



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**DISEÑO DE ACEROS BAINÍTICOS PARA REVESTIMIENTOS DE MOLINOS
SAG Y BOLAS DE MOLIENDA**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
MECÁNICO**

ANDRÉS JESÚS ARANEDA ROSELLO

PROFESOR GUÍA:

RODRIGO PALMA HILLERNS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

AQUILES SEPÚLVEDA OSSES

RODRIGO ESPINOZA GONZÁLEZ

SANTIAGO DE CHILE

SEPTIEMBRE 2013

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE: INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

POR: Andrés Jesús Araneda Rosello

FECHA: 04/09/2013

PROFESOR GUÍA: Rodrigo Palma Hillerns

**DISEÑO DE ACEROS BAINÍTCOS PARA REVESTIMIENTOS DE MOLINOS
SAG Y BOLAS DE MOLIENDA**

El reemplazo de revestimientos de los molinos en la etapa de molienda produce que los procesos mineros se detengan por bastante tiempo, por lo que el diseño de aceros que tengan una buena resistencia al desgaste producto de moler las rocas y una dureza aceptable para esta labor, puede ser muy útil para la industria minera y para Chile.

Por lo anterior, en este trabajo se diseñan aceros para revestimientos de molino SAG y bolas de molienda. Además de esto, se estudian relaciones microestructura-propiedades en aceros bainíticos, se diseña la composición de aceros bainíticos para bolas y revestimientos, y seleccionan los tratamientos térmicos.

El estudio se centra en aceros bainíticos debido a que tienen una mejor relación entre dureza y resistencia al desgaste que los aceros perlíticos, los cuales son actualmente utilizados en la industria minera para revestimientos de molinos. Además, los aceros bainíticos presentan una mejor resistencia al desgaste a una misma dureza que los aceros martensíticos utilizados para confeccionar las bolas de molienda.

La metodología es buscar bibliografía apropiada, para luego seleccionar aceros según ésta y así solicitar diagramas CCT (Transformación por enfriamiento continuo) de los aceros seleccionados a la Universidad Federico Santa María, los cuales son obtenidos mediante un programa computacional, e intersectados con las curvas de enfriamiento de las bolas y los revestimientos confeccionadas con tratamientos térmicos utilizados en la industria. Después, utilizando ecuaciones se obtienen las propiedades de los aceros estudiados.

Las aleaciones seleccionadas son las siguientes:

- Bolas de Molienda: Aleaciones con la siguiente composición: 0,7%C-2%Mn-1%Cr-2%Si-0,25%Mo para enfriamiento con agua con agitada fuertemente y 0,7%C-0,7%Mn-1%Cr-2%Si-0,5%Mo para enfriamiento con agua agitada violentamente.
- Revestimientos (Lifter y Parrilla): Aleación con la siguiente composición: 0,3%C-0,7%Mn-2,5%Cr-2%Si-0,5%Mo para enfriamiento con aire forzado.

Las propiedades mecánicas para los revestimientos son:

- Límite de fluencia lifter: 1528,5 [MPa]. Límite de fluencia parrilla: 1551,8 [MPa].
- Dureza lifter: 513,1 [HB]. Dureza parrilla: 518,2 [HB].
- Tenacidad lifter: 59 [MPa \sqrt{m}]. Tenacidad parrilla: 59,39 [MPa \sqrt{m}].

Este trabajo está dedicado a los 4 integrantes de mi primera familia, Daniel Araneda Caballol, Marcela Rosello Herrera, David Araneda Rosello y Gabriel Araneda Rosello, y a mi nueva familia, María Fernanda Palma López e Ignacio Araneda Palma.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mis padres, Daniel Araneda Caballol y Marcela Rosello Herrera, por todo el apoyo durante toda mi vida. Por ayudarme en los momentos difíciles de esta y por todo el amor y cariño que me han brindado en estos 25 años.

Darles las gracias a mis 2 hermanos, David Araneda Rosello y Gabriel Araneda Rosello, por su apoyo y cercanía. Ustedes han sido el complemento perfecto al apoyo de mis padres.

A mis amigos desde el inicio de esta travesía Universitaria, Javiera, Natalia, Luis, Kenji, Alexis y Vicente, y a mis amigos de especialidad, en especial a Francisco, por su cercanía y apoyo.

Agradecer al profesor Rodrigo Palma Hillerns, por su guía y ayuda durante todo este trabajo, al profesor Aquiles Sepúlveda Osses, por su ayuda en esta memoria desde el curso de Introducción al trabajo de título y al profesor Rodrigo Espinoza González por su colaboración. Además quiero agradecer a los 3 por su constante preocupación por mi familia.

A David Villaseca y Carolina Castillo por su ayuda y buen recibimiento en la empresa COMOTECH.

Gracias a María del Carmen Núñez y Raquel Valdés por su ayuda y constante preocupación.

También quiero agradecer a toda la gente del departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile por su colaboración y ayuda en mi formación académica y como persona.

Para finalizar quiero agradecer a María Fernanda Palma López por su apoyo, cariño y todo el amor que me ha brindado. Quiero agradecerte por darme el regalo más lindo de toda mi vida, mi hijo hermoso, Ignacio Araneda Palma, que llegó a coronar el final de esta etapa. Gracias hijo por darme esta alegría de vivir cada día contigo y hacerme enormemente feliz.

Tabla de contenido

1. Introducción.....	1
1.1. Objetivo General.....	1
1.2. Objetivos específicos	1
1.3. Alcances.....	2
Capítulo 2.....	3
2. Antecedentes	3
2.1. Molinos SAG.....	3
2.2. Bolas de Molienda	4
2.3. Revestimientos.....	5
2.4. Desgaste abrasivo	5
2.5. Austenita y tamaño de grano.....	7
2.6. Bainita.....	8
2.6.1. Microestructura.....	9
2.6.2. Cinética de transformación.....	11
2.6.3. Propiedades mecánicas	15
2.6.4. Elementos aleantes	16
2.7. Martensita	17
2.7.1. Microestructura.....	17
2.7.2. Propiedades mecánicas	18
2.8. Bainita – Martensita.....	20
2.9. Velocidad de enfriamiento.....	22
2.9.1. Bolas de molienda	22
2.9.2. Revestimientos	24
3. Metodología.....	25
3.1. Diagramas CCT	25
3.2. Curvas de enfriamiento	25
3.3. Intersección Curvas.....	25
3.4. Propiedades	25
Capítulo 4.....	26
4. Desarrollo.....	26

4.1.	Curvas CCT	26
4.2.	Enfriamiento aceros	27
4.2.1.	Bolas de molienda	27
4.2.2.	Revestimientos	27
4.3.	Relación dureza-fluencia	27
4.3.1	Aceros Bainíticos.....	27
4.3.2	Aceros martensíticos.....	28
4.3.3	Mezcla bainita-martensita.....	28
	Capítulo 5.....	30
5.	Resultados	30
5.1	Curvas de enfriamiento	30
5.1.1	Bolas de molienda	30
5.1.2	Lifter	41
4.2.1.	Parrilla	45
5.2.	Obtención de aceros	48
5.3.	Definición de aceros	49
5.3.1	Bolas de molienda	49
5.3.2	Lifter	51
5.3.3	Parrilla	52
5.3.4	Propiedades Mecánicas aceros seleccionados	54
5.4.	Análisis de resultados	56
5.5.	Limitaciones del modelo.....	56
	Capítulo 6.....	58
6.	Conclusiones	58
7.	Bibliografía	60
	Anexo A.....	62
A.	Diagramas CCT	62
	Anexo B	79
B.	Aporte en dureza de los elementos aleantes en aceros martensíticos	79

Índice de tablas

Tabla 2.1: Comparación entre las propiedades mecánicas de los aceros bainíticos (^a) y los aceros perlíticos (^b). ([5]).....	7
Tabla 2.2: Constantes para la obtención de V_B ([1]).	14
Tabla 3.1: Rango en que varía cada elemento aleantes para obtener los diagramas CCT.	25
Tabla 5.1: Propiedades del acero para las bolas de molienda ([2]).	30
Tabla 5.2: Propiedades del agua ([18]).....	33
Tabla 5.3: Rangos de elementos aleantes para construir los diagramas CCT.	49
Tabla 5.4: Aleaciones con más de 50% de bainita.	49
Tabla 5.5: Aleaciones con más de 50% de bainita para el lifter.....	51
Tabla 5.6: Aleaciones con más de 50% de bainita para la parrilla.	52
Tabla 5.7: Composición, fracciones de cada fase y porcentaje de carbono en austenita.	55
Tabla 5.8: Límite de fluencia en MPa y dureza en Brinell antes del revenido.....	55
Tabla 5.9: Límite de fluencia en MPa y dureza en Brinell después del revenido. CVN en Joule y tenacidad en $MPa \cdot m^{0.5}$	55

Índice de figuras

Figura 2.1: Molino SAG, Codelco, División Andina.	3
Figura 2.2: Interior Molino SAG.	4
Figura 2.3: Bolas de molienda.	4
Figura 2.4: Microestructuras del acero con su relación de resistencia al desgaste y dureza. ([4])..	6
Figura 2.5: Formación bainita superior e inferior. ([11])	9
Figura 2.6: Formación de bainita. ([11])	9
Figura 2.7: Curva T_0' . ([11]).....	12
Figura 2.8: Crecimiento de la bainita. Las regiones c y d indican crecimiento. Las zonas a y b son nuevas partículas, pero b no contribuye a la expansión de la bainita.	14
Figura 2.9: Contribución del elemento aleante por porcentaje en peso de ferrita. ([15]).....	16
Figura 2.10: Dureza de un acero martensítico revenido dependiendo del contenido de carbono.	19
Figura 2.11: Temperatura del centro como función del tiempo en una esfera de radio r.	23
Figura 2.12: Distribución de temperaturas en una esfera de radio r.	23
Figura 4.1: Diagrama CCT obtenido con el programa Stecal.	26
Figura 5.1: Conductividad térmica en función de la temperatura.	32
Figura 5.2: Calor específico en función de la temperatura.	32
Figura 5.3: Mecanismos de enfriamiento para distintas temperaturas del acero.	34
Figura 5.4: Velocidad de enfriamiento en el centro, a 2,5” de diámetro y en la superficie de la bola de molienda obtenido mediante aproximaciones con gráficos.	36
Figura 5.5: Velocidad de enfriamiento logarítmica en el centro, a 2,5” de diámetro y en la superficie de la bola de molienda obtenido mediante aproximaciones con gráficos.....	36
Figura 5.6: Velocidad de enfriamiento en distintos medios para un acero bainítico ([17]).	37
Figura 5.7: velocidad de enfriamiento de la superficie obtenida en Ansys.	38
Figura 5.8: Velocidad de enfriamiento de la bola enfriada con agua agitada fuertemente obtenida en Ansys.	39
Figura 5.9: Velocidad de enfriamiento de la bola enfriada con agua agitada fuertemente obtenida en Ansys en escala logarítmica.....	39
Figura 5.10: Velocidad de enfriamiento de la bola enfriada con agua agitada violentamente obtenida en Ansys.....	40
Figura 5.11: Velocidad de enfriamiento de la bola enfriada con agua agitada violentamente obtenida en Ansys en escala logarítmica.	40
Figura 5.12: Modelo CAD del lifter.	41
Figura 5.13: Modelo CAD del lifter utilizado en ANSYS.	42
Figura 5.14: Condiciones de borde lifter.	42
Figura 5.15: Velocidades de enfriamiento del lifter.	43
Figura 5.16: Velocidades de enfriamiento logarítmica del lifter.	44
Figura 5.17: Puntos del lifter de los cuales se obtienen las curvas de enfriamiento.	45
Figura 5.18: Modelo CAD de una parrilla de un molino SAG.	46
Figura 5.19: Modelo CAD de la parrilla utilizado en ANSYS.....	46
Figura 5.20: Velocidades de enfriamiento de la parrilla.	47

Figura 5.21: Velocidades de enfriamiento logarítmicas de la parrilla.....	47
Figura 5.22: Puntos de la parrilla de los cuales se obtienen las curvas de enfriamiento.....	48
Figura 5.23: Diagrama CCT de la aleación número 16 intersectado con la curva de enfriamiento con agitación fuerte.	50
Figura 5.24: Diagrama CCT de la aleación número 35 intersectado con la curva de enfriamiento con agitación violento (Curvas verdes).	50
Figura 5.25: Diagrama CCT de la aleación número 40 intersectado con la curva de enfriamiento del lifter.	52
Figura 5.26: Diagrama CCT de la aleación número 40 intersectado con la curva de enfriamiento de la parrilla.	53
Figura A.1: Diagrama CCT para la aleación 2.	62
Figura A.2: Diagrama CCT para la aleación 3.	63
Figura A.3: Diagrama CCT para la aleación 4.	63
Figura A.4: Diagrama CCT para la aleación 7.	64
Figura A.5: Diagrama CCT para la aleación 8.	64
Figura A.6: Diagrama CCT para la aleación 9.	65
Figura A.7: Diagrama CCT para la aleación 11.	65
Figura A.8: Diagrama CCT para la aleación 12.	66
Figura A.9: Diagrama CCT para la aleación 13.	66
Figura A.10: Diagrama CCT para la aleación 14.	67
Figura A.11: Diagrama CCT para la aleación 15.	67
Figura A.12: Diagrama CCT para la aleación 16.	68
Figura A.13: Diagrama CCT para la aleación 18.	68
Figura A.14: Diagrama CCT para la aleación 19.	69
Figura A.15: Diagrama CCT para la aleación 20.	69
Figura A.16: Diagrama CCT para la aleación 22.	70
Figura A.17: Diagrama CCT para la aleación 27.	70
Figura A.18: Diagrama CCT para la aleación 30.	71
Figura A.19: Diagrama CCT para la aleación 32.	71
Figura A.20: Diagrama CCT para la aleación 33.	72
Figura A.21: Diagrama CCT para la aleación 35.	72
Figura A.22: Diagrama CCT para la aleación 40.	73
Figura A.23: Diagrama CCT para la aleación 44.	73
Figura A.24: Diagrama CCT para la aleación 45.	74
Figura A.25: Diagrama CCT para la aleación 47.	74
Figura A.26: Diagrama CCT para la aleación 50.	75
Figura A.27: Diagrama CCT para la aleación 3.	75
Figura A.28: Diagrama CCT para la aleación 53.	76
Figura A.29: Diagrama CCT para la aleación 55.	76
Figura A.30: Diagrama CCT para la aleación 57.	77
Figura A.31: Diagrama CCT para la aleación 58.	77
Figura A.32: Diagrama CCT para la aleación 59.	78

Figura B.1: Contribución de elementos aleantes a la dureza de la martensita revenida a 400°C por una hora.	79
Figura B.2: Contribución de elementos aleantes a la dureza de la martensita revenida a 500°C por una hora.	79
Figura B.3: Contribución de elementos aleantes a la dureza de la martensita revenida a 600°C por una hora.	80
Figura B.4: Contribución de elementos aleantes a la dureza de la martensita revenida a 700°C por una hora.	80
Figura B.5: Contribución de elementos aleantes a la dureza de la martensita revenida a 800°C por una hora.	81
Figura B.6: Contribución de elementos aleantes a la dureza de la martensita revenida a 900°C por una hora.	81
Figura B.7: Contribución de elementos aleantes a la dureza de la martensita revenida a 1000°C por una hora.	82
Figura B.8: Contribución de elementos aleantes a la dureza de la martensita revenida a 1100°C por una hora.	82
Figura B.9: Contribución de elementos aleantes a la dureza de la martensita revenida a 1200°C por una hora.	83
Figura B.10: Contribución de elementos aleantes a la dureza de la martensita revenida a 1300°C por una hora.	83

Capítulo 1

1. Introducción

En Chile la industria minera es la principal fuente de ingresos del país, por lo que es muy importante realizar mejoras en esta área. Una parte importante del proceso de producción que se realiza en una minera, es el proceso de molienda, el cual puede ser realizado en molinos SAG, los cuales deben ser mantenidos por causa del desgaste de las bolas de molienda o del acero que reviste el molino.

Para realizar la mantención del acero que reviste los molinos, éstos se deben detener, por lo que no hay producción en este período de tiempo, lo que causa pérdidas importantes en la industria. Además, el dinero que se gasta en bolas para estos molinos es considerable ya que éstas se deben recambiar cada cierto tiempo, a pesar de que para esto no se deba detener el proceso.

Así, es importante desarrollar aceros que resistan mejor la abrasión y el impacto sufrido por los componentes de los molinos SAG al chocar las rocas que deben ser reducidas.

Es por esto que en este trabajo se buscará obtener una buena relación entre la dureza y la tenacidad, de manera que los revestimientos y las bolas de molienda de los molinos SAG duren más y, por ende, se ahorre dinero en los costos de producción principalmente, y si es posible en cuanto a los materiales utilizados, ya que se necesitarán menos bolas si estas durasen más.

Por esta razón se buscarán composiciones de aceros bainíticos en la bibliografía existente y, mediante un programa, se obtendrán las propiedades mecánicas de estos aceros, para finalmente elegir el que sea más apto para la confección de bolas de molienda y revestimientos de molinos SAG.

1.1. Objetivo General

Diseñar la composición y tratamiento térmico necesario para fabricar aceros bainíticos para revestimientos de molino SAG y bolas de molienda.

1.2. Objetivos específicos

- Estudiar relaciones microestructura-propiedades en aceros bainíticos.
- Diseñar composición de aceros bainíticos para bolas y revestimientos.

- Diseñar tratamientos térmicos para bolas y revestimientos.

1.3. Alcances

Este trabajo es teórico, por lo que no se fabricarán los aceros, sino que sólo se diseñarán.

Capítulo 2

2. Antecedentes

2.1. Molinos SAG

Los molinos SAG o molinos semiautógenos se ocupan para reducir el tamaño de las rocas extraídas luego de la etapa de chancado primario que se le realiza al mineral.

La ventaja que tienen estos molinos con respecto a los de bolas es que son más grandes y se puede pasar directamente de la etapa de chancado primario a la de flotación sin pasar por un chancador secundario o terciario.

Estos molinos reducen el tamaño del mineral haciendo chocar las rocas entre ellas o las bolas de acero que se encuentran en su interior con estas.



Figura 2.1: Molino SAG, Codelco, División Andina.



Figura 2.2: Interior Molino SAG.

En su interior se encuentran bolas de molienda, las cuales son levantadas por los lifter y desechadas por las parrillas en caso de que estas estén muy desgastadas. Debido a esto último cada cierto tiempo es necesario suministrar nuevas bolas al molino.

2.2. Bolas de Molienda

Estas bolas se encuentran dentro del molino y por causa de la rotación de este se mueven dentro golpeando las rocas que contienen el mineral para reducir el tamaño de estas.

Las bolas de molienda tienen una microestructura martensítica, con durezas del orden de 60 Rc.



Figura 2.3: Bolas de molienda.

2.3. Revestimientos

Los revestimientos de los molinos SAG deben tener una resistencia al desgaste tal que puedan resistir el impacto de las rocas y de las bolas de molienda con un desgaste mínimo, de manera que el molino no sea detenido en bastante tiempo para reemplazar las parrillas y los lifter, los cuales son los 2 tipos de revestimientos que se tienen.

Los revestimientos actuales son de microestructura perlítica, los cuales tienen una dureza alrededor de los 350 HB. Estos aceros luego de los acero bainíticos son los que presentan mejor resistencia al desgaste.

2.4. Desgaste abrasivo

El desgaste tanto de los revestimientos como de las bolas de molienda será un desgaste abrasivo, producto del contacto entre las rocas y el acero, además del contacto entre las superficies de las bolas con el lifter y las parrillas.

Este tipo de desgaste provoca remoción de material producto de la interacción mecánica entre las superficies. Esto puede ocurrir de 2 maneras, la primera es por el roce de una superficie de mayor dureza con otra y la segunda es por partículas abrasivas entre 2 cuerpos.

Debido a que el volumen desgastado por la abrasión dependerá no sólo del material sino de los esfuerzos a los que este esté sometido, Holm y Archard ([3]) obtuvieron la siguiente fórmula para estimar el volumen desgastado.

$$V = \frac{kNS}{H} \quad (2.1)$$

Con:

V: Volumen desgastado.

N: Carga aplicada.

S: Distancia de deslizamiento.

H: Dureza de la superficie desgastada.

k: Coeficiente de desgaste.

El coeficiente de desgaste va a depender tanto de las propiedades de los materiales en contacto como de las condiciones de operación.

La Resistencia al desgaste (R) aumenta a medida que disminuye el volumen desgastado según la siguiente ecuación:

$$R = \frac{1}{V} \quad (2.2)$$

La resistencia al desgaste también depende de la microestructura del acero como se muestra en la siguiente figura.

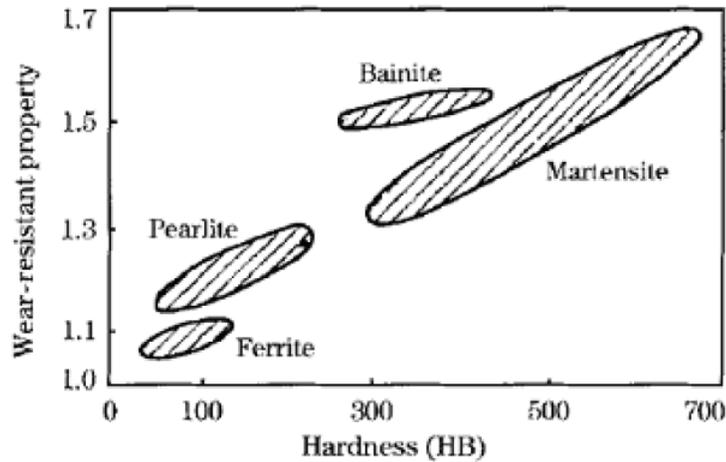


Figura 2.4: Microestructuras del acero con su relación de resistencia al desgaste y dureza. ([4])

Aquí se puede observar que si bien los aceros bainíticos tienen una buena resistencia al desgaste, debido a su alto contenido de carbono este bajaba, por lo que para los revestimientos se ocupaban aceros de microestructura perlítica. Debido a esto se fueron haciendo estudios para mejorar las propiedades de los aceros bainíticos, por lo que al obtener aceros con esta microestructura y un bajo contenido de carbono se logró finalmente mejorar las propiedades mecánicas de estos aceros.

**Tabla 2.1: Comparación entre las propiedades mecánicas de los aceros bainíticos ^(a) y los aceros perlíticos ^(b).
([5])**

Acero	UTS [MPa]	Sy [MPa]	Elongación [%]	Dureza [HRC]
J1 ^a	1360	846	14	40
J2 ^a	1151	830	16	37
J4 ^a	945	721	18	28
J6 ^a	1433	992	8.8	
X1 ^a	1350-1402	850-886	9-14	41
B1 ^a	823	645	19.6	26
B2 ^a	1421	1079	14	43
HH ^b	1206-1320	790-861	11-13	37
P1 ^b	855	401	15.3	26
P2 ^b	1303	900	13.3	40
Rail ^a	1092-1280	560-844	11-18	

Debido a que los aceros bainíticos tienen pequeñas partículas de cementita en una matriz ferrítica, muestran una mejor relación en general de resistencia y ductilidad como se puede apreciar en la tabla expuesta anteriormente.

