

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**OPTIMIZACIÓN DE TRATAMIENTOS
TÉRMICOS DEL ACERO A PARTIR DE
ESTUDIOS DE CONSUMO DE GAS**

**(Steel Heat Treatment Optimization based on
Gas Consumption Studies)**

Para acceder al Título de

**GRADUADO EN INGENIERÍA EN
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES**

Autor: Jorge Bengochea García

Julio - 2025

RESUMEN

El presente TFG recoge dos estudios relacionados con el consumo de gas en tratamientos térmicos del acero.

El primero atiende a un estudio estadístico basado en datos históricos de consumo y producción con el que se estudia desde diferentes ángulos la relación existente entre el consumo de gas y las múltiples variables de proceso manejadas en el Taller de Tratamientos Térmicos de Reinosa Forgings & Castings, como son las dimensiones de las piezas, la carga total de las hornadas, las temperaturas alcanzadas durante los tratamientos o la duración de los mismos. De este análisis ha resultado un modelo con capacidad predictiva que, alimentado con datos de hornadas, permite estimar el consumo a futuro de tratamientos térmicos de normalizado. Asimismo, se propone un planteamiento de coeficientes adimensionales que caracterizan la eficiencia de los distintos tratamientos. Este conjunto de coeficientes, aún careciendo de capacidad predictiva, permite ahondar en las diferencias entre tratamientos y puede ayudar a estimar los costes energéticos desde un punto de vista comercial o de ingeniería.

El segundo estudio consiste en el desarrollo y validación de un método para, a partir de la curva de consumo de gas instantáneo del horno, estimar el grado de empapamiento de una pieza. Mediante una combinación de simulación por elementos finitos y mediciones directas de temperatura, se ha conseguido predecir con exactitud la historia térmica de la zona más fría de la pieza. Esta predicción se ha cruzado con la curva de consumo de gas, estableciendo la relación entre ambas. Al fin del Proyecto, se propone un modelo simple que permite predecir de manera conservadora el instante en que la pieza está correctamente empapada para el tratamiento de revenido. Este modelo es potencialmente transferible a otras piezas similares, siempre que las propiedades físicas de las mismas no disten mucho del caso de validación.

Palabras clave: tratamiento térmico, gas, consumo, horno, acero, pieza, estadística, optimización, elementos finitos, MAGMASOFT, empapamiento.

ABSTRACT

This Final Degree Project includes two studies related to gas consumption in steel heat treatments.

The first of them performs a statistical study based on historical consumption and production data. This study examines from different angles the relationship between gas consumption and the multiple process variables handled in the Reinoso Forgings & Castings Heat Treatment Workshop, such as part dimensions, total batch load, temperatures reached during treatments, and treatment duration. This analysis resulted in a predictive model that, when fed with batch data, allows for estimating future consumption for normalizing heat treatments. It also proposes dimensionless coefficients that characterize the efficiency of the different treatments. This set of coefficients, while lacking predictive capacity, allows for a deeper understanding of the differences between treatments and can help estimate energy costs from a commercial or engineering perspective.

The second study involves the development and validation of a method for estimating the soaking degree of a part using the furnace's instantaneous gas consumption curve. Through a combination of finite element simulation and direct temperature measurements, the thermal history of the coldest zone of the part has been accurately predicted. This prediction has been cross-referenced with the gas consumption curve, establishing a relationship between them. At the end of the project, a simple model is proposed that allows a conservative prediction of the moment at which the part is adequately soaked for the annealing treatment. This model is potentially transferable to other similar parts, provided their physical properties do not differ significantly from the validation case.

Keywords: heat treatment, gas, consumption, furnace, steel, part, statistics, optimization, finite elements, MAGMASOFT, soaking.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a Carlos Llovo Vidal, por su orientación y dedicación constante, siendo fundamental su experiencia y conocimientos para el desarrollo del proyecto. A Reinossa Forgings & Castings, por la confianza depositada y la oportunidad de trabajar el caso de estudio presentado, en especial, a todo el personal del Departamento de Tecnología de Forja. También a Pedro Corcuera Miró Quesada por su trabajo como director del proyecto.

A mis compañeros y amigos, quienes me han acompañado durante mis años de estudios.

Finalmente, a mis abuelos, a mis padres y a mi hermano, por la educación que me han proporcionado, los valores y el apoyo incondicional en todos mis retos.

A todos ellos, gracias.

ÍNDICE

1	CONTEXTO DEL PROYECTO	12
2	OBJETIVO Y ALCANCE.....	13
3	ESTADO DEL ARTE.....	14
3.1	ACERO.....	14
3.1.1	CLASIFICACIÓN	14
3.1.2	MICROESTRUCTURA	15
3.1.3	DIAGRAMAS T.T.T Y C.C.T	18
3.2	TRATAMIENTOS TÉRMICOS DEL ACERO.....	20
3.2.1	NORMALIZADO	22
3.2.2	RECOCIDO	23
3.2.3	TEMPLE	24
3.2.4	REVENIDO.....	26
3.3	HORNOS INDUSTRIALES DE GAS.....	28
3.3.1	TIPOS DE HORNOS DE GAS.....	28
3.3.2	MECANISMOS DE TRANSMISIÓN DE CALOR Y BALANCE DE ENERGÍA	30
3.3.3	DESCRIPCIÓN DE HORNOS UTILIZADOS (25 Y 31).....	34
3.4	GENERALIDADES DEL SOFTWARE MAGMASOFT.....	35
3.5	ESTADÍSTICA ANALÍTICA.....	36
3.5.1	PRUEBA DE KOLMOGÓROV-SMIRNOV (K-S).....	36
3.5.2	PRUEBA t.....	37
3.5.3	PRUEBA U DE MANN-WHITNEY	37
3.5.4	PRUEBA DE KRUSKAL-WALLIS	38
3.5.5	CORRELACIÓN DE SPEARMAN.....	39
3.5.6	REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE.....	39

4	INVESTIGACIONES PARA LA OPTIMIZACIÓN DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS.....	42
4.1	ESTUDIO ESTADÍSTICO DE CONSUMO DE GAS EN HORNOS	42
4.1.1	DATOS DE PARTIDA Y SU ESTRUCTURA.....	42
4.1.2	PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS.....	45
4.1.3	RESULTADOS	52
4.1.3.1	PREDICCIÓN DE CONSUMO DE GAS	52
4.1.3.2	COEFICIENTES.....	61
4.2	PREDICCIÓN DE EMPAPAMIENTO DE UNA PIEZA	63
4.2.1	PIEZA Y CICLOS TÉRMICOS DE ESTUDIO.	63
4.2.2	PROCEDIMIENTO DE SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN	66
4.2.3	HIPÓTESIS DE EMPAPAMIENTO	76
4.2.4	RESULTADOS	77
5	CONCLUSIONES	83
6	RECOMENDACIONES A FUTURO.....	85
7	REFERENCIAS	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama Hierro Cementita (Callister 2012).....	15
Figura 2. a) Microestructura de la ferrita. b) Microestructura de la austenita a alta temperatura (Schlegel 2023).....	16
Figura 3. Puntos críticos de los aceros (Verhoeven 2005).	18
Figura 4. Diagrama T.T.T. o Curva de la “S”. (Gil Mur 2005).....	18
Figura 5. Curva CCT de un acero con f 0.12% C, 0.79% Mn, 1.23% Si, 0.014% S, 0.0011% P, 0.43% Ni, 1.22% Cr, 0.54% Mo, 0.24% Cu, 0.053% As, 0.016% Ti. (Verdeja González, Fernández-González, Verdeja González 2023)	20
Figura 6. Etapas de los tratamientos térmicos (Schlegel 2023).....	21
Figura 7. Clasificación de los tratamientos térmicos.....	22
Figura 8. Tipología de tratamientos de recocidos globulares (Verdeja González, Fernández-González, Verdeja González 2023).	24
Figura 9. Curva de enfriamiento crítico sobre un diagrama C.C.T. (Callister 2012). 25	
Figura 10. Esquema de temple y revenido.	27
Figura 11. Hornos de solera fija, móvil y de campana. (Trinks 2004)	29
Figura 12. Horno continuo. (Trinks 2004).....	30
Figura 13. Curvas de conductividad para distintas aleaciones. (Peet, Hasan, Bhadeshia 2011).....	31
Figura 14. Comparación del poder relativo de radiación y convección para distintas temperaturas (Trinks 2004).....	32
Figura 15. Balance de energía de horno y pieza.....	33
Figura 16. Ejemplo de datos de regresión.....	40
Figura 17. Diagrama de obtención de datos.....	43
Figura 18. Proporción de tratamientos en el taller.....	44
Figura 19. Distribuciones de densidad para los distintos tratamientos.	46
Figura 20. Comparación de distribuciones entre hornos 25 y 31.....	46
Figura 21. Recuento de hornadas de temple por tipo de pieza.	47
Figura 22. Recuento de hornadas de normalizado por tipo de pieza.....	47
Figura 23. Recuento de hornadas de revenido por tipo de pieza.	48
Figura 24. Matriz de correlación de Spearman para el normalizado.....	50
Figura 25. Matriz de correlación de Spearman para el normalizado.....	51
Figura 26. Gráfica de consumo por grupo L/D y carga.....	53

Figura 27. Composición de piezas del grupo L/D 2,5-5,5.	54
Figura 28. Diagrama de decisión para modelo predictivo de normalizado.	55
Figura 29. Representación de promedio de consumo para grupos L/D y carga.	57
Figura 30. Representación de promedio de consumo para grupo L/D y duración. ...	59
Figura 31. Representación de promedio de consumo para pieza y carga.	59
Figura 32. Representación de promedio de consumo para pieza y duración.	60
Figura 33. Representación de promedio de consumo para temperatura y carga. ...	60
Figura 34. Representación de promedio de consumo para temperatura y diámetro.	61
Figura 35. Temperatura de consigna del tratamiento de revenido.	64
Figura 36. Plano del eje para el revenido y ubicación de termopares.	65
Figura 37. Temperatura de consigna del tratamiento de distensionado.	65
Figura 38. Plano del eje para el distensionado y ubicación de termopares.	65
Figura 39. Modelo 3D del eje con los puntos de medición de temperatura y modelo del mallado para el revenido.	66
Figura 40. Configuración de la sección “Heat Treatment” para la simulación del revenido.	68
Figura 41. HTC convectivo original.	69
Figura 42. Configuración del material.	69
Figura 43. Curvas de termopares en MAGMASOFT.	70
Figura 44. Curvas del termopar 7.	70
Figura 45. Curvas de los termopares 8 y 2.	71
Figura 46. Curvas del termopar 9.	71
Figura 47. Curvas de conductividad y calor específico junto a sus respectivas tablas de valores.	72
Figura 48: Curvas de HTC optimizada y original.	72
Figura 49. Modelo 3D del eje con los puntos de medición de temperatura y modelo del mallado para el distensionado.	73
Figura 50. Configuración de la sección “Heat Treatment” para la simulación del distensionado.	74
Figura 51. Curva del HTC para el distensionado.	75
Figura 52. Curvas de los termopares 4, 5 y 6 del distensionado.	75
Figura 53. Distorsión de la curva real del termopar 6.	76

Figura 54. Curva de muestras de consumo instantáneo del ciclo de distensionado junto a temperatura de consigna del ciclo.	77
Figura 55. Representación gráfica de un estado intermedio de calentamiento en MAGMASOFT.....	78
Figura 56. Ubicación del termopar de superficie.	78
Figura 57. Curvas de temperatura mínima y de superficie MAGMASOFT.	79
Figura 58. Evolución de las diferencias de temperatura con el tiempo.	79
Figura 59. Gráfica de la media móvil y la pendiente frente al tiempo.	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tabla de características de los hornos empleados.....	35
Tabla 2. Distribución de muestras de tratamiento por horno.	44
Tabla 3. Valores p para prueba K-S.....	45
Tabla 4. Kruskal Wallis para normalizado (Nm3).	49
Tabla 5. Kruskal Wallis para normalizado (Nm3/Tn).	49
Tabla 6. Kruskal Wallis para revenido (Nm3).	49
Tabla 7. Kruskal Wallis para revenido (Nm3/Tn).	49
Tabla 8. Valores de R ² para regresiones sobre grupos L/D.	53
Tabla 9. Valores de R ² obtenidos para distintas regresiones múltiples.	54
Tabla 10. Coeficientes de regresión para modelo del normalizado.	56
Tabla 11. Datos de hornadas de comprobación del modelo.....	56
Tabla 12. Tabla de comparación entre resultado de predicción y real.....	56
Tabla 13. Comparación entre las sumas de consumo del modelo predictivo y las sumas del consumo real.	57
Tabla 14. Resultados de R ² para agrupación L/D de revenido.	58
Tabla 15. Valores de R ² para subdivisión por tipo de pieza.....	58
Tabla 16. Valores de R ² para agrupación por temperaturas.....	61
Tabla 17. Tabla de valores de p para prueba t sobre los tipos de pieza en el tratamiento temple	62
Tabla 18. Tabla de coeficientes calculados para cada tratamiento.	63
Tabla 19. Datos de peso y porcentaje de elementos de aleación en porcentaje de peso.....	64

1 CONTEXTO DEL PROYECTO

Reinosa Forgings & Castings, situada en Cantabria, es uno de los principales fabricantes de grandes piezas forjadas y fundidas de acero a nivel mundial. Fundada en 1918 como Sociedad Española de Construcción Naval, comenzó su especialización en el sector militar y la industria de defensa española. Durante sus más de cien años de historia, la empresa ha sido ejemplo de crecimiento y adaptación a nuevos mercados, productos y competidores, lo que la ha permitido acumular gran conocimiento y experiencia hasta convertirse en referente en fabricación de piezas y grandes bienes de equipo para sectores como la construcción naval, cementero, minería, generación de energía, laminación o cigüeñales.

La planta de Reinosa cuenta con instalaciones especializadas para ofrecer un proceso de fabricación totalmente integrado, partiendo del reciclaje de chatarra como materia prima, pasando por procesos de fundición, forja, tratamientos térmicos o mecanizado, hasta la obtención de productos totalmente terminados. En la actualidad, la fábrica cuenta con la tecnología necesaria para cubrir las necesidades de los clientes de piezas forjadas de hasta 80 toneladas y piezas fundidas de hasta 166 toneladas mecanizadas en terminación (*Quienes somos*).

Dada la alta demanda energética del sector siderúrgico tanto en la fabricación como en el procesado del acero, la empresa es un gran consumidor tanto de energía eléctrica como de gas natural, siendo esta última la fuente de energía utilizada en los hornos destinados a los tratamientos térmicos del acero. La empresa participa activamente en diferentes proyectos de investigación orientados a la mejora de eficiencia en el uso de recursos y reducción de costes de producción como base de la competitividad y desarrollo de la empresa. En esta línea de compromiso con la sostenibilidad ambiental y optimización de procesos se plantea el presente proyecto en el área de tratamientos térmicos. El estudio se apoya en la experiencia previa de la fábrica y sus distintos sistemas de gestión y control de procesos para plantear una evaluación estadística acerca del rendimiento energético actual en los hornos de gas, planteando soluciones de predicción de consumo de gas y tratamiento de costes. Por otro lado, se trabaja en la simulación de tratamientos térmicos en una pieza mediante software de elementos finitos, validando un modelo que permita la predicción del empapamiento térmico de esta.

2 OBJETIVO Y ALCANCE.

El presente Trabajo de Fin de Grado tiene como objetivo principal el análisis y desarrollo de herramientas de apoyo para la optimización del consumo de gas en tratamientos térmicos del acero llevados a cabo en el Taller de Tratamientos Térmicos de Reinosa Forgings & Castings. Para ello, se abordan dos estudios complementarios que combinan el análisis estadístico de datos históricos y la simulación térmica mediante elementos finitos.

El primer estudio tiene como objetivo la elaboración de un modelo estadístico predictivo del consumo de gas en piezas y unos coeficientes adimensionales que permitan establecer la relación de eficiencia entre los distintos tratamientos térmicos.

Debido a la falta de datos históricos disponibles acerca del consumo de gas, la muestra de datos se limita a las hornadas registradas en dos de los 23 hornos del Taller. Asimismo, dicha muestra se disminuye durante el Proyecto para descartar aquellos tratamientos con menos representación, realizándose finalmente el estudio sobre los tres tratamientos principales (normalizado, temple, revenido) y la mayoría de las piezas tratadas en los hornos “25” y “31” desde 2015 hasta la actualidad.

El segundo estudio tiene como objetivo la predicción del instante en que la carga de una hornada se encuentra empapada de calor mediante observación de la curva de consumo de gas del horno. Concretamente, comprende el desarrollo de modelos geométricos 3D y simulaciones de elementos finitos que, apoyadas por mediciones directas de temperatura, permitan predecir el instante de empapamiento de una pieza. Como caso de estudio, se escoge una pieza tipo eje a la que se le colocan termopares en varias configuraciones, y se valida el estudio con procedimiento secuencial. Primero, se calibra el set de propiedades físicas del acero con datos procedentes de un tratamiento de revenido donde se conocen las temperaturas superficiales e interna de la pieza. A continuación, se utilizan estas propiedades físicas para predecir la temperatura interior de la pieza en un tratamiento de distensionado en el que sólo se conoce la temperatura superficial de la pieza.

El alcance de este TFG abarca tanto el análisis estadístico como el modelado físico mediante simulación numérica, proporcionando una base metodológica para futuros estudios y pruebas de optimización del control energético, la planificación de costes y la mejora de la eficiencia en procesos industriales de tratamiento térmico.

3 ESTADO DEL ARTE

3.1 ACERO

Los aceros son aleaciones metálicas compuestas por hierro (Fe) como elemento base y carbono (C) como elemento aleante. El contenido en carbono, elemento más influyente en las propiedades y estructura del acero, varía generalmente entre 0,02% y 2,11% del peso según el diagrama de fases hierro-carbono. Además, la composición puede contener otros elementos aleantes que alteran y modifican las propiedades para atender a un mayor rango de sollicitaciones.

3.1.1 CLASIFICACIÓN

Los aceros se clasifican según diferentes criterios como pueden ser las exigencias de calidad y composición química, sus aplicaciones, su microestructura o su proceso de fabricación o de conformación. Atendiendo a criterios de calidad, podemos diferenciar claramente el tipo de acero involucrado en los estudios del presente proyecto. De esta forma se distinguen tres grupos (Schlegel 2023):

Aceros de base: este grupo incluye un número reducido de aceros generalmente no aleados para los que no se prescriben requisitos especiales sobre propiedades mecánicas o composición, por lo que no se requieren tratamientos térmicos o medidas especiales durante la producción. Estos se utilizan en piezas no críticas o estructuras.

Aceros de calidad: incluye aceros aleados y no aleados sin exigencias en lo referido a tratamientos térmicos o procesados posteriores, pero que, si presentan requisitos ligeramente más rigurosos que los aceros base en lo referido a resistencia mecánica, tamaño de grano o conformado, los cuales se tratan de asegurar a lo largo del proceso de fabricación.

Aceros especiales: estos aceros se caracterizan por tener propiedades mejoradas y específicas conseguidas a partir de la adición controlada de múltiples elementos aleantes y procesos especiales de producción que permiten garantizar altos estándares de calidad, resistencia, dureza y estrechos márgenes de composiciones químicas. Esto explica la complejidad y especificidad de los tratamientos térmicos a los que se someten para garantizar características físicas exigentes.

3.1.2 MICROESTRUCTURA

La microestructura de los aceros es la organización o arreglo interno de las fases metálicas y no metálicas para un estado concreto de temperatura. Esta microestructura está formada en la mayoría de las aplicaciones por múltiples elementos o microconstituyentes, por lo que el estudio y entendimiento de la naturaleza, morfología y estructura de estos es fundamental para determinar las propiedades físicas y químicas de los aceros.

Los diagramas de fase permiten predecir diferentes características de la estructura de una aleación, por lo que para las aleaciones férricas se utiliza el diagrama de fases hierro-carbono. La fase más estable del sistema hierro-carbono es el grafito, siendo representado en el diagrama hierro-carbono estable su coexistencia con otras fases ricas en hierro. Sin embargo, en aplicaciones industriales, la cementita se forma y permanece estable debido a transformaciones o enfriamientos, mientras que el grafito no es probable de encontrar, por lo que el diagrama hierro-grafito se sustituye por el diagrama hierro cementita. La cementita (Fe_3C) es una fase metaestable compuesta por tres átomos de hierro y uno de carbono con una proporción de 6,67% de carbono. Se entiende la metaestabilidad como una fase que no es completamente estable termodinámicamente, pero que puede persistir bajo condiciones normales sin transformarse (Callister 2012).

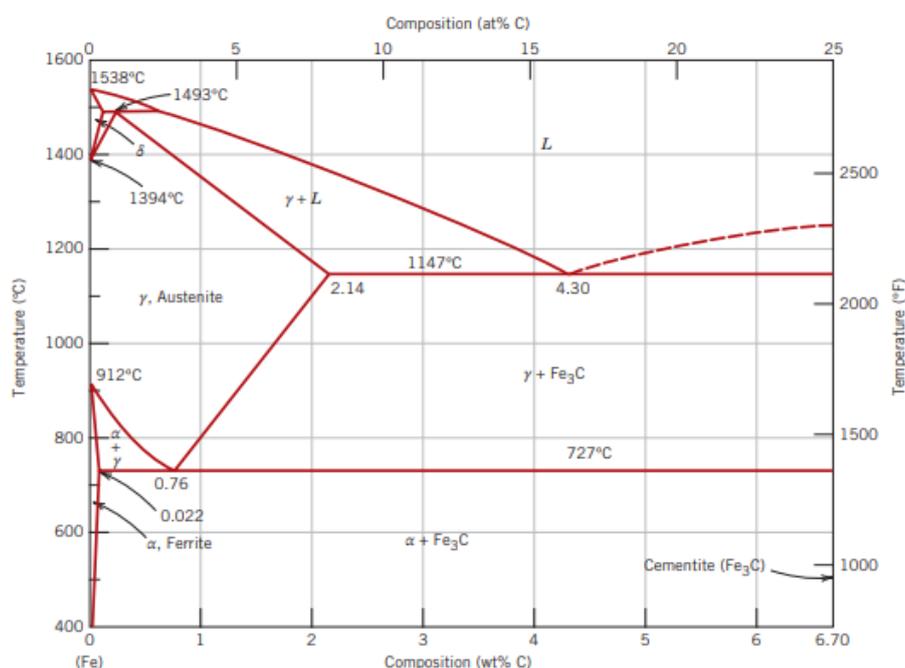


Figura 1. Diagrama Hierro Cementita (Callister 2012).

Atendiendo al hierro puro representado por el 0% de carbono en el diagrama, se tiene la forma estable de hierro α o ferrita con estructura BCC. Esta transforma a 912°C en austenita (γ) con estructura FCC, la cual persiste hasta 1394°C, donde se vuelve a convertir en una fase BCC (ferrita δ) que funde a 1538°C. El carbono forma compuestos sólidos con la ferrita α , la ferrita δ y la austenita α . La solubilidad máxima de la ferrita α se alcanza para el valor de 0,022% de carbono a 727°C. La ferrita δ es muy parecida a la ferrita α , diferenciándose en el tramo de temperaturas en el cual se presentan en el diagrama. La austenita se transforma en otras fases al someterse a enfriamientos muy rápidos, siendo de gran importancia en los tratamientos térmicos de los aceros.

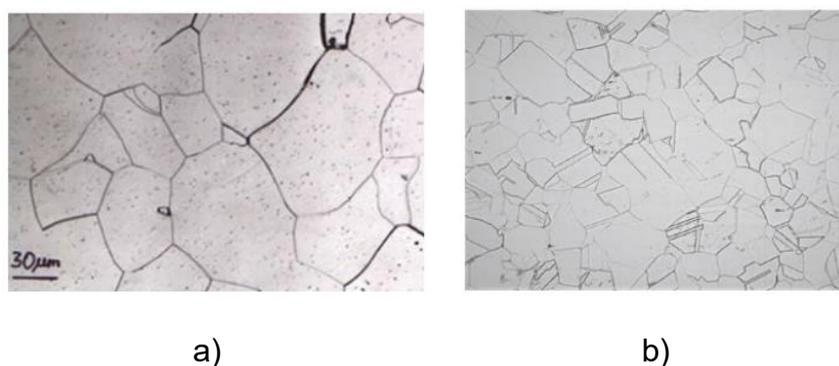


Figura 2. a) Microestructura de la ferrita. b) Microestructura de la austenita a alta temperatura (Schlegel 2023).

En el diagrama hierro-cementita, se reflejan tres reacciones invariantes en las que intervienen tres fases que son (Blázquez Martínez, Lorenzo Esteban, Río López 2014):

- Reacción peritética (1495°C): $\delta(0,009\% \text{ de C}) + L(0,53\% \text{ de C}) \rightarrow \gamma(0,17\% \text{ de C})$
- Reacción eutéctica (1148°C): $L(4,30\% \text{ de C}) \rightarrow \gamma(2,11\% \text{ de C}) + \text{Fe}_3\text{C}$
- Reacción eutectoide (727°C): $\gamma(0,77\% \text{ de C}) \rightarrow \alpha(0,022\% \text{ de C}) + \text{Fe}_3\text{C}$

La reacción eutectoide da lugar a un constituyente bifásico compuesto por láminas o capas alternadas de las fases ferrita α y Fe_3C denominada perlita. La perlita se agrupa en granos en los que las láminas están orientadas en la misma dirección variando de un grano a otro.

Para la reacción eutéctica, obtenemos un compuesto denominado ledeburita, el cual es resultado de la solidificación del líquido con 4,30% de carbono a una temperatura de 1147°C. Según avanza el enfriamiento, el porcentaje de carbono disuelto en la

austenita sigue disminuyendo en favor de la cementita, hasta llegar a ser del 0,77%C a 727°C.

El diagrama hierro-cementita, permite diferenciar y clasificar las diferentes aleaciones férreas según el contenido de carbono. Sin embargo, se clasifican como aceros las aleaciones de hasta un 2,11% de peso en carbono. Este porcentaje representa la máxima solubilidad del acero en la austenita, dado que este es el único de los constituyentes por encima de los 727°C que presenta plasticidad para ser forjable o deformable.

Puntos críticos de los aceros

Los puntos críticos de los aceros representan las temperaturas específicas a las que ocurren las principales transformaciones de fase durante el calentamiento o enfriamiento de las aleaciones. La correcta aplicación de las temperaturas de los tratamientos térmicos viene marcada por estas temperaturas críticas, las cuales no sólo dependen del porcentaje de carbono, sino también del resto de elementos aleantes.

Los puntos críticos se diferencian mediante la aplicación de subíndices numéricos según el orden de aparición en el diagrama desde la temperatura ambiente. El primer punto, A_0 , identifica la transformación magnética de la cementita. La siguiente reacción, asignada como A_1 se produce a la temperatura eutectoide o comienzo de la formación de austenita. Por encima de esta temperatura se observa el cambio de magnetismo de la ferrita (A_2), y la temperatura A_3 en la que se alcanza la región monofásica de la austenita. En temperaturas más altas aparece el punto A_4 que representa la formación de ferrita δ .

