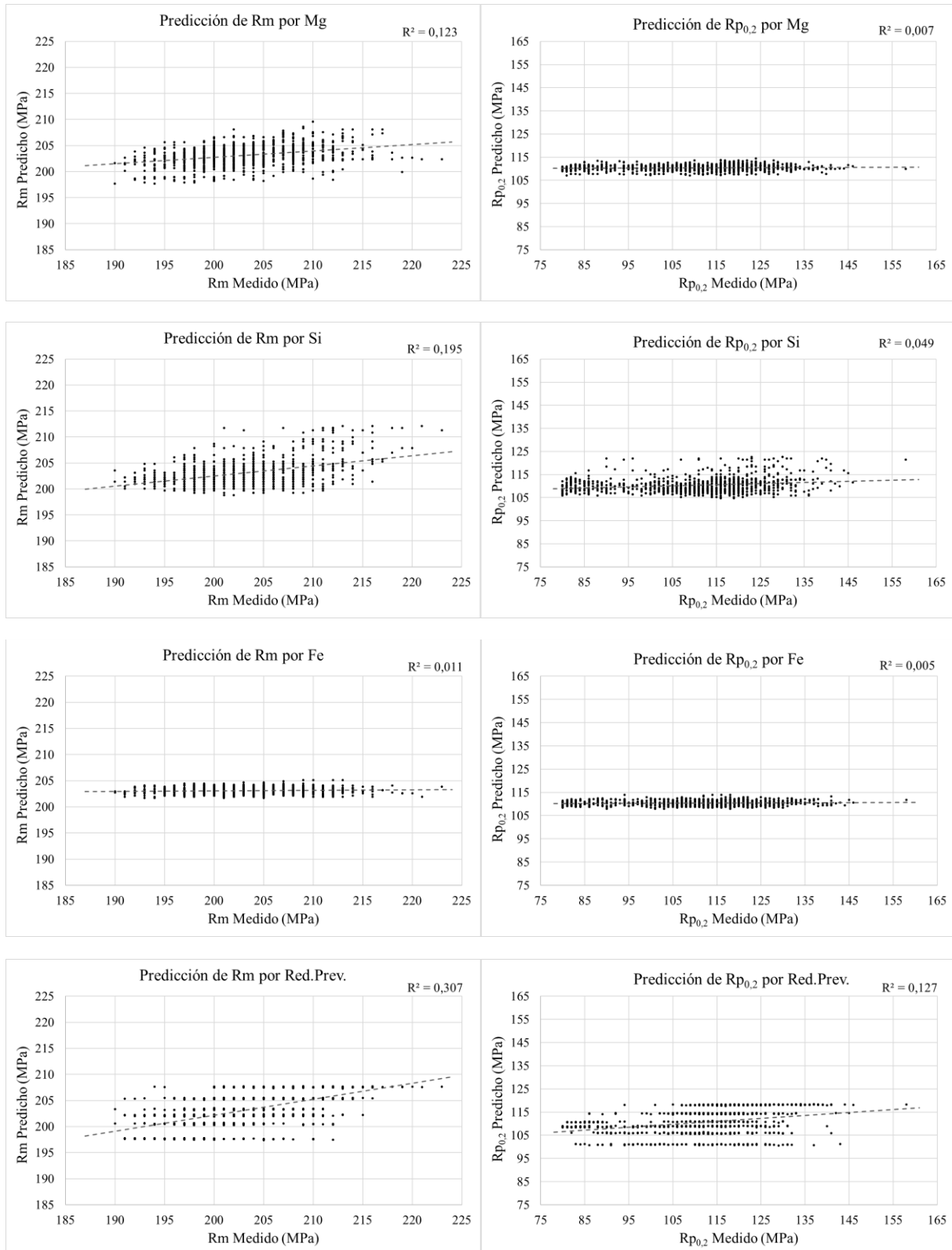


Figura 23: Datos de Resistencia Mecánica y Límite Elástico medidos frente a datos predichos mediante las regresiones individuales²¹ en el Grupo de Muestras A.

²¹ Estas gráficas se encuentran a un mayor tamaño en el Anexo D, al igual que las gráficas de las Figuras, 18, 19, 20, 22, 34, 38 y 39.

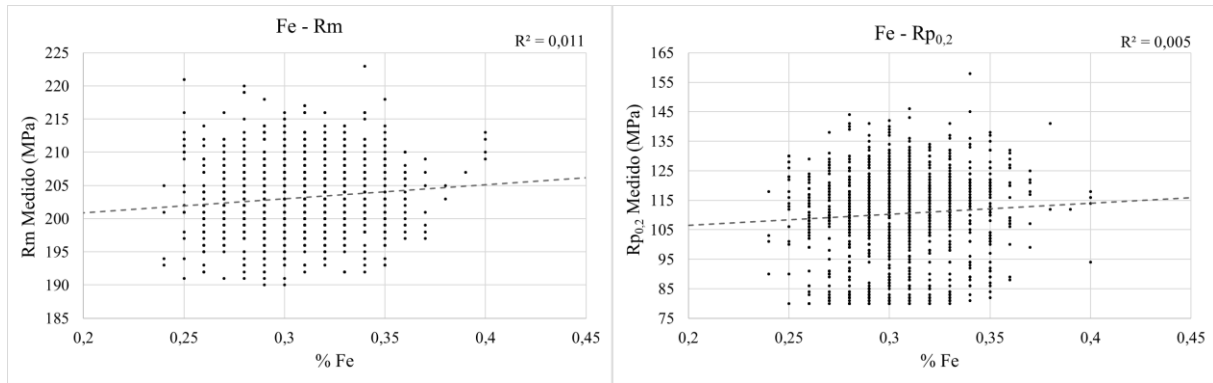


Figura 24: Relación del contenido de Fe con la Resistencia Mecánica y el Límite Elástico en los datos del Grupo de Muestras A.

Para determinar mejor la relación se lleva a cabo una regresión lineal múltiple con las dos variables de la composición (Mg y Si) que han mostrado una mayor correlación con las dos variables dependientes, obteniendo los resultados de la Tabla 5, que dan lugar a las ecuaciones 11 y 12 cuya aplicación se ajusta a los datos experimentales tal y como se observa en la Figura 25.

$$Rm (MPa) = 120,74 + 33,71 * \%Mg - 53,51 * \%Si$$

Ecuación 11: Estimación de la Resistencia Mecánica a partir del %Mg y el %Si en Grupo de Muestras A.

$$Rp_{0,2} (MPa) = 48,55 + 27,57 * \%Mg - 66,11 * \%Si$$

Ecuación 12: Estimación del Límite Elástico a partir del %Mg y el %Si en Grupo de Muestras A.

Tabla 5: Resultado de la Regresión con los contenidos de Si y Mg como variables independientes.

Variable de estudio	Factor	Coeficiente	Valores estadísticos del factor de la variable independiente		
			Error Típico (MPa/%)	T	P-valor
Resistencia Mecánica	Independiente	121,18	4,88	24,83	2,36E-106
	Mg	33,5	1,76	19,04	3,47E-69
	Si	-53,45	2,43	-21,98	1,22E-87
Límite Elástico	Independiente	52,14	16,49	3,16	1,61E-03
	Mg	26,2	5,95	4,41	1,16E-05
	Si	-65,86	8,22	-8,02	3,02E-15

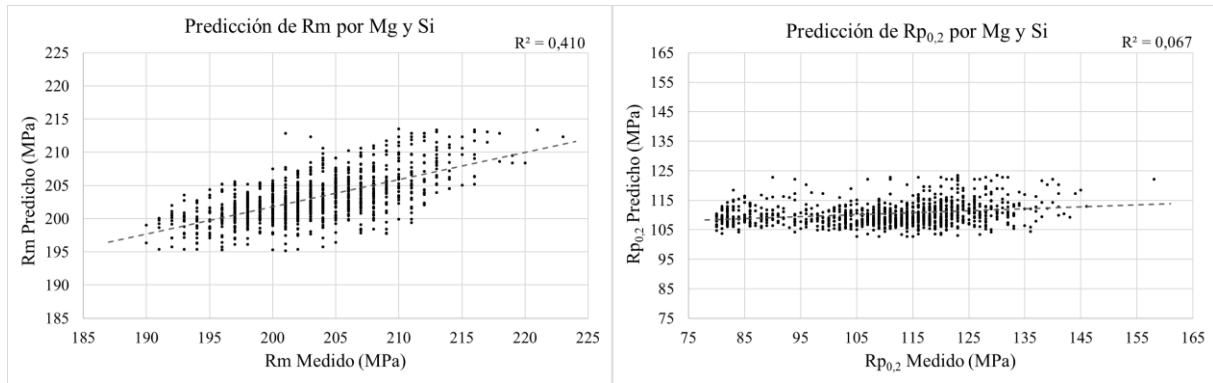


Figura 25: Datos de Resistencia Mecánica y Límite Elástico medidos frente a datos predichos por la regresión con Mg y Si.

Como se puede observar el ajuste para la Resistencia Mecánica es mucho mejor que con el análisis individual de cada una de las dos variables independientes (Si y Mg), mientras que la predicción del Límite Elástico, aunque es mejor, no explica aún un porcentaje relevante de la variación de este.

Si se incluye la variable independiente del contenido de Fe en este análisis se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 6 y en la Figura 26.

Tabla 6: Resultado de la Regresión con los contenidos de Si, Mg y Fe como variables independientes.

Variable de estudio	Factor	Coeficiente	Valores estadísticos del factor de la variable independiente		
			Error Típico (MPa/%)	T	P-valor
Resistencia Mecánica	Independiente	111,67	5,02	22,24	2,55E-89
	Mg	33,72	1,73	19,53	3,75E-72
	Si	-54,67	2,39	-22,84	3,32E-93
	Fe	30,15	4,79	6,3	4,47E-10
Límite Elástico	Independiente	36,82	17,22	2,14	3,28E-02
	Mg	26,55	5,92	4,48	8,27E-06
	Si	-67,84	8,21	-8,26	4,53E-16
	Fe	48,6	16,42	2,96	3,14E-03

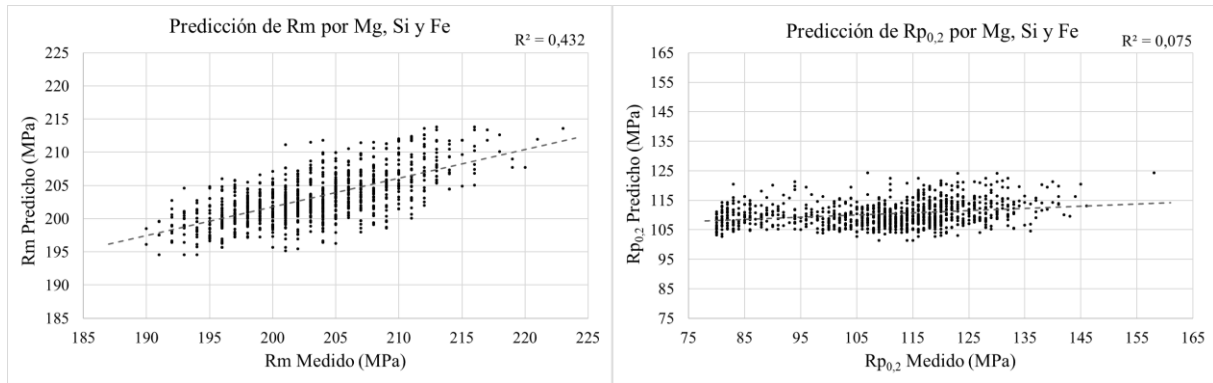


Figura 26: Datos de Resistencia Mecánica y Límite Elástico medidos frente a datos predichos por la regresión con Mg, Si y Fe.

Sin que se pueda apreciar una mejora sustancial con respecto a la regresión que excluía al Fe.

4.2. Efecto del Fe en relación con la Reducción Previa

Para estudiar mejor el efecto del Fe se procede a dividir la población de datos del grupo de Muestras A en seis grupos por rango de Reducción Previa, (Tabla 2 del Anexo A):

Grupo 1: 27-29%

Grupo 2: 42-44%

Grupo 3: 50-52%

Grupo 4: 56-58%

Grupo 5: 66-68%

Grupo 6: 77-79%

Se observa que la correlación del contenido de Fe con la Resistencia Mecánica y el Límite Elástico dentro de cada grupo varía conforme aumenta la reducción, aunque debido a la interferencia de los otros factores aún es difícil observar una tendencia (Tabla 7).

Tabla 7: Correlación del contenido de Fe con la Resistencia Mecánica y el Límite de Elástico en cada uno de los Grupos del Anexo D.

Correlaciones	Todos	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5	Grupo 6
Fe - Rm	0,11	-0,13	-0,04	0,23	0,16	0,23	0,12
Fe - Rp _{0,2}	0,07	-0,06	0,04	0,1	0,05	0,12	0,11

A continuación, se realiza una regresión lineal múltiple en cada uno de los grupos con los contenidos de Si, Fe y Mg como variables independientes para la Resistencia Mecánica y el Límite Elástico, obteniendo el coeficiente por el que se multiplica el contenido de Fe en cada una que se expone junto a sus valores estadísticos en la Tabla 8.

Tabla 8: Datos sobre el efecto del Fe en la Resistencia Mecánica y el Límite Elástico según la regresión en cada uno de los grupos del Anexo D.

Variable de estudio	Grupo	Coefficientes del %Fe	Error Típico (MPa/%)	T	P-valor
Resistencia Mecánica	1	-1,01	10,25	-0,1	0,92
	2	14,62	9,88	1,48	0,14
	3	27,97	6,29	4,45	1,25E-05
	4	32,01	8,03	3,99	1,21E-04
	5	39,92	8,68	4,6	8,60E-06
	6	48,23	8,59	5,62	7,11E-08
Límite Elástico	1	-14,12	44,29	-0,32	0,75
	2	47,39	36,73	1,29	0,2
	3	45,1	31,09	1,45	0,15
	4	40,96	49,46	0,83	0,41
	5	41,52	25,44	1,63	0,1
	6	66,68	25,02	2,67	8,39E-03

En esta tabla se puede apreciar que el P-valor de los coeficientes para la predicción de la Resistencia Mecánica disminuye conforme aumenta la reducción previa y por lo tanto disminuye la probabilidad de la hipótesis nula. Por otro lado, los coeficientes por los que se multiplica el contenido de Fe para el cálculo de la Resistencia Mecánica aumentan conforme aumenta la reducción previa. En cuanto al Límite Elástico, estas tendencias parecen mucho más difíciles de ver. Todo esto se puede apreciar mejor en la Figura 27 en la que se expone el valor del coeficiente para cada grupo asignándole a cada uno de ellos la reducción previa media de cada uno de sus componentes.

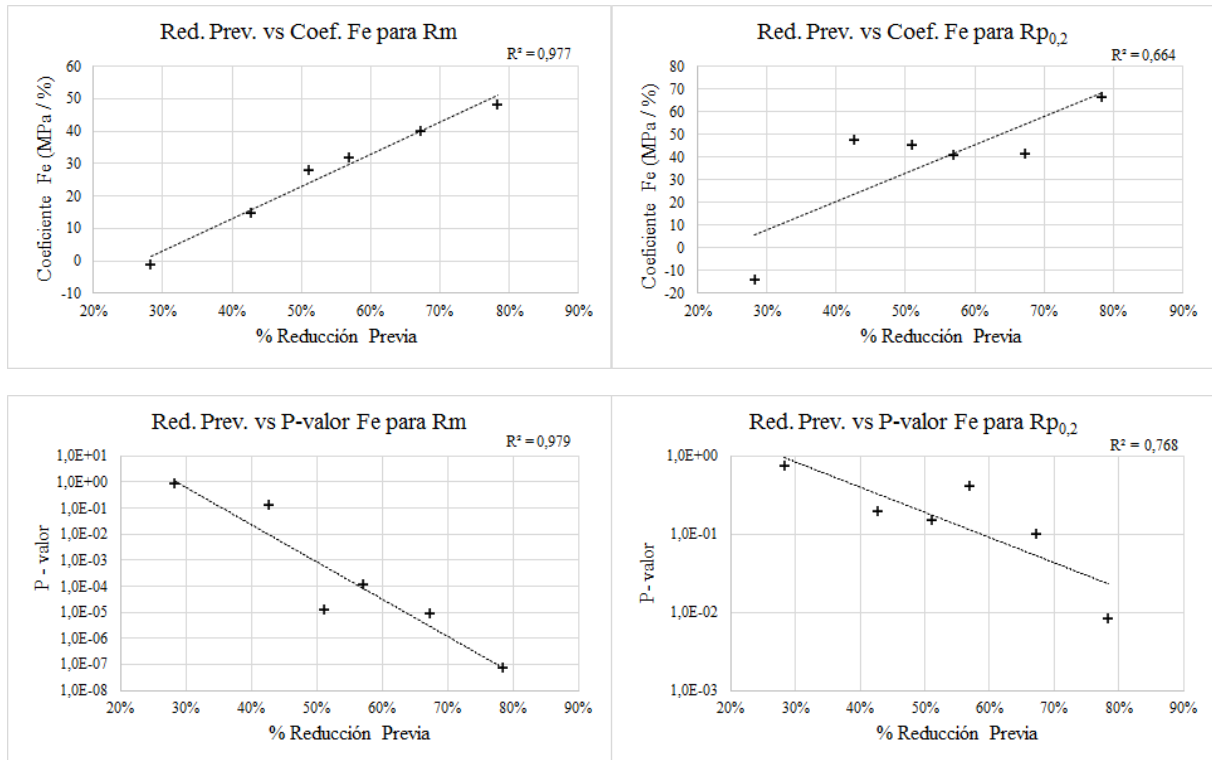


Figura 27: Relación entre la cantidad de reducción previa al recocido y el efecto del Fe en la Resistencia Mecánica y el Límite Elástico.

A continuación, se realiza en la población total una regresión lineal simple con una nueva variable independiente, $Fe*RedP$, que es igual al valor del producto del contenido de Fe por la reducción previa, obteniendo un algoritmo semejante a la Ecuación 10 con los datos que constan en la Tabla 9 y la precisión en la estimación que se observa en la Figura 28.

Tabla 9: Datos sobre el efecto de $Fe*RedP$ en la Resistencia Mecánica y el Límite Elástico según la regresión realizada.

Variable de estudio	Factor	Coeficiente	Valores estadísticos del factor de la variable independiente		
			Error Típico (MPa/%)	T	P-valor
Resistencia Mecánica	Independiente	192,53	0,51	374,58	0
	$Fe*RedP$	62,13	2,9	21,4	6,31E-84
Límite Elástico	Independiente	92,22	1,56	59,23	0
	$Fe*RedP$	106,99	8,79	12,17	7,48E-32

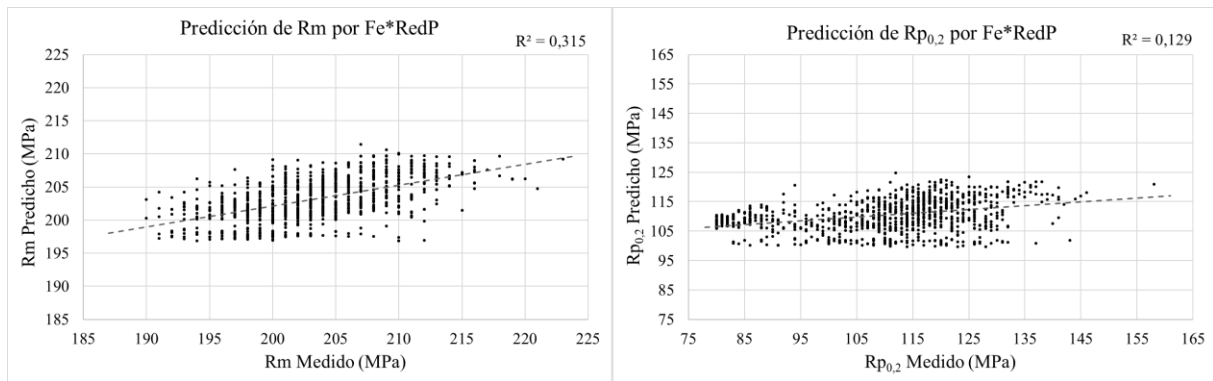


Figura 28: Datos de Resistencia Mecánica y Límite Elástico medidos frente a datos predichos por la regresión con Fe*RedP como variable independiente.

Se observa un mejor ajuste y una reducción del P-valor con respecto a las regresiones hechas con el Fe y la Reducción Previa por separado. En cuanto, al Límite Elástico sigue teniendo un peor ajuste que la Resistencia Mecánica.

Finalmente se realiza una regresión lineal múltiple con las tres variables independientes más exitosas, Si, Mg y Fe*RedP para ambas variables dependientes, obteniendo las Ecuaciones 13 y 14, con los datos estadísticos de la Tabla 10 lográndose el ajuste que se observa en la Figura 29.

$$Rm (MPa) = 106,72 + 34,70 * \%Mg - 50,38 * \%Si + 60,83 * FeRedP$$

Ecuación 13: Estimación de la Resistencia Mecánica a partir del %Mg, %Si y FeRedP en el grupo de Muestras A.

$$Rp_{0,2} (MPa) = 27,30 + 28,25 * \%Mg - 60,59 * \%Si + 104,50 * FeRedP$$

Ecuación 14: Estimación del Límite Elástico a partir del %Mg, %Si y FeRedP en el grupo de Muestras A.

Tabla 10: Resultado de la Regresión con los contenidos de Si, Mg y Fe*RedP como variables independientes.

Variable de estudio	Factor	Coeficiente	Valores estadísticos del factor		
			Error Típico (MPa/%)	T	P-valor
Resistencia Mecánica	Independiente	106,72	3,45	30,9	1,45E-147
	Mg	34,7	1,24	28,09	2,40E-128
	Si	-50,38	1,71	-29,48	7,30E-138
	Fe*RedP	60,83	1,9	32,08	1,17E-155
Límite Elástico	Independiente	27,3	15,51	1,76	7,86E-02
	Mg	28,25	5,55	5,09	4,20E-07
	Si	-60,59	7,67	-7,9	7,53E-15
	Fe*RedP	104,5	8,51	12,27	2,42E-32

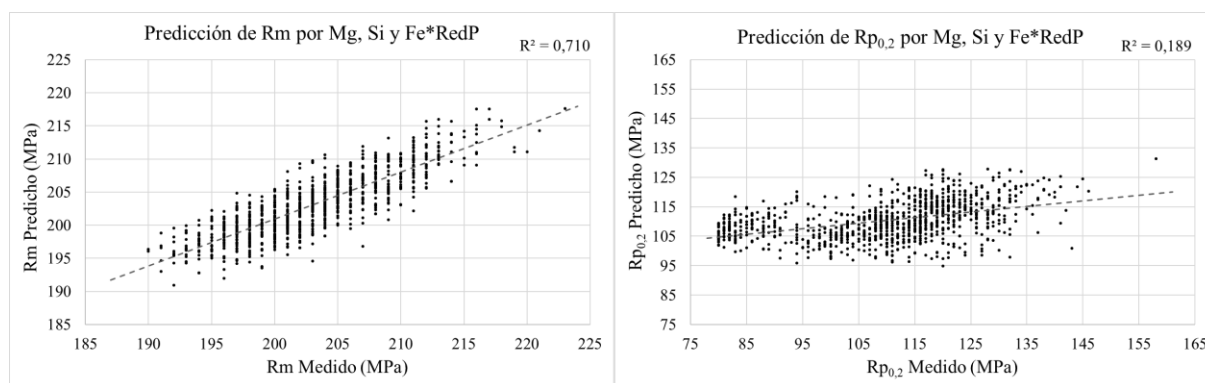


Figura 29: Datos de Resistencia Mecánica y Límite Elástico medidos frente a datos predichos por la regresión con Si, Mg y Fe*RedP como variables independientes.

Con esta regresión se logra un ajuste mucho mejor que con las anteriores y suficientemente relevante para la Resistencia Mecánica con un error medio de 2,32 MPa y una desviación típica de 2,94 MPa, lo que en un rango de 33 MPa supone un 7% y un 9% del rango respectivamente.

El Límite Elástico, sin embargo, tiene un ajuste aún muy insuficiente con esta regresión.

4.2.1. Análisis Metalográfico y de Dureza del efecto del Fe

Para observar el efecto que tienen en la microestructura y en las propiedades de la aleación AA5754 en estado recocido, el contenido de Fe y la reducción previa al recocido total final, se han escogido el grupo de muestras D.

4.2.1.1. Microestructura

Se ha preparado una probeta metalográfica en sección con las dos muestras con el espesor de 9 mm, es decir, aquellas que tras la laminación en caliente no han sufrido ningún proceso posterior y tras ser pulida ha sido observada mediante microscopio óptico obteniendo cinco imágenes de la sección longitudinal en la zona intermedia (a la misma distancia de la superficie como del centro de la sección) como las que aparecen en la Figura 30, en las que se aprecian siliciuros de magnesio (color oscuro) y constituyentes de Fe (color claro), estos últimos se encuentran en mayor cantidad y tamaño en la muestra con mayor contenido de Fe (Muestra H).

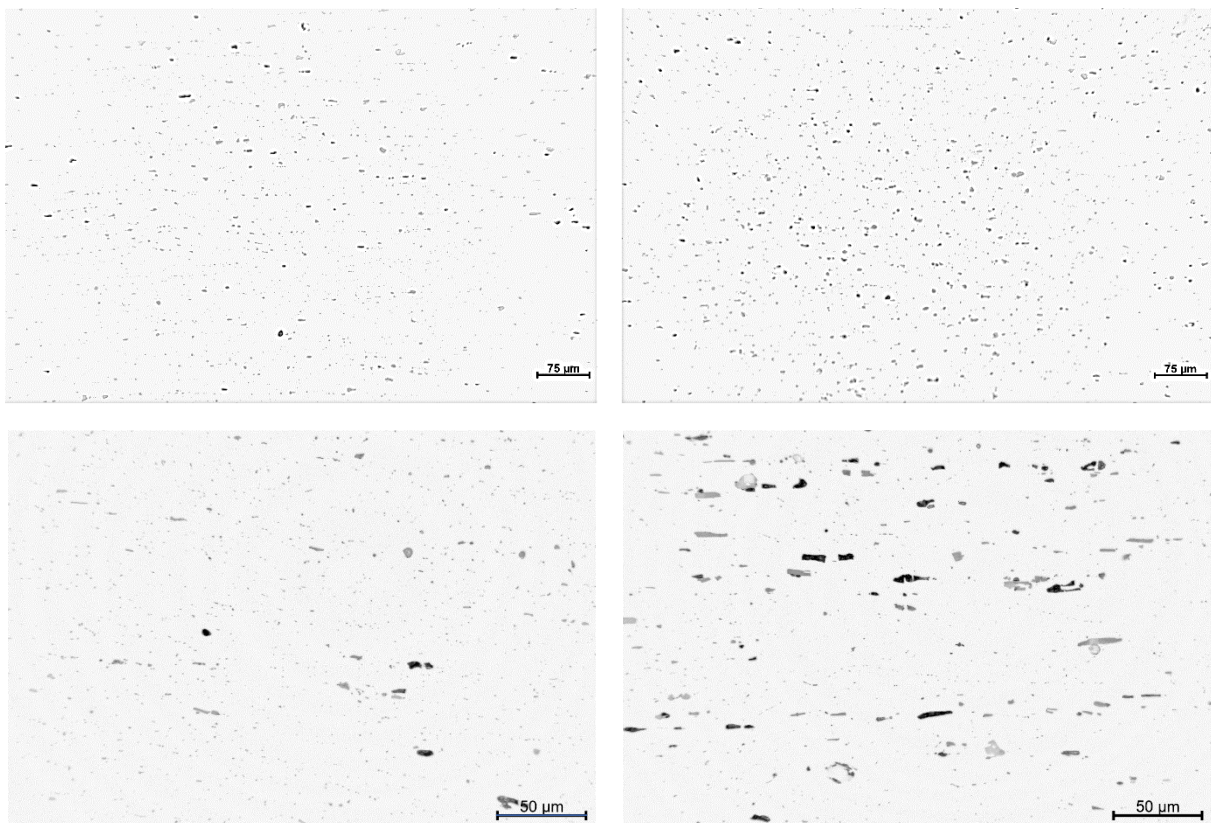


Figura 30: Micrografías ópticas de la Muestra L con un 0,26% de Fe (izq.) y la Muestra H con un 0,36% de Fe (dcha.), arriba a 100 aumentos y debajo a 250 aumentos, ataque con ácido fluorhídrico.

Para poder cuantificar esta diferencia se procede al análisis de imagen con ImageJ obteniendo los resultados que se observan en la Tabla 11 en cuanto a la cantidad y fracción en volumen de las partículas.

Tabla 11: Datos estadísticos de las partículas en las muestras metalográficas L y H.

Muestra	% Fe	Número medio de partículas por mm ²	Fracción en Volumen Media	% RA
A	0,26%	1197	1,74%	16,30%
B	0,36%	2029	2,67%	8,30%

Si se repite el análisis escogiendo únicamente los constituyentes de la fase α se obtienen los resultados de la Tabla 12 que permiten ver que la mayor parte de la fracción en volumen del análisis anterior responde a estos constituyentes.

Tabla 12: Datos estadísticos de las partículas de fase α en las muestras metalográficas L y H.

Muestra	% Fe	Número medio de constituyentes (fase α) por mm ²	Fracción en Volumen Media	% RA
A	0,26%	1082	1,61%	15,26%
B	0,36%	1885	2,56%	9,46%

4.2.1.2. *Tamaño de grano*

Se montaron probetas metalográficas en sección para cada una de las seis reducciones de las muestras L y H (espesores 7, 6, 4.5, 3, 1 y 0,1 mm). Y se realizó un ataque electroquímico para poder observar la estructura de grano de cada una de ellas como se puede ver en las micrografías (todas a la misma escala) de la Figura 31.

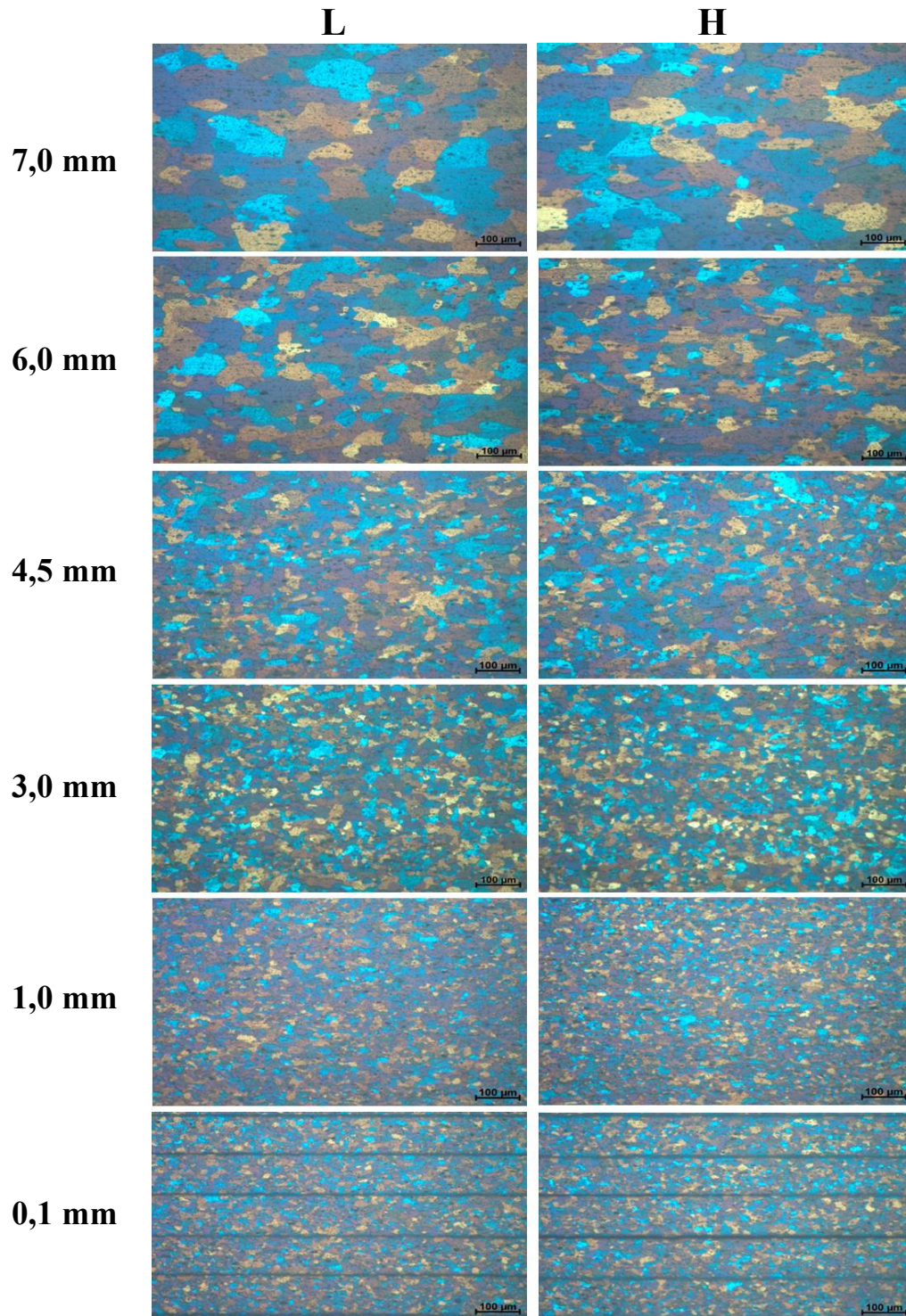


Figura 31, Micrografías ópticas (170 aumentos) mostrando la estructura de grano de la sección longitudinal de cada una de las reducciones de las muestras L (izquierda) y H (Derecha). Desde arriba hasta abajo 7, 6, 4'5, 3, 1 y 0'1 mm de espesor.

A continuación, se analizó el tamaño de grano de las dos muestras mediante el método de interceptación para cada una de las seis reducciones previas, obteniendo los tamaños que se

observan en la tabla 13 y la relación entre la crudeza y el tamaño de grano (en volumen) en el gráfico siguiente (Figura 32).

Tabla 13: Datos del tamaño de grano medido para cada uno de los espesores finales de las dos muestras analizadas.

Espesor (mm)	Crudeza (%)	Diámetro Medio Long. (μm)		Diámetro Medio Trans. (μm)		Diámetro Medio Trans. Corto (μm)		Volumen medio (μm^3)	
		L	H	L	H	L	H	L	H
7	0,29	55 \pm 3	73 \pm 6	55 \pm 5	59 \pm 14	37 \pm 4	36 \pm 3	5,95E+4	8,15E+4
6	0,50	31 \pm 7	38 \pm 8	30 \pm 5	39 \pm 5	22 \pm 2	24 \pm 2	1,07E+4	1,85E+4
4,5	1,00	21 \pm 4	23 \pm 3	20 \pm 3	21 \pm 2	13 \pm 2	14 \pm 1	2,89E+3	3,68E+3
3	2,00	18 \pm 2	20 \pm 2	19 \pm 2	20 \pm 1	13 \pm 2	13 \pm 1	2,19E+3	2,82E+3
1	8,00	11 \pm 2	13 \pm 2	11 \pm 1	13 \pm 2	8 \pm 1	8 \pm 1	4,74E+2	7,24E+2
0,1	89,00	9 \pm 1	11 \pm 1	10 \pm 2	10 \pm 1	7 \pm 1	8 \pm 1	3,73E+2	4,30E+2

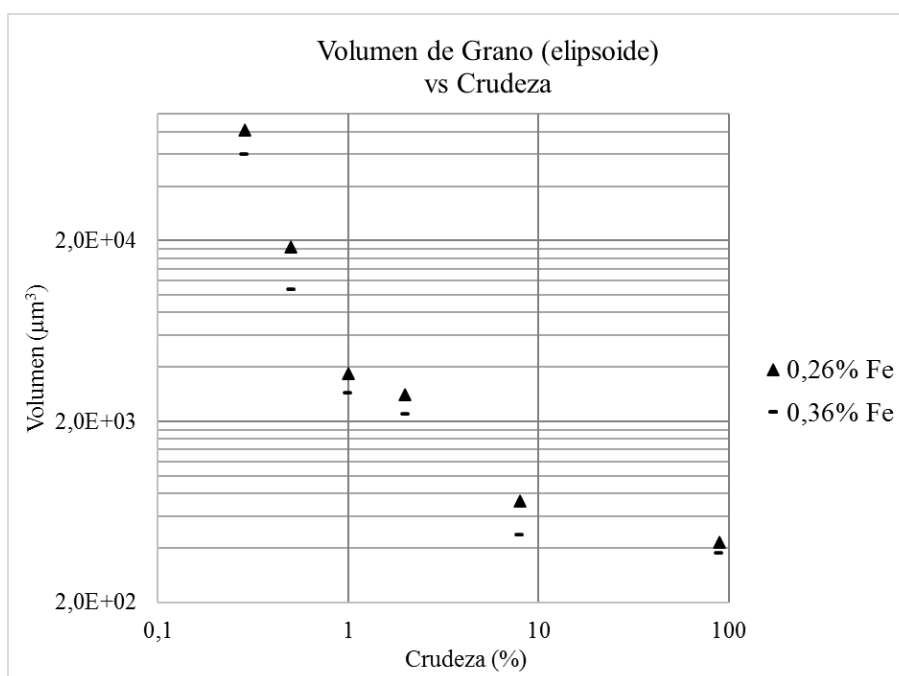


Figura 32: Relación entre el volumen de grano y la Crudeza en el Grupo de Muestras D.

Si se utiliza parte de la expresión de la ecuación de Hall-Petch convirtiendo el tamaño de grano en la raíz cuadrada del diámetro equivalente y se relaciona este con la variable $Fe*RedP$ se obtiene la relación que se observa en la Figura 33.

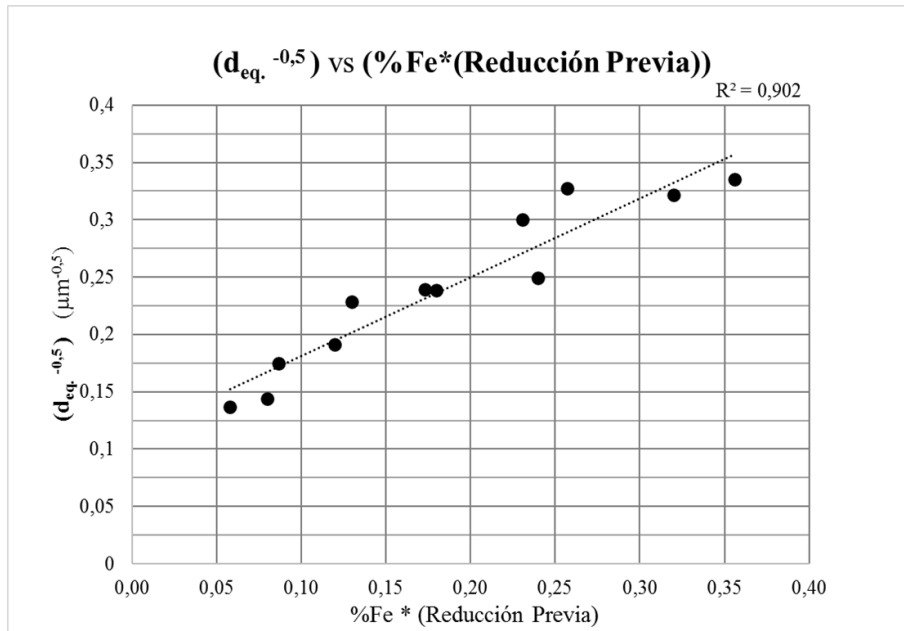


Figura 33: Relación entre la inversa de la raíz cuadrada del diámetro equivalente medio de grano con $Fe*RedP$ en el Grupo de Muestras D.

Se puede apreciar que hay una gran relación entre el tamaño de grano y la variable compuesta. Esta relación es aún más fuerte si en vez del diámetro equivalente ($R^2 = 0,902$) se escoge el diámetro medio de grano en la dirección longitudinal ($R^2 = 0,934$) como se ve en la Figura 34.