Estudios recientes incluso han mostrado que los aceros bainíticos presentan mejor tenacidad que algunos aceros perlíticos ([5]), ([6]), ([7]).

Debido a los motivos anteriormente expuestos es que se hace muy interesante el estudio de aceros bainíticos para revestimientos de molinos SAG y bolas de molienda.

2.5. Austenita y tamaño de grano

El tamaño de grano austenítico influirá directamente en las propiedades mecánicas del acero, independiente de la microestructura que este tenga, en cuanto a si es bainítica o de otro tipo. Este tamaño de grano va a depender de la siguiente relación ([8]), ([9]), ([10]):

$$d = A * \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) t^n \quad (2.3)$$

Con:

d: Tamaño de grano austenítico.

A: Constante.

n: Constante.

Q: Energía de activación.

R: Constante universal de los gases.

T: temperatura.

t: Tiempo.

Debido a que además de la dependencia de la temperatura y el tiempo con el tamaño de grano austenítico, este depende también de los elementos aleantes presentes en el acero, Seok-Jae Lee y Young-Kook Lee, propusieron la siguiente ecuación, luego de hacer estudios con placas de aceros compuestas de carbono, níquel, molibdeno y cromo, laminadas en caliente de 8 [mm] de espesor:

$$d = 76671 * \exp\left(-\frac{89098 + 3581C + 1211Ni + 1443Cr + 4031Mo}{RT}\right) t^{0,211} \quad (2.4)$$

Donde:

d: Tamaño de grano austenítico en [μm].

T: temperatura en Kelvin.

t: Tiempo en segundos.

C: Porcentaje en peso de carbono en la aleación.

Ni: Porcentaje en peso de níquel en la aleación.

Cr: Porcentaje en peso de cromo en la aleación.

Mo: Porcentaje en peso de molibdeno en la aleación.

2.6. Bainita

La bainita está formada por placas de ferrita supersaturada en carbono. Luego dependiendo de la temperatura de transformación de la bainita existen 2 tipos de esta como se muestra en la siguiente figura.

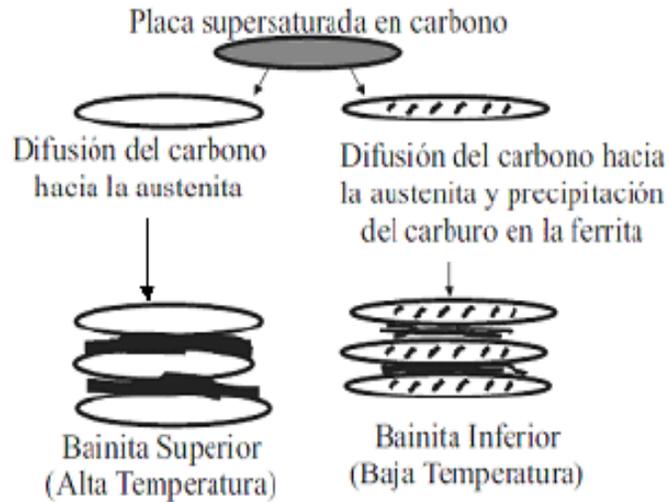


Figura 2.5: Formación bainita superior e inferior. ([11])

- Bainita Superior: El carbono difunde hacia la austenita.
- Bainita Inferior: Además de la difusión del carbono a la austenita, también se precipita el carburo en la ferrita.

2.6.1. Microestructura

La microestructura de la bainita está formada por plumas que están en los bordes de grano austeníticos. Estas plumas están formadas a su vez por placas que se agrupan de forma paralela. Esto se puede ver en la siguiente figura.

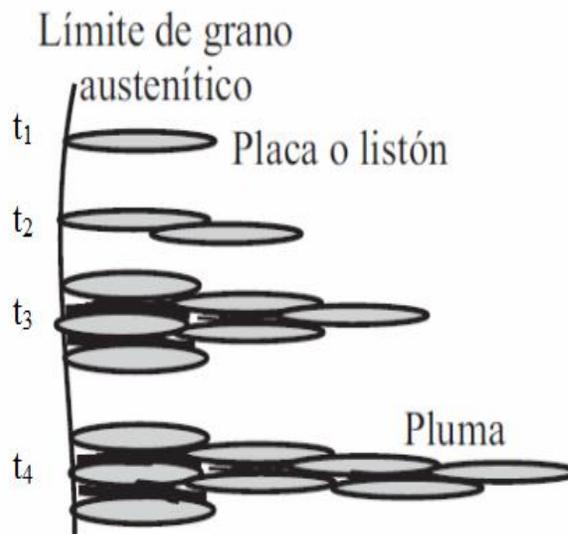


Figura 2.6: Formación de bainita. ([11])

Tamaño de grano:

Las subunidades bainíticas tienen un espesor que depende de la siguiente relación ([12]):

$$w_{\alpha B} = 0,478 + (1,2 * 10^{-4})T + (1,25 * 10^{-4})(-\Delta G^{\gamma \rightarrow \alpha}) - (2,2 * 10^{-3})S_{\gamma} \quad (2.5)$$

Con:

T: temperatura en Kelvin.

$\Delta G^{\gamma \rightarrow \alpha}$: Fuerza impulsora para la transformación bainítica en J/mol.

S_{γ} : Fluencia en la austenita residual.

Luego la fluencia en la austenita residual queda dada por ([12]):

$$S_{\gamma} = 15,4 * f(T_R) + (4,4 + 23C + 1,3Si + 0,24Cr + 0,94Mo + 32N) \quad (2.6)$$

Donde:

$$f(T_R) = 1 - 0,26 * 10^{-2}T_R + 0,47 * 10^{-5}T_R^2 - 0,326 * 10^{-8}T_R^3 \quad (2.7)$$

Con:

$$T_R = T - 298 \quad (2.8)$$

Densidad dislocaciones:

Para la densidad de dislocaciones en la bainita se tiene la siguiente relación, para temperaturas entre 570 a 920 Kelvin ([13]):

$$\rho = 9,2848 + \frac{6880}{T} - \frac{1780360}{T^2} \quad (2.9)$$

Donde:

ρ : Densidad de dislocaciones en $[m^{-2}]$.

T: Temperatura de transformación isotérmica en Kelvin.

Se asume que bajo los 570 [K] la densidad de dislocaciones se mantiene igual a la que hay a esta temperatura.

2.6.2. Cinética de transformación

La bainita al crecer no difunde, sin embargo al nuclear sí, ya que el carbono difunde a la austenita. Entonces para la formación de bainita deben darse 2 condiciones, una para la nucleación y otra para el crecimiento.

Para nucleación:

$$\Delta G_m < G_N \quad (2.10)$$

Con:

ΔG_m : Energía motriz para la nucleación

G_N : Energía crítica para nucleación.

Para crecimiento:

$$\Delta G^{\gamma \rightarrow \alpha} < -G_{SB} \quad (2.11)$$

Donde:

$\Delta G^{\gamma \rightarrow \alpha}$: Energía motriz crítica para el crecimiento.

G_{SB} : Energía de deformación.

Debido a que la energía crítica para la nucleación depende de la temperatura se tiene lo siguiente ([11]):

$$G_N = 3,541(T - 273,18) - 2540 \quad (2.12)$$

Donde:

G_N : Energía crítica para nucleación en [J/mol].

T: Temperatura en Kelvin.

La temperatura de transformación bainítica, B_S , es a la cual las condiciones de crecimiento y nucleación se cumplen. Según Kirkaldy esta temperatura depende de la composición de la siguiente forma ([14]):

$$B_S = 656 - 57,7C - 75Si - 35Mn - 15,3Ni - 34Cr - 41,2Mo \quad (2.13)$$

Se va a definir también una temperatura llamada T_0' , bajo la cual tendrá lugar la transformación bainítica. El comportamiento de esta temperatura se muestra a continuación.

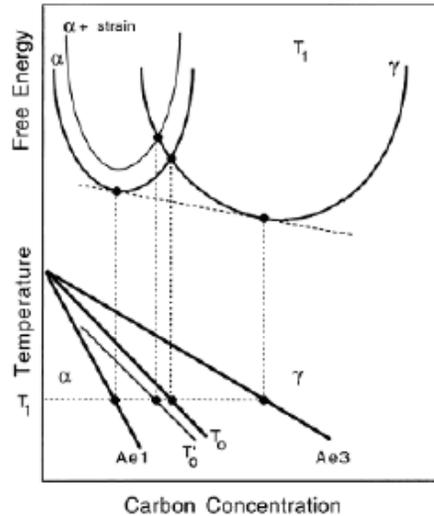


Figura 2.7: Curva T_0' . ([11])

La transformación será por debajo de esta temperatura, debido a que la concentración de carbono debe ser menor a la que se tiene a T_0' .

La fracción máxima de bainita que se puede transformar a una temperatura dada (V_{max}), está dada por:

$$V_{max} = \frac{x_{T_0'} - \bar{x}}{x_{T_0'} - x^{\alpha\gamma}} \quad (2.14)$$

Donde:

\bar{x} : Concentración molar de carbono en la aleación.

$x_{T_0'}$: Concentración molar de carbono para una temperatura de transformación isotérmica.

$x^{\alpha\gamma}$: Concentración de carbono en la ferrita.

Según Russell, el inicio de la nucleación en los bordes de grano es directamente proporcional a la siguiente expresión:

$$\tau_s \propto \frac{T}{(\Delta F_m^v)^p D} \quad (2.15)$$

Con:

T: Temperatura absoluta.

(ΔF_m^v) : Máximo cambio de energía libre que acompaña la formación de un núcleo.

D: Coeficiente de difusión efectivo.

p: Magnitud relacionada con la naturaleza del núcleo.

El coeficiente de difusión efectivo es a su vez directamente proporcional a la expresión:

$$D \propto \exp\left(\frac{S}{R}\right) \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2.16)$$

Donde:

S: Entropía para la activación de la difusión.

Q: Entalpía para la activación de la difusión.

R: Constante universal de los gases.

Ahora se debe determinar el tiempo que demora en crecer la bainita al volumen máximo que se puede obtener.

Para calcular primero el volumen de bainita que se tiene en total se ocupa la siguiente relación:

$$dV^\alpha = \left(1 - \frac{V^\alpha}{V}\right) dV^e \quad (2.17)$$

Con:

V: Volumen total.

V^α : Volumen de bainita formada.

V^e : Expansión del volumen de bainita.

Además se tiene para dV^e , la siguiente expresión:

$$dV^e = I_V V u dt \quad (2.18)$$

Donde:

I_V : Tasa de nucleación de bainita.

u: Volumen de una sub-unidad de bainita.

Esto debido a que hay partículas que contribuyen al incremento de bainita, mientras que otras no lo hacen. Esto se muestra en la siguiente imagen.

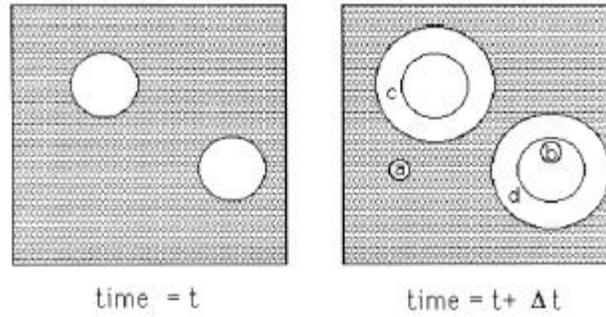


Figura 2.8: Crecimiento de la bainita. Las regiones c y d indican crecimiento. Las zonas a y b son nuevas partículas, pero b no contribuye a la expansión de la bainita.

Cabe destacar que la tasa de nucleación está dada por la siguiente ecuación:

$$I_V = (1 - \beta V_B) I_0 \quad (2.19)$$

Con:

I_0 : Tasa de nucleación en estado inicial.

β : Factor de autocatálisis.

La tasa de nucleación es aproximada por la siguiente ecuación:

$$I_0 = (\bar{L} K'_1)^{-1} \quad (2.20)$$

Donde:

\bar{L} : Tamaño de la austenita.

El factor K'_1 se puede ver en la siguiente tabla:

Tabla 2.2: Constantes para la obtención de V_B ([1]).

Constante	Unidad	Valor	Ref.
λ_1		147,5	[31]
λ_2		30,33	[31]
K_2	J/mol	2.540	[26]
K_3	J/mol	94.810	[26]
K'_1/u	$mm^{-1}s$	34.456	[31]

Finalmente el tiempo de transformación de bainita está dado por:

$$t = \frac{\left(\frac{1}{1 + \beta V_{max}} \right) (\ln(1 + \beta V_{max} \zeta) - \ln(1 - \zeta))}{\frac{u I_0}{V_{max}}} \quad (2.21)$$

Con:

$$\zeta = \frac{V_B}{V_{max}} = (2,7183^{Kt} - 1) / (\beta V_{max} + 2,7183^{Kt}) \quad (2.22)$$

$$K = \frac{uI_0}{V_{max}} (b + 1) \quad (2.23)$$

Cabe destacar que V_B corresponde a la fracción de volumen de bainita.

A este tiempo calculado se le debe sumar el tiempo que demora la bainita en nuclear, ya que este sólo considera el tiempo de crecimiento de las nucleaciones.

Finalmente el porcentaje de carbono en la austenita residual luego de la transformación de ferrita en bainita está dado por la siguiente expresión:

$$x_\gamma = \frac{\bar{x} - V_B x_B}{1 - V_B} \quad (2.24)$$

Con:

\bar{x} : Concentración de carbono inicialmente en el acero.

x_B : Concentración de carbono en la bainita ferrítica.

V_B : Fracción volumétrica de bainita.

2.6.3. Propiedades mecánicas

La resistencia a la fluencia de la bainita y la martensita están dadas por ([11]):

$$\sigma = \sigma_{Fe} + \sum_i \sigma_{SS}^i + \sigma_C + k_\varepsilon (\bar{L}_3)^{-1} + k_p \Delta^{-1} + C_{10} \rho^{0,5} \quad (2.25)$$

Donde:

σ_{Fe} : Aporte intrínseco del hierro.

σ_{SS} : Solución sólida de los elementos aleantes.

σ_C : Carbono en solución sólida.

k_ε : Constante ($k_\varepsilon = 115[\text{MPa}\mu\text{m}]$).

k_p : Constante.

C_{10} : Constante ($C_{10} = 7,34 * 10^{-6}$ [MPam]).

\bar{L}_3 : Medida del tamaño de la ferrita en forma de placa.

Δ^{-1} : Distancia entre partículas de cementita.

ρ : Densidad de las dislocaciones.

Para aceros con elementos aleantes y estructura BCC (estructura cúbica centrada en el cuerpo) se tiene la siguiente influencia de estos elementos a la resistencia a la fluencia, como se muestra en la siguiente figura.

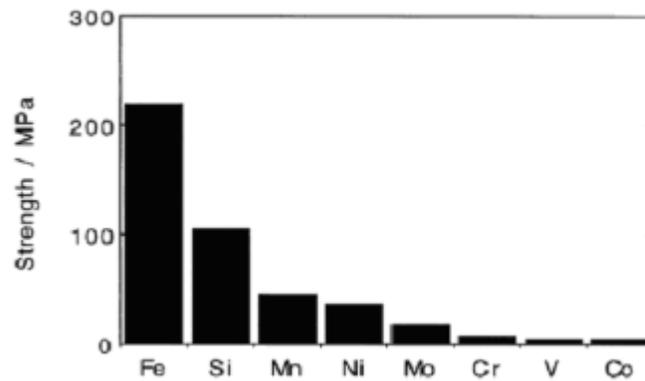


Figura 2.9: Contribución del elemento aleante por porcentaje en peso de ferrita. ([15])

Para el aporte del carbono a la resistencia a la fluencia se tiene la siguiente expresión ([16]):

$$\sigma_c = 1722,2x^{0,5} \quad (2.26)$$

Con:

σ_c : En [MPa].

x: Concentración de carbono en porcentaje en peso de solución sólida.

2.6.4. Elementos aleantes

El porcentaje de silicio varía entre 1,5 y 2% para que la cementita no precipite, y de esta forma obtener propiedades mecánicas deseadas para bolas de molienda y revestimientos.

El molibdeno debe ser máximo un 0,25%. Es importante para retardar el crecimiento de granos austeníticos.

Para resistir a la corrosión y otorgar dureza al acero se le aporta cromo en un porcentaje no superior al 1,5%.

Debido a que el vanadio puede desmejorar la tenacidad del acero, pero a su vez ser un aporte en la dureza de este, el porcentaje de este elemento aleante no será superior al 0,15%.

Según la bibliografía el valor máximo de níquel y manganeso es de un 3,5% y un 2% respectivamente.

2.7. Martensita

La martensita es la fase que presenta mayor dureza en los aceros. Para que esta se forme es necesario estar bajo la temperatura M_S , la cual se estima en función de los elementos aleantes como sigue ([16]):

$$M_S(^{\circ}C) = 539 - 423C - 30,4Mn - 12,1Cr - 17,7Ni - 7,5Mo \quad (2.27)$$

Luego de formarse la bainita, quedará austenita retenida con un nuevo contenido de carbono, por lo que la temperatura M_S cambiará de la obtenida en la aleación original. La fórmula para obtener esta nueva temperatura está dada por:

$$M_S = M_S(^{\circ}C) - 564(x_{\gamma} - \bar{x}) \quad (2.28)$$

Ahora para calcular la fracción de martensita se ocupa la siguiente relación:

$$\xi = 1 - (\exp(0,011 * (M_S - T_q))) \quad (2.29)$$

Aquí T_q representa la temperatura a la que está el medio en que se enfría el acero.

2.7.1. Microestructura

La martensita tiene forma de agujas y placas. Del tamaño del agujas de la martensita van a depender propiedades como la fluencia y la tenacidad. Es por esto que Kotrechko obtuvo la siguiente relación experimental del tamaño de la martensita (y) en función del tamaño de la austenita previa (x). Esta relación se muestra en la siguiente expresión ([1]):

$$y = 7,4528 \ln(x) - 10,311 \quad (2.30)$$

Luego se puede calcular el tamaño de la martensita en función del porcentaje de bainita presente en el acero. Esto se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$S_M = y * \exp(-0,015V_B) \quad (2.31)$$

Aquí se tiene que S_M es el tamaño de la martensita, mientras que V_B es el porcentaje de bainita en el acero obtenido.

2.7.2. Propiedades mecánicas

La martensita tiene una gran dureza, pero una tenacidad bastante baja. Es por esto que si bien se requiere martensita para otorgarle mayor dureza a los aceros esta debe estar en un porcentaje adecuado para que el acero no pierda tenacidad y no se fracture frente a esfuerzos.

La dureza de la martensita queda dada por la siguiente relación ([1]):

$$HV = HV_C + \Delta HV_{Mn} + \Delta HV_P + \Delta HV_{Si} + \Delta HV_{Ni} + \Delta HV_{Cr} + \Delta HV_{Mo} + \Delta HV_V \quad (2.32)$$

Aquí HV es la dureza en Vickers, HV_C es la contribución del carbono y ΔHV_i represente el aporte de los elementos aleantes presentes en el acero.

Debido a que estos aportes se expresarán para un revenido a cierta temperatura por una hora, se debe calcular la temperatura equivalente para poder obtener el aporte del carbono y los elementos aleantes a la dureza del acero. Esto se hace con la siguiente relación:

$$(F + 460)(18 + \log(t))10^3 = cte \quad (2.33)$$

El procedimiento para poder obtener la temperatura equivalente es obtener la constante de la fórmula anterior colocando en esta el tiempo de revenido (t) en horas y la temperatura a la que este se realiza (F) en grados Fahrenheit. Luego de obtener esta constante se ocupa la misma fórmula, pero ahora con un tiempo de 1 hora y se despeja la temperatura.

El aporte del carbono a la dureza, a la temperatura equivalente anteriormente obtenida, se obtiene de la siguiente figura:

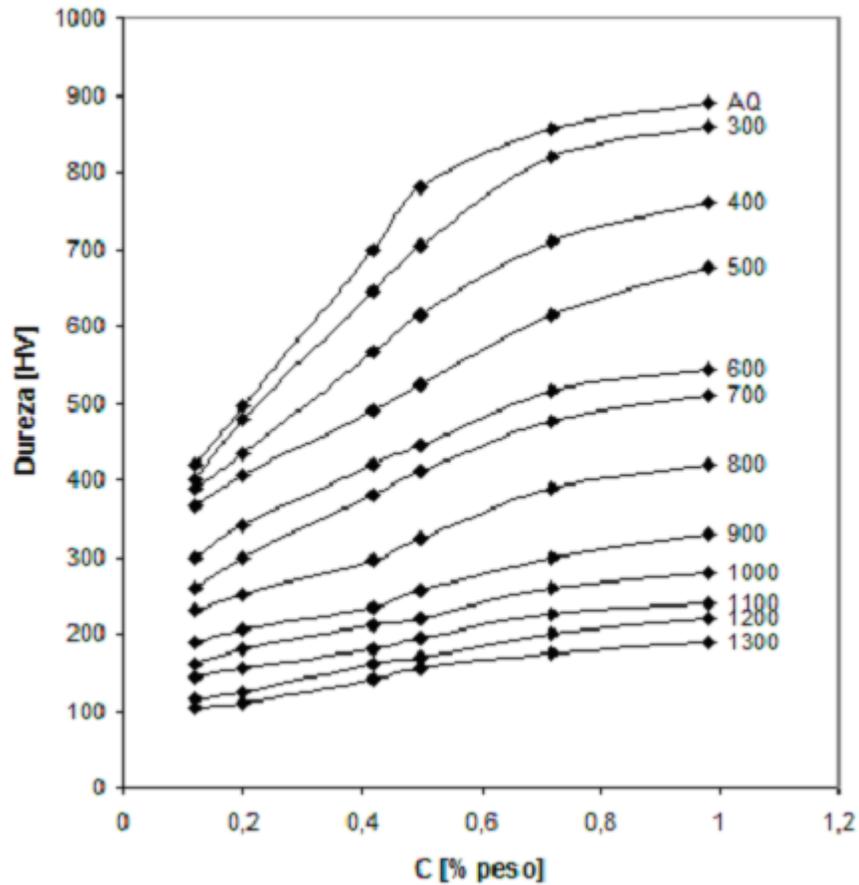


Figura 2.10: Dureza de un acero martensítico revenido dependiendo del contenido de carbono.

Mientras tanto que el aporte de los elementos aleantes se obtiene de los gráficos presentados en el Apéndice B.

Para el aporte del carbono a la resistencia a la fluencia para la martensita se tiene la siguiente expresión ([1]):

$$\sigma_C = 1771,2x^{0,5} \tag{2.34}$$

Con:

σ_C : En [MPa].

x: Concentración de carbono en porcentaje en peso de solución sólida.

A continuación se muestra la dependencia de la dureza de la martensita en función del contenido de carbono de esta:

$$HV = -763,49C^2 + 1392,1C + 257,24 \tag{2.35}$$

En esta ecuación HV representa la dureza en Vickers y C es la concentración de carbono en la martensita.