Los puntos críticos mencionados como A_i , se detectan experimentalmente cuando la temperatura varía muy lentamente y en condiciones de equilibrio que hacen que la temperatura coincida tanto calentando como enfriando. Sin embargo, es habitual leer estos puntos acompañados de las letras c y r en el subíndice haciendo referencia a calentamiento o enfriamiento respectivamente (A_{r1} , A_{c1}). Esto es porque debido a una mayor velocidad de la variación de temperatura los puntos críticos son más altos durante el calentamiento que en el enfriamiento.

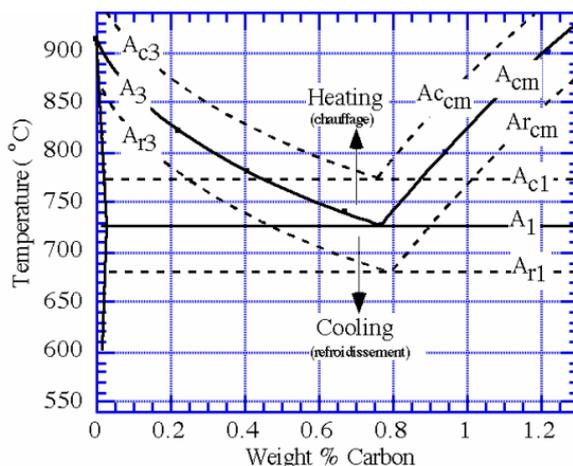


Figura 3. Puntos críticos de los aceros (Verhoeven 2005).

3.1.3 DIAGRAMAS T.T.T Y C.C.T

El estudio de los tratamientos térmicos está fundamentado en el procedimiento experimental ideado por Brain y Davenport en 1930. El método recoge en un procedimiento gráfico una serie de experimentos y ensayos realizados con probetas simulando un calentamiento hasta la austenización y un posterior mantenimiento a una temperatura constante seguido de un enfriamiento rápido. El estudio metalográfico de las probetas aporta resultados sobre los porcentajes de cada compuesto obtenido en estas. Esta gráfica se conoce como la curva de la “S” o curvas T.T.T (Time-Temperature-Transformation).

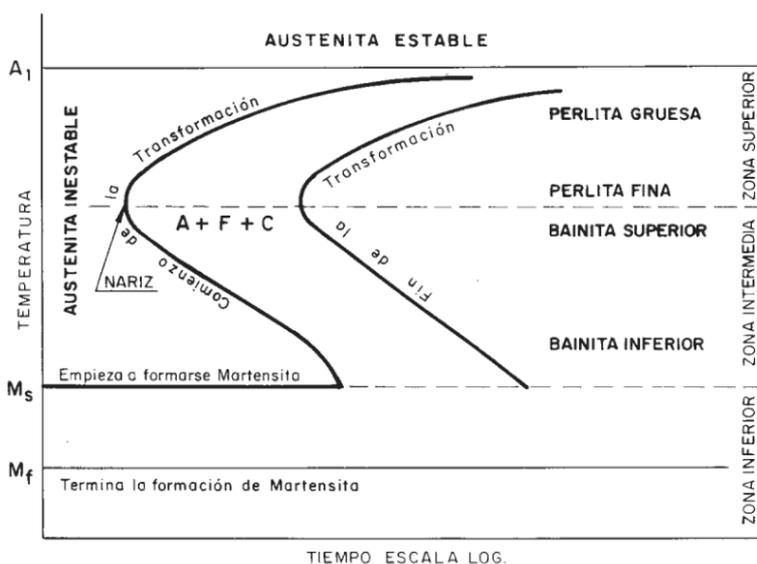


Figura 4. Diagrama T.T.T. o Curva de la “S”. (Gil Mur 2005)

La Figura 4 muestra la representación más sencilla de la curva T.T.T., la cual recoge las transformaciones de las zonas superior, intermedia e inferior por mantenimiento a una determinada temperatura mencionadas anteriormente.

La morfología de las curvas T.T.T y su separación del eje y depende de una serie de factores. Uno de ellos es la composición química, la cual generalmente cuanto mayor es la cantidad de átomos aleantes que forman solución sólida con la austenita, la difusión tiende a ser más lenta retrasando las transformaciones tanto perlítica como bainítica. Otros factores como el tamaño de grano o la temperatura de austenización derivada de la composición química, también modifican las curvas de transformación T.T.T. (Verdeja González, Fernández-González, Verdeja González 2023).

Diagramas C.C.T.

En la mayoría de las aplicaciones industriales de tratamientos térmicos, se busca transformar la austenita mediante enfriamientos térmicos continuos debido a la dificultad de aplicación de los tratamientos isotérmicos en los que un acero debe enfriarse rápidamente desde una temperatura superior a la eutectoide y luego mantener una temperatura elevada durante un tiempo determinado. Las curvas que se desarrollan por tanto para estudiar las transformaciones por enfriamiento continua se conocen como curvas C.C.T. (Continuous-Cooling-Transformation) y difieren ligeramente de las curvas T.T.T. (Callister 2012).

En la Figura 5 se representa la curva de enfriamiento continuo de una aleación determinada, así como unas líneas que representan distintos tipos de enfriamientos continuos. En la parte inferior de estas líneas aparece la dureza que se obtendría si se siguiese cada uno de los enfriamientos. Con las curvas C.C.T se aprecia fácilmente siguiendo la línea de enfriamiento las fases por las que pasa la descomposición de la austenita.

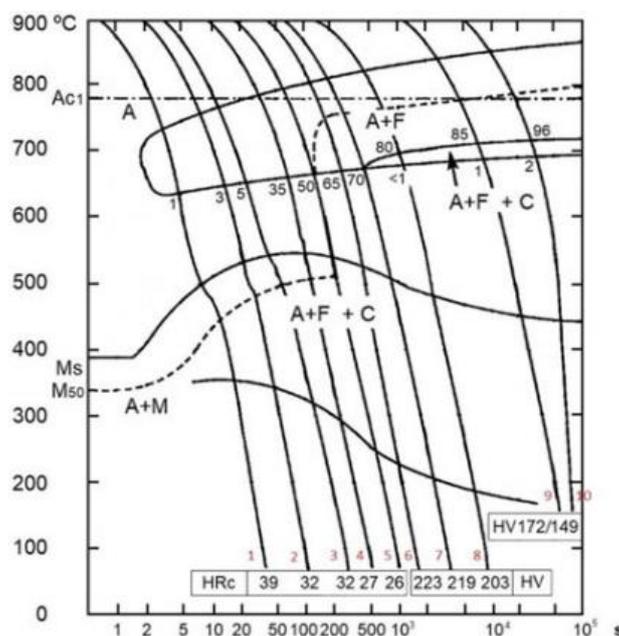


Figura 5. Curva CCT de un acero con f 0.12% C, 0.79% Mn, 1.23% Si, 0.014% S, 0.0011% P, 0.43% Ni, 1.22% Cr, 0.54% Mo, 0.24% Cu, 0.053% As, 0.016% Ti. (Verdeja González, Fernández-González, Verdeja González 2023)

Las curvas T.T.T. son, en principio, únicamente aplicables a las descomposiciones a temperatura constante, aunque tiene morfologías parecidas a las curvas C.C.T. y se encuentran desplazadas hacia arriba y hacia la izquierda respecto a las últimas. Sin embargo, la obtención de las curvas C.C.T. es más compleja que la obtención de las anteriores, así como más difíciles de encontrar en textos, por lo que, atendiendo a las precauciones pertinentes, se puede llegar a utilizar una curva T.T.T. para obtener información sobre un enfriamiento continuo.

3.2 TRATAMIENTOS TÉRMICOS DEL ACERO

Los tratamientos térmicos son operaciones o procesos de calentamiento y enfriamiento a unas temperaturas determinadas a las que se someten las aleaciones con el objetivo de obtener las propiedades y características más adecuadas para la aplicación a la que van destinadas.

Los tratamientos térmicos no tienen la capacidad de modificar la composición química, pero sí otros factores como los constituyentes estructurales y es su defecto, las propiedades mecánicas (Del Barrio González, García Mendieta).

Todos los tratamientos térmicos se desarrollan en tres fases diferenciadas:

- Fase 1 – Calentamiento: En esta etapa se produce un calentamiento controlado y a una temperatura uniforme en toda la pieza generalmente medida en °C/h. Durante esta etapa es crucial garantizar la mayor uniformidad posible en el calentamiento, el cuál debe llegar hasta el corazón o núcleo de la pieza, especialmente en piezas de grandes tamaños y grosores. De lo contrario, grandes diferencias de temperatura entre el interior y la superficie pueden crear fuertes tensiones internas provocadas por la desigual dilatación de las zonas y por las contracciones del acero al atravesar las zonas críticas. Estas tensiones pueden provocar grietas o roturas que, aunque no se manifiesten durante el propio tratamiento, aparezcan durante temple o revenidos posteriores. Para solucionar este problema, es frecuente el uso de mantenimientos a temperaturas intermedias durante el calentamiento con el fin de reducir las diferencias de temperaturas
- Fase 2 – Mantenimiento: Durante esta fase se realiza un mantenimiento a la temperatura máxima fijada del tratamiento para garantizar la total transformación del constituyente que se pretende conseguir. Es importante encontrar un equilibrio en el tiempo de mantenimiento que permita el empapamiento térmico de la pieza sin entrar en largos mantenimientos que producen sobrecrecimiento del grano y una estructura frágil.
- Fase 3 – Enfriamiento: Esta fase consiste en el descenso de temperatura de la pieza desde el mantenimiento a la temperatura ambiente. Este proceso debe ser rigurosamente controlado y las velocidades vendrán determinadas por el tipo de tratamiento y las propiedades que se pretenden conseguir.

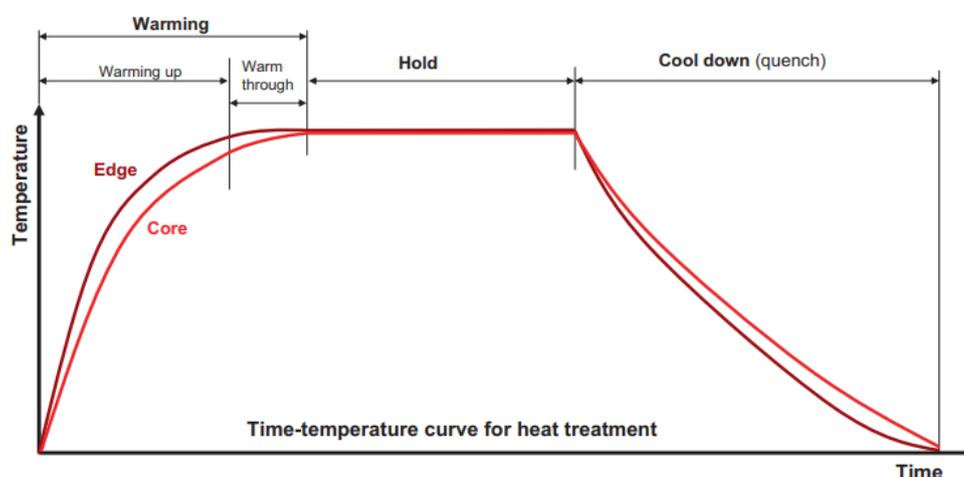


Figura 6. Etapas de los tratamientos térmicos (Schlegel 2023).

Clasificación de los tratamientos térmicos.

La clasificación de los tratamientos de los aceros atiende al esquema de la Figura 7. Para este caso nos centramos en los tratamientos máxicos, los cuales están involucrados en los estudios presentados en el apartado experimental.

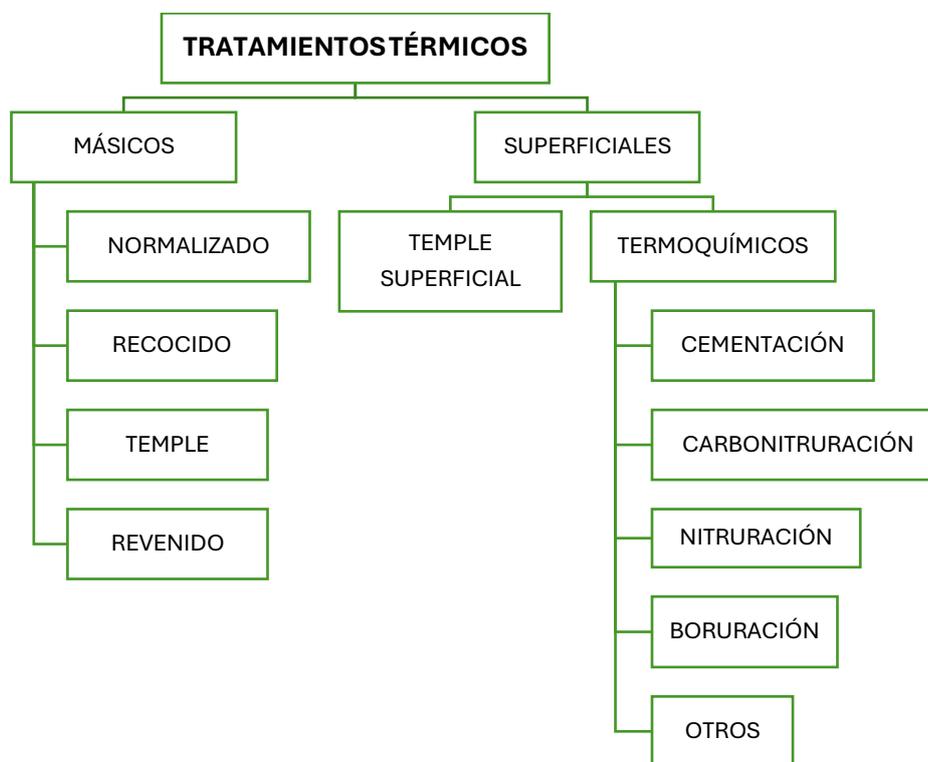


Figura 7. Clasificación de los tratamientos térmicos.

3.2.1 NORMALIZADO

El tratamiento térmico del normalizado consiste en un calentamiento a temperatura entre 50-75°C por encima de la temperatura crítica superior del acero (A_3), mantenimiento corto a esa temperatura y seguido, un enfriamiento al aire tranquilo. El objetivo del normalizado es devolver al acero al estado de propiedades y características que se supone como normales según su composición después de haber sido trabajado mediante deformaciones en frío, forja, laminación o procesos similares. También puede ser utilizado como tratamiento correctivo después de haber recibido otros tratamientos previos que resultaron defectuosos (Del Barrio González, García Mendieta).

Mediante el tratamiento de normalizado, se logra un afinamiento y homogenización de la estructura. La velocidad de enfriamiento empleada es más lenta que en el temple y más rápida que en el revenido lo cual evita deformaciones y tensiones y aporta plasticidad.

En ocasiones, para aceros poco aleados puede llegar a sustituir al temple y revenido, tratando de obtener una estructura perlítica laminar cuya dureza y resistencia es suficiente para los requerimientos de servicio.

3.2.2 RECOCIDO

Con el nombre de recocido se clasifican varios tipos de tratamientos cuya finalidad es “ablandar” el acero para facilitar operaciones posteriores como mecanizado o conformado en frío. En otras ocasiones se puede buscar además regenerar la estructura o eliminar tensiones internas. Para ello se emplean generalmente calentamientos a las temperaturas adecuadas dependiendo de la finalidad, seguido de enfriamientos muy lentos.

Los recocidos no proporcionan, generalmente, las propiedades y características más adecuadas para la utilización del acero. El recocido se trata por tanto como un tratamiento térmico preliminar al que posteriormente le seguirán tratamientos de calidad con el fin de obtener las características óptimas para su uso.

Recocido de Austenización completa o de Regeneración

Este tipo de recocido consiste en elevar la temperatura entre 20-50°C por encima del punto A_{c3} para transformar la estructura en austenita para después dejar enfriar lentamente en el interior del horno. El tiempo de mantenimiento en este caso debe ser el mínimo necesario para que la pieza quede térmicamente homogénea.

Este tratamiento permite afinar el grano grueso que regenera la estructura deteriorada por procesos de forja o laminación anteriores.

Recocido de Homogenización

El recocido de homogenización se emplea para reducir la heterogeneidad de composición química producto de la solidificación o transformaciones en caliente.

La temperatura que se alcanza en este tratamiento se encuentra muy por encima del punto A_{c3} y se aplica un largo mantenimiento antes de enfriar lentamente en horno.

Recocido Globular

Este recocido se emplea con el objeto de conseguir una estructura de dureza muy baja que permita el mecanizado de aceros altamente aleados.

Este tratamiento globular se puede realizar mediante recocidos subcríticos, oscilantes de austenización completa. El tratamiento subcrítico se realiza a temperaturas muy próximas pero inferiores a A_{c1} , mientras que la austenización incompleta supera esta temperatura crítica. Por su parte, en el recocido oscilante, se calienta hasta el punto crítico A_1 , y se realiza un proceso de enfriamiento y calentamiento alterno en torno al punto A_1 .

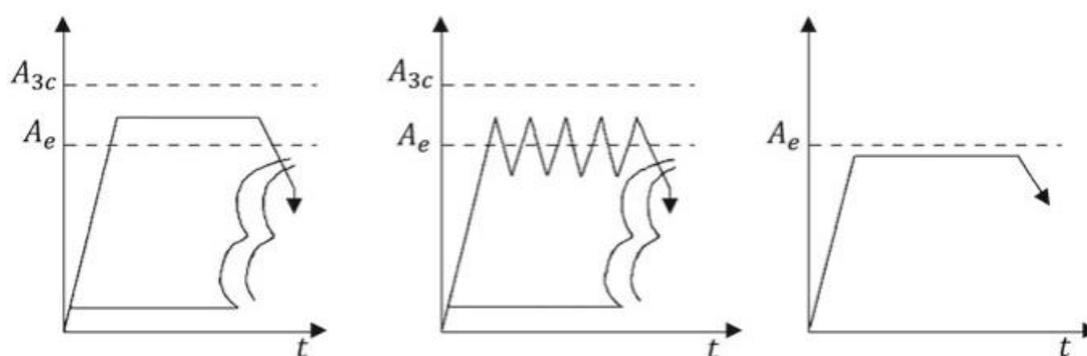


Figura 8. Tipología de tratamientos de recocidos globulares (Verdeja González, Fernández-González, Verdeja González 2023).

Recocido contra Acritud

El recocido contra acritud se realiza en aceros que han sufrido deformaciones en frío como laminados o trefilados con el objeto de aumentar su ductilidad.

3.2.3 TEMPLE

El temple es un tipo de tratamiento realizado con el fin de endurecer y aumentar la resistencia del acero. El proceso consiste en un calentamiento a temperatura de temple seguido de un mantenimiento a una temperatura ligeramente superior a la temperatura crítica superior, para después enfriar rápidamente con una velocidad mínima llamada "crítica". También se puede referir al temple como un tratamiento por el cual, desde un punto de vista termodinámico, se obtiene una estructura fuera de equilibrio. Esta estructura obtenida corresponde en la mayoría de las aplicaciones a

la martensita, lo que indica que generalmente se obtengan durezas y resistencias mecánicas mayores que las que se obtendrían en situaciones de equilibrio.

Lo que hace diferencial a este tratamiento de otros mencionados es el proceso de enfriamiento. El valor conocido como “velocidad crítica de temple” está definido por la velocidad mínima de enfriamiento que el tratamiento debe seguir para conseguir la transformación a martensita directamente sin sufrir transformaciones intermedias desde la austenita. Trasladando esto a un diagrama C.C.T., la curva de enfriamiento crítico es tangente a la curva C.C.T en el punto situado más a la izquierda en el diagrama.

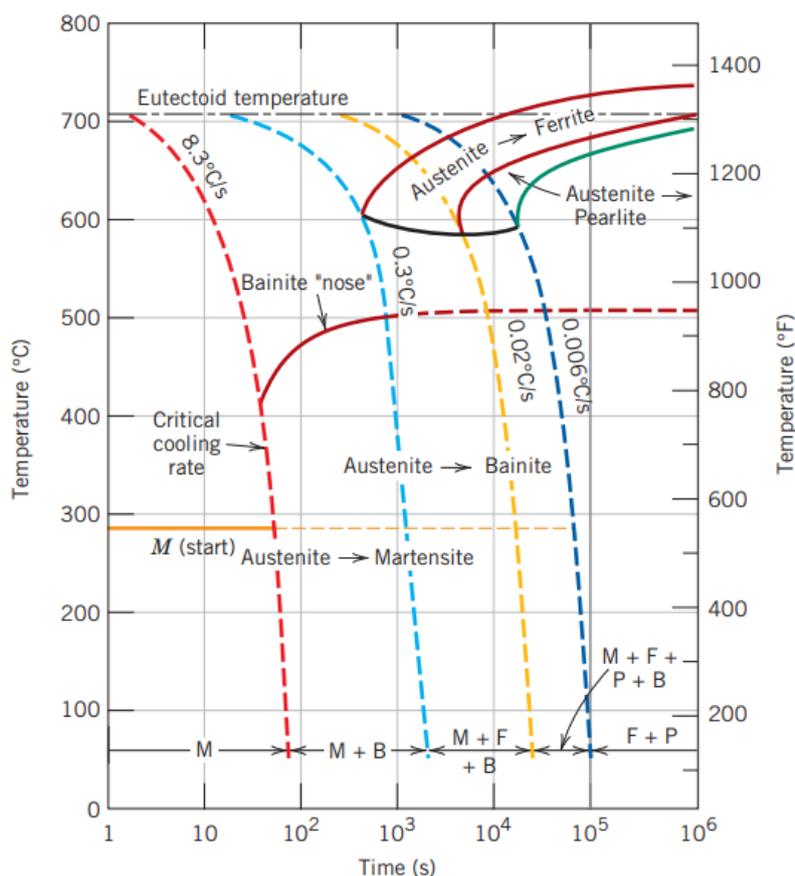


Figura 9. Curva de enfriamiento crítico sobre un diagrama C.C.T. (Callister 2012).

El tratamiento térmico del temple se ve influenciado por diversos factores como pueden ser el tamaño o geometría de la pieza, la composición química, el tamaño de grano o el medio empleado para su enfriamiento.

El primer factor mencionado tiene una gran influencia en términos de empapamiento y características finales de la pieza. Si bien los perfiles delgados presentan diferencias muy pequeñas de temperatura entre la periferia y el interior, esto se ve agravado en

piezas de gran espesor o diámetro. Como solución se emplean calentamientos más prolongados o escalonados, pero durante el enfriamiento, la situación es mucho más compleja de corregir. Puede suceder que la velocidad de enfriamiento del núcleo sea inferior a la crítica de temple, quedando sin templar y diferenciándose una capa templada en la pieza que parte desde la periferia. La capa templada, por tanto, aumenta su profundidad según disminuye el diámetro de la pieza.

Medios templantes

Además de los factores relacionados con el acero, otro factor determinante en el mecanismo del temple es la refrigeración del medio templante. Esta refrigeración viene representada por la severidad del temple, la cual se define como la intensidad con la que se enfría el material. Los medios templantes más habituales son los siguientes: aire, agua, aceite, sales o metales fundidos. El empleo de agua como medio templante, suele ir acompañado de un movimiento provocado del fluido conocido como "agitación". Al introducir una pieza caliente a altas temperaturas, el agua en contacto con la pieza se vaporiza instantáneamente rodeando completamente el redondo con una capa gaseosa que hace que el enfriamiento se produzca por radiación y conducción por esta capa. El empleo de agitación permite romper esta capa gaseosa y sustituir en la zona el fluido caliente por fluido más frío, aumentando la severidad del temple. Sin embargo, se debe encontrar siempre un equilibrio, que permita una velocidad de temple adecuada para el acero con la menor severidad posible, debido a que una refrigeración muy agresiva aumenta el riesgo de grietas, tensiones y deformaciones provocadas por altos gradientes de temperatura y diferencias de cambios de volumen.

3.2.4 REVENIDO

El revenido es un tratamiento térmico que generalmente acompaña al temple en el proceso de fabricación. Tras el temple, los aceros suelen presentar una excesiva dureza y fragilidad para su finalidad, por lo que el revenido viene a corregir y adecuar las características obtenidas de este tratamiento. Al uso conjunto de estos dos tratamientos se denomina "bonificado".

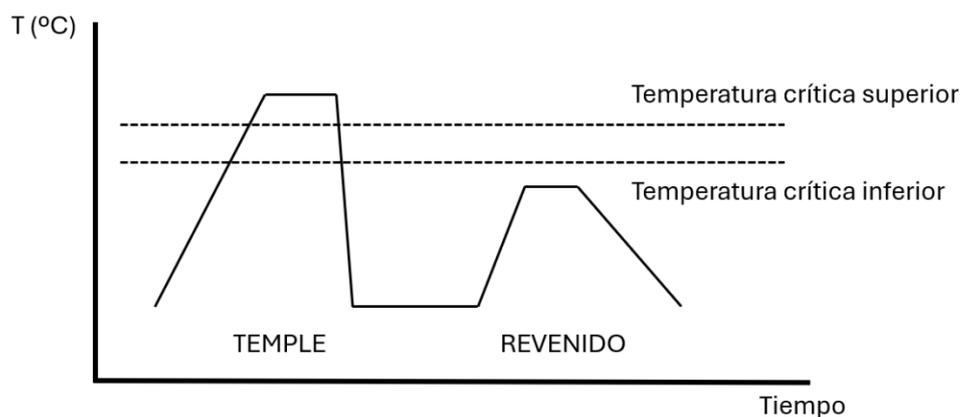


Figura 10. Esquema de temple y revenido.

El proceso del revenido consiste en calentar la pieza después de sufrir un temple o normalizado, a una temperatura inferior a A_{c1} , seguido de un enfriamiento a una velocidad controlada y determinada por los resultados de dureza, tenacidad o tensiones que se pretenden obtener. Los objetivos del temple son generalmente los siguientes: reducir la fragilidad del acero, disminuir las tensiones internas originadas por la transformación del temple o modificar las características mecánicas de la siguiente forma:

- Disminución de resistencia a rotura, dureza o límite elástico.
- Aumentar la ductilidad, alargamiento, estricción, resiliencia o tenacidad.

Factores del Revenido

Las principales variables que afectan al tratamiento de revenido son el estado inicial del acero, el tiempo y la temperatura. El estado inicial del cual parte el revenido, marca la evolución de la microestructura durante este tratamiento.

La temperatura definida para el revenido tiene su mayor influencia en la dureza obtenida. Aquellos aceros que requieren mayor tenacidad son sometidos a temperaturas de en torno a 500-650°C, mientras que otros como los aceros de herramientas, los cuales necesitan mayor dureza, se someten a revenidos con temperaturas inferiores.