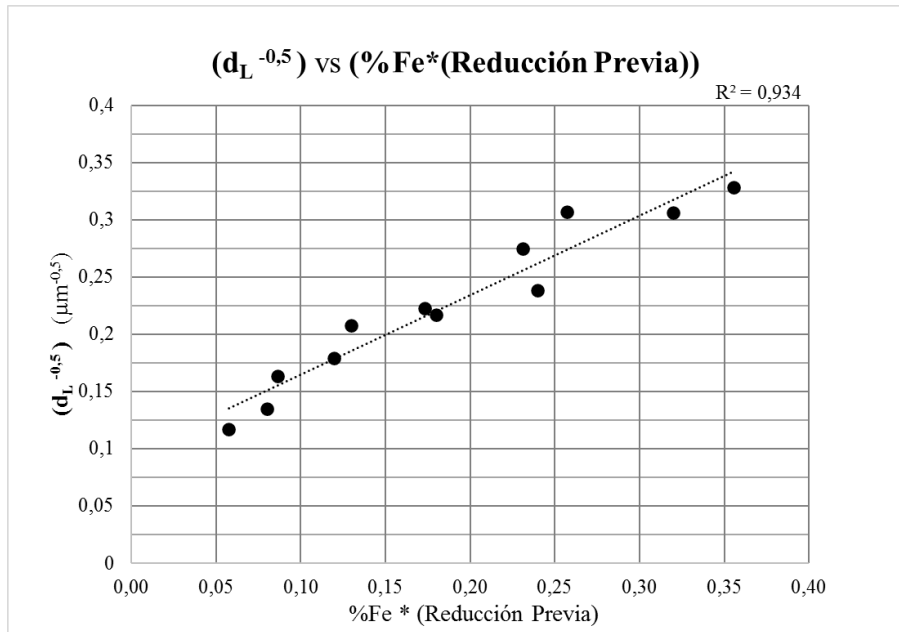


Figura 34: Relación entre la inversa de la raíz cuadrada del diámetro longitudinal medio de grano con Fe*RedP en el Grupo de Muestras D.

Y si, a continuación, teniendo en cuenta los resultados del efecto de la Reducción Previa sobre el efecto del contenido de Fe en la Resistencia Mecánica (Figura 35) y el límite aproximado de reducción mínima para dar lugar a la PSN propuesto por la Bibliografía (Figura 7) se le resta a la Reducción previa un 20% a la hora de calcular la variable compuesta se obtiene una relación aún más fuerte ($R^2 = 0,961$).

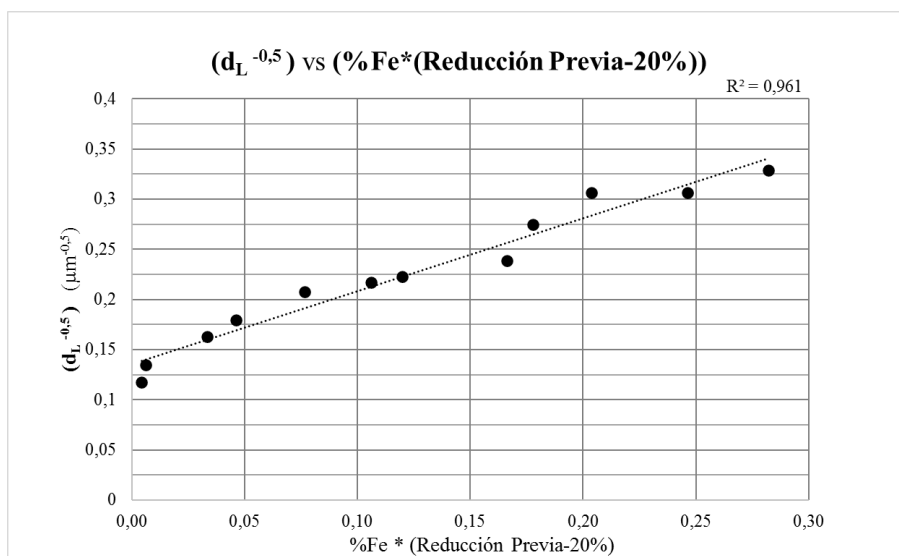


Figura 35: Relación entre la inversa de la raíz cuadrada del diámetro equivalente medio de grano con Fe*(RedP-20%) en el Grupo de Muestras D.

4.2.1.3. Dureza

La dureza es una propiedad que se utiliza a menudo en la ciencia de los materiales para aproximar los valores de la Resistencia Mecánica y del Límite Elástico. (Asgharzadeh, Nazari Tiji, & Emaeilpour, 2020) Por ese motivo se analizó la microdureza de cada una de las 12 probetas del Grupo de Muestras D en la sección longitudinal (Tabla 14) y se relacionó con la Crudeza (Figura 36).

Tabla 14: Medidas de dureza media para cada uno de los espesores finales de las dos muestras analizadas.

Espesor (mm)	Crudeza (%)	Dureza (HV)	
		L	H
7,0	0,29	55,5 ± 1,1	55,4 ± 0,5
6,0	0,5	56,6 ± 0,4	55,6 ± 0,8
4,5	1	56,9 ± 0,7	57,3 ± 0,9
3,0	2	57,8 ± 0,9	58,1 ± 1,1
1,0	8	60,1 ± 0,9	62,4 ± 1,3
0,1	89	64,8 ± 0,9	72,1 ± 1,5

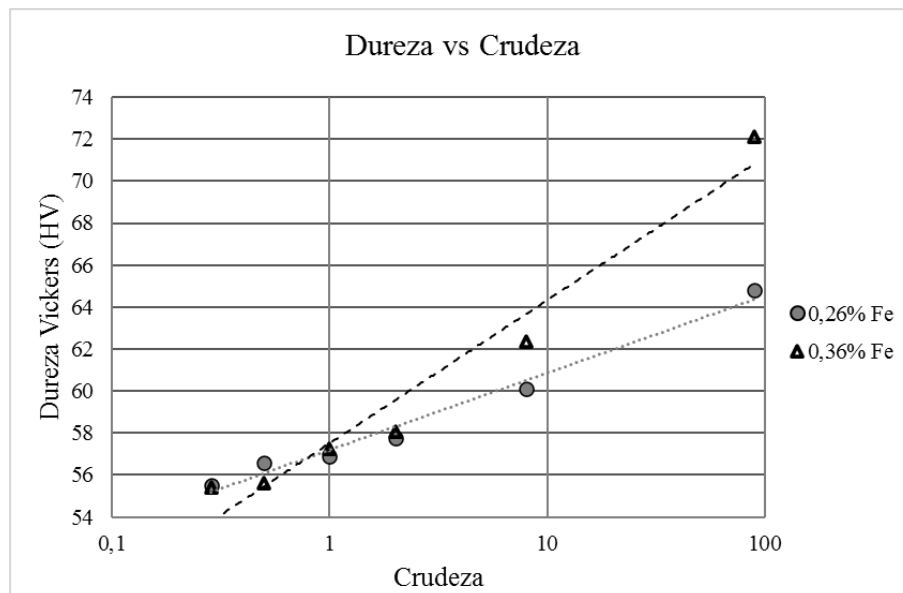


Figura 36: Dureza vs Crudeza Previa al recocido total final para los dos contenidos de Fe de las muestras L (0,36%) y H (0,26%).

A continuación, se relaciona la Dureza con la inversa del diámetro (Figura 37) obteniendo una relación fuerte ($R^2 = 0,934$) aproximable a una función polinómica de grado 2.

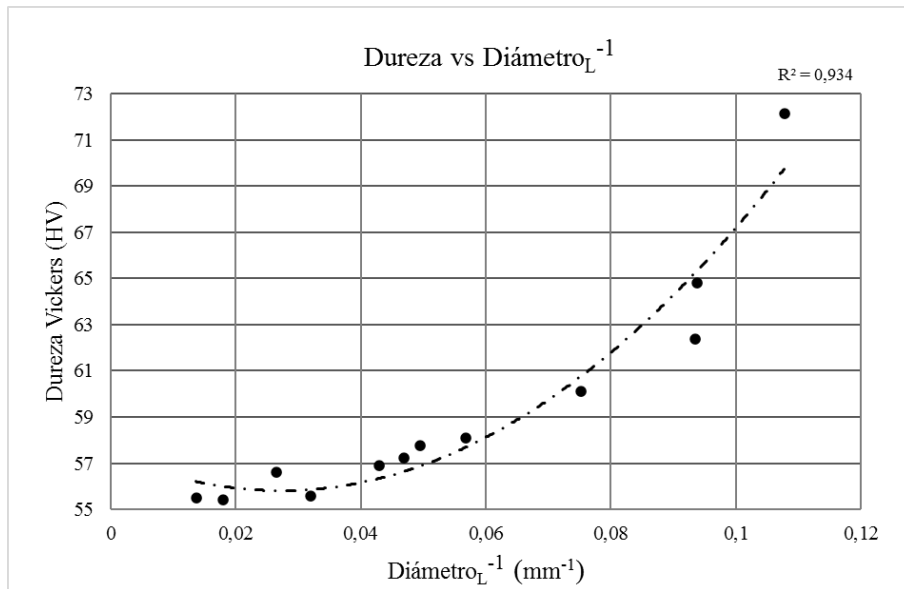


Figura 37: Relación entre la dureza y la inversa del diámetro longitudinal medio en las muestras analizadas.

Y si a continuación se relaciona la Dureza con la variable compuesta (Fe*RedP) también se encuentra una relación fuerte (Figura 38).

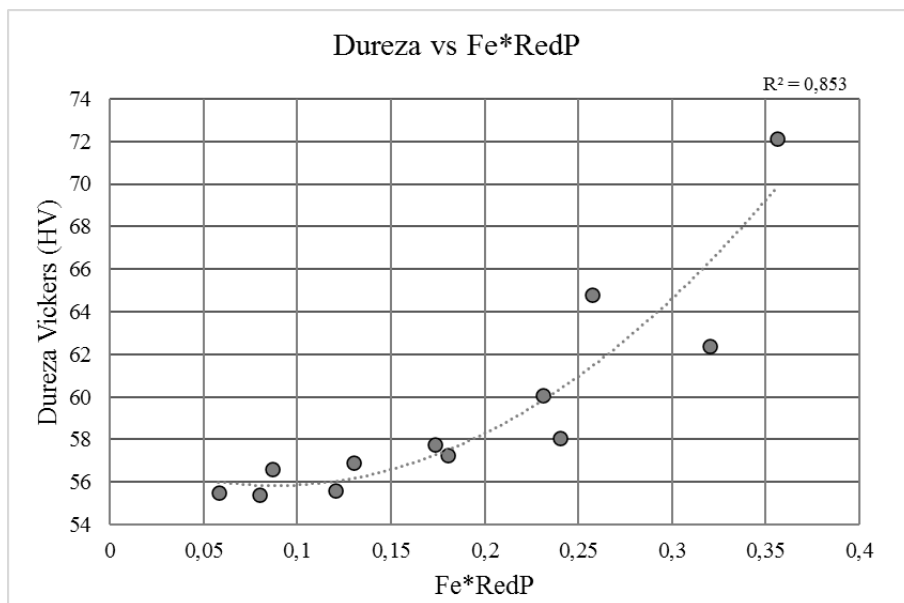


Figura 38: Relación entre la dureza y la Fe*RedP en las muestras analizadas.

Si en la última relación se corrige la variable compuesta restando el 20% de la reducción como se hizo en la Figura 36, se obtiene una mejor relación (Figura 39).

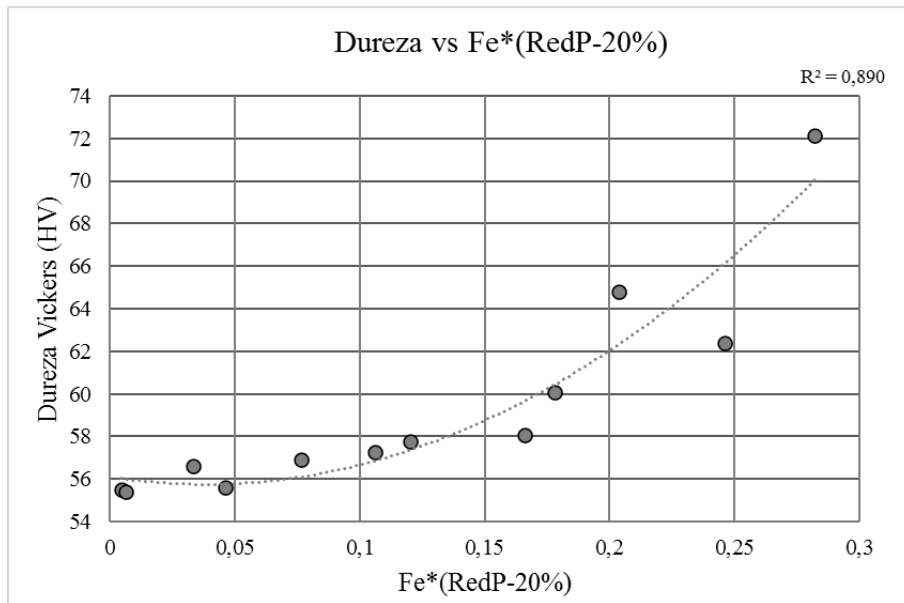


Figura 39: Relación entre la dureza y la Fe*(RedP-20%) en las muestras analizadas.

4.2.1.4. Aplicación de la variable Fe*(Red.Prev-20%) al modelo general

A continuación, se aplica la variable *RedP. – 20%* al modelo general en sustitución de la variable *Fe*RedP*, obteniendo los datos que constan en la Tabla 15 que dan lugar al ajuste que se observa en la Figura 40 sin que se pueda apreciar un cambio significativo con respecto a la regresión previa.

Tabla 15: Resultado de la Regresión con los contenidos de Si, Mg y (Fe*RedP-20%) como variables independientes en el Grupo de Muestras A.

Variable de estudio	Factor	Coeficiente	Valores estadísticos del factor		
			Error Típico (MPa/%)	T	P-valor
Resistencia mecánica	Independiente	110,12	3,44	32,02	3,22E-155
	Mg	34,65	1,23	28,07	3,50E-128
	Si	-49,78	1,71	-29,13	1,87E-135
	Fe*(RedP-20%)	62,75	1,95	32,11	6,83E-156
Límite Elástico	Independiente	33,11	15,45	2,14	3,23E-02
	Mg	28,17	5,54	5,08	4,48E-07
	Si	-59,55	7,67	-7,76	2,10E-14
	Fe*(RedP-20%)	108,01	8,78	12,31	1,68E-32

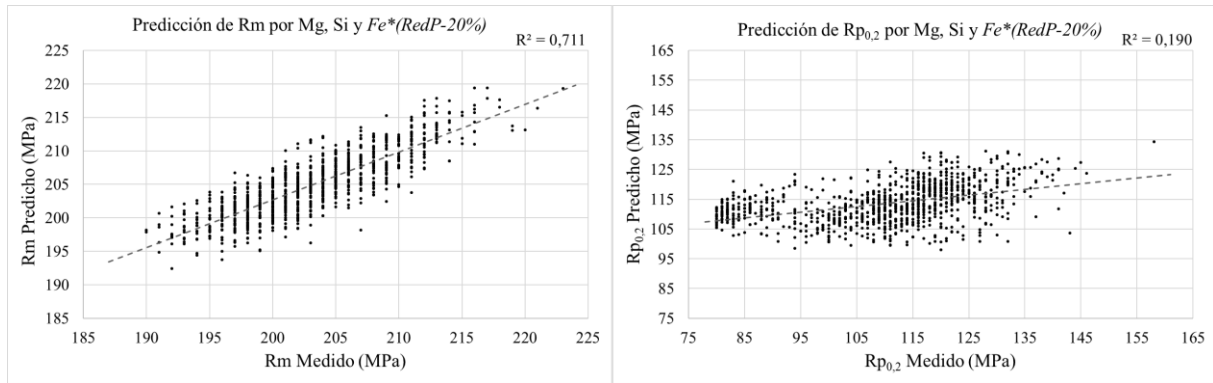


Figura 40: Datos de Resistencia Mecánica y Límite Elástico medidos frente a datos predichos por la regresión con Si, Mg y Fe*(RedP-20%) como variables independientes.

4.3. Efecto del Si

La relación negativa del Si con la Resistencia Mecánica ya fue estudiada en una primera aproximación por el autor en una publicación anterior (Vicent Fanconi, Gil Fernández-Marcote, & Ruiz-Bustanza, 2023), obteniendo al analizar el contenido de Mg en la matriz de distintas muestras de AA5754 con un similar contenido de Mg como este variaba disminuyendo según aumentaba el contenido de Si y la precipitación de Mg_2Si . Concluyendo que el Si al precipitar Mg de la matriz para dar lugar a siliciuros de magnesio, disminuía el contenido de Mg en esta, por lo que disminuía su efecto de endurecimiento por solución sólida, lo que significaba que el Si reducía la Resistencia Mecánica de la aleación AA5754.

4.3.1. Comprobación de la pérdida de Mg en solución sólida.

Para comprobar esta afirmación se ha aumentado la muestra a analizar de las cinco probetas del estudio original a un total de 25 (Anexo E), cuya matriz ha sido analizada mediante Microscopía Electrónica de Barrido en sus secciones longitudinales a más de 1 mm de la superficie y del centro obteniendo los resultados que figuran en la Tabla 16, es importante resaltar que los datos obtenidos en este análisis son semicuantitativos.

Como se puede observar en la Figura 41, únicamente se halló Mg y Al en la matriz, sin detectarse un porcentaje en peso relevante de otro elemento (superior a 0,005%) en ninguna de las muestras analizadas.

Esto significaría que todo el endurecimiento por solución sólida en este producto de la AA5754 se debería al Mg.

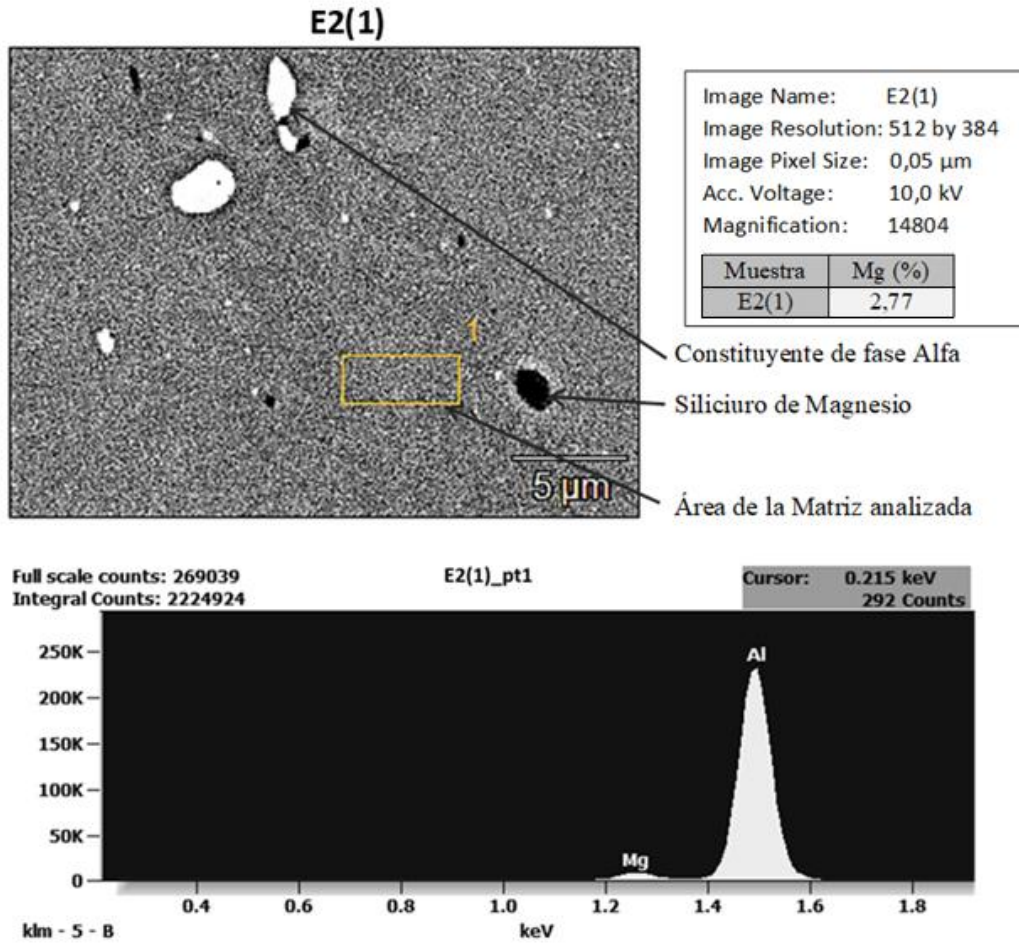


Figura 41: Micrografía de FESEM (3000 aumentos) con detector de electrones retrodispersados (ABS) de la muestra E2 (arriba), junto a un microanálisis EDX de una sección de la matriz de la muestra E2 (abajo).

Tabla 16: Contenidos de Mg detectados en la matriz de las muestras que constan en el anexo E.

Muestra	Fe (%)	Si (%)	Mg (%)	Mg detectado en matriz (%)
E1	0,32	0,19	3,03	2,81 ± 0,04
E2	0,30	0,21	3,00	2,73 ± 0,03
E3	0,30	0,20	3,02	2,70 ± 0,03
E4	0,30	0,23	2,98	2,71 ± 0,02
E5	0,33	0,24	3,03	2,73 ± 0,02
E6	0,30	0,24	3,02	2,83 ± 0,06
E7	0,28	0,24	2,93	2,56 ± 0,08
E8	0,31	0,26	3,00	2,81 ± 0,07
E9	0,33	0,25	3,04	2,70 ± 0,03
E10	0,33	0,27	3,01	2,68 ± 0,04
E11	0,31	0,29	3,04	2,74 ± 0,02
E12	0,36	0,29	2,92	2,59 ± 0,00
E13	0,31	0,30	3,02	2,68 ± 0,08
E14	0,33	0,30	3,01	2,54 ± 0,07
E15	0,31	0,30	2,94	2,53 ± 0,06
E16	0,31	0,31	3,00	2,60 ± 0,06
E17	0,33	0,33	2,94	2,37 ± 0,10
E18	0,30	0,33	2,95	2,59 ± 0,06
E19	0,30	0,34	3,07	2,64 ± 0,03
E20	0,31	0,37	3,10	2,58 ± 0,05
EP-1	0,3	0,13	2,89	2,79 ± 0,02
EP-2	0,26	0,22	2,89	2,58 ± 0,04
EP-3	0,28	0,26	2,84	2,59 ± 0,02
EP-4	0,3	0,32	2,9	2,51 ± 0,05
EP-5	0,28	0,33	2,86	2,36 ± 0,03

Si se utiliza la diferencia entre el contenido total de Mg y el contenido en la matriz y se la relaciona con el contenido de Si se puede confirmar la relación inversamente proporcional entre ambos valores, Figura 42.

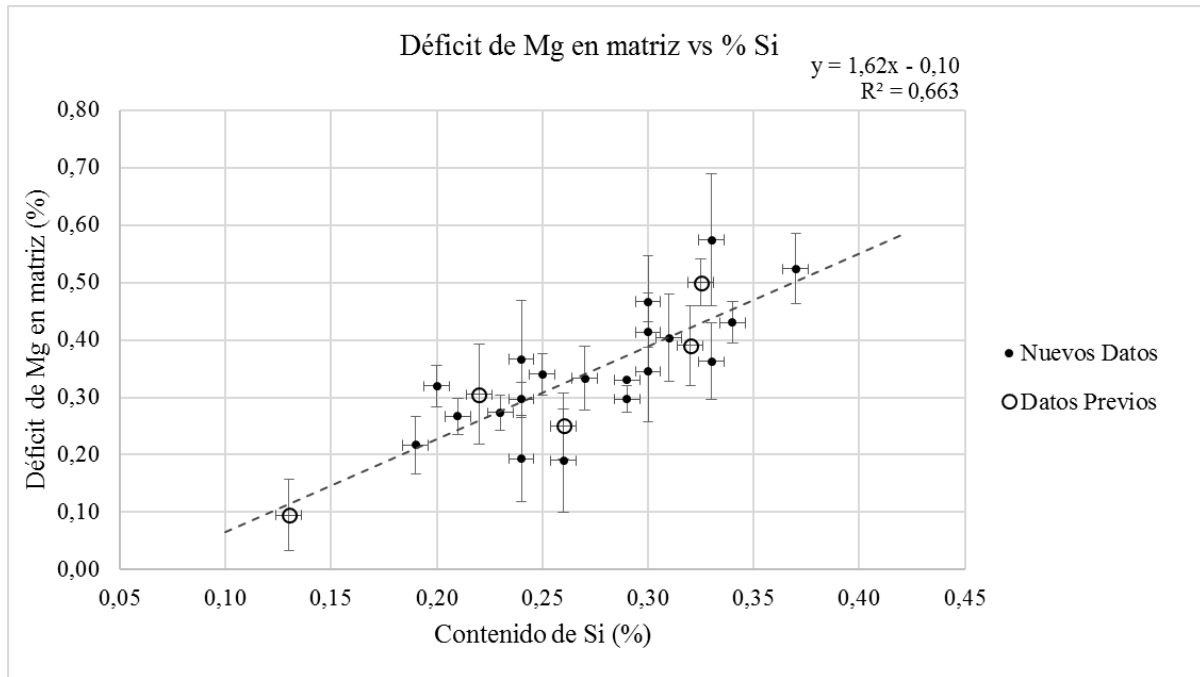


Figura 42: Déficit de Mg en matriz vs contenido de Si en el grupo de muestras E, con los datos del artículo previo representados con un círculo vacío

4.3.1.1. Imprecisión en la medida del contenido de Mg de la matriz

En los datos de contenido de Mg en matriz presentados se ha observado una relevante desviación representada por las barras de error verticales de la Figura 42. Esta desviación tiene dos causas: la imprecisión del equipo y la heterogeneidad de la matriz.

4.3.1.2. Imprecisión del equipo

La imprecisión del equipo es la del dato de medida, es decir el segundo decimal del porcentaje, $\pm 0,01\%$.

4.3.1.3. Heterogeneidad de la matriz

Para comprobar si el Mg puede encontrarse disuelto en la matriz de forma heterogénea en la sección ensayada se ha escogido la muestra E11 preparando una probeta en sección longitudinal de 20 mm de largo para el ensayo de barrido, seleccionando 5 zonas de análisis a distintas profundidades del espesor según aparece en la Figura 43.

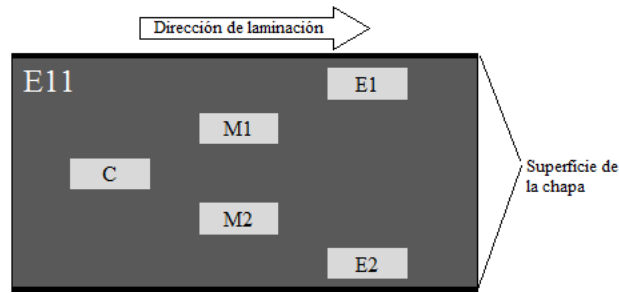


Figura 43: Esquema de las zonas analizadas en la muestra E11.

Obteniendo los contenidos de Mg en matriz que se ofrecen en la Tabla 17 y que dan lugar a la Figura 44.

Tabla 17: Contenido de Mg en matriz detectado en cada zona, asignando una profundidad de 0 mm al centro de la sección.

Zona	Profundidad (mm)	Mg en matriz (%)
E1	-3,50	2,74 ± 0,02
M1	-1,75	2,78 ± 0,04
C	0,00	2,65 ± 0,04
M2	1,75	2,84 ± 0,03
E2	3,50	2,78 ± 0,05

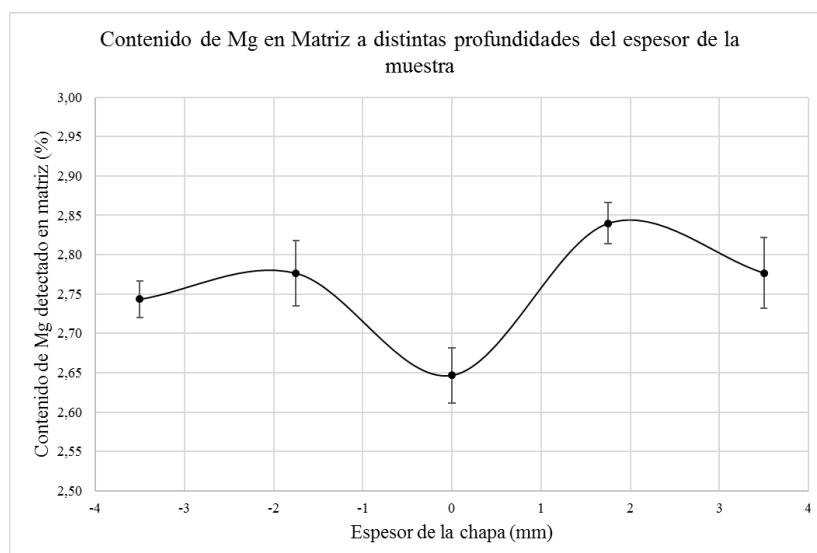


Figura 44: Contenido de Mg en matriz a distintas profundidades del espesor de la muestra E11, asignando una profundidad de 0 mm al centro de la sección.

De modo, que se observa una cierta heterogeneidad entre las distintas profundidades de la sección, habiendo un menor contenido de Mg en matriz en el centro de la sección que en el resto de esta lo que puede deberse al fenómeno de macrosegregación de colada. (Moriceau, Laval, Schlecht, & Soulier, 1981) Por este motivo en el presente estudio con el objetivo de reducir el efecto de esta heterogeneidad se ha analizado el metal en una zona intermedia entre la superficie y el centro de la sección.

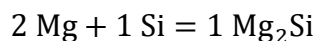
4.3.1.4. Precipitación de Mg_2Si y déficit de Mg en matriz

La pendiente de la línea de tendencia de la nube de puntos de la Figura 42 es igual a 1,62, Ecuación 15.

$$D\acute{e}ficit\ de\ matriz = 1,62 * \%Si - 0,1$$

Ecuación 15: Relación del Déficit de Mg en Matriz con el %Si.

Esto como ya se indicaba en el estudio anterior podría estar relacionado con el equilibrio estequiométrico de la reacción de precipitación de los siliciuros de magnesio ya abordado en un estudio anterior (Ecuación 16) (Vicent Fanconi, Gil Fernández-Marcote, & Ruiz-Bustinza, 2023).



$$-\frac{1\ Si\ unit\ of\ mass}{28,09\ g \cdot mol^{-1}} \cdot 2 \cdot 24,31\ g \cdot mol^{-1} = 1,73\ units\ of\ Mass$$

Ecuación 16: Relación estequiométrica de la formación de Mg_2Si .
(Vicent Fanconi, Gil Fernández-Marcote, & Ruiz-Bustinza, 2023)

La pendiente calculada en la Figura 42 es ligeramente menor que la relación estequiométrica, lo que podría deberse a que una parte del Si no produzca un déficit de Mg, sino que se agote en otro desempeño, como podría ser la formación de la fase α (Al-(Fe,Mn)Si) (Mondolfo, 1976).

4.3.2. Microestructura

A continuación, se analizó la fracción en volumen de Mg_2Si de las 25 muestras mediante el programa ImageJ, pudiendo relacionar el número y tamaño de estos con el contenido de Si (Figura 45) y la diferencia entre el Mg en solución sólida (Figura 46).

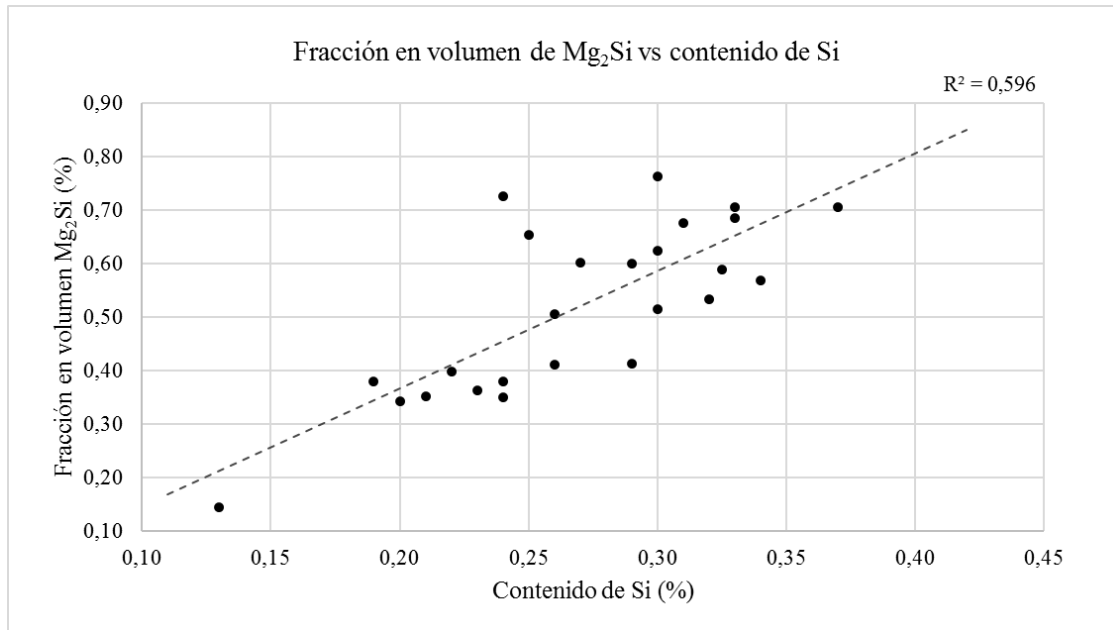


Figura 45: Relación entre el contenido de Si y la fracción en volumen media de Mg₂Si en el grupo de muestras E.

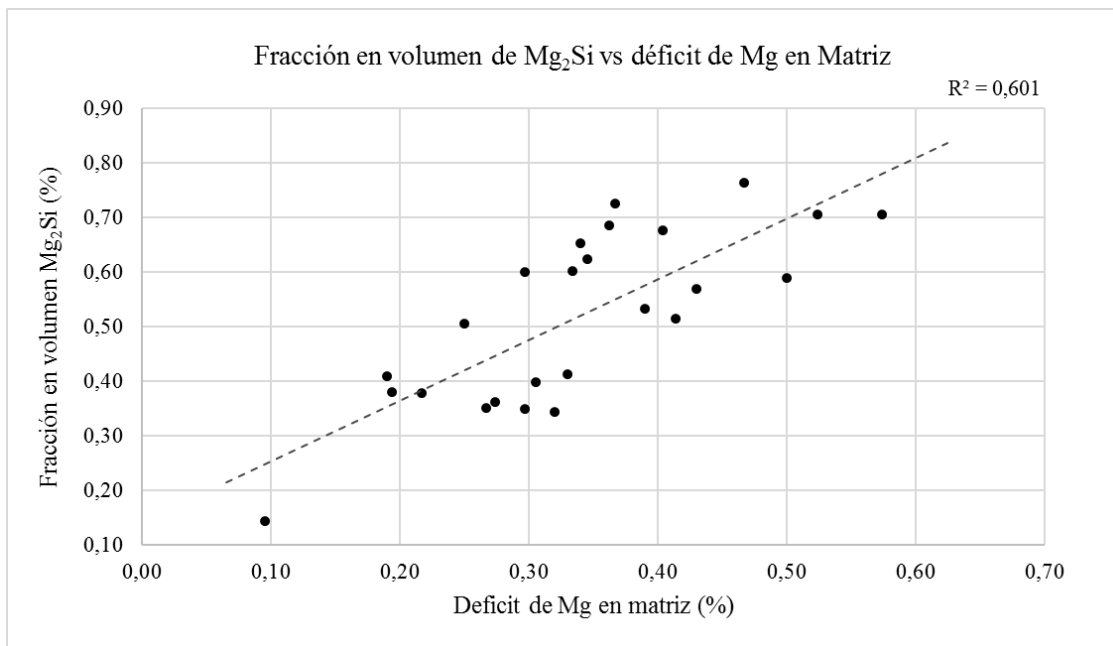


Figura 46: Relación entre el déficit de Mg en matriz y la fracción en volumen de Mg₂Si en el grupo de muestras E.

4.3.3. Conductividad

Otra forma de comprobar la pérdida de Mg en la Matriz por precipitación con el Si es la medición de la variación de la conductividad según aumenta el contenido de Si porque, como se ha indicado previamente, a un mayor contenido en solución sólida una menor conductividad.

Para ello se han escogido las muestras del Anexo C y se ha analizado su conductividad, Tabla 18. Que al relacionarse con el contenido de Si, la Resistencia Mecánica y el Límite Elástico dan lugar a las relaciones que se observan en las Figuras 47, 48 y 49.

Tabla 18: Conductividad y propiedades mecánicas del Grupo de Muestras C.

Muestra	Si (%)	Conductividad (mS/m)	Rm (MPa)	Rp _{0.2} (MPa)
C1	0,17	19,06 ± 0,03	219	122
C2	0,19	19,37 ± 0,01	211	107
C3	0,20	19,34 ± 0,01	216	113
C4	0,21	19,6 ± 0,01	213	112
C5	0,23	19,63 ± 0,01	213	110
C6	0,24	19,49 ± 0,00	213	112
C7	0,24	19,74 ± 0,03	211	105
C8	0,25	19,85 ± 0,02	210	108
C9	0,27	19,64 ± 0,01	209	109
C10	0,28	19,73 ± 0,01	209	112
C11	0,29	20,04 ± 0,03	211	108
C12	0,30	19,65 ± 0,01	207	105
C13	0,31	19,82 ± 0,01	208	108
C14	0,33	19,93 ± 0,01	206	106

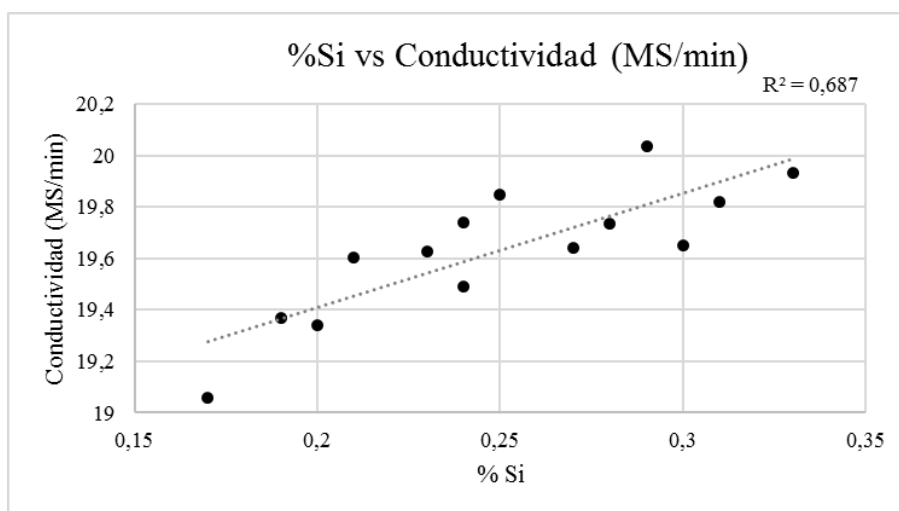


Figura 47: Conductividad vs contenido de Si en las muestras del Anexo C.

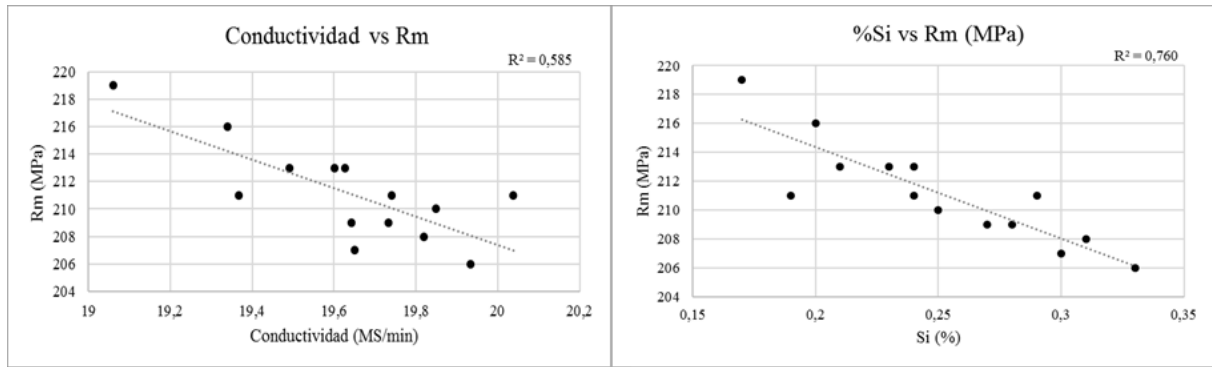


Figura 48: Conductividad vs Resistencia Mecánica (izq.) y contenido de Si vs a la Resistencia Mecánica en las muestras del Anexo C.

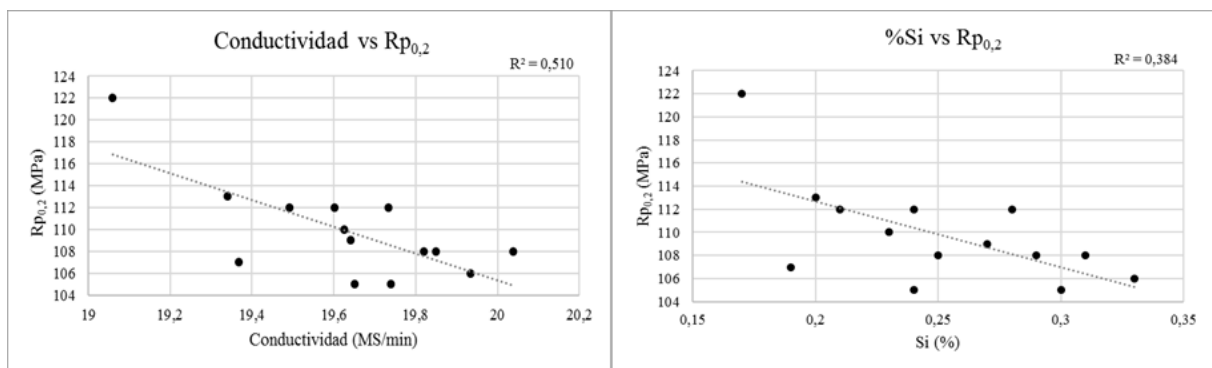


Figura 49: Conductividad vs Resistencia Mecánica (izq.) y contenido de Si vs a la Resistencia Mecánica en las muestras del Anexo C.