Una relación que muestra la dependencia de la dureza de un acero martensítico en función de su límite de fluencia es la siguiente:

$$HB = 0,2025S_y + 163,7 \quad (2.36)$$

Aquí la dureza se expresa en Brinell, mientras que S_y es el límite de fluencia del acero en [MPa].

2.8. Bainita – Martensita

La mezcla de bainita y martensita es muy interesante de analizar debido a las propiedades de cada microestructura. Mientras la martensita es bastante dura, pero poco dúctil, la bainita tiene una baja dureza, pero una gran ductilidad, por lo que con ciertos tratamientos térmicos a los aceros y obteniendo estas 2 microestructuras se pueden lograr interesantes propiedades mecánicas.

Para la resistencia a la fluencia se van a tener 2 ecuaciones, las cuales se van a aplicar según la fracción volumétrica de bainita que se tenga (V_B). Para V_B entre 0 y 30% se ocupará la siguiente ecuación ([1]):

$$\sigma_{0,2}^{Mix} = (\sigma_i + kS_M^{-\frac{1}{2}}) \quad (2.37)$$

Donde:

$\sigma_{0,2}^{Mix}$: Resistencia a la fluencia de la mezcla bainita-martensita.

$\sigma_{0,2}^M$: Resistencia a la fluencia de la martensita ($\sigma_{0,2}^M = (\sigma_i + kS_M^{-\frac{1}{2}})$).

$\sigma_{0,2}^B$: Resistencia a la fluencia de la bainita.

Para rangos entre un 25 y un 100% se ocupará la siguiente relación:

$$\sigma_{0,2}^{Mix} = (\sigma_i + kS_M^{-\frac{1}{2}}) * (1 - V_B) + \sigma_{0,2}^B * V_B \quad (2.38)$$

La tenacidad mientras tanto está dada por el factor K_{IC} como sigue:

$$K_{IC} = \sigma_f(2\pi r_c)^{0,5} \quad (2.39)$$

Con:

σ_f : Valor crítico de estrés.

r_c : Distancia r de la grieta de largo c.

Luego:

$$\sigma_f = \left(\frac{4E\sigma_p}{\pi(1-\nu^2)c} \right)^{0,5} \quad (2.40)$$

Donde:

E: Módulo de Young de la ferrita.

ν : Radio de Poisson.

σ_p : Trabajo plástico de fractura por unidad de área.

Sin embargo Di Schino y Guarnaschelli obtuvieron la siguiente relación para aceros templados y revenidos de alta resistencia:

$$\sigma_f = \left(\frac{4E\sigma_p}{(1-\nu^2)} \right)^{0,5} * d_{grano}^{-0,5} \quad (2.41)$$

Aquí d_{grano} representa el tamaño de grano.

Para un porcentaje mayor a un 30% de bainita la dureza de la aleación se obtiene mediante la siguiente relación:

$$H_{mix} = H_M(1 - V_B) + H_B V_B \quad (2.42)$$

Donde H_M es el aporte a la dureza de la martensita y H_B el de la bainita, ambas revenidas.

Para obtener la tenacidad del acero se calcula la Energía al impacto de Charpy de la siguiente manera:

$$CVN = 65,3S_M^{-0,5}(-5,96V_B + 2V_B + 0,87) \quad (2.43)$$

Y finalmente se calcula el factor K_{IC} con el valor obtenido anteriormente de CVN mediante la ecuación que se muestra a continuación:

$$K_{IC} = \left(5\sigma_y \left(CVN - \frac{\sigma_y}{20} \right) \right)^{-0,5} \quad (2.44)$$

2.9. Velocidad de enfriamiento

Dependiendo de la velocidad a la que se enfríen las bolas de molienda y los revestimientos al momento de su confección y los distintos elementos aleantes de estos se tendrán distintas microestructuras.

Es por esto que se debe analizar la velocidad de enfriamiento de las bolas de molienda y de los revestimientos.

2.9.1. Bolas de molienda

Para el caso de una esfera se tiene lo siguiente:

$$\theta^* = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \exp(-\xi_n^2 F_0) * \frac{1}{(\xi_n r^*)} * \text{Sen}(\xi_n r^*) \quad (2.45)$$

Donde:

$$F_0 = \frac{\alpha t}{r_0^2} \quad (2.46)$$

$$C_n = \frac{4[\text{Sen}(\xi_n) - \xi_n \text{Cos}(\xi_n)]}{2\xi_n - \text{Sen}(2\xi_n)} \quad (2.47)$$

$$1 - \xi_n \text{Cot}(\xi_n) = Bi \quad (2.48)$$

Para $F_0 > 0,2$:

$$C_1 \exp(-\xi_1^2 F_0) * \frac{1}{(\xi_1 r^*)} * \text{Sen}(\xi_1 r^*) \quad (2.49)$$

Debido a que estas ecuaciones son difíciles de resolver se ocupará un método de aproximación mediante gráficos que se describe a continuación.

Para las bolas de molienda se realizará un modelo como si estas fueran circulares, ya que la transferencia de calor será radial. Es por esto que se hará una aproximación unidimensional dependiendo del radio del círculo.

Para una esfera se tienen los siguientes gráficos:

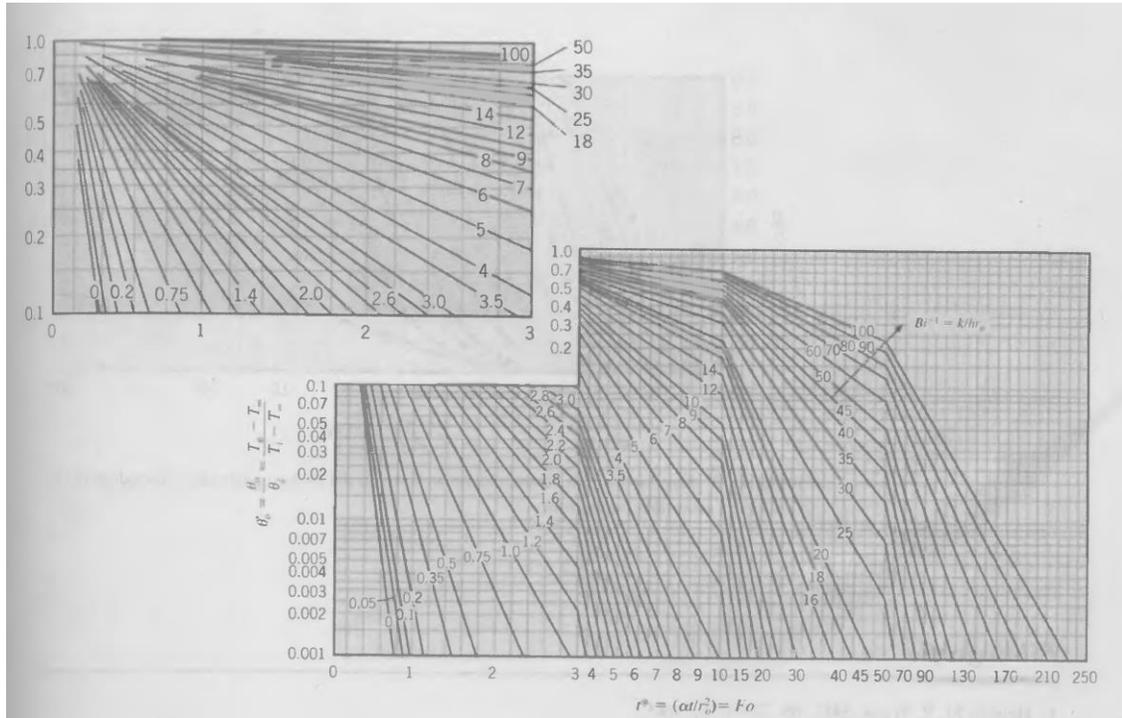


Figura 2.11: Temperatura del centro como función del tiempo en una esfera de radio r .

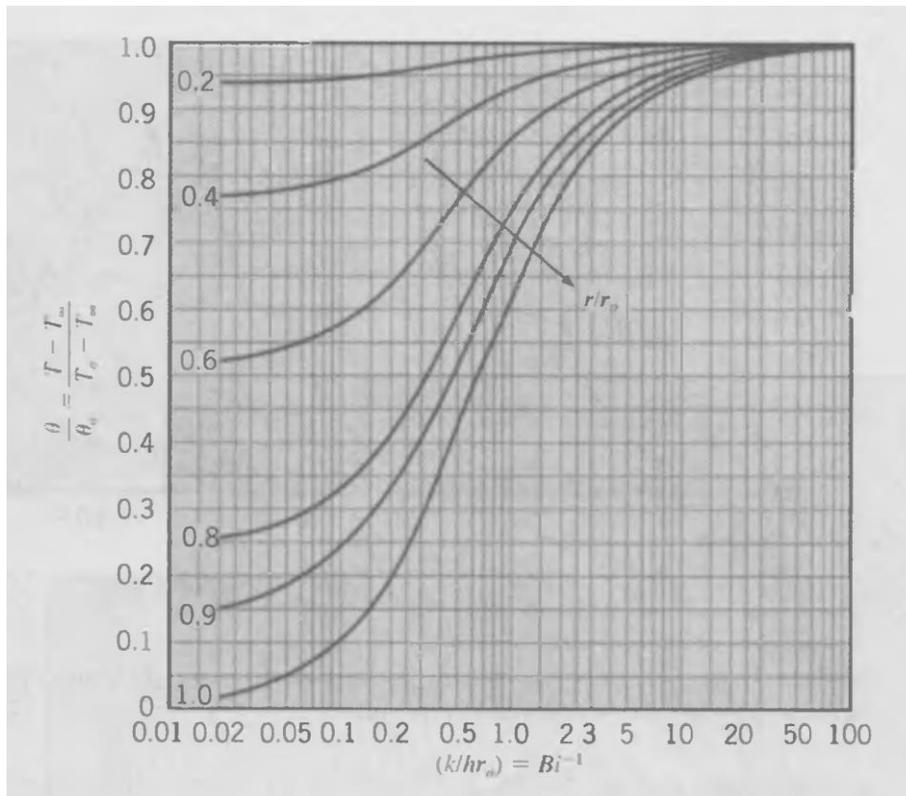


Figura 2.12: Distribución de temperaturas en una esfera de radio r .

Ocupando el segundo gráfico mostrado en esta sección, dependiendo del punto en el cual queramos conocer la temperatura, va a ser la curva que ocupemos. Luego, se puede calcular el recíproco de número de Biot, y de esta forma conocer la relación θ/θ_0 . De esta forma como se conoce la temperatura del ambiente (T_∞), se puede despejar la temperatura del centro (T_0). Luego esta temperatura nos permite calcular la relación del eje de las ordenadas del primer gráfico. Este valor se intersecta con la curva correspondiente al recíproco del Biot ya calculado, de manera de conocer el número de Fourier, y por ende el tiempo que demora la bola en bajar a la temperatura impuesta.

Luego con estos tiempos obtenidos se puede hacer un gráfico de la temperatura versus el tiempo que esta demora en decaer.

2.9.2. Revestimientos

Tanto para el lifter como para la parrilla, al ser la geometría bastante complicada se ocupará el programa Ansys para realizar las curvas de enfriamiento de las piezas, mostrando la velocidad de enfriamiento para el punto de menor y el punto de mayor temperatura, además de 3 puntos intermedios entre los 2 puntos anteriormente mencionados.

Capítulo 3

3. Metodología

3.1. Diagramas CCT

Lo primero que se hace es generar diagramas CCT mediante el programa Stecal, entregándole a este rangos de composición, los cuales varían según la siguiente tabla:

Tabla 3.1: Rango en que varía cada elemento aleantes para obtener los diagramas CCT.

Elemento	C	Mn	Si	Cr	Mo	B
Mínimo	0.3	0.7	0.3	1	0.25	no
Máximo	0.7	2	2	2.5	0.5	si

Estas curvas son obtenidas por la Universidad Federico Santa María.

3.2. Curvas de enfriamiento

Las curvas de enfriamiento serán obtenidas mediante el método de aproximación utilizado en la sección 2.9 para las bolas de molienda y mediante Ansys tanto para las bolas, de manera de corroborar los datos obtenidos utilizando la aproximación, como para los revestimientos.

3.3. Intersección Curvas

Los diagramas CCT y las curvas de enfriamiento se intersectan de manera de obtener la microestructura presente en el acero y seleccionar aceros bainíticos con un porcentaje igual o mayor a un 50% de bainita.

3.4. Propiedades

Se obtendrán propiedades mecánicas utilizando distintas relaciones. Estas propiedades serán la dureza y la tenacidad del acero obtenido mediante un tratamiento térmico establecido.

Capítulo 4

4. Desarrollo

4.1. Curvas CCT

Las curvas CCT obtenidas por la universidad Federico Santa María se formaron con el rango de composición expuesto en la tabla 3.1.

Cabe destacar que el programa sólo especifica el contenido de boro y no el porcentaje de este. El software empleado es Stecal. A este programa se le entrega la composición de los aceros y este retorna los diagramas CCT de estos.

Con estas composiciones se obtuvieron 64 diagramas CCT, como el que se ilustra a continuación:

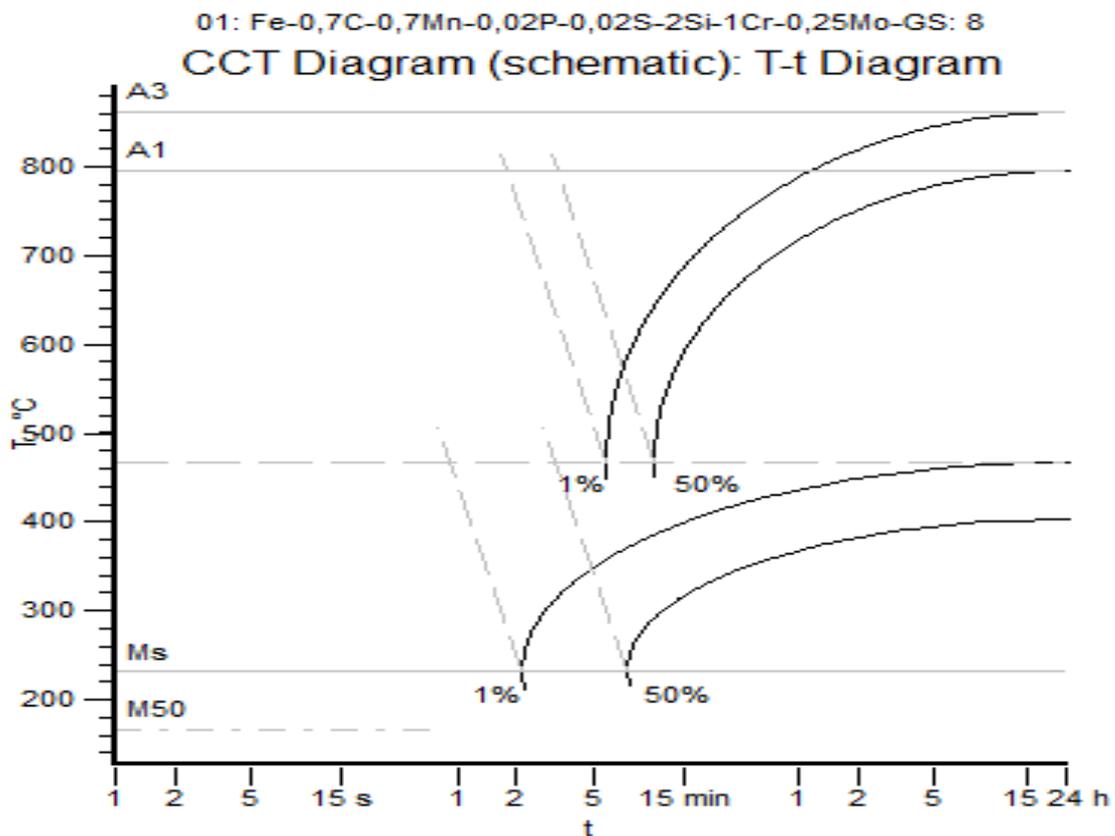


Figura 4.1: Diagrama CCT obtenido con el programa Stecal.

4.2. Enfriamiento aceros

Se obtuvieron paralelamente a los diagramas CCT curvas de enfriamiento para los revestimientos y las bolas de molienda.

4.2.1. Bolas de molienda

Se utilizan los gráficos para hacer las aproximaciones expuestos en antecedentes. Luego de obtener las curvas por este medio se comparan con datos obtenidos experimentalmente ([17]) para ser validadas. Finalmente se obtienen resultados mediante Ansys.

4.2.2. Revestimientos

Tanto para el lifter como para la parrilla se ocupa el programa Ansys para obtener las curvas de enfriamiento. Esto debido a la complicada geometría de ambas piezas.

4.3. Relación dureza-fluencia

4.3.1 Aceros Bainíticos

Se tiene la siguiente relación para la dureza en función de la fluencia para aceros bainíticos ([1]):

$$HB = -0,0002S_{ys}^2 + 0,7601S_{ys} - 166,54 \quad (4.1)$$

Donde:

HB: Dureza en Brinell.

S_{ys} : Fluencia de un acero bainítico en [MPa].

4.3.2 Aceros martensíticos

Se tiene la siguiente relación para la dureza en función de la fluencia para aceros martensíticos ([1]):

$$HB = 0,2025S_{ys} - 163,7 \quad (4.2)$$

Donde:

HB: Dureza en Brinell.

S_{ys} : Fluencia de un acero martensítico en [MPa].

4.3.3 Mezcla bainita-martensita

Para una fracción volumétrica de bainita (V_B) entre un 0 y un 25 % se ocupará la siguiente ecuación para determinar la dureza:

$$H_{mix} = H_M(1 - V_B) \quad (4.3)$$

Entre un 25 y un 30% de fracción volumétrica de bainita:

$$H_{mix} = H_M(1 - V_B) + H_B(V_B) * \frac{1}{2} \quad (4.4)$$

Y para rangos de V_B superior al 30% se tiene que:

$$H_{mix} = H_M(1 - V_B) + H_B(V_B) \quad (4.5)$$

En estas ecuaciones H_M es la dureza por contribución de la martensita y H_B por la bainita. H_{mix} es la dureza del acero con cierto porcentaje de bainita y otro porcentaje de martensita.

Mientras tanto para la tenacidad se tiene la siguiente relación:

$$K_{IC}^2 = 5\sigma_y(CVN - \frac{\sigma_y}{20}) \quad (4.6)$$

Donde:

$$CVN = (65,3 * S_M^{-0,5}) * (-5,96V_B^2 + 2V_B + 0,87) \quad (4.7)$$

Con:

S_M : Tamaño de grano de la martensita formada.

Además σ_y debe estar en [kpsi] y CVN en [lb*ft], por lo tanto, K_{IC} queda en [kpsi \sqrt{in}].

Capítulo 5

5. Resultados

5.1 Curvas de enfriamiento

En esta sección se presentarán 3 curvas de enfriamiento, una para la bola de molienda y otras 2 para los revestimientos del molino SAG. Para la bola se utilizará agua para enfriarla y para el revestimiento el medio en el cual se enfriará será aire.

5.1.1 Bolas de molienda

La bola de molienda de un diámetro de 5,5", será enfriada con agua agitada.

Para obtener la curva de la variación de la temperatura en función del tiempo primero se deben obtener las propiedades del acero y del agua a temperatura ambiente, la cual en este caso tomaremos como 50 °C. A continuación se muestran las propiedades del acero.

Tabla 5.1: Propiedades del acero para las bolas de molienda ([2]).

Propiedades de la bola de acero		Unidad
Diámetro	0,1397	m
Radio	0,06985	m
conductividad térmica (k) a 20°C	48,5576	$\frac{W}{mK}$
conductividad térmica (k) a 100°C	46,4646	$\frac{W}{mK}$
conductividad térmica (k) a 200°C	44,3716	$\frac{W}{mK}$
conductividad térmica (k) a 400°C	38,5112	$\frac{W}{mK}$
conductividad térmica (k) a 600°C	31,8136	$\frac{W}{mK}$
conductividad térmica (k) a 800°C	25,9532	$\frac{W}{mK}$
conductividad térmica (k) a 1000°C	28,0462	$\frac{W}{mK}$
calor específico (c) a 20°C	460	$\frac{J}{KgK}$
calor específico (c) a 100°C	493,948	$\frac{J}{KgK}$

calor específico (c) a 200°C	523,25	$\frac{J}{KgK}$
calor específico (c) a 400°C	594,412	$\frac{J}{KgK}$
calor específico (c) a 600°C	740,922	$\frac{J}{KgK}$
calor específico (c) a 800°C	933,478	$\frac{J}{KgK}$
densidad (ρ)	7840	$\frac{Kg}{m^3}$
difusividad térmica (α) a 20°C	1,34643E-05	$\frac{m^2}{s}$
difusividad térmica (α) a 100°C	1,19984E-05	$\frac{m^2}{s}$
difusividad térmica (α) a 200°C	1,08163E-05	$\frac{m^2}{s}$
difusividad térmica (α) a 400°C	8,26387E-06	$\frac{m^2}{s}$
difusividad térmica (α) a 600°C	5,47677E-06	$\frac{m^2}{s}$
difusividad térmica (α) a 800°C	3,54626E-06	$\frac{m^2}{s}$
Temperatura inicial	900	°C
Factor de emisividad (ϵ)	0,55	
Constante de Stefan-Boltzman (σ)	5,67E-08	$\frac{W}{m^2K^4}$
Temperatura media	460	°C
h radiación del acero	73,04974041	$\frac{W}{m^2K}$

Para hacer los cálculos se calcula una conductividad térmica, una difusividad térmica y un calor específico a 475°C, debido a que esta es la temperatura promedio, ya que la bola de molienda se enfriará desde 900°C hasta 50°C . De esta forma haciendo una aproximación polinómica a los datos obtenidos, se obtienen los siguientes gráficos:

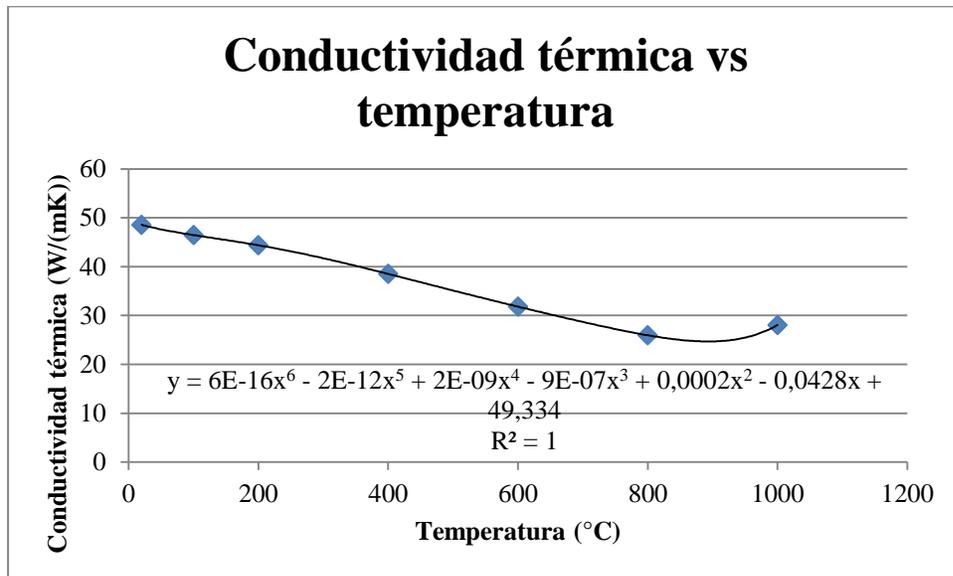


Figura 5.1: Conductividad térmica en función de la temperatura.