3.3 HORNOS INDUSTRIALES DE GAS

Los hornos industriales de gas son equipos ampliamente asentados en numerosos procesos productivos industriales que requieren el calentamiento a muy altas temperaturas durante largos periodos de tiempo. Este tipo de hornos son especialmente importantes en el sector metalúrgico debido a su gran versatilidad con un amplio rango de temperaturas, bajo coste operativo y de mantenimiento con empleo en tratamientos térmicos de metales o como calentamientos de ablandamiento previos a procesos de deformación por flexión, forja, laminación y otro tipo de conformados. También admiten una fácil incorporación de sistemas avanzados de control automático mediante sensores y mecanismos de optimización de su funcionamiento. Estos sistemas incorporados, permiten una rápida puesta en marcha y responden con un estricto control de la temperatura que se traducen en una gran mejora de la calidad del tratamiento térmico y homogeneidad de calentamiento (Trinks 2004).

En un contexto industrial orientado a la sostenibilidad y eficiencia de recursos, los hornos de gas aportan un gran rendimiento energético a la vez que una buena adaptabilidad a diferentes procesos. El entendimiento de funcionamiento y optimización de sus procesos son cada vez más demandados para garantizar una buena rentabilidad operativa.

3.3.1 TIPOS DE HORNOS DE GAS

Los hornos de gas orientados a tratamientos térmicos del acero presentan distintas tipologías de funcionamiento y diseño en función de los procesos productivos involucrados, características de producto o nivel de automatización. La clasificación más representativa de los hornos de gas empleados en tratamientos del acero es la que diferencia entre hornos de lotes y hornos continuos.

Hornos de lote

Los hornos de lote son aquellos que únicamente son capaces de procesar una carga a la vez. El proceso engloba la carga del horno, el proceso del ciclo y la descarga del horno. Sin embargo, estos hornos son los adecuados para la personalización completa del tratamiento a llevar, con flexibilidad de piezas y tamaños, programación de rampas de calentamiento, mantenimiento y enfriamiento específicos del

tratamiento y demás ajustes concretos de cada ciclo. Por el contrario, los costes operacionales son mayores al presentar periodos de inactividad entre cargas y descargas. Los hornos de lotes más empleados son los siguientes:

- Horno de solera fija: son los hornos más sencillos y cuentan con una solera o base fija sobre la cual se cargan las piezas a tratar.
- Horno de solera móvil: Son los hornos más habituales para este tipo de tratamientos, y cuentan con una solera o plataforma que puede desplazarse fuera del horno mediante raíles o ruedas. La carga se realiza fuera del horno aportando una mayor rapidez y facilidad de manejo de grandes bienes. También aporta una mayor variabilidad de tipos de enfriamientos, pudiendo enfriar al aire extrayendo la solera, o interiormente.
- Horno de campana: Consta de una base fija en la cual se coloca la carga y una campana o estructura que se coloca sobre la carga y la base cubriéndola herméticamente. Este tipo de hornos destaca sobre los anteriores por una mayor homogeneidad térmica y un mayor control electrónico de las zonas al presentar también menores pérdidas de calor. Por el contrario, el proceso conlleva mayores movimientos de cargas, al tener que colocar tanto la pieza como la estructura manualmente.

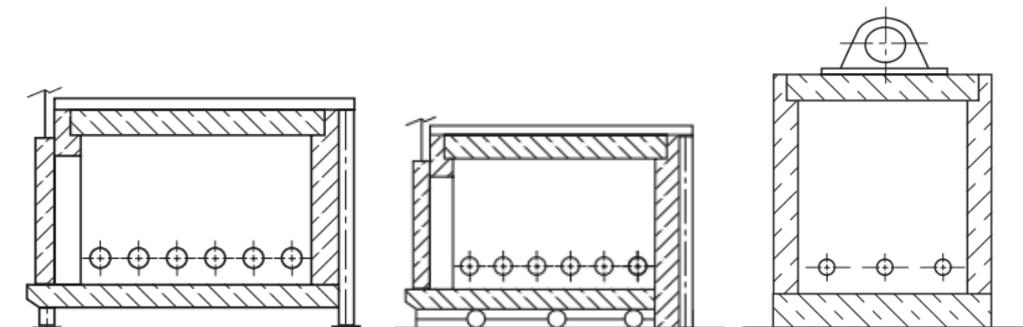


Figura 11. Hornos de solera fija, móvil y de campana. (Trinks 2004)

Hornos continuos

La operativa de los hornos continuos se basa en el calentamiento de las piezas a medida que se desplazan a lo largo de la estructura del horno mediante empujadores o cintas de rodillos. Este tipo de hornos se utilizan para la producción masiva o en línea de productos específicos aportando una mayor productividad y eficiencia al proceso. Sin embargo, la falta de flexibilidad y personalización de parámetros del

tratamiento requiere una mayor estandarización del producto y ciclos iguales y repetitivos para todas las piezas.

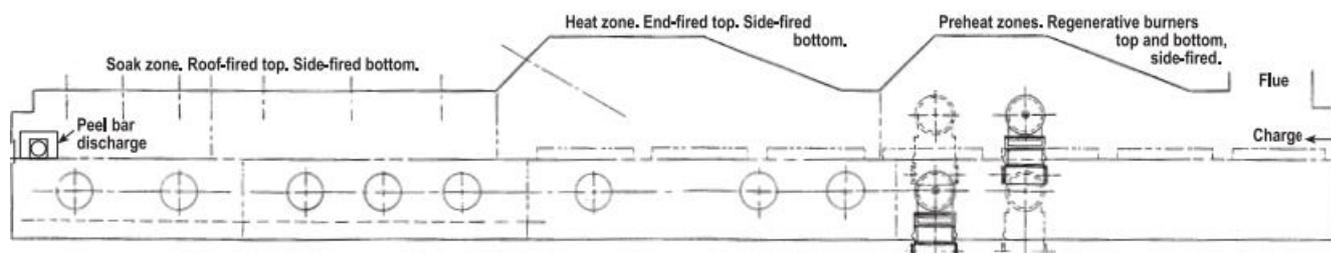


Figura 12. Horno continuo. (Trinks 2004)

3.3.2 MECANISMOS DE TRANSMISIÓN DE CALOR Y BALANCE DE ENERGÍA

En los hornos industriales de gas, el calor se obtiene de la transformación de la energía química que posee el combustible en los distintos quemadores. Este calor es posteriormente transmitido y distribuido a la carga cumpliendo con las especificaciones requeridas de uniformidad, temperatura y tiempo. El calor a impartir a la carga viene representado por el producto del peso, el calor específico y la diferencia de temperaturas.

$$Q = m \times c \times \Delta T$$

El calor específico representa la cantidad de energía necesaria para calentar una unidad de masa de una sustancia en un grado Celsius (°C) o Kelvin (°K). El calor específico de los metales no es constante, sino que varía con la temperatura. A mayor temperatura, generalmente aumenta el calor específico al necesitar más energía para seguir incrementando la temperatura.

Otras variables de interés en los tratamientos térmicos son la conductividad y la difusividad térmica. La conductividad (k), representa la capacidad de un material para transmitir el calor a través de él por conducción y tiene una gran influencia en la evolución de la distribución de temperaturas en el interior de las piezas. La conductividad es también una variable que se ve ampliamente afectada por los elementos de aleación como se puede ver en la Figura 13. Es por esto por lo que cobra gran importancia la validación de modelos de simulación para el tipo de aleación involucrada como se plantea en 4.2.

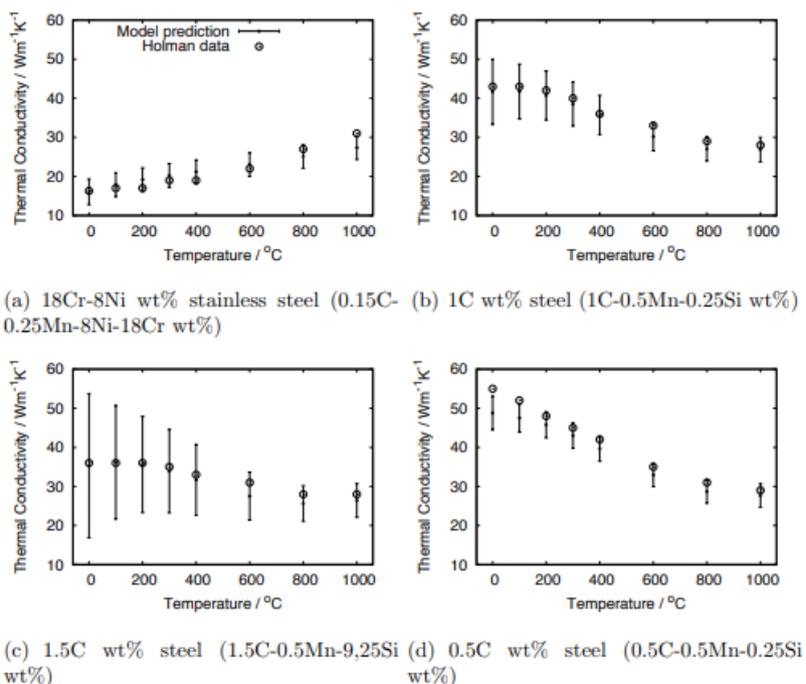


Figura 13. Curvas de conductividad para distintas aleaciones. (Peet, Hasan, Bhadeshia 2011)

La difusividad (α), representa cómo de rápido se propaga el calor dentro de una pieza. Cuanto mayor es esta relación, el material responde más rápidamente a la conducción del calor ya que almacena menor energía térmica.

$$\alpha \left(\frac{m^2}{s} \right) = \frac{k \left(\frac{W}{mK} \right)}{c \left(\frac{J}{kgK} \right) \times \rho \left(\frac{kg}{m^3} \right)}$$

En los hornos, la transmisión de calor se lleva a cabo por tres métodos: conducción, convección y radiación. En la realidad, el calor se transmite en el horno por medio de una compleja combinación de las tres formas anteriores.

- Conducción: la transmisión entre dos sólidos se produce por medio del traspaso del calor por la superficie de contacto entre ellos. Es la menos representativa de las tres, y se puede presentar en el contacto entre las piezas y los soportes de la solera sobre la que están posadas.
- Convección: este método combina la conducción y el movimiento de fluidos que transportan moléculas calientes en la superficie. Al existir un gradiente de temperaturas entre sólido y fluido y un movimiento del fluido, se forma una capa límite térmica en la cercanía de la superficie sólida, que representa la transición

progresiva de temperatura entre sólido y fluido. Mediante la circulación forzada de los gases en el interior del horno, se busca que las moléculas en movimiento y las de los gases estacionarios o lentos de la capa se mezclen, reduciendo el espesor de la capa límite y aumentando la transmisión de calor. El coeficiente de convección (h_c) cuantifica la eficiencia de transmisión por convección.

$$\frac{Q_{convección}}{A} = h_c \left(\frac{W}{m^2 K} \right) \times (T_s - T_f)$$

- Radiación: recoge la transmisión de calor por medio de ondas electromagnéticas. En los hornos, los componentes metálicos, las llamas de los quemadores y los propios gases emiten y transfieren calor por radiación. El calor transmitido por radiación de un cuerpo caliente hacia uno más frío es la diferencia entre el calor radiado por el sólido caliente hacia el frío y el radiado por el cuerpo frío al caliente. Expresión en W/m^2 :

$$\frac{Q}{A} = 5,67 \times \varepsilon \times \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

La radiación es la transmisión predominante a altas temperaturas, a medida que los componentes aumentan su temperatura y emiten mayor cantidad de calor.

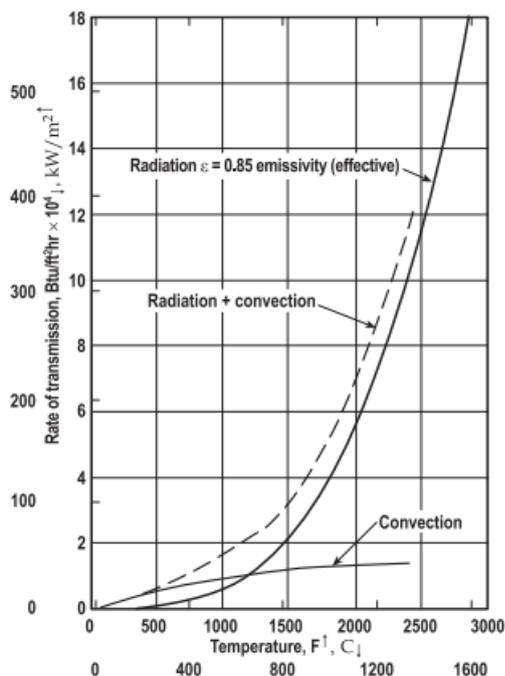


Figura 14. Comparación del poder relativo de radiación y convección para distintas temperaturas (Trinks 2004).

En un horno real, los elementos sólidos del horno, tanto la carga como los soportes y las paredes, se calientan desde la superficie por convección. Estas superficies radian a su vez en todas las direcciones, al igual que lo hacen las moléculas de los gases. Estas interacciones entre convección y radiación entre todos los elementos crean un modelo en el que es complejo calcular con exactitud las transmisiones de calor. A esto se suma, la gran cantidad de variables que intervienen en el proceso: cargas, temperatura, composición, velocidad de calentamiento, superficies expuestas, emisividades, o estado general del horno.

Balance de energías

Mediante un elemento volumen de control del interior del horno, se puede aproximar un balance de energías basado en el principio de conservación de la energía. Este modelo recoge que el calor generado por la fuente de energía o energía entrante, en este caso la combustión de gas, es igual a la energía que sale. La energía saliente se puede dividir en energía almacenada y energía que sale en forma de pérdidas:

$$\text{Energía de entrada} = \text{Energía almacenada} + \text{Energía de salida o pérdidas}$$

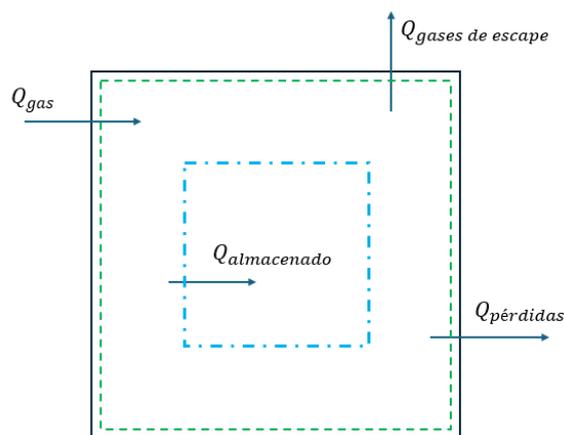


Figura 15. Balance de energía de horno y pieza.

$$Q_{gas} = Q_{almacenado} + Q_{refractario} + Q_{gases de escape} + Q_{pérdidas}$$

Siendo:

- Q_{gas} : energía térmica proporcionada por la combustión del gas natural.
- $Q_{almacenado}$: energía absorbida por las piezas para aumentar su temperatura hasta la temperatura de consigna.

- $Q_{refractario}$: fracción de energía saliente por los elementos aislantes, la cual depende de las características refractarias de los materiales.
- $Q_{gases\ de\ escape}$: energía que se pierde por la chimenea del horno y que contienen los gases calientes de escape.
- $Q_{pérdidas}$: recoge el resto de la energía perdida por distintos medios: fugas por aberturas, conducción por paredes y soportes, ineficiencias de los quemadores o radiación al exterior.

Entendiendo este reparto de calor, se establece la expresión de representa la eficiencia del horno, comparando el calor suministrado con el calor que se destina al objetivo de calentar la pieza:

$$\eta (\%) = \frac{Q_{almacenado}}{Q_{gas}} \times 100$$

3.3.3 DESCRIPCIÓN DE HORNOS UTILIZADOS (25 Y 31)

Los hornos 25 y 31 utilizados en el estudio estadístico de consumo se clasifican como hornos de solera móvil. El horno consiste en una cámara de combustión en forma de paralelepípedo rectangular con los quemadores instalados a uno de los lados. El producto a calentar se posiciona en el carro, con los separadores correspondientes, siendo éste introducido en el horno mediante un motorreductor que acciona a una cremallera solidaria al carro. Dicho carro está revestido por diversas capas de hormigones refractarios y aislantes.

La carcasa de los hornos (laterales, bóveda y puerta) está formada por paneles de entramado metálico fuertemente armado y recubiertos interiormente por módulos de fibra cerámica. El cierre del horno se consigue mediante una junta o puerta elevable con cierre de fibra cerámica.

Los humos producidos en la combustión son evacuados a través de 4 salidas de humos situadas a nivel de la solera. Los humos correspondientes a estas salidas son recogidos por un colector en la fachada del horno que los conduce hasta la chimenea de salida al exterior de la nave.

La instalación de los hornos está compuesta por zonas de regulación de dos quemadores situados a 225 milímetros de la solera, de forma que los gases pasen

por debajo de la carga. La regulación de los quemadores se realiza mediante un sistema de control pulsatorio gobernado por un PID en cada zona y cuyas entradas de lazos son termopares que miden la temperatura de cada una de las zonas.

En la siguiente tabla se recogen las características técnicas individuales de cada zona:

	HORNO 25	HORNO 31
Nº Quemadores	10	8
Nº Zonas de regulación	5	4
Potencia	2200 th/h	1640 th/h
Presión de suministro de gas	2.5 bar	2.5 bar
Temperatura máxima	1100 °C	1050°C
Longitud de la cámara	10290 mm	9400 m
Anchura de la cámara	2840 mm	2800 mm
Altura de la cámara	2500 mm	2400 mm

Tabla 1. Tabla de características de los hornos empleados.

3.4 GENERALIDADES DEL SOFTWARE MAGMASOFT

MAGMASOFT es un software desarrollado por la empresa alemana MAGMA GmbH orientado a la simulación, optimización y desarrollo de procesos de fundición. La herramienta está basada en el análisis de elementos finitos (FEA), siendo referente mundial en simulación de procesos de fundición de metales (*MAGMASOFT®*).

El software está diseñado para abarcar toda la cadena de procesos involucrados en el proceso de fundición, desde el vertido del material líquido, flujo y distribución dentro del molde, proceso de enfriamiento y solidificación, hasta el análisis térmico posterior. Además de esto, el programa también permite el estudio y predicción de microestructuras, tensiones térmicas o deformaciones.

Entre los principales beneficios de su aplicación se encuentran la mejora de la calidad, permitiendo detectar y corregir defectos de fundición, mejora de diseño de moldes y

sistema de colada y reducción de costos, permitiendo suprimir los prototipos por sistemas e iteraciones virtuales.

Aunque la principal funcionalidad de magma es el proceso de fundición, el programa incluye un módulo dedicado a la simulación de los tratamientos térmicos de temple y revenido posteriores a la solidificación. Esta sección es de gran interés para este proyecto, permitiendo simular y estudiar el comportamiento y evolución de temperaturas de una pieza a lo largo de un tratamiento, ajustando las curvas de propiedades, las temperaturas y la duración del ciclo.

3.5 ESTADÍSTICA ANALÍTICA

3.5.1 PRUEBA DE KOLMOGOROV-SMIRNOV (K-S)

La prueba de Kolmogorov-Smirnov se emplea para comprobar la hipótesis nula que establece que un conjunto de datos presenta una distribución similar a una teórica de partida. Si esta distribución teórica es la normal, este test pasa a ser una alternativa para evaluar el grado de normalidad de una muestra de datos (Kanji 2009).

Hipótesis:

- H_0 La muestra sigue la distribución teórica especificada (normal).
- H_1 : La muestra no sigue la distribución teórica.

Estadístico D:

$$D = \max|Fn(x) - F(x)|$$

Siendo:

- $F_n(x)$: función de distribución empírica de la muestra,
- $F(x)$: es la función de distribución teórica.

Interpretación del p-valor: Si $p < 0.05$, se rechaza H_0 y se concluye que la muestra no sigue la distribución igual a la teórica, es decir, no sigue una distribución normal con un nivel de significancia del 95%.

3.5.2 PRUEBA t

La prueba t de Student es una prueba estadística empleada para determinar si existe una diferencia importante o significativa entre las medias de dos grupos de datos independientes (Nguyen 2023). Este test asume, además de la independencia, la normalidad de los conjuntos.

Hipótesis:

- $H_0 : \mu_1 = \mu_2$
- $H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$

Estadístico t:

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{s_p^2 \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}}$$

Siendo:

- \bar{X}_1 : media de cada grupo,
- s_p^2 : varianza combinada,

$$s_p^2 = \frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

- n_i : tamaño muestral de cada grupo.

Interpretación del p-valor: $p < 0.05$, se rechaza H_0 y se establece que hay una diferencia significativa entre las medias.

3.5.3 PRUEBA U DE MANN-WHITNEY

La prueba U de Mann-Whitney es una prueba estadística no paramétrica empleada para determinar si dos muestras independientes pueden venir de dos poblaciones distintas con la misma distribución (Brownlee 2018).

Hipótesis:

- H_0 : Las distribuciones de los dos grupos son iguales.
- H_1 : Las distribuciones de los grupos son diferentes.

Estadístico U:

$$U_1 = n_1 n_2 + \frac{n_1(n_1 + 1)}{2} - R_1$$

$$U_2 = n_1 n_2 + \frac{n_2(n_2 + 1)}{2} - R_2$$

$$U = \min(U_1, U_2)$$

Siendo:

- R_1 : suma de los rangos del grupo 1,
- R_2 : suma de los rangos del grupo 2,
- n_1, n_2 : tamaños muestrales.

Interpretación del p-valor: Si $p < 0.05$, se rechaza la hipótesis nula y se considera que hay diferencias significativas entre grupos.

3.5.4 PRUEBA DE KRUSKAL-WALLIS

La PRUEBA H de Kruskal-Wallis es una prueba no paramétrica empleada para determinar si dos o más grupos independientes tienen la misma distribución. Se puede plantear la prueba como una generalización de la prueba U de Mann-Whitney, en la que, a diferencia de esta, se permite la comparativa de más de dos muestras (Kanji 2009).

Hipótesis:

- H_0 : Las distribuciones son iguales.
- H_1 : Al menos un grupo difiere significativamente de los demás.

Estadístico de Kruskal-Wallis:

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{j=1}^k \frac{R_j^2}{n_j} - 3(N+1)$$

Siendo:

- N: número total de observaciones,
- k : número de grupos,
- R_j suma de rangos del grupo j,
- n_j : tamaño del grupo j.

Interpretación del p-valor: Si $p < 0.05$, se rechaza H_0 y se concluye que existen diferencias importantes entre al menos dos grupos.

3.5.5 CORRELACIÓN DE SPEARMAN

La correlación de Spearman es un análisis no paramétrico utilizado para investigar la significancia o relación creciente o decreciente entre dos grupos de observaciones (Kanji 2009).

Cálculo del coeficiente de Spearman:

En primer lugar, se transforman los datos a rangos. Después se obtiene la diferencia de los rangos para cada par de observaciones mediante:

$$d_i = R(x_i) - R(y_i)$$

Y después se calcula el coeficiente de correlación:

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_j^2}{n(n^2 - 1)}$$

Siendo:

- d_i : diferencia de rangos
- n : número de pares

Interpretación:

- $\rho = +1$: La correlación es perfectamente creciente o positiva.
- $\rho = -1$: La correlación es perfectamente decreciente o negativa.
- $\rho = 0$: No existe correlación.

3.5.6 REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE

La regresión lineal múltiple involucra múltiples variables independientes para modelar o calcular su relación con una variable dependiente (Nguyen 2023).

Expresión de la regresión:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n$$

Siendo:

- β_0 : intercepto
- β_i : coeficientes de regresión.

La salida de un test de este tipo es como sigue:

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,79805337
Coefficiente de determinación R ²	0,63688917
R ² ajustado	0,62797895
Error típico	4,41819387
Observaciones	489

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	10	16400,22177	1640,022177	93,3507205	1,1115E-105
Residuos	479	9350,289347	19,52043705		
Total	489	25750,51112			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	14,0079214	3,910595824	3,582042748	0,00037577	6,323878823	21,691964	6,32387882	21,691964
NORMALIZADO	8,98477013	2,016421032	4,455800644	1,0416E-05	5,022646255	12,946894	5,02264625	12,946894
DURACIÓN	8,47001303	2,033160213	4,165934869	#¡NUM!	4,474997848	12,4650282	4,47499785	12,4650282
TEMPERATURA	1,39032142	1,233603252	1,127040983	0,26028942	-1,033621209	3,81426405	-1,03362121	3,81426405
TEMP INICIAL	-1,32813116	0,560969186	-2,367565261	0,01830196	-2,430395699	-0,22586661	-2,4303957	-0,22586661
CARGA	-17,9821393	1,239160969	-14,51154429	8,2354E-40	-20,41700243	-15,5472761	-20,4170024	-15,5472761
Nº PIEZAS	-0,16871763	0,118854991	-1,419524951	0,15639647	-0,402259227	0,06482398	-0,40225923	0,06482398
COEF DIM	-3,33755521	1,496218986	-2,230659576	0,02616601	-6,277519072	-0,39759134	-6,27751907	-0,39759134
CQ	0,77546898	0,784787151	0,988126497	0,32358957	-0,766581943	2,3175199	-0,76658194	2,3175199

Figura 16. Ejemplo de datos de regresión.

En este ejemplo, se presenta una regresión cualquiera realizada sobre un conjunto de datos con tamaño muestral 489, una variable objetivo y 8 variables dependientes. Los principales parámetros y su valoración se describen a continuación:

- R² ajustado: varía entre 0 y 1, y se relaciona directamente con la confianza de la predicción. Indica la fracción del efecto que tienen las variables dependientes sobre la objetivo. En este ejemplo, el 63% del comportamiento de la variable objetivo puede explicarse mediante el modelo que resulta de esta regresión.
- Valor crítico de F: es el valor de la probabilidad p resultante de un test estadístico con la siguiente hipótesis nula:

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots \beta_n = 0$$

Siendo n el número de variables dependientes. La hipótesis nula significa que, al ser todos los coeficientes de las variables nulos, todas ellas son independientes de la variable objetivo. Por tanto, rechazar la hipótesis nula con valores p menores de 0.05 nos permite afirmar con un 95% de confianza que al menos una de ellas guarda relación lineal con dicha variable.

- Estadístico t de cada una de las variables: tras demostrar que al menos una de las variables guarda relación lineal, este paso permite comprobar el grado de

ajuste lineal de cada una de ellas separadamente con la variable objetivo. Este valor es el resultado de un test t de Student en el que se establece que:

- $H_0 : \beta_i = 0$
- $H_1 : \beta_i \neq 0$

Siendo i la variable de estudio y variando este número hasta alcanzar la variable n .

En este caso, valores de $p < 0.05$ permiten rechazar H_0 y concluyen que la variable en estudio tiene un efecto significativo sobre la variable dependiente. De manera inversa, si no es posible rechazar la hipótesis nula tendríamos que valorar el excluir dicha variable de nuevos análisis, porque su presencia puede, en principio, perjudicar al ajuste del modelo.