Se puede establecer que existe una relación entre el contenido de Si y la conductividad en la aleación AA5754 en estado recocido total, y que esta relación también se puede establecer entre ambas variables con la Resistencia Mecánica, mientras que el Límite Elástico, una vez más, no muestra una relación clara con ninguna de las dos.

4.4. Imprecisión en la estimación del Límite Elástico

En muestras que han sido producidas industrialmente y no en un laboratorio, como es el caso del presente estudio, es necesario tener en cuenta la variabilidad que se da en la fabricación a esta escala. Una temperatura un poco más baja o un poco más alta, un poco más de tensión en una desbobinadora, o cualquier otra pequeña variación, normal a escala industrial, harán que cambien el tamaño de grano, la orientación de estos y su forma, la densidad de las dislocaciones, etc.

Una variable de gran utilidad para conocer si ha habido una variación en el proceso que haya podido dar lugar a un estado del metal distinto, y que tiene una gran relación con la Resistencia Mecánica y el Límite Elástico es, como se explicó anteriormente, el coeficiente n, el cual se

utilizará a continuación para arrojar algo de luz sobre el error en la estimación del Límite Elástico que se vio en todos los análisis anteriores.

Para ello se utilizará el grupo de muestras B, compuesto por 629 muestras de un mismo producto que han sido sometidas al mismo proceso de fabricación, sin haber sufrido ningún recocido total o laminación en frío, terminando en la laminación en caliente, reduciéndose por lo tanto el número de operaciones que pueden añadir variabilidad al proceso.

Además, se han escogido composiciones con un 3,0% de Mg $\pm 0,05\%$ para limitar la influencia de este elemento en el coeficiente n.

En primer lugar, se ha analizado la relación del coeficiente n con la Resistencia Mecánica y el Límite Elástico como se ve en las Figura 50. Observando que mientras que la relación de n con la Resistencia Mecánica no es fuerte si lo es con el Límite Elástico.

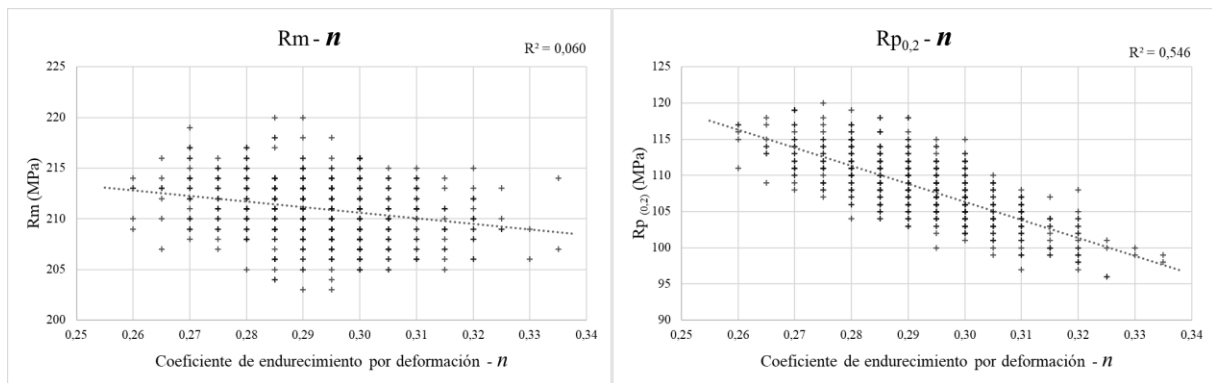


Figura 50: La Resistencia Mecánica (izq.) y el Límite Elástico (dcha.) frente al coeficiente de endurecimiento por deformación, en las muestras del anexo B.

Si se realiza una regresión de n con Rp_{0,2} y Rm como variables independientes (Figura 51) se observa un mejor ajuste que en la relación Rp_{0,2} - n indicando que la variación del Rm también está relacionada con la variación del coeficiente de endurecimiento por deformación con un p-valor en esta muestra igual a 2,21E-18.

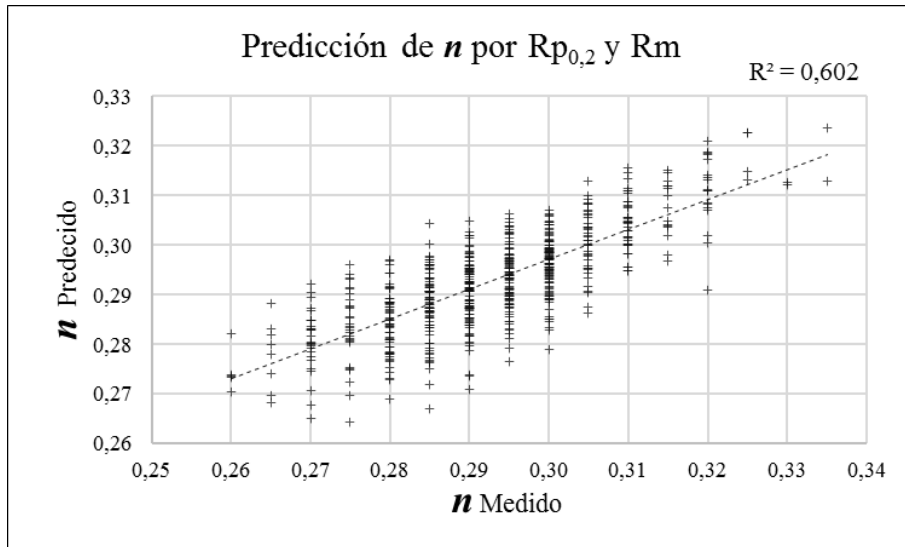


Figura 51: Datos del coeficiente de endurecimiento por deformación n medidos frente a datos predichos por la regresión con R_m y $R_{p0,2}$ como variables independientes en el Grupo de Muestras B.

Si se procede a aplicar la misma regresión lineal múltiple que anteriormente con los contenidos de Si, Fe y Mg como variables independientes para la predicción del Límite Elástico y a continuación se repite la misma regresión añadiendo el coeficiente de endurecimiento por deformación se obtienen los valores de ambas que constan en la Tabla 19. Los ajustes de cada una se pueden comparar en la Figura 52.

Tabla 19: Resultados de la regresión realizada para el Límite Elástico con el Si, Fe y Mg como únicas variables independientes y añadiendo n .

Variable de estudio	Factor	Coeficiente	Valores estadísticos del factor de la variable independiente		
			Error Típico	T	P-valor
Límite Elástico (sin n)	Independiente	1,46	21,12	0,07	9,45E-01
	Si	-16,19	3,74	-4,33	1,76E-05
	Fe	34,25	8,13	4,22	2,86E-05
	Mg	33,10	7,03	4,71	3,11E-06
Límite Elástico (con n)	Independiente	84,42	14,09	5,99	3,49E-09
	n	-247,03	8,52	-29,00	1,01E-117
	Si	-15,94	2,44	-6,52	1,44E-10
	Fe	20,59	5,33	3,86	1,23E-04
	Mg	30,97	4,59	6,74	3,59E-11

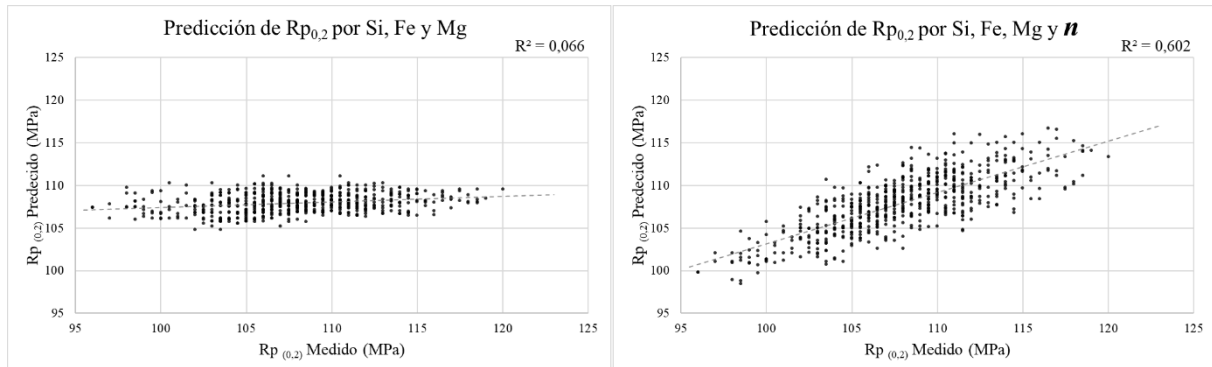


Figura 52: Datos de Límite Elástico medidos frente a datos predichos por la regresión con Si, Mg y Fe (izq.) como variables independientes y añadiendo n a las variables independientes (dcha.) en el Grupo de Muestras B.

Es de destacar el mucho mayor ajuste en la predicción del Límite Elástico al incluir el coeficiente n, algo que se ve especialmente en el mucho más bajo P-valor de los coeficientes en la regresión (con excepción del P-valor del Fe que es similar en ambas).

Resulta relevante el que los coeficientes del Si y el Mg en la regresión sin el coeficiente n estén próximos a los que tienen cuando se le añade en la regresión que tiene un ajuste mayor. Indicando que la estimación del efecto del Si y el Mg en el Límite Elástico sin tener en cuenta n se aproxima de forma relevante al real a pesar de que debido a la influencia de n el ajuste de la regresión sea mucho menor.

En cuanto al Fe el coeficiente que se calcula a su efecto por medio de una regresión que no incluya al coeficiente de endurecimiento n solo resulta indicativo de cuál sería el efecto calculado de incluir a n en la regresión. Por ejemplo, en este caso se podría decir que el primer coeficiente del Fe indica que este aumenta y no disminuye el Límite Elástico.

5. Discusión

Según estudios previos el Si no tendría un efecto relevante en la resistencia de la aleación AA5754 y en todo caso este sería positivo, sin embargo, en este estudio se ha observado una fuerte relación negativa entre el contenido de Si en la aleación AA5754 en estado recocido total y la Resistencia Mecánica y el Límite Elástico.

Según estudios previos, tras un recocido total no sería relevante el proceso que haya sufrido previamente la aleación AA5754 para determinar su Resistencia Mecánica o su Límite Elástico, sin embargo, en esta investigación se ha observado que la laminación previa al recocido total es relevante en cuanto a la Resistencia Mecánica y el Límite Elástico.

Según estudios previos el efecto del Fe en la Resistencia Mecánica de esta aleación en este estado no era fuerte, sin embargo, se ha observado que un contenido del 0,3% de Fe en determinadas circunstancias podía generar un aumento de la Resistencia Mecánica de más de 10 MPa.

A continuación, se discutirán estos resultados.

5.1. Efecto del Si

Se ha determinado mediante microscopía electrónica (EDX) que la diferencia en la aleación AA5754 entre el contenido de Mg total y en solución sólida aumenta según aumenta el porcentaje de Si. Y además que la conductividad, como medida inversa de la concentración en solución sólida, también aumenta.

Además, se ha observado con el método estadístico de la regresión lineal que el aumento del contenido de Si está fuertemente relacionado con una disminución de la Resistencia Mecánica y algo menos fuertemente con una disminución del Límite Elástico.

También se ha observado que la pérdida de contenido de Mg en solución sólida y el aumento de la conductividad están también acompañados por una pérdida de Resistencia Mecánica y Límite Elástico.

Por último, se ha observado que un aumento del contenido de Si está relacionado con un aumento de la fracción en volumen de los siliciuros de magnesio.

Y siendo conocido por estudios previos que:

- El Mg endurece la aleación AA5754 (O) por solución sólida, de forma que a cuanto más Mg en solución sólida mayor será el Límite Elástico y la Resistencia Mecánica.

- El Si en esta aleación precipita el Mg de la matriz formando siliciuros de magnesio.
- Un recocido total conduce a un tamaño de siliciuros de magnesio demasiado grande como para se produzca un endurecimiento por precipitación.

Se confirma con cierta seguridad que la disminución de la Resistencia Mecánica y del Límite Elástico que se observa en la aleación AA5754 en estado recocido total conforme aumenta el contenido de Si se debe a que este ha disminuido el contenido de Mg en la matriz precipitándolo como siliciuros de magnesio y limitando su efecto de endurecimiento por solución sólida sin dar lugar a otro mecanismo de endurecimiento que lo compense.

Al realizar el aumento de la muestra analizada en el estudio previo se ha podido confirmar la relación entre el contenido de Mg detectado en matriz y el contenido de Si cercana, y el hecho de que es ligeramente inferior a la relación estequiométrica del Si y el Mg en la precipitación de los siliciuros de magnesio. (Vicent Fanconi, Gil Fernández-Marcote, & Ruiz-Bustinza, 2023)

Esta diferencia entre la relación estequiométrica de la precipitación de siliciuros de magnesio (1,73) y la relación entre el contenido de Si y el déficit de Mg en matriz (1,62), podría explicarse por la existencia de la fase α en cuya composición se encuentra el Si. El Si que forme los constituyentes de la fase α no dará lugar a la precipitación de los siliciuros de magnesio reduciendo en cierta medida la relación entre el contenido de este y el déficit de Mg. En otras palabras, para que las dos relaciones fuesen iguales tendría que no existir la fase α .

El diferente desempeño del Si en los equilibrios de cada muestra podría deberse a esta competencia entre la fase α y los siliciuros de magnesio cuyo equilibrio depende de la composición química (incluyendo otros elementos que no se encuentran en ninguna de las dos fases), el proceso de solidificación y los distintos tratamientos térmicos.

Es interesante señalar la heterogeneidad en la concentración de Mg en la matriz a lo largo de la sección. Esta, se explicaría con el fenómeno de la macrosegregación de Mg en la colada el cual por difusión se concentra en la superficie de la placa reduciendo su contenido según nos acercamos al centro del espesor, tal y como se ha observado en el análisis realizado. (Moriceau, Laval, Schlecht, & Soulier, 1981)

Aunque una vez señalado, el efecto del Si resulta evidente, es importante recordar que este era muy menor hasta que comenzó a aumentar su contenido debido al reciclaje. Hay que señalar además que por debajo de ciertos contenidos de Si este puede acabar en una gran medida ligado a los constituyentes de la fase α (Al-(Fe,Mn)-Si) donde no tendría efecto sobre el Mg en solución sólida.

Tratar de evitar esta precipitación mediante un tratamiento térmico es muy complicado debido a que los siliciuros de magnesio comienzan a formarse por encima de los 500 °C y son una fase estable a cualquier temperatura inferior hasta la temperatura ambiente. (Mondolfo, 1976)

Un estudio adicional podría investigar en qué medida el Si precipita la fase α y en qué medida precipita los siliciuros de magnesio y si la relación entre ambas reacciones está condicionada por otras circunstancias como el contenido de otros elementos como el Fe y el Mn, o el proceso térmico sufrido.

Sería relevante analizar que efecto puede tener el contenido de Si en otras propiedades como la Formabilidad y el Alargamiento en tanto en cuanto da lugar a precipitados de un tamaño relevante y con una gran acicularidad características que propician los puntos de generación de grieta, y en qué medida ese efecto puede ser paliado mediante tratamientos térmicos previos como el precaldeo que permitan disolver los siliciuros de magnesio para que aparezcan en una precipitación más fina y menos perjudicial.

5.2. Efecto del Fe*RedP

En esta investigación se ha demostrado que existe una relación positiva entre el contenido de Fe y la Resistencia Mecánica y el Límite Elástico en el estado recristalizado de la aleación AA5754 cuyo alcance depende de cuánto se ha deformado previamente al recocido total. De tal modo que se puede modelizar este efecto como el producto del contenido de Fe y la reducción previa al recocido.

Al analizar juntas muestras con distinta reducción previa al recocido en una regresión lineal en la que el Fe era una de las variables independientes y la Resistencia Mecánica y el Límite Elástico las dependientes, se obtenía como resultado que el contenido de Fe no era relevante para predecir estas propiedades, sin embargo, cuando se analizaban muestras con una misma reducción previa al recocido y especialmente cuando esta era acusada se obtenía que el Fe era un predictor válido.

De ahí se dedujo que el efecto del Fe en estas dos propiedades dependía de la reducción previa.

Este efecto se ha relacionado con una reducción del tamaño de grano, de modo que cuanto mayor es la reducción previa al recocido menor es el tamaño de grano final y al mismo tiempo, para una misma reducción, cuanto mayor es el contenido de Fe menor es el tamaño de grano.

Esto se ha relacionado con la nucleación estimulada por partículas (PSN) tal como fue descrita por Humphreys (Humphreys & Hatherly, 1995) y el mecanismo de endurecimiento de grano según la relación Hall-Petch. Siendo las partículas la fase α cuyo número y fracción en volumen se ha comprobado que aumenta en la AA5754 según aumenta el contenido de Fe. Así se ha observado que, en dos muestras de AA5754 en estado recocido total con distinto contenido de Fe, tanto el tamaño de grano como la dureza variaban conforme aumentaba el producto del contenido de Fe y la reducción previa.

Siguiendo la afirmación de Humphreys et al. de que es necesaria una deformación mínima previa al recocido total para que se dé la nucleación estimulada por partículas que sería superior al 20%, se ha corregido la variable a $\%Fe*(Red.Prev-20\%)$ obteniendo un mejor ajuste tanto con la dureza como con el tamaño de grano, sin que se vea perjudicado el ajuste de la Resistencia Mecánica y el Límite Elástico.

De esto se podría afirmar que al laminarse la aleación AA5754 se acumulan dislocaciones en el entorno de las partículas de la fase α dando lugar a lo que Humphreys et al. describen como una zona de deformación alrededor de cada una, cuanto mayor sea la partícula y cuanto mayor sea la reducción acumulada durante la laminación, mayor será la zona de deformación.

Durante el recocido total posterior, si esta zona de deformación es suficientemente grande, se generará un grano según el fenómeno de la nucleación estimulada por partículas (PSN). Al haber un número mayor de granos, el tamaño final de grano será menor. Todo esto dará lugar al mecanismo de endurecimiento por tamaño de grano lo que implicará un aumento tanto de la dureza como del Límite Elástico y la Resistencia Mecánica.

Este endurecimiento tiene un límite en tanto en cuanto existe un tamaño mínimo de grano para que se dé el mecanismo de endurecimiento por tamaño de grano. (Humphreys & Hatherly, 1995)

Otra limitación es que, al producirse esta nucleación únicamente con partículas de aproximadamente una micra de diámetro o más, no importa cuanta deformación más se acumule a partir de que se alcance la suficiente como para que todas las partículas con el tamaño mínimo nucleen.

Resulta interesante señalar que se ha encontrado un efecto del contenido de Fe en la Resistencia Mecánica en los productos del grupo de muestras B, el cual no ha pasado por un laminador frío, sino únicamente por la laminación en caliente, ni ha sido introducido en un horno de recocido para llevar a cabo una recristalización. Por lo tanto, aparentemente no ha habido una *reducción previa al recocido total* que posibilite la nucleación estimulada por partículas con Fe. Y, sin embargo, el Fe aparece claramente relacionado con la Resistencia Mecánica en el grupo de muestras B. Esto podría deberse a que como ya se ha mencionado previamente, en el laminador en caliente se produce una reducción que se recupera mediante un “autorecocido” tras la última pasada y es posible que en ese autorecocido se produzca el mecanismo de PSN por el que se aumente la Resistencia Mecánica, y sería de interés comprobarlo en un estudio posterior.

Por último, hay que señalar que al igual que con el Si, la relación de la variable $Fe*RedP$ era mayor con la Resistencia Mecánica que con el Límite Elástico.

Hay que tener en cuenta que, según la Bibliografía, los beneficios de obtener un grano más fino son muchos más allá de una mayor resistencia²², como aumentar la ductilidad, la tenacidad, la resistencia a fatiga y la conductividad, prevenir la aparición del defecto superficial llamado “piel de naranja”, aumentar la homogeneidad de la superficie generando un mejor brillo, aumentar la resistencia a la corrosión intergranular, etc.

5.3. Imprecisión del Límite Elástico

En todos los análisis realizados se ha podido comprobar que la predictibilidad del Límite Elástico por las variables utilizadas era menor que la de la Resistencia Mecánica, con la excepción del coeficiente de deformación n , el cual, una vez introducido en los análisis mejoraba notablemente la predictibilidad del Límite Elástico.

Esto evidencia la notable sensibilidad de este parámetro a variaciones en el proceso incluso en un producto cuyo proceso no incluye una laminación en frío ni un recocido total como el del Grupo de Muestras B. Lo que conlleva que únicamente una parte menor de la variación del Límite Elástico en cada uno de los grupos de muestras analizados responda a cambios en la composición y sea por tanto explicable por la influencia de las impurezas de Fe y Si.

5.4. Multidependencia del R_m y el $R_{p0,2}$

A lo largo de esta Tesis se ha ido mostrando la predictibilidad de cada una de las propiedades de estudio por cada una de las variables independientes utilizadas (Si, Fe, Mg y Red.Prev.) y se ha mostrado como estas podían ser predichas mejor por las segundas cuando se utilizaban en conjunto.

A continuación, se muestra en una tabla los ajustes obtenidos más arriba para cada propiedad con las distintas regresiones dentro del Grupo de muestras A (Tabla 20).

²² El grano fino también puede ser perjudicial para algunos aspectos como, por ejemplo, la aparición del defecto superficial de las bandas Lüders.

Tabla 20: Ajuste (R^2) y desviación típica (σ) de las regresiones realizadas en el Grupo de Muestras A para la Resistencia Mecánica y el Límite Elástico.

Variables Independientes	Resistencia Mecánica		Límite Elástico	
	R^2	σ (MPa)	R^2	σ (MPa)
Mg	0,123	5,11	0,007	14,62
Si	0,195	4,90	0,049	14,31
Fe	0,011	5,43	0,005	14,63
Red.Prev.	0,307	4,54	0,127	13,71
Mg y Si	0,410	4,20	0,067	14,18
Mg, Si y Fe	0,432	4,12	0,075	14,12
Mg, Si y $Fe*RedP$	0,710	2,94	0,189	13,22
Mg, Si y $Fe*(RedP-20\%)$	0,710	2,94	0,190	13,22

En esta tabla puede observarse que se han encontrado tres variables independientes relacionadas con la Resistencia Mecánica y que dentro de los grupos de muestras utilizados permiten predecirla en gran medida. El Límite Elástico como se indicó en el apartado anterior tiene una gran influencia de la variabilidad del proceso de producción que impide establecer bien el grado de relación de las variables independientes con esta propiedad, aunque sí se pueda aproximar, especialmente sabiendo la relación que hay entre la Resistencia Mecánica y el Límite Elástico.

En cuanto a la corrección de restar un 20% a la reducción previa en la variable ($Fe*(RedP-20\%)$) debido al mínimo teórico de reducción necesaria para el PSN, se ha demostrado que no produce una mejora relevante en la predicción de las dos propiedades de estudio, aunque resulta conveniente tenerlo en cuenta en el caso de que se vayan a estudiar productos con una reducción por debajo de este límite.

De modo que finalmente se han podido establecer las siguientes ecuaciones predictoras de la Resistencia Mecánica y el Límite Elástico para la aleación AA5754 en estado recocido y con el resto de los elementos en los rangos declarados del Grupo de muestras A, Ecuaciones 17 y 18.

$$R_m \text{ (MPa)} = 107 + 35 * \%Mg - 50 * \%Si + 61 * \%Fe * RedP$$

Ecuación 17: (Estimación del R_m para la aleación AA5754 O en los rangos de composición dados, $\sigma=3$ MPa)

$$Rp_{0,2} (MPa) = 27 + 28 * \%Mg - 60 * \%Si + 108 * \%Fe * RedP$$

Ecuación 18: (Estimación del $Rp_{0,2}$ para la aleación AA5754 O en los rangos de composición dados, $\sigma=13$ MPa)

Por lo tanto, se puede afirmar que tanto la Resistencia Mecánica como el Límite Elástico dependen de todas las variables estudiadas (Mg, Si y Fe*RedP) y ninguna de ellas es despreciable a la hora de realizar una estimación.

5.5. Contradicción con otros estudios

La mayoría de las investigaciones sobre el efecto de los elementos químicos en las propiedades mecánicas de las aleaciones 5xxx se realizaron en una época en la que el contenido normal de Fe y Si estaba por debajo del 0,2% y el 0,1% respectivamente, lo que daba lugar a una variación de las propiedades despreciable, por lo que es comprensible que no se les otorgase un efecto relevante.

Sin embargo, en el siglo XXI se realizó la investigación de Zander et al. a partir de contenidos de Fe y Si que ya no eran despreciables, y en ella se concluyó que en un grupo de aleaciones y estados entre los que se encuentra la aleación AA5754 en estado recocido total el contenido de Fe no tenía ningún efecto en la Resistencia Mecánica ni en el Límite Elástico, y que el contenido de Si tenía un efecto positivo de 20 MPa por punto porcentual en la Resistencia Mecánica mientras que tampoco tenía ningún efecto en el Límite Elástico. (Zander, Sandström, & Vitos, 2007)

Estas conclusiones entran en completa contradicción con lo observado en la presente tesis. A continuación, se darán una serie de motivos a los que se debe esta diferencia y porqué se prefieren los hallazgos de esta investigación.

5.5.1. Aproximación Teórica

5.5.1.1. Heterogeneidad de la población base

Zander et al. analizaron en un mismo grupo aleaciones de las series 1xxx, 3xxx y 5xxx y supusieron para ello que todos los elementos (incluyendo el Fe y el Si) se comportan de un mismo modo en todas ellas.

Para que eso fuese así debería darse un equilibrio químico similar a lo largo de todas las posibles composiciones comprendidas en estas series de aleaciones que se encontrarían en los siguientes rangos: 0-0,25% de Cr, 0-0,15% de Cu, 0-0,4% de Fe, 0-5,1% de Mg, 0-1,25% de Mn y 0-0,3% de Si (los rangos de composición de otros elementos no se declaran en el artículo) (Zander,

Sandström, & Vitos, 2007). Centrándose únicamente en los tres elementos que se han estudiado aquí, esto quiere decir que todas las composiciones de aluminio²³ con un contenido de Mg, de Si y de Fe tendrían un mismo equilibrio químico o muy similar. Sin embargo, esto no es así, y dentro de esas composiciones hay decenas de diagramas de equilibrio aplicables. (Mondolfo, 1976)

Por lo que si en un equilibrio en concreto el aumento de un elemento (el Mg, por ejemplo) produce una variación de la microestructura (por ejemplo, en una 1345 cargada en Si un aumento de Mg daría lugar a un incremento de los siliciuros de Mg) en otro equilibrio el mismo aumento de ese mismo elemento puede producir una variación completamente distinta (por ejemplo, en la AA5754 ese aumento de Mg generaría un aumento del Mg en solución sólida). Y una distinta variación de la microestructura implicará distintos efectos en las propiedades mecánicas. (Mondolfo, 1976) (The Aluminum Association, 2009)

Pero el estudio en cuestión realizó su análisis como si esto no fuera así.

5.5.1.2. Omisión del Endurecimiento por Tamaño de Grano

En ese estudio se tuvieron en cuenta únicamente tres mecanismos de endurecimiento: por acritud, por solución sólida y por precipitados, omitiéndose el endurecimiento por tamaño de grano. De modo que el Fe al tener una solubilidad en la matriz muy baja y dar lugar a precipitados de gran tamaño que no eran susceptibles de generar un endurecimiento por precipitación se consideró irrelevante para el endurecimiento. Esta omisión cobra aún más importancia en el estado recocido total en el que el endurecimiento por tamaño de grano es más importante.

5.5.1.3. Simplificación de los estados de dureza

Zander et al. consideran que las propiedades mecánicas entre los tres tipos de estados de dureza H1X, H2X y H3X no varían de forma relevante, y que lo único que se debe tener en cuenta de estos es el segundo dígito que haría referencia a la cantidad de reducción en frío necesaria para lograr el endurecimiento por acritud. Esto que según la norma podría ser cierto en cuanto a la Resistencia Mecánica cuyos límites de norma no varían entre el estado duro (H1X), el recocido parcial (H2X) y el estabilizado (H3X) no lo es en cuanto al Límite Elástico cuyos límites varían notablemente entre los H1X y los H2X como se puede observar más arriba en la Tabla 2.

²³ Se supone que el contenido del resto de elementos se encuentra dentro de los rangos de las series mencionadas.

5.5.2. Análisis estadístico

5.5.2.1. Características de la base Aluselect

Los datos proporcionados por la base Aluselect son composiciones y características mecánicas medias, de modo que todos los datos que se correspondan a una misma aleación se les considerará con la misma composición en el momento del análisis estadístico, no relacionando la composición y propiedades mecánicas de una muestra sino únicamente la composición media de una aleación y sus propiedades mecánicas medias lo que conlleva un error asociado que no se puede determinar.

5.5.2.2. Población insuficiente

En el estudio de Zander et al. se utilizaron 43 composiciones medias diferentes a las que se adjudicaba las propiedades mecánicas medias de 5 estados de dureza distintos (O, HX2, HX4, HX6 y HX8), esto no es lo mismo que estar trabajando con 215 datos independientes con 215 composiciones distintas.

Y para explicar la variación de las propiedades mecánicas en esa población de datos se utilizaron 6 variables más 1: los contenidos de Cr, Cu, Fe, Mg, Mn y Si y el grado de endurecimiento determinado por un coeficiente que se asigna a cada estado de dureza (1 para HX8, $\frac{3}{4}$ para HX6, $\frac{1}{2}$ para HX4, $\frac{1}{4}$ para HX2 y 0 para O).

Si se escogen únicamente los datos referentes al estado recocido total tenemos 43 datos con 6 variables (al ser el grado de endurecimiento 0), cuando se recomienda que en una regresión lineal múltiple la muestra tenga al menos 10 veces más datos que variables predictoras²⁴ (en este caso 60), un mínimo que crece a cuanto menor sea el porcentaje de variación de la variable respuesta que explican las variables predictoras, por ejemplo, el error de medida del laboratorio que ha analizado los resultados²⁵. (Montero Granados, 2016)

Por todo ello se considera que 43 composiciones son insuficientes para realizar esa regresión.

Una población insuficiente para el número de variables predictoras puede ver incrementado artificialmente su ajuste a la población analizada en la regresión. (Montero Granados, 2016)

²⁴ Otras fuentes recomiendan un mínimo de 20 veces más datos que variables predictoras. (Harrell F, 1985) (Montero Granados, 2016)

²⁵ Como la base Aluselect da los valores de los límites de tensión en megapascuales redondeados a la unidad, el error es de al menos ± 1 MPa.

5.5.3. Mejor precisión de esta tesis

Esta tesis se centra en un rango estrecho de composición acotado por una aleación (la AA5754) por lo que el equilibrio químico es similar en todas las muestras que componen la población estudiada, y por lo tanto responden de forma similar a cambios en las variables estudiadas.

En esta tesis si se ha tenido en cuenta el endurecimiento por tamaño de grano.

También se ha centrado la investigación en un solo estado de dureza lo que reduce mucho la heterogeneidad de la muestra.

Los datos utilizados corresponden a propiedades mecánicas y composiciones de probetas individuales y no a datos medios u orientativos.

Por último, en las regresiones lineales múltiples realizadas se han utilizado dos poblaciones de datos independientes, una de 1000 muestras y otra de 629 muestras para determinar el efecto de 3 o 4 variables, muy por encima del mínimo recomendado de diez datos por variable.

A pesar de todo lo anterior no es justo rebajar el mérito de la investigación de Zander et al. en ser la primera en intentar aislar los efectos individuales de cada uno de los constituyentes (impurezas y aleantes) en las propiedades mecánicas, en todos los estados de dureza de las aleaciones no tratables de varias series.

5.5.4. Otras investigaciones

Recientemente otras investigaciones han tratado de determinar el efecto de los constituyentes de las aleaciones de aluminio en las propiedades mecánicas cuyas conclusiones ofrecen efectos muy dispares debido a defectos similares o de mayor peso que los mencionados previamente, como no distinguir en el análisis estadístico entre aleaciones tratables y no tratables o de forja y moldeo mezclando equilibrios químicos muy dispares o aplicar una regresión lineal múltiple a poblaciones de datos demasiado pequeñas para el número de variables utilizadas. (Jarfors, Du, Yu, Zheng, & Wang, 2020 (12)) (Fu, y otros, 2023 (16))

5.6. Propuestas finales

Teniendo en cuenta que el contenido de impurezas, a corto plazo, aumentará en todas las aleaciones en las que se quiera mantener un alto nivel de reciclaje y que ese será también el caso de la aleación AA5754 y otras 5xxx, en vista de lo expuesto en esta Tesis doctoral se deberían tomar algunas medidas a fin de mantener la Resistencia Mecánica y el Límite Elástico que exigen los clientes sin reducir la resistencia ni el reciclaje.

5.6.1. Resistencia Mecánica

Para compensar el efecto negativo del Si en la Resistencia Mecánica se debe adicionar una cantidad mayor de Mg que consiga mantener el contenido en solución sólida. Para lograr esta compensación se debe aumentar la adición de Mg con al menos 1,62 veces el aumento que se haya producido en el Si. Por seguridad se podría establecer la relación de que por cada tanto por ciento que aumente el contenido de Si se aumenten dos el del Mg.

El aumento de Fe debe considerarse una forma eficaz de aumentar la Resistencia Mecánica en los productos recristalizados si se combina con una suficiente reducción previa al recocido final.

Para poder estimar cuanto es el efecto de estas variables (el Si, el Fe y el Mg) en la Resistencia Mecánica utilizar la Ecuación 17, sabiendo que se refiere a unos contenidos determinados del resto de los elementos que podrían tener un efecto en las propiedades mecánicas, especialmente el Mn y el Cr.

5.6.2. Límite Elástico

Debe considerarse que el Si tiene un efecto negativo en el Límite Elástico, compensable con el Mg al igual que en el caso de la Resistencia Mecánica.

El Fe tiene un efecto positivo dependiente de la reducción previa que puede asimilarse al de la Resistencia Mecánica.

Esta propiedad depende mucho de pequeñas variaciones en el proceso posterior al recocido final y por ello si se quiere mantener o modificar, debe hacerse en los parámetros del proceso posterior al recocido final como, por ejemplo, en la tensión de procesos finales que incluyen aplanado para controlar la planicidad de chapas.

Como ya se ha explicado esta variabilidad dificulta establecer una estimación precisa del efecto de las impurezas, de modo que el error de la estimación que da la ecuación 18 (13 MPa de desviación típica) es sustancial. Tener en cuenta el coeficiente n es de gran utilidad para explicar esta variabilidad.

5.6.3. Otros factores

Hay numerosos factores que se han dejado excluidos en esta tesis y que sería de gran interés investigar en futuras investigaciones, como son la cuantificación del efecto del Mn, el Cr, el Zn y el Cu, que son aleados en muchos productos de esta aleación o se encuentran presentes como impurezas en concentraciones no despreciables.

Las condiciones de los tratamientos térmicos previos la laminación en caliente como la colada, el homogeneizado o el precaldeo, la temperatura de salida de la laminación en caliente, el número de pasadas en la laminación en frío o la cantidad de reducción dada en cada una.

5.6.4. Otras propiedades

Existen otras propiedades afectadas por el Si y el Fe que, aunque no forman parte del objeto de esta Tesis es importante mencionar.

El Si al formar partículas aciculares como son los siliciuros de magnesio es posible que reduzca el Alargamiento y la Formabilidad.

El Fe al reducir el tamaño de grano debido a la reducción previa al recocido afecta a numerosas propiedades que dependen de este dando lugar a una mayor ductilidad²⁶, tenacidad, resistencia a la corrosión intergranular, conductividad, resistencia a fatiga, homogeneidad de la superficie (lo que mejora el brillo) y la prevención del defecto de piel de naranja.

5.6.5. Beneficios económicos y Medioambientales

Un mayor conocimiento del efecto en la Resistencia Mecánica y el Límite Elástico de las dos impurezas más frecuentes del aluminio en una de las aleaciones más comunes de la industria actual permitirá estimar qué propiedades se darán en cada uno de los distintos escenarios de impurezas, se podrán diseñar productos en los que se compensen sus efectos negativos y se optimicen los positivos de forma que cumplan las especificaciones del cliente. Así se podrá aumentar el contenido de reciclaje sin miedo a los efectos que tendrá un aumento de estas dos impurezas que ya estarán estimados y previstos.

Además, un mayor conocimiento permitirá reducir la variabilidad de estas propiedades permitiendo ofrecer productos más estables. Teniendo en cuenta las fórmulas ofrecidas, solo en la Resistencia Mecánica el rango de variabilidad adjudicable a los parámetros utilizados dentro del estado recristalizado de la aleación AA5754 es de 42 MPa excluyendo el Mg, o 77 MPa incluyéndolo. Teniendo en cuenta que no es inusual que un cliente exija un rango de 20 MPa para la Resistencia Mecánica la fórmula proporcionada resulta de gran utilidad para evitar costosos rechazos.

En cuanto al efecto del Fe en el tamaño de grano permitirá no solo mejorar las propiedades de Resistencia Mecánica y Límite Elástico sino también otras muchas, aumentando la calidad de los productos.

²⁶ Aunque da lugar a un aumento de segundas fases que podría ser perjudicial para la Formabilidad y que disminuyera el efecto beneficioso de la reducción del tamaño de grano.

Todo esto también permitirá mantener e incluso aumentar el reciclaje en todos aquellos casos en los que el contenido de Si y Fe sea el factor limitante, pudiéndose cambiar los límites internos de cada empresa a unos más acordes al actual escenario de economía circular.

Un aumento del reciclaje implica una reducción en el consumo de bienes primarios con todos sus costes medioambientales y económicos, una mayor eliminación de chatarra que será reconvertida en productos tras haber acabado su vida útil, una menor generación de residuos, un menor gasto energético y unas menores emisiones. En definitiva, una menor huella.

5.6.5.1. Ejemplo

Para ejemplificar como pueden ayudar estas propuestas se propone el siguiente supuesto de una empresa transformadora de aluminio:

Supóngase un producto de la aleación AA5754 en estado recocido total que sale de la laminación en caliente con 5,5 mm de espesor y se entrega tras la laminación en frío y el recocido con 0,5 mm de espesor. Llámese a este producto Al.

Al se destina en chapas cortadas de una bobina para el Cliente A que pide una Resistencia Mecánica mínima de 200 MPa, cada vez que el departamento de calidad de la empresa transformadora de aluminio detecta una bobina por debajo de 200 MPa de Resistencia Mecánica como ésta ya está cortada en chapas y no se puede reconducir a otro cliente menos exigente es necesario refundirla como chatarra interna.

La producción es de 1.000 bobinas de cinco toneladas cada una, que se pagan al precio del aluminio más 1.000 € por tonelada de costes de producción. Al refundir una bobina se pierde este coste de producción más otros costes de transporte, pérdidas de fundición, pérdida de capacidad, etc. que a efectos de este ejemplo consideraré equivalentes a 300 € por tonelada, en total 1.300 €/t.

La Resistencia Mecánica media de Al es de 215 MPa, con una desviación estándar de aproximadamente 5 MPa únicamente fallan dos bobinas al año, lo que suponen 2.600 € por fallo de calidad sobre un coste total de 5.000.000 €.

Esto es así hasta se decide aumentar el uso de reciclaje de la empresa desde un 20% a un 80%.

Esto tiene dos beneficios:

El aluminio primario que se consume tiene asociadas 12 t CO₂ equiv./t mientras que el aluminio secundario tiene 3 t CO₂ equiv./t, por lo que el aumento de reciclaje supone pasar de 10,2 t CO₂ equiv./t a 4,8 t CO₂ equiv./t, lo que es una reducción de más del 50% de las emisiones.

Por otro lado, el precio al que se vende el producto Al son los costes de producción más el precio del aluminio en el LME que, aunque fluctúa, se supondrá que es de 2.500 €/t. Si se utiliza

aluminio primario se compra al precio que marca el LME, pero la chatarra se compra a un precio inferior, al 92% del LME en metal líquido final, esto quiere decir que se pasa de un ahorro por uso de chatarra de 40 €/t. a 160 €/tonelada.²⁷

De manera que el aumento del reciclaje supondría una reducción del 50% de las emisiones y 120 € de beneficio por tonelada, es decir, 600.000€ anuales.

Sin embargo, como ya se indicó en la introducción, en la actual situación del mercado un aumento del reciclaje conduce a un aumento de las impurezas de modo que el Si y el Fe pasaron de un contenido del 0,1% y el 0,2% a un 0,3% y un 0,38% respectivamente, y esto se vio acompañado de una bajada de 10 MPa de la Resistencia Mecánica media del producto.