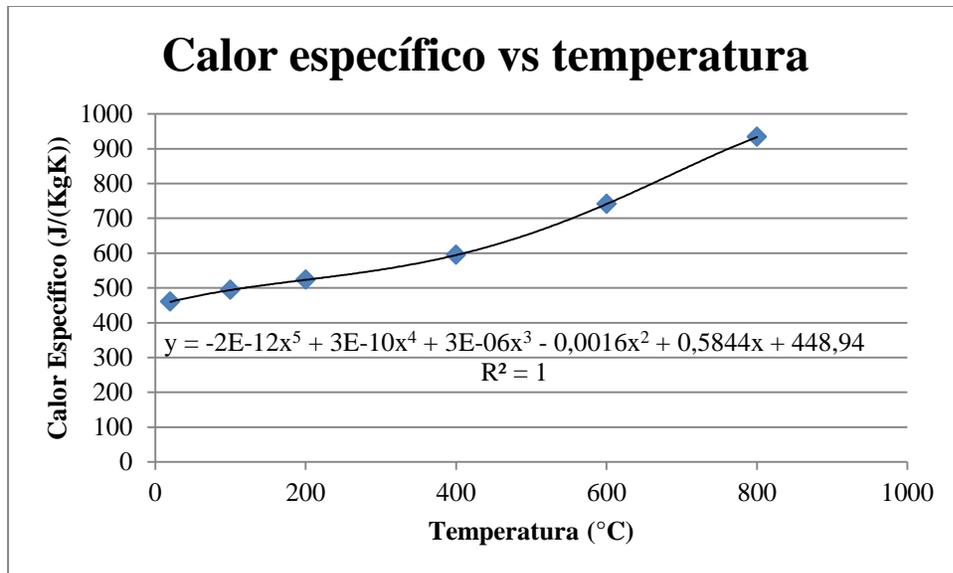


Figura 5.2: Calor específico en función de la temperatura.

De esta forma se obtiene un calor específico de $643,45 \left[\frac{J}{KgK} \right]$, una conductividad térmica de $38,4 \left[\frac{W}{mK} \right]$ y con la siguiente fórmula se obtiene la difusividad térmica a $460^{\circ}C$:

$$\alpha = \frac{k}{\rho * c_p} \tag{5.1}$$

La densidad es prácticamente constante con la temperatura, por lo que se obtiene:

$$\alpha = 7,61 * 10^{-6} \left[\frac{m^2}{s} \right] \tag{5.2}$$

El factor de emisividad se considera a 400°C.

A continuación se muestran las propiedades del agua.

Tabla 5.2: Propiedades del agua ([18]).

Propiedades del agua		
T del agua	20	°C
Temperatura de saturación	99,63	°C
Temperatura de película	499,815	°C
densidad del líquido	958,61	$\frac{Kg}{m^3}$
densidad del vapor	0,2805	$\frac{Kg}{m^3}$
Cp	2135	$\frac{J}{KgK}$
conductividad térmica (k)	0,06697	$\frac{W}{mK}$
Pr	0,9107	
Viscosidad	0,0001019	$\frac{m^2}{s}$
Velocidad	0	$\frac{s}{m}$
β	0,001297	$[K^{-1}]$
α	0,0001119	$\frac{m^2}{s}$
μ	2,8583E-05	[Pas]
Calor latente de evaporación	2257000	$\frac{J}{Kg}$
Calor latente corregido	3624031,96	$\frac{J}{Kg}$
Nusselt (Nu)	241,890618	
h del agua	115,9585876	$\frac{W}{m^2K}$
h agua con agitado fuerte	231,9171752	$\frac{W}{m^2K}$

La viscosidad dinámica (μ) se obtiene como la multiplicación de la densidad por la viscosidad cinemática.

Al comienzo del enfriamiento el acero formará una película de vapor con el agua, por lo que la transferencia de calor será más lenta debido a que esta capa actuará como aislante. Luego de esta etapa el calor será transferido mediante el método de ebullición en película. A continuación se ilustran las etapas de la transferencia de calor en la bola de molinenda.

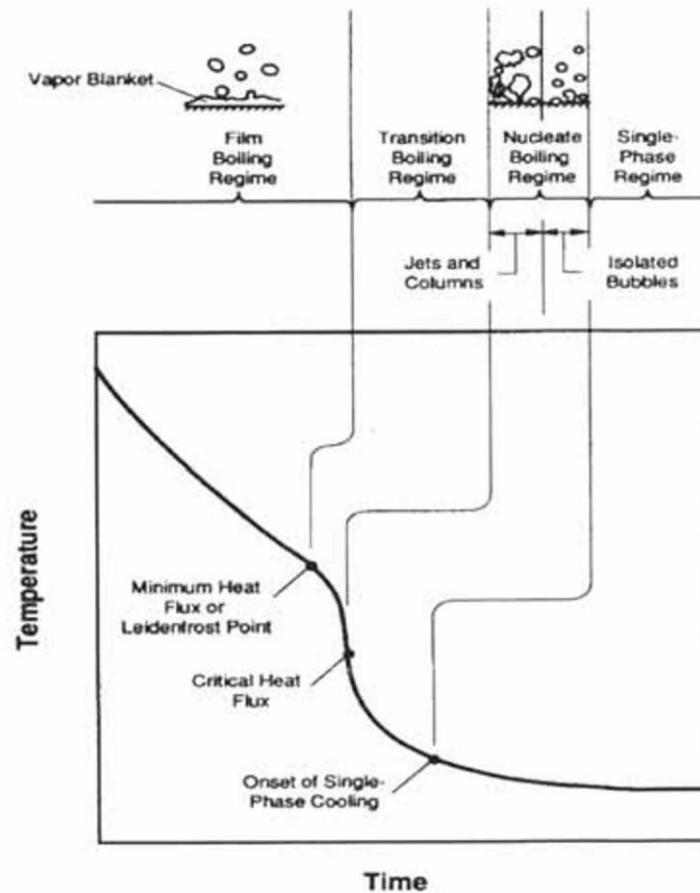


Figura 5.3: Mecanismos de enfriamiento para distintas temperaturas del acero.

En la primera etapa debido a que la transferencia de calor por convección es despreciable, producto de la capa de vapor entre el agua y el acero, en comparación con la radiación, se considerará sólo esta última.

Cabe notar que la velocidad es nula y debido a la gran diferencia de temperatura entre la bola y el agua, la transferencia de calor será mediante ebullición en película después de los 650 °C.

Para calcular el número de Nusselt se ocupa la siguiente expresión:

$$\overline{Nu}_D = C \left[\frac{g(\rho_L - \rho_V)h'_{fg}D^3}{\nu_v k_v (T_s - T_{sat})} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (5.3)$$

Con:

C: Constante de correlación. (0,67 para esferas)

Además se define h'_{fg} de la siguiente forma:

$$h'_{fg} = h_{fg} + 0,8c_{pv}(T_s - T_{sat}) \quad (5.4)$$

Las propiedades del vapor son a temperatura de película, es decir, a 460°C, mientras que la densidad del líquido se evalúa a temperatura de saturación.

A temperaturas superficiales iguales o mayores a 300°C, se tiene que:

$$\bar{h}^4 = \bar{h}_{conv}^4 + \bar{h}_{rad}\bar{h}^3 \quad (5.5)$$

Y debido a que $\bar{h}_{rad} < \bar{h}_{conv}$, se tiene que:

$$\bar{h} = \bar{h}_{conv} + \left(\frac{3}{4}\right)\bar{h}_{rad} \quad (5.6)$$

Mientras el coeficiente radiativo efectivo es calculado mediante la siguiente expresión:

$$\bar{h}_{rad} = \frac{\varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{sat}^4)}{T_s - T_{sat}} \quad (5.7)$$

Donde:

ε : Emisividad del sólido.

σ : Constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma=5,67*10^{-8}$ [W/m²K⁴]).

A continuación se presenta la curva de enfriamiento obtenida mediante aproximaciones, utilizando los gráficos expuestos en antecedentes.

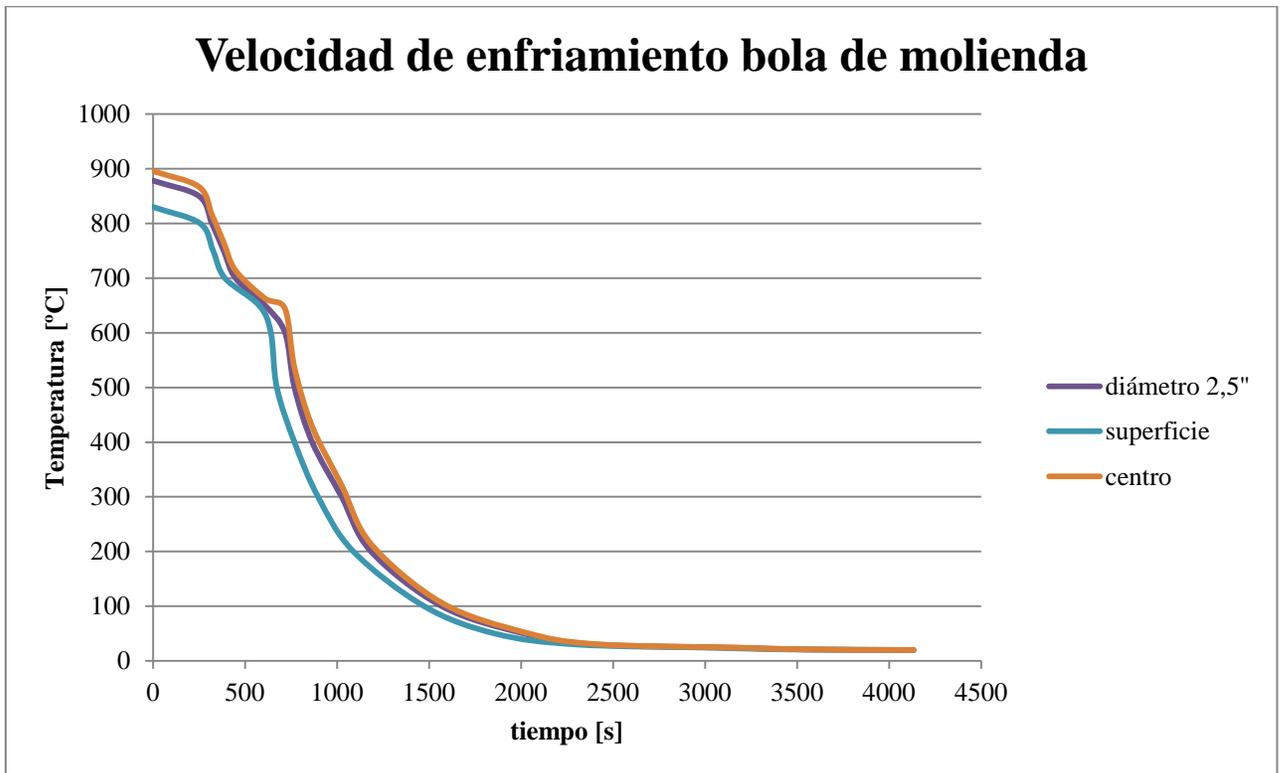


Figura 5.4: Velocidad de enfriamiento en el centro, a 2,5" de diámetro y en la superficie de la bola de molienda obtenido mediante aproximaciones con gráficos.

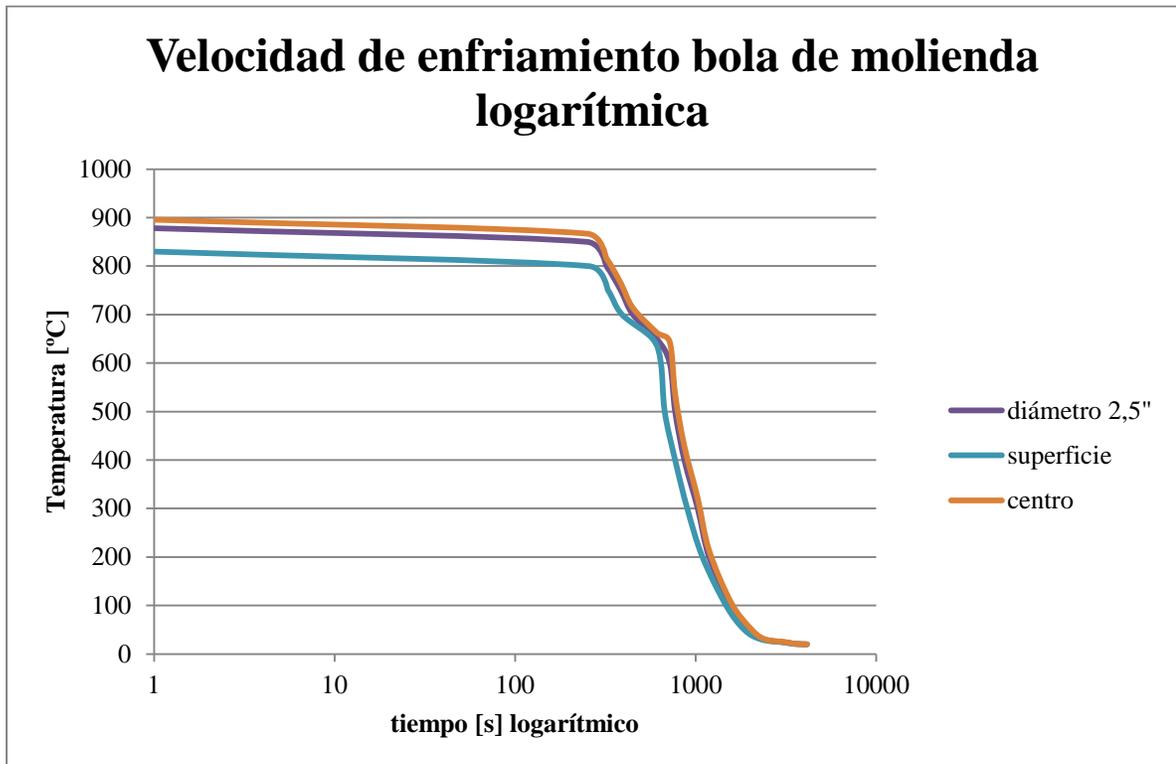


Figura 5.5: Velocidad de enfriamiento logarítmica en el centro, a 2,5" de diámetro y en la superficie de la bola de molienda obtenido mediante aproximaciones con gráficos.

Se muestran 3 curvas de enfriamiento debido a que es importante saber la microestructura en el centro, superficie y a 2,5 pulgadas de diámetro, debido a que cuando las bolas alcanzan esta medida son desechadas a través de la parrilla.

A continuación se muestra la curva para enfriamiento de aceros bainíticos obtenidas experimentalmente:

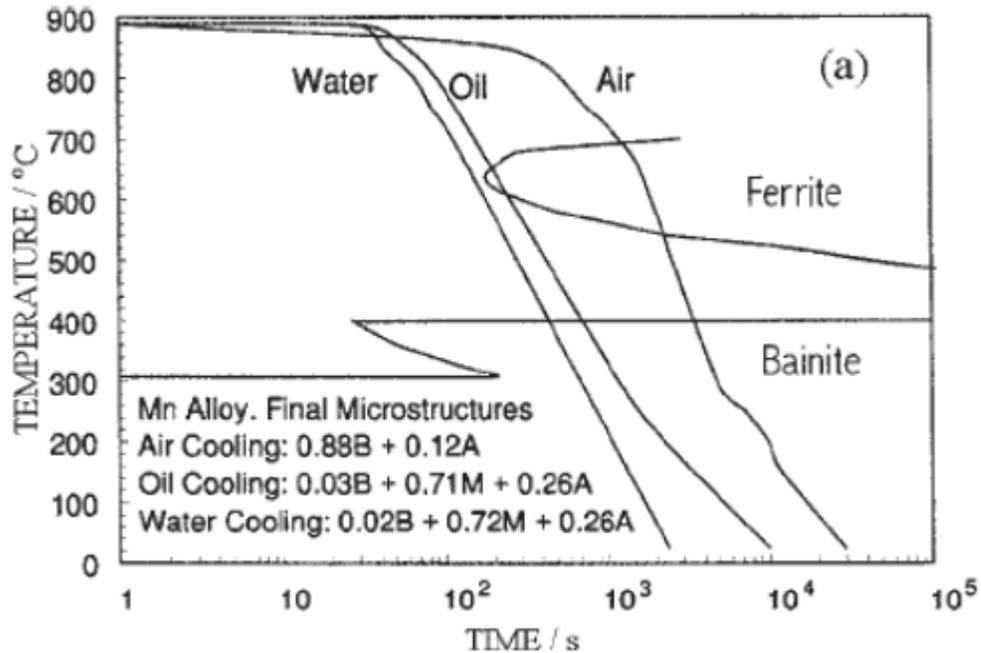


Figura 5.6: Velocidad de enfriamiento en distintos medios para un acero bainítico ([17]).

Si comparamos esta curva con la obtenida en el paper podemos observar que ambas son muy similares por lo que la aproximación resulta bastante cercana a la realidad.

Luego utilizando Ansys se obtiene la siguiente curva de enfriamiento.

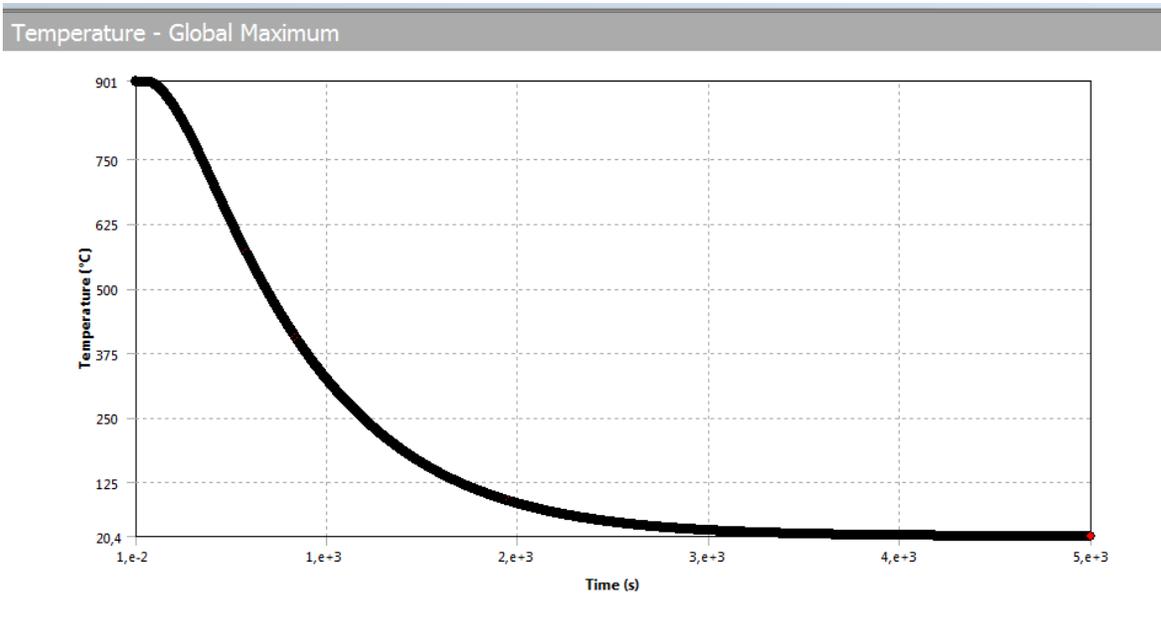


Figura 5.7: velocidad de enfriamiento de la superficie obtenida en Ansys.

Aquí se puede observar también que esta curva es bastante semejante a la obtenida en el paper y por la aproximación realizada mediante gráficos, por lo que los resultados obtenidos en Ansys son válidos. Debido a que se han validado los resultados obtenidos en Ansys y que la geometría de los revestimientos es bastante compleja se utilizará este programa para obtener la curva de enfriamiento tanto del lifter como de la parrilla.

Finalmente extrayendo los resultados que arroja Ansys podemos obtener las velocidades de enfriamiento para el centro y la superficie de la bola de molienda.

Debido a que el enfriamiento realmente de las bolas de molienda se realiza con agua a 50 °C, se realiza el modelo en Ansys para esta temperatura del agua.

Luego utilizando Ansys se obtiene la siguiente curva de enfriamiento para agua agitada fuertemente.

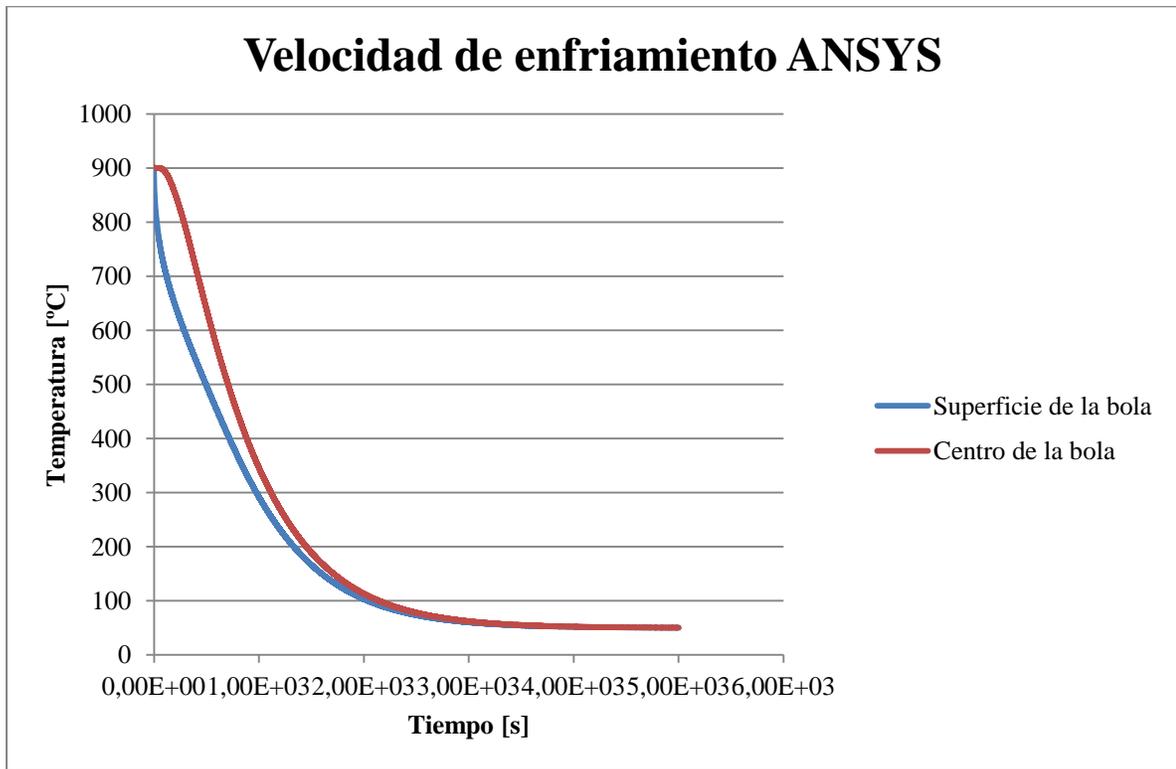


Figura 5.8: Velocidad de enfriamiento de la bola enfriada con agua agitada fuertemente obtenida en Ansys.