4 INVESTIGACIONES PARA LA OPTIMIZACIÓN DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS

4.1 ESTUDIO ESTADÍSTICO DE CONSUMO DE GAS EN HORNOS

4.1.1 DATOS DE PARTIDA Y SU ESTRUCTURA

El estudio estadístico comienza con la definición y estructuración de la información más relevante a observar, qué variables deben obtenerse, población y muestras del estudio. Para ello, se diseña en primer lugar la metodología de extracción de datos basada en la interconexión de tres sistemas distintos de almacenamiento de datos y control de la producción. Estos tres sistemas empleados, también se pueden diferenciar por los tipos de variables que se obtienen de cada uno de ellos.

Para la prueba estadística se cuenta con históricos de dos hornos de tratamientos térmicos de la fábrica conocidos como hornos 25 y 31 con señal de consumo de gas acumulado. Las fechas abarcadas por los históricos de los hornos son las siguientes:

- H25: 15/04/2015 - 31/03/2025
- H31: 15/09/2022 – 31/03/2025

Para la evaluación estadística se plantea la obtención de una serie de variables relacionadas con las hornadas que son de interés para posteriores análisis. En primer lugar, se emplean bases de datos departamentales para la adquisición de datos relacionados con la producción, como son los números identificadores de hornadas, coladas, órdenes de fabricación (OFs), fechas de producción, tipo de tratamiento, temperatura máxima y cargas de hornadas o tipos de piezas entre otros datos. Mediante búsquedas y consultas SQL de Microsoft Office Access, se organizan, filtran y combinan grandes grupos de datos según los criterios más adecuados. Organizando las búsquedas por fechas, se extraen los datos históricos comprendidos entre las fechas solicitadas incluyendo los datos específicos de cada variable para cada código de hornada.

Por otro lado, se emplea el sistema SAP ERP para la obtención de datos dimensionales de las piezas involucradas en las hornadas previamente consultadas en las bases de datos. SAP es una herramienta de software integral de gestión y planificación de recursos empresariales que permite la organización e integración

centralizada de la información de producción de todos los departamentos en una sola plataforma. A partir de los códigos de las piezas de las hornadas obtenidos por medio de las consultas SQL, se extraen de SAP las variables de diámetro máximo y longitud

La tercera vía utilizada es el sistema Experion PKS (Process Knowledge System) de Honeywell. Esta es una plataforma de automatización y control avanzado que adopta hardware y software para optimizar, programar y controlar los procesos productivos. En este caso, es el sistema utilizado para el control de los procesos de tratamientos térmicos. Combina comunicadores SCADA, bases de datos y sensorización relativa a caudalímetros de consumo de gas y termopares de zona del interior de los hornos. Mediante este sistema se pueden observar y extraer las gráficas de consumo y temperaturas de los distintos tratamientos térmicos. De este sistema se exportan los valores de consumos anteriores, posteriores y total del ciclo térmico en Nm³, temperatura inicial del tratamiento, y la temperatura máxima del tratamiento, la cual se corrobora con el valor obtenido de Access.

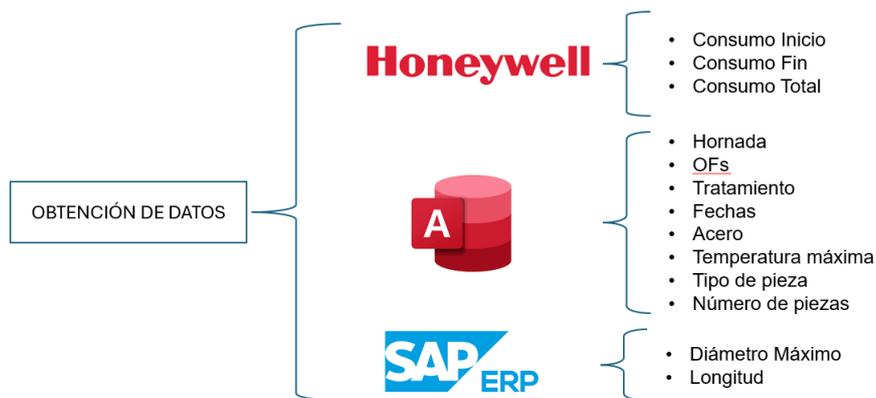


Figura 17. Diagrama de obtención de datos.

Las gráficas de consumos se pueden presentar de dos formas distintas: curva de consumo instantáneo (Nm³/h), o consumo acumulado (Nm³). Este último es el caso que se presenta para los dos hornos disponibles en los que el consumo perteneciente a cada tratamiento se obtiene de restar el valor del caudalímetro de gas inmediatamente posterior a la finalización del tratamiento y el valor inmediatamente anterior al comienzo de este.

Para este estudio, Una vez extraídas todas las variables necesarias para los análisis estadísticos, se combinan y organizan por código de hornada, de forma que se tiene una distribución de datos estructurada y organizada. Después, se realiza un filtrado

manual de los datos de forma que se eliminan todas aquellas hornadas que presentan errores o valores vacíos para alguna de las variables involucradas. También se analizan las hornadas con valores anómalos de consumo que pueden distorsionar los resultados de futuros análisis. La distribución de hornadas disponibles para cada tratamiento y horno se recoge en la Tabla 2.

	H25	H31	PROPORCIÓN SOBRE EL TOTAL
TEMPLE	0	52	9,5%
NORMALIZADO	194	14	38%
REVENIDO	206	37	45%
RECOCIDO ABLANDAMIENTO	17	4	3,9%
RECOCIDO GLOBULAR	3	0	0,5%
RECOCIDO DE REGENERACIÓN	2	1	0,5%
DISTENSIONADO	14	0	2,6%

Tabla 2. Distribución de muestras de tratamiento por horno.

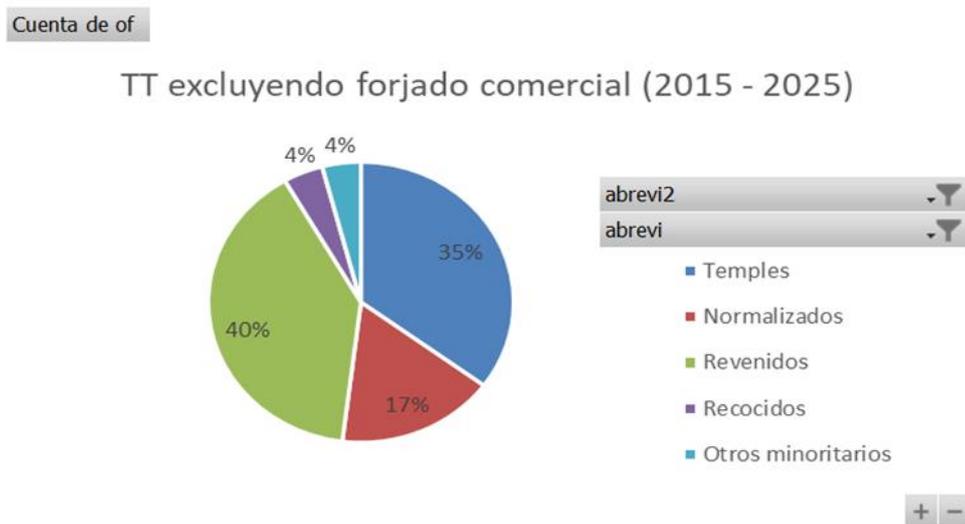


Figura 18. Proporción de tratamientos en el taller.

Los datos que se han podido recabar representan una muy pequeña parte de las hornadas totales que se han efectuado en el taller de Piezas. Habiendo excluido las OFs consideradas como forjado comercial, que no ocupan el alcance de este

proyecto, resulta que la muestra representa globalmente un 5% de las OFs fabricadas desde 2015. Esto, teniendo en cuenta que se han muestreado 2 hornos frente a los 23 totales, es una conclusión que es a priori esperable.

Estos hornos, además, presentan sesgos en cuanto a las hornadas que se le asignan. Concretamente, son populares para los tratamientos de normalizado y no tanto para los temple. Esto se traduce en una muestra infrarrepresentada para los temple que hace muy difícil sacar conclusiones estadísticamente válidas en esa población.

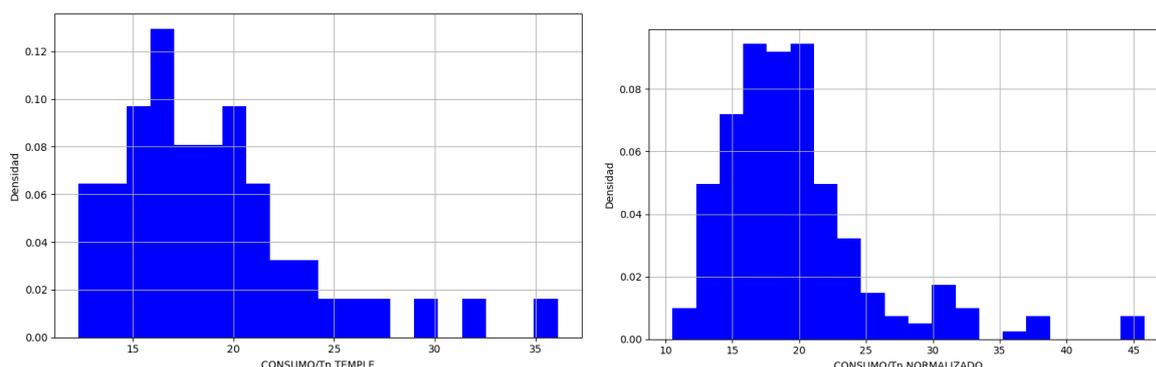
Los tratamientos de revenido, al seguir tanto a temple como a normalizados, son frecuentes en la muestra obtenida. Además, representan proporcionalmente una cantidad muy parecida a la proporción global que se observa en el Taller (cerca al 40 % de OFs). Sin embargo, como se verá más adelante, esta aparente virtud choca con la alta dispersión de los datos de consumo individuales de hornadas, haciendo imposible establecer un modelo predictivo preciso.

4.1.2 PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS

Para comenzar el análisis, se plantea la verificación de normalidad para las distribuciones de la variable objetivo “consumo de gas” en los distintos tratamientos térmicos. En este caso, se procesa la variable para reflejar el consumo de gas específico en metros cúbicos normales por tonelada (Nm³/Tn). La normalidad de las distribuciones se verifica ya que condiciona la elección de las pruebas estadísticas posteriores. Para este análisis se empleará la prueba de Kolmogorov-Smirnov (K-S) obteniendo los siguientes resultados.

	TEMPLE	NORMALIZADO	REVENIDO
Valor p	0,21	0,00026	6,29x10 ⁻¹⁰

Tabla 3. Valores p para prueba K-S.



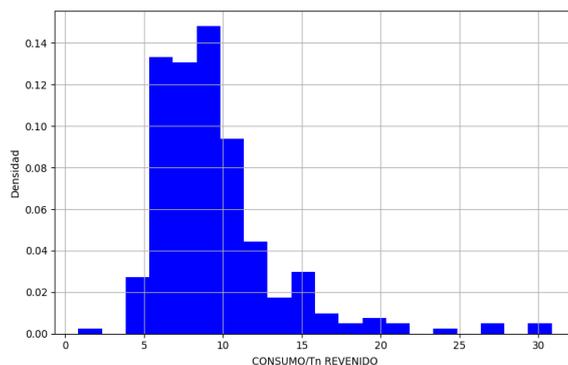
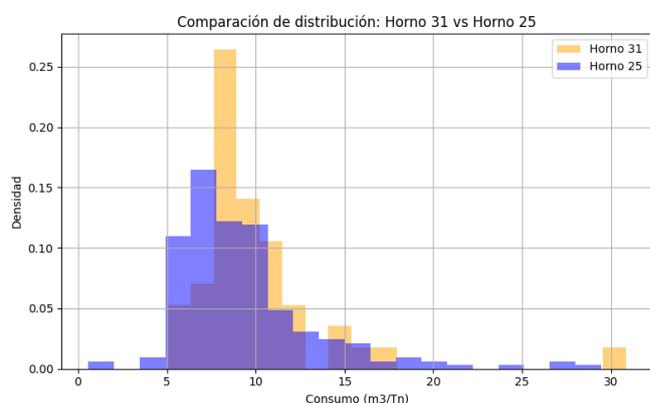


Figura 19. Distribuciones de densidad para los distintos tratamientos.

La prueba (K-S) rechaza la hipótesis para el normalizado y el revenido indicando evidencia suficiente para justificar que las distribuciones son diferentes a la normal, mientras que no lo hace para el caso de los temples.

A continuación, se estudia la posibilidad de que exista una diferencia de eficiencia entre los dos hornos disponibles, de modo que sea necesario reflejar esta diferencia en los resultados finales subdividiendo los datos por horno. Para este estudio, se comparan los tratamientos de revenido realizados en ambos hornos, ya que éste es el único tratamiento que coincide con una muestra de tamaño razonable en ambos hornos. Se emplea la prueba no paramétrica U de Mann-Whitney, debido a la no normalidad de las distribuciones, con un nivel de significancia del 5%.



	Mann-Whitney
Valor p	0,089

Figura 20. Comparación de distribuciones entre hornos 25 y 31.

La prueba U de Mann-Whitney no rechaza la hipótesis nula, por lo que se puede evidenciar que no hay una diferencia significativa entre los dos hornos y se puede continuar tratando los datos conjuntos de ambos.

Para profundizar en el análisis se propone dividir los grupos de tratamiento en un primer instante por tipo de pieza, estableciendo un límite en aquellas piezas cuyo número de muestra es inferior a las 10 unidades, en cuyo caso se agrupan todas bajo una misma categoría.

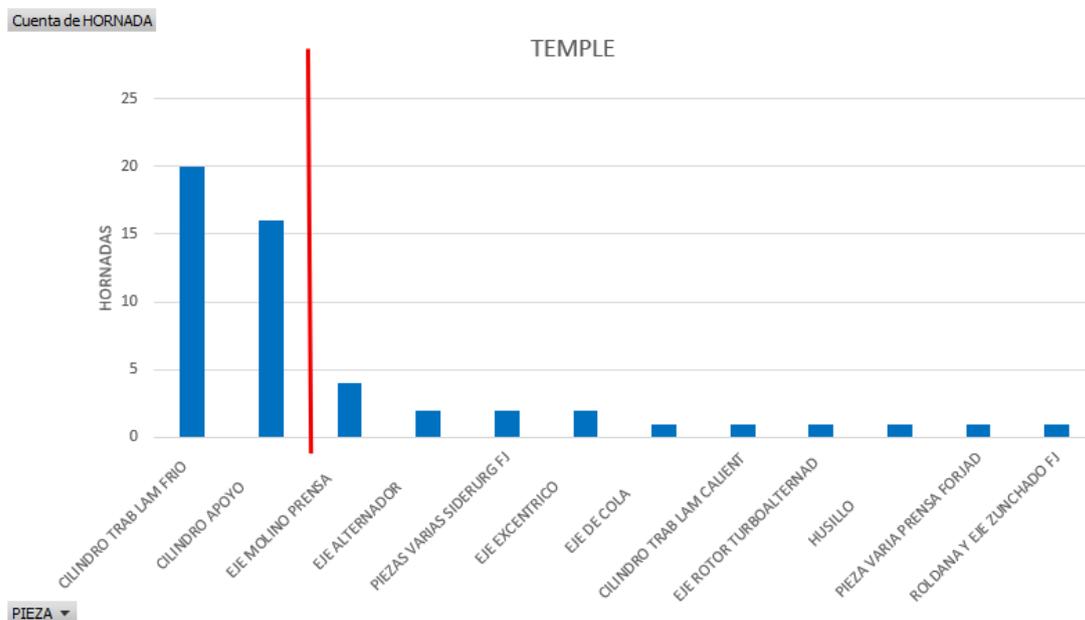


Figura 21. Recuento de hornadas de temple por tipo de pieza.

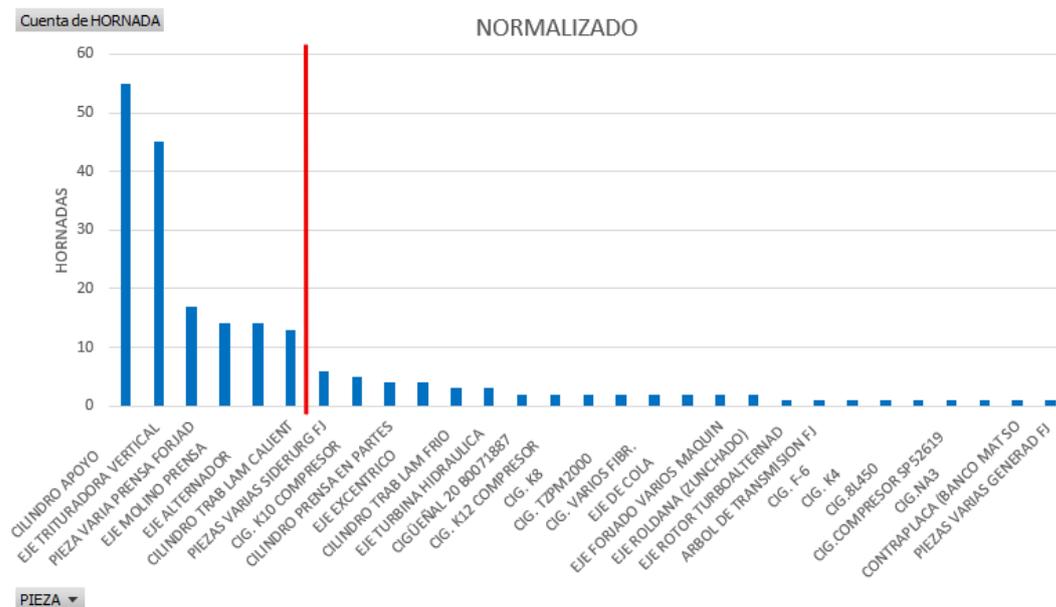


Figura 22. Recuento de hornadas de normalizado por tipo de pieza.



Figura 23. Recuento de hornadas de revenido por tipo de pieza.

Esta división se toma como válida para el caso del temple debido al número limitado de muestras que se presentan. Por el contrario, este tipo de agrupación incurre en la asociación en un mismo grupo de un gran número hornadas de piezas muy distintas entre sí y cuya variabilidad dimensional es muy alta, por lo que se descarta esta división para el normalizado y el revenido. Como alternativa de división, se calcula un coeficiente dimensional resultado de dividir la longitud de la pieza entre su diámetro máximo. En siguientes párrafos, este coeficiente toma el nombre de L/D. De esta manera, se obtiene una agrupación más homogénea con piezas que se pueden considerar equivalentes en términos dimensionales. Además, permite incorporar al modelo la cola de hornadas de tipo de pieza muy poco frecuentes.

Se procede a realizar la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para buscar diferencias significativas entre el consumo de gas de las diferentes agrupaciones del parámetro dimensional L/D. Estas variables son de naturaleza categóricas, y el test no paramétrico arriba mencionado es adecuado para su tratamiento.

NORMALIZADO (Nm3)					
L/D	<2,5	2,5-3,5	3,5-4,5	4,5-5,5	>5,5
Valor p	0.0001				
\bar{X}	1131,9	1108,1	1142,9	998,45	940,44
n	22	57	76	22	31

Tabla 4. Kruskal Wallis para normalizado (Nm3).

NORMALIZADO (Nm3/Tn)					
L/D	<2,5	2,5-3,5	3,5-4,5	4,5-5,5	>5,5
Valor p	0,0012				
\bar{X}	22,6	18	18,7	19,9	19,3
n	22	57	76	22	31

Tabla 5. Kruskal Wallis para normalizado (Nm3/Tn).

REVENIDO (Nm3)					
L/D	<2,5	2,5-3,5	3,5-4,5	4,5-5,5	>5,5
Valor p	0,0001				
\bar{X}	451,03	556,36	507,22	491,6	416,72
n	26	69	83	27	41

Tabla 6. Kruskal Wallis para revenido (Nm3).

REVENIDO (Nm3/Tn)					
L/D	<2,5	2,5-3,5	3,5-4,5	4,5-5,5	>5,5
Valor p	0,1591				
\bar{X}	11,5	9,88	8,63	9,38	8,77
n	26	69	83	27	41

Tabla 7. Kruskal Wallis para revenido (Nm3/Tn).

Como se puede observar en las tablas de Kruskal-Wallis, se rechaza la hipótesis nula para los grupos de normalizado tanto para el consumo total como para el consumo unitario como variable objetivo estableciendo que hay diferencias significativas para al menos dos grupos. Para el revenido se rechaza también la hipótesis nula para el consumo total como variable objetivo, pero contra intuitivamente no lo hace para el consumo unitario al tener un valor de p mayor que 0,05.

Para finalizar el análisis previo de los datos, se plantea un mapa de calor que representa la correlación de Spearman para cada uno de los tratamientos. Aquí se muestra el grado de correlación de cada una de las variables consigo misma y las demás. Las columnas de especial interés para sucesivos estudios son “CONSUMO TT”, que representa el consumo total (Nm3) y “CONSUMO/Tn” representando el consumo unitario.

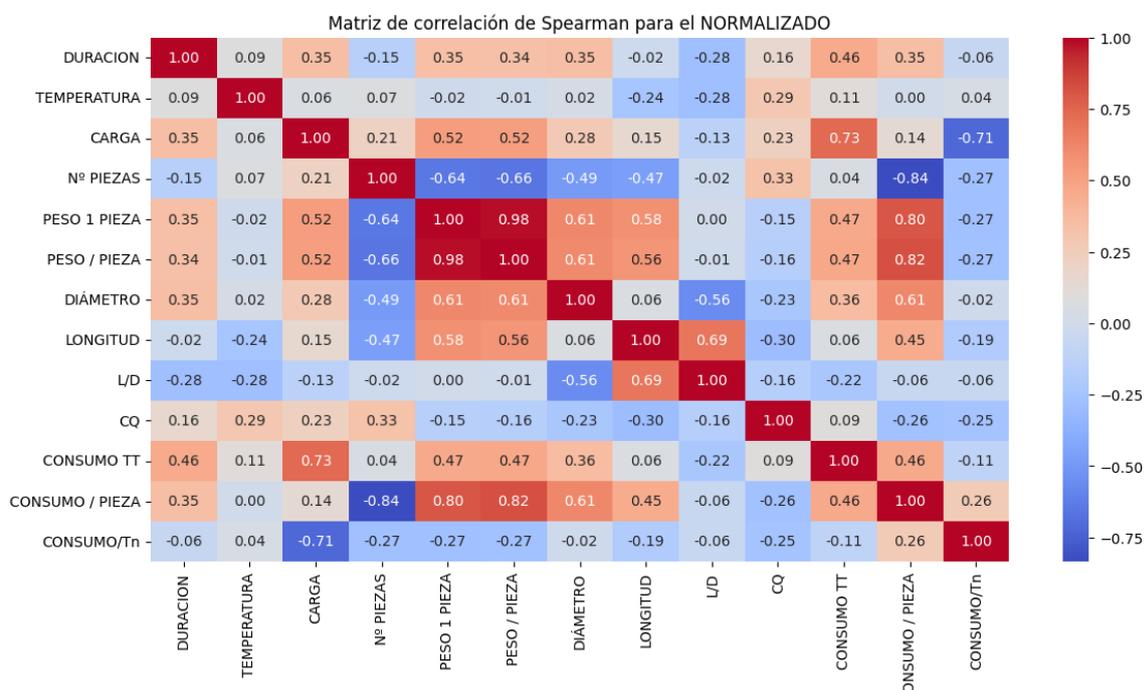


Figura 24. Matriz de correlación de Spearman para el normalizado.

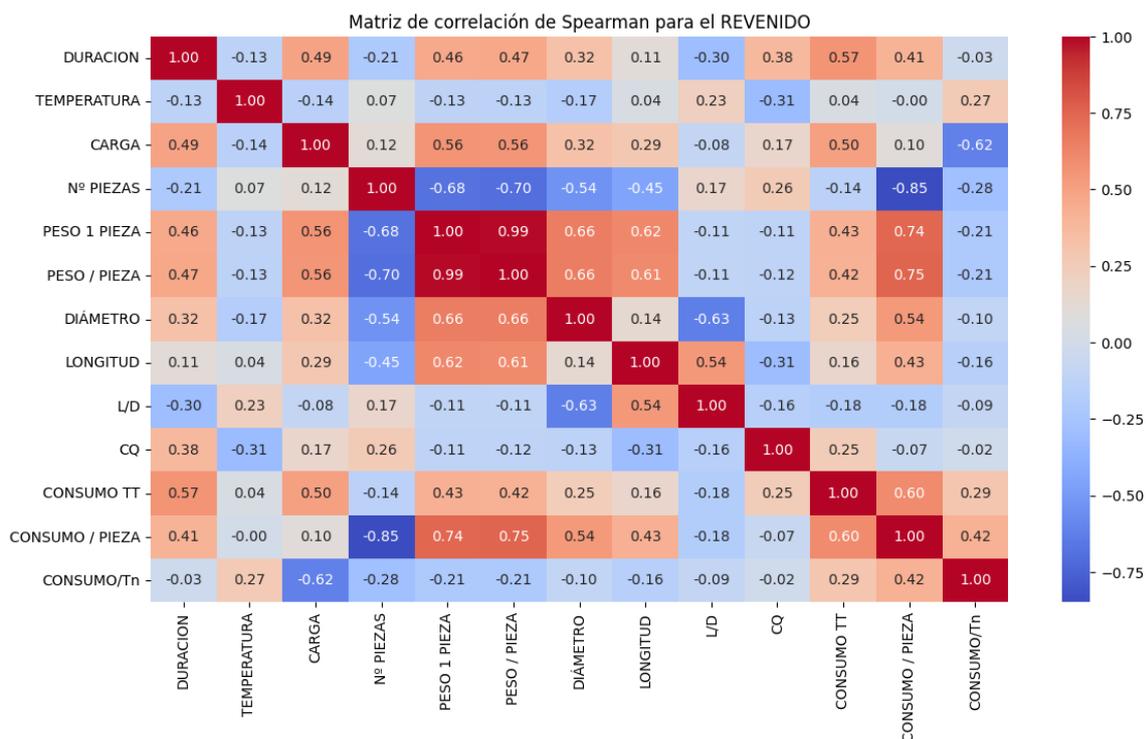


Figura 25. Matriz de correlación de Spearman para el normalizado.

La principal correlación esperable a priori es la relación directa del consumo con la carga del horno, la cual refleja claramente el mayor calor que se necesita aportar para calentar un peso mayor y por lo tanto también un mayor volumen de acero. Destaca cómo esta correlación se vuelve negativa para el consumo unitario reflejando cómo en términos de consumo por tonelada, el proceso se vuelve más eficiente cuanto mayor es la carga de la hornada. También destacan las influencias de la duración del tratamiento y del diámetro máximo de las piezas debido a que cuanto mayor es el diámetro de una pieza, mayor es el tiempo necesario para alcanzar una homogeneidad aceptable. Por otro lado, puede llamar la atención la poca influencia de la temperatura en el consumo. Esto se puede explicar desde el punto de vista de la división realizada por tipo de tratamiento, puesto que los rangos de temperaturas dentro de un mismo tratamiento son muy estrechos, siendo menos relevantes respecto a otras variables.