De modo que de 2 bobinas excesivamente blandas al año se empezaron a producir 100 bobinas por debajo del límite exigido por el cliente, lo que conlleva a unas pérdidas por fallo de calidad de 650.000 € al año, convirtiendo en No Rentable el aumento del reciclaje.

Utilizando las estimaciones previas, se podría suponer que la causa del aumento de los fallos por calidad es el aumento del contenido de Si que al sacar Mg de la matriz reduce 50 MPa la Resistencia Mecánica por punto porcentual de contenido en peso, de modo que al pasar de un 0,1% de contenido a un 0,3% se ha reducido 10 MPa, lo que teniendo en cuenta la desviación estándar de 5 MPa del producto provoca el fallo de calidad en 100 bobinas.

Aplicando estas estimaciones se podría en primer lugar predecir por su composición que bobinas van a fallar antes de cortarlas en chapas de modo que se puedan redirigir a otros productos más exigentes evitando la refundición

Además, se puede rediseñar el producto, aumentando un 0,4% el contenido de Mg para compensar el déficit creado por el Si o aumentando la reducción previa al recocido para aprovechar el efecto endurecedor del Fe, terminando la laminación en caliente a 9 mm, con lo que se aumentarían 10 MPa la Resistencia Mecánica. O una solución híbrida de las dos anteriores.

Esto permitiría mantener en este caso el reciclaje con sus beneficios medioambientales y económicos, e incluso aumentarlo. En la Tabla 21 se exponen resumidos los tres escenarios del producto A1 relatados.

²⁷ Existen otros beneficios económicos del reciclaje como el Rotterdam Premium, pero no se tendrán en cuenta en este ejemplo.

Tabla 21: Donde el Escenario 1 se refiere a la situación inicial con un 20% de reciclaje, el Escenario 2 con un 80% de reciclaje sin medidas correctoras y el Escenario 3 con un 80% de reciclaje con medidas correctoras.

Escenarios	1	2	3
Aluminio Reciclado (%)	20%	80%	80%
Aluminio Primario (%)	80%	20%	20%
% Fe Medio	0,20%	0,38%	0,38%
% Si Medio	0,10%	0,30%	0,30%
Resistencia Mecánica Media (MPa)	215	205	215
Ingresos por producto (M€)	200	800	800
Costes por fallos de Calidad (M€)	-3	-650	-3
Beneficios (M€)	197	150	797
Emisiones (Mt)	51	24	24
Coste energético (GWh)	810	240	240
Barros rojos (kt)	8	2	2
Bauxita retirada (kt)	16	4	4

5.6.5.2 Aplicación de los resultados de esta investigación en Aludium

Un ejemplo más tangible del impacto potencial de esta investigación es el que ya ha tenido en Aludium.

En esta empresa las conclusiones de este proyecto se han utilizado para la optimización de la composición de cerca de 100.000 toneladas de aleaciones de aluminio y para el desarrollo de un nuevo producto del que ya se han producido más de 60 toneladas.

Además, el departamento de calidad ha utilizado las fórmulas expuestas arriba para supervisar la producción de más de 10.000 toneladas y así evitar incumplimientos en las especificaciones de los clientes.

6. Conclusiones

En esta sección se resumen las aportaciones de este trabajo de investigación al conocimiento actual sobre el efecto de las impurezas Fe y Si en las propiedades mecánicas de la aleación AA5754 en el estado recocido total, relacionando el de este último con el del Mg.

En cuanto a la Resistencia Mecánica:

1. Se confirma el efecto del Mg y se establece en 35 ± 2 MPa por tanto por ciento en peso.
2. Se determina el efecto del Si estableciéndolo en -50 ± 2 MPa por tanto por ciento en peso y demostrando por distintas vías y amplias poblaciones de muestras que está relacionado con un déficit de Mg en la matriz y la aparición de Mg_2Si , ofreciéndose la teoría de que el Si precipita el Mg de la matriz reduciendo su contenido en la matriz y junto a él su efecto endurecedor dando lugar a una reducción de las propiedades mecánicas.
 - 2.1 En cuanto a en qué medida se produce el déficit de Mg en la matriz por acción del Si se ha establecido empíricamente la relación de un déficit de Mg en matriz de 1,62 puntos porcentuales por cada punto porcentual de contenido de Si. Que es ligeramente inferior a la relación estequiométrica entre el Mg y el Si en la reacción de precipitación de los siliciuros de magnesio tal como se apuntaba en un estudio anterior (Vicent Fanconi, Gil Fernández-Marcote, & Ruiz-Bustinza, 2023).
 - 2.2 En cuanto a la relación entre el contenido de Si y la aparición de siliciuros de magnesio se ha establecido la relación de la fracción en volumen de siliciuros de magnesio por tanto por ciento de Si presente en la composición.
3. Se establece el efecto del Fe como dependiente de la reducción previa en 61 ± 2 MPa por tanto por ciento en peso de Fe multiplicado por el tanto por ciento de reducción previa al recocido total final con respecto al espesor inicial, señalando que esta variable ($Fe*RedP$) está relacionada con el tamaño de grano y este con la dureza. Ofreciéndose la teoría de que al producirse la laminación en frío se acumulan dislocaciones alrededor de los constituyentes de Fe (fase α) de modo que se convierten en puntos de nucleación durante el subsiguiente recocido, tal y como describe la teoría de la nucleación estimulada por partículas, dando lugar a un tamaño de grano final menor y por lo tanto según el mecanismo de endurecimiento por tamaño de grano a una mayor Resistencia Mecánica.

4. Se propone la siguiente ecuación para estimar la Resistencia Mecánica a partir del contenido de Mg, Si, Fe y la Reducción Previa al recocido en estos productos (Ecuación 17)

$$R_m \text{ (MPa)} = 107 + 35 * Mg - 50 * Si + 61 * Fe * RedP$$

Ecuación 17: (Estimación del Rm para la aleación AA5754 O en los rangos de composición dados, $\sigma = 3$ MPa)

En cuanto al Límite Elástico:

1. Se ha determinado y probado el efecto del Mg como aleante principal en el Límite Elástico estableciéndolo en 28 ± 6 MPa por tanto por ciento en peso.
2. Se ha determinado y probado la relevancia del efecto del Si en el Límite Elástico estableciendo su efecto en -60 ± 8 MPa por tanto por ciento en peso, confirmando que el mecanismo por el que se produce es el déficit de Mg en matriz por precipitación de siliciuros de magnesio.
3. Se ha determinado y probado la relevancia del efecto del Fe en el Límite Elástico en dependencia de la cantidad de reducción previa al recocido total, estableciendo su efecto a través del producto entre el contenido de Fe y el porcentaje de reducción ($Fe * RedP$) en 108 ± 9 MPa por unidad. El mecanismo por el que se explica este efecto sería el citado anteriormente para la Resistencia Mecánica, el endurecimiento por tamaño de grano debido a la nucleación estimulada por partículas (PSN), en este caso constituyentes de la fase α cuyo tamaño y fracción en volumen aumenta con el contenido de Fe.
4. Finalmente se ha propuesto una ecuación mediante el contenido de Mg como aleante principal y el contenido de Si y Fe como impurezas de estudio añadiendo la reducción previa como condicionante del efecto del Fe (Ecuación 18), pero, debido al gran efecto que tienen en este las variaciones del proceso de fabricación (tal como se ve en la relación del Límite Elástico con el coeficiente de endurecimiento n) tiene un mayor error asociado ($\sigma = 13$ MPa) que se podría reducir si se incluyese este coeficiente en el cálculo.

$$Rp_{0,2} \text{ (MPa)} = 27 + 28 * Mg - 60 * Si + 108 * Fe * RedP$$

Ecuación 18: (Estimación del $Rp_{0,2}$ para la aleación AA5754 O en los rangos de composición dados, $\sigma = 13$ MPa)

En cuanto a la paliación o la optimización de los efectos de los altos contenidos de Si y Fe en la aleación AA5754 en estado recocido total.

1. Se concluye que se puede compensar el efecto del aumento del contenido de Si en la Resistencia Mecánica y el Límite Elástico aumentando el contenido de Mg en aproximadamente 2 puntos porcentuales por cada uno que aumente el del Si, con lo que se lograría compensar el déficit de Mg en matriz causado por la precipitación de siliciuros de magnesio.
2. Se concluye que se puede potenciar el efecto del Fe en la reducción de tamaño de grano aumentando el grado de reducción previa al recocido total final logrando así un aumento de la Resistencia Mecánica y el Límite Elástico, desaconsejándose el aumento del contenido de Fe para lograr este objetivo, porque al hacerlo se aumentaría también la fracción en volumen lo que podría tener consecuencias negativas para la Formabilidad.

Referencias

- AENOR. (2017). *UNE-EN 515:2017 Aluminio y aleaciones de aluminio. Productos forjados. Designación de los estados de tratamiento*. Madrid: AENOR.
- AENOR. (2023). *UNE-EN 573-3:2020+Al:2023*. Madrid: AENOR.
- Agrawal, S., & Dhawan, N. (2021). Evaluation of red mud as a polymetallic source – A review. *Minerals Engineering*, 107084.
- Alcan International Limited. (1972). *Metallurgy of Al-Mg-Si Alloys*. Banbury, England: Alcan International Limited.
- Altenpohl, D. (1982). *Aluminum Viewed from Within*. Düsseldorf, Federal Republic of Germany: Aluminium-Verlag.
- Aludium. (2023). *Sustainability Report 2023*. Alicante: Aludium Transformación de Productos S.L.
- ASERAL. (10 de 01 de 2012). *ASERAL - Guía para la Clasificación de Chatarras*. (ASERAL) Recuperado el 2023 de 01 de 25, de <http://www.aseral.es/principal.htm>
- Asgharzadeh, A., Nazari Tiji, S., & Emaeilpour, R. e. (2020). Determination of hardness-strength and -flow behavior relationships in bulged aluminum alloys and verification by FE analysis on Rockwell hardness test. *Int J Adv Manuf Technol*, 106, 315-331. doi:<https://doi.org/10.1007/s00170-019-04565-6>
- ASTM INTERNATIONAL. (2003). *Annual Book of ASTM Standards*. Conshohocken: ASTM INTERNATIONAL Standards Worldwide.
- ASTM INTERNATIONAL. (2017). *E3-11(2017): Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*. Conshohocken: ASTM INTERNATIONAL Standards Worldwide.
- ASTM INTERNATIONAL. (2024). *E112-24: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*. Conshohocken: ASTM INTERNATIONAL Standards Worldwide.
- Bell, S., Davis, B., Javaid, A., & Essadiqi, E. (2006). *Final Report on Effect of Impurities in Aluminum*. Ottawa: Natural Resources Canada.
- Bjurenstedt, A., Seifeddine, S., & Jarfors, A. (2016). The Effects of Fe-Particles on the Tensile Properties of Al-Si-Cu Alloys. *Metals*, 6(12), 314. doi:<https://doi.org/10.3390/met6120314>
- Brooks, L., Gaustad, G., Gesing, A., Mortvedt, T., & Freire, F. (2019). Ferrous and non-ferrous recycling: Challenges and potential technology solutions. *Waste Management*, 519-528.
- Capuzzi, S., & Timelli, G. (2018). Preparation and Melting of Scrap in Aluminum Recycling: A Review. *Metals*, 8(4), 249. doi:<https://doi.org/10.3390/met8040249>
- Constellium. (15 de Diciembre de 2022). *Constellium*. (Constellium) Recuperado el 27 de Enero de 2023, de <https://www.constellium.com/sustainability/promoting-recycling>
- Curtolo, D. C., Rodriguez-Rojas, M. J., Friedrich, S., & Friedrich, B. (2021). Alternative fractional crystallization-based methods to produce high-purity aluminum. *Journal of Materials Research and Technology*, 12, 796-806. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785421002519>

- Dai, M., Wang, P., Chen, W.-Q., & Liu, G. (2019). Scenario analysis of China's aluminum cycle reveals the coming scrap age and the end of primary aluminum boom. *Journal of Cleaner Production*, 226(1), 793-804. doi:10.1016
- Davis, J., Henry, S., Frueh, S., Boring, R., Levicki, D., Harrison, L., & Scott, W. (1993). *Aluminum and Aluminum Alloys*. Ohio: ASM International.
- Dosdale, T., & Morgan, G. (1974). The temperature resistivity of dilute alloys. *Journal of Physics F: Metal Physics*(4), 402.
- El Economista. (19 de Noviembre de 2024). Las laminadoras de aluminios crean Aselam para defender los intereses del sector. *El Economista*.
- Fu, K., Zhu, D., Zhang, Y., Zhang, C., Wang, X., Wang, C., . . . Meng, X. e. (2023 (16)). Predictive Modeling of Tensile Strength in Aluminum Alloys via Machine Learning. *Materials*, 7236. doi:https://doi.org/10.3390/ma16227236
- Grupo Baux. (10 de Septiembre de 2024). *Grupo Baux - Sostenibilidad: Nuestro propósito, nuestra creencia*. Obtenido de Grupo Baux: <https://baux.es/sostenibilidad>
- Guyot, P., & Raynaud, G. (1991). Dislocation structure distributions and properties of heavily cold rolled aluminum and aluminum-magnesium alloys. *Acta Metallurgica et Materialia*, 39(3), 317-322. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/0956-7151\(91\)90310-W](https://doi.org/10.1016/0956-7151(91)90310-W)
- Handwerk, B. (24 de Mayo de 2022). Pirámides de Guiza: quién las construyó y que hay dentro. *National Geographic*.
- Harrell F, L. K. (1985). Regression models for prognostic prediction: Advantages, problems and suggested solutions. . *Cancer Treatment Reports*, 1071-7.
- Hatch, J. E. (1984). *Aluminum Properties and Physical Metallurgy*. Metals Park, Ohio: American Society for Metals.
- Humphreys, F., & Hatherly, M. (1995). *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*. New York: Elsevier Science Ltd.
- International Aluminium Institute. (June de 2023). *Material Flow Analysis a Look at the Numbers Globally and in Asia*. Obtenido de International Aluminium Institute website: <https://international-aluminium.org/resources/material-flow-analysis-a-look-at-the-numbers-globally-and-in-asia/>
- International Aluminium Institute. (10 de Diciembre de 2024). *Greenhouse Gas Emissions Intensity- Primary Aluminium - International Aluminium Institute*. Obtenido de International Aluminium Institute: <https://international-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-production/?publication=primary-aluminium-production&filter=%7B%22dateRange%22%3A%22annually%22%2C%22monthFrom%22%3A10%2C%22monthTo%22%3A10%2C%22quarterFrom%22%3A1%2C%22quarterTo%22%3A4%2C%2>
- International Energy Agency. (2024). *World Energy Outlook 2024*. Paris: International Energy Agency.
- ISO. (2003). *ISO 115:2023 Unalloyed aluminium ingots for remelting - Classification and composition*. Madrid: Asociación Española de Normalización (UNE).
- Jarfors, A. E., Du, A., Yu, G., Zheng, J., & Wang, K. (2020 (12)). On the Sustainable Choice of Alloying Elements for Strength of Aluminum-Based Alloys. *Sustainability*, 1059.

- Karabay, S. (2008). Influence of AlB₂ compound on elimination of incoherent precipitation in artificial aging of wires drawn from redraw rod extruded from billets cast of alloy AA-6101 by vertical direct chill casting. *Materials & Design*, 29(7), 1364-1375.
- Keeler, S. (Julio de 2002). Increased Use of Higher Strength Steels. *PMA Metalforming Magazine*.
- Kieft, R., Bergström, T., Le Brun, P., Friedrich, B., Oygard, A., Pisch, A., . . . Sillekens, W. (2004). Aluminium Purification. *ASEM Workshop on Clean Technologies*. Hanoi. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/305330786_Aluminium_purification
- Lee, B.-H., Kim, S.-H., Park, J.-H., Kim, H.-W., & Lee, J.-C. (2016). Role of Mg in simultaneously improving the strength and ductility of Al-Mg alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 657(Al-Mg alloys; Mechanical characterization; X-ray diffraction; Dislocation structures; Stacking fault energy), 115-122.
- Li, S., Zhang, T., Niu, L., & Yue, Q. (2021). Analysis of the development scenarios and greenhouse gas (GHG) emissions in China's aluminum industry till 2030. *Journal of Cleaner Production*, 290, 125859.
- MIMITech. (2023). *Mapping Study on Aluminium Melt Purification from Post Consumer Scrap*. Aachen: MIMI Tech GmbH.
- Modaresi, R., Løvik, A., & Müller, D. (2014). Component- and Alloy-Specific Modeling for Evaluating Aluminum Recycling Strategies for Vehicles. *JOM*, 66, 2262–2271. doi:<https://doi.org/10.1007/s11837-014-0900-8>
- Mondolfo, L. F. (1976). *Aluminum Alloys*. London: Butterworth & Co (Publishers) Ltd.
- Montero Granados, R. (2016). *Modelos de regresión lineal múltiple*. Granada, Spain: Universidad de Granada.
- Moriceau, J., Laval, R., Schlecht, F., & Soulier, R. (1981). Manuel de fonderie. En J. Moriceau, R. Laval, F. Schlecht, & R. Soulier, *Dictionnaire Encyclopédique Metallurgique et Technique* (págs. 595-598). Paris: CRVF.
- Nabarro, F. (1977). The theory of solution hardening. *The Philosophical Magazine: A Journal of Theoretical Experimental and Applied Physics*, 613-622.
- Naciones Unidas. (2019). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible*. New York: Naciones Unidas.
- Norsk Hydro ASA. (2021). *Annual Report 2021*. Oslo: Norsk Hydro ASA.
- Novelis. (2022). *2022 Global Sustainability Report*. Atlanta: Novelis.
- Organización Internacional de Normalización (ISO). (22 de Julio de 2020). *Ensayo de Tracción. Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente. (ISO 6982-1:2020)*. Obtenido de UNE-ISO Web Site: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0064441>
- Paraskevas, D., Kellens, K., Dewulf, W., & Duflou, J. R. (2015). Environmental modelling of aluminium recycling: a Life Cycle Assessment tool for sustainable metal management. *Journal of Cleaner Production*, 105, 357-370. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.102>.
- Pérez Hidalgo, M. D., Basulto Santos, J., & Camúñez Ruiz, J. A. (2019). Un antecedente histórico de regresión lineal: la estimación mediana propuesta por Boscovich. *La Gaceta de la RSME*, 22(2), 351-364.

- Pérez Prado, M. T. (1998). *Estudio de la Deformación de Aleaciones superplásticas de Aluminio mediante Análisis de Texturas*. Madrid: Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid.
- Raabe, D., Ponge, D., Uggowitzer, P., Roscher, M., Paolantonio, M., Liu, C., . . . Pogatscher, S. (2022). Making sustainable aluminum by recycling scrap: The science of “dirty” alloys,. *Progress in Materials Science*, 128(Aluminum; Alloy design; Precipitation; Sustainability; Recycling; Properties; Processing; Corrosion; Thermodynamics).
- Red Eléctrica de España. (2024). *La demanda de energía eléctrica aumenta un 3,8% en diciembre (Nota de Prensa)*. Madrid: Red Electrica de España.
- Santora, E., Berneder, J., Simetsberger, F., & Doberer, M. (2019). *Mechanical properties evolution for 8xxx foil stock materials by alloy optimization-literature review and experimental research*. Miner Met Mater Ser, Springer International Publishing.
- Smith, W. F., & Hashemi, J. (2006). *Foundations of Materials Science and Engineering*. New York: McGraw-Hill.
- Statista GmbH. (10 de Diciembre de 2024). *Statista*. Obtenido de Global CO₂ emissions by year 1940-2024 | Statista: <https://www.statista.com/statistics/276629/global-co2-emissions/>
- The Aluminum Association. (2009). *International Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys*. Arlington: The Aluminum Association, Inc.
- Thurston, R. (18 de Mayo de 1900). Aluminium-Magnesium Alloys. *Science*, 11(281), 783-785.
- Van den Eynde, S., Bracquené, E., Diaz-Romero, D., Zaplana, I., Engelen, B., Duflou, J. R., & Peeters, J. R. (2022). Forecasting global aluminium flows to demonstrate the need for improved sorting and recycling methods. *Waste Management*, 137(ISSN 0956-053X), 231-240. doi:10.1016
- Vicent Fanconi, M., Gil Fernández-Marcote, I., & Ruiz-Bustanza, Í. (2023). The Challenge of Impurities (Fe,Si) to Recycling in the Rolled Aluminum Industry in the Coming Years in Relation to Their Influence on Ultimate Tensile Strength. *Metals*, 13, 13.
- Zander, J., Sandström, R., & Vitos, L. (2007). Modelling mechanical properties for non-hardenable aluminium alloys. *Computational Materials Science*, Pages 86-95.
- Zhang, L., & Shibuta, Y. (2020). Inverse Hall-Petch relationship of high-entropy alloy by atomistic simulation. *Materials Letters*, 274, 128024. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128024>.

Anexos

Anexo A

Selección de 1000 muestras extraídas de productos de Aludium de la aleación AA5754 en estado recocido total, con un contenido de Mn de $0,20 \pm 0,01\%$ y de Cr de $0,02\% \pm 0,01$, constando sus contenidos de Mg, Fe y Si, el porcentaje de reducción en frío previa al recocido total sufrido y sus valores de Resistencia Mecánica (Rm) y Límite Elástico (Rp_{0,2}). Mediciones hechas por los laboratorios normalizados de los departamentos de Calidad de Aludium Transformación de Productos, SLU.

Tabla A1

Muestra	Grupo	Mg (%)	Fe (%)	Si (%)	Reducción Previa	Rm (MPa)	Rp _{0,2} (MPa)
A1	1	2,63	0,34	0,16	27%	198	122
A2	1	2,85	0,30	0,21	27%	205	129
A3	1	2,80	0,26	0,05	27%	212	111
A4	1	2,97	0,31	0,27	28%	202	113
A5	1	2,85	0,31	0,12	28%	206	131
A6	1	2,91	0,31	0,25	28%	202	96
A7	1	2,83	0,30	0,27	28%	197	96
A8	1	2,97	0,31	0,26	28%	203	108
A9	1	2,88	0,33	0,16	28%	205	111
A10	1	2,88	0,33	0,16	28%	205	111
A11	1	2,85	0,30	0,27	28%	197	112
A12	1	2,82	0,35	0,26	28%	198	100
A13	1	2,80	0,27	0,23	28%	198	91
A14	1	2,97	0,28	0,28	28%	201	104
A15	1	2,87	0,30	0,18	28%	203	131
A16	1	2,83	0,28	0,27	28%	197	94
A17	1	2,84	0,27	0,29	28%	196	121
A18	1	2,81	0,28	0,27	28%	195	110
A19	1	2,89	0,26	0,28	28%	198	124
A20	1	2,97	0,35	0,25	28%	203	116
A21	1	2,90	0,34	0,29	28%	199	101
A22	1	2,88	0,28	0,31	28%	198	100
A23	1	2,82	0,31	0,30	28%	197	100
A24	1	2,80	0,30	0,22	28%	200	127
A25	1	2,79	0,29	0,23	28%	198	112
A26	1	2,73	0,32	0,28	28%	194	104
A27	1	2,72	0,25	0,25	28%	194	114
A28	1	2,84	0,31	0,32	28%	196	118
A29	1	2,86	0,35	0,28	28%	198	110
A30	1	2,82	0,27	0,26	28%	197	115

Muestra	Grupo	Mg (%)	Fe (%)	Si (%)	Reducción Previa	Rm (MPa)	Rp _{0,2} (MPa)
A31	1	2,92	0,28	0,26	28%	200	121
A32	1	2,83	0,26	0,28	28%	195	108
A33	1	2,64	0,33	0,26	28%	192	94
A34	1	2,85	0,31	0,27	28%	197	88
A35	1	2,89	0,26	0,28	28%	200	119
A36	1	2,83	0,37	0,26	28%	197	99
A37	1	2,88	0,28	0,28	28%	197	84
A38	1	2,77	0,29	0,21	28%	199	114
A39	1	2,82	0,29	0,22	28%	198	100
A40	1	2,96	0,31	0,28	28%	200	117
A41	1	2,97	0,26	0,28	28%	200	106
A42	1	2,93	0,27	0,26	28%	199	89
A43	1	2,74	0,27	0,23	28%	197	117
A44	1	2,90	0,30	0,28	28%	202	123
A45	1	2,88	0,29	0,27	28%	201	127
A46	1	3,03	0,29	0,29	28%	202	110
A47	1	2,88	0,32	0,33	28%	199	114
A48	1	2,94	0,33	0,27	28%	200	100
A49	1	2,80	0,27	0,28	28%	198	120
A50	1	2,88	0,28	0,30	28%	195	107
A51	1	2,76	0,27	0,28	28%	191	111
A52	1	2,85	0,31	0,29	28%	195	115
A53	1	2,76	0,30	0,19	28%	201	120
A54	1	2,80	0,30	0,26	28%	194	102
A55	1	2,88	0,32	0,30	28%	195	110
A56	1	2,90	0,25	0,09	28%	210	123
A57	1	2,76	0,31	0,25	28%	193	110
A58	1	2,83	0,32	0,27	28%	201	130
A59	1	2,81	0,35	0,29	28%	193	121
A60	1	2,79	0,28	0,28	28%	192	100
A61	1	2,86	0,32	0,22	28%	197	116
A62	1	2,78	0,29	0,32	28%	196	120
A63	1	2,80	0,28	0,05	28%	210	126
A64	1	2,80	0,29	0,26	28%	192	100
A65	1	2,84	0,29	0,27	28%	202	100
A66	1	2,89	0,27	0,26	28%	196	95
A67	1	2,78	0,27	0,17	28%	196	86
A68	1	2,63	0,29	0,12	28%	200	112
A69	1	2,88	0,32	0,33	28%	201	119
A70	1	2,79	0,30	0,30	28%	199	111
A71	1	2,90	0,29	0,30	28%	203	100
A72	1	2,79	0,33	0,26	28%	192	106
A73	1	2,86	0,30	0,27	28%	194	103
A74	1	2,87	0,32	0,28	28%	194	98

Muestra	Grupo	Mg (%)	Fe (%)	Si (%)	Reducción Previa	Rm (MPa)	Rp _{0,2} (MPa)
A75	1	2,81	0,33	0,19	28%	196	98
A76	1	2,71	0,36	0,26	28%	199	127
A77	1	2,93	0,32	0,28	28%	196	98
A78	1	2,75	0,29	0,12	28%	206	126
A79	1	2,93	0,32	0,28	28%	195	110
A80	1	2,86	0,33	0,28	28%	192	88
A81	1	2,80	0,29	0,14	28%	208	137
A82	1	2,80	0,25	0,10	28%	210	128
A83	1	2,89	0,34	0,27	28%	193	94
A84	1	2,79	0,30	0,28	28%	203	132
A85	1	2,84	0,36	0,29	28%	207	89
A86	1	2,80	0,35	0,24	29%	198	116
A87	1	2,83	0,32	0,27	29%	197	108
A88	1	2,86	0,33	0,23	29%	200	108
A89	1	2,76	0,30	0,19	29%	198	83
A90	1	2,89	0,28	0,29	29%	199	83
A91	1	2,87	0,28	0,24	29%	200	107
A92	1	2,83	0,31	0,31	29%	197	96
A93	1	2,86	0,31	0,22	29%	199	101
A94	1	2,96	0,29	0,21	29%	204	102
A95	1	2,68	0,35	0,13	29%	198	114
A96	1	2,86	0,31	0,22	29%	199	120
A97	1	2,90	0,31	0,25	29%	200	105
A98	1	3,00	0,30	0,22	29%	207	126
A99	1	2,73	0,35	0,24	29%	194	97
A100	1	2,85	0,29	0,25	29%	198	96
A101	1	2,85	0,31	0,29	29%	199	119
A102	1	2,79	0,26	0,27	29%	193	91
A103	1	2,80	0,32	0,24	29%	196	122
A104	1	2,81	0,31	0,25	29%	199	143
A105	1	2,84	0,31	0,28	29%	196	111
A106	1	2,81	0,35	0,19	29%	199	102
A107	1	2,79	0,28	0,28	29%	193	108
A108	1	2,75	0,32	0,27	29%	197	111
A109	1	2,88	0,29	0,19	29%	200	105
A110	1	2,89	0,28	0,31	29%	200	111
A111	1	2,73	0,31	0,21	29%	199	85
A112	1	2,76	0,30	0,26	29%	191	124
A113	1	2,87	0,31	0,22	29%	197	102
A114	1	2,82	0,31	0,29	29%	192	103
A115	2	2,79	0,29	0,21	42%	198	104
A116	2	2,79	0,29	0,21	42%	198	104
A117	2	2,81	0,28	0,29	42%	200	113
A118	2	2,72	0,31	0,22	42%	197	109

Muestra	Grupo	Mg (%)	Fe (%)	Si (%)	Reducción Previa	Rm (MPa)	Rp _{0,2} (MPa)
A119	2	2,88	0,34	0,29	42%	201	114
A120	2	2,88	0,28	0,31	42%	200	109
A121	2	2,78	0,31	0,26	42%	198	107
A122	2	2,83	0,33	0,30	42%	202	118
A123	2	2,95	0,33	0,33	42%	209	116
A124	2	2,87	0,31	0,25	42%	202	111
A125	2	2,86	0,26	0,27	42%	202	113
A126	2	2,85	0,31	0,28	42%	203	107
A127	2	2,83	0,27	0,29	42%	201	110
A128	2	2,86	0,26	0,27	42%	201	113
A129	2	2,94	0,29	0,32	42%	199	111
A130	2	2,80	0,27	0,19	42%	200	91
A131	2	2,93	0,26	0,27	42%	202	123
A132	2	2,86	0,30	0,28	42%	202	111
A133	2	2,86	0,26	0,27	42%	203	114
A134	2	2,79	0,33	0,30	42%	198	110
A135	2	2,91	0,28	0,29	42%	202	117
A136	2	2,85	0,31	0,27	42%	199	108
A137	2	2,70	0,28	0,04	42%	212	123
A138	2	2,85	0,31	0,27	42%	197	112
A139	2	2,76	0,30	0,26	42%	194	110
A140	2	2,82	0,31	0,30	42%	202	112
A141	2	2,85	0,31	0,29	42%	197	95
A142	2	2,84	0,29	0,21	42%	201	115
A143	2	2,80	0,29	0,27	42%	196	116
A144	2	2,83	0,28	0,30	42%	198	104
A145	2	2,80	0,35	0,24	42%	201	117
A146	2	2,82	0,29	0,25	42%	199	109
A147	2	2,81	0,31	0,24	42%	204	117
A148	2	2,80	0,25	0,10	42%	209	123
A149	2	2,83	0,32	0,20	42%	210	130
A150	2	2,93	0,26	0,27	42%	199	102
A151	2	2,81	0,31	0,20	42%	211	119
A152	2	2,78	0,30	0,27	42%	197	113
A153	2	2,83	0,30	0,27	42%	200	115
A154	2	2,75	0,31	0,12	42%	202	92
A155	2	2,93	0,26	0,27	42%	202	110
A156	2	2,91	0,38	0,28	42%	203	112
A157	2	2,85	0,32	0,24	42%	202	132
A158	2	2,81	0,29	0,27	42%	202	115
A159	2	2,91	0,38	0,28	42%	205	141
A160	2	2,91	0,31	0,27	42%	196	111
A161	2	2,79	0,30	0,30	42%	194	95
A162	2	2,88	0,26	0,25	43%	204	113

Muestra	Grupo	Mg (%)	Fe (%)	Si (%)	Reducción Previa	Rm (MPa)	Rp_{0,2} (MPa)
A163	2	2,86	0,31	0,22	43%	203	119
A164	2	2,89	0,28	0,31	43%	200	96
A165	2	2,76	0,37	0,21	43%	198	122
A166	2	2,66	0,32	0,20	43%	194	97
A167	2	2,88	0,33	0,16	43%	210	129
A168	2	2,91	0,35	0,32	43%	203	112
A169	2	2,89	0,26	0,28	43%	201	116
A170	2	2,81	0,31	0,20	43%	205	129
A171	2	2,94	0,29	0,30	43%	205	114
A172	2	2,85	0,31	0,27	43%	198	88
A173	2	2,71	0,31	0,20	43%	201	132
A174	2	2,75	0,29	0,29	43%	195	105
A175	2	2,80	0,24	0,04	43%	201	90
A176	2	2,81	0,31	0,30	43%	198	104
A177	2	2,80	0,29	0,27	43%	196	96
A178	2	2,84	0,32	0,19	43%	205	114
A179	2	2,84	0,31	0,29	43%	203	94
A180	2	2,87	0,31	0,27	43%	201	120
A181	2	2,76	0,35	0,14	43%	205	120
A182	2	2,91	0,29	0,28	43%	200	127
A183	2	2,78	0,29	0,20	43%	203	130
A184	2	2,88	0,33	0,16	43%	204	119
A185	2	2,84	0,30	0,30	43%	194	92
A186	2	2,79	0,32	0,33	43%	198	107
A187	2	2,98	0,32	0,30	43%	204	109
A188	2	2,89	0,34	0,27	43%	195	107
A189	2	2,84	0,29	0,31	43%	196	111
A190	2	2,87	0,30	0,24	43%	205	113
A191	2	2,87	0,29	0,26	43%	198	94
A192	2	2,87	0,30	0,18	43%	203	126
A193	2	2,88	0,28	0,30	43%	199	99
A194	2	2,90	0,28	0,32	43%	203	122
A195	2	2,81	0,33	0,26	43%	196	106
A196	2	2,81	0,31	0,24	43%	203	103
A197	2	2,80	0,34	0,05	43%	212	107
A198	2	2,79	0,27	0,26	43%	200	124
A199	2	2,65	0,32	0,13	43%	201	103
A200	2	2,89	0,32	0,29	43%	203	98
A201	2	2,82	0,29	0,32	43%	195	98
A202	2	2,77	0,31	0,26	43%	200	128
A203	2	2,73	0,35	0,24	43%	199	101
A204	2	2,83	0,30	0,24	43%	195	89
A205	2	2,76	0,34	0,21	43%	198	105
A206	2	2,93	0,32	0,28	43%	197	108

Muestra	Grupo	Mg (%)	Fe (%)	Si (%)	Reducción Previa	Rm (MPa)	Rp _{0,2} (MPa)
A207	2	2,88	0,30	0,26	43%	205	122
A208	2	2,79	0,34	0,22	43%	198	128
A209	2	2,98	0,26	0,29	43%	202	119
A210	2	2,81	0,30	0,27	43%	199	111
A211	2	2,87	0,30	0,18	43%	201	109
A212	2	2,83	0,37	0,26	43%	199	118
A213	2	2,73	0,35	0,24	43%	196	91
A214	2	2,89	0,32	0,29	43%	204	118
A215	2	2,77	0,29	0,28	43%	190	98
A216	2	2,75	0,31	0,23	43%	197	123
A217	2	2,74	0,36	0,20	43%	201	109
A218	2	2,89	0,33	0,20	43%	206	122
A219	2	2,83	0,30	0,24	43%	195	88
A220	2	2,78	0,31	0,26	43%	202	128
A221	2	2,90	0,28	0,20	43%	205	129
A222	2	2,82	0,32	0,24	43%	198	97
A223	2	2,65	0,34	0,24	43%	192	93
A224	2	2,80	0,33	0,26	43%	195	110
A225	2	2,79	0,26	0,27	43%	198	99
A226	2	2,78	0,35	0,23	43%	199	91
A227	2	2,88	0,28	0,28	43%	200	112
A228	2	2,80	0,35	0,21	43%	203	128
A229	2	2,76	0,33	0,25	43%	203	118
A230	2	2,81	0,31	0,27	43%	193	98
A231	2	2,78	0,35	0,23	43%	201	82
A232	2	2,98	0,32	0,30	43%	207	120
A233	2	2,66	0,32	0,28	43%	196	127
A234	2	2,78	0,31	0,26	43%	202	105
A235	2	2,85	0,29	0,21	43%	202	122
A236	2	2,93	0,27	0,26	43%	202	90
A237	2	2,73	0,31	0,23	43%	198	94
A238	2	2,68	0,34	0,22	43%	198	113
A239	2	2,75	0,35	0,18	44%	197	101
A240	2	2,90	0,28	0,20	44%	204	122
A241	2	2,65	0,35	0,23	44%	193	87
A242	2	2,72	0,33	0,27	44%	199	103
A243	2	2,81	0,33	0,27	44%	201	101
A244	2	2,86	0,34	0,24	44%	200	112
A245	3	2,84	0,29	0,31	50%	199	103
A246	3	2,90	0,28	0,27	50%	203	82
A247	3	2,81	0,30	0,32	50%	197	80
A248	3	2,74	0,31	0,22	50%	199	82
A249	3	2,86	0,30	0,27	50%	202	88
A250	3	3,00	0,31	0,19	50%	210	124

Muestra	Grupo	Mg (%)	Fe (%)	Si (%)	Reducción Previa	Rm (MPa)	Rp _{0,2} (MPa)
A251	3	2,84	0,30	0,22	50%	204	82
A252	3	2,85	0,32	0,22	50%	203	81
A253	3	2,78	0,28	0,21	50%	201	82
A254	3	2,65	0,29	0,24	50%	195	111
A255	3	2,98	0,40	0,23	50%	210	94
A256	3	2,80	0,32	0,27	50%	201	82
A257	3	2,77	0,28	0,26	50%	199	82
A258	3	2,91	0,28	0,21	50%	206	126
A259	3	2,79	0,29	0,24	50%	199	80
A260	3	2,90	0,29	0,21	50%	204	82
A261	3	2,85	0,27	0,27	50%	199	82
A262	3	2,85	0,27	0,28	50%	201	90
A263	3	2,84	0,31	0,28	50%	200	116
A264	3	2,82	0,28	0,20	50%	202	83
A265	3	2,83	0,32	0,21	50%	205	88
A266	3	2,80	0,33	0,19	50%	205	81
A267	3	2,80	0,28	0,05	50%	211	94
A268	3	2,79	0,28	0,28	50%	200	82
A269	3	2,89	0,26	0,28	50%	200	84
A270	3	2,80	0,33	0,19	50%	202	82
A271	3	2,90	0,27	0,30	50%	202	83
A272	3	2,83	0,28	0,30	50%	200	80
A273	3	2,78	0,31	0,26	50%	198	106
A274	3	2,82	0,29	0,22	50%	201	83
A275	3	2,86	0,28	0,28	50%	199	80
A276	3	2,77	0,29	0,20	50%	199	82
A277	3	3,00	0,29	0,20	50%	208	97
A278	3	2,88	0,31	0,29	50%	204	82
A279	3	2,87	0,31	0,24	50%	205	86
A280	3	2,67	0,30	0,13	50%	204	86
A281	3	2,74	0,26	0,27	50%	198	80
A282	3	2,82	0,32	0,19	50%	202	103
A283	3	2,76	0,30	0,19	50%	204	81
A284	3	2,78	0,29	0,27	50%	196	84
A285	3	2,86	0,33	0,24	50%	201	82
A286	3	2,81	0,29	0,26	50%	198	83
A287	3	2,92	0,31	0,23	50%	203	86
A288	3	2,76	0,31	0,25	50%	202	80
A289	3	2,79	0,32	0,23	50%	204	85
A290	3	2,65	0,29	0,24	50%	192	102
A291	3	2,69	0,25	0,10	50%	205	90
A292	3	3,00	0,31	0,23	50%	207	89
A293	3	2,80	0,34	0,25	50%	204	81
A294	3	2,85	0,27	0,28	50%	197	81

Muestra	Grupo	Mg (%)	Fe (%)	Si (%)	Reducción Previa	Rm (MPa)	Rp _{0,2} (MPa)
A295	3	2,86	0,28	0,28	50%	198	81
A296	3	2,73	0,32	0,26	50%	195	82
A297	3	2,92	0,28	0,20	50%	204	84
A298	3	2,87	0,28	0,24	50%	200	117
A299	3	2,86	0,30	0,27	50%	199	86
A300	3	2,76	0,30	0,26	50%	195	103
A301	3	2,90	0,31	0,22	50%	202	86
A302	3	2,90	0,29	0,21	50%	202	85
A303	3	2,77	0,34	0,27	50%	196	96
A304	3	2,81	0,29	0,27	50%	196	97
A305	3	2,76	0,31	0,25	50%	203	80
A306	3	2,75	0,27	0,18	50%	197	82
A307	3	2,85	0,27	0,28	50%	196	80
A308	3	2,87	0,30	0,24	50%	207	90
A309	3	2,85	0,28	0,29	50%	204	112
A310	3	2,85	0,28	0,29	50%	204	112
A311	3	2,83	0,30	0,24	50%	198	80
A312	3	2,84	0,31	0,26	50%	198	81
A313	3	2,76	0,28	0,25	50%	202	88
A314	3	2,87	0,28	0,24	50%	199	106
A315	3	2,86	0,33	0,26	50%	199	81
A316	3	2,84	0,32	0,19	50%	201	86
A317	3	2,89	0,31	0,23	50%	209	91
A318	3	2,67	0,30	0,13	50%	206	96
A319	3	2,74	0,29	0,24	50%	202	85
A320	3	2,78	0,31	0,24	50%	196	81
A321	3	2,98	0,30	0,21	50%	204	85
A322	3	2,72	0,28	0,26	50%	202	86
A323	3	2,83	0,29	0,29	50%	193	82
A324	3	2,82	0,29	0,17	51%	205	122
A325	3	2,79	0,31	0,22	51%	202	110
A326	3	2,85	0,32	0,24	51%	204	119
A327	3	2,86	0,28	0,28	51%	201	106
A328	3	2,94	0,29	0,23	51%	206	110
A329	3	2,80	0,30	0,25	51%	201	81
A330	3	2,66	0,25	0,16	51%	198	101
A331	3	2,85	0,29	0,28	51%	201	85
A332	3	2,90	0,29	0,21	51%	205	85
A333	3	2,81	0,28	0,24	51%	201	94
A334	3	2,91	0,31	0,25	51%	205	106
A335	3	2,91	0,34	0,14	51%	211	124
A336	3	2,83	0,32	0,27	51%	201	80
A337	3	3,03	0,31	0,18	51%	213	128
A338	3	2,78	0,26	0,23	51%	200	104