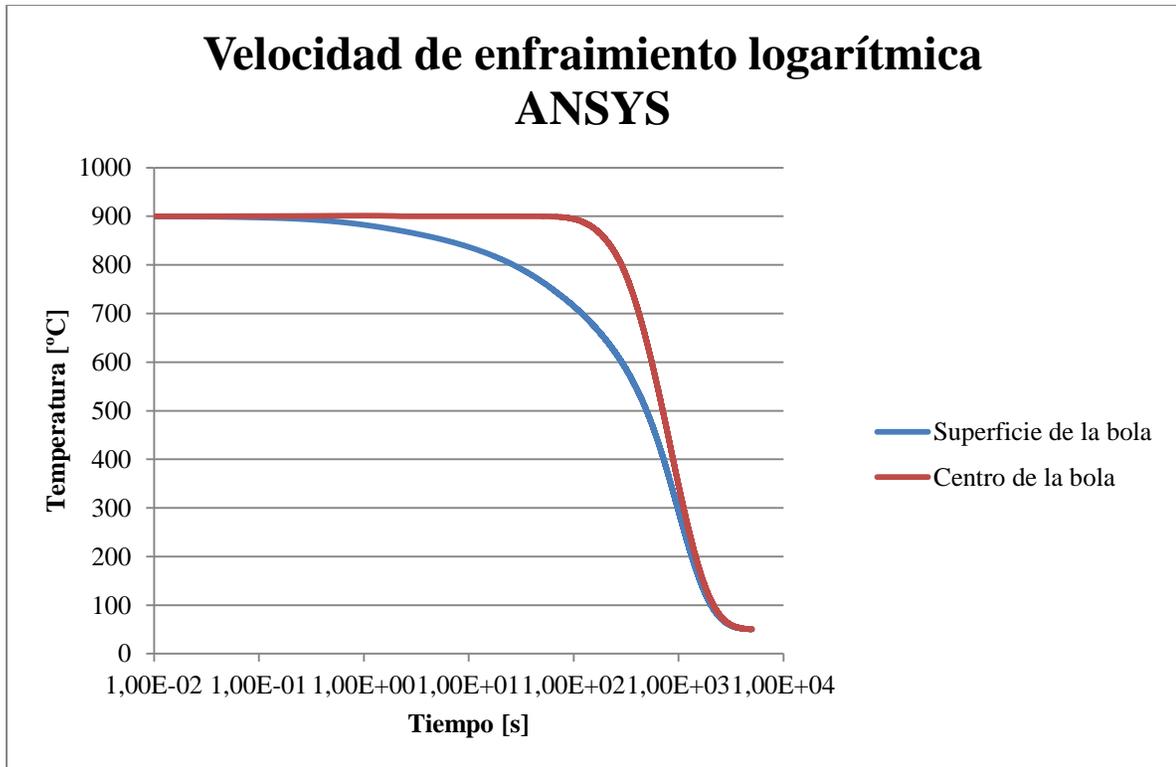


Figura 5.9: Velocidad de enfriamiento de la bola enfriada con agua agitada fuertemente obtenida en Ansys en escala logarítmica.

Los resultados en Ansys para un enfriamiento con agua agitada violentamente se presentan a continuación:

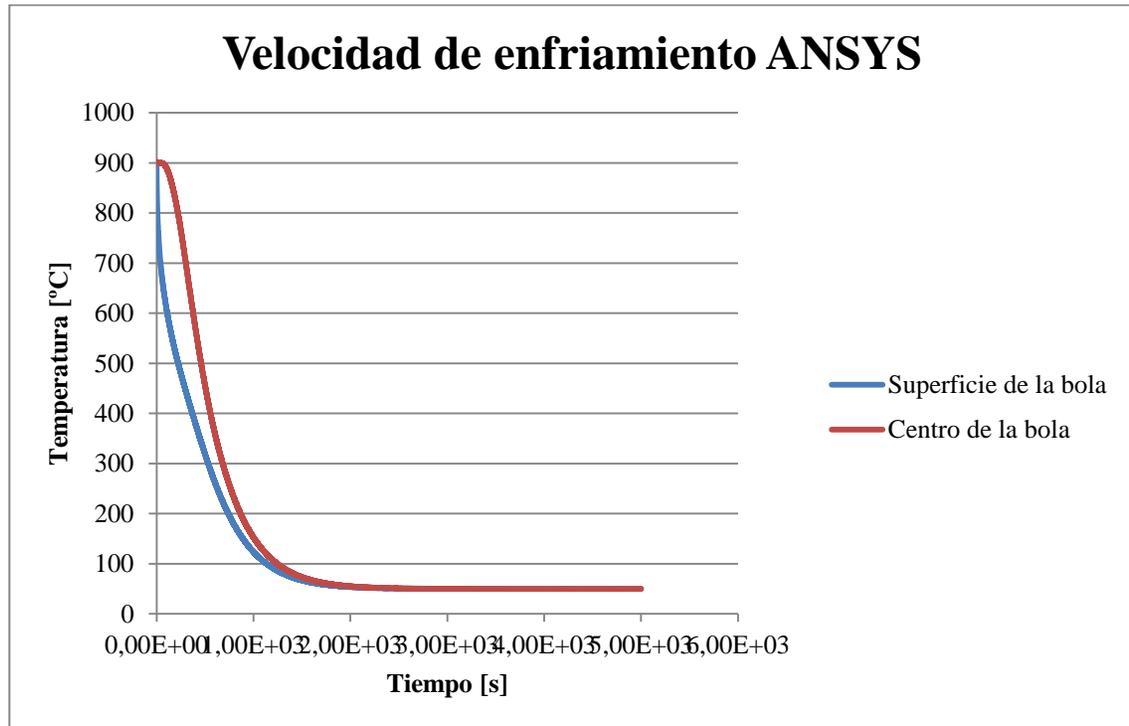


Figura 5.10: Velocidad de enfriamiento de la bola enfriada con agua agitada violentamente obtenida en Ansys.

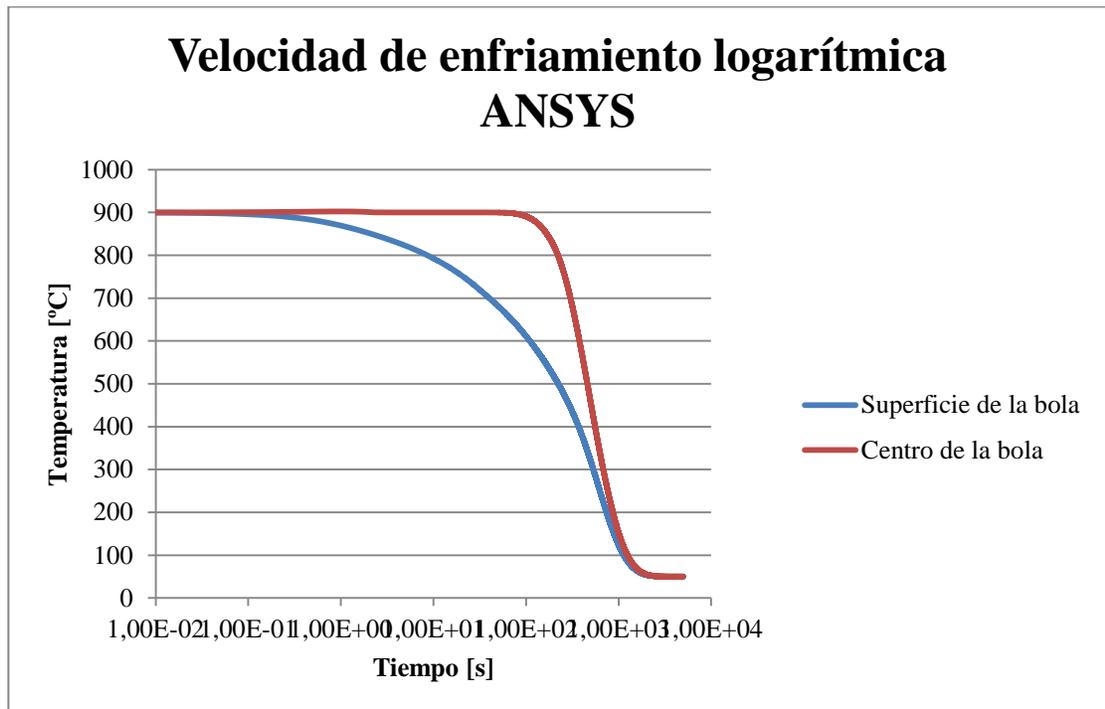


Figura 5.11: Velocidad de enfriamiento de la bola enfriada con agua agitada violentamente obtenida en Ansys en escala logarítmica.

5.1.2 Lifter

El modelo del lifter se obtuvo de imágenes y planos referenciales. Para construir el modelo se diseñó un modelo CAD, el cual se ilustra a continuación.

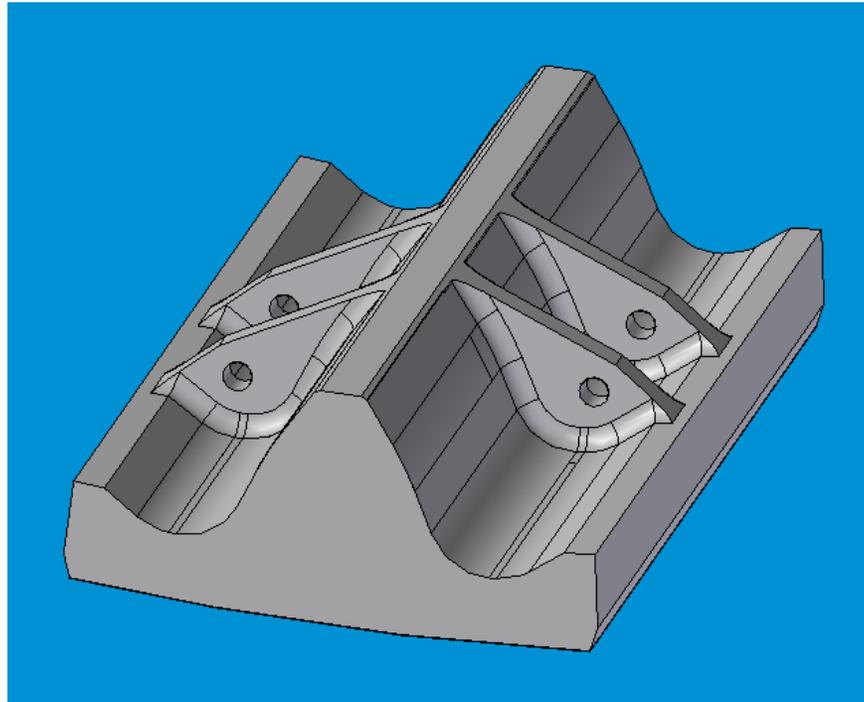


Figura 5.12: Modelo CAD del lifter.

Debido a que en la parte de las aletas se coloca un aislante para que estas no se enfríen muy rápido, el modelo es simplificado quitando estas. Debido a esto el lifter analizado en Ansys queda de la siguiente manera.

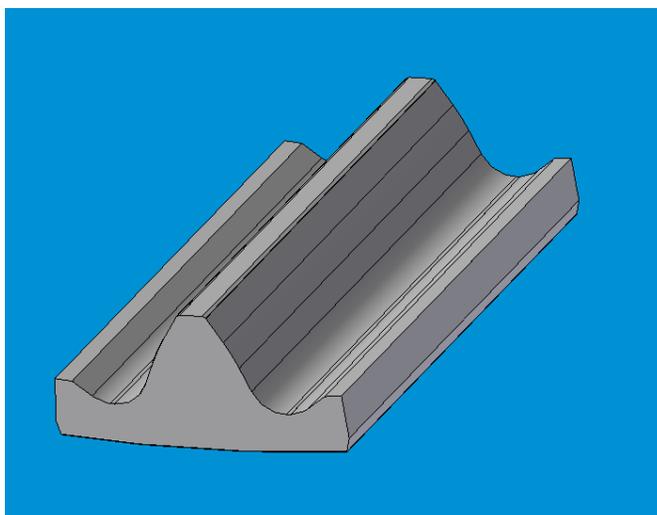


Figura 5.13: Modelo CAD del lifter utilizado en ANSYS.

Para el obtener la velocidad de enfriamiento del punto de mayor y menor temperatura en el lifter se realizó un modelo en un programa CAD del negativo del lifter, es decir, de una caja que contenía un espacio vacío con la forma de la pieza, para luego con el módulo CFX de Ansys obtener la curva de enfriamiento continuo. Cabe destacar que la caja que era el volumen de control del fluido, en este caso aire a 5 [m/s], debía ser bastante más grande al volumen del lifter para que no hubiese problemas con la turbulencia. A continuación se muestra una figura con las condiciones de borde del lifter.

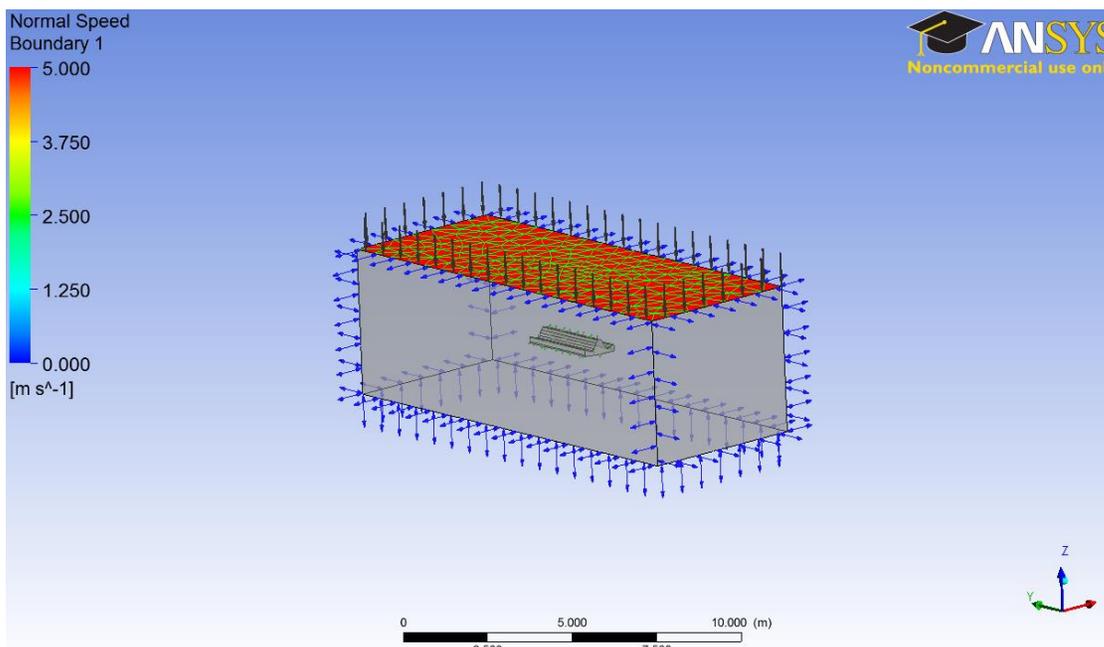


Figura 5.14: Condiciones de borde lifter.

Las condiciones de borde son las siguientes:

- Velocidad entrante por la zona superior del lifter y en dirección normal a este de 5[m/s].

- Paredes laterales e inferiores abiertas.
- Transferencia de calor por radiación y convección entre el aire y el lifter.

Inicialmente el lifter se encuentra a 900 °C y el aire a 20 °C.

El programa además pide como input la emisividad, el calor específico y la conductividad térmica. Estos valores fueron calculados a temperatura de película, es decir a 460 °C, para un acero similar al que iba a ser ocupado en construir los revestimientos. Estos valores son:

- Conductividad térmica: 37,925 [W/m*K].
- Calor específico: 632,086 [J/Kg*K].
- Emisividad: 0,55.

La iteración se hizo con un time step de 10 segundos, durante 20.000 segundo de manera que la curva obtenida sirva para identificar la formación de bainita en el punto de mayor y menor temperatura del lifter. Las curvas de enfriamiento se muestran en las figuras 5.15 y 5.16.

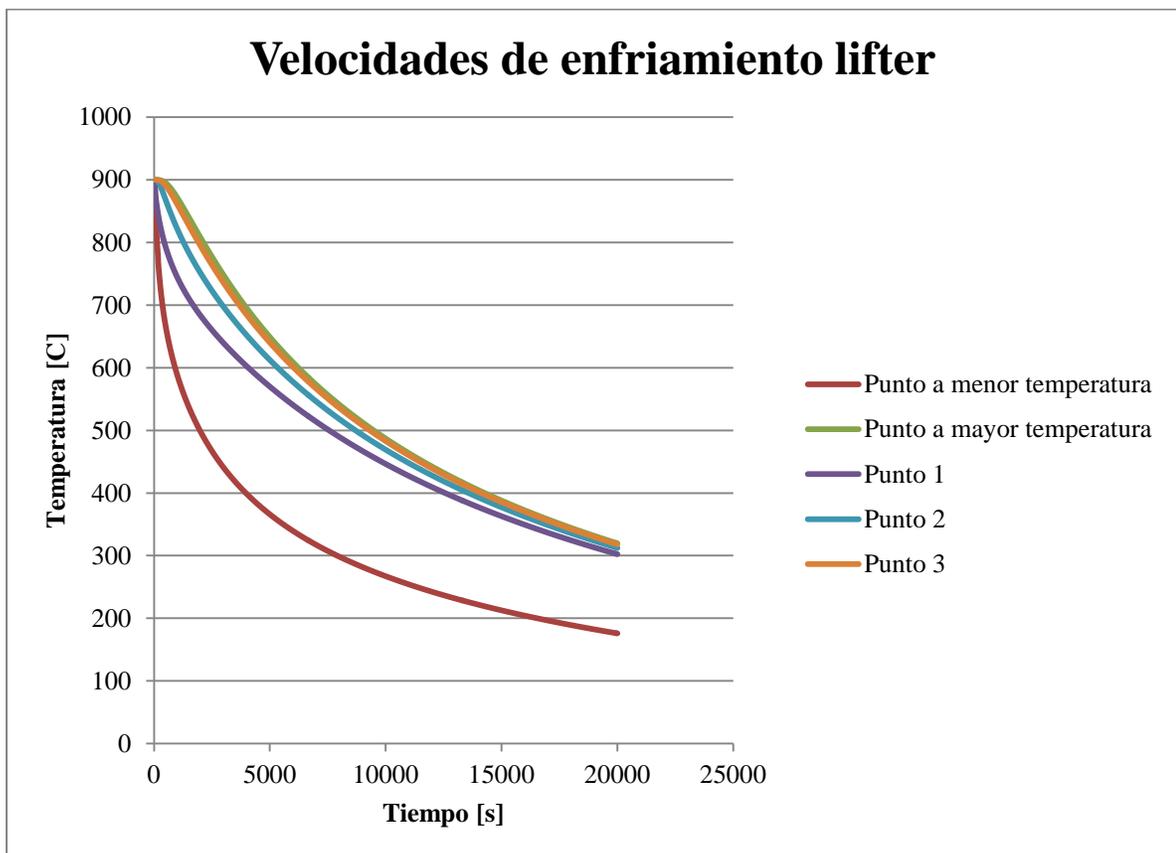


Figura 5.15: Velocidades de enfriamiento del lifter.

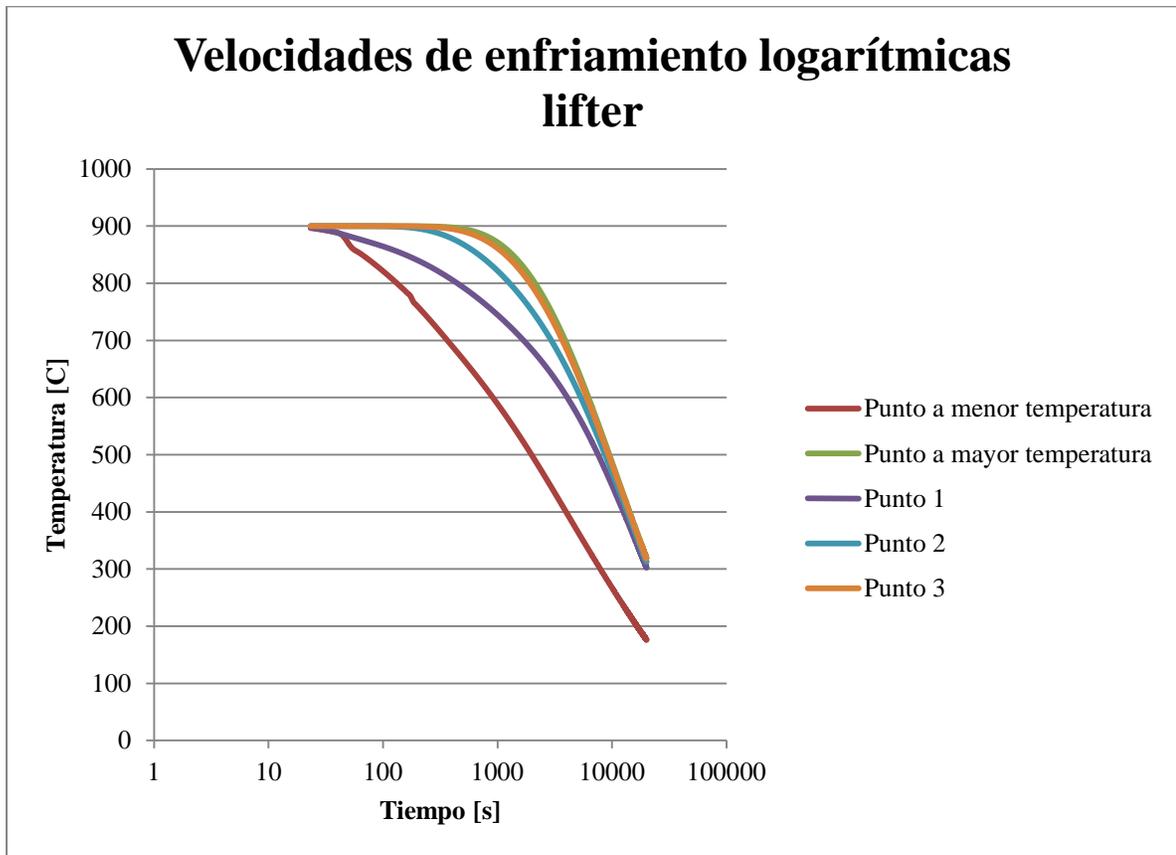


Figura 5.16: Velocidades de enfriamiento logarítmica del lifter.