4.1.3 RESULTADOS

4.1.3.1 PREDICCIÓN DE CONSUMO DE GAS

El estudio de consumo de gas se realizó sobre los tipos de tratamiento “normalizado” y “revenido”, con conclusiones diferentes en ambos casos. Debido al limitado escenario de muestras de hornadas que se manejan para el “temple”, se decide dejar fuera del modelo este tratamiento. Por su parte, para la predicción de los modelos de normalizado, se cuenta con las categorías dimensionales de L/D presentadas con anterioridad y que muestran una diferencia entre los grupos a partir de prueba no paramétrica de diferencias en las distribuciones de datos.

Modelo de normalizado.

En un inicio se diseña una regresión lineal múltiple para cada grupo de L/D empleando las variables más representativas del diagrama de Spearman como son la duración, la carga y el diámetro. También se añade la variable temperatura que, aunque a priori puede ser irrelevante en algunas ocasiones, dependiendo de cómo se subdivide la muestra podría llegar a aportar información al modelo. A continuación, se presentan una serie de regresiones en las que se van eliminando progresivamente las variables en un ejercicio de optimización del factor R^2 y guiados por el valor p individual de cada una de ellas.

El primer paso antes de comenzar a realizar las regresiones es el normalizado o escalado de las variables en juego. Esto se hace cuando las variables presentan unidades y escalas de valores muy dispares, asegurando que todas ellas contribuyen equitativamente al modelo. Por ejemplo, para una hipotética variable X, se tiene que:

$$x_{i,escalada} = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}$$

Siendo

x_{max} el valor máximo que toma la variable en todo el conjunto de datos.

x_{min} el valor mínimo que toma la variable en todo el conjunto de datos.

x_i el valor de la variable x en la posición i.

Y con i variando en el rango $[0, n]$, dónde n es el número máximo de muestras disponibles para la variable X.

A partir de tablas dinámicas se pueden visualizar los diferentes patrones de comportamiento entre las variables y la variable objetivo. La Figura 26 muestra la relación creciente entre la carga agrupada y el consumo total de hornadas para las piezas agrupadas según su parámetro L/D.

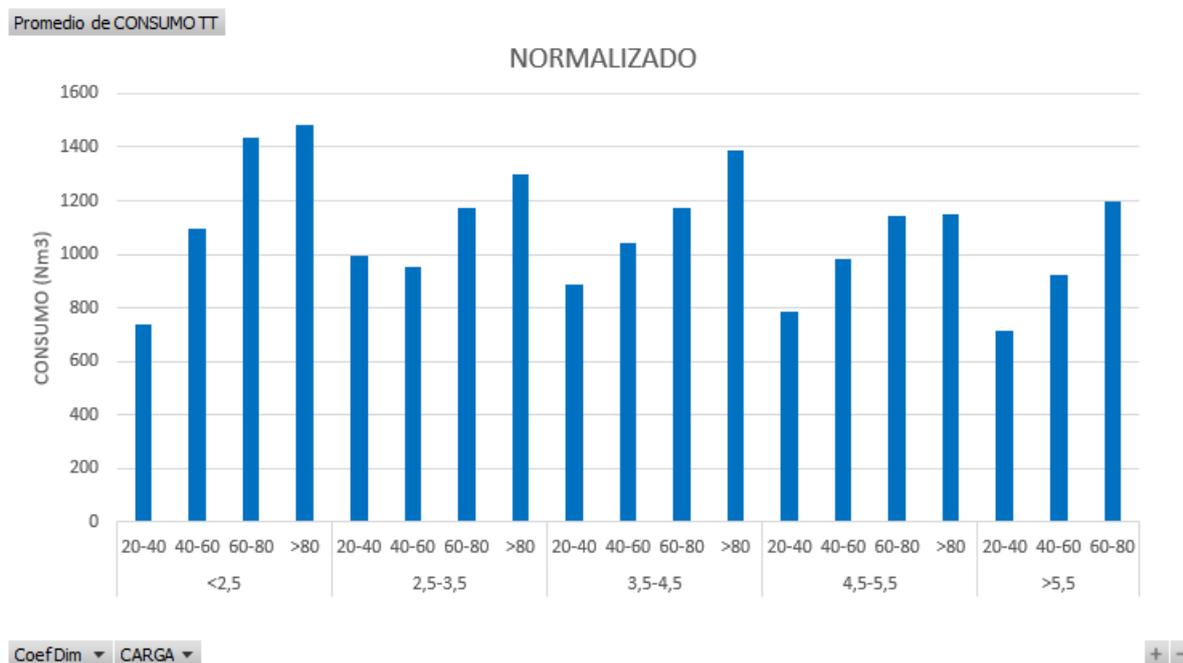


Figura 26. Gráfica de consumo por grupo L/D y carga.

Las primeras regresiones para los grupos L/D muestran los siguientes valores:

L/D	<2,5	2,5-3,5	3,5-4,5	4,5-5,5	>5,5
R ²	0,89	0,37	0,52	0,51	0,85

Tabla 8. Valores de R² para regresiones sobre grupos L/D.

Los resultados arrojan ajustes muy precisos para los valores extremos mientras que el modelo se debilita para rangos intermedios. Para intentar mejorar el ajuste intermedio y optimizar los R² del modelo se prueba a combinar los rangos centrales en un único rango “2,5-5,5”. A su vez, observando la distribución de piezas por grupo, se aprecia la influencia marcada de dos grupos mayoritarios de pieza como son “Cilindro Apoyo” y “Eje de Trituradora” en el grupo “2,5-5,5”. Esto se aprecia de manera clara al analizar la producción en la Figura 27. Siendo esta división tan clara, se decide extraer estas piezas del grupo “2,5-5,5”, ya que merecen una regresión propia.

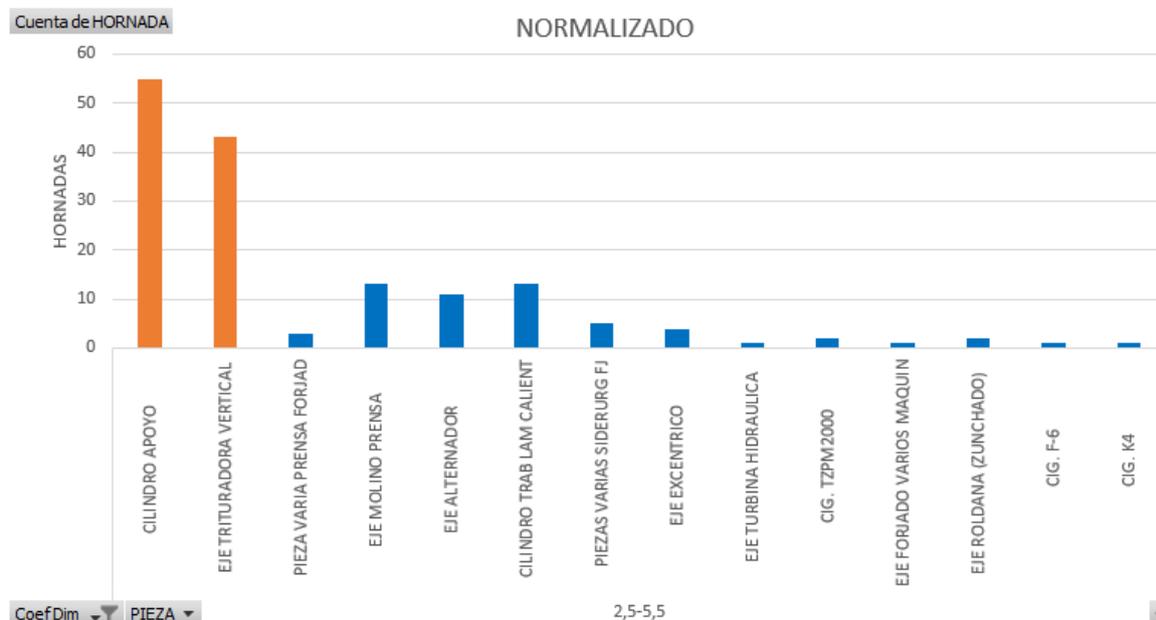


Figura 27. Composición de piezas del grupo L/D 2,5-5,5.

En la Tabla 9, a continuación, se presentan los resultados de dicha regresión optimizada. Este modelo puede esquematizarse como un árbol de decisión y permitir la predicción del consumo mediante un algoritmo que decida la mejor ecuación de regresión en función de las características de la hornada objetivo (Figura 28).

GRUPO	R ²
L/D 2,5-5,5	0,46
L/D 2,5-5,5 SIN EJE T. / CIL APOYO	0,60
CIL APOYO	0,39
EJE TRITURADORA	0,35
CIL APOYO + EJE TRITURADORA	0,45

Tabla 9. Valores de R² obtenidos para distintas regresiones múltiples.

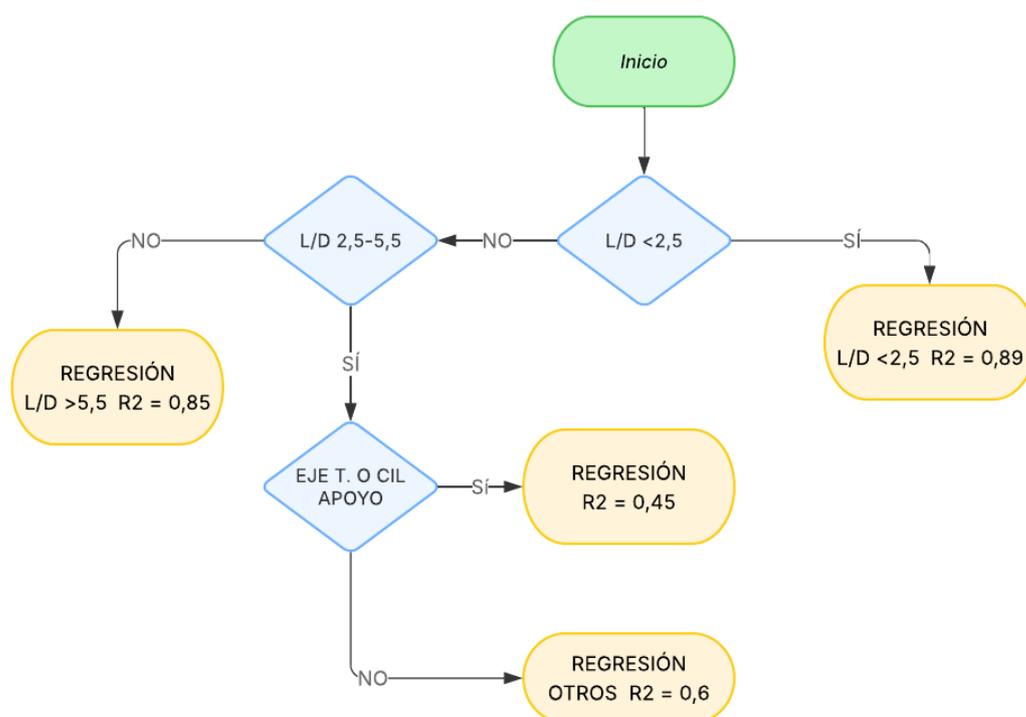


Figura 28. Diagrama de decisión para modelo predictivo de normalizado.

En la siguiente tabla se recogen los valores de los coeficientes de las variables que influyen en cada regresión junto al intercepto o coeficiente independiente. Asimismo, se indica el valor crítico de F para comprobar la idoneidad o relevancia de todos los modelos. Como se explica en la sección 3.5, estos valores indican un buen valor regresivo de los modelos.

La observación de los coeficientes propuestos en la Tabla 10 para cada variable, permite ver su influencia sobre el consumo de gas. Destaca el hecho de que el consumo de los cilindros de apoyo y ejes de trituradora es, a diferencia de las demás piezas, independientes de la duración del tratamiento, diámetro de la pieza y temperatura.

GRUPO	INTERCEPTO	DURACIÓN	CARGA	DIÁMETRO	TEMPERATURA	R ²	Valor crítico de F
L/D <2,5	-0,1957	0,3145	0,7081	0,1765	0,0966	0,89	4,91x10 ⁻⁸
CIL APOYO + EJE TRITURADORA	0,1138		0,4215			0,45	4,64x10 ⁻¹⁴
OTROS 2,5-5,5	0,1000	0,2317	0,4981	0,1813		0,60	2,42x10 ⁻¹⁰
>5,5	-0,0875	0,8213	0,3103	-0,0195	0,0660	0,85	1,69x10 ⁻⁹

Tabla 10. Coeficientes de regresión para modelo del normalizado.

Una vez obtenido el modelo y sus coeficientes, se escogen cuatro hornadas posteriores a las fechas de hornadas abarcadas en el estudio y se introducen las variables en las ecuaciones de regresión de los grupos para comprobar el funcionamiento del modelo. Tenemos una hornada por cada grupo de regresión con los siguientes datos:

HORNADA							
	PIEZA	DURACIÓN (h)	CARGA (Tn)	DIAMETRO (mm)	TEMPERATURA (°C)	L/D	CONSUMO (Nm3)
1	EJE TURBINA	57,43	59,10	1070	930	8,56	1100,30
2	EJE TRITURADORA	61,10	65,35	1870	930	3,80	1423,98
3	CIGÜEÑAL K4	56,20	22,70	1030	900	3,26	577
4	EJE MOLINO	80,57	58,40	1560	900	2,32	1039,70

Tabla 11. Datos de hornadas de comprobación del modelo.

Para las hornadas mostradas, se escalan debidamente sus valores y se introducen en sus respectivos grupos de regresión. Después se compara el consumo obtenido con el real, calculando los errores cometidos (Tabla 12).

HORNADA	PREDICCIÓN (Nm3)	CONSUMO REAL (Nm3)	ERROR (%)
1	975,36	1100,3	-11,4%
2	1121,87	1423	-21,1%
3	774	577	+34%
4	1127	1039,7	+8,4%
PROMEDIO DE ERRORES ABSOLUTOS EN HORNADAS INDIVIDUALES			20,3%

Tabla 12. Tabla de comparación entre resultado de predicción y real.

Con los resultados obtenidos se puede destacar el mejor resultado obtenido para los grupos cuyo R^2 está cercano al 90% frente a los otros dos grupos. Si bien se pueden dar errores algo mayores a los presentados como en el caso de la hornada 3, puede utilizarse el modelo para obtener un resultado orientativo en la mayoría de las ocasiones. Por otro lado, se puede calcular cuál sería el error al sumar los consumos del modelo predictivo y los consumos reales y comparar el error entre ellos.

SUMA PREDICCIÓN (Nm3)	SUMA CONSUMO REAL (Nm3)	ERROR (%)
3998,23	4140	3,42%

Tabla 13. Comparación entre las sumas de consumo del modelo predictivo y las sumas del consumo real.

De las comparaciones de los sumatorios de consumo predictivo y consumo real obtenemos un resultado concluyente. El error se minimiza en gran medida cuando se efectúan los sumatorios de consumo debido a que las desviaciones de predicción frente a la realidad se compensan entre sí. Si trasladamos estos resultados a una predicción de carácter temporal como pueden ser varios días, una semana o un mes, se puede establecer que el modelo es mucho más robusto que para la obtención de predicciones individuales.

Modelo de revenido.

Para la realización del modelo del revenido, se inicia de la misma forma que para el normalizado, dividiendo por L/D y observando resultados de ajuste.

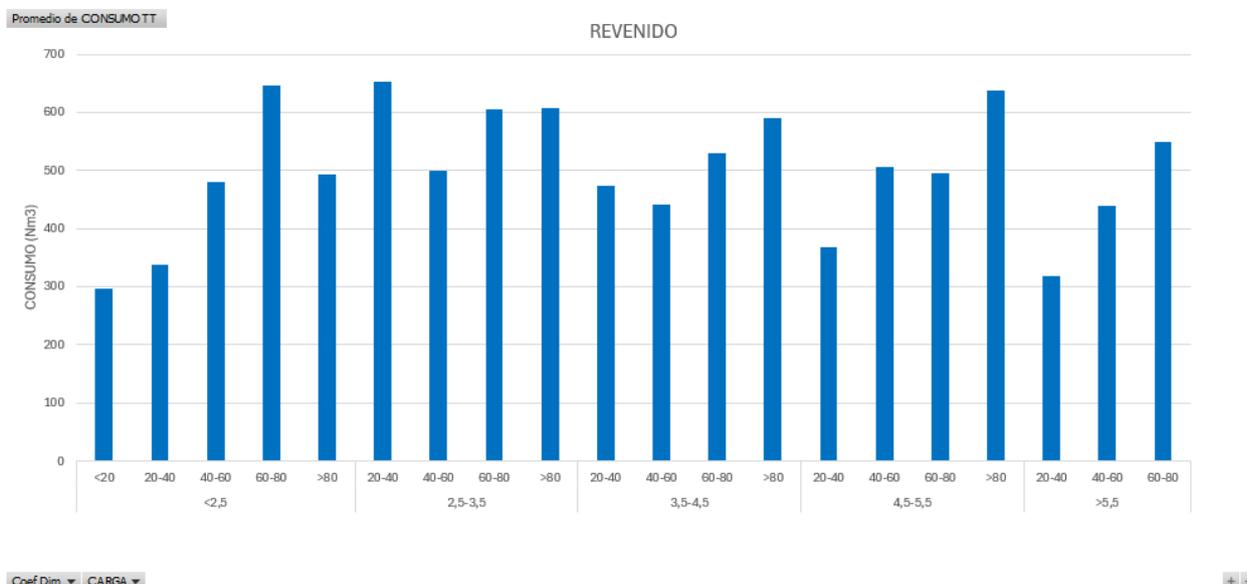


Figura 29. Representación de promedio de consumo para grupos L/D y carga.

L/D	<2,5	2,5-3,5	3,5-4,5	4,5-5,5	>5,5
R ²	0,64	0,001	0,32	0,39	0,03

Tabla 14. Resultados de R² para agrupación L/D de revenido.

Observando los resultados obtenidos en la Tabla 14, los R² reflejan valores de ajuste inaceptables a excepción del grupo “<2,5”. De esto se deduce que la agrupación por coeficiente L/D no es eficiente para los revenidos. Como segunda opción se estudia la posibilidad de dividir por tipo de pieza, aunque los valores de ajuste para algunos de los grupos de pieza con mayor número de muestra se siguen manteniendo pequeños (Tabla 15).

PIEZA	CIL APOYO	EJE MOLINO	EJE TRITURADORA	OTROS
R ²	0,07	0,4	0,36	0,013

Tabla 15. Valores de R² para subdivisión por tipo de pieza.

Los resultados para este tipo de subdivisión también representan modelos muy débiles de predicción que no pueden ser aceptados. Si observamos más gráficas de comparación agrupando por pieza o L/D frente a las variables más influyentes como pueden ser la carga y la duración, se aprecia cómo existe una mayor dispersión de los datos que para los tratamientos de normalizado. Esto se traduce en tendencias que no reflejan una linealidad clara de la influencia de las variables en muchos de los grupos, produciendo modelos de ajuste muy poco exactos.



Figura 30. Representación de promedio de consumo para grupo L/D y duración.

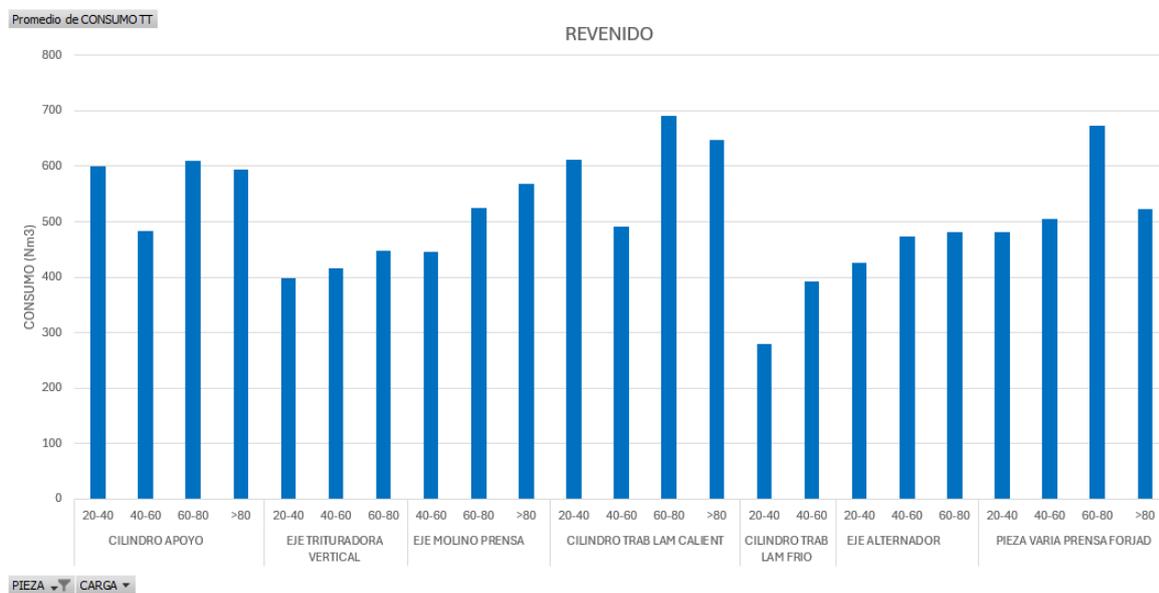


Figura 31. Representación de promedio de consumo para pieza y carga.

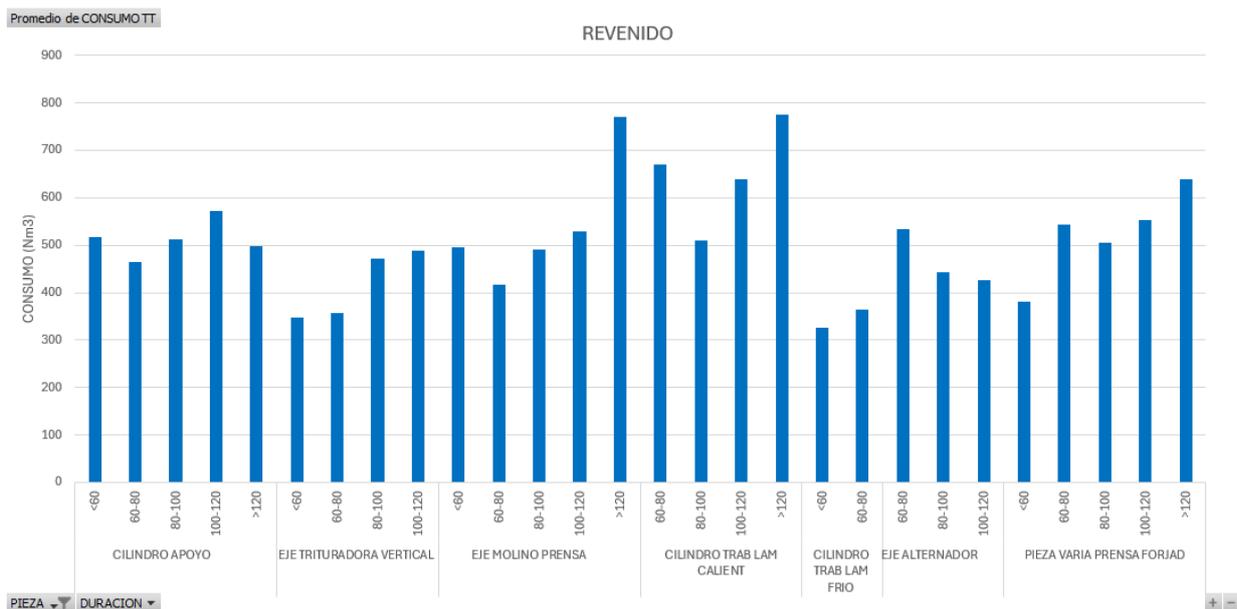


Figura 32. Representación de promedio de consumo para pieza y duración.

Por último, se refleja la posibilidad de dividir los grupos por rango de temperatura ya que algunos de los grupos muestran visiblemente una buena linealidad con la carga (Figura 33), aunque posteriormente no se verifica este caso en los resultados de ajuste de estos grupos (Tabla 16) debido a la gran disparidad de tipología de pieza que se está agrupando, como se puede ver en la Figura 34.

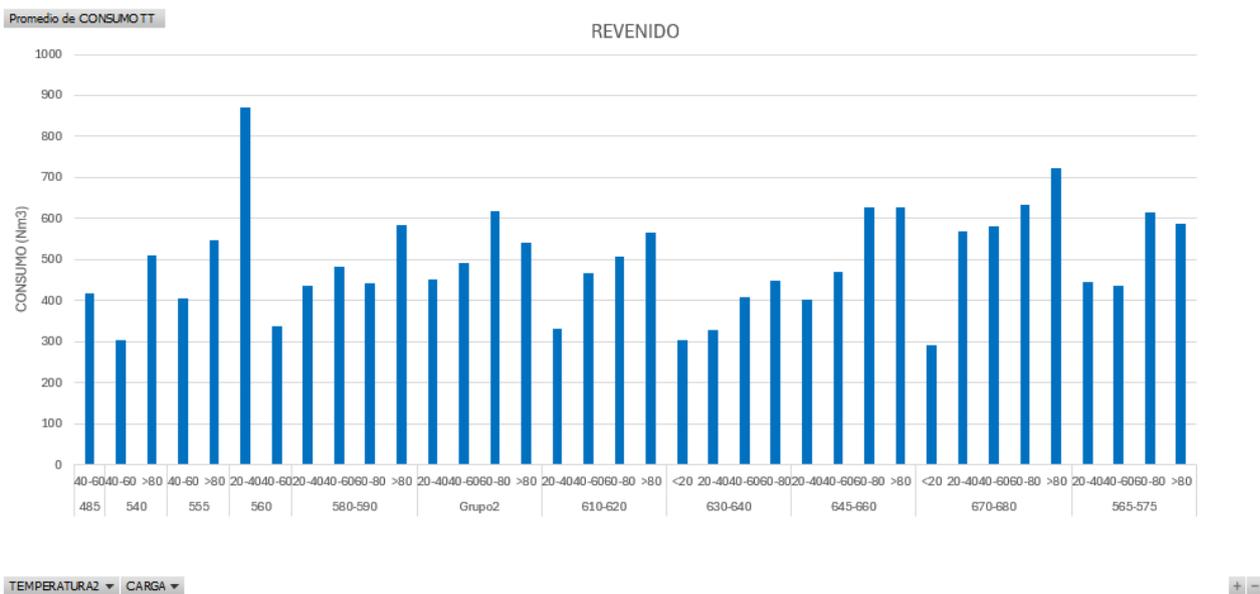


Figura 33. Representación de promedio de consumo para temperatura y carga.

GRUPO	580-590	610-620	630-640	645-660
R ²	0,22	0,60	0,01	0,30

Tabla 16. Valores de R² para agrupación por temperaturas.