Muestra	Grupo	Mg (%)	Fe (%)	Si (%)	Reducción Previa	Rm (MPa)	Rp _{0,2} (MPa)
A339	3	2,97	0,28	0,28	51%	205	118
A340	3	2,89	0,27	0,27	51%	202	98
A341	3	2,81	0,27	0,26	51%	199	106
A342	3	2,74	0,30	0,24	51%	199	116
A343	3	2,83	0,34	0,20	51%	204	120
A344	3	2,86	0,34	0,25	51%	204	126
A345	3	2,74	0,31	0,24	51%	200	116
A346	3	2,79	0,28	0,28	51%	198	80
A347	3	2,91	0,33	0,30	51%	204	86
A348	3	2,87	0,28	0,24	51%	202	96
A349	3	2,85	0,27	0,23	51%	203	84
A350	3	2,92	0,33	0,27	51%	206	108
A351	3	2,72	0,29	0,30	51%	194	81
A352	3	2,88	0,28	0,28	51%	201	108
A353	3	2,74	0,26	0,27	51%	195	99
A354	3	2,70	0,28	0,04	51%	207	96
A355	3	2,81	0,26	0,29	51%	197	83
A356	3	2,85	0,27	0,27	51%	201	110
A357	3	2,85	0,31	0,27	51%	201	108
A358	3	2,81	0,28	0,24	51%	200	91
A359	3	2,92	0,26	0,26	51%	204	103
A360	3	2,93	0,27	0,26	51%	205	108
A361	3	2,93	0,29	0,29	51%	204	114
A362	3	2,71	0,31	0,21	51%	198	111
A363	3	2,93	0,29	0,28	51%	205	119
A364	3	2,93	0,29	0,28	51%	205	115
A365	3	2,80	0,30	0,29	51%	198	90
A366	3	2,66	0,25	0,16	51%	197	100
A367	3	2,79	0,30	0,21	51%	200	82
A368	3	2,86	0,27	0,23	51%	201	102
A369	3	2,94	0,31	0,31	51%	205	128
A370	3	2,83	0,28	0,30	51%	200	101
A371	3	2,84	0,30	0,30	51%	198	110
A372	3	2,78	0,27	0,24	51%	201	109
A373	3	2,63	0,30	0,24	51%	196	99
A374	3	2,79	0,25	0,23	51%	201	106
A375	3	2,84	0,33	0,21	51%	203	83
A376	3	2,84	0,26	0,29	51%	201	107
A377	3	2,92	0,30	0,25	51%	203	106
A378	3	3,04	0,34	0,24	51%	209	116
A379	3	2,85	0,29	0,21	51%	202	84
A380	3	2,85	0,29	0,21	51%	202	86
A381	3	2,71	0,31	0,21	51%	197	116
A382	3	2,91	0,31	0,25	51%	203	96

Muestra	Grupo	Mg (%)	Fe (%)	Si (%)	Reducción Previa	Rm (MPa)	Rp _{0,2} (MPa)
A383	3	2,88	0,32	0,30	51%	204	117
A384	3	2,83	0,32	0,27	51%	203	103
A385	3	2,99	0,33	0,20	51%	208	94
A386	3	2,84	0,29	0,31	51%	197	80
A387	3	2,80	0,32	0,24	51%	199	80
A388	3	2,80	0,29	0,04	51%	212	116
A389	3	2,80	0,29	0,28	51%	196	81
A390	3	2,82	0,33	0,26	51%	204	83
A391	3	2,93	0,37	0,23	51%	205	117
A392	3	2,83	0,35	0,28	51%	204	94
A393	3	2,82	0,30	0,29	51%	197	109
A394	3	2,81	0,26	0,28	51%	196	114
A395	3	2,74	0,29	0,25	51%	195	83
A396	3	2,97	0,35	0,25	51%	205	104
A397	3	2,74	0,31	0,22	51%	202	126
A398	3	2,99	0,31	0,22	51%	207	85
A399	3	2,84	0,30	0,30	51%	197	100
A400	3	2,87	0,28	0,24	51%	200	105
A401	3	2,81	0,26	0,29	51%	195	80
A402	3	2,81	0,26	0,23	51%	204	104
A403	3	2,86	0,29	0,24	51%	206	113
A404	3	2,73	0,31	0,21	51%	202	90
A405	3	2,84	0,25	0,30	51%	201	112
A406	3	2,86	0,33	0,28	51%	199	98
A407	3	2,85	0,30	0,28	51%	198	81
A408	3	2,86	0,32	0,20	51%	209	120
A409	3	3,02	0,33	0,22	51%	207	88
A410	3	2,90	0,35	0,26	51%	208	126
A411	3	2,77	0,35	0,27	51%	196	102
A412	3	2,75	0,32	0,25	51%	196	81
A413	3	2,90	0,26	0,29	51%	204	111
A414	3	2,75	0,30	0,23	51%	203	100
A415	3	2,82	0,30	0,29	51%	196	104
A416	3	2,84	0,29	0,26	51%	198	107
A417	3	2,85	0,30	0,28	51%	204	114
A418	3	2,93	0,32	0,21	51%	204	83
A419	3	2,93	0,28	0,28	51%	200	103
A420	3	2,71	0,35	0,19	51%	205	126
A421	3	2,79	0,28	0,29	51%	202	83
A422	3	2,93	0,29	0,28	51%	200	106
A423	3	2,91	0,31	0,27	51%	200	104
A424	3	2,88	0,28	0,30	51%	197	91
A425	3	2,84	0,33	0,21	51%	201	83
A426	3	2,85	0,30	0,27	51%	197	99

Muestra	Grupo	Mg (%)	Fe (%)	Si (%)	Reducción Previa	Rm (MPa)	Rp _{0,2} (MPa)
A427	3	2,75	0,30	0,29	51%	193	102
A428	3	2,78	0,30	0,29	51%	193	102
A429	3	2,84	0,33	0,27	51%	206	90
A430	3	2,87	0,31	0,24	51%	207	122
A431	3	2,74	0,27	0,23	51%	202	109
A432	3	2,66	0,32	0,20	51%	193	108
A433	3	2,75	0,30	0,27	51%	194	80
A434	3	2,75	0,31	0,18	51%	198	106
A435	3	2,90	0,35	0,26	51%	209	104
A436	3	2,85	0,36	0,26	51%	199	108
A437	3	2,80	0,29	0,28	51%	194	106
A438	3	2,80	0,32	0,19	51%	199	124
A439	3	2,85	0,27	0,23	51%	207	109
A440	3	2,86	0,36	0,25	51%	200	107
A441	3	2,72	0,28	0,26	51%	201	115
A442	3	2,87	0,30	0,26	51%	208	114
A443	3	2,80	0,25	0,10	51%	211	128
A444	3	2,80	0,25	0,10	51%	211	126
A445	3	2,76	0,30	0,19	51%	207	119
A446	3	2,77	0,33	0,20	51%	197	81
A447	3	2,79	0,35	0,26	51%	196	112
A448	3	2,87	0,28	0,24	51%	208	110
A449	3	2,91	0,31	0,21	51%	201	83
A450	3	2,80	0,28	0,05	51%	215	140
A451	3	2,81	0,28	0,29	51%	204	83
A452	3	2,83	0,32	0,27	51%	207	85
A453	3	2,80	0,27	0,05	51%	203	127
A454	3	2,78	0,28	0,17	51%	197	109
A455	3	2,81	0,25	0,30	51%	191	80
A456	3	2,91	0,34	0,15	51%	204	83
A457	3	2,78	0,26	0,26	51%	192	111
A458	3	2,85	0,24	0,26	51%	194	101
A459	3	2,74	0,36	0,20	51%	208	131
A460	3	2,78	0,27	0,24	51%	206	107
A461	3	2,70	0,27	0,09	51%	211	128
A462	3	2,88	0,30	0,30	51%	194	99
A463	3	2,85	0,24	0,26	51%	193	103
A464	3	2,81	0,31	0,24	51%	208	88
A465	3	2,77	0,29	0,26	51%	191	103
A466	3	2,79	0,31	0,22	52%	202	104
A467	3	2,97	0,29	0,23	52%	208	129
A468	3	2,97	0,29	0,23	52%	208	129
A469	3	2,96	0,29	0,20	52%	208	124
A470	3	2,88	0,33	0,31	52%	202	105

Muestra	Grupo	Mg (%)	Fe (%)	Si (%)	Reducción Previa	Rm (MPa)	Rp _{0,2} (MPa)
A471	3	2,68	0,35	0,13	52%	203	118
A472	3	2,85	0,35	0,29	52%	202	103
A473	3	3,00	0,29	0,20	52%	210	123
A474	3	2,92	0,34	0,25	52%	205	101
A475	3	2,88	0,27	0,28	52%	201	102
A476	3	2,92	0,36	0,26	52%	206	126
A477	3	2,90	0,31	0,22	52%	205	125
A478	3	2,81	0,26	0,28	52%	198	108
A479	3	2,91	0,28	0,21	52%	205	116
A480	3	2,79	0,28	0,18	52%	202	109
A481	3	2,85	0,36	0,26	52%	204	107
A482	3	2,92	0,34	0,25	52%	206	92
A483	3	3,00	0,30	0,22	52%	210	124
A484	3	2,78	0,35	0,23	52%	203	111
A485	3	2,87	0,31	0,22	52%	206	120
A486	3	2,87	0,31	0,22	52%	206	120
A487	3	2,82	0,29	0,22	52%	204	117
A488	3	2,83	0,34	0,30	52%	202	116
A489	3	2,83	0,34	0,30	52%	202	113
A490	3	2,88	0,31	0,29	52%	201	112
A491	3	2,83	0,32	0,27	52%	202	110
A492	3	2,83	0,34	0,30	52%	202	120
A493	3	2,87	0,33	0,30	52%	203	99
A494	3	2,77	0,33	0,23	52%	199	118
A495	3	2,77	0,33	0,23	52%	199	115
A496	3	2,79	0,26	0,27	52%	196	106
A497	3	2,66	0,32	0,25	52%	197	101
A498	3	2,79	0,28	0,18	52%	204	114
A499	3	2,81	0,26	0,28	52%	200	108
A500	3	2,83	0,35	0,27	52%	204	84
A501	3	2,82	0,31	0,23	52%	203	108
A502	3	2,84	0,32	0,19	52%	207	110
A503	3	2,83	0,36	0,22	52%	203	120
A504	3	2,89	0,27	0,28	52%	200	115
A505	3	2,95	0,33	0,23	52%	206	131
A506	3	2,87	0,30	0,26	52%	205	109
A507	3	2,87	0,26	0,17	52%	207	122
A508	3	2,71	0,31	0,21	52%	201	101
A509	3	2,92	0,30	0,25	52%	203	97
A510	3	2,94	0,31	0,21	52%	206	117
A511	3	2,83	0,30	0,21	52%	206	110
A512	3	2,85	0,35	0,29	52%	200	108
A513	3	2,62	0,36	0,24	52%	198	100
A514	3	2,77	0,33	0,23	52%	198	114

Muestra	Grupo	Mg (%)	Fe (%)	Si (%)	Reducción Previa	Rm (MPa)	Rp _{0,2} (MPa)
A515	3	2,94	0,31	0,31	52%	206	123
A516	3	3,05	0,31	0,23	52%	209	116
A517	3	2,80	0,30	0,22	52%	200	86
A518	3	2,85	0,36	0,26	52%	206	106
A519	3	2,66	0,32	0,28	52%	196	120
A520	3	2,80	0,31	0,32	52%	200	114
A521	3	2,90	0,29	0,21	52%	208	126
A522	3	2,78	0,34	0,25	52%	198	110
A523	3	2,78	0,31	0,26	52%	202	110
A524	3	2,75	0,30	0,29	52%	194	102
A525	3	2,85	0,29	0,21	52%	207	128
A526	3	2,87	0,31	0,24	52%	206	121
A527	3	2,77	0,32	0,19	52%	205	126
A528	3	2,66	0,28	0,23	52%	199	107
A529	3	2,98	0,40	0,23	52%	213	118
A530	3	2,73	0,33	0,21	52%	197	80
A531	3	2,92	0,34	0,25	52%	209	110
A532	3	2,77	0,31	0,20	52%	197	111
A533	3	2,84	0,32	0,19	52%	210	120
A534	3	2,78	0,28	0,17	52%	198	105
A535	3	2,87	0,30	0,23	52%	209	125
A536	3	2,83	0,30	0,21	52%	209	131
A537	3	2,83	0,35	0,27	52%	208	103
A538	3	2,82	0,31	0,28	52%	206	109
A539	4	2,90	0,34	0,31	56%	203	86
A540	4	2,89	0,29	0,25	56%	204	87
A541	4	2,66	0,29	0,24	56%	196	82
A542	4	2,87	0,32	0,30	56%	202	85
A543	4	2,88	0,34	0,29	56%	203	89
A544	4	2,64	0,33	0,26	56%	196	84
A545	4	2,78	0,30	0,27	56%	199	87
A546	4	2,81	0,27	0,31	56%	197	81
A547	4	2,88	0,30	0,28	56%	203	86
A548	4	2,85	0,34	0,21	56%	207	118
A549	4	2,81	0,28	0,27	56%	199	83
A550	4	2,82	0,30	0,27	56%	200	89
A551	4	2,75	0,32	0,27	56%	198	86
A552	4	2,80	0,33	0,31	56%	198	84
A553	4	2,66	0,29	0,24	56%	195	83
A554	4	2,86	0,36	0,32	56%	203	88
A555	4	2,98	0,32	0,30	56%	204	90
A556	4	2,89	0,36	0,24	56%	205	129
A557	4	2,87	0,30	0,32	56%	198	88
A558	4	2,85	0,34	0,21	56%	209	122

Muestra	Grupo	Mg (%)	Fe (%)	Si (%)	Reducción Previa	Rm (MPa)	Rp _{0,2} (MPa)
A559	4	2,81	0,29	0,27	56%	197	82
A560	4	2,84	0,35	0,26	56%	200	89
A561	4	2,90	0,31	0,21	57%	207	124
A562	4	2,88	0,32	0,30	57%	202	103
A563	4	2,88	0,32	0,30	57%	202	112
A564	4	2,77	0,35	0,22	57%	203	89
A565	4	2,90	0,30	0,28	57%	203	116
A566	4	2,76	0,32	0,24	57%	201	120
A567	4	2,76	0,32	0,24	57%	201	120
A568	4	2,81	0,31	0,25	57%	202	85
A569	4	2,91	0,29	0,28	57%	203	117
A570	4	2,78	0,28	0,21	57%	202	114
A571	4	3,01	0,30	0,23	57%	210	93
A572	4	2,87	0,29	0,23	57%	204	114
A573	4	2,83	0,30	0,26	57%	202	119
A574	4	2,80	0,29	0,10	57%	208	122
A575	4	2,91	0,30	0,20	57%	208	118
A576	4	2,82	0,34	0,24	57%	204	86
A577	4	2,75	0,29	0,24	57%	199	110
A578	4	2,88	0,33	0,24	57%	205	124
A579	4	3,01	0,34	0,30	57%	207	121
A580	4	2,87	0,25	0,28	57%	201	113
A581	4	2,87	0,28	0,26	57%	203	113
A582	4	2,85	0,32	0,25	57%	203	111
A583	4	3,09	0,31	0,30	57%	210	124
A584	4	2,95	0,28	0,24	57%	207	120
A585	4	2,90	0,31	0,12	57%	211	114
A586	4	2,77	0,32	0,25	57%	200	116
A587	4	2,84	0,31	0,28	57%	202	109
A588	4	2,84	0,32	0,28	57%	201	112
A589	4	2,86	0,30	0,21	57%	206	87
A590	4	2,63	0,34	0,16	57%	200	108
A591	4	2,78	0,28	0,20	57%	203	130
A592	4	2,85	0,31	0,12	57%	209	104
A593	4	2,85	0,31	0,31	57%	201	105
A594	4	2,77	0,32	0,22	57%	203	106
A595	4	2,77	0,35	0,22	57%	204	122
A596	4	2,84	0,35	0,31	57%	202	121
A597	4	2,84	0,28	0,27	57%	200	109
A598	4	2,80	0,33	0,13	57%	209	116
A599	4	2,86	0,31	0,22	57%	206	123
A600	4	2,76	0,33	0,26	57%	201	110
A601	4	2,91	0,28	0,28	57%	202	116
A602	4	2,76	0,34	0,21	57%	202	113

Muestra	Grupo	Mg (%)	Fe (%)	Si (%)	Reducción Previa	Rm (MPa)	Rp _{0,2} (MPa)
A603	4	2,86	0,31	0,30	57%	202	115
A604	4	2,93	0,34	0,33	57%	204	115
A605	4	2,82	0,29	0,32	57%	197	108
A606	4	2,72	0,31	0,22	57%	199	116
A607	4	2,88	0,35	0,22	57%	206	119
A608	4	2,88	0,28	0,30	57%	202	118
A609	4	2,61	0,30	0,23	57%	194	109
A610	4	3,01	0,30	0,23	57%	211	119
A611	4	2,77	0,29	0,21	57%	203	103
A612	4	2,75	0,35	0,28	57%	198	110
A613	4	2,70	0,32	0,18	57%	203	115
A614	4	2,79	0,32	0,25	57%	203	111
A615	4	2,72	0,35	0,26	57%	201	86
A616	4	2,65	0,35	0,23	57%	200	113
A617	4	2,83	0,33	0,25	57%	205	111
A618	4	2,73	0,32	0,26	57%	201	94
A619	4	2,64	0,28	0,19	57%	200	115
A620	4	2,64	0,28	0,19	57%	200	120
A621	4	2,92	0,29	0,24	57%	208	128
A622	4	2,70	0,32	0,18	57%	204	116
A623	4	2,62	0,28	0,22	57%	193	100
A624	4	2,86	0,32	0,22	57%	203	115
A625	4	2,87	0,34	0,20	57%	205	115
A626	4	2,80	0,33	0,26	57%	199	115
A627	4	2,76	0,37	0,21	57%	201	121
A628	4	2,90	0,34	0,29	57%	201	89
A629	4	2,65	0,34	0,24	57%	194	88
A630	4	2,84	0,33	0,27	57%	206	107
A631	4	2,64	0,29	0,18	57%	202	119
A632	4	2,93	0,32	0,23	57%	211	122
A633	4	2,84	0,35	0,26	57%	200	111
A634	4	2,71	0,36	0,26	57%	203	126
A635	4	2,88	0,36	0,25	57%	202	109
A636	4	2,89	0,28	0,28	57%	198	83
A637	4	2,89	0,28	0,29	57%	206	116
A638	4	2,85	0,34	0,28	57%	207	121
A639	4	2,79	0,30	0,23	57%	197	114
A640	4	2,79	0,30	0,28	57%	204	106
A641	4	2,61	0,30	0,23	57%	190	81
A642	4	2,87	0,29	0,23	57%	197	109
A643	4	2,70	0,32	0,23	58%	199	118
A644	4	2,84	0,28	0,27	58%	201	113
A645	4	2,72	0,31	0,25	58%	200	112
A646	4	2,72	0,33	0,27	58%	200	114

Muestra	Grupo	Mg (%)	Fe (%)	Si (%)	Reducción Previa	Rm (MPa)	Rp _{0,2} (MPa)
A647	4	2,80	0,31	0,24	58%	204	116
A648	4	2,81	0,33	0,27	58%	204	117
A649	4	2,82	0,27	0,26	58%	197	109
A650	4	2,93	0,31	0,27	58%	210	130
A651	5	2,80	0,32	0,28	66%	199	105
A652	5	2,80	0,28	0,29	66%	201	89
A653	5	2,80	0,27	0,04	66%	211	131
A654	5	2,81	0,29	0,27	66%	209	100
A655	5	2,93	0,40	0,28	67%	212	116
A656	5	2,93	0,40	0,28	67%	209	114
A657	5	2,93	0,37	0,23	67%	207	107
A658	5	2,74	0,36	0,20	67%	207	132
A659	5	2,79	0,35	0,20	67%	209	118
A660	5	2,92	0,34	0,29	67%	210	117
A661	5	2,75	0,34	0,22	67%	206	116
A662	5	2,90	0,34	0,31	67%	208	114
A663	5	2,83	0,34	0,30	67%	206	118
A664	5	2,90	0,33	0,19	67%	207	116
A665	5	2,97	0,33	0,27	67%	214	118
A666	5	2,92	0,33	0,27	67%	210	123
A667	5	2,73	0,32	0,28	67%	202	119
A668	5	2,84	0,32	0,31	67%	204	123
A669	5	2,84	0,32	0,31	67%	206	128
A670	5	2,88	0,32	0,27	67%	209	118
A671	5	2,84	0,32	0,18	67%	202	104
A672	5	2,80	0,32	0,28	67%	200	110
A673	5	2,80	0,32	0,28	67%	198	108
A674	5	2,82	0,31	0,23	67%	204	99
A675	5	2,92	0,31	0,23	67%	210	124
A676	5	2,99	0,31	0,22	67%	212	124
A677	5	2,75	0,31	0,23	67%	203	117
A678	5	2,80	0,31	0,03	67%	213	123
A679	5	2,90	0,31	0,21	67%	203	122
A680	5	2,97	0,31	0,27	67%	208	117
A681	5	2,91	0,31	0,25	67%	208	123
A682	5	2,90	0,31	0,26	67%	205	111
A683	5	2,65	0,31	0,24	67%	197	112
A684	5	2,85	0,31	0,27	67%	206	126
A685	5	2,79	0,31	0,27	67%	199	112
A686	5	2,94	0,31	0,31	67%	211	118
A687	5	2,81	0,31	0,27	67%	198	113
A688	5	2,76	0,30	0,20	67%	201	115
A689	5	2,81	0,30	0,32	67%	207	116
A690	5	2,80	0,30	0,23	67%	203	121

Muestra	Grupo	Mg (%)	Fe (%)	Si (%)	Reducción Previa	Rm (MPa)	Rp _{0,2} (MPa)
A691	5	2,85	0,30	0,26	67%	201	109
A692	5	2,78	0,30	0,25	67%	200	117
A693	5	2,78	0,30	0,25	67%	202	114
A694	5	2,97	0,30	0,31	67%	206	122
A695	5	2,97	0,30	0,31	67%	207	119
A696	5	2,73	0,33	0,21	67%	201	117
A697	5	2,86	0,29	0,16	67%	203	115
A698	5	2,66	0,29	0,11	67%	200	113
A699	5	2,80	0,29	0,04	67%	212	111
A700	5	2,87	0,29	0,16	67%	204	116
A701	5	2,91	0,29	0,21	67%	210	120
A702	5	2,91	0,29	0,21	67%	209	121
A703	5	2,88	0,29	0,19	67%	206	121
A704	5	2,88	0,29	0,19	67%	207	123
A705	5	2,90	0,29	0,21	67%	212	119
A706	5	2,96	0,29	0,21	67%	213	121
A707	5	2,98	0,29	0,20	67%	213	120
A708	5	2,79	0,29	0,24	67%	201	111
A709	5	2,65	0,29	0,24	67%	204	117
A710	5	2,94	0,29	0,25	67%	208	118
A711	5	2,82	0,29	0,23	67%	202	116
A712	5	2,83	0,29	0,25	67%	205	129
A713	5	2,82	0,29	0,29	67%	200	110
A714	5	2,75	0,29	0,29	67%	200	121
A715	5	2,78	0,28	0,27	67%	200	118
A716	5	2,66	0,28	0,23	67%	197	113
A717	5	2,88	0,28	0,25	67%	203	92
A718	5	2,71	0,28	0,31	67%	193	115
A719	5	2,87	0,28	0,25	67%	209	117
A720	5	2,71	0,28	0,31	67%	191	109
A721	5	2,80	0,27	0,29	67%	200	108
A722	5	2,81	0,27	0,26	67%	202	120
A723	5	2,78	0,27	0,24	67%	203	117
A724	5	2,85	0,27	0,23	67%	204	111
A725	5	2,96	0,27	0,28	67%	208	126
A726	5	2,86	0,27	0,23	67%	203	108
A727	5	2,99	0,26	0,28	67%	207	129
A728	5	2,76	0,26	0,27	67%	198	105
A729	5	2,80	0,26	0,09	67%	209	117
A730	5	2,81	0,26	0,28	67%	198	113
A731	5	2,92	0,26	0,26	67%	202	109
A732	5	2,81	0,26	0,23	67%	208	115
A733	5	2,80	0,26	0,28	67%	196	86
A734	5	2,83	0,26	0,29	67%	196	86

Muestra	Grupo	Mg (%)	Fe (%)	Si (%)	Reducción Previa	Rm (MPa)	Rp _{0,2} (MPa)
A735	5	2,76	0,26	0,27	67%	192	102
A736	5	2,79	0,25	0,23	67%	202	116
A737	5	2,87	0,25	0,28	67%	204	118
A738	5	2,82	0,24	0,16	67%	205	118
A739	5	2,82	0,29	0,34	67%	201	116
A740	5	2,84	0,29	0,33	67%	204	121
A741	5	2,87	0,29	0,23	67%	208	111
A742	5	2,82	0,29	0,34	67%	202	119
A743	5	2,87	0,28	0,24	67%	208	125
A744	5	2,95	0,28	0,30	67%	209	128
A745	5	2,96	0,27	0,28	67%	208	119
A746	5	2,81	0,28	0,13	67%	212	99
A747	5	2,62	0,36	0,24	68%	197	116
A748	5	2,79	0,35	0,20	68%	208	124
A749	5	2,68	0,35	0,13	68%	211	111
A750	5	2,88	0,35	0,22	68%	210	121
A751	5	2,84	0,35	0,27	68%	201	92
A752	5	2,86	0,34	0,25	68%	212	133
A753	5	2,91	0,34	0,15	68%	215	145
A754	5	2,78	0,34	0,25	68%	205	124
A755	5	2,78	0,34	0,25	68%	201	104
A756	5	2,89	0,33	0,20	68%	208	109
A757	5	2,79	0,33	0,21	68%	206	112
A758	5	2,94	0,33	0,21	68%	211	120
A759	5	2,94	0,33	0,21	68%	212	116
A760	5	2,94	0,33	0,21	68%	213	121
A761	5	2,77	0,33	0,20	68%	205	120
A762	5	2,85	0,33	0,29	68%	198	107
A763	5	2,88	0,33	0,30	68%	206	116
A764	5	2,91	0,33	0,30	68%	208	108
A765	5	2,85	0,32	0,22	68%	205	119
A766	5	2,83	0,32	0,27	68%	203	116
A767	5	2,86	0,32	0,20	68%	210	118
A768	5	2,88	0,32	0,27	68%	206	121
A769	5	2,81	0,32	0,30	68%	201	106
A770	5	2,88	0,32	0,30	68%	206	119
A771	5	2,73	0,32	0,26	68%	204	115
A772	5	2,78	0,31	0,26	68%	205	124
A773	5	2,78	0,31	0,26	68%	206	123
A774	5	2,80	0,31	0,03	68%	216	130
A775	5	2,89	0,31	0,23	68%	205	116
A776	5	2,74	0,31	0,24	68%	205	121
A777	5	2,94	0,31	0,25	68%	206	119
A778	5	2,79	0,31	0,27	68%	199	109

Muestra	Grupo	Mg (%)	Fe (%)	Si (%)	Reducción Previa	Rm (MPa)	Rp _{0,2} (MPa)
A779	5	2,84	0,31	0,32	68%	205	133
A780	5	2,84	0,31	0,26	68%	205	126
A781	5	2,94	0,31	0,31	68%	207	118
A782	5	2,88	0,31	0,29	68%	201	109
A783	5	2,88	0,31	0,29	68%	202	106
A784	5	2,80	0,31	0,25	68%	201	92
A785	5	2,76	0,30	0,19	68%	204	110
A786	5	2,87	0,30	0,18	68%	208	117
A787	5	2,83	0,30	0,20	68%	207	116
A788	5	2,83	0,30	0,20	68%	207	116
A789	5	2,84	0,30	0,22	68%	214	121
A790	5	2,84	0,30	0,22	68%	214	121
A791	5	2,74	0,30	0,24	68%	201	105
A792	5	2,80	0,30	0,23	68%	206	142
A793	5	2,75	0,30	0,23	68%	199	98
A794	5	2,75	0,30	0,23	68%	202	102
A795	5	2,92	0,30	0,24	68%	206	109
A796	5	2,90	0,30	0,31	68%	202	107
A797	5	2,78	0,30	0,29	68%	196	111
A798	5	2,78	0,30	0,29	68%	195	103
A799	5	2,87	0,30	0,28	68%	201	102
A800	5	2,91	0,30	0,32	68%	203	110
A801	5	2,84	0,30	0,31	68%	202	109
A802	5	2,84	0,30	0,29	68%	200	105
A803	5	2,80	0,29	0,23	68%	202	113
A804	5	2,79	0,29	0,23	68%	204	119
A805	5	2,82	0,29	0,29	68%	202	112
A806	5	2,82	0,29	0,29	68%	200	109
A807	5	2,85	0,27	0,27	68%	204	108
A808	5	2,80	0,26	0,04	68%	211	123
A809	5	2,80	0,25	0,10	68%	213	130
A810	5	2,79	0,29	0,24	68%	205	107
A811	5	2,82	0,28	0,29	68%	204	114
A812	5	2,90	0,28	0,30	68%	207	111
A813	5	2,89	0,28	0,29	68%	207	112
A814	6	2,83	0,27	0,29	77%	208	115
A815	6	2,87	0,33	0,30	77%	206	116
A816	6	2,97	0,28	0,27	77%	213	117
A817	6	2,86	0,27	0,23	78%	207	118
A818	6	2,80	0,27	0,06	78%	212	129
A819	6	2,80	0,25	0,03	78%	221	130
A820	6	2,77	0,31	0,24	78%	209	122
A821	6	2,79	0,31	0,22	78%	211	125
A822	6	2,76	0,33	0,26	78%	205	132

Muestra	Grupo	Mg (%)	Fe (%)	Si (%)	Reducción Previa	Rm (MPa)	Rp _{0,2} (MPa)
A823	6	2,72	0,30	0,11	78%	213	127
A824	6	2,86	0,36	0,32	78%	210	120
A825	6	2,80	0,30	0,23	78%	205	130
A826	6	2,78	0,27	0,17	78%	204	127
A827	6	2,77	0,28	0,26	78%	208	120
A828	6	2,80	0,27	0,23	78%	206	118
A829	6	2,80	0,31	0,29	78%	209	135
A830	6	2,76	0,27	0,28	78%	195	116
A831	6	3,03	0,29	0,29	78%	214	122
A832	6	2,82	0,29	0,25	78%	205	124
A833	6	2,71	0,35	0,13	78%	208	120
A834	6	2,80	0,29	0,14	78%	213	126
A835	6	2,72	0,33	0,27	78%	209	123
A836	6	2,70	0,28	0,04	78%	219	139
A837	6	2,80	0,26	0,29	78%	204	119
A838	6	2,93	0,35	0,25	78%	214	120
A839	6	2,82	0,28	0,25	78%	206	118
A840	6	2,80	0,30	0,25	78%	202	114
A841	6	2,83	0,27	0,26	78%	204	110
A842	6	2,80	0,27	0,06	78%	216	138
A843	6	2,79	0,28	0,28	78%	203	117
A844	6	2,79	0,35	0,20	78%	213	135
A845	6	2,86	0,32	0,11	78%	214	120
A846	6	2,80	0,29	0,04	78%	212	132
A847	6	2,77	0,32	0,25	78%	201	109
A848	6	2,75	0,31	0,23	78%	204	120
A849	6	2,88	0,31	0,30	78%	208	127
A850	6	2,79	0,27	0,28	78%	204	112
A851	6	2,82	0,34	0,24	78%	202	94
A852	6	2,86	0,32	0,20	78%	216	134
A853	6	2,82	0,33	0,23	78%	208	130
A854	6	2,84	0,29	0,26	78%	208	130
A855	6	2,84	0,29	0,26	78%	208	130
A856	6	2,77	0,28	0,26	78%	204	113
A857	6	2,82	0,32	0,20	78%	208	120
A858	6	2,83	0,26	0,29	78%	205	117
A859	6	2,67	0,29	0,27	78%	201	110
A860	6	2,95	0,33	0,23	78%	211	132
A861	6	2,90	0,30	0,22	78%	211	126
A862	6	2,82	0,32	0,24	78%	210	133
A863	6	2,75	0,31	0,23	78%	205	120
A864	6	3,03	0,31	0,18	78%	217	120
A865	6	2,94	0,33	0,21	78%	214	121
A866	6	2,96	0,27	0,28	78%	209	125

Muestra	Grupo	Mg (%)	Fe (%)	Si (%)	Reducción Previa	Rm (MPa)	Rp _{0,2} (MPa)
A867	6	2,89	0,31	0,23	78%	209	122
A868	6	2,85	0,31	0,29	78%	207	120
A869	6	2,84	0,33	0,21	78%	213	141
A870	6	2,79	0,33	0,23	78%	212	123
A871	6	2,86	0,34	0,22	78%	211	122
A872	6	2,80	0,32	0,20	78%	209	118
A873	6	3,00	0,31	0,19	78%	217	118
A874	6	2,97	0,29	0,23	78%	213	109
A875	6	2,81	0,31	0,20	78%	209	118
A876	6	3,03	0,31	0,18	78%	216	117
A877	6	2,78	0,31	0,22	78%	205	117
A878	6	2,87	0,31	0,22	78%	212	146
A879	6	2,85	0,27	0,28	78%	205	113
A880	6	2,89	0,31	0,23	78%	208	117
A881	6	2,82	0,32	0,26	78%	203	115
A882	6	2,80	0,26	0,05	78%	214	121
A883	6	2,75	0,30	0,27	78%	201	112
A884	6	2,90	0,34	0,31	78%	211	119
A885	6	2,80	0,30	0,21	78%	205	101
A886	6	2,74	0,29	0,24	78%	200	107
A887	6	3,00	0,31	0,19	78%	213	117
A888	6	2,88	0,30	0,29	78%	212	118
A889	6	2,87	0,39	0,29	78%	207	112
A890	6	2,70	0,34	0,26	78%	209	119
A891	6	2,88	0,30	0,15	78%	215	129
A892	6	2,99	0,34	0,28	78%	216	136
A893	6	2,85	0,29	0,27	78%	209	119
A894	6	2,91	0,36	0,29	78%	210	121
A895	6	2,92	0,29	0,24	78%	209	126
A896	6	2,90	0,28	0,30	78%	210	125
A897	6	2,82	0,31	0,29	78%	205	125
A898	6	2,80	0,26	0,06	78%	209	123
A899	6	2,84	0,30	0,23	78%	205	114
A900	6	2,87	0,30	0,23	78%	211	125
A901	6	2,83	0,34	0,13	78%	216	134
A902	6	2,80	0,25	0,05	78%	212	122
A903	6	2,77	0,28	0,29	78%	202	109
A904	6	2,75	0,29	0,24	78%	205	124
A905	6	2,74	0,29	0,24	78%	200	107
A906	6	2,74	0,29	0,24	78%	200	107
A907	6	2,86	0,32	0,22	78%	207	112
A908	6	2,82	0,31	0,28	78%	208	120
A909	6	2,77	0,29	0,20	78%	210	119
A910	6	2,93	0,32	0,28	78%	206	109

Muestra	Grupo	Mg (%)	Fe (%)	Si (%)	Reducción Previa	Rm (MPa)	Rp _{0,2} (MPa)
A911	6	2,91	0,29	0,33	78%	205	114
A912	6	2,74	0,29	0,24	78%	202	108
A913	6	2,75	0,29	0,24	78%	205	118
A914	6	2,93	0,32	0,29	78%	212	119
A915	6	2,87	0,29	0,26	78%	206	111
A916	6	2,85	0,30	0,28	78%	208	117
A917	6	2,81	0,33	0,19	78%	208	121
A918	6	2,80	0,29	0,10	78%	214	122
A919	6	2,65	0,30	0,11	78%	210	140
A920	6	2,91	0,33	0,28	78%	206	113
A921	6	2,85	0,29	0,11	78%	213	118
A922	6	2,85	0,27	0,25	78%	210	127
A923	6	2,80	0,27	0,04	78%	212	120
A924	6	2,74	0,31	0,26	78%	207	118
A925	6	2,88	0,30	0,29	78%	209	122
A926	6	2,83	0,29	0,26	78%	204	116
A927	6	2,82	0,28	0,25	78%	206	118
A928	6	2,87	0,26	0,30	78%	204	116
A929	6	2,83	0,33	0,31	78%	211	136
A930	6	2,86	0,29	0,24	79%	208	115
A931	6	2,85	0,35	0,15	79%	218	132
A932	6	2,81	0,28	0,13	79%	220	144
A933	6	2,78	0,29	0,20	79%	208	130
A934	6	2,77	0,31	0,26	79%	205	115
A935	6	2,85	0,32	0,20	79%	212	133
A936	6	2,80	0,32	0,24	79%	207	128
A937	6	2,79	0,30	0,23	79%	204	132
A938	6	2,87	0,30	0,23	79%	215	139
A939	6	2,91	0,35	0,32	79%	211	132
A940	6	2,80	0,34	0,05	79%	223	158
A941	6	2,76	0,33	0,26	79%	208	118
A942	6	2,84	0,26	0,29	79%	204	119
A943	6	2,77	0,29	0,28	79%	204	133
A944	6	2,72	0,33	0,16	79%	207	127
A945	6	2,76	0,37	0,21	79%	209	125
A946	6	2,66	0,32	0,28	79%	200	113
A947	6	2,82	0,28	0,27	79%	204	120
A948	6	2,71	0,28	0,31	79%	194	114
A949	6	2,64	0,33	0,26	79%	204	129
A950	6	2,88	0,33	0,31	79%	206	125
A951	6	2,71	0,31	0,31	79%	202	105
A952	6	2,82	0,32	0,20	79%	211	133
A953	6	2,82	0,32	0,20	79%	211	133
A954	6	2,80	0,33	0,31	79%	208	129

Muestra	Grupo	Mg (%)	Fe (%)	Si (%)	Reducción Previa	Rm (MPa)	Rp _{0,2} (MPa)
A955	6	2,78	0,28	0,27	79%	201	122
A956	6	2,71	0,28	0,12	79%	205	126
A957	6	2,64	0,30	0,10	79%	212	124
A958	6	2,63	0,30	0,24	79%	205	116
A959	6	2,93	0,32	0,29	79%	211	133
A960	6	2,83	0,32	0,26	79%	212	132
A961	6	2,82	0,28	0,26	79%	204	120
A962	6	2,80	0,29	0,04	79%	218	128
A963	6	2,67	0,31	0,29	79%	201	123
A964	6	2,72	0,35	0,26	79%	207	119
A965	6	2,72	0,33	0,27	79%	207	119
A966	6	2,91	0,31	0,27	79%	205	114
A967	6	2,84	0,31	0,26	79%	205	115
A968	6	2,81	0,31	0,27	79%	200	126
A969	6	2,80	0,29	0,13	79%	213	135
A970	6	2,88	0,30	0,28	79%	207	127
A971	6	2,83	0,33	0,30	79%	211	126
A972	6	2,82	0,29	0,28	79%	203	119
A973	6	2,72	0,35	0,26	79%	207	111
A974	6	2,71	0,31	0,15	79%	212	123
A975	6	2,83	0,32	0,20	79%	213	114
A976	6	2,80	0,29	0,08	79%	214	141
A977	6	2,91	0,29	0,33	79%	208	128
A978	6	2,72	0,35	0,26	79%	209	122
A979	6	2,81	0,30	0,18	79%	211	117
A980	6	2,81	0,28	0,13	79%	219	141
A981	6	2,80	0,31	0,32	79%	205	136
A982	6	2,86	0,29	0,24	79%	206	112
A983	6	2,85	0,30	0,19	79%	213	138
A984	6	2,78	0,31	0,18	79%	210	116
A985	6	2,72	0,33	0,16	79%	208	115
A986	6	2,80	0,30	0,22	79%	203	128
A987	6	2,76	0,30	0,20	79%	207	137
A988	6	2,81	0,33	0,27	79%	211	137
A989	6	2,90	0,31	0,21	79%	211	131
A990	6	2,89	0,31	0,23	79%	211	132
A991	6	2,73	0,32	0,28	79%	203	128
A992	6	2,84	0,35	0,26	79%	208	138
A993	6	2,78	0,27	0,24	79%	201	119
A994	6	2,87	0,30	0,22	79%	209	128
A995	6	2,87	0,30	0,22	79%	209	128
A996	6	2,80	0,35	0,21	79%	209	118
A997	6	2,89	0,35	0,23	79%	212	137
A998	6	2,81	0,30	0,19	79%	216	134

Muestra	Grupo	Mg (%)	Fe (%)	Si (%)	Reducción Previa	Rm (MPa)	Rp_{0,2} (MPa)
A999	6	2,80	0,25	0,10	79%	216	130
A1000	6	2,76	0,34	0,27	79%	200	121

Anexo B

Selección de 629 muestras de 9 mm de espesor de Aludium de la aleación AA5754 en estado recocido total que no han sido sometidas a laminación en frío, habiendo sufrido todas el mismo proceso de fabricación, junto con sus contenidos de Mg, Fe y Si y sus valores Resistencia Mecánica (Rm), Límite Elástico (Rp_{0,2}) y coeficiente de endurecimiento (*n*_{4-6%}). Las medidas de composición las han realizado los laboratorios normalizados de los departamentos de Calidad de Aludium Transformación de Productos. Los valores de CCMM y coeficiente de endurecimiento se han obtenido en los laboratorios normalizados de Cindal con el material y los métodos expuestos en el apartado de Material y Métodos de esta tesis.