Los puntos del lifter en los cuales se obtienen estas curvas de enfriamiento se muestran en la figura 5.17.

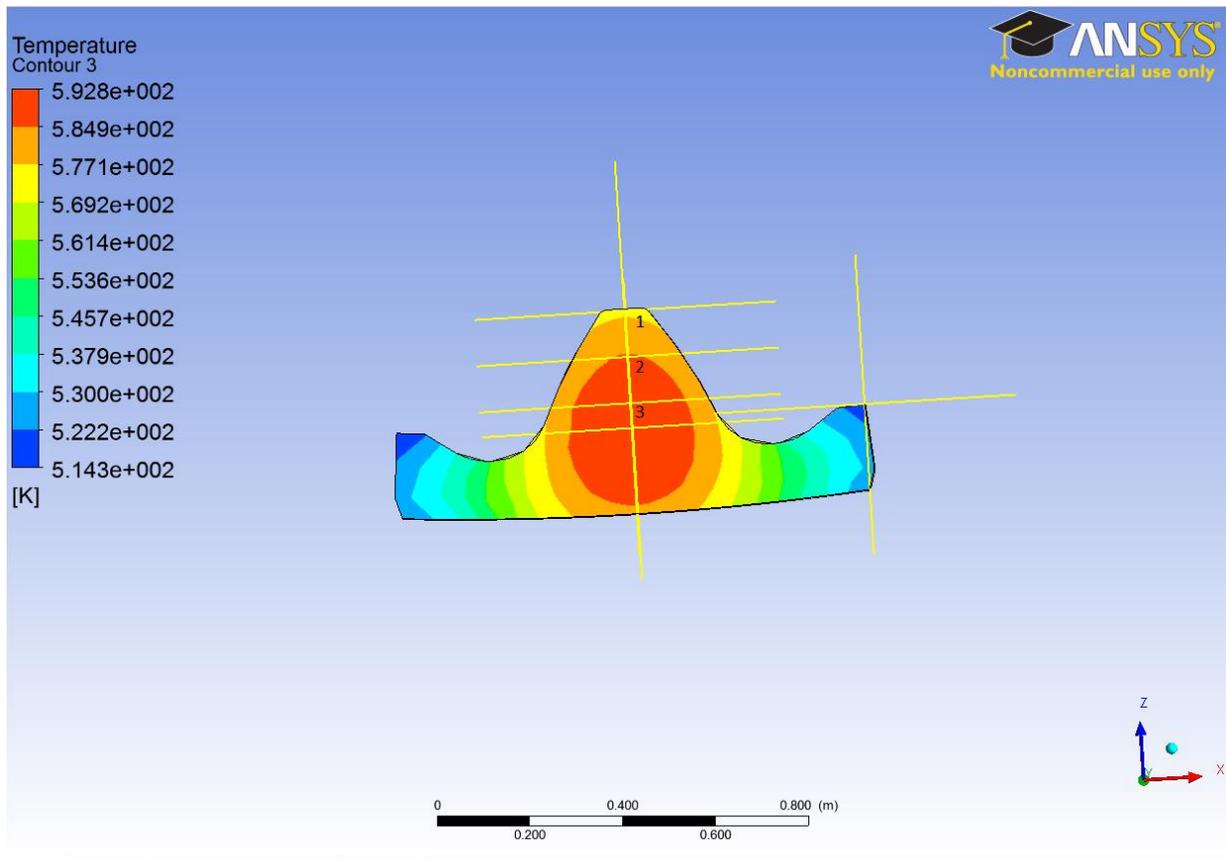


Figura 5.17: Puntos del lifter de los cuales se obtienen las curvas de enfriamiento.

El punto de mayor temperatura es el punto que se encuentra por debajo del punto 3 y corresponde al centro del lifter, mientras que el de menor temperatura es el que se encuentra en la orilla.

Estas curvas posteriormente serán intersectadas con los diagramas CCT obtenidos por el programa Stecal para obtener aleaciones posibles con las que construir el lifter.

4.2.1. Parrilla

Para la parrilla se construyó el modelo CAD mostrado en la figura 5.18.

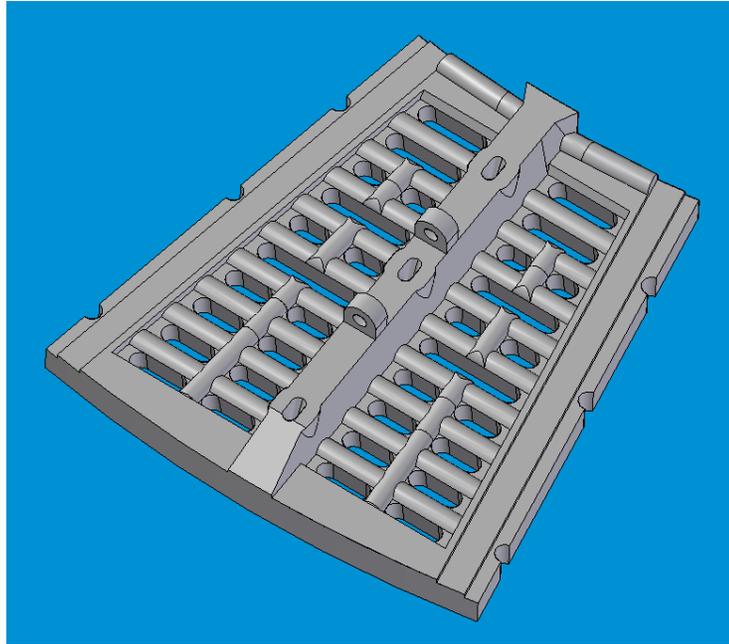


Figura 5.18: Modelo CAD de una parrilla de un molino SAG.

En los orificios de la parrilla se coloca aislante al igual que en las orejas del lifter por lo que el modelo será simplificado relleno los slots como si estos no existieran. Debido a esto el modelo queda de la forma mostrada en la figura 5.19.

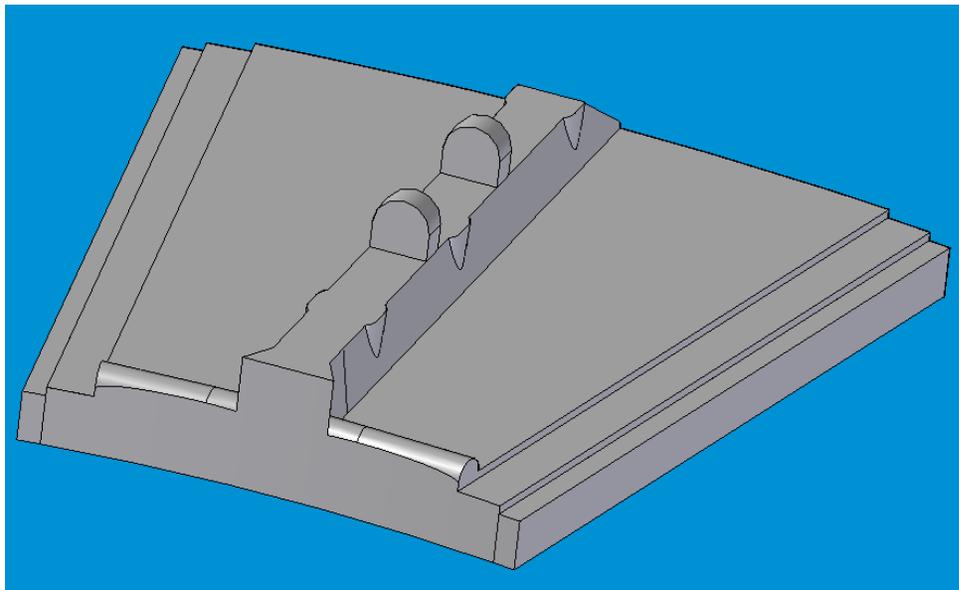


Figura 5.19: Modelo CAD de la parrilla utilizado en ANSYS.

Ahora se realiza el mismo procedimiento hecho con el lifter obteniendo las curvas de enfriamiento mostradas en las figuras 5.20 y 5.21.

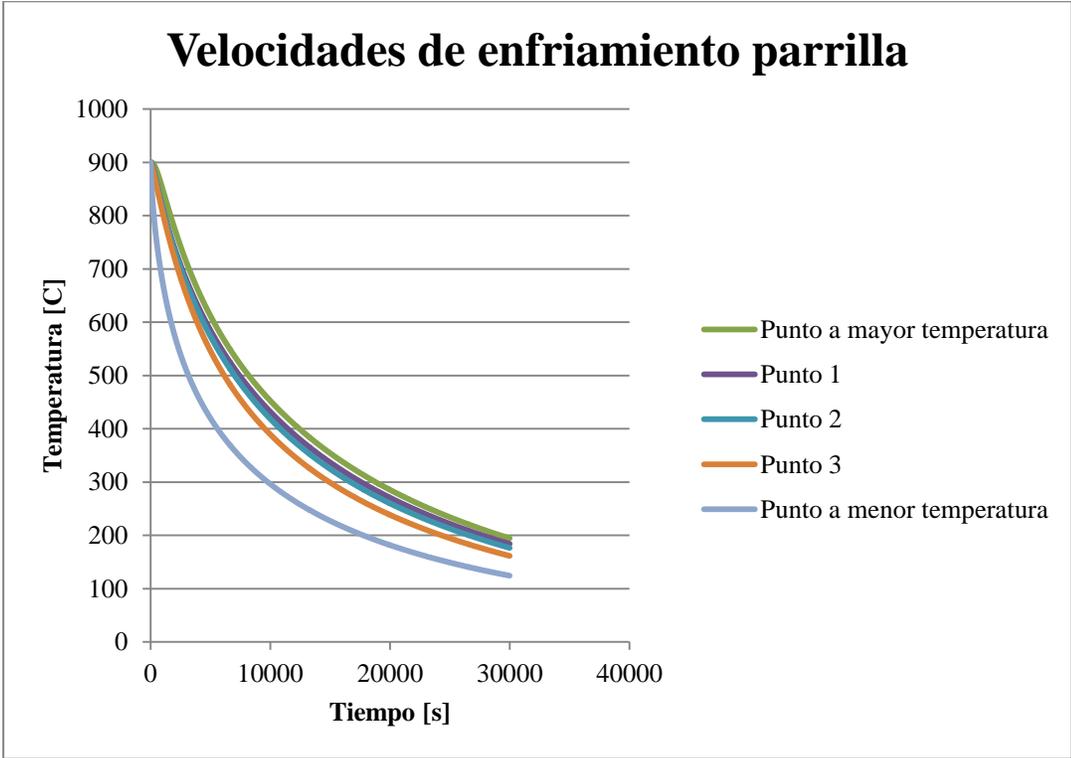


Figura 5.20: Velocidades de enfriamiento de la parrilla.

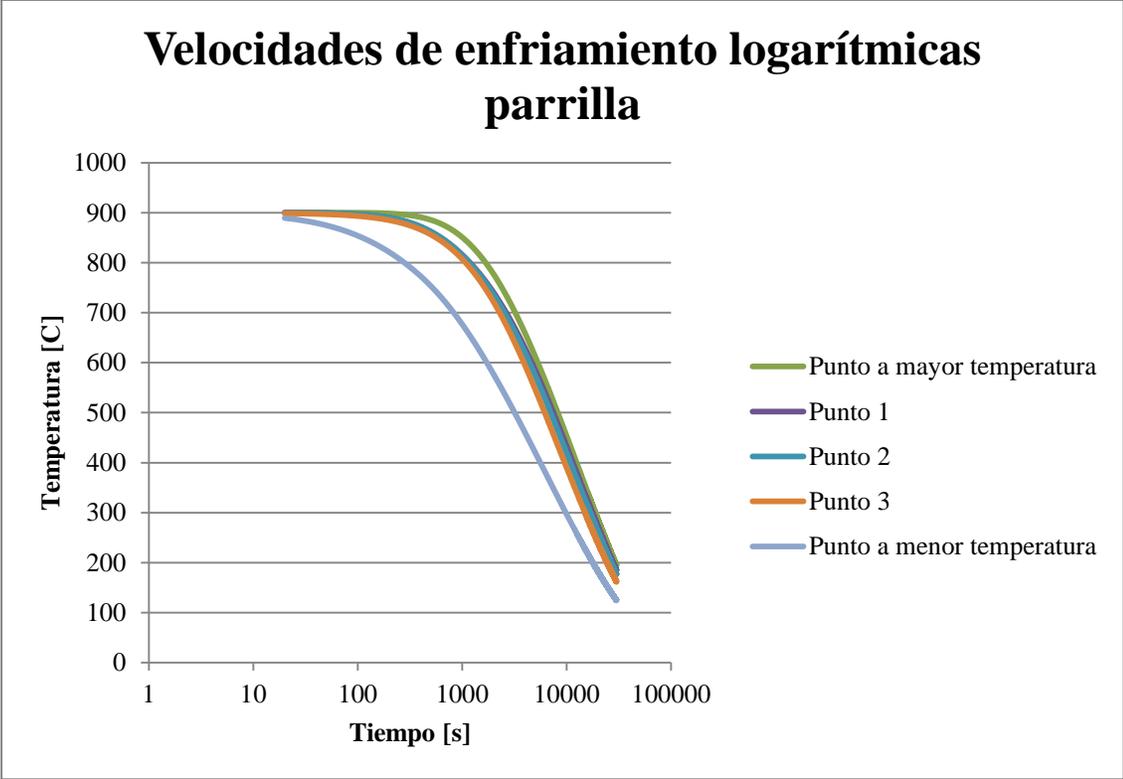


Figura 5.21: Velocidades de enfriamiento logarítmicas de la parrilla.

Los puntos de la parrilla de los cuales se obtuvieron estas curvas se ilustran en la siguiente figura:

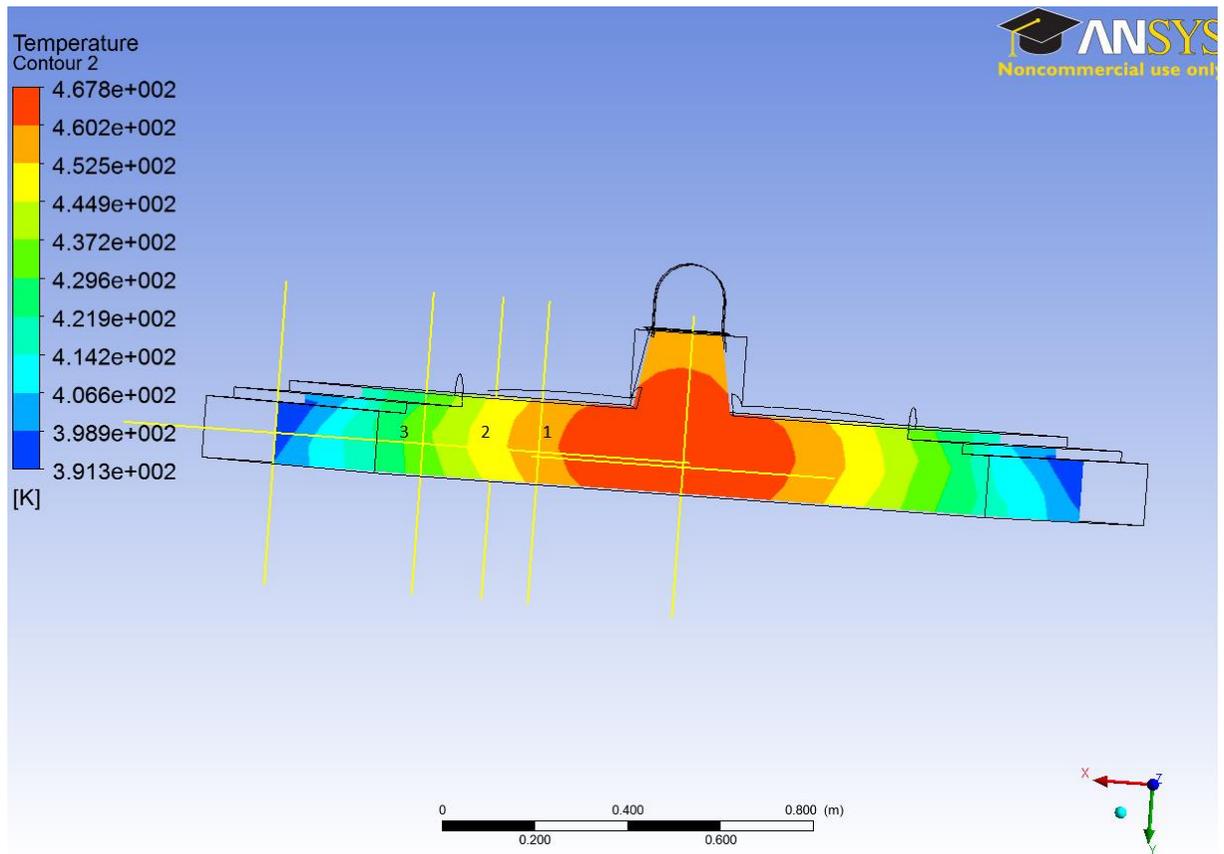


Figura 5.22: Puntos de la parrilla de los cuales se obtienen las curvas de enfriamiento.

El punto de mayor temperatura es el punto que se encuentra por más al centro del punto 1 y corresponde al centro de la parrilla, mientras que el de menor temperatura es el que se encuentra en la orilla.

Estas curvas posteriormente serán intersectadas con los diagramas CCT obtenidos por el programa Stecal para obtener aleaciones posibles con las que construir el lifter.

5.2. Obtención de aceros

Los diagramas CCT construidos mediante el programa computacional varían dependiendo de la cantidad que contenga el acero los distintos elementos aleantes. Los rangos en que varían estos elementos son expuestos en la siguiente tabla.

Tabla 5.3: Rangos de elementos aleantes para construir los diagramas CCT.

Elemento	C	Mn	Si	Cr	Mo	B
Mínimo	0.3	0.7	0.3	1	0.25	no
Máximo	0.7	2	2	2.5	0.5	si

Según esto se obtienen 64 diagramas. Cabe destacar que el programa no considera la cantidad de boro, sino que solo si la aleación lo contiene o no.

5.3. Definición de aceros

Luego de obtenidos los diagramas CCT se procedieron a intersectar estos con las curvas de enfriamiento logarítmicas obtenidas, debido a que el programa entrega los diagramas en escala logarítmica.

5.3.1 Bolas de molienda

Para las bolas de molienda se obtuvieron 4 aceros, tanto para un agitación fuerte del agua como violento, es decir, en total 8 aceros, en los cuales la fase de bainita está presente en un porcentaje mayor al 50%. Estos aceros se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 5.4: Aleaciones con más de 50% de bainita.

Pieza	Aleación	C	Mn	Cr	Si	Mo	P	S
Bola agitación fuerte	9	0,3	0,7	2,5	0,3	0,25	0,02	0,02
Bola agitación fuerte	11	0,3	2	1	2	0,5	0,02	0,02
Bola agitación fuerte	16	0,7	2	1	2	0,25	0,02	0,02
Bola agitación fuerte	47	0,7	2	1	0,3	0,5	0,002	0,002
Bola agitación violento	14	0,3	2	1	2	0,25	0,02	0,02
Bola agitación violento	22	0,3	2	1	0,3	0,5	0,02	0,02
Bola agitación violento	35	0,7	0,7	1	2	0,5	0,002	0,002
Bola agitación violento	45	0,7	2	1	0,3	0,25	0,002	0,002

Los aceros más aptos para elaborar las bolas son los aceros seleccionados con amarillo en la tabla anterior, debido a que tienen un porcentaje de silicio igual al 2%, lo que produce para que se disminuya la formación de carburos que disminuyen la tenacidad. Además las aleaciones seleccionadas poseen un 0,7% de carbono, lo que hace que puedan tener una dureza apta.

Cabe destacar que debido al poco control que se tiene sobre el contenido de boro en la aleación los resultados con boro no serán considerados.

A continuación se muestran las curvas de la velocidad de enfriamiento intersectada con el diagrama CTT para estos aceros.

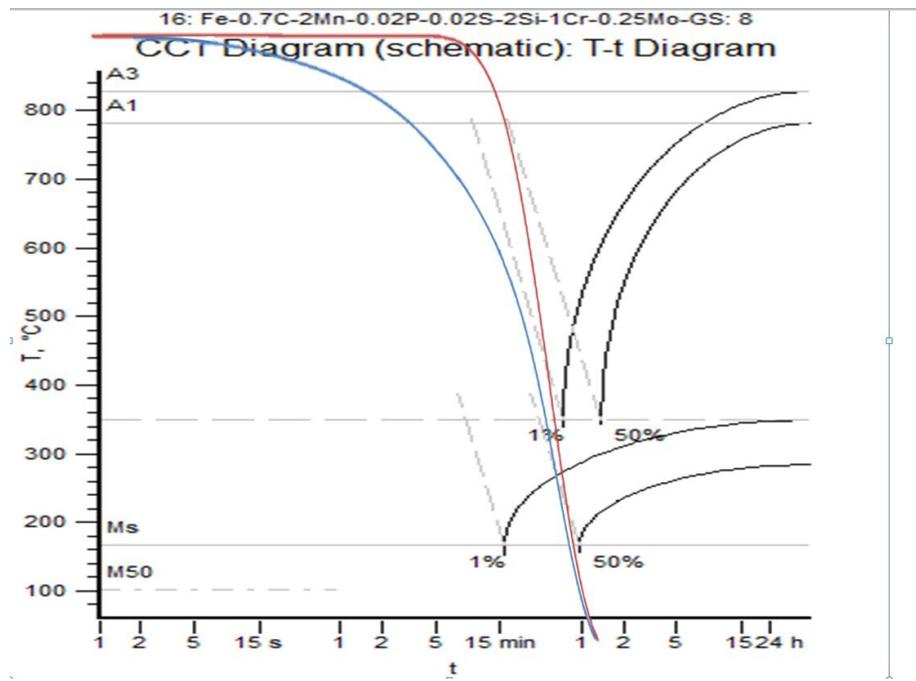


Figura 5.23: Diagrama CCT de la aleación número 16 intersectado con la curva de enfriamiento con agitación fuerte.