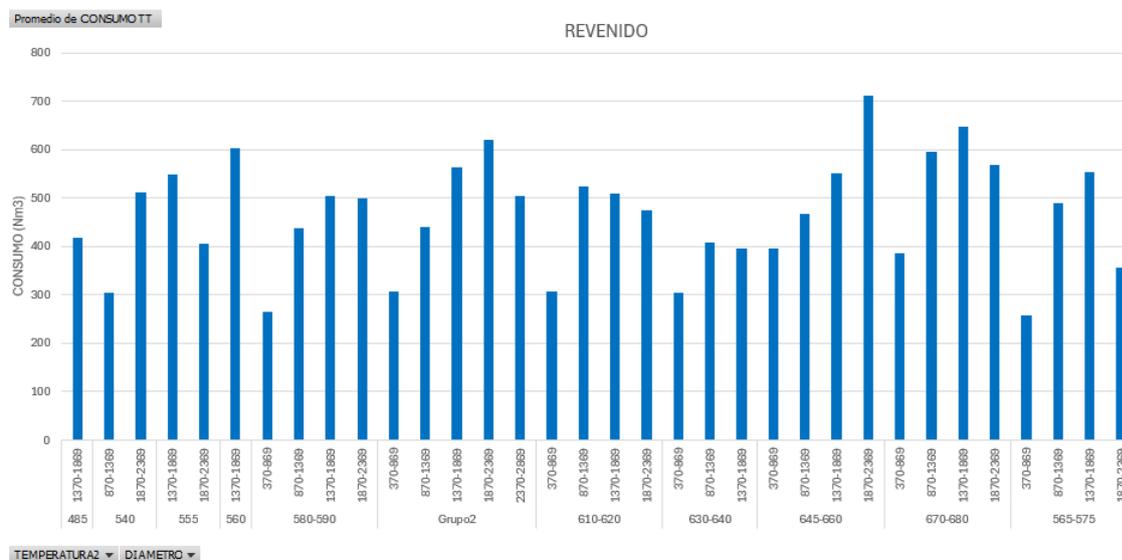


Figura 34. Representación de promedio de consumo para temperatura y diámetro.

Ante los resultados obtenidos por diferentes métodos de agrupación se decide abandonar el análisis del modelo debido a la imposibilidad de obtener ajustes estadísticamente válidos y fiables. A pesar de varios intentos de calibración y ajuste, el modelo presenta problemas persistentes, como:

- Baja capacidad predictiva.
- Bajos coeficientes de determinación (R²), lo que indicaba escasa relación entre las variables analizadas.

4.1.3.2 COEFICIENTES

En base al conjunto de pruebas y estudios de consumo se plantean a continuación, una serie de coeficientes basados en las agrupaciones previas para representar la eficiencia de cada tipo de tratamiento. Para esto se emplean los promedios calculados en Nm³/Tn. Estos a su vez, permiten relacionar las eficiencias de las distintas poblaciones caracterizadas mediante un valor adimensional que también sirve para aproximar el cálculo de costes unitario para cada tratamiento.

En este planteamiento, se definen dos coeficientes distintos. Por un lado, un coeficiente CD_{tto} que refleja la relación de medias entre los grupos de normalizado, temple y revenido. Para ello se toma uno de los tratamientos como referencia con un $CD_{tto} = 1$, representado en este caso por el tratamiento “Temple”. Se tiene por tanto que:

$$CD_{tto} = \frac{\mu_{tto}}{\mu_{TEMPLE}}$$

El segundo coeficiente CD_i , representa la relación de consumo unitario entre subgrupos dentro del propio tratamiento, teniendo que:

$$CD_i = \frac{\bar{X}}{\mu_{tto_z}}$$

Siendo,

\bar{X} promedio de consumo de gas del subgrupo i

μ_{tto} promedio de consumo global para el tratamiento z

Tomando i diferentes valores según el número de sub-grupos de cada tratamiento y tomando z los valores de “normalizado”, “temple” o “revenido”, según corresponda.

Para el tratamiento de temple se plantea una prueba t de Student, aprovechando la normalidad de la muestra, que valora las diferencias de medias entre grupos de piezas. En este caso, se realiza una matriz de comparativas en la que cada tipo mayoritario de pieza se compara con los demás uno a uno. La comparativa de cada grupo consigo mismo carece de sentido y aparece como sombreada en la Tabla 17.

	CIL APOYO	CIL TRABAJO EN FRÍO	OTROS
CIL APOYO		0,0004	0,3242
CIL TRABAJO EN FRÍO	0,0004		0,0005
OTROS	0,3242	0,0005	

Tabla 17. Tabla de valores de p para prueba t sobre los tipos de pieza en el tratamiento temple

Esta matriz muestra que es posible rechazar la hipótesis nula en el caso de comparar el consumo de gas de los cilindros de trabajo en frío con los otros dos grupos, concluyendo que éste es significativamente distinto. Por otro lado, no se rechaza la hipótesis nula para la comparación entre los cilindros de apoyo y el grupo “otros”, por lo que se decide unir estos dos últimos grupos.

En cuanto al caso de los normalizados, se plantea la división en rangos de L/D.

Para el caso del revenido, al no tener resultados concluyentes del análisis de consumo, y reflejar la prueba de Kruskal-Wallis que no existen diferencias significativas entre grupos L/D, se calcula un coeficiente único para la población.

La tabla conjunta de coeficientes de dificultad puede verse a continuación:

	GRUPO	SUBGRUPO	n	μ_{tto} (m ³ /Tn)	\bar{X} (m ³ /Tn)	CDtto	CD
NORMALIZADO	L/D <2,5		22	19	22,58	1	1,2
	L/D 2,5-5,5	CIL APOYO O EJE TRITURADORA	98		18,22		0,9
		OTROS	57		19,36		1,0
	L/D >5,5		31		19,32	1,0	
TEMPLE	CILINDROS DE TRABAJO EN FRÍO		20		15,88	1	0,8
	OTROS		32		20,93		1,1
REVENIDO	ÚNICO		243	9,37		0,5	1

Tabla 18. Tabla de coeficientes calculados para cada tratamiento.

Con los coeficientes calculados, se emplea la siguiente fórmula para el cálculo de costes de los tratamientos térmicos.

$$COSTE (\text{€}) = m (Tn) \times CDtto \times CD \times tarifa \left(\frac{\text{€}}{Tn} \right)$$

Siendo:

- m : peso de la carga del horno en toneladas.
- $tarifa$: coste de fabricación en euros de una tonelada de acero.

4.2 PREDICCIÓN DE EMPAPAMIENTO DE UNA PIEZA

4.2.1 PIEZA Y CICLOS TÉRMICOS DE ESTUDIO.

El proceso de empapamiento de una pieza de acero es una etapa crítica del tratamiento térmico. Conceptualmente, se corresponde con el instante en el que la zona más fría de la pieza alcanza un cierto umbral cercano a la temperatura objetivo. En este instante, el resto de la masa estará ya a esa temperatura y por tanto el material puede considerarse empapado. Este instante es difícilmente medible en condiciones normales de producción debido a que es necesario conocer en todo momento la temperatura mínima de la pieza. En la práctica, estas temperaturas se miden instalando termopares en piezas de sacrificio o se infieren mediante modelos de simulación.

Con este tipo de modelos se puede predecir la distribución de temperaturas de una pieza a lo largo el tiempo y estudiar el impacto de los gradientes en la uniformidad del tratamiento.

Como pieza de ensayo se plantea un eje de rotor experimental el cual se somete a un primer tratamiento de revenido y posteriormente a un segundo revenido conocido como distensionado. Para cada uno de los tratamientos, el eje tiene una configuración geométrica diferente, así como distintos termopares utilizados para la comparación entre la prueba real y la simulación.

PESO (Kg)	C (%)	Cr (%)	Cu (%)	Mn (%)	Mo (%)	Ni (%)	Si (%)	V (%)
13272	0,29	1,3	0,1	0,65	1,1	0,65	0,01	0,3

Tabla 19. Datos de peso y porcentaje de elementos de aleación en porcentaje de peso.

Tratamiento de Revenido

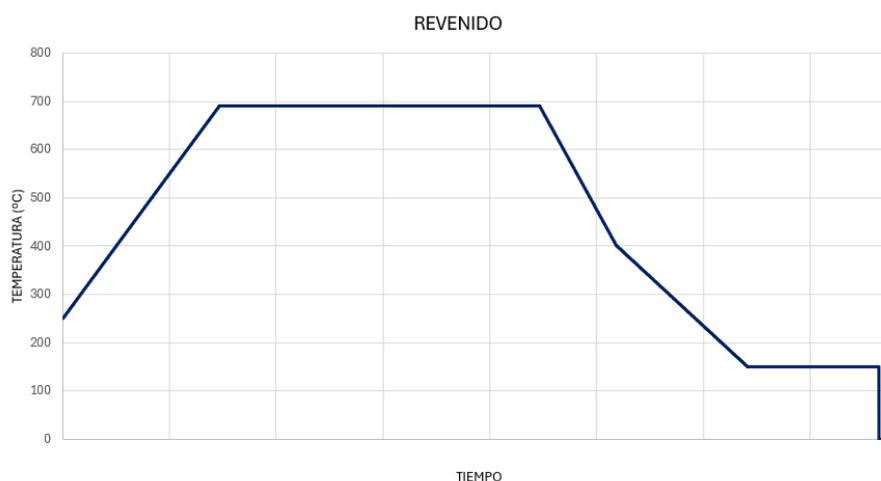


Figura 35. Temperatura de consigna del tratamiento de revenido.

El revenido consiste en un calentamiento hasta 690°C seguido de un enfriamiento controlado. La geometría del eje se muestra en la siguiente figura junto con la configuración de termopares. Se cuenta con 5 termopares interiores colocados en unas perforaciones sobre la pieza a distintas profundidades, uno en el eje central, y otros cuatro, dos simétricos a 50 milímetros de la superficie, y otros dos también simétricos a 155 milímetros. Los exteriores o superficiales se colocan por parejas en dos ubicaciones con distinto diámetro.

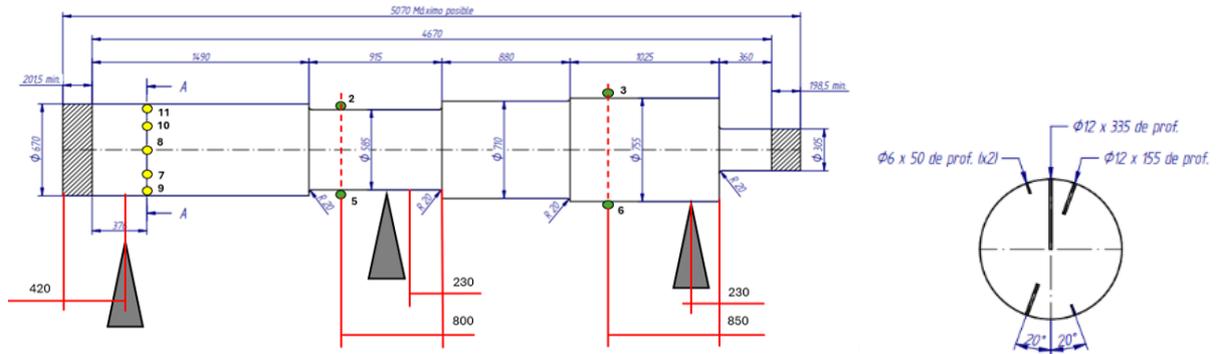


Figura 36. Plano del eje para el revenido y ubicación de termopares.

Tratamiento de Distensionado

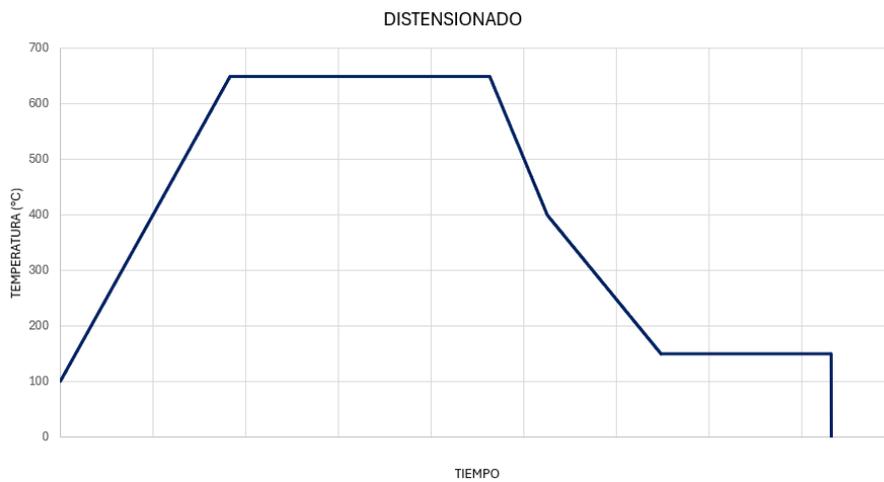


Figura 37. Temperatura de consigna del tratamiento de distensionado.

El tratamiento de distensionado sigue un tratamiento similar al anterior con calentamiento a 650°C. Los termopares este caso serán únicamente superficiales, y se cuenta con tres parejas situadas en tres zonas del eje con diámetros distintos.

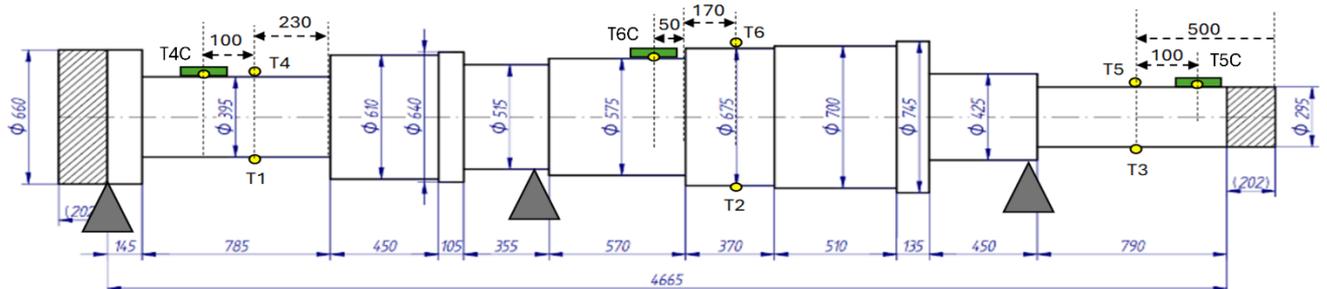


Figura 38. Plano del eje para el distensionado y ubicación de termopares.

4.2.2 PROCEDIMIENTO DE SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN

El primer paso del estudio consiste en validar un modelo de material del eje a partir de la simulación del revenido. Para ello, el objetivo es igualar las curvas de temperatura medidas por los termopares en el ciclo real con las curvas proporcionadas por la simulación del tratamiento en el software MAGMASOFT.

En primer lugar, se modela la geometría de la pieza en su configuración de revenido mediante software CAD 3D y se importa el modelo en MAGMASOFT. Después se crean puntos de medición de temperatura que simulan los termopares reales a partir de un eje de coordenadas local en la pieza para, posteriormente, crear una malla de nodos sobre la pieza. Para el mallado o “mesh” se calculan 1.000.000 de nodos, de forma que se pueda obtener la mayor precisión posible sin incurrir en un tiempo de simulación excesivamente largo.

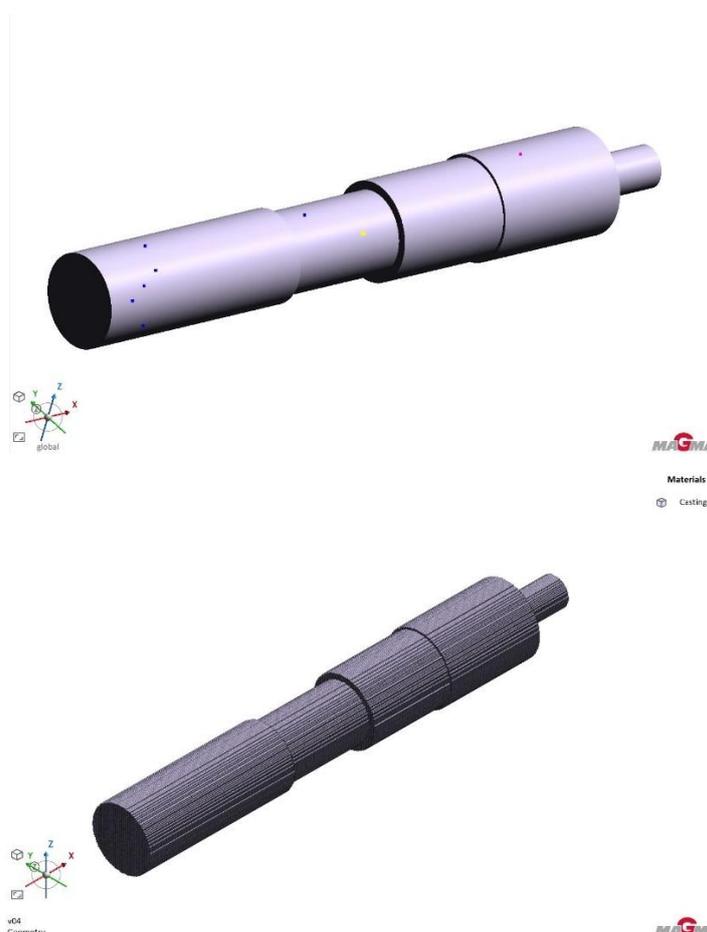


Figura 39. Modelo 3D del eje con los puntos de medición de temperatura y modelo del mallado para el revenido.

Una vez la malla está creada, se introducen los parámetros del tratamiento y del material. El módulo de simulado de tratamientos de MAGMASOFT necesita configurar

un ciclo completo de tratamiento para correr la simulación basado en un calentamiento por encima de la temperatura de austenización, temple y revenido (Austenitization-Quenching-Tempering). Sin embargo, como el único tratamiento de interés para la prueba es el revenido, se establecen tiempos muy cortos de simulación para los dos procesos anteriores de forma que no tengan efecto en la simulación final (Tezanos 2004).

Los parámetros del tratamiento se modifican en el apartado "Heat Treatment" (Figura 40). Se configura la temperatura inicial de 200°C y en la sección "Temperature History" se introduce la gráfica presentada en la Figura 35 con la temperatura de consigna del horno graficando únicamente la rampa de calentamiento y el mantenimiento ya que son las dos etapas de interés para la prueba.

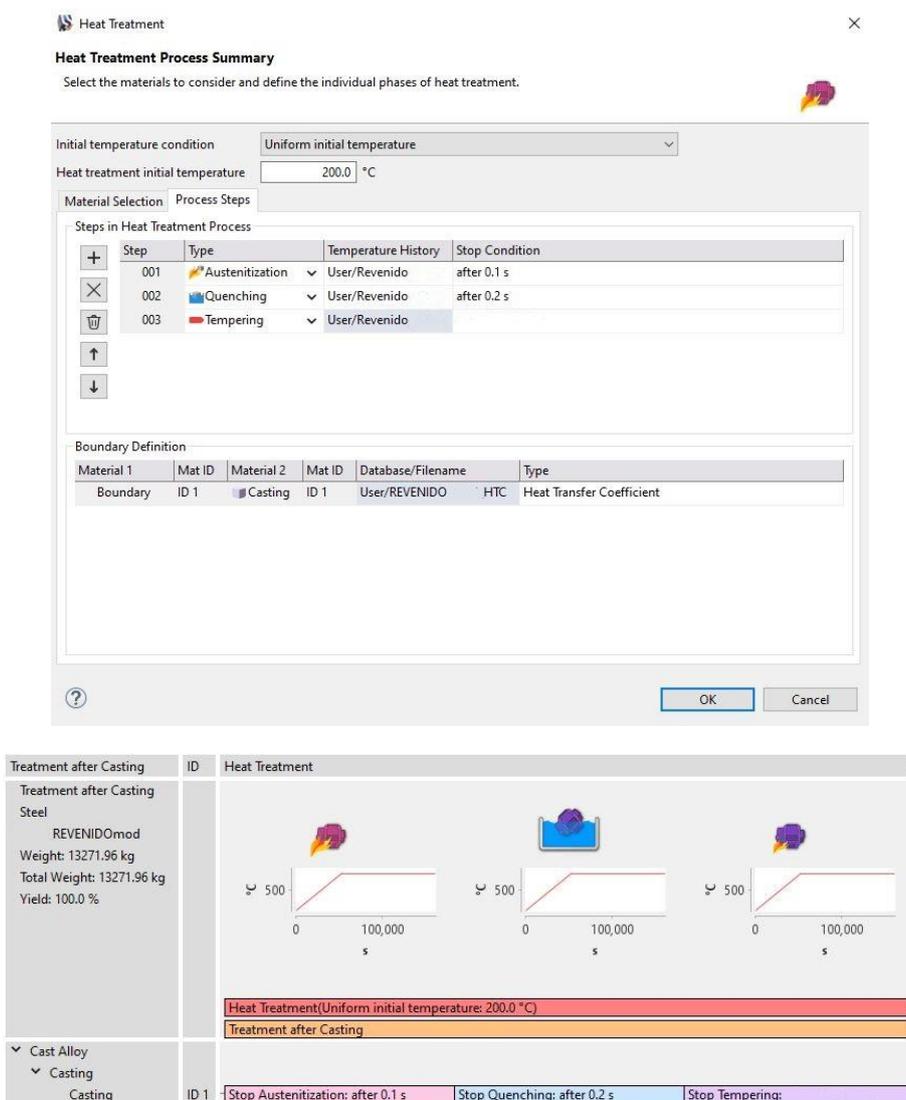


Figura 40. Configuración de la sección “Heat Treatment” para la simulación del revenido.

Dentro de la misma sección se define la condición de contorno “Heat Transfer Coefficient”. Este parámetro representa la curva del coeficiente de convección (HTC), para la cual se parte de una primera curva de condición convectiva adecuada a los hornos de tratamientos presentes en la fábrica (Tezanos, 2004). A partir de esta ecuación se realiza un ajuste exponencial que nos permite tener una ecuación para la curva del coeficiente de convección dependiente de dos coeficientes A y B, tal y como se puede ver en la Figura 41. Esta ecuación se utiliza posteriormente para la optimización paramétrica del modelo.

$$HTC = A \times e^{B \times T}$$

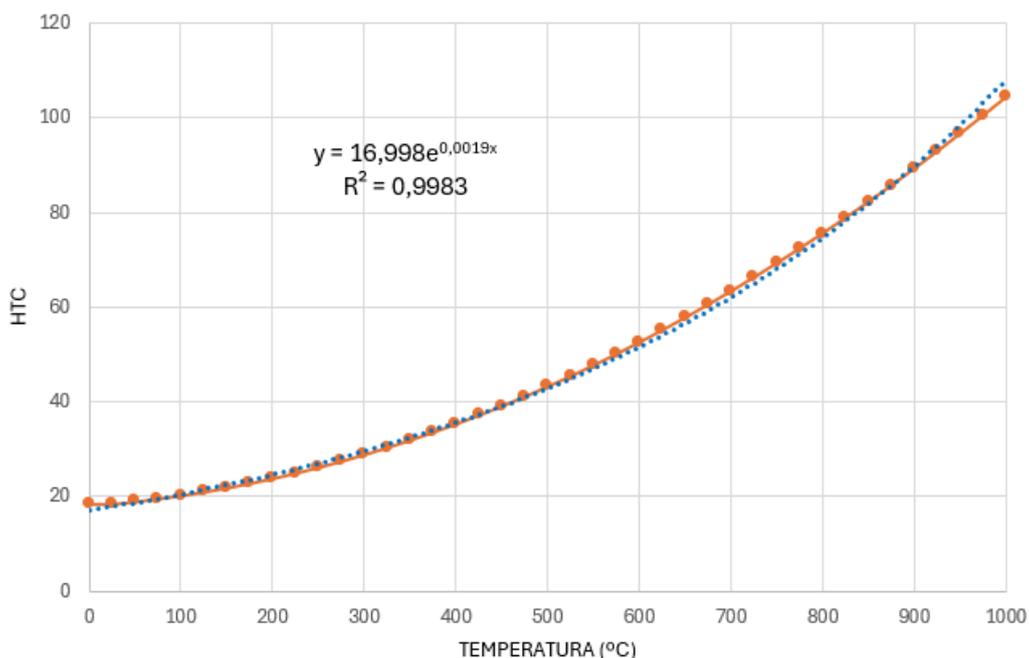


Figura 41. HTC convectivo original.

Por último, se define el material con los valores de composición química elemental (Figura 42) y se definen las gráficas de conductividad (k) y calor específico (c_p). Para el calor específico se emplea una curva obtenida de pruebas anteriores realizadas sobre el eje experimental. La conductividad de partida corresponde a una curva obtenida en función del contenido de carbono (Wyczolkowski, Strychalska, Badgasaryan 2022).

Material	Mat ID	Database/Filename	Initial Temperature (°C)	Feeding Effectivity (%)	Steel Composition
> Cast Alloy		User/ REVENIDMod	1570.0	30.0	Al (Aluminum) 0.0 % C (Carbon) 0.29 % Co (Cobalt) 0.0 % Cr (Chromium) 1.3 % Cu (Copper) 0.1 % Mn (Manganese) 0.65 % Mo (Molybdenum) 1.1 % Ni (Nickel) 0.65 % P (Phosphorus) 0.0 % S (Sulfur) 0.0 % Si (Silicon) 0.01 % Ti (Titanium) 0.0 % V (Vanadium) 0.3 % W (Tungsten) 0.0 %

Figura 42. Configuración del material.

Con las configuraciones y condiciones expuestas, se emplea una optimización paramétrica para encontrar la mejor solución posible, es decir, las curvas que temperatura que mejor se adaptan a las curvas de los termopares medidas en el ciclo

real. La solución depende de los parámetros de convección, conductividad y calor específico.

Finalmente se adoptan los resultados que se presentan a continuación como la solución óptima que valida el modelo y que ajusta en mejor medida las curvas de la simulación a los resultados reales. Las curvas referenciadas en las leyendas con terminación “_M” representan las curvas exportadas de MAGMASOFT, las cuales aparecen junto a las curvas del ciclo real de los mismos termopares.