Tabla B1

Muestra	Mg (%)	Fe (%)	Si (%)	Rm (MPa)	Rp _{0,2%} (MPa)	<i>n</i> _{4-6%}
B1	3,03	0,33	0,24	209	100	0,330
B2	3,00	0,29	0,20	209	96	0,325
B3	3,00	0,29	0,20	209	96	0,325
B4	2,98	0,31	0,28	206	97	0,310
B5	3,00	0,32	0,24	208	97	0,320
B6	3,01	0,29	0,22	210	98	0,320
B7	2,99	0,30	0,20	206	98	0,320
B8	3,02	0,38	0,29	212	98	0,320
B9	3,05	0,29	0,20	214	98	0,335
B10	3,05	0,30	0,28	210	99	0,320
B11	2,99	0,30	0,29	207	99	0,310
B12	2,99	0,30	0,20	206	99	0,330
B13	3,01	0,33	0,26	208	99	0,320
B14	3,03	0,30	0,28	207	99	0,305
B15	3,05	0,30	0,22	207	99	0,335
B16	2,98	0,32	0,27	206	99	0,310
B17	2,98	0,32	0,29	209	99	0,315
B18	2,98	0,33	0,26	207	99	0,315
B19	2,99	0,30	0,20	206	99	0,320
B20	3,01	0,34	0,27	209	99	0,310
B21	3,00	0,27	0,20	213	100	0,320
B22	2,98	0,31	0,28	205	100	0,305
B23	2,99	0,30	0,23	211	100	0,315
B24	3,05	0,33	0,27	209	100	0,320
B25	2,98	0,32	0,26	209	100	0,315
B26	2,98	0,32	0,27	206	100	0,315
B27	3,04	0,28	0,22	206	100	0,310
B28	2,99	0,31	0,30	203	100	0,295

Muestra	Mg (%)	Fe (%)	Si (%)	Rm (MPa)	Rp_{0,2%} (MPa)	n_{4-6%}
B29	2,99	0,26	0,20	209	100	0,315
B30	3,05	0,33	0,27	210	100	0,325
B31	3,02	0,33	0,15	213	101	0,325
B32	2,98	0,31	0,28	206	101	0,305
B33	2,99	0,30	0,20	210	101	0,320
B34	3,01	0,31	0,28	208	101	0,310
B35	2,98	0,32	0,29	208	101	0,310
B36	2,98	0,32	0,27	205	101	0,315
B37	3,02	0,32	0,25	209	101	0,305
B38	2,99	0,31	0,30	205	101	0,300
B39	2,99	0,34	0,25	207	101	0,305
B40	3,03	0,30	0,27	211	102	0,310
B41	3,05	0,35	0,27	213	102	0,315
B42	2,98	0,31	0,28	207	102	0,310
B43	3,02	0,29	0,14	212	102	0,320
B44	2,99	0,32	0,28	208	102	0,300
B45	2,99	0,28	0,15	213	102	0,310
B46	3,00	0,31	0,28	205	102	0,305
B47	3,02	0,32	0,25	209	102	0,300
B48	2,97	0,33	0,28	205	102	0,300
B49	2,98	0,27	0,28	207	102	0,300
B50	3,01	0,33	0,26	208	102	0,295
B51	3,01	0,31	0,28	208	102	0,300
B52	3,01	0,31	0,21	211	102	0,320
B53	3,02	0,28	0,21	210	102	0,305
B54	3,03	0,30	0,28	206	102	0,300
B55	3,00	0,27	0,18	209	103	0,295
B56	3,00	0,29	0,19	212	103	0,305
B57	3,00	0,32	0,28	208	103	0,305
B58	2,97	0,31	0,30	206	103	0,300
B59	2,97	0,33	0,26	208	103	0,300
B60	2,98	0,34	0,30	206	103	0,290
B61	2,99	0,31	0,30	203	103	0,290
B62	2,99	0,30	0,29	207	103	0,305
B63	2,99	0,31	0,26	211	103	0,310
B64	3,01	0,32	0,27	209	103	0,310
B65	3,03	0,30	0,28	208	103	0,315
B66	2,97	0,38	0,32	206	103	0,310
B67	2,97	0,33	0,14	212	103	0,320
B68	2,99	0,32	0,28	206	103	0,300
B69	2,99	0,32	0,28	208	103	0,300
B70	2,99	0,33	0,25	211	103	0,305
B71	3,01	0,32	0,19	213	103	0,310
B72	3,02	0,33	0,15	212	103	0,300
B73	2,97	0,31	0,32	205	103	0,300

Muestra	Mg (%)	Fe (%)	Si (%)	Rm (MPa)	Rp_{0,2%} (MPa)	n_{4-6%}
B74	2,98	0,29	0,26	207	103	0,300
B75	2,98	0,29	0,26	210	103	0,305
B76	2,98	0,32	0,29	215	103	0,310
B77	3,00	0,31	0,19	209	103	0,295
B78	3,01	0,33	0,26	208	103	0,290
B79	3,01	0,31	0,28	209	103	0,300
B80	3,01	0,32	0,20	214	103	0,315
B81	3,01	0,31	0,21	212	103	0,320
B82	3,02	0,29	0,14	214	103	0,305
B83	2,97	0,33	0,14	210	104	0,295
B84	2,99	0,29	0,17	212	104	0,295
B85	2,99	0,29	0,15	215	104	0,305
B86	3,05	0,32	0,28	211	104	0,310
B87	2,97	0,27	0,20	210	104	0,305
B88	2,98	0,31	0,28	206	104	0,290
B89	2,98	0,27	0,28	208	104	0,300
B90	2,98	0,30	0,27	207	104	0,305
B91	2,98	0,29	0,26	206	104	0,305
B92	2,98	0,29	0,26	209	104	0,315
B93	2,99	0,31	0,30	205	104	0,285
B94	2,99	0,32	0,28	209	104	0,290
B95	2,99	0,30	0,29	207	104	0,300
B96	3,00	0,30	0,21	210	104	0,315
B97	3,00	0,30	0,21	211	104	0,315
B98	3,00	0,30	0,21	209	104	0,320
B99	3,03	0,34	0,26	211	104	0,285
B100	3,03	0,35	0,26	209	104	0,300
B101	3,03	0,25	0,14	212	104	0,300
B102	3,03	0,33	0,24	211	104	0,310
B103	2,97	0,32	0,29	206	104	0,295
B104	2,98	0,27	0,11	212	104	0,300
B105	2,99	0,28	0,15	211	104	0,305
B106	2,99	0,32	0,28	207	104	0,315
B107	3,00	0,29	0,19	213	104	0,305
B108	3,03	0,30	0,27	211	104	0,305
B109	3,04	0,31	0,29	210	104	0,305
B110	2,97	0,32	0,29	207	104	0,300
B111	2,98	0,34	0,30	205	104	0,280
B112	2,98	0,31	0,28	206	104	0,295
B113	2,98	0,30	0,15	215	104	0,320
B114	2,99	0,26	0,20	212	104	0,290
B115	2,99	0,35	0,26	208	104	0,290
B116	3,00	0,26	0,24	210	104	0,295
B117	3,00	0,30	0,21	209	104	0,300
B118	3,01	0,31	0,21	213	104	0,310

Muestra	Mg (%)	Fe (%)	Si (%)	Rm (MPa)	Rp_{0,2%} (MPa)	n_{4-6%}
B119	3,02	0,31	0,22	213	104	0,310
B120	3,03	0,34	0,26	210	104	0,295
B121	3,03	0,30	0,26	213	104	0,300
B122	3,03	0,35	0,26	210	104	0,305
B123	3,04	0,30	0,27	206	104	0,300
B124	3,05	0,30	0,22	210	104	0,310
B125	2,98	0,32	0,26	207	105	0,300
B126	2,98	0,27	0,11	211	105	0,300
B127	2,99	0,32	0,28	208	105	0,300
B128	3,02	0,36	0,23	208	105	0,300
B129	3,02	0,32	0,25	210	105	0,305
B130	3,05	0,30	0,28	212	105	0,310
B131	2,97	0,31	0,30	207	105	0,295
B132	2,97	0,31	0,30	207	105	0,300
B133	2,98	0,31	0,28	206	105	0,300
B134	2,98	0,29	0,24	211	105	0,310
B135	2,99	0,32	0,28	206	105	0,285
B136	2,99	0,31	0,27	208	105	0,300
B137	3,00	0,35	0,28	206	105	0,285
B138	3,00	0,30	0,21	210	105	0,320
B139	3,01	0,38	0,28	212	105	0,295
B140	3,02	0,28	0,21	210	105	0,300
B141	3,03	0,35	0,26	209	105	0,295
B142	2,97	0,32	0,29	206	105	0,295
B143	2,97	0,31	0,28	208	105	0,295
B144	2,97	0,31	0,28	207	105	0,300
B145	2,97	0,31	0,28	207	105	0,305
B146	2,99	0,33	0,25	211	105	0,305
B147	3,00	0,29	0,18	213	105	0,310
B148	3,01	0,33	0,26	209	105	0,300
B149	3,02	0,32	0,28	210	105	0,300
B150	3,02	0,30	0,24	211	105	0,310
B151	3,03	0,32	0,19	214	105	0,310
B152	3,04	0,29	0,18	209	105	0,300
B153	2,97	0,33	0,28	207	105	0,295
B154	2,98	0,32	0,29	210	105	0,290
B155	2,98	0,31	0,28	205	105	0,295
B156	2,98	0,33	0,26	209	105	0,300
B157	2,99	0,32	0,28	209	105	0,290
B158	2,99	0,31	0,27	206	105	0,300
B159	3,01	0,30	0,28	211	105	0,285
B160	3,01	0,29	0,13	214	105	0,300
B161	3,01	0,28	0,23	214	105	0,310
B162	3,01	0,32	0,20	213	105	0,310
B163	3,02	0,31	0,30	207	105	0,290

Muestra	Mg (%)	Fe (%)	Si (%)	Rm (MPa)	Rp_{0,2%} (MPa)	n_{4-6%}
B164	3,02	0,31	0,30	207	105	0,290
B165	3,02	0,31	0,22	209	105	0,300
B166	3,04	0,33	0,26	208	105	0,295
B167	2,97	0,32	0,29	206	106	0,295
B168	2,97	0,32	0,29	207	106	0,295
B169	2,98	0,32	0,26	207	106	0,300
B170	2,98	0,32	0,26	209	106	0,305
B171	2,98	0,32	0,26	208	106	0,305
B172	2,99	0,28	0,15	214	106	0,295
B173	3,00	0,29	0,18	213	106	0,295
B174	3,00	0,31	0,28	207	106	0,300
B175	3,03	0,32	0,19	212	106	0,310
B176	3,04	0,34	0,28	210	106	0,310
B177	2,97	0,27	0,20	210	106	0,290
B178	2,97	0,36	0,26	209	106	0,300
B179	2,98	0,34	0,30	204	106	0,285
B180	2,98	0,30	0,27	207	106	0,290
B181	2,98	0,34	0,30	205	106	0,290
B182	2,99	0,31	0,30	206	106	0,285
B183	2,99	0,32	0,28	210	106	0,290
B184	3,00	0,32	0,27	210	106	0,295
B185	3,00	0,30	0,21	212	106	0,310
B186	3,01	0,30	0,28	210	106	0,285
B187	3,02	0,31	0,30	210	106	0,305
B188	3,03	0,34	0,26	213	106	0,295
B189	3,04	0,33	0,27	212	106	0,295
B190	3,04	0,30	0,27	205	106	0,300
B191	3,05	0,32	0,30	209	106	0,285
B192	3,05	0,35	0,26	210	106	0,290
B193	3,05	0,31	0,31	207	106	0,300
B194	3,05	0,35	0,26	211	106	0,300
B195	3,05	0,30	0,22	210	106	0,305
B196	2,98	0,27	0,11	213	106	0,295
B197	2,98	0,32	0,29	209	106	0,295
B198	2,98	0,32	0,29	209	106	0,300
B199	3,00	0,40	0,26	211	106	0,295
B200	3,01	0,32	0,31	209	106	0,285
B201	3,02	0,31	0,30	208	106	0,295
B202	3,02	0,29	0,19	210	106	0,295
B203	3,02	0,32	0,28	208	106	0,305
B204	3,02	0,27	0,11	214	106	0,310
B205	3,03	0,32	0,19	212	106	0,300
B206	3,05	0,35	0,27	212	106	0,300
B207	3,05	0,32	0,28	210	106	0,300
B208	3,05	0,30	0,28	212	106	0,300

Muestra	Mg (%)	Fe (%)	Si (%)	Rm (MPa)	Rp_{0,2%} (MPa)	n_{4-6%}
B209	2,97	0,33	0,26	204	106	0,295
B210	2,97	0,33	0,26	208	106	0,295
B211	2,98	0,29	0,24	210	106	0,280
B212	2,98	0,33	0,26	210	106	0,295
B213	2,98	0,29	0,26	207	106	0,300
B214	3,00	0,33	0,25	210	106	0,285
B215	3,00	0,31	0,16	213	106	0,295
B216	3,01	0,31	0,28	209	106	0,285
B217	3,01	0,32	0,27	211	106	0,310
B218	3,02	0,35	0,26	211	106	0,300
B219	3,03	0,35	0,26	208	106	0,280
B220	3,04	0,34	0,31	209	106	0,290
B221	3,04	0,34	0,31	208	106	0,290
B222	3,04	0,32	0,12	215	106	0,290
B223	2,99	0,29	0,17	212	107	0,295
B224	3,00	0,40	0,26	210	107	0,290
B225	3,00	0,29	0,18	213	107	0,300
B226	3,02	0,33	0,28	208	107	0,275
B227	3,02	0,33	0,27	210	107	0,300
B228	3,02	0,31	0,30	210	107	0,300
B229	3,02	0,33	0,27	211	107	0,315
B230	3,03	0,30	0,15	214	107	0,300
B231	3,04	0,30	0,30	209	107	0,300
B232	3,05	0,35	0,27	213	107	0,295
B233	3,05	0,35	0,29	212	107	0,300
B234	2,97	0,33	0,28	206	107	0,285
B235	2,98	0,31	0,28	208	107	0,290
B236	2,98	0,33	0,26	208	107	0,295
B237	2,98	0,31	0,28	207	107	0,300
B238	2,99	0,31	0,27	209	107	0,285
B239	2,99	0,31	0,26	210	107	0,300
B240	3,00	0,29	0,20	211	107	0,295
B241	3,00	0,35	0,28	209	107	0,295
B242	3,00	0,35	0,28	209	107	0,295
B243	3,01	0,31	0,28	208	107	0,295
B244	3,02	0,35	0,26	213	107	0,305
B245	3,02	0,35	0,27	210	107	0,310
B246	3,02	0,29	0,14	214	107	0,310
B247	3,03	0,35	0,26	208	107	0,300
B248	3,03	0,33	0,27	214	107	0,305
B249	3,05	0,30	0,22	211	107	0,300
B250	2,98	0,31	0,16	211	107	0,310
B251	2,99	0,28	0,11	214	107	0,295
B252	3,00	0,29	0,19	213	107	0,290
B253	3,01	0,31	0,16	211	107	0,300

Muestra	Mg (%)	Fe (%)	Si (%)	Rm (MPa)	Rp_{0,2%} (MPa)	n_{4-6%}
B254	3,02	0,33	0,28	209	107	0,285
B255	3,02	0,29	0,19	211	107	0,295
B256	3,02	0,33	0,27	211	107	0,300
B257	3,02	0,27	0,11	214	107	0,300
B258	3,02	0,30	0,24	211	107	0,310
B259	3,03	0,33	0,24	212	107	0,290
B260	3,03	0,32	0,19	211	107	0,300
B261	3,04	0,24	0,12	213	107	0,295
B262	2,97	0,33	0,28	208	107	0,295
B263	2,97	0,31	0,32	206	107	0,300
B264	2,99	0,31	0,27	208	107	0,280
B265	2,99	0,32	0,24	210	107	0,280
B266	2,99	0,34	0,28	210	107	0,300
B267	3,00	0,32	0,29	208	107	0,295
B268	3,01	0,29	0,13	213	107	0,300
B269	3,02	0,35	0,27	209	107	0,290
B270	3,02	0,35	0,27	210	107	0,290
B271	3,02	0,32	0,29	207	107	0,295
B272	3,03	0,33	0,24	213	107	0,295
B273	3,04	0,30	0,27	204	107	0,285
B274	3,04	0,35	0,28	211	107	0,300
B275	3,05	0,34	0,27	209	107	0,290
B276	3,05	0,31	0,27	211	107	0,290
B277	3,05	0,32	0,30	210	107	0,300
B278	3,05	0,31	0,31	207	107	0,300
B279	2,97	0,32	0,29	206	108	0,285
B280	2,98	0,31	0,16	212	108	0,305
B281	2,99	0,33	0,31	212	108	0,290
B282	2,99	0,29	0,17	212	108	0,290
B283	2,99	0,28	0,11	215	108	0,300
B284	3,00	0,27	0,20	212	108	0,285
B285	3,00	0,32	0,28	209	108	0,290
B286	3,01	0,32	0,31	208	108	0,285
B287	3,01	0,28	0,15	212	108	0,290
B288	3,01	0,28	0,15	213	108	0,290
B289	3,02	0,31	0,30	209	108	0,295
B290	3,03	0,30	0,27	212	108	0,310
B291	3,04	0,31	0,29	211	108	0,290
B292	3,04	0,34	0,28	212	108	0,290
B293	3,04	0,31	0,29	212	108	0,300
B294	3,04	0,32	0,33	209	108	0,305
B295	3,05	0,35	0,31	211	108	0,290
B296	2,97	0,29	0,13	213	108	0,285
B297	2,97	0,33	0,28	206	108	0,285
B298	2,98	0,30	0,15	214	108	0,295

Muestra	Mg (%)	Fe (%)	Si (%)	Rm (MPa)	Rp_{0,2%} (MPa)	n_{4-6%}
B299	2,98	0,30	0,15	213	108	0,295
B300	3,00	0,27	0,20	213	108	0,280
B301	3,00	0,27	0,20	213	108	0,290
B302	3,00	0,32	0,29	212	108	0,290
B303	3,00	0,26	0,24	210	108	0,295
B304	3,03	0,31	0,27	214	108	0,300
B305	3,04	0,34	0,31	208	108	0,285
B306	3,04	0,32	0,12	215	108	0,300
B307	3,05	0,33	0,26	211	108	0,295
B308	2,99	0,29	0,15	214	108	0,275
B309	2,99	0,29	0,17	212	108	0,295
B310	3,01	0,30	0,15	213	108	0,285
B311	3,01	0,30	0,15	212	108	0,290
B312	3,01	0,28	0,15	213	108	0,295
B313	3,02	0,29	0,19	210	108	0,290
B314	3,02	0,30	0,17	214	108	0,295
B315	3,02	0,27	0,11	214	108	0,300
B316	3,02	0,36	0,23	210	108	0,320
B317	3,03	0,30	0,27	211	108	0,295
B318	3,04	0,29	0,25	209	108	0,300
B319	2,97	0,28	0,12	212	108	0,275
B320	2,98	0,33	0,28	209	108	0,270
B321	2,98	0,30	0,27	208	108	0,280
B322	2,98	0,30	0,15	214	108	0,285
B323	2,98	0,33	0,28	211	108	0,285
B324	2,98	0,33	0,26	209	108	0,305
B325	2,99	0,32	0,24	210	108	0,295
B326	2,99	0,35	0,26	209	108	0,295
B327	3,00	0,33	0,25	211	108	0,280
B328	3,00	0,35	0,28	208	108	0,280
B329	3,00	0,35	0,28	208	108	0,280
B330	3,00	0,32	0,27	211	108	0,290
B331	3,00	0,32	0,27	205	108	0,290
B332	3,01	0,32	0,20	214	108	0,285
B333	3,01	0,32	0,27	209	108	0,295
B334	3,01	0,28	0,23	215	108	0,300
B335	3,02	0,32	0,27	212	108	0,290
B336	3,04	0,35	0,28	213	108	0,295
B337	3,04	0,33	0,26	209	108	0,295
B338	3,04	0,33	0,27	213	108	0,295
B339	2,99	0,32	0,25	213	109	0,275
B340	2,99	0,28	0,15	214	109	0,305
B341	3,00	0,31	0,22	209	109	0,285
B342	3,00	0,31	0,22	212	109	0,285
B343	3,01	0,33	0,26	210	109	0,290

Muestra	Mg (%)	Fe (%)	Si (%)	Rm (MPa)	Rp_{0,2%} (MPa)	n_{4-6%}
B344	3,01	0,32	0,31	209	109	0,295
B345	3,02	0,31	0,30	209	109	0,295
B346	3,02	0,31	0,30	210	109	0,295
B347	3,03	0,32	0,19	213	109	0,305
B348	3,04	0,34	0,28	212	109	0,270
B349	3,05	0,35	0,31	211	109	0,290
B350	3,05	0,33	0,27	211	109	0,290
B351	2,97	0,29	0,13	213	109	0,285
B352	2,98	0,31	0,23	209	109	0,290
B353	2,98	0,38	0,25	209	109	0,290
B354	2,98	0,31	0,12	216	109	0,295
B355	2,98	0,30	0,15	216	109	0,300
B356	2,98	0,31	0,23	210	109	0,300
B357	2,99	0,32	0,24	209	109	0,275
B358	3,00	0,26	0,24	209	109	0,285
B359	3,00	0,27	0,20	213	109	0,285
B360	3,00	0,32	0,29	207	109	0,295
B361	3,01	0,32	0,27	209	109	0,285
B362	3,01	0,38	0,28	211	109	0,285
B363	3,02	0,32	0,27	210	109	0,275
B364	3,02	0,32	0,27	211	109	0,280
B365	3,04	0,33	0,26	211	109	0,295
B366	3,05	0,31	0,26	211	109	0,275
B367	3,05	0,31	0,26	211	109	0,280
B368	2,99	0,31	0,26	210	109	0,285
B369	3,00	0,29	0,19	212	109	0,290
B370	3,01	0,30	0,15	214	109	0,300
B371	3,02	0,31	0,30	210	109	0,290
B372	3,02	0,27	0,11	215	109	0,290
B373	3,03	0,28	0,21	214	109	0,295
B374	3,03	0,30	0,27	212	109	0,305
B375	3,04	0,29	0,18	216	109	0,300
B376	3,04	0,29	0,25	209	109	0,305
B377	3,05	0,32	0,28	211	109	0,285
B378	2,98	0,33	0,28	209	109	0,280
B379	2,98	0,30	0,15	213	109	0,290
B380	2,98	0,30	0,15	213	109	0,290
B381	2,98	0,31	0,12	216	109	0,290
B382	2,98	0,31	0,23	211	109	0,295
B383	3,01	0,34	0,30	210	109	0,265
B384	3,01	0,29	0,13	215	109	0,295
B385	3,01	0,32	0,27	209	109	0,300
B386	3,02	0,32	0,25	210	109	0,285
B387	3,03	0,33	0,24	212	109	0,285
B388	3,03	0,30	0,17	215	109	0,290

Muestra	Mg (%)	Fe (%)	Si (%)	Rm (MPa)	Rp_{0,2%} (MPa)	n_{4-6%}
B389	2,97	0,33	0,14	213	110	0,280
B390	2,98	0,32	0,23	213	110	0,290
B391	3,00	0,31	0,27	213	110	0,285
B392	3,00	0,31	0,28	208	110	0,290
B393	3,00	0,27	0,18	211	110	0,290
B394	3,00	0,31	0,28	208	110	0,300
B395	3,01	0,31	0,16	214	110	0,285
B396	3,01	0,32	0,19	214	110	0,300
B397	3,02	0,32	0,25	211	110	0,295
B398	3,02	0,34	0,23	212	110	0,295
B399	3,04	0,34	0,28	210	110	0,280
B400	3,04	0,32	0,33	209	110	0,285
B401	2,97	0,36	0,26	210	110	0,295
B402	2,98	0,31	0,26	214	110	0,290
B403	2,98	0,31	0,23	210	110	0,290
B404	2,99	0,35	0,25	210	110	0,295
B405	3,01	0,30	0,28	210	110	0,275
B406	3,02	0,35	0,26	211	110	0,280
B407	3,02	0,31	0,23	213	110	0,285
B408	3,02	0,32	0,25	210	110	0,285
B409	3,02	0,34	0,26	214	110	0,285
B410	3,02	0,35	0,26	215	110	0,300
B411	3,03	0,31	0,27	212	110	0,270
B412	3,03	0,30	0,26	211	110	0,280
B413	3,03	0,31	0,24	213	110	0,290
B414	3,04	0,34	0,30	212	110	0,285
B415	3,04	0,31	0,27	210	110	0,290
B416	3,04	0,33	0,27	213	110	0,300
B417	3,05	0,31	0,26	213	110	0,290
B418	3,05	0,31	0,31	210	110	0,290
B419	2,98	0,30	0,13	213	110	0,285
B420	2,99	0,33	0,25	213	110	0,280
B421	3,00	0,31	0,27	214	110	0,285
B422	3,01	0,34	0,28	210	110	0,280
B423	3,03	0,30	0,15	214	110	0,295
B424	3,04	0,32	0,33	209	110	0,270
B425	3,04	0,29	0,25	210	110	0,305
B426	3,05	0,33	0,27	212	110	0,285
B427	3,05	0,31	0,20	214	110	0,290
B428	2,98	0,31	0,12	215	110	0,290
B429	2,99	0,35	0,26	211	110	0,280
B430	2,99	0,35	0,25	212	110	0,290
B431	2,99	0,34	0,28	210	110	0,295
B432	3,00	0,31	0,19	213	110	0,280
B433	3,00	0,32	0,27	210	110	0,285

Muestra	Mg (%)	Fe (%)	Si (%)	Rm (MPa)	Rp_{0,2%} (MPa)	n_{4-6%}
B434	3,00	0,32	0,29	207	110	0,285
B435	3,00	0,31	0,16	214	110	0,290
B436	3,01	0,32	0,27	209	110	0,290
B437	3,02	0,32	0,25	211	110	0,290
B438	3,03	0,30	0,17	212	110	0,290
B439	3,04	0,34	0,31	209	110	0,280
B440	3,05	0,31	0,26	211	110	0,280
B441	2,98	0,33	0,19	212	111	0,270
B442	2,98	0,33	0,19	212	111	0,285
B443	2,98	0,31	0,16	212	111	0,285
B444	2,98	0,33	0,19	213	111	0,295
B445	2,98	0,32	0,23	213	111	0,295
B446	2,99	0,33	0,25	212	111	0,275
B447	2,99	0,31	0,27	211	111	0,275
B448	2,99	0,28	0,11	216	111	0,300
B449	3,01	0,33	0,26	209	111	0,275
B450	3,02	0,31	0,30	209	111	0,275
B451	3,05	0,35	0,29	214	111	0,295
B452	3,05	0,35	0,29	213	111	0,300
B453	2,97	0,36	0,26	210	111	0,270
B454	2,97	0,28	0,12	213	111	0,280
B455	2,98	0,31	0,12	216	111	0,300
B456	2,99	0,31	0,26	209	111	0,270
B457	2,99	0,31	0,27	207	111	0,275
B458	3,00	0,31	0,19	213	111	0,280
B459	3,01	0,31	0,21	214	111	0,300
B460	3,02	0,34	0,26	212	111	0,290
B461	3,02	0,32	0,27	212	111	0,295
B462	3,03	0,33	0,24	212	111	0,285
B463	3,03	0,36	0,26	213	111	0,295
B464	3,04	0,32	0,12	215	111	0,290
B465	3,05	0,29	0,20	215	111	0,275
B466	2,98	0,27	0,11	213	111	0,285
B467	2,98	0,32	0,28	214	111	0,290
B468	2,98	0,32	0,23	212	111	0,295
B469	2,99	0,33	0,25	213	111	0,285
B470	3,00	0,31	0,22	211	111	0,280
B471	3,01	0,33	0,26	209	111	0,260
B472	3,01	0,31	0,16	213	111	0,290
B473	3,01	0,34	0,28	212	111	0,290
B474	3,02	0,36	0,23	210	111	0,270
B475	3,02	0,25	0,13	217	111	0,285
B476	3,02	0,33	0,15	215	111	0,295
B477	3,03	0,33	0,26	212	111	0,280
B478	3,03	0,26	0,15	213	111	0,285

Muestra	Mg (%)	Fe (%)	Si (%)	Rm (MPa)	Rp_{0,2%} (MPa)	n_{4-6%}
B479	3,03	0,33	0,26	213	111	0,290
B480	3,03	0,33	0,26	211	111	0,290
B481	3,05	0,35	0,27	216	111	0,300
B482	2,99	0,31	0,26	208	111	0,270
B483	3,00	0,27	0,20	212	111	0,290
B484	3,00	0,32	0,27	209	111	0,295
B485	3,01	0,34	0,30	212	111	0,275
B486	3,01	0,31	0,26	210	111	0,280
B487	3,02	0,32	0,27	214	111	0,285
B488	3,03	0,30	0,26	211	111	0,270
B489	3,03	0,34	0,27	213	111	0,285
B490	3,04	0,31	0,27	211	111	0,280
B491	3,04	0,34	0,30	210	111	0,280
B492	3,05	0,33	0,26	212	111	0,290
B493	2,98	0,32	0,28	214	112	0,285
B494	2,98	0,32	0,23	212	112	0,295
B495	2,99	0,29	0,15	214	112	0,270
B496	2,99	0,28	0,15	215	112	0,275
B497	2,99	0,32	0,30	211	112	0,295
B498	2,99	0,32	0,30	211	112	0,300
B499	3,00	0,31	0,22	211	112	0,285
B500	3,01	0,32	0,31	211	112	0,275
B501	3,02	0,25	0,13	218	112	0,285
B502	3,02	0,25	0,13	218	112	0,290
B503	3,02	0,30	0,24	212	112	0,290
B504	3,02	0,34	0,23	215	112	0,290
B505	3,04	0,30	0,26	213	112	0,285
B506	3,05	0,35	0,27	216	112	0,300
B507	2,98	0,31	0,26	213	112	0,285
B508	2,98	0,31	0,26	212	112	0,300
B509	2,99	0,34	0,28	211	112	0,290
B510	3,01	0,34	0,30	212	112	0,295
B511	3,01	0,35	0,27	216	112	0,300
B512	3,01	0,35	0,27	216	112	0,300
B513	3,02	0,34	0,26	214	112	0,290
B514	3,03	0,28	0,25	212	112	0,275
B515	3,04	0,35	0,28	214	112	0,280
B516	3,05	0,32	0,30	209	112	0,280
B517	2,98	0,31	0,16	212	112	0,280
B518	2,99	0,33	0,31	213	112	0,295
B519	3,02	0,36	0,23	210	112	0,270
B520	3,02	0,31	0,30	210	112	0,270
B521	3,02	0,31	0,30	210	112	0,285
B522	3,02	0,34	0,23	212	112	0,285
B523	3,02	0,30	0,24	213	112	0,290

Muestra	Mg (%)	Fe (%)	Si (%)	Rm (MPa)	Rp_{0,2%} (MPa)	n_{4-6%}
B524	3,04	0,31	0,25	218	112	0,295
B525	2,97	0,29	0,13	213	112	0,290
B526	2,98	0,32	0,29	211	112	0,290
B527	3,00	0,30	0,21	213	112	0,290
B528	3,01	0,28	0,23	214	112	0,280
B529	3,01	0,38	0,28	213	112	0,285
B530	3,02	0,31	0,23	213	112	0,285
B531	3,03	0,28	0,25	213	112	0,280
B532	3,05	0,31	0,27	212	112	0,285
B533	3,05	0,33	0,27	212	112	0,300
B534	2,97	0,38	0,32	209	113	0,285
B535	2,98	0,34	0,23	211	113	0,285
B536	3,00	0,40	0,26	213	113	0,265
B537	3,00	0,30	0,23	211	113	0,290
B538	3,04	0,32	0,33	209	113	0,280
B539	2,97	0,28	0,12	214	113	0,285
B540	3,01	0,34	0,27	214	113	0,285
B541	3,02	0,31	0,22	210	113	0,280
B542	3,03	0,36	0,26	214	113	0,290
B543	3,04	0,34	0,30	213	113	0,295
B544	3,05	0,33	0,26	210	113	0,280
B545	2,97	0,38	0,32	209	113	0,285
B546	2,99	0,31	0,27	212	113	0,270
B547	2,99	0,32	0,25	214	113	0,270
B548	3,00	0,31	0,27	214	113	0,275
B549	3,00	0,27	0,20	212	113	0,275
B550	3,02	0,33	0,15	214	113	0,280
B551	3,04	0,24	0,12	216	113	0,300
B552	3,05	0,33	0,27	213	113	0,290
B553	3,05	0,31	0,20	216	113	0,300
B554	3,03	0,31	0,27	213	113	0,265
B555	3,01	0,31	0,16	211	114	0,285
B556	3,02	0,29	0,19	211	114	0,285
B557	3,02	0,32	0,25	212	114	0,295
B558	3,03	0,30	0,15	214	114	0,280
B559	3,03	0,33	0,26	212	114	0,285
B560	3,04	0,30	0,26	214	114	0,295
B561	2,97	0,29	0,13	214	114	0,290
B562	2,99	0,35	0,26	210	114	0,280
B563	3,00	0,32	0,29	213	114	0,265
B564	3,01	0,32	0,27	211	114	0,280
B565	3,02	0,30	0,24	215	114	0,270
B566	3,02	0,36	0,30	212	114	0,290
B567	3,03	0,30	0,17	214	114	0,270
B568	3,03	0,34	0,27	213	114	0,290

Muestra	Mg (%)	Fe (%)	Si (%)	Rm (MPa)	Rp_{0,2%} (MPa)	n_{4-6%}
B569	2,98	0,34	0,23	213	114	0,285
B570	2,99	0,31	0,27	212	114	0,280
B571	2,99	0,29	0,15	217	114	0,280
B572	2,99	0,29	0,15	218	114	0,285
B573	3,00	0,31	0,27	217	114	0,270
B574	3,01	0,32	0,19	212	114	0,265
B575	3,01	0,30	0,15	214	114	0,275
B576	3,04	0,31	0,25	215	114	0,275
B577	3,05	0,31	0,20	216	114	0,280
B578	3,05	0,31	0,20	215	114	0,290
B579	2,97	0,29	0,13	215	114	0,280
B580	2,99	0,31	0,27	210	114	0,275
B581	3,02	0,35	0,26	213	114	0,270
B582	2,97	0,33	0,14	216	115	0,275
B583	2,98	0,32	0,28	215	115	0,290
B584	2,99	0,31	0,26	210	115	0,260
B585	2,99	0,29	0,15	220	115	0,290
B586	3,00	0,27	0,20	216	115	0,280
B587	3,03	0,30	0,15	215	115	0,280
B588	3,03	0,33	0,26	214	115	0,300
B589	3,05	0,33	0,27	212	115	0,295
B590	2,99	0,30	0,23	214	115	0,270
B591	3,00	0,31	0,16	211	115	0,275
B592	3,02	0,33	0,26	214	115	0,280
B593	2,98	0,32	0,28	214	115	0,280
B594	2,99	0,28	0,11	216	115	0,270
B595	3,04	0,28	0,22	217	115	0,280
B596	3,03	0,34	0,27	212	115	0,280
B597	3,03	0,34	0,27	213	115	0,280
B598	3,04	0,35	0,28	215	115	0,280
B599	3,05	0,33	0,26	207	115	0,265
B600	2,98	0,34	0,23	212	116	0,290
B601	3,01	0,28	0,15	213	116	0,275
B602	3,04	0,30	0,26	213	116	0,270
B603	3,01	0,37	0,27	214	116	0,285
B604	3,02	0,30	0,24	216	116	0,280
B605	2,98	0,34	0,23	214	116	0,285
B606	2,99	0,32	0,30	212	116	0,285
B607	3,00	0,32	0,29	213	116	0,260
B608	3,02	0,36	0,30	213	116	0,280
B609	2,97	0,33	0,14	214	117	0,260
B610	3,01	0,34	0,28	217	117	0,270
B611	3,04	0,31	0,25	217	117	0,270
B612	3,04	0,34	0,28	217	117	0,280
B613	3,01	0,37	0,27	215	117	0,280

Muestra	Mg (%)	Fe (%)	Si (%)	Rm (MPa)	Rp_{0,2%} (MPa)	n_{4-6%}
B614	2,99	0,32	0,25	214	117	0,275
B615	3,04	0,31	0,25	216	117	0,265
B616	3,01	0,34	0,27	215	117	0,280
B617	3,03	0,31	0,24	213	117	0,260
B618	3,03	0,26	0,15	216	118	0,290
B619	3,04	0,35	0,28	213	118	0,275
B620	3,05	0,33	0,27	214	118	0,290
B621	3,03	0,28	0,21	214	118	0,265
B622	3,04	0,28	0,22	220	118	0,285
B623	3,02	0,36	0,30	212	118	0,285
B624	3,03	0,28	0,21	214	119	0,270
B625	3,04	0,28	0,22	219	119	0,270
B626	3,01	0,34	0,27	215	119	0,280
B627	3,04	0,35	0,28	216	119	0,270
B628	3,03	0,31	0,24	213	119	0,270
B629	3,04	0,35	0,28	214	120	0,275

Anexo C

Selección de 14 chapas de 9 mm de espesor de Aludium de la aleación AA5754 en estado recocido total que no han sufrido laminación en frío, junto con sus contenidos de Mg, Fe y Si y sus valores de Conductividad, Resistencia Mecánica (Rm) y Límite Elástico (Rp_{0,2}). Los contenidos de composición han sido medidos por los laboratorios normalizados de los departamentos de Calidad de Aludium Transformación de Productos. Los valores de CCMM y de conductividad se han obtenido en Cindal con el material y los métodos expuestos en el apartado de Material y Métodos de esta tesis.

Tabla C1

Muestra	Mg (%)	Fe (%)	Si (%)	Conductividad (mS/m)	Rm (MPa)	Rp_{0,2} (MPa)
C1	3,08	0,31	0,17	19,06 ± 0,03	219	122
C2	3,03	0,32	0,19	19,37 ± 0,01	211	107
C3	3,05	0,31	0,2	19,34 ± 0,01	216	113
C4	3,00	0,30	0,21	19,60 ± 0,01	213	112
C5	2,98	0,32	0,23	19,63 ± 0,01	213	110
C6	3,02	0,30	0,24	19,49 ± 0,00	213	112
C7	3,03	0,33	0,24	19,74 ± 0,03	211	105
C8	3,08	0,31	0,25	19,85 ± 0,02	210	108
C9	3,09	0,30	0,27	19,64 ± 0,01	209	109
C10	3,09	0,32	0,28	19,73 ± 0,01	209	112
C11	3,04	0,31	0,29	20,04 ± 0,03	211	108
C12	3,02	0,31	0,3	19,65 ± 0,01	207	105
C13	3,01	0,32	0,31	19,82 ± 0,01	208	108
C14	2,95	0,30	0,33	19,93 ± 0,01	206	106

Anexo D

Se presentan las gráficas de las figuras 23, 24, 25 26 27 28, 29, 40, 41, 52 a un tamaño aumentado, identificándolas según en que figura se encuentran, en que fila de esta figura (siendo la fila superior la fila 1) y si están en la columna de la izquierda o en la columna de la derecha.