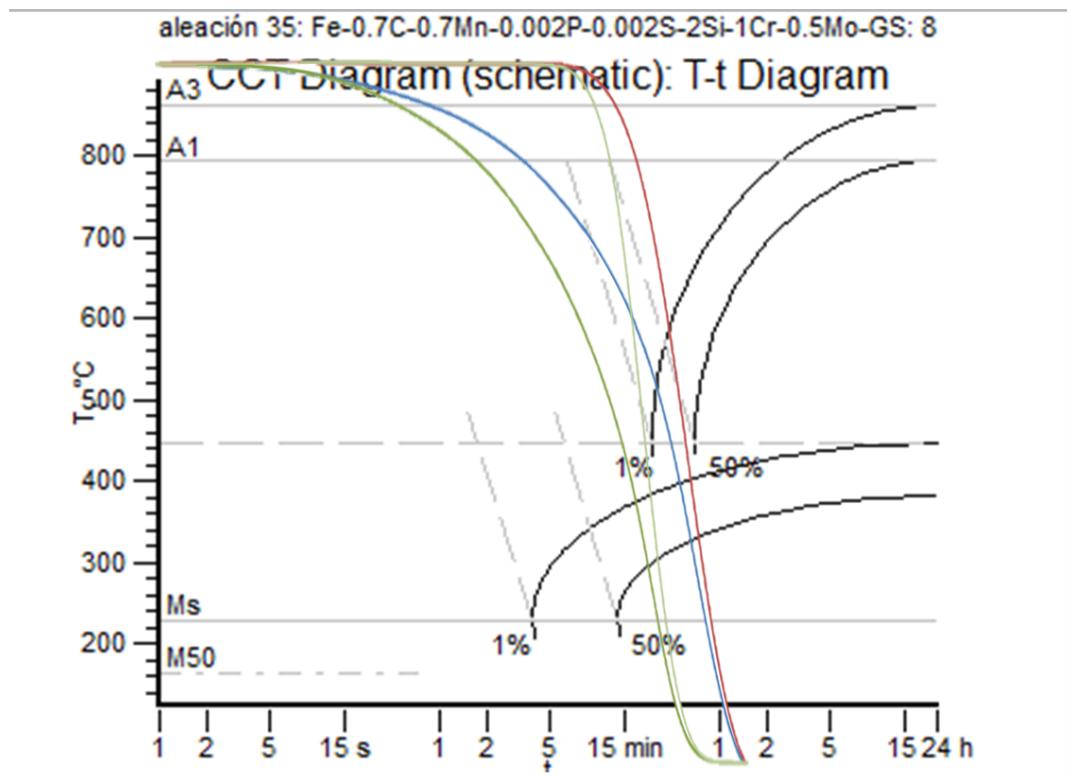


Figura 5.24: Diagrama CCT de la aleación número 35 intersectado con la curva de enfriamiento con agitación violento (Curvas verdes).

En la figura para la aleación 16 la línea roja representa la curva de enfriamiento para el centro de la bola, al igual que la línea verde claro en la figura de la aleación 35, mientras que la línea azul y la verde oscura representan la curva de enfriamiento para la superficie de la bola.

5.3.2 Lifter

Para el lifter se obtienen 6 aleaciones en las cuales hay un porcentaje de bainita igual o superior al 50%. Estas aleaciones se ilustran en la siguiente tabla:

Tabla 5.5: Aleaciones con más de 50% de bainita para el lifter.

Pieza	Aleación	C	Mn	Cr	Si	Mo	P	S
Lifter	3	0,7	0,7	2,5	2	0,5	0,02	0,02
Lifter	13	0,7	0,7	2,5	2	0,25	0,02	0,02
Lifter	15	0,7	2	2,5	0,3	0,25	0,02	0,02
Lifter	32	0,3	0,7	2,5	0,3	0,5	0,002	0,002
Lifter	40	0,3	0,7	2,5	2	0,5	0,002	0,002
Lifter	59	0,7	0,7	2,5	0,3	0,5	0,002	0,002

La aleación seleccionada con amarillo es la escogida debido a su alto porcentaje de silicio, por las mismas razones explicadas anteriormente y porque tiene un porcentaje de carbono de 0,3%, lo que hace que la dureza no sea tan alta como en el caso de la bola.

A continuación se ilustra la curva CCT de la aleación 40 con la curva de enfriamiento del lifter.

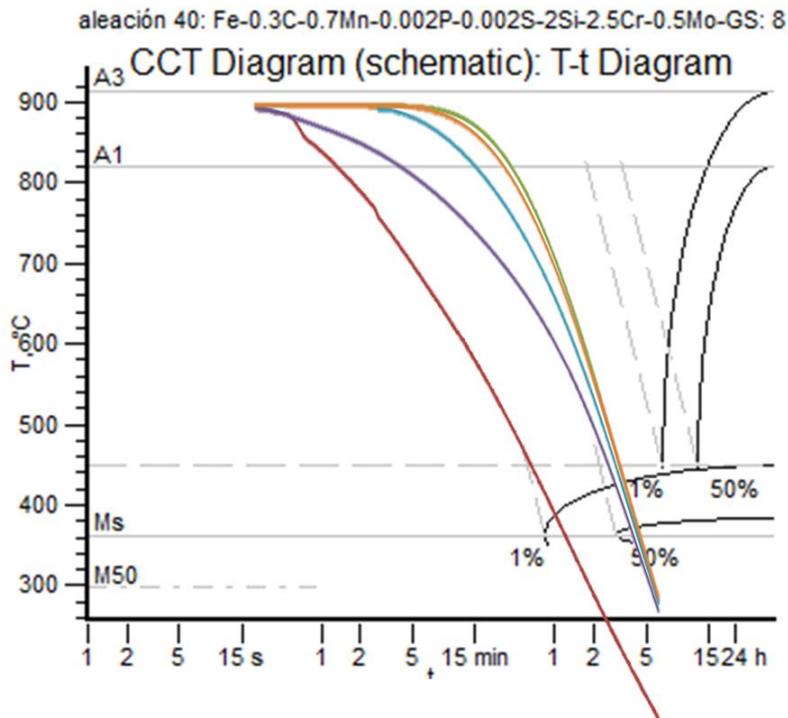


Figura 5.25: Diagrama CCT de la aleación número 40 intersectado con la curva de enfriamiento del lifter.

Aquí se puede observar que la parte del lifter que se enfría más rápidamente tiene un bajo porcentaje de bainita, pero esto no se toma en cuenta para el análisis, ya que en las zonas de enfriamiento más veloz a estas piezas se le coloca un aislante, de manera que la curva se desplaza hacia la izquierda y se puede obtener en estas zonas un 50% de bainita al igual que en el resto de la pieza.

5.3.3 Parrilla

Al igual que en el caso del lifter, para la parrilla se obtuvieron 6 aleaciones en las que se obtenía el porcentaje de bainita suficiente.

Tabla 5.6: Aleaciones con más de 50% de bainita para la parrilla.

Pieza	Aleación	C	Mn	Cr	Si	Mo	P	S
Parrilla	3	0,7	0,7	2,5	2	0,5	0,02	0,02
Parrilla	13	0,7	0,7	2,5	2	0,25	0,02	0,02
Parrilla	32	0,3	0,7	2,5	0,3	0,5	0,002	0,002
Parrilla	40	0,3	0,7	2,5	2	0,5	0,002	0,002
Parrilla	58	0,7	2	1	2	0,5	0,002	0,002
Parrilla	59	0,7	0,7	2,5	0,3	0,5	0,002	0,002

Por las mismas razones mencionadas en el caso del revestimiento anterior la aleación seleccionada es la 40. A continuación se muestra el diagrama CCT para esta aleación intersectado con la curva de enfriamiento de la parrilla.

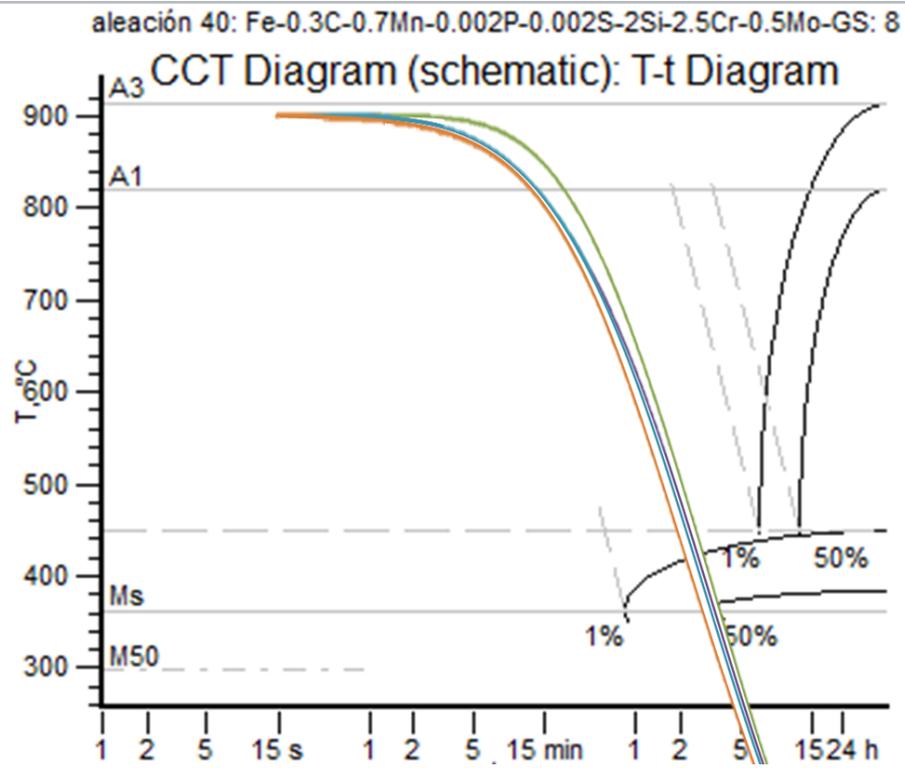


Figura 5.26: Diagrama CCT de la aleación número 40 intersectado con la curva de enfriamiento de la parrilla.

5.3.4 Propiedades Mecánicas aceros seleccionados

Para el cálculo de las propiedades mecánicas, se estima en el diagrama CCT intersectado con las curvas de enfriamiento, el porcentaje de bainita que se obtiene aproximadamente en el acero. Luego de esto ocupando la ecuación 2.24 se obtiene el porcentaje de carbono presente en la austenita. Producto del cambio de carbono contenido en la austenita la temperatura M_s cambiará de la obtenida para la aleación original con la fórmula 2.27. Para el cálculo de la nueva temperatura M_s se ocupa la relación 2.28.

La fracción de austenita que se transforma en martensita será calculado con la ecuación 2.29, y luego multiplicando este valor por la austenita residual se obtendrá la fracción de martensita. De esta forma se obtienen los porcentajes de bainita, austenita y martensita en el acero.

Ahora se debe calcular el límite de fluencia de la bainita, mediante la ecuación 2.25, viendo el aporte de cada elemento aleante y del carbono al límite de fluencia en la figura 2.9, luego en esta ecuación se debe sumar el aporte del espesor de la bainita y la densidad de dislocaciones entregados por las ecuaciones 2.5 y 2.9 respectivamente. Para el límite de fluencia de la austenita se calculará con la ecuación 2.6. Luego estos valores se ponderan utilizando la ley de mezcla para obtener el límite de fluencia de la mezcla de austenita y bainita.

Después se debe calcular la dureza de la mezcla de bainita con austenita utilizando la relación 4.1 y mediante la ecuación 2.33 se obtiene la dureza de la martensita en función del carbono concentrado en la austenita residual. Finalmente con la relación 2.34 que expresa la relación entre la dureza de la martensita y su fluencia se puede obtener esta última propiedad, para así luego ocupar la ley de mezcla y obtener la dureza y fluencia del acero.

Para obtener las propiedades que se logran luego del revenido se tomará un tratamiento térmico de este tipo a 250°C por 2 horas en el caso de las bolas, y a 650°C por 5 horas en el caso de los revestimientos. Para el cálculo de las fórmulas de aquí en adelante se considerará V_B el porcentaje de bainita y la austenita sumados.

El tamaño de grano de la martensita se puede obtener con la ecuación 2.31, luego de haber obtenido el tamaño de la austenita previa mediante la relación 2.4. Se considera media hora por cada pulgada de espesor en el tiempo de austenización.

Luego se obtiene la dureza considerando $V_B=0$, para luego mediante la ecuación 2.36 obtener el límite de fluencia, el cual obedece a la siguiente fórmula:

$$\sigma_m = \sigma_i + kS_M^{-0,5} \quad (5.8)$$

Utilizando $k=827,91$, se puede despejar σ_i de la ecuación anterior. Ahora se empleará la fórmula 2.42, para V_B mayor a 30. Con esto se obtiene la dureza y el límite de fluencia.

Al calcular la tenacidad se debe considerar V_B igual a 25%, debido que el efecto de tener mayor bainita lo único que podría causar es tener una mayor tenacidad. Calculando nuevamente S_M y reemplazando este valor en la fórmula 2.43 se obtiene la energía absorbida y con este valor se puede obtener la tenacidad mediante la relación 2.44.

Estos cálculos se aplican para todos los aceros. Los resultados se muestran a continuación.

Debido a que con el método recientemente descrito para las bolas no se obtiene martensita, se considera que se debe aplicar otro método para obtener las propiedades de los aceros seleccionados para estas.

Para la aleación 40 se obtienen las siguientes propiedades para la parrilla y el lifter:

Tabla 5.7: Composición, fracciones de cada fase y porcentaje de carbono en austenita.

Pieza	Aleación	C	Mn	Cr	Si	Mo	Ni	V	P	S	Co	Vb	Va	Vm	x_y
Lifter	40	0,3	0,7	2,5	2	0,5	0	0	0,002	0,002	0	0,53	0,08	0,39	0,6
Parrilla	40	0,3	0,7	2,5	2	0,5	0	0	0,002	0,002	0	0,5	0,07	0,43	0,57

Tabla 5.8: Límite de fluencia en MPa y dureza en Brinell antes del revenido.

Pieza	Aleación	σ_y B+A	σ_y M	σ_y mix	Dureza M	Dureza B+A	Dureza mix
Lifter	40	1154,34	2396,11	1643,04	648,91	493,54	554,69
Parrilla	40	1166,21	2356,43	1683,16	640,87	499,11	560,68

M: Martensita; B: Bainita; A: Austenita

Tabla 5.9: Límite de fluencia en MPa y dureza en Brinell después del revenido. CVN en Joule y tenacidad en $MPa \cdot m^{0,5}$.

Pieza	Aleación	σ_y mix (MPa)	Dureza mix (HB)	CVN (J)	Tenacidad ($MPa \cdot m$)
Lifter	40	1528,54	513,05	19,28	58,99
Parrilla	40	1551,75	518,23	19,50	59,39

Cabe destacar que las propiedades cambiarán en los distintos sectores de la pieza, pero aproximadamente estas serán las propiedades de los aceros obtenidos tanto en la parrilla como en el lifter.

5.4. Análisis de resultados

En el trabajo realizado se pudo corroborar que las curvas de enfriamiento son bastante cercanas a lo que ocurre en la realidad ya que se pudo comparar con un artículo experimental [17] que validó el uso de Ansys para las bolas de molienda y los revestimientos. El uso de este programa es útil por la complicada geometría de los revestimientos.

Los diagramas CCT obtenidos en Stecal pueden variar, ya que este usa ciertas relaciones para obtenerlos, las cuales se aproximan a lo que ocurrirá realmente, pero podría diferir en ciertos casos de la realidad.

Mientras tanto las propiedades de los aceros son obtenidas mediante relaciones experimentales para ciertas composiciones de aceros, que se extienden como si fueran casos generales, por lo que estas podrían no aplicar totalmente al universo de composiciones tratadas en este informe.

Se puede observar en los resultados expuestos que las propiedades para los aceros bainíticos son bastante aptas para el uso en revestimientos alcanzando valores de dureza más altos que en el caso de los aceros perlíticos actualmente utilizados en la construcción de estas piezas.

Es por esto que se corrobora que un alto contenido de silicio disminuye la formación de carburos y hace que se obtengan mejores propiedades para los aceros. Además la concentración de acero de un 0,3% es bastante adecuada ya que a concentraciones mayores se obtienen peores propiedades mecánicas.

Si bien se obtuvieron aceros en los que se formaban más de un 50% de bainita en las bolas de molienda, las propiedades no se pudieron obtener. La explicación de esto se detalla en la sección 5.5.

Los resultados muestran un prometedor uso de los aceros bainíticos para la confección de revestimientos de molinos SAG, pero la elección de la aleación específica con la cual estas piezas serán confeccionadas está sujeta a aproximaciones que se hacen en este modelo tanto al obtener las propiedades como las curvas de enfriamiento, por lo que mediante experimentos deberán ser corroboradas.

5.5. Limitaciones del modelo

Como ya se expuso anteriormente la fórmula 2.24 no sirve para cualquier composición de acero, debido a que debe tener un rango, el cual no aparece explícito en la bibliografía, ya que claramente en las bolas de molienda debería formarse martensita.

Debido a la carencia de propiedades para el caso de las bolas de molienda este modelo será válido sólo para revestimientos, ya que en un rango de composición mayor al 0,4% de carbono no se obtiene martensita o se obtiene muy poca cantidad de esta, por lo que las propiedades obtenidas al seguir con el modelo están muy alejadas de la realidad.

En este modelo además se consideran que el medio de enfriamiento es infinito en el caso de las bolas de molienda y tiene un volumen de control acotado, pero bastante grande en el caso de los revestimientos, lo que genera que en la práctica las curvas de enfriamiento puedan variar y de esta forma obtenerse aleaciones que fueron desechadas en este trabajo.

Además de lo anteriormente expuesto hay propiedades que se obtuvieron a una temperatura promedio del acero. Debido a esta aproximación podrían cambiar valores de las propiedades debido a diferentes tamaños de grano en diferentes partes de los revestimientos por ejemplo, además de concentraciones de esfuerzos producto del mismo proceso de enfriamiento del acero, los cuales deben ser estudiados.

Capítulo 6

6. Conclusiones

En el trabajo se lograron todos los objetivos, tanto el general como los objetivos específicos. Así es como se diseñó la composición y tratamiento térmico necesario para fabricar aceros bainíticos para revestimientos de molino SAG y bolas de molienda.

Esto se hizo mediante el estudio de relaciones entre la microestructura y las propiedades mecánicas en aceros bainíticos con más de 50% de bainita. Aunque si bien estas relaciones no lograron extenderse a las bolas de molienda, sí sirvieron para el caso de los revestimientos.

Además, se determina la composición de aceros bainíticos para bolas y revestimientos, de manera de obtener más de un 50% de bainita en ambos casos, 0,7% de carbono en el caso de las bolas, y 0,3% de carbono en el caso de los revestimientos. Lo anterior se realiza intersectando los diagramas CCT para cada acero con las curvas de enfriamiento obtenidas para cada tratamiento térmico.

Los tratamientos térmicos aquí considerados son los que se ocupan para fabricar estos tipos de pieza en el mercado actual, adaptando las temperaturas y los medios con los cuales se enfría cada pieza.

Las ecuaciones empleadas en este informe son el resultado de experimentos hechos con aceros distintos a los utilizados, pero de similar composición, por lo que representan sólo aproximaciones de las propiedades de los aceros ocupados en este trabajo.

Para hacer más completo este trabajo se deben fabricar los aceros, para de esta forma validar o cambiar ciertas relaciones utilizadas y ver la verdadera influencia del volumen de bainita en las propiedades de los aceros.

Sin embargo, los resultados obtenidos son bastante alentadores para el uso de estos aceros en revestimientos y se espera que también puedan ser usados para fabricar bolas de molienda, a pesar de no poder obtener las propiedades de estas.

Las aleaciones seleccionadas son las siguientes:

- Bolas de Molienda: Aleaciones 16 y 35. La primera aleación mencionada es para bolas confeccionadas con agitación fuerte del agua para enfriarlas y la segunda para agitación violento.
- Revestimientos (Lifter y Parrilla): Aleación 40.

En la tabla 6.1 se muestra la composición de las aleaciones anteriormente mencionadas.

Tabla 6.1: Composición aleaciones seleccionadas.

Pieza	Aleación	C	Mn	Cr	Si	Mo	P	S
Bola, agua agitada fuertemente	16	0,7	2	1	2	0,25	0,02	0,02
Bola, agua agitada violentamente	35	0,7	0,7	1	2	0,5	0,002	0,002
Lifter y parrilla, aire forzado	40	0,3	0,7	2,5	2	0,5	0,002	0,002

Las propiedades mecánicas obtenidas para los revestimientos son:

- Límite de fluencia lifter: 1528,5 [MPa].
- Límite de fluencia parrilla: 1551,8 [MPa].
- Dureza lifter: 513,1 [HB].
- Dureza parrilla: 518,2 [HB].
- Tenacidad lifter: 59 [MPa√m].
- Tenacidad parrilla: 59,39 [MPa√m].

7. Bibliografía

- [1]. *Álvaro Salinas Gaona; METODOLOGÍA DE DISEÑO DE ACEROS RESISTENTES AL DESGASTE Y AL IMPACTO PARA USO EN LA MINERÍA Trabajo de Titulación para optar al Título de Ingeniero Mecánico, Universidad de Chile, (2012).* (mgh, Ed.) nc.
- [2]. *Metals reference book, volume 3, Colin J. Smithells, Cuarta Edición, página 697, segundo acero.*
- [3]. *PP.J Alison & H. Wilman; The different behavior of hexagonal and cubic materials in their friction, wear and work hardening during abrasion; Brit. J. Appl. Phys., 15 (1964) 281-289.*
- [4]. *Hong-Sheng Fang, Chun Feng, Yan-Kang Zheng, Zhi-Gang Yang & Bing-Zhe Bai; Creation of Air-Cooled Mn Series Bainitic Steels, Journal of Iron and Steel Research, International,.*
- [5]. *H.A. Aglan, Z.Y. Liu, M.F. Hassan & M. Fateh; Mechanical and fracture behavior of bainitic rail steel, Journal of Materials Processing Technology, 151 (2004) 268-274.*
- [6]. *F.Qi, X. Hou & X. Mao; Foundry 12 (1998), 27-29.*
- [7]. *H. Yokoyama, S. Mitao, S. Yamamoto, Y. Kataoka & T. Sugiyama; NKK Tech. Rev. 84 (2001).*
- [8]. *Hodgon & Gibbs; A mathematical model to predict the mechanical properties of hot rolles.*
- [9]. *S.H. Zahiri, S.B Byon, Sung-Il Kim, Y. Lee & P. Hodgson; Static and metadynamic recrystallization of interstitial free steels during hot deformation, ISIJ International, 44 (2004) 1918-.*
- [10]. *Y.C. Lin; Study of static recrystalization in a low alloy steels, Computational Materials Science 44, (2008), 316-321.*
- [11]. *H.K.D.H. Bhadeshia Bainite in Steels, IOM Communications Ltd segunda Edición, Londres, 2001.*
- [12]. *S.B.Singh & H.K.D.H Bhadeshia; Estimation of bainite plate-thickness in low alloy steels, Materials Science and Engineering, A245 (1998) 72.*
- [13]. *M.Takahashi & H.K.D.H Bhadeshia; Mater. Sci. Technol., 6 (1990) 592-603 .*
- [14]. *J.S.Kirkaldy & D. Venugopalan; Phase Transformations in Ferrous Alloys, Editado por A.R.*
- [15]. *W.C. Leslie; Metall. Trans., 3 (1972) 5-26.*
- [16]. (s.f.). *J.W. Christian; Strengthening methods in crystals Editado por A. Kelly y R. Nicholson (1971).*

- [17]. *F.G. Caballero, H.K.D.H Bhadeshia, K.J.A Mawella, D.G.Jones & P. Brown; Design of novel high strengt bainitic steels: Part 1, Materials Science and Technology, 17 (2001) 512-516.*
- [18]. *Heat and Mass Transfer, Hans Dieter Baehr, Segunda edición, página 629.*

Anexo A

A. Diagramas CCT

A continuación se presentan 32 de los 64 diagramas CCT que obtuvo la Universidad Federico Santa María para realizar este trabajo de título. Los diagramas no presentados son los que contienen boro.