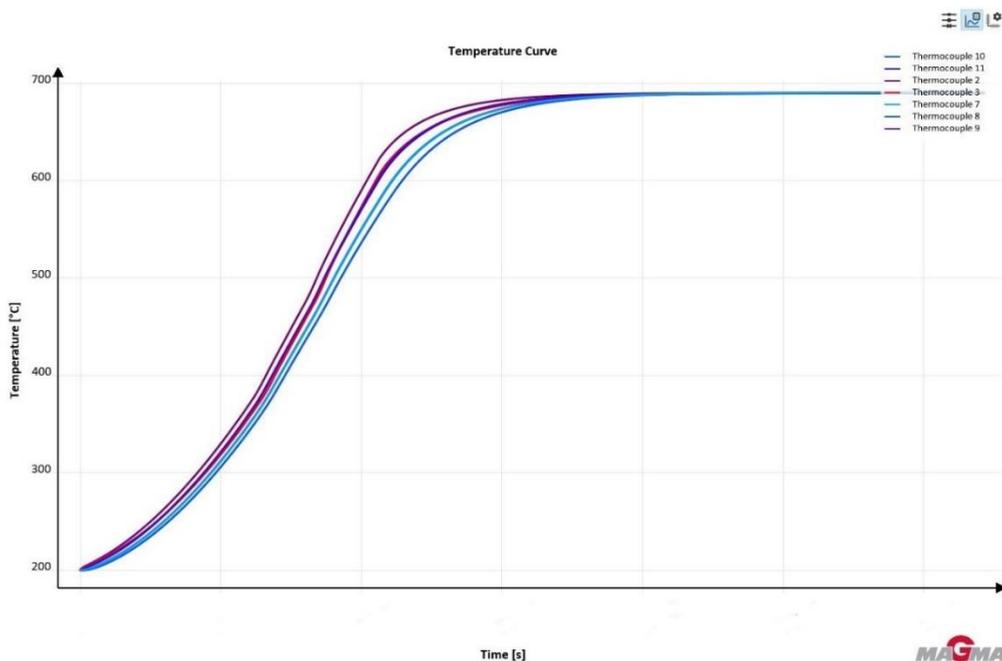


Figura 43. Curvas de termopares en MAGMASOFT.

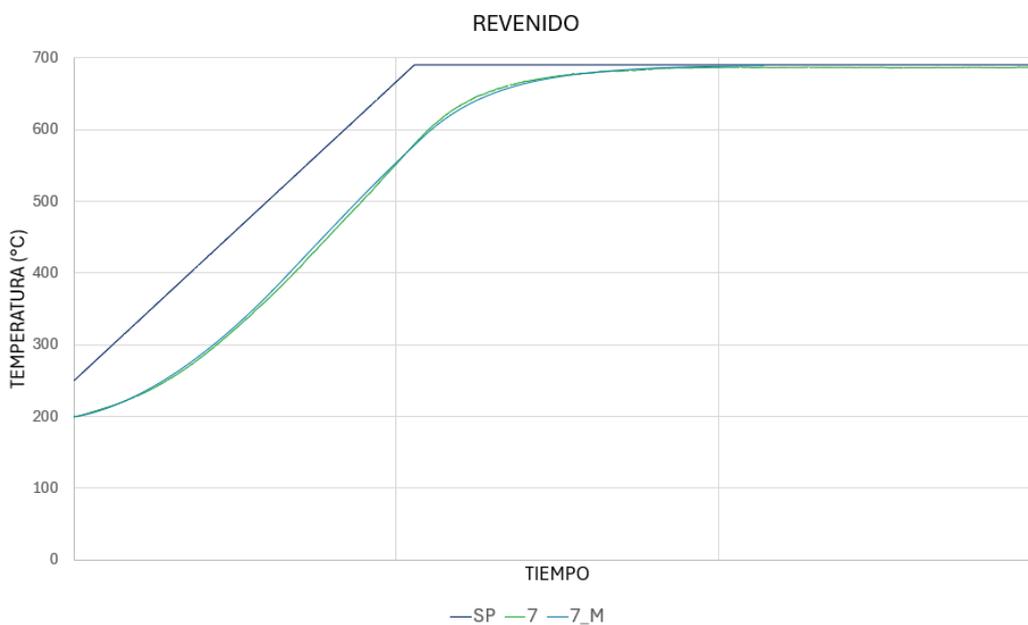


Figura 44. Curvas del termopar 7.

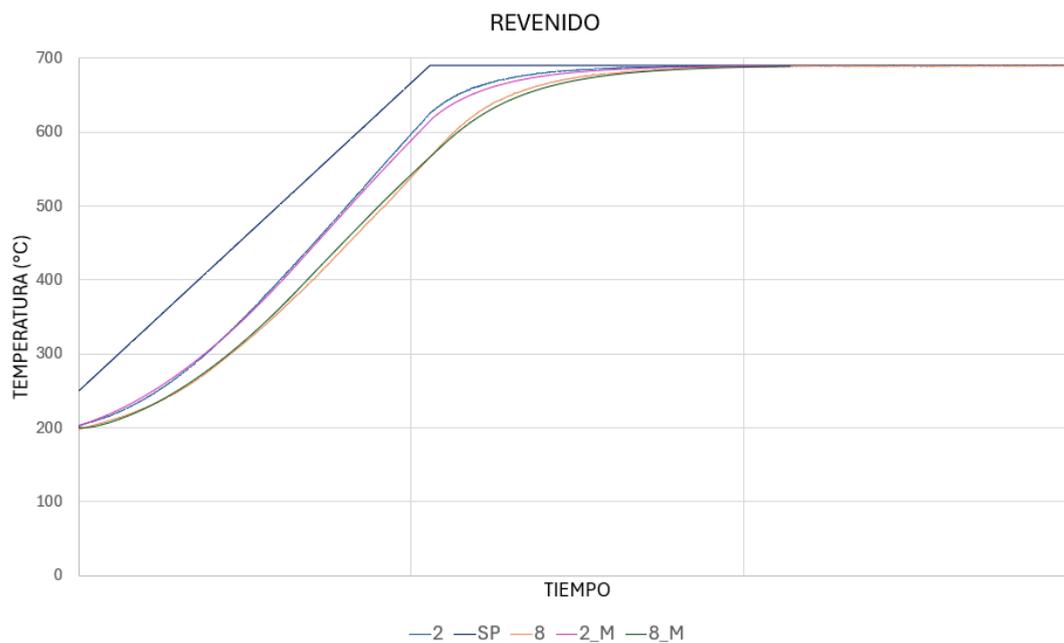


Figura 45. Curvas de los termopares 8 y 2.

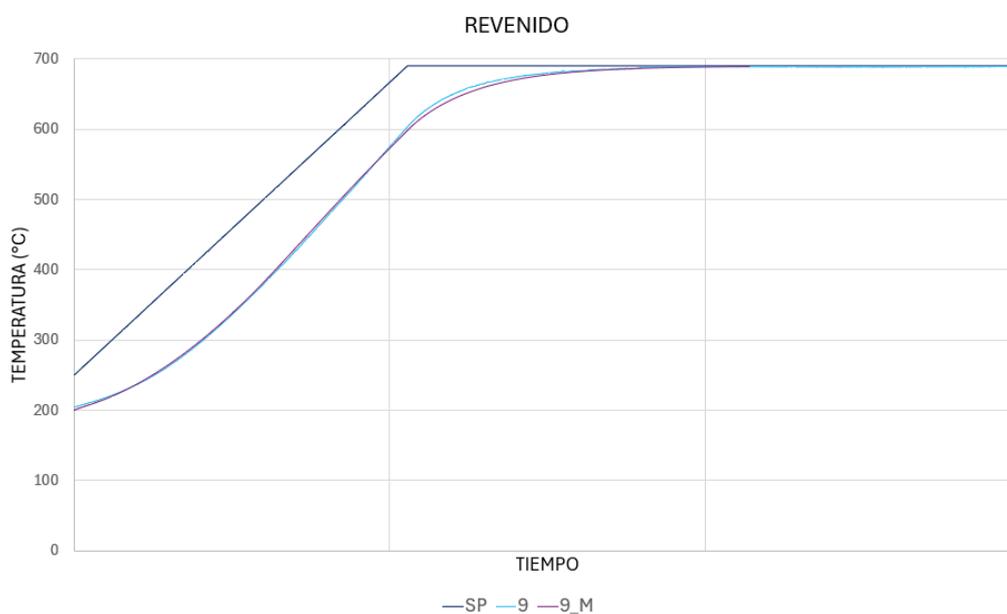


Figura 46. Curvas del termopar 9.

Estas curvas de temperatura exportadas de MAGMASOFT se han conseguido con las siguientes curvas de calor específico, conductividad y convección (Figura 47 y Figura 48). Los resultados de conductividad y calor específico se establecen como los adecuados para utilizar en sucesivas simulaciones.

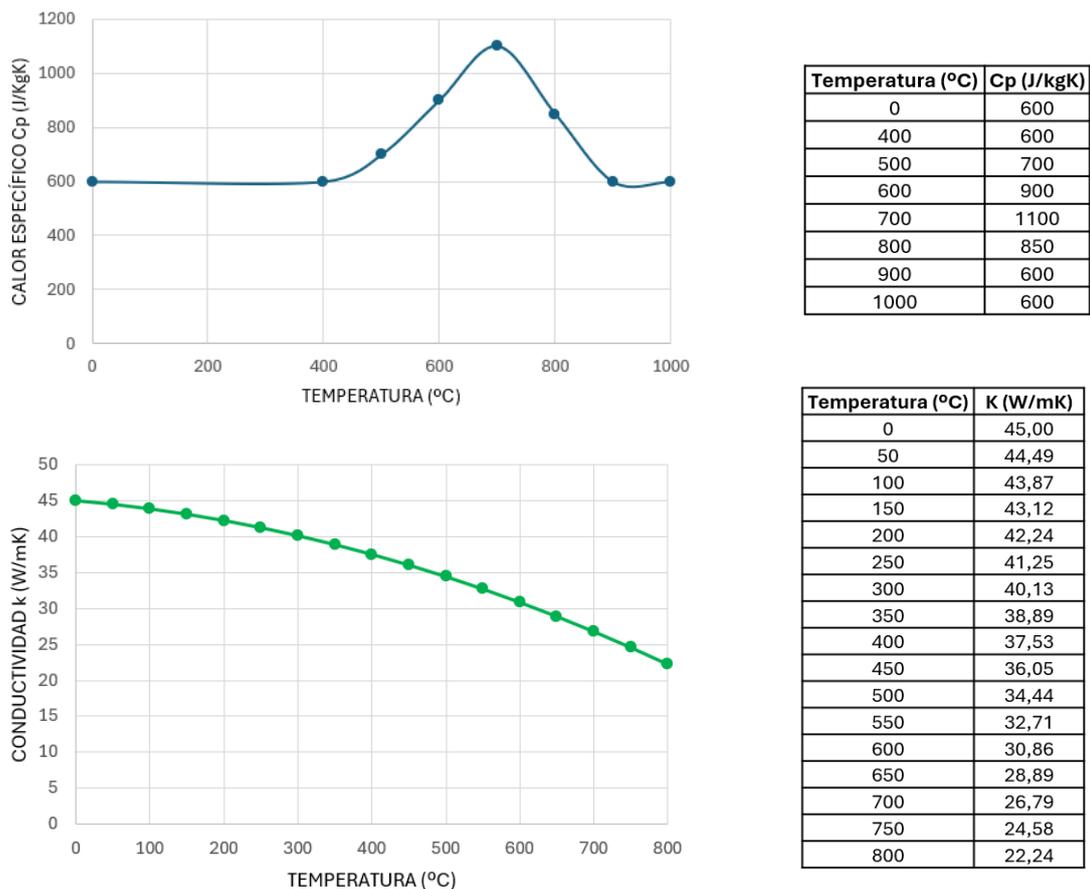


Figura 47. Curvas de conductividad y calor específico junto a sus respectivas tablas de valores.

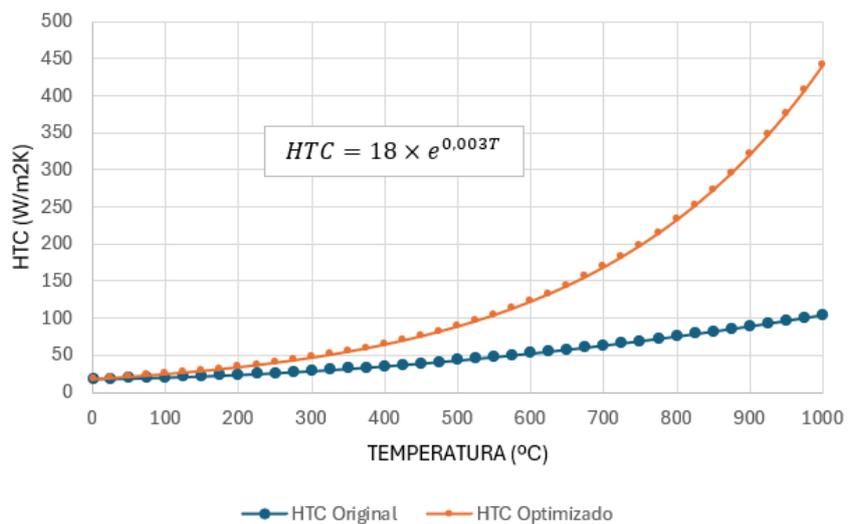


Figura 48: Curvas de HTC optimizada y original.

Simulación del distensionado

Una vez fijadas las curvas del material, se procede a simular el proceso de distensionado. Los pasos a seguir son los mismos que para el revenido, comenzando con el modelado 3D de la nueva geometría, la colocación de los termopares y el mallado.

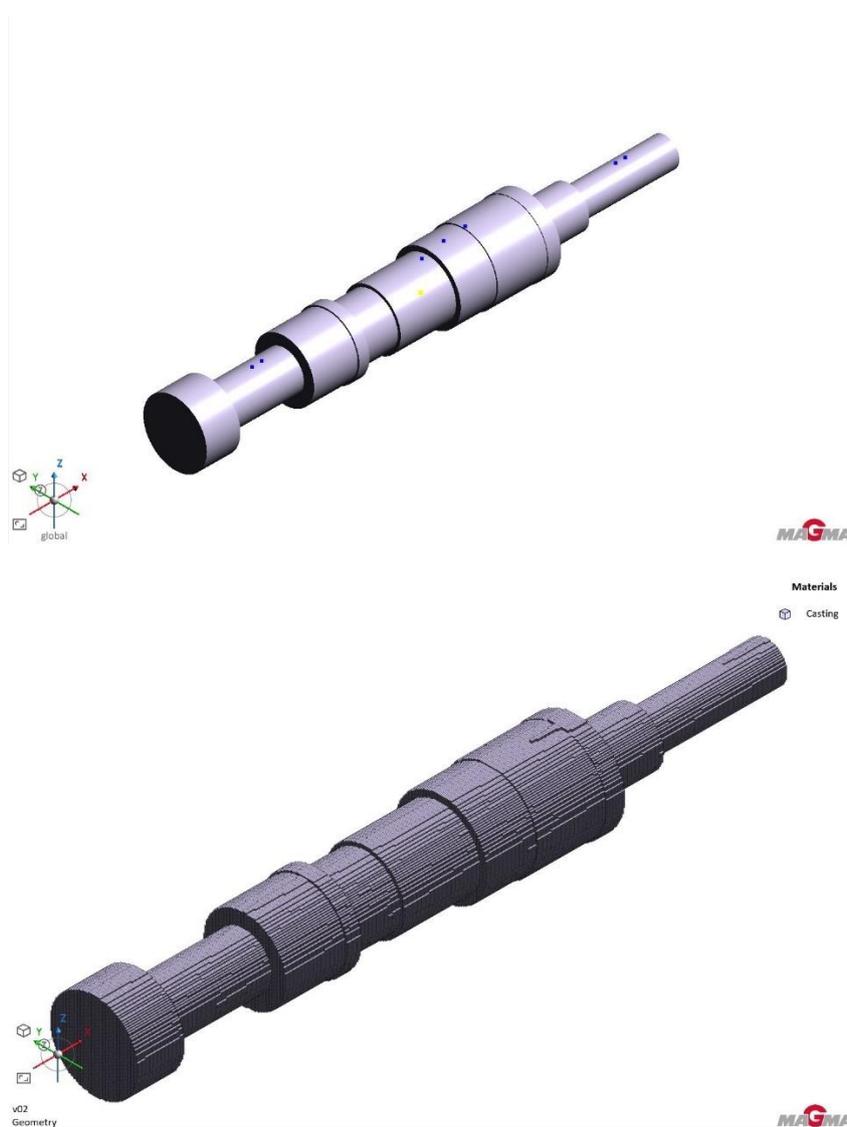


Figura 49. Modelo 3D del eje con los puntos de medición de temperatura y modelo del mallado para el distensionado.

Para esta simulación se introduce la curva de la Figura 37 correspondiente al distensionado. De nuevo, únicamente se necesita la curva desde el comienzo del

calentamiento hasta el final del mantenimiento en la sección “Temperature History”, donde también se establece la temperatura inicial en 25°C.

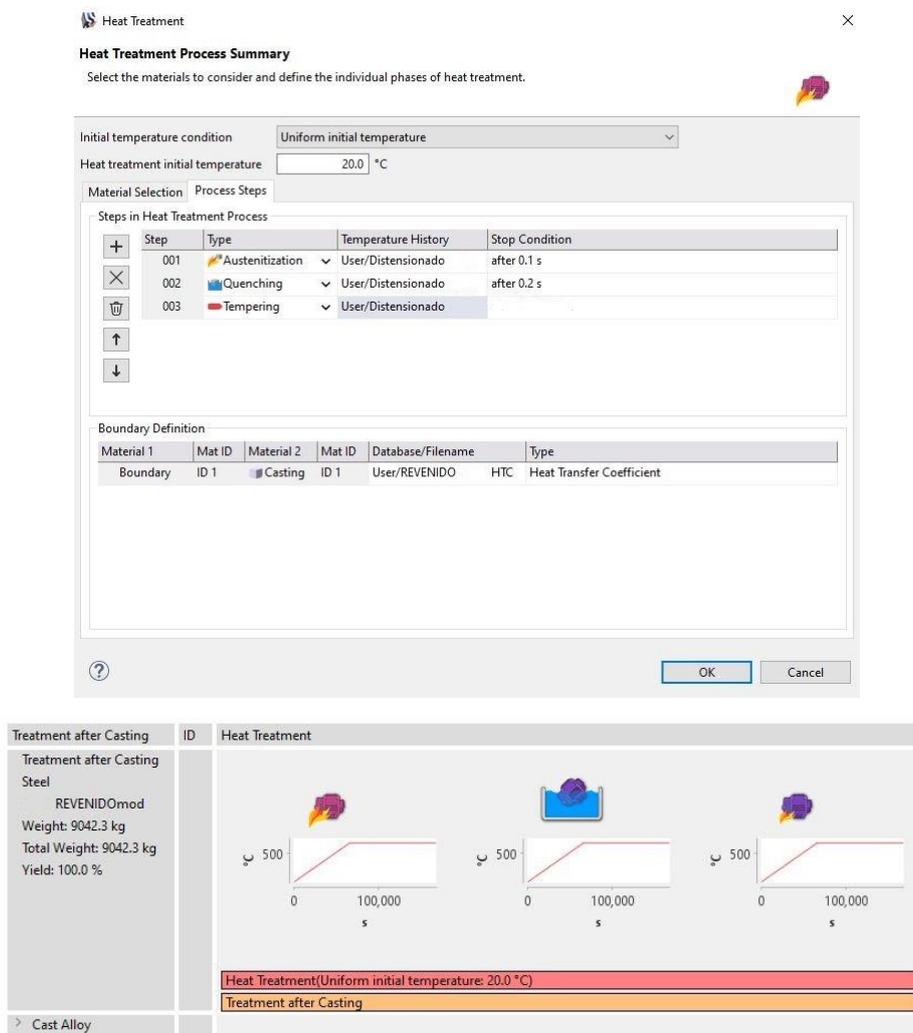


Figura 50. Configuración de la sección “Heat Treatment” para la simulación del distensionado..

Esta vez, la única variable con la que se realiza el ajuste de las curvas de temperatura simuladas es el coeficiente de convección (HTC) y se aplican las curvas de calor específico y conductividad validadas previamente para el material. Se plantea esta metodología puesto que no se puede considerar que las condiciones convectivas del horno real sean las mismas para los dos tratamientos. La convección se ve afectada por multitud de variables en un ciclo real como pueden ser la temperatura de tratamiento, velocidades de circulación del aire o el estado general y de los quemadores del horno el cual puede variar entre las fechas de los tratamientos. Es por esto que se plantea una curva de HTC distinta para cada tratamiento.

De esta forma se procede a optimizar el simulado obteniendo los resultados que se presentan a continuación. El HTC final empleado corresponde a una combinación de varias curvas exponenciales que adaptan la evolución del coeficiente por rangos de temperatura. Las curvas referenciadas en la leyenda de la Figura 52 con terminación “_M” corresponden a las exportadas de MAGMASOFT.

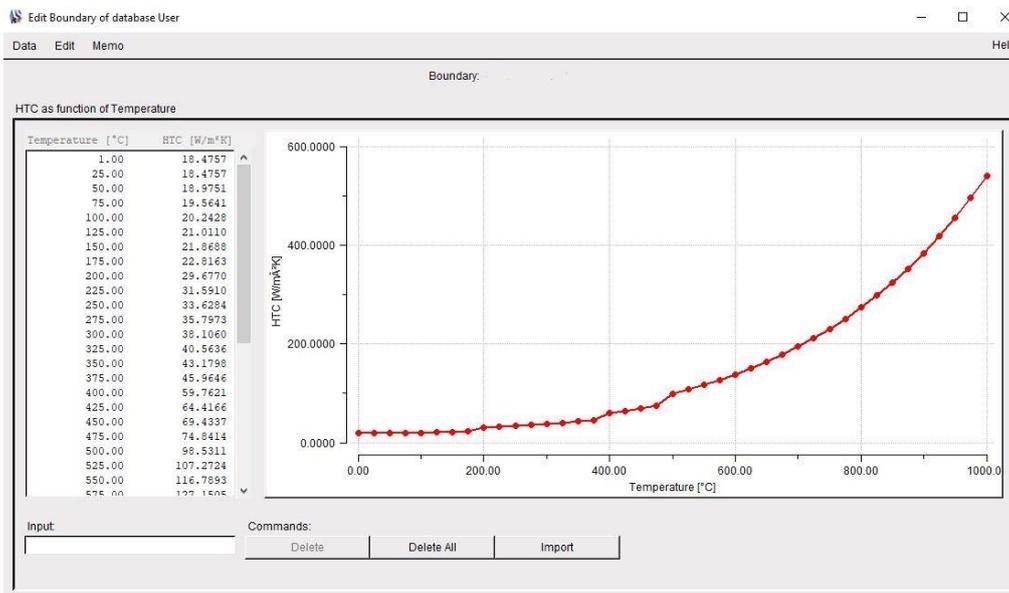


Figura 51. Curva del HTC para el distensionado.

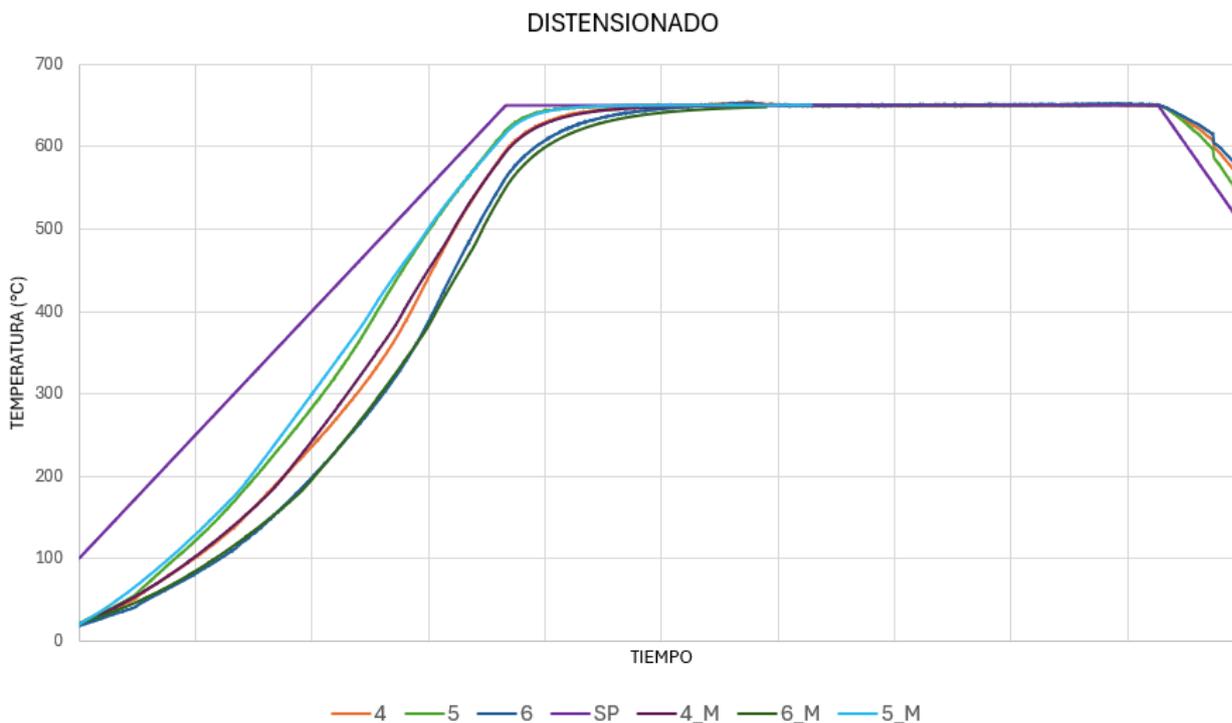


Figura 52. Curvas de los termopares 4, 5 y 6 del distensionado.

Como se puede apreciar en la Figura 52, las curvas correspondientes al termopar número 6 parecen desajustadas en el rango superior de temperaturas. Sin embargo, al ampliar la gráfica en la zona superior, se aprecia cómo el calentamiento real se desvía ligeramente de la temperatura de consigna por lo que se puede considerar que las condiciones de calentamiento en esa zona estaban siendo superiores a las teóricas (Figura 53). Esto se puede deber a pequeñas desviaciones en la regulación de esa zona del horno. Por lo tanto, teniendo en cuenta este factor se puede tomar la curva correspondiente a MAGMASOFT como válida conociendo, además, que el resto de las curvas coinciden con las reales.

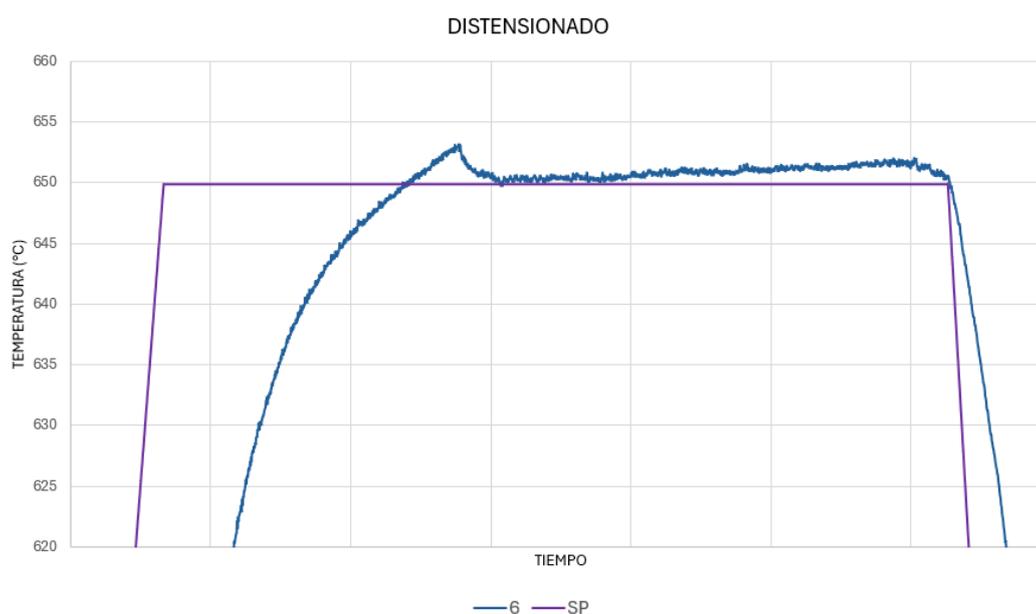


Figura 53. Distorsión de la curva real del termopar 6.