Figura 23: Datos de Resistencia Mecánica y Límite Elástico medidos frente a datos predichos mediante las regresiones individuales en el Grupo de Muestras A.

Figura 23, fila 1, Izquierda:

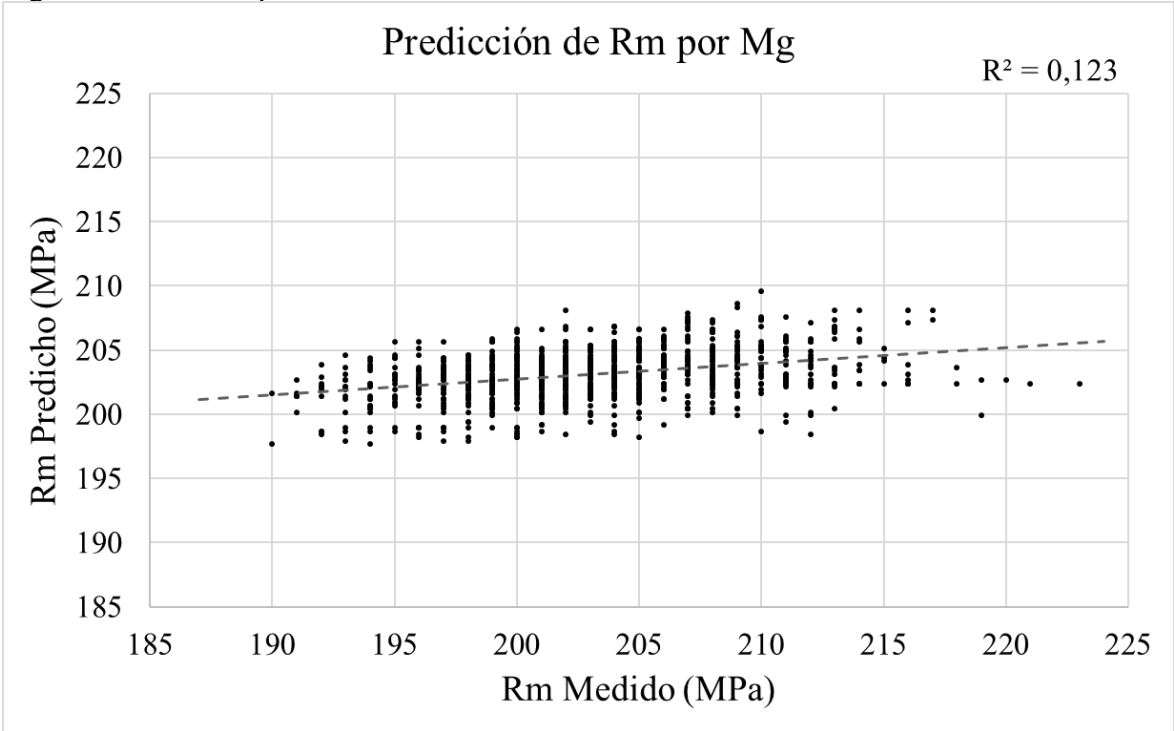


Figura 23, fila 1, Derecha

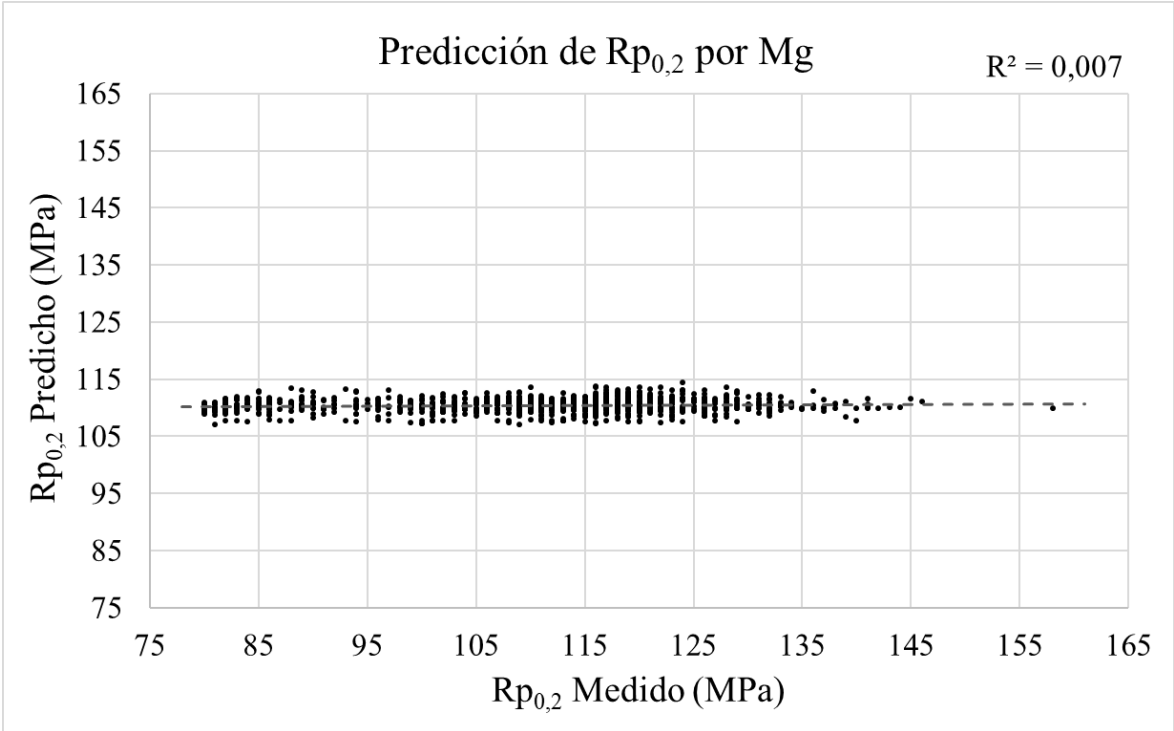


Figura 23, fila 2, Izquierda:

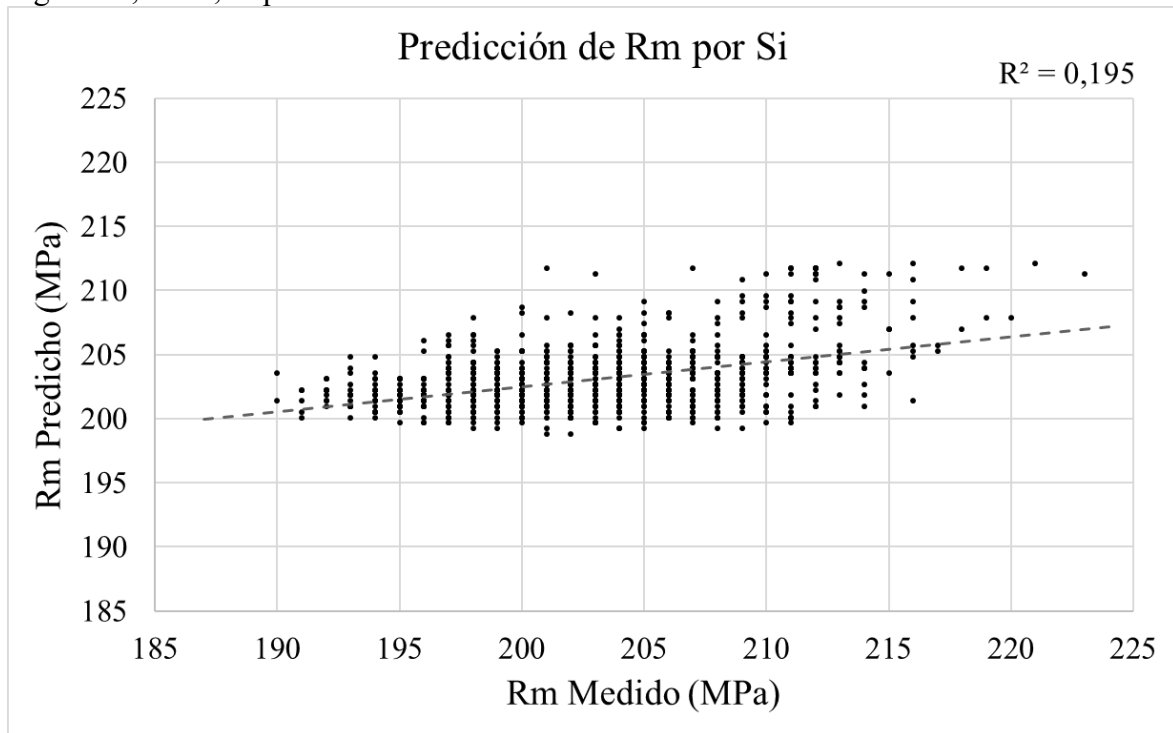


Figura 23, fila 2, Derecha:

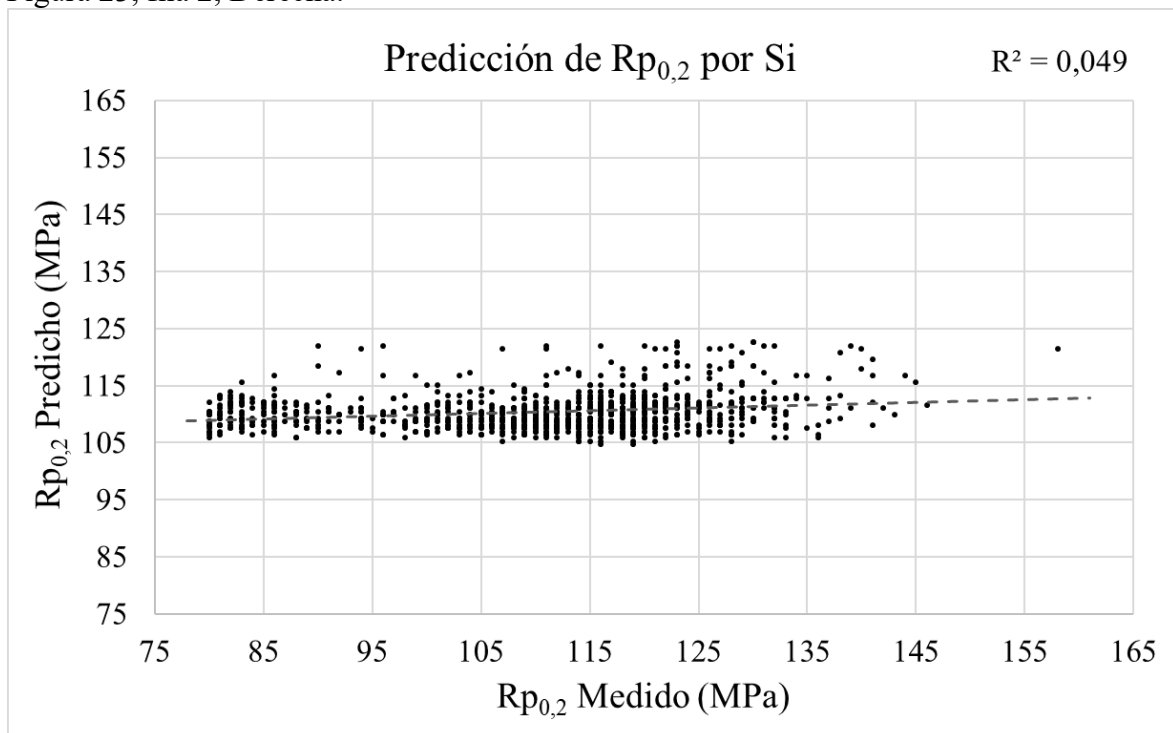


Figura 23, fila 3, Izquierda:

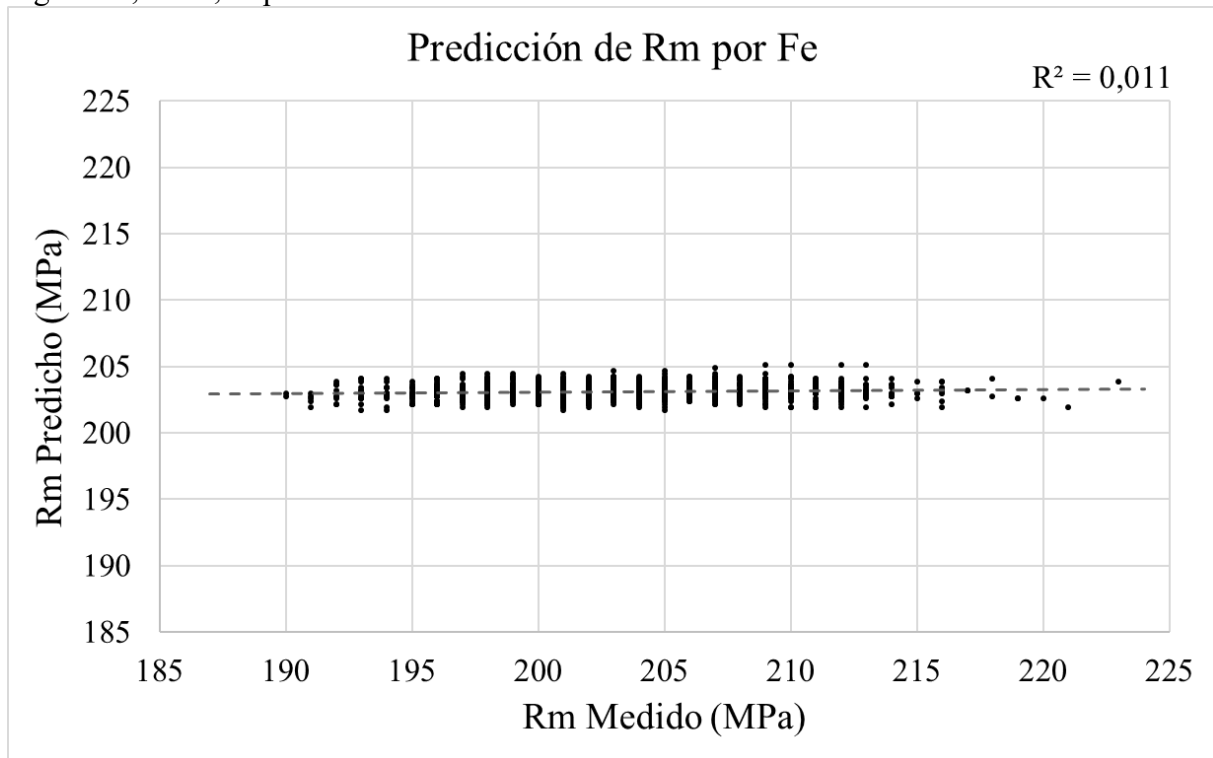


Figura 23, fila 3, Derecha:

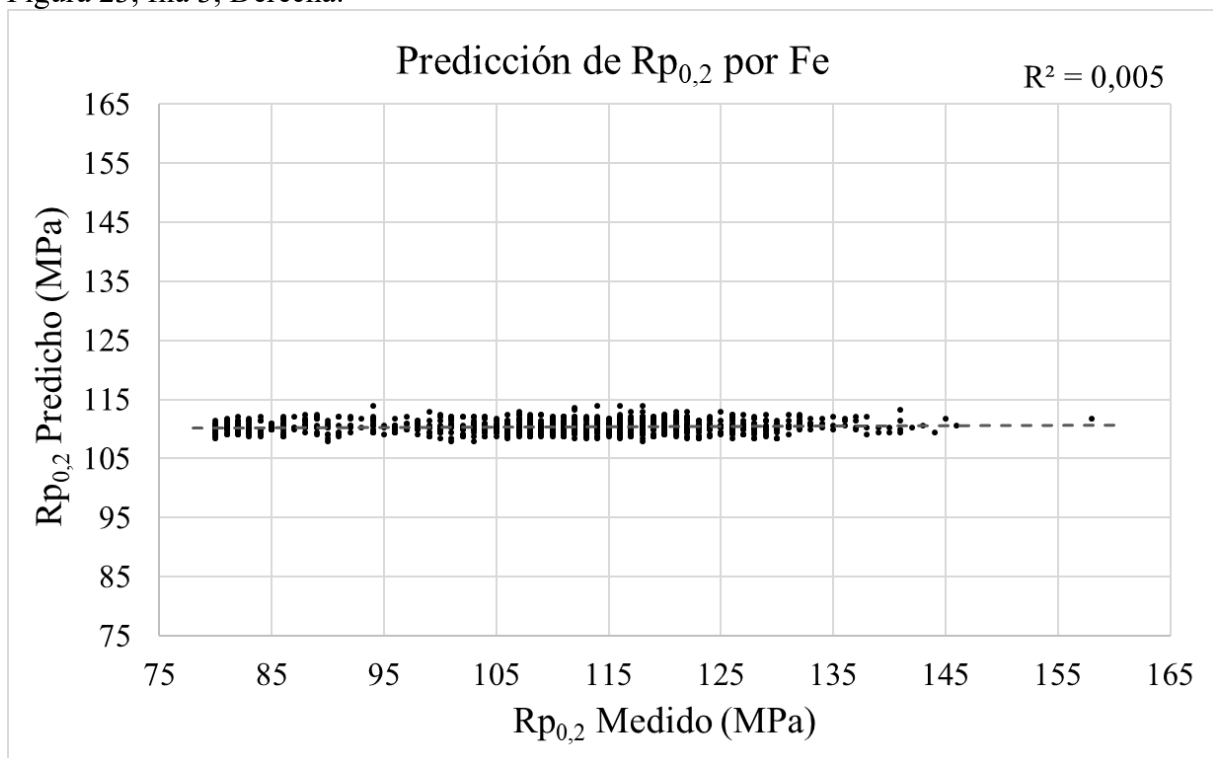


Figura 23, fila 4, Izquierda:

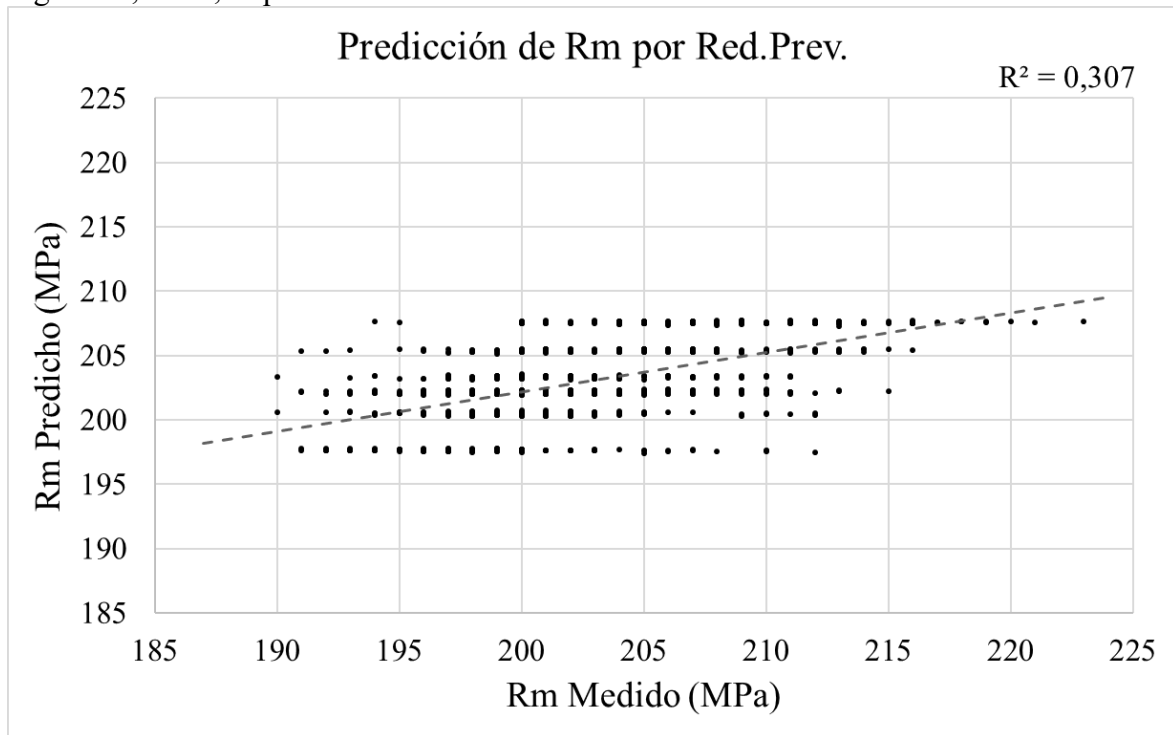


Figura 23, fila 4, Derecha:

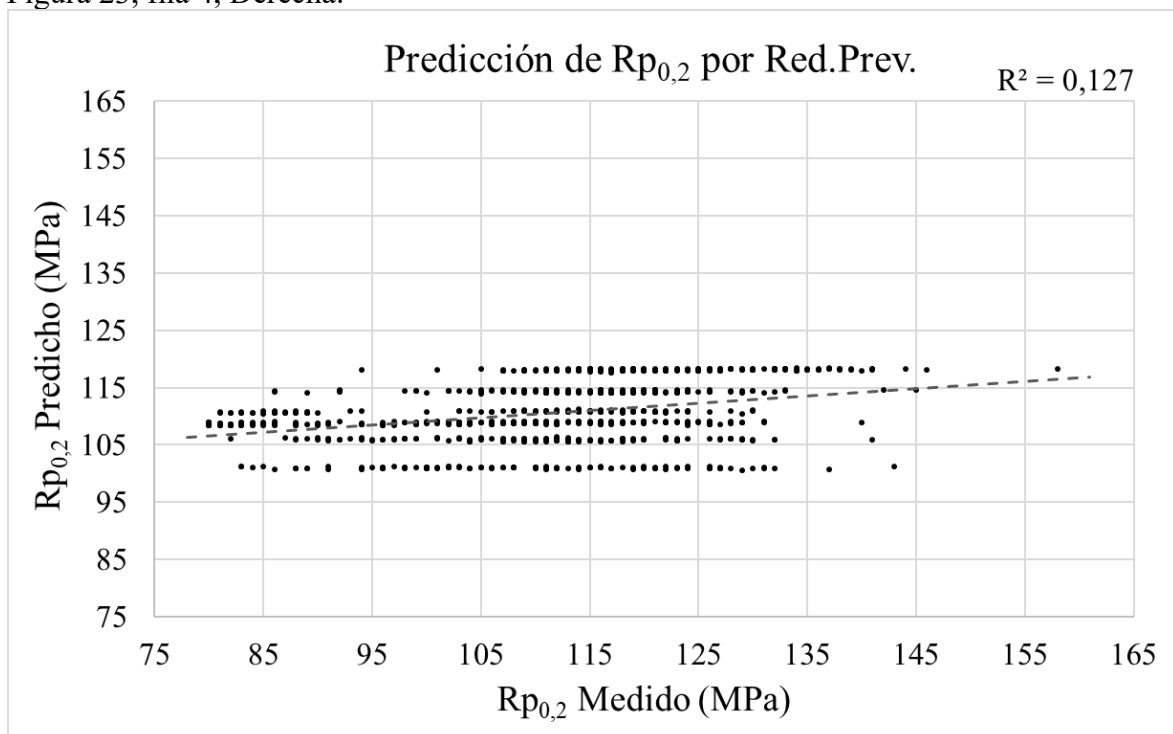


Figura 24: Relación del contenido de Fe con la Resistencia Mecánica y el Límite Elástico en los datos del Grupo de Muestras A.

Figura 24, fila 1, Izquierda:

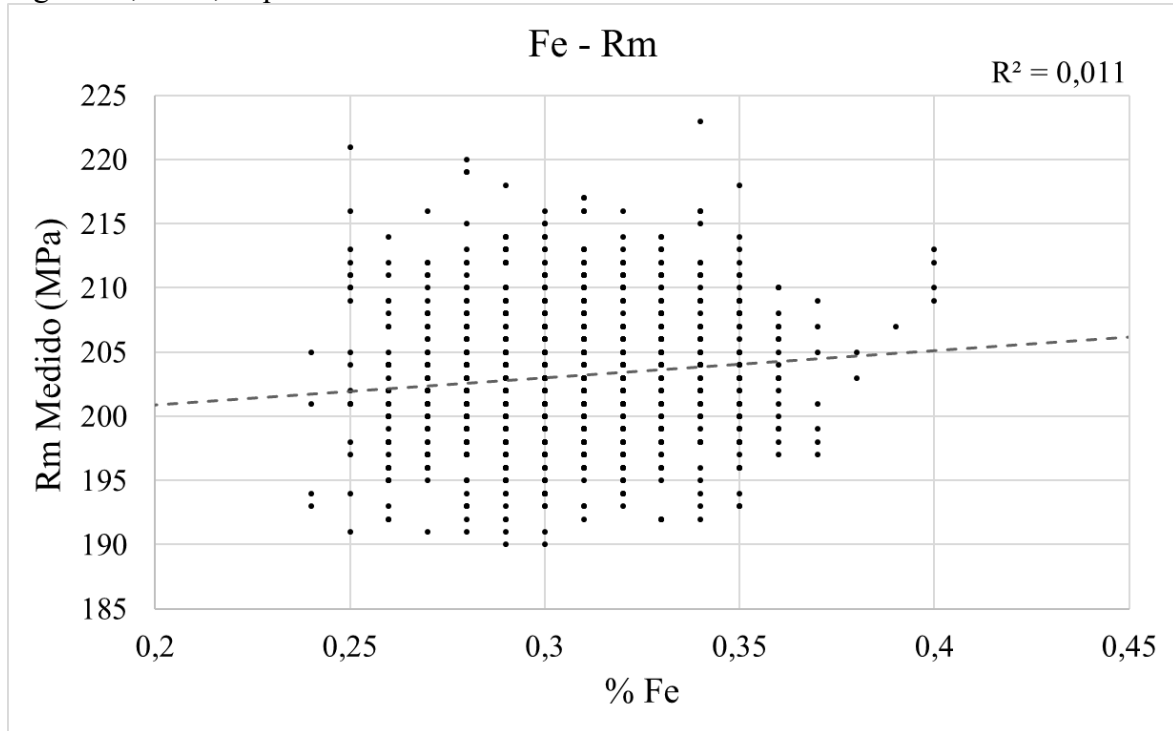


Figura 24, fila 1, Derecha:

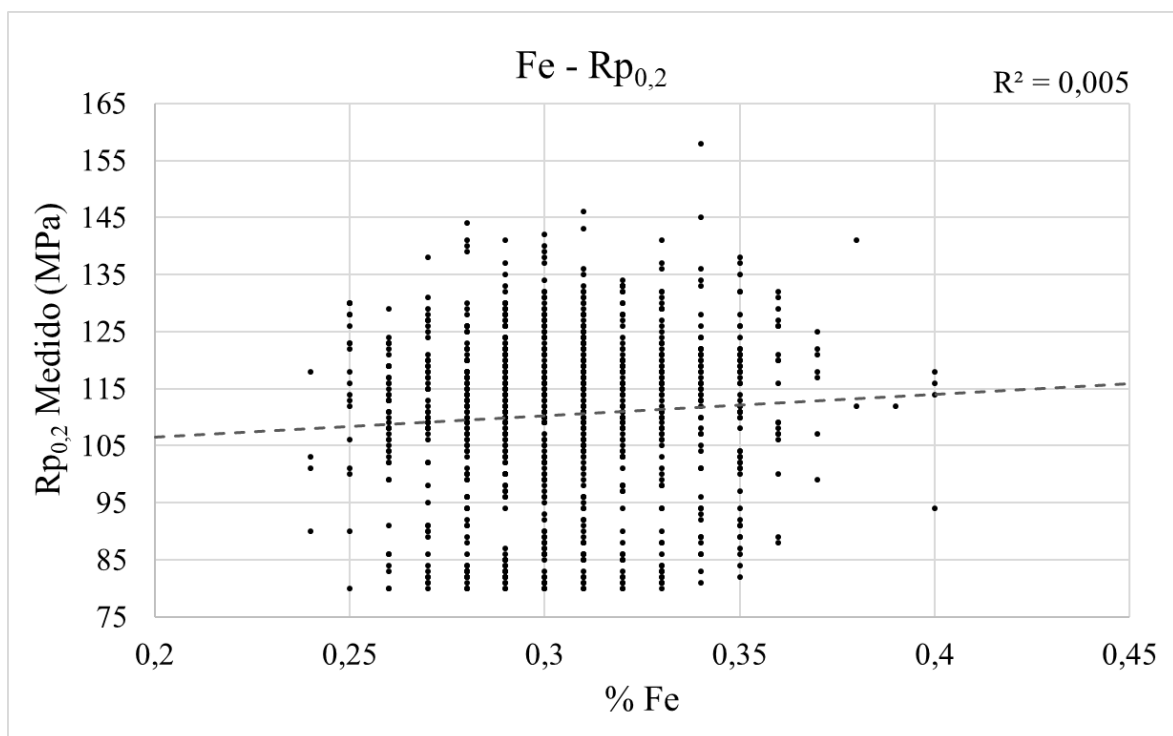


Figura 25: Datos de Resistencia Mecánica y Límite Elástico medidos frente a datos predichos por la regresión con Mg y Si.

Figura 25, fila 1, Izquierda:

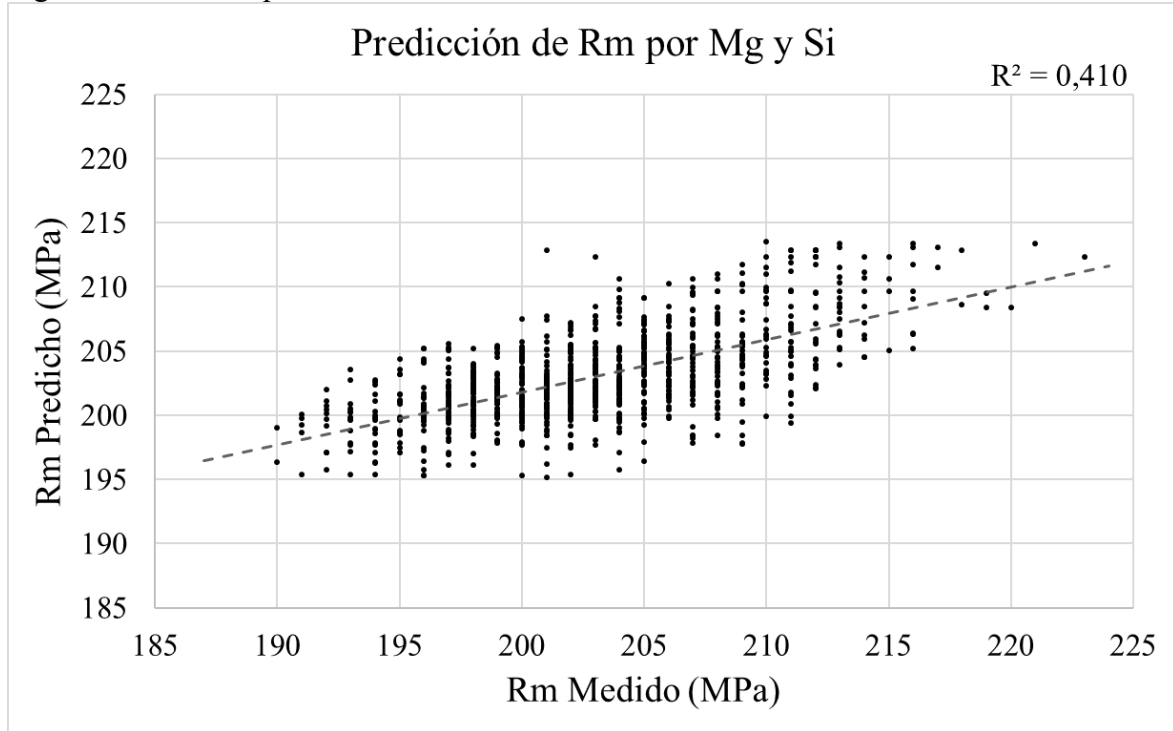


Figura 25, fila 1, Derecha:

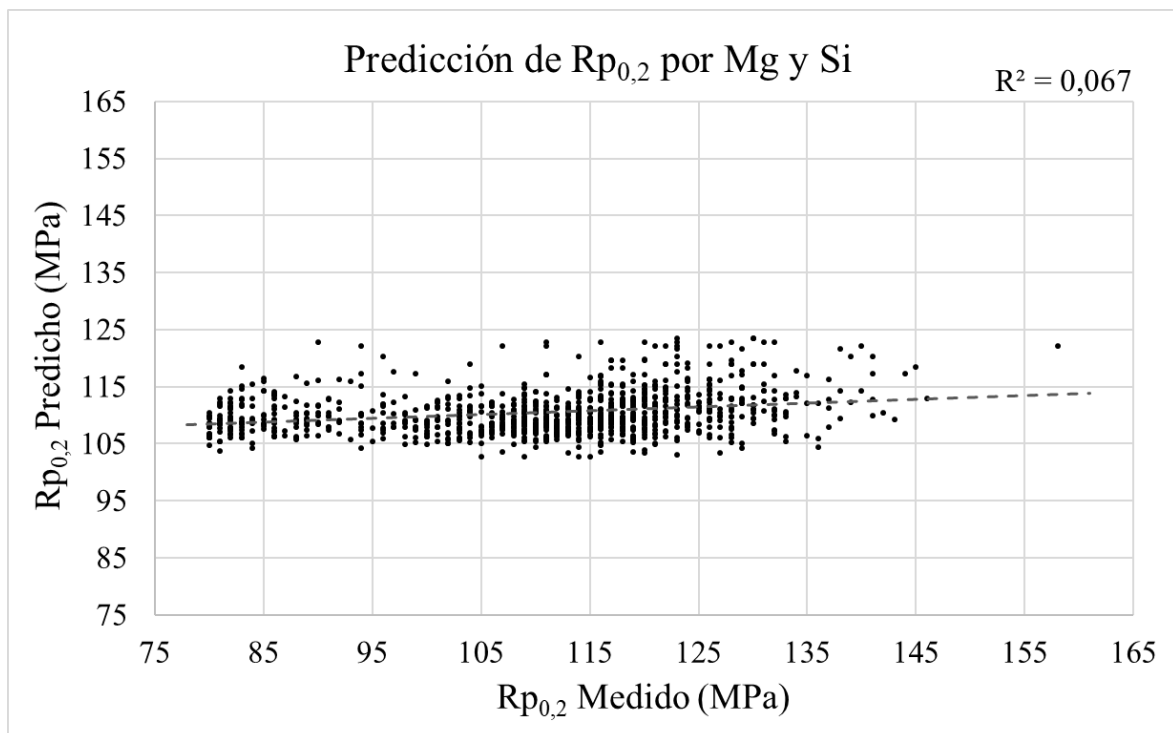


Figura 26: Datos de Resistencia Mecánica y Límite Elástico medidos frente a datos predichos por la regresión con Mg, Si y Fe.

Figura 26, fila 1, Izquierda:

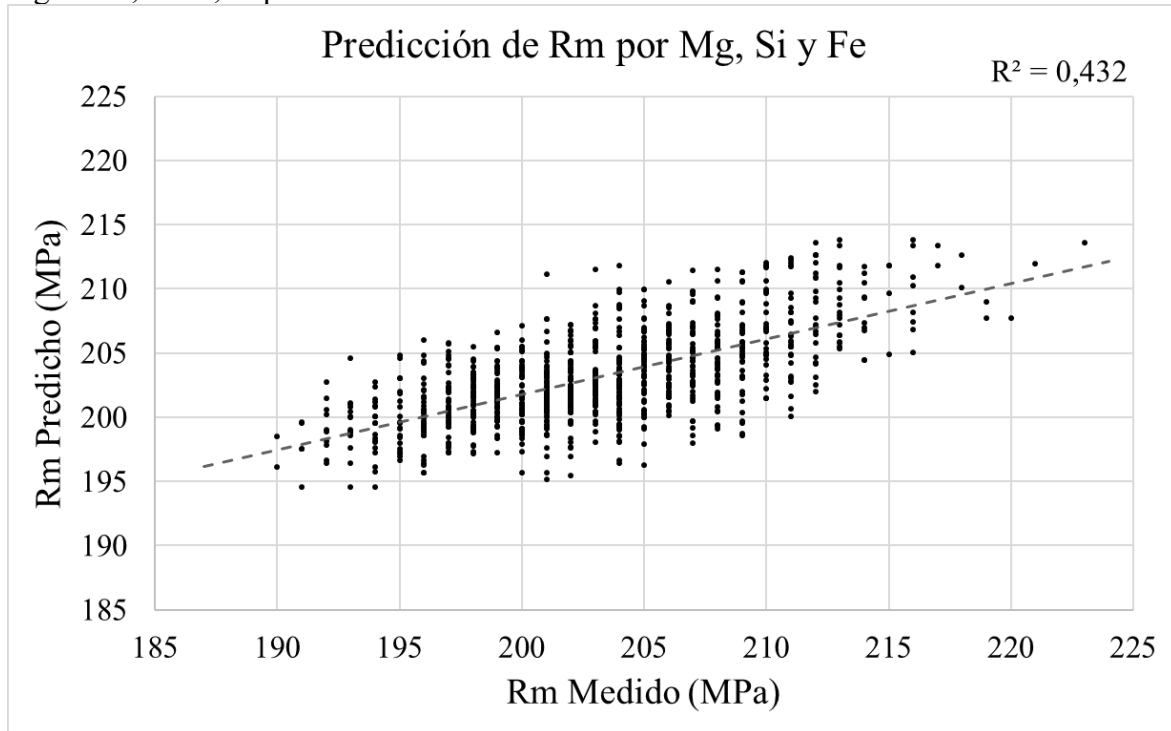


Figura 26, fila 1, Derecha:

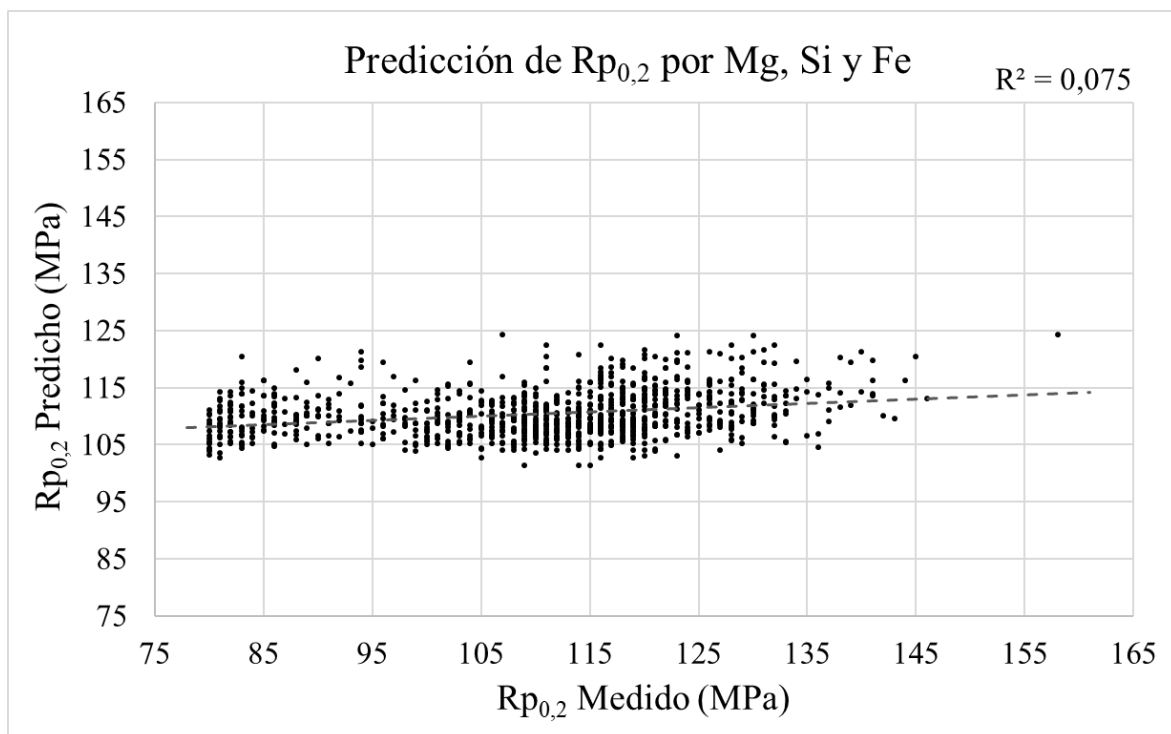


Figura 27: Relación entre la cantidad de reducción previa al recocido y el efecto del Fe en la Resistencia Mecánica y el Límite Elástico.