Con estos resultados queda validado el modelo de distensionado que simula la evolución de temperaturas de la pieza real y que se utiliza a continuación para estudiar el empapamiento de la pieza.

4.2.3 HIPÓTESIS DE EMPAPAMIENTO

Atendiendo a una curva de consumo de gas instantáneo se puede apreciar cómo, una vez alcanzada la temperatura máxima de mantenimiento, la pendiente de la curva va decreciendo con el tiempo hasta volverse prácticamente horizontal. Este comportamiento atiende a cuestiones de transferencia de calor a la pieza, puesto que a medida que la distribución de temperaturas de la pieza converge con la temperatura de consigna, la tasa de transferencia de calor es cada vez menor. Esta tasa alcanza un punto en el que el calor aportado es únicamente el necesario para el

mantenimiento de la temperatura y la compensación de las pérdidas del horno, resultando en un estado estacionario y el carácter asintótico de la curva de consumo.

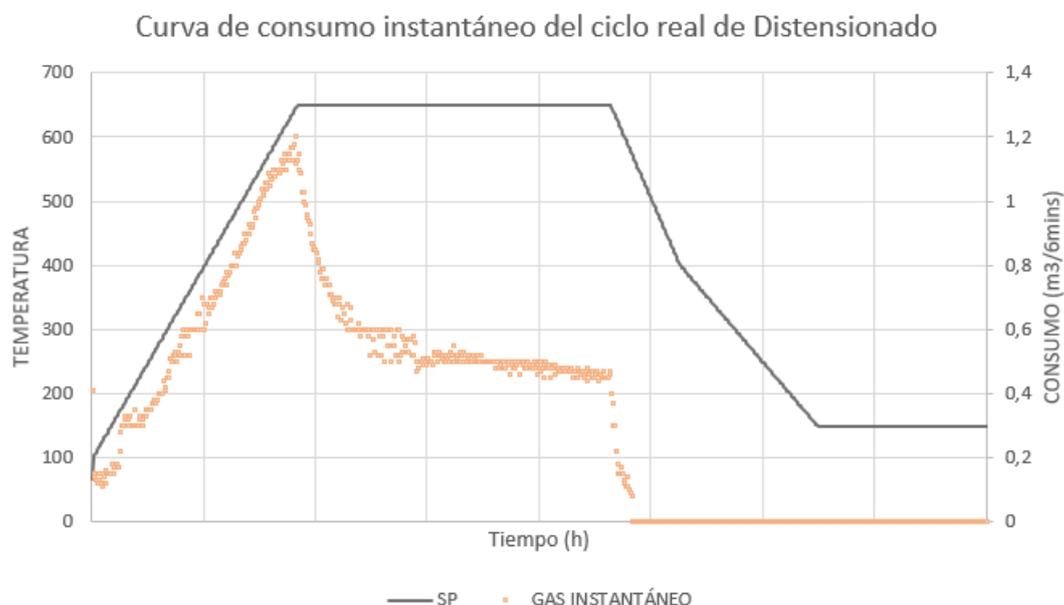


Figura 54. Curva de muestras de consumo instantáneo del ciclo de distensionado junto a temperatura de consigna del ciclo.

El concepto de empapamiento puede tener diferentes definiciones en función de la práctica industrial. Para la prueba que se plantea, se considera que la pieza ha alcanzado la homogeneidad óptima cuando la diferencia máxima de temperaturas sea menor o igual a 4°C para los dos siguientes casos:

- Diferencia de temperatura entre el punto más frío de la pieza, el cual se encuentra cerca del núcleo en la zona de mayor diámetro, y el punto superficial más cercano.
- Diferencia de temperatura entre el punto más frío (centro) y temperatura de consigna del horno.

4.2.4 RESULTADOS

Para la evaluación de resultados se utiliza el modelo validado de simulación del distensionado. Interrogando al software MAGMASOFT se puede conocer cuál es la localización del punto más frío de la pieza y caracterizar la curva que describe su historia térmica.

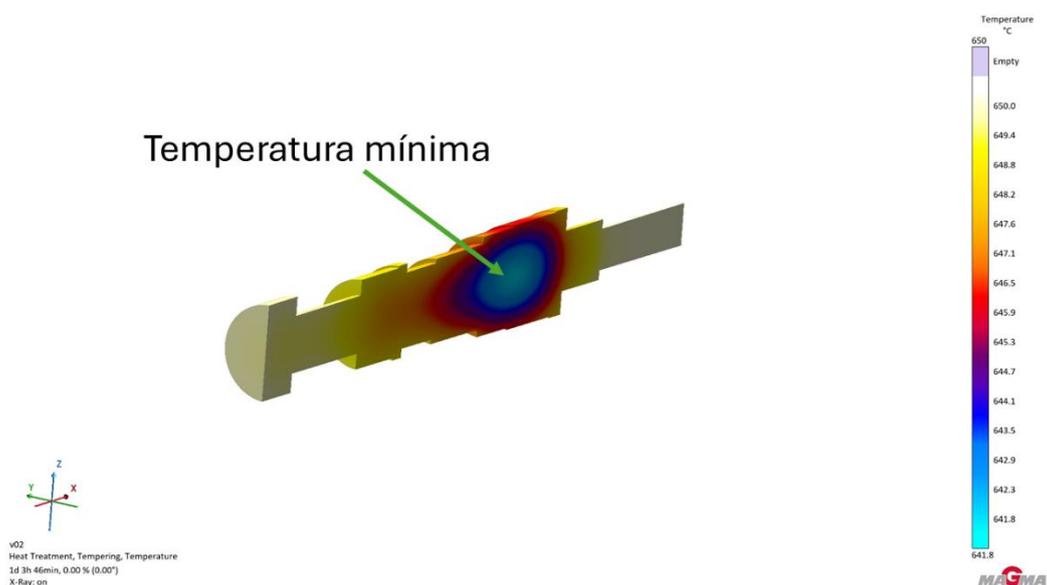


Figura 55. Representación gráfica de un estado intermedio de calentamiento en MAGMASOFT.

A continuación, se coloca un termopar virtual en la intersección de un plano transversal al eje longitudinal de la pieza que pasa por la localización del punto más frío y la superficie de la misma. Después, se vuelve a correr la simulación de forma que se obtiene la curva de temperatura en este punto.

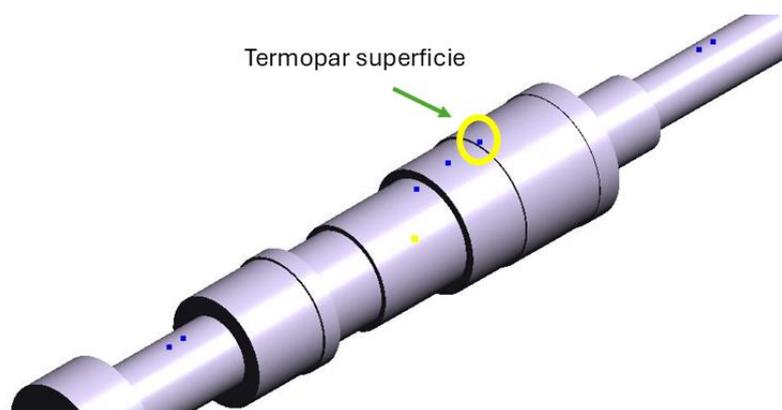


Figura 56. Ubicación del termopar de superficie.

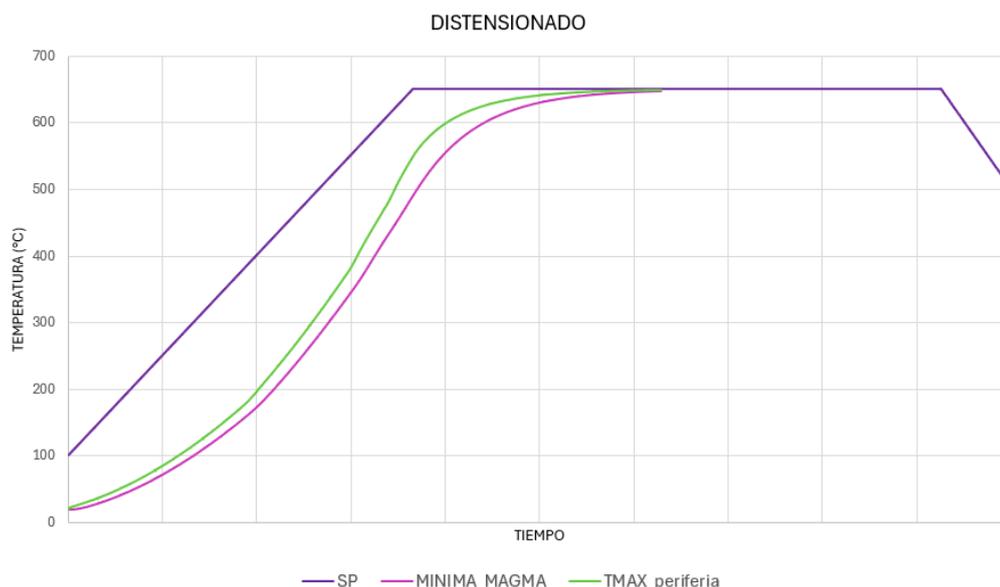


Figura 57. Curvas de temperatura mínima y de superficie MAGMASOFT.

Una vez obtenidas las curvas de temperatura mínima y de superficie de MAGMASOFT se calculan las diferencias entre centro y superficie y entre centro y consigna mencionadas anteriormente. A continuación, se presenta la evolución de ambas diferencias con el tiempo de tratamiento. Puede apreciarse como la pieza se equilibra térmicamente antes que con el horno, y cómo ambas diferencias tienden a converger en un valor cero o próximo a cero.

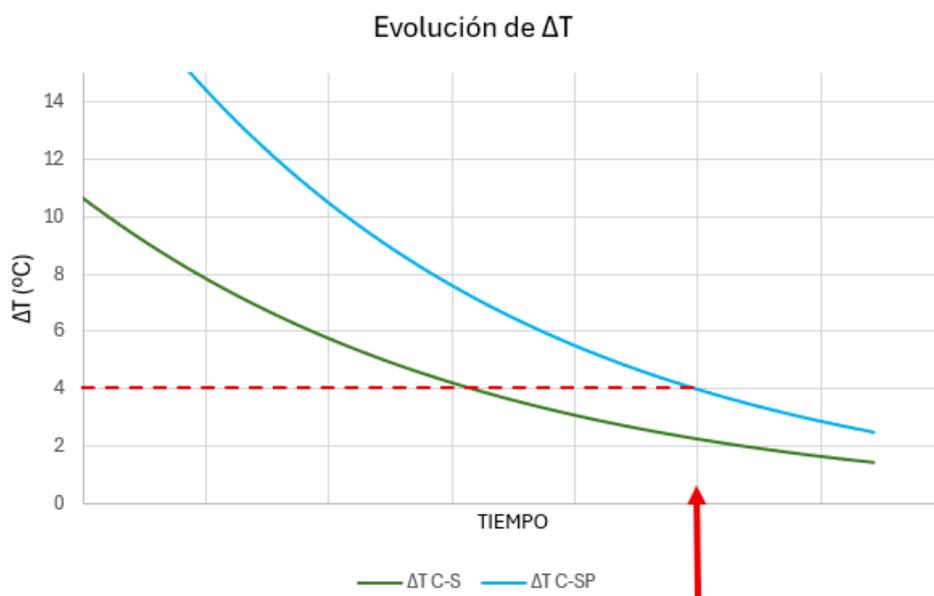


Figura 58. Evolución de las diferencias de temperatura con el tiempo.

De la Figura 58 se obtiene el momento temporal en el que se cumple la condición de empapamiento presentada previamente, cumpliendo que las dos diferencias de temperatura se encuentran por debajo de 4°C.

A continuación, se estudia la curva de consumo instantáneo del tratamiento real para poder comparar su comportamiento con los resultados de MAGMASOFT. En primer lugar, se realiza una media móvil de las muestras de consumo instantáneo de forma que se obtiene una curva suavizada de la distribución de muestras.

$$MMG_t = \frac{\sum_{i=1}^n G_{t-i}}{n}$$

Siendo,

- MMG_t : la media móvil de la señal de consumo instantáneo en el instante t , en $m^3/6mins$.
- G_{t-i} : el valor de cada muestra de consumo instantáneo, en $m^3/6mins$.
- n : el número de unidades de tiempo promediadas. Si $n = 5$, tenemos que

$$\left(6 \frac{min}{dato}\right) \cdot 5 \text{ datos} \cdot \frac{1 \text{ hora}}{60 \text{ min}} = 0.5 \text{ horas}$$

Variando los parámetros de la ecuación según:

- $t [n, n + 1, n + 2 \dots n + x]$ con x igual al número de datos que se tienen.
- $i [0, n]$ en intervalos de 1 dato.

Sobre esta curva se aplica el valor mínimo histórico registrado hasta el momento.

$$MH_t = MIN(MMG_0: MMG_t)$$

Siendo,

- MH_t : mínimo histórico en el instante t , en $m^3/6mins$.
- MMG_0 : media móvil en el instante inicial en $m^3/6mins$.
- MMG_t : media móvil en el instante t , en $m^3/6mins$.

También se grafica la pendiente (m) de los datos correspondientes al mínimo histórico en un periodo de 0,5 horas de forma que se facilita el entendimiento del momento en que se puede considerar que la curva se ha vuelto asintótica.

$$m (\%) = \frac{MH_t - MH_{t-n}}{n} \times 100$$

Con $n = 5$ siguiendo la lógica de pasos anteriores.

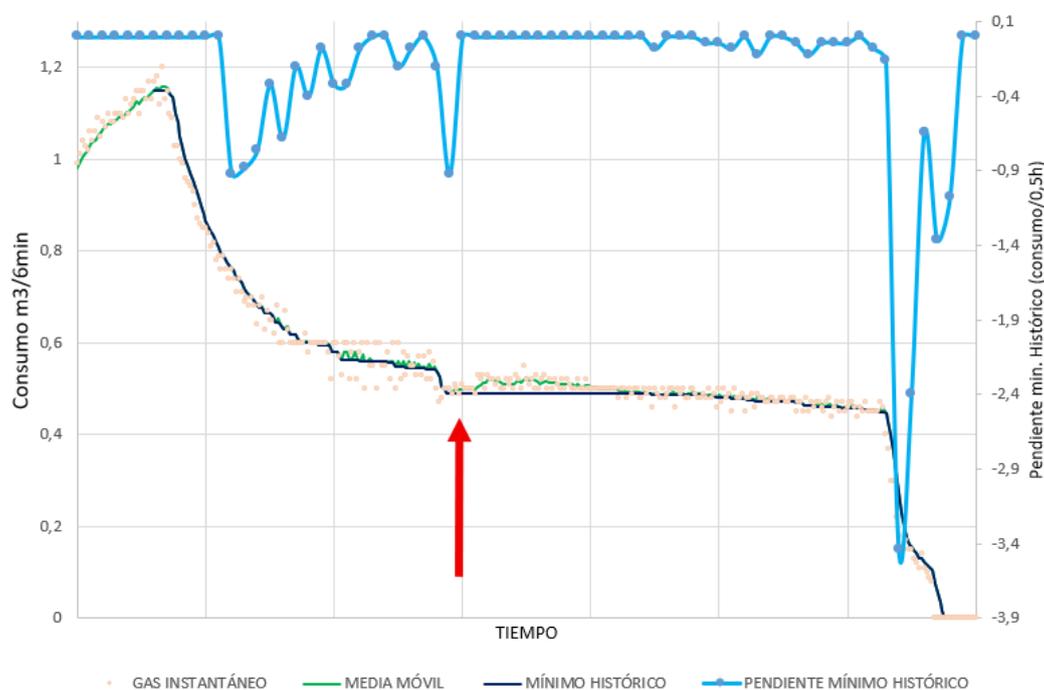


Figura 59. Gráfica de la media móvil y la pendiente frente al tiempo.

En la Figura 59, se refleja con una flecha el momento en que se alcanza el empapamiento, según las predicciones de MAGMASOFT. Se puede observar cómo ese momento coincide con el instante en que la pendiente del mínimo histórico se hace cero. Antes de concluir el análisis cabe mencionar unas apreciaciones sobre la dinámica del tratamiento que tienen repercusión sobre las conclusiones del mismo.

La observación cuidadosa de la forma de la curva de consumo instantáneo nos indica que existe una discontinuidad que coincide en el tiempo con la predicción de empapamiento. Esto, lejos de ser un efecto normal, es fruto de un ajuste en la regulación del horno.

Es típico en hornadas tan diversas como las que se dan en el taller de Reinoso Forgings & Castings el percibir pequeñas desviaciones en las zonas de control del horno. Dada la variedad de pesos y geometría de las piezas, es prácticamente imposible establecer una configuración óptima de quemadores para cada pieza a priori, quedando el ajuste más adecuado de la regulación delegado en el personal del Taller que monitoriza cuidadosamente cada hornada y corrige la configuración de quemadores antes de que las diferencias alcancen valores excesivos. Al detectarse

este tipo de casos, el personal del Taller regula la entrada de gas a algunos quemadores para bajar selectivamente la energía de las zonas más calientes. Lo que se observa en la Figura 59 es, de hecho, ese caso. Por ello, cabe entender que las condiciones de transferencia de calor serán diferentes antes y después de dicho cambio en la regulación.

En cualquier caso, el análisis revela que existe una buena correlación entre la pendiente de la curva de consumo instantáneo y el empapamiento de la pieza. A la luz de los datos, se propone el siguiente modelo para predecir de manera muy simple el instante en el que se alcanza el empapamiento:

$$t_{empapamiento} = t_{pMH,0.5} + A$$

Donde,

$t_{empapamiento}$ es el instante en el que se alcanza el empapamiento de la pieza en horas.

$t_{pMH,0.5}$ es el instante en horas en el que la pendiente de la señal de mínimo histórico alcanza un valor nulo. El subíndice 0.5 denota que esta condición debe mantenerse durante al menos media hora para amortiguar el efecto de posibles fluctuaciones de la señal.

A es un tiempo de seguridad, en horas, cuya función responde a ajustar el modelo para considerar las diferentes regulaciones que se pueden dar en el horno.

En vista de hacer el presente modelo lo más transferible posible a otros hornos y hornadas, se decide optar por un valor de $A = 2$ horas. De esta manera, la predicción del modelo se torna algo conservadora, reconociendo que en el caso del distensionado la primera parte del tratamiento ha sido quizá más intensa energéticamente hablando que en otros procesos equivalentes. Esto, teniendo en cuenta la enorme incertidumbre que existe en la predicción industrial de tiempos de empapamiento, se considera una aproximación que aporta valor al Taller.

5 CONCLUSIONES

A continuación, se recogen las principales conclusiones derivadas de ambos estudios, destacando los resultados más relevantes obtenidos a partir del análisis de datos históricos, la construcción de modelos predictivos y la validación numérica mediante elementos finitos.

Conclusiones en cuanto al análisis estadístico:

- Se ha desarrollado y propuesto un modelo predictivo del consumo de gas para hornadas de normalizado, no pudiendo ajustarlo a los tratamientos de temple, revenidos, distensionados o recocidos. Los resultados de comprobación destacan la robustez del modelo para predicciones de grupos de varias hornadas frente a hornadas individuales. La predicción de varios grupos tiene la capacidad de absorber los errores y acertar con un error tan bajo como 3.42 %. Esto plantea el modelo como una buena opción para obtener una predicción temporal de hornadas como, por ejemplo, el consumo total de las hornadas de una semana.
- Como no requiere de una segregación en subgrupos, es posible utilizar la muestra de tratamientos de los hornos 25 y 31 para generar una propuesta de coeficientes de dificultad. Sin embargo, su valor para representar al Taller en su conjunto es limitado. Se recomienda considerar estos coeficientes mayormente para los revenidos, donde la proporción de hornadas se asemeja al Taller y se tiene una cantidad razonable de muestras para el estudio. Los normalizados pueden valorarse, y ningún tratamiento más debería ser considerado preciso hasta que no se reediten estos análisis con una muestra más amplia.

Conclusiones en cuanto a la predicción del empapamiento de piezas:

- Se ha determinado la historia térmica del punto más frío de una pieza de manera indirecta, utilizando una combinación de simulación con software MAGMASOFT y medidas directas de temperatura.
- Se ha validado satisfactoriamente un método predictivo basado en la evaluación de la pendiente de la curva de consumo instantáneo para determinar el instante de empapamiento de piezas. Dicho modelo debe

entenderse dependiente del horno y del tipo de acero, conque su aplicabilidad está en principio restringida a hornadas de características similares a la utilizadas para validarlo.

6 RECOMENDACIONES A FUTURO

El presente Proyecto ha dado unos primeros pasos en la estimación estadística estableciendo una base metodológica y de actuación para los estudios del consumo de gas en el área de Piezas Forjadas y Fundidas y en la predicción del grado del empapamiento en base a curvas de consumo.

Los análisis han resultado en modelos que pueden utilizarse para realizar predicciones y análisis de costes con las limitaciones descritas en el apartado 5. Se recomienda continuar alimentando los análisis estadísticos con muestras más amplias, incluyendo más hornos y piezas, para así poder generar un modelo que contemple no sólo normalizados sino también temples y posiblemente revenidos. Asimismo, se cree que el uso de herramientas basadas en *machine learning*, como árboles de regresión o técnicas de *clustering* podrían ayudar a esclarecer las complejas relaciones de variables que se dan, como, por ejemplo, en los revenidos.

En cuanto a la predicción de empapamiento, se recomienda repetir el ejercicio desarrollado en el presente Proyecto en nuevas hornadas en las que se disponga de termopares interiores, para ensanchar el rango de confianza del método y, posiblemente, proponerlo como una alternativa en línea para optimizar tiempos de residencia de piezas.

7 REFERENCIAS

APRÁIZ BARREIRO, José, 1984. *Tratamientos térmicos de los aceros*. Madrid : Dossat.

BLÁZQUEZ MARTÍNEZ, Víctor M., LORENZO ESTEBAN, Vicente y RÍO LÓPEZ, Benito del, 2014. *Ingeniería y ciencia de los materiales metálicos*. Madrid : Dextra Editorial. Ingeniería y ciencia de los materiales. ISBN 9788416277230.

BROWNLEE, Jason, 2018. *Statistical Methods for Machine Learning: Discover how to Transform Data into Knowledge with Python*. Machine Learning Mastery.

BRUCE, Peter, 2022. *Estadística Práctica para Ciencia de Datos con R y Python*. 1st ed. Barcelona : Marcombo, S.A. ISBN 9788426734549.

CALLISTER, William, 2012. *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Reimpr. Barcelona : Reverté. ISBN 9788429172539.

DEL BARRIO GONZÁLEZ, J.M. y GARCÍA MENDIETA, E. *Metalurgia del Acero*. Sidenor I+D.

GIL MUR, Francisco Javier, 2005. *Metalografía*. 1. ed. Barcelona : Edicions UPC. Politext, 166. ISBN 9788483018040.

GONZÁLEZ GARCÍA, Laura , 2025. *Optimización de tratamientos térmicos del acero utilizando la señal de consumo del horno* [en línea]. Universidad de Cantabria. Recuperado a partir de : <https://hdl.handle.net/10902/35492>

Inicio, *REINOSA Forgings Castings* [en línea]. Recuperado a partir de : <https://reinosafc.com/> [accedido 5 mayo 2025].

KANJI, Gopal K., 2009. *100 statistical tests*. 3. ed., reprinted. London : Sage Publ. ISBN 9781412923750.

LEE, Jye-Long et al., 1999. Evaluation of Transformation Latent Heat in C-Mn Steels. *ISIJ International*. Vol. 39, n.º 3, pp. 281-287. DOI 10.2355/isijinternational.39.281.

MAGMASOFT®, *MAGMASOFT – Ingeniería Autónoma* [en línea]. Recuperado a partir de : <https://www.magmasoft.com/es/solutions/magmasoft/> [accedido 16 mayo 2025].

MCKINNEY, Wes, 2010. *Data Structures for Statistical Computing in Python*. *scipy*. DOI 10.25080/Majora-92bf1922-00a.

NGUYEN, Huy Hoang, 2023. *Building statistical models in Python: Develop useful models for regression, classification, time series, and survival analysis*. Birmingham : Packt Publishing, Limited. ISBN 9781804614280.

PEET, M.J., HASAN, H.S. y BHADESHIA, H.K.D.H., 2011. Prediction of thermal conductivity of steel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Vol. 54, n.º 11-12, pp. 2602-2608. DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.01.025.

Quienes somos, *REINOSA Forgings Castings* [en línea]. Recuperado a partir de : <https://reinosafc.com/quienes-somos/> [accedido 5 mayo 2025].

SCHLEGEL, Joachim, 2023. *The World of Steel: On the History, Production and Use of a Basic Material*. 1st ed. Wiesbaden : Springer Vieweg. in Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH. ISBN 9783658397326.

TEZANOS, J., 2004. *Proyecto TF-137/03 - Manual de funcionamiento MAGMASOFT*. . Sidenor I+D.

THORBORG, Jesper y THOMSER, Corinna. *Heat Treatment of steels - Virtual optimization of microstructures, mechanical properties, stresses and distortions*. . MAGMA Giebereitechnologie GmbH.

TRINKS, W. (ed.), 2004. *Industrial Furnaces*. 6th ed. Hoboken, N.J : J. Wiley. ISBN 9780471387060.

VERDEJA GONZÁLEZ, José Ignacio, FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, Daniel y VERDEJA GONZÁLEZ, Luis Felipe, 2023. *Physical metallurgy and heat treatment of steel*. Cham : Springer. Topics in mining, metallurgy and materials engineering. ISBN 9783031057014.

VERHOEVEN, John D., 2005. *Metalurgy of Steel for Bladesmiths & Others who Heat Treat and Forge Steel*.

WYCZOLKOWSKI, Rafal, STRYCHALSKA, Dominika y BADGASARYAN, Vazgen, 2022. Correlations for the thermal conductivity of selected steel grades as a function of temperature in the range of 0–800°C. *Archives of Thermodynamics*. Vol. 43, n.º 3, pp. 29-45. DOI 10.24425/ather.2022.143170.