Figura 27, fila 1, Izquierda:

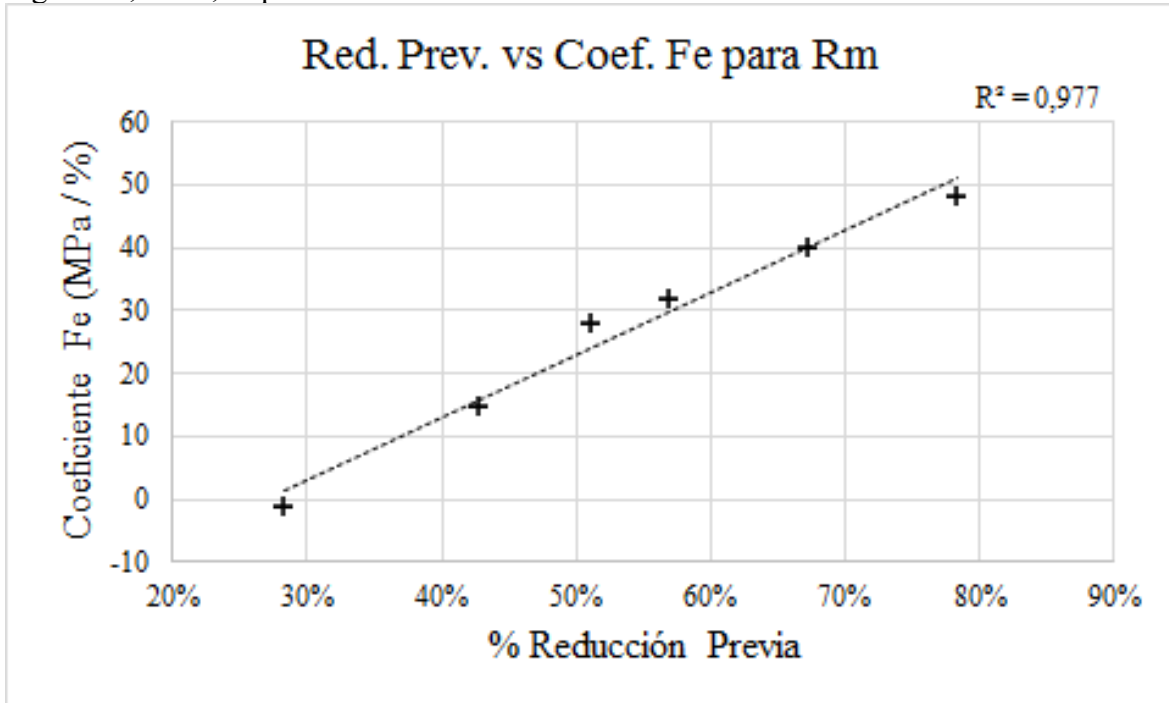


Figura 27, fila 1, Derecha:

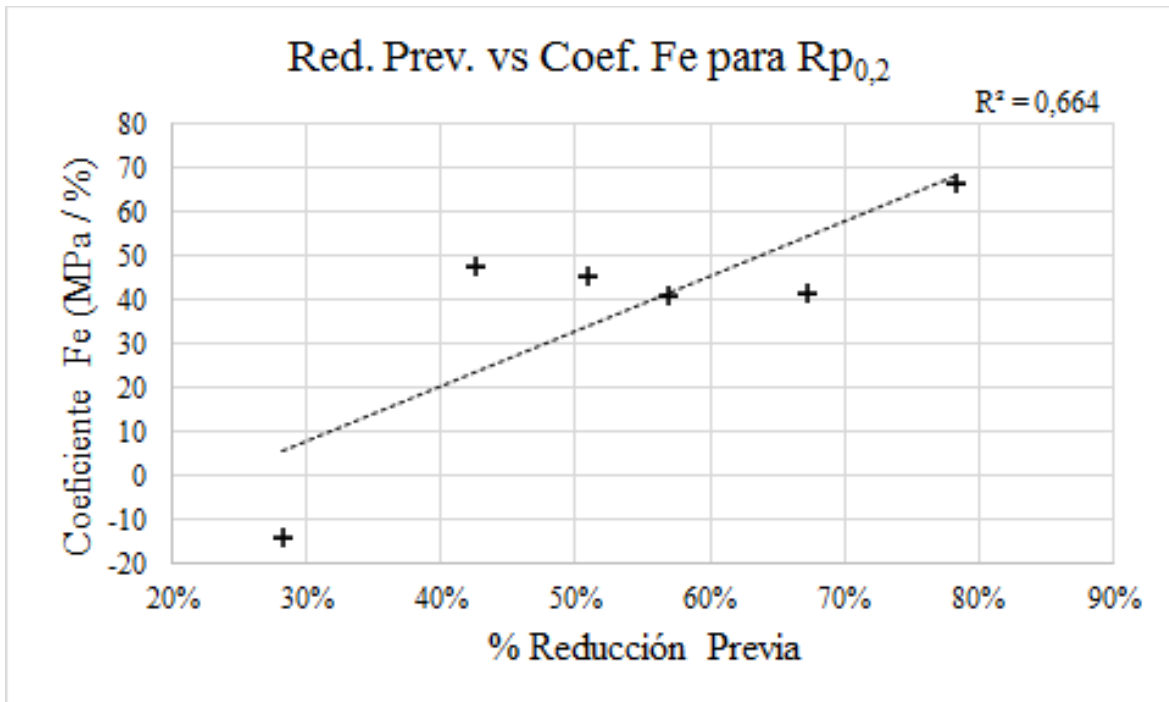


Figura 27, fila 2, Izquierda:

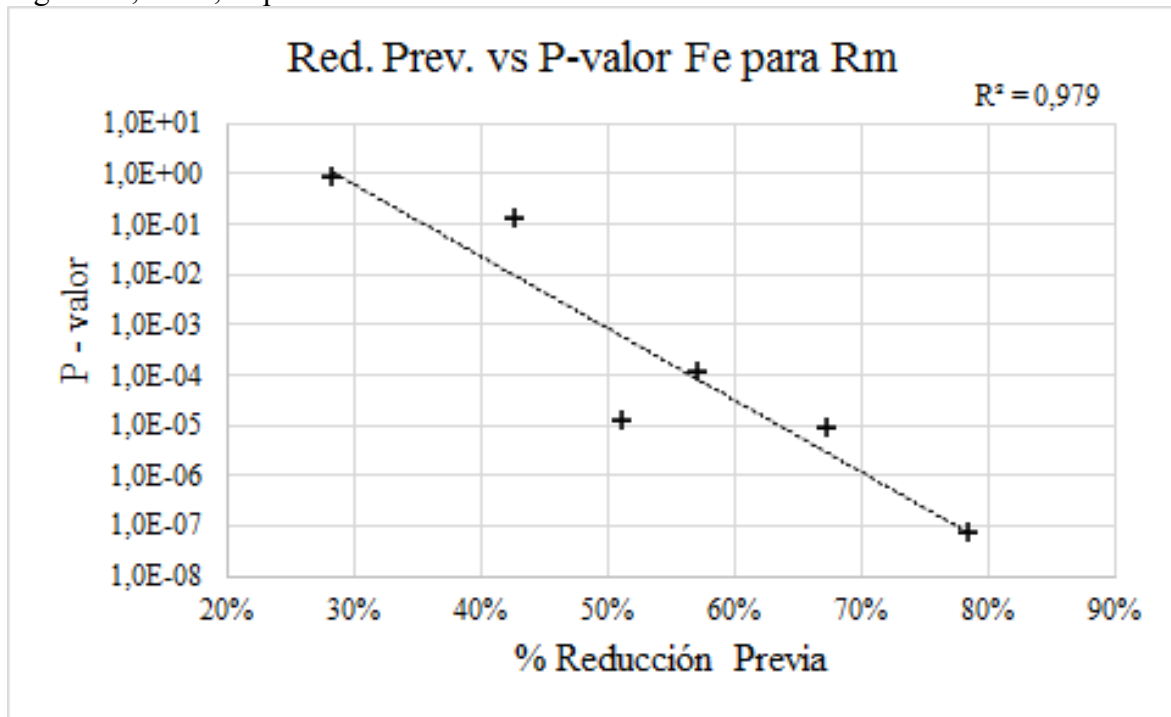


Figura 27, fila 2, Derecha:

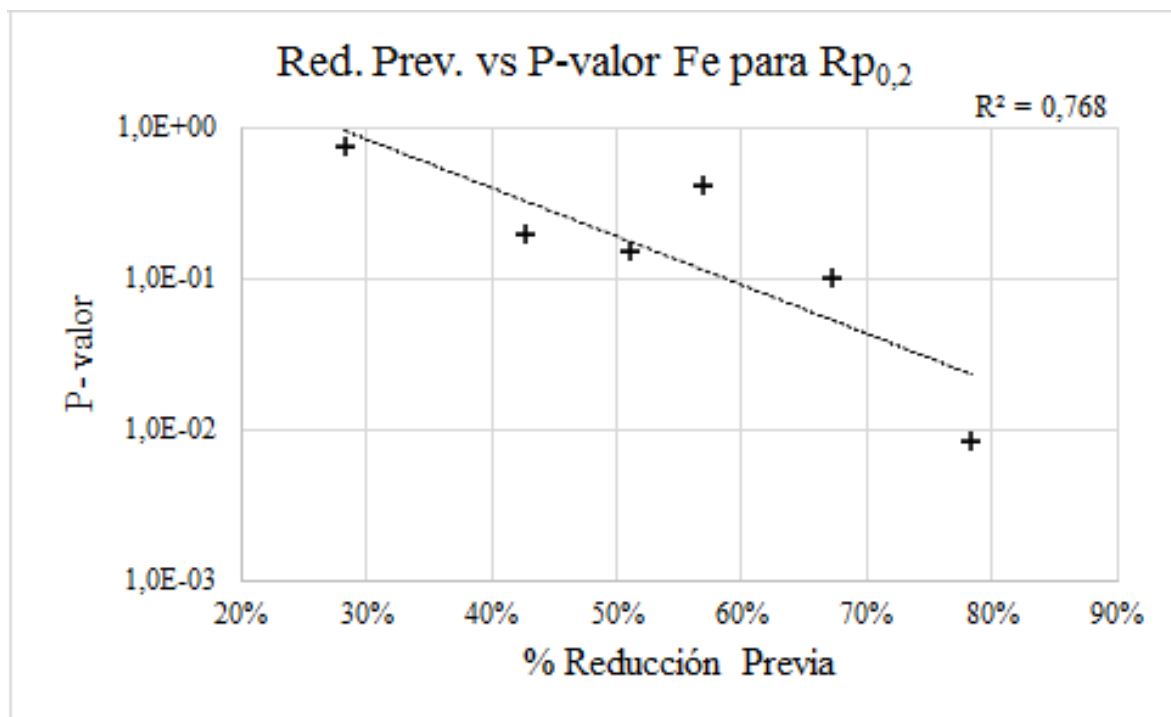


Figura 28: Datos de Resistencia Mecánica y Límite Elástico medidos frente a datos predichos por la regresión con Fe*RedP como variable independiente.

Figura 28, fila 1, Izquierda:

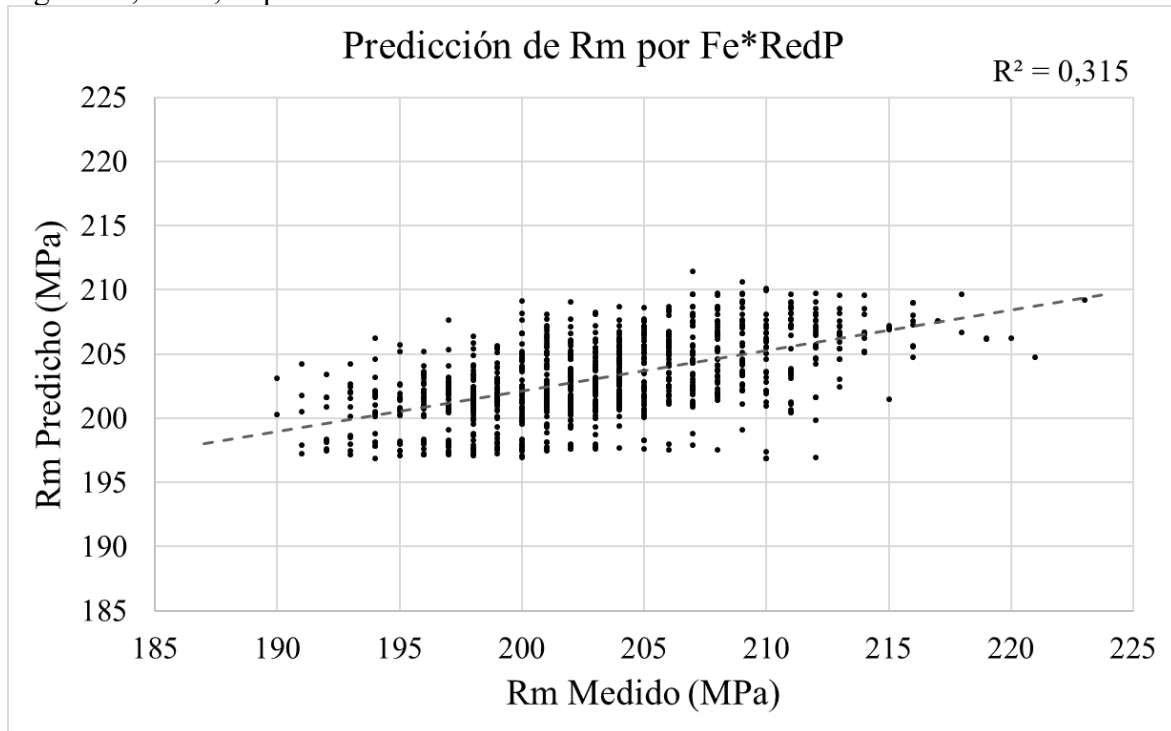


Figura 28, fila 1, Derecha:

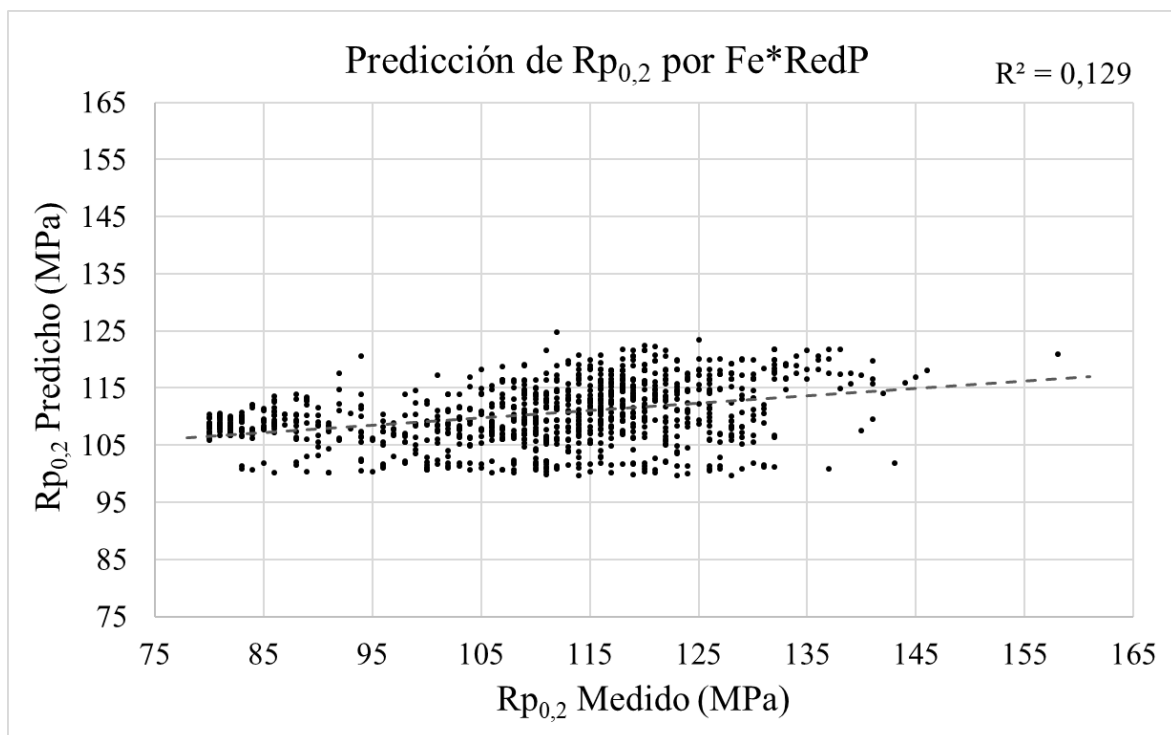


Figura 29: Datos de Resistencia Mecánica y Límite Elástico medidos frente a datos predichos por la regresión con Si, Mg y Fe*RedP como variables independientes.

Figura 29, fila 1, Izquierda:

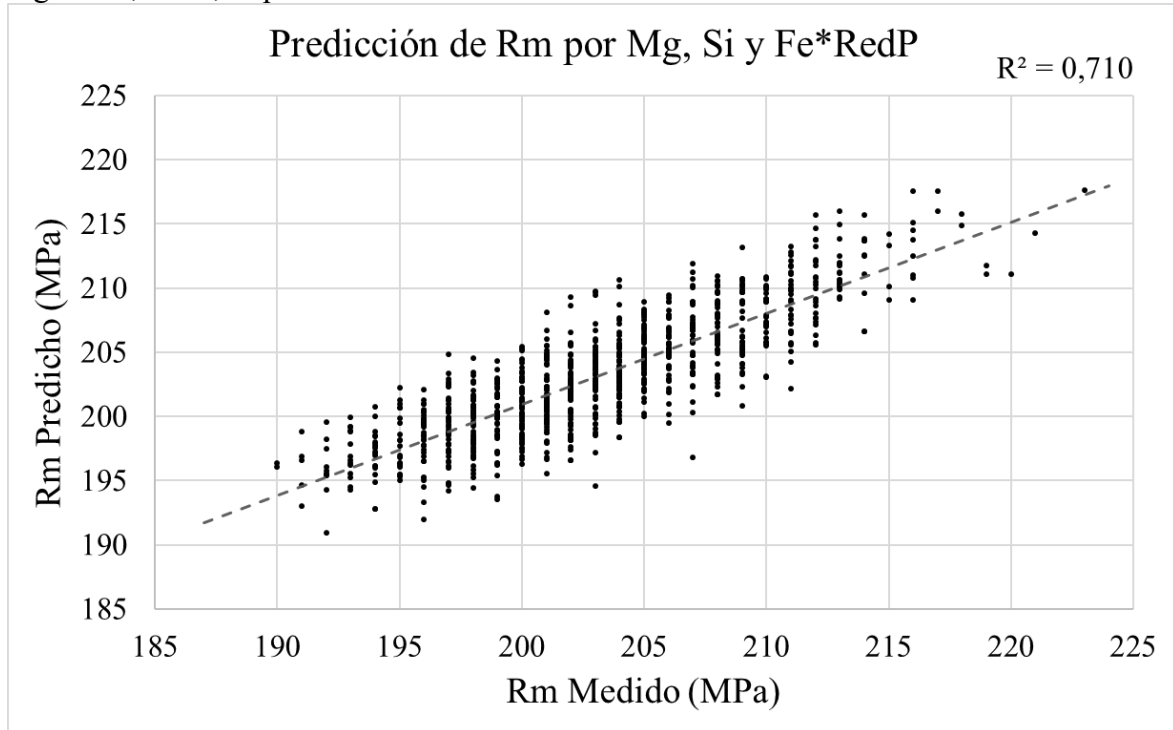


Figura 29, fila 1, Derecha:

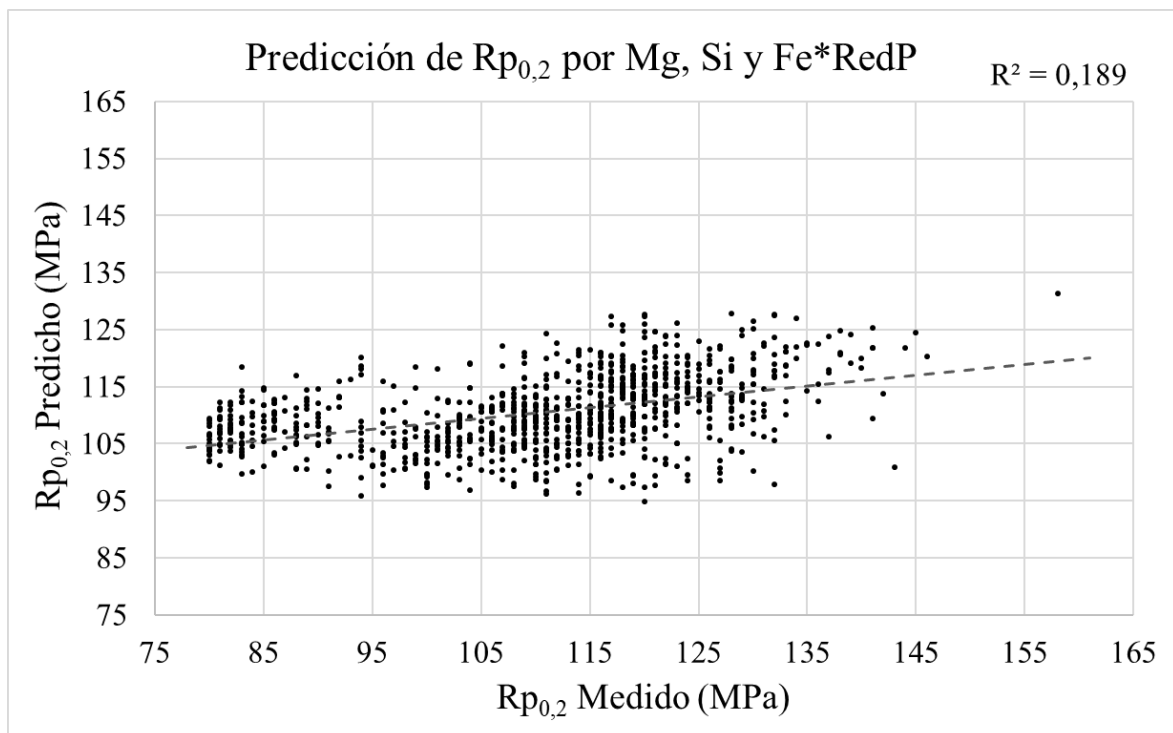


Figura 40: Datos de Resistencia Mecánica y Límite Elástico medidos frente a datos predichos por la regresión con Si, Mg y Fe*(RedP-20%) como variables independientes.

Figura 40, fila 1, Izquierda:

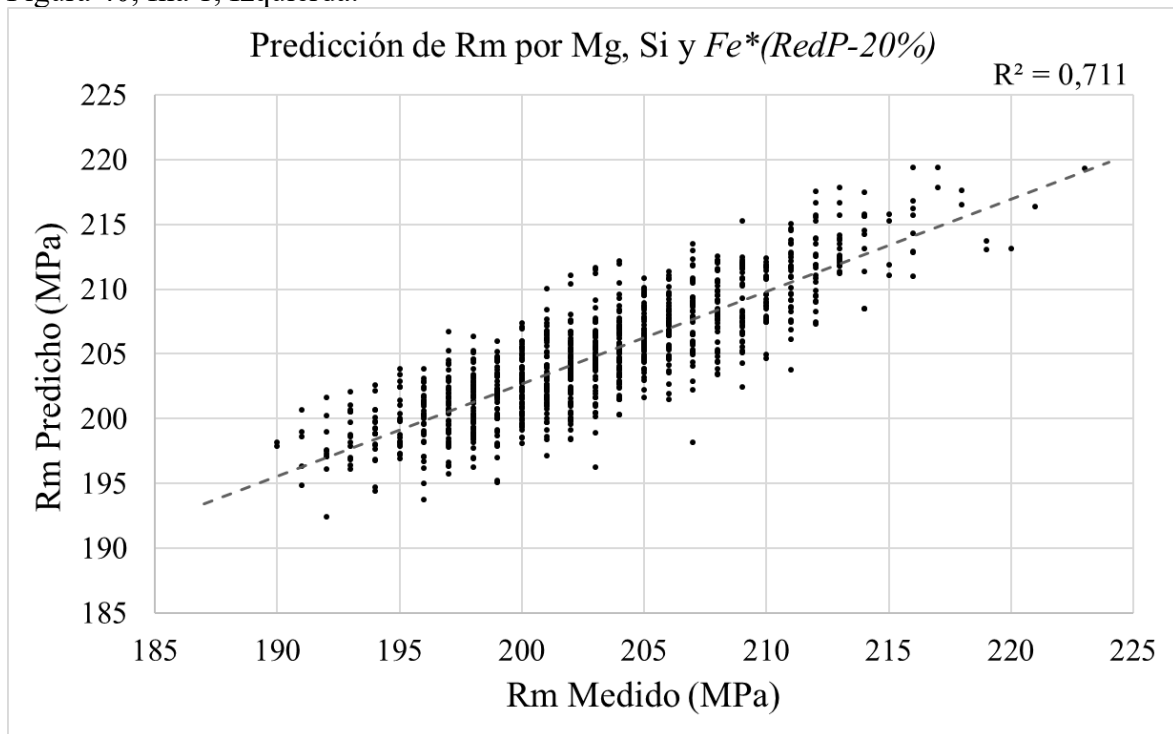


Figura 40, fila 1, Derecha:

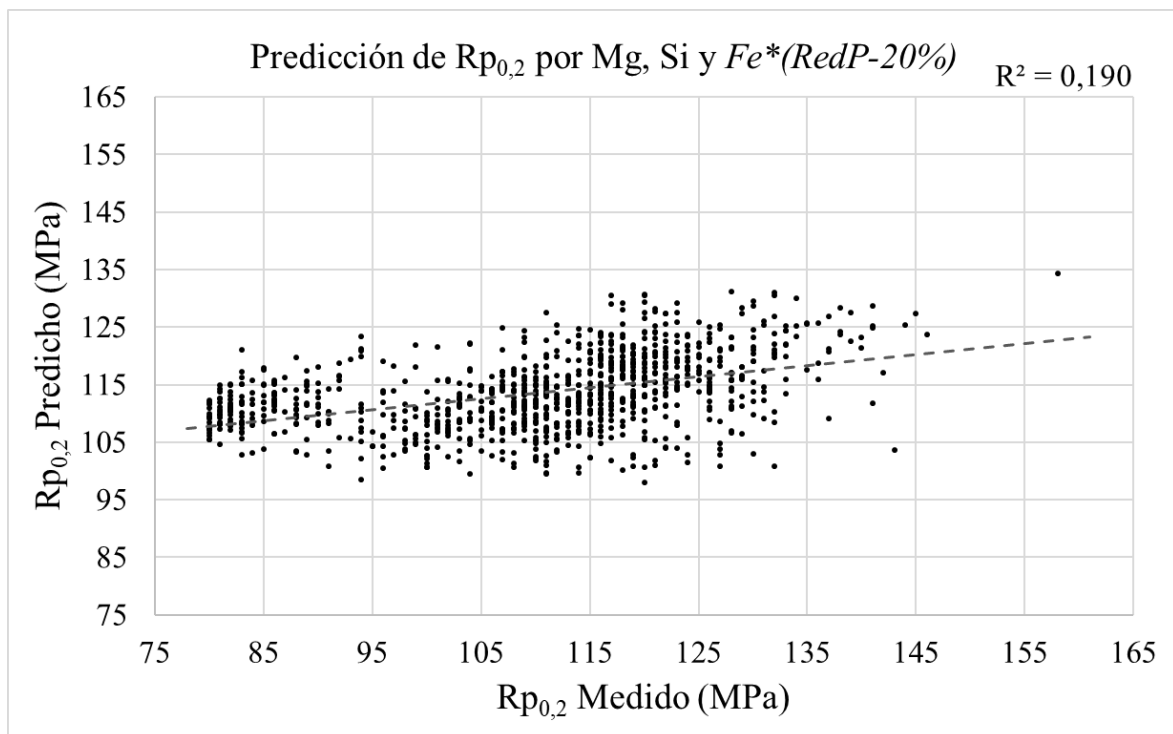


Figura 50: La Resistencia Mecánica (izq.) y el Límite Elástico (dcha.) frente al coeficiente de endurecimiento por deformación, en las muestras del anexo B.

Figura 50, fila 1, Izquierda:

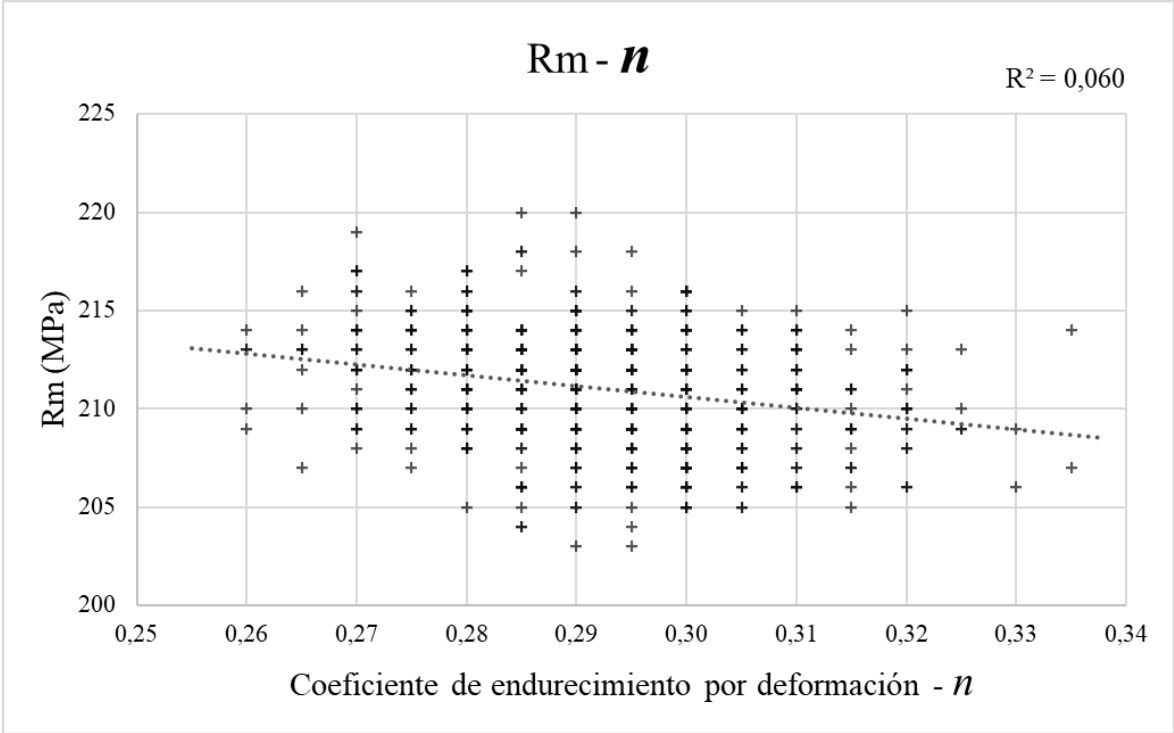


Figura 50, fila 1, Derecha:

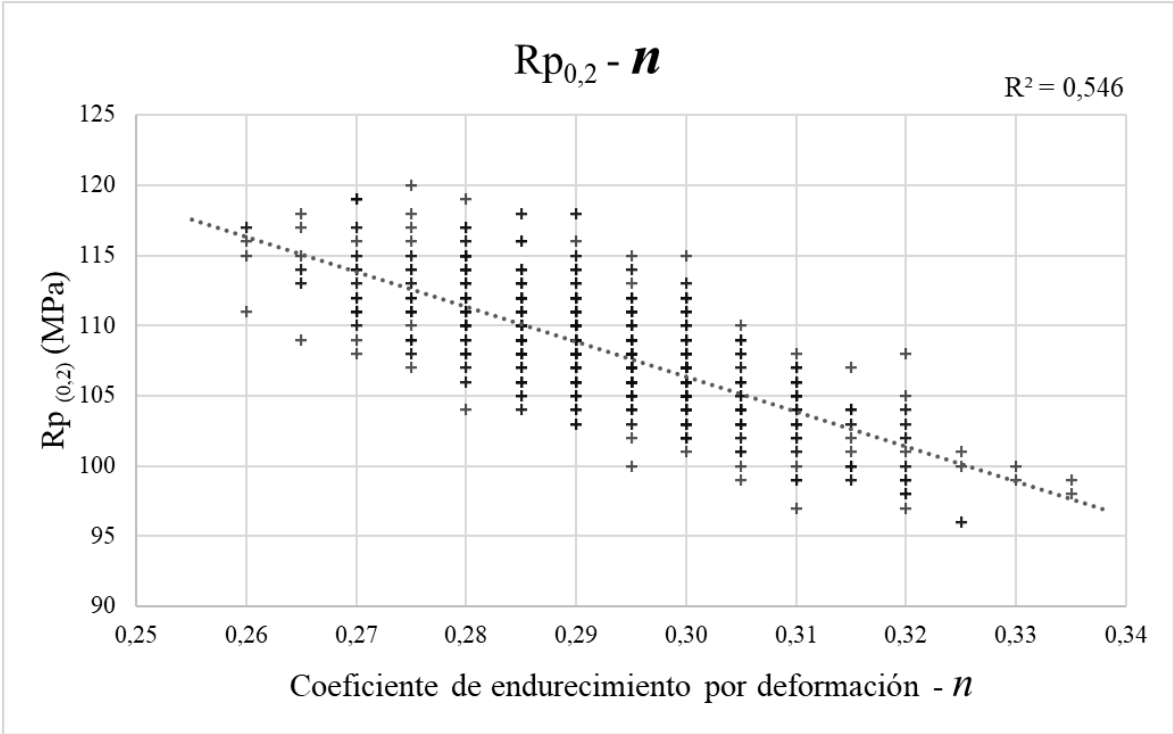


Figura 52: Datos de Límite Elástico medidos frente a datos predichos por la regresión con Si, Mg y Fe (izq.) como variables independientes y añadiendo n a las variables independientes (dcha.) en el Grupo de Muestras B.

Figura 52, fila 1, Izquierda:

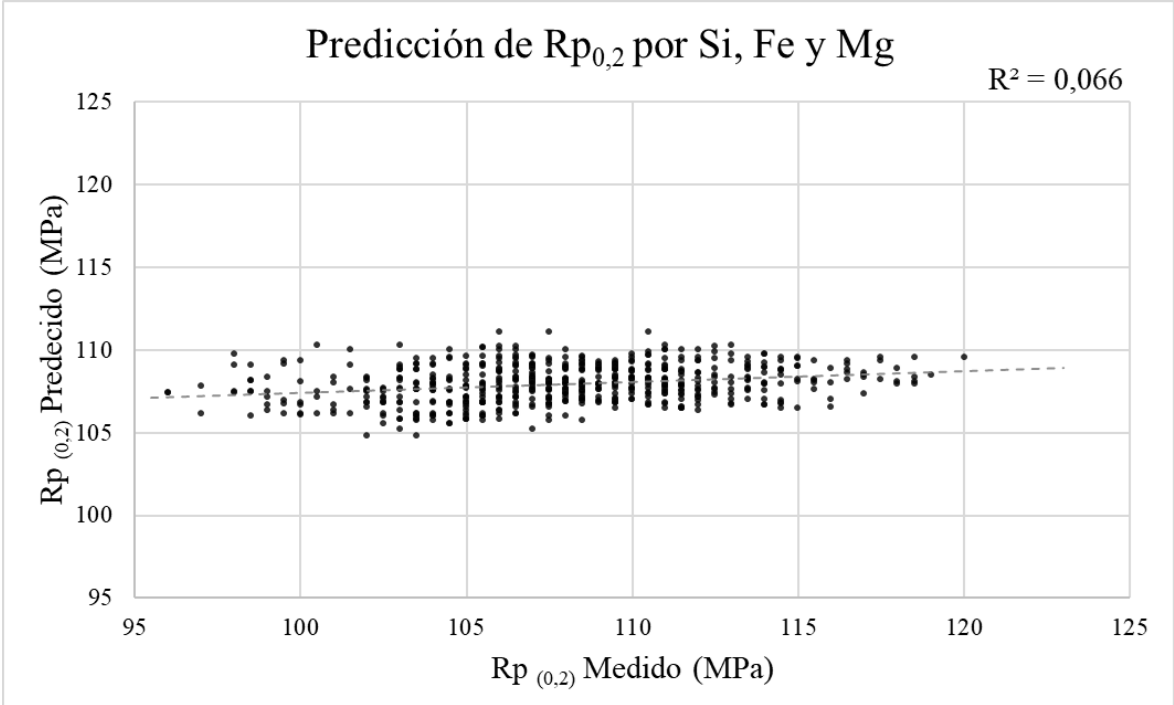
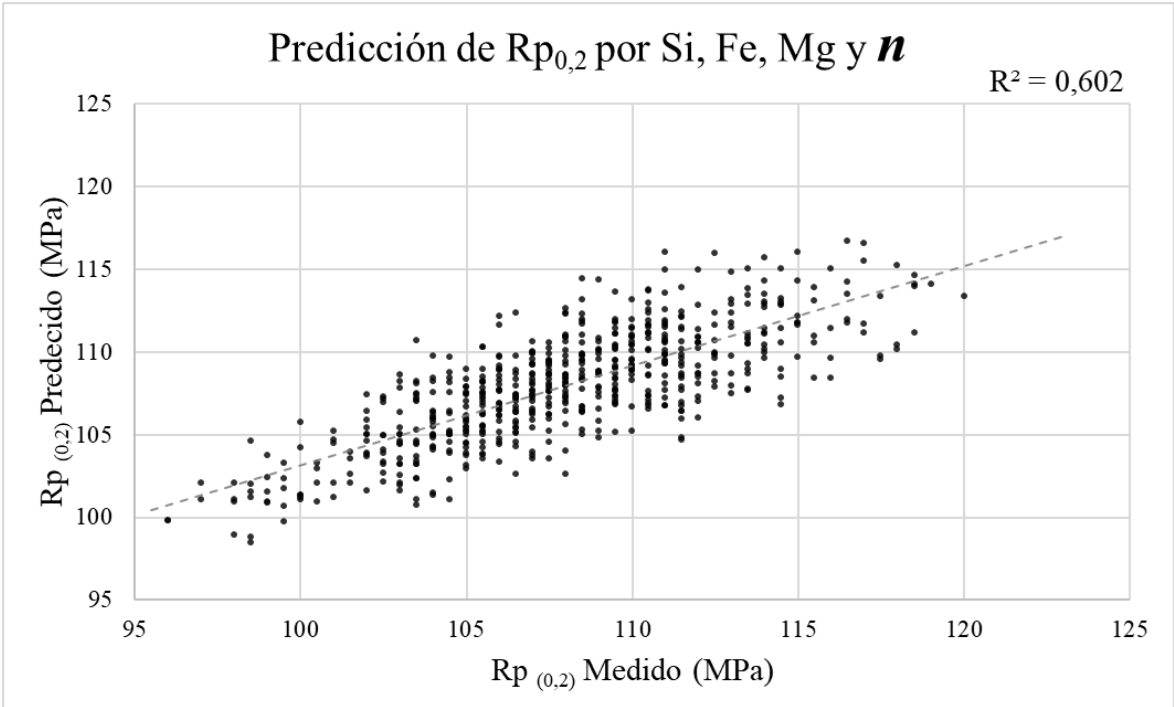


Figura 52, fila 1, Derecha:



Anexo E

Selección de 5 muestras de la aleación AA5754 en estado recocido total que no han sufrido laminación en frío utilizadas en un artículo anterior (Vicent Fanconi, Gil Fernández-Marcote, & Ruiz-Bustanza, 2023) (constan como EP-X) junto a 20 muestras de la misma aleación, estado y producto que se añaden para comprobar y dar más peso al análisis (constan como EX). Se ofrecen sus contenidos totales de Fe, Si y Mg junto al contenido de Mg detectado en matriz mediante microscopía electrónica de barrido con el material y los métodos expuestos en el apartado de Material y Métodos de esta tesis. Los contenidos de composición han sido medidos por los laboratorios normalizados de los departamentos de Calidad de Aludium Transformación de Productos.

Tabla E1

Muestra	Fe (%)	Si (%)	Mg (%)	Mg detectado en matriz (%)
E1	0,32	0,19	3,03	2,81 ± 0,04
E2	0,30	0,21	3,00	2,73 ± 0,03
E3	0,30	0,20	3,02	2,70 ± 0,03
E4	0,30	0,23	2,98	2,71 ± 0,02
E5	0,33	0,24	3,03	2,73 ± 0,02
E6	0,30	0,24	3,02	2,83 ± 0,06
E7	0,28	0,24	2,93	2,56 ± 0,08
E8	0,31	0,26	3,00	2,81 ± 0,07
E9	0,33	0,25	3,04	2,70 ± 0,03
E10	0,33	0,27	3,01	2,68 ± 0,04
E11	0,31	0,29	3,04	2,74 ± 0,02
E12	0,36	0,29	2,92	2,59 ± 0,00
E13	0,31	0,30	3,02	2,68 ± 0,08
E14	0,33	0,30	3,01	2,54 ± 0,07
E15	0,31	0,30	2,94	2,53 ± 0,06
E16	0,31	0,31	3,00	2,60 ± 0,06
E17	0,33	0,33	2,94	2,37 ± 0,10
E18	0,30	0,33	2,95	2,59 ± 0,06
E19	0,30	0,34	3,07	2,64 ± 0,03
E20	0,31	0,37	3,10	2,58 ± 0,05
EP-1	0,30	0,13	2,89	2,79 ± 0,02
EP-2	0,26	0,22	2,89	2,58 ± 0,04
EP-3	0,28	0,26	2,84	2,59 ± 0,02
EP-4	0,30	0,32	2,9	2,51 ± 0,05
EP-5	0,28	0,33	2,86	2,36 ± 0,03