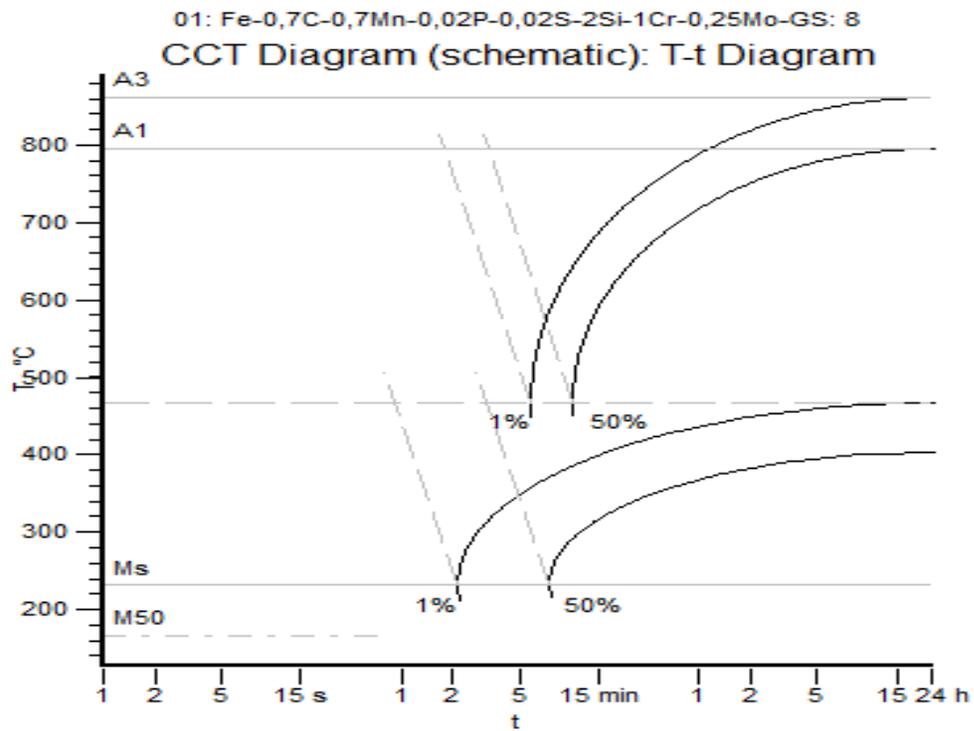


Figura A.1: Diagrama CCT para la aleación 2.

01: Fe-0,7C-0,7Mn-0,02P-0,02S-2Si-2,5Cr-0,5Mo-GS: 8
 CCT Diagram (schematic): T-t Diagram

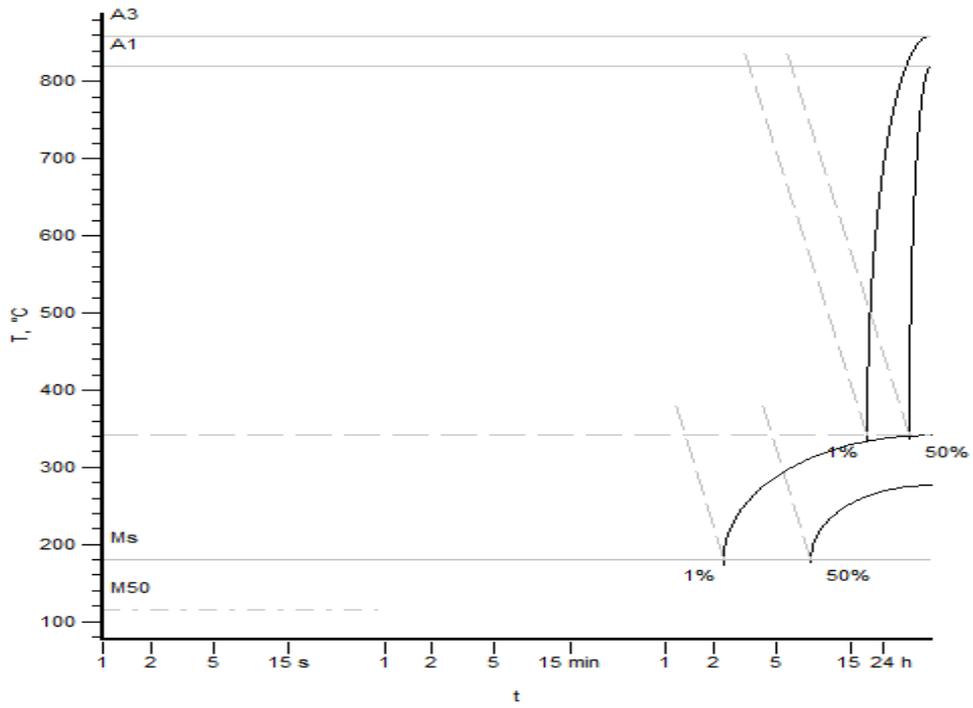


Figura A.2: Diagrama CCT para la aleación 3.

04: Fe-0.3C-2Mn-0.02P-0.02S-2Si-2.5Cr-0.5Mo-GS: 8
 CCT Diagram (schematic): T-t Diagram

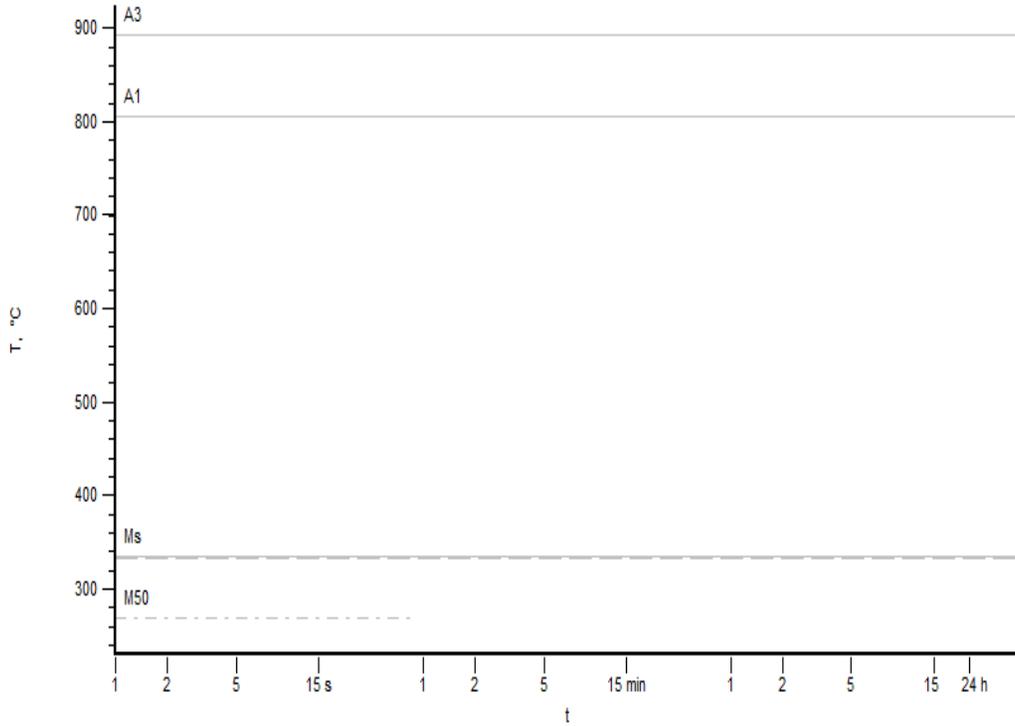


Figura A.3: Diagrama CCT para la aleación 4.

07: Fe-0,7C-0,7Mn-0,02P-0,02S-0,3Si-1Cr-0,25Mo-GS: 8
 CCT Diagram (schematic): T-t Diagram

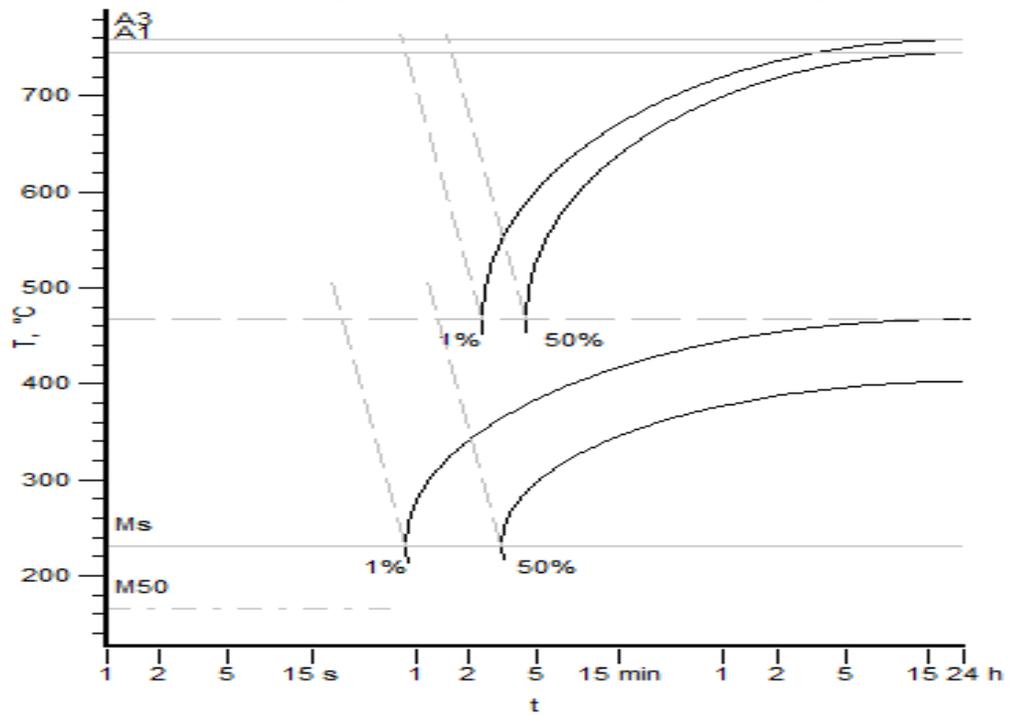


Figura A.4: Diagrama CCT para la aleación 7.

08: Fe-0,3C-0,7Mn-0,02P-0,02S-0,3Si-1Cr-0,5Mo-GS: 8
 CCT Diagram (schematic): T-t Diagram

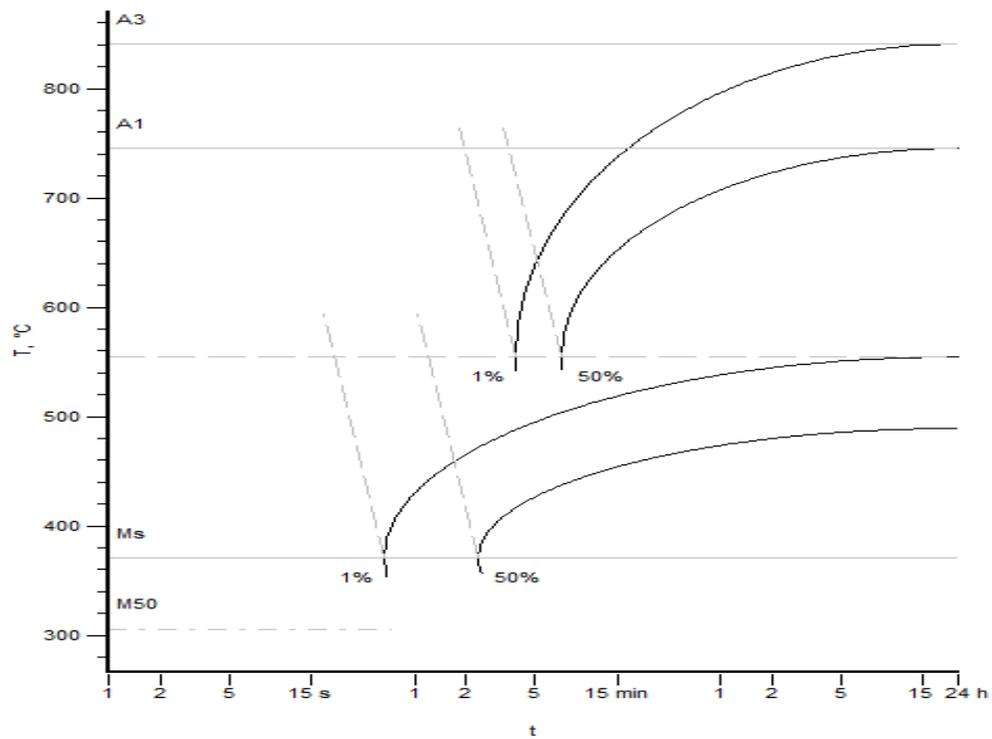


Figura A.5: Diagrama CCT para la aleación 8.

09: Fe-0,3C-0,7Mn-0,02P-0,02S-0,3Si-2,5Cr-0,25Mo-GS: 8
CCT Diagram (schematic): T-t Diagram

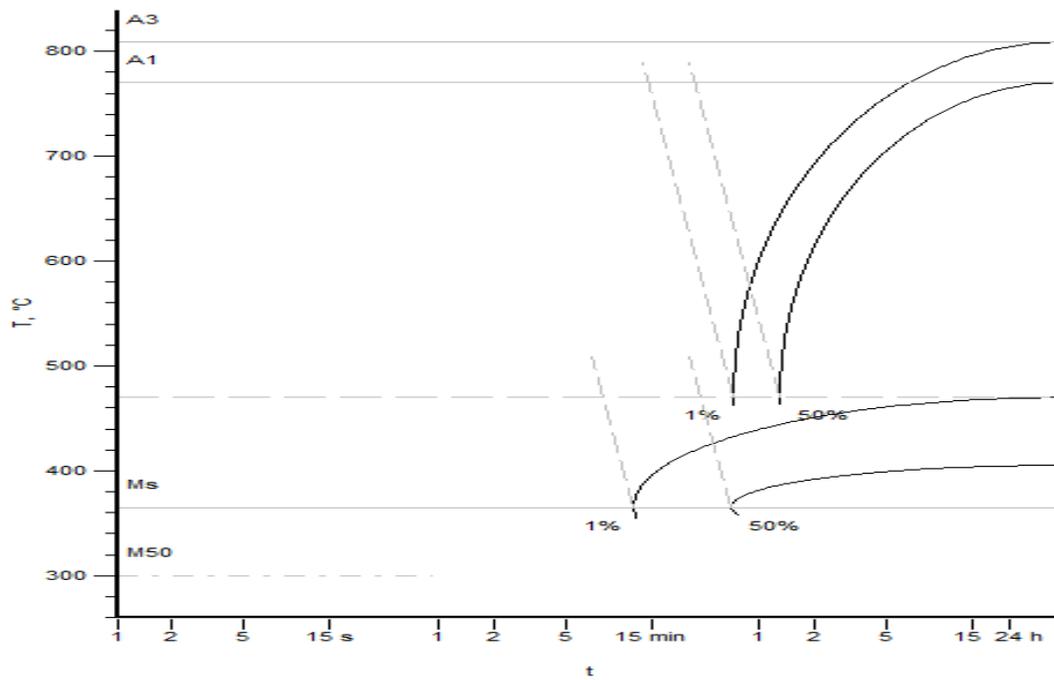


Figura A.6: Diagrama CCT para la aleación 9.

11: Fe-0.3C-2Mn-0.02P-0.02S-2Si-1Cr-0.5Mo-GS: 8
CCT Diagram (schematic): T-t Diagram

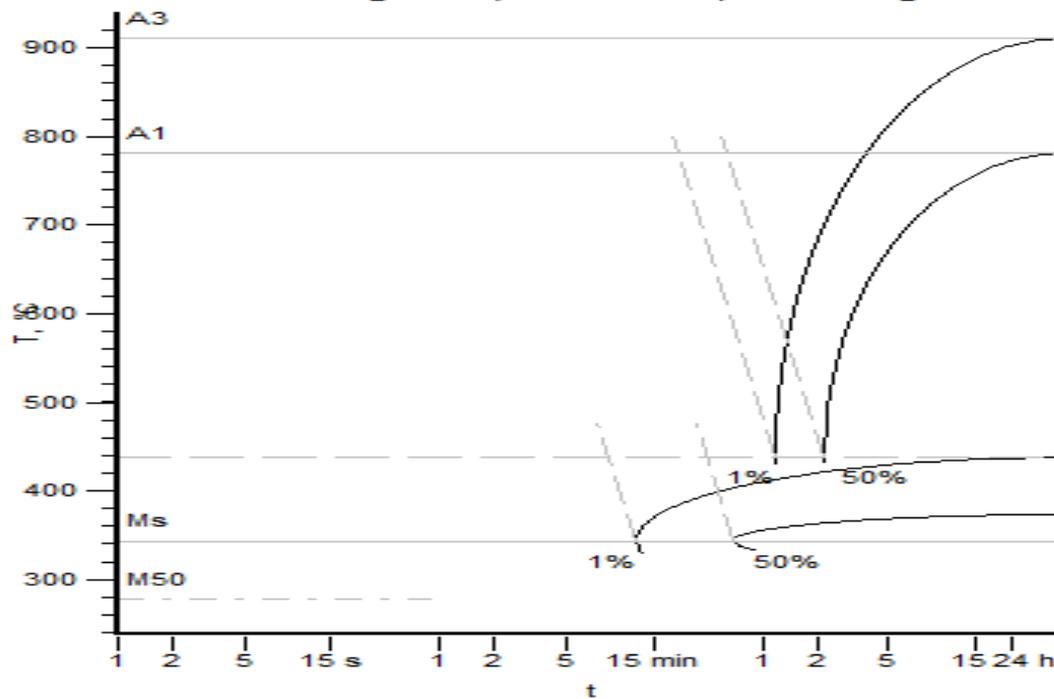


Figura A.7: Diagrama CCT para la aleación 11.

12: Fe-0.7C-0.7Mn-0.02P-0.02S-0.3Si-1Cr-0.5Mo-GS: 8

CCT Diagram (schematic): T-t Diagram

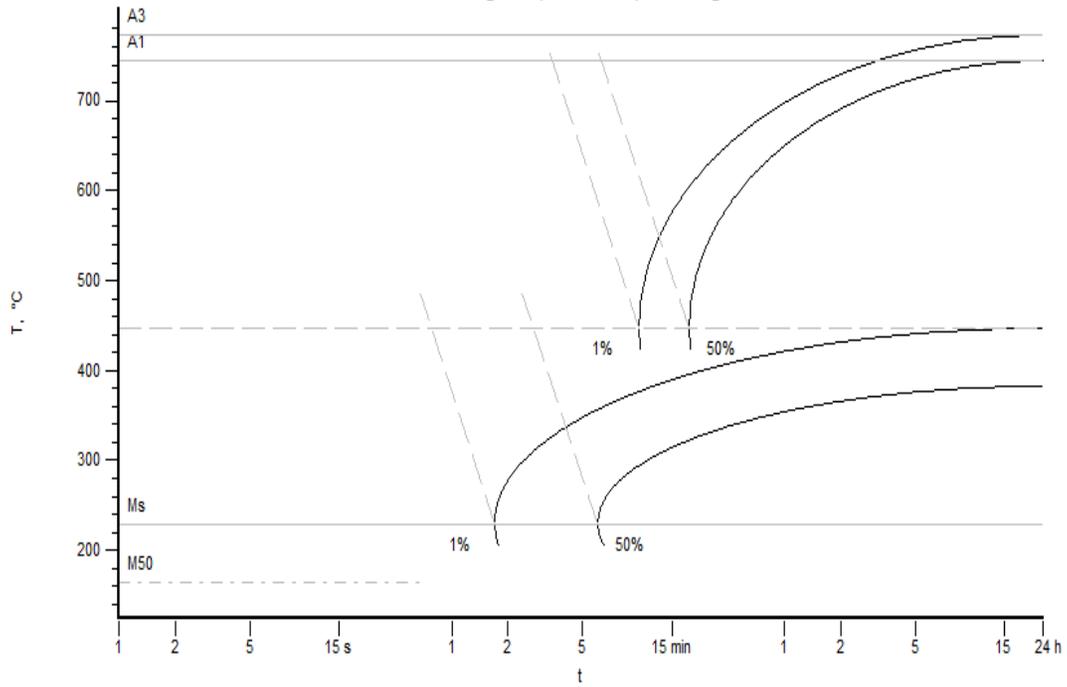


Figura A.8: Diagrama CCT para la aleación 12.

13: Fe-0.7C-0.7Mn-0.02P-0.02S-2Si-2.5Cr-0.25Mo-GS: 8

CCT Diagram (schematic): T-t Diagram

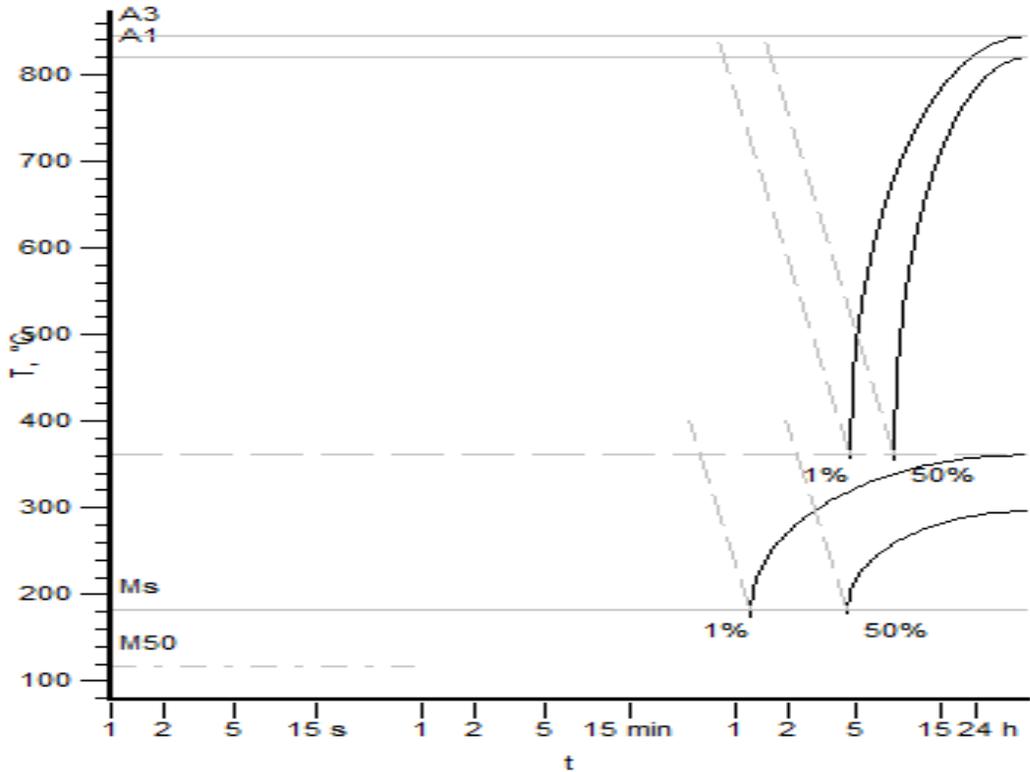


Figura A.9: Diagrama CCT para la aleación 13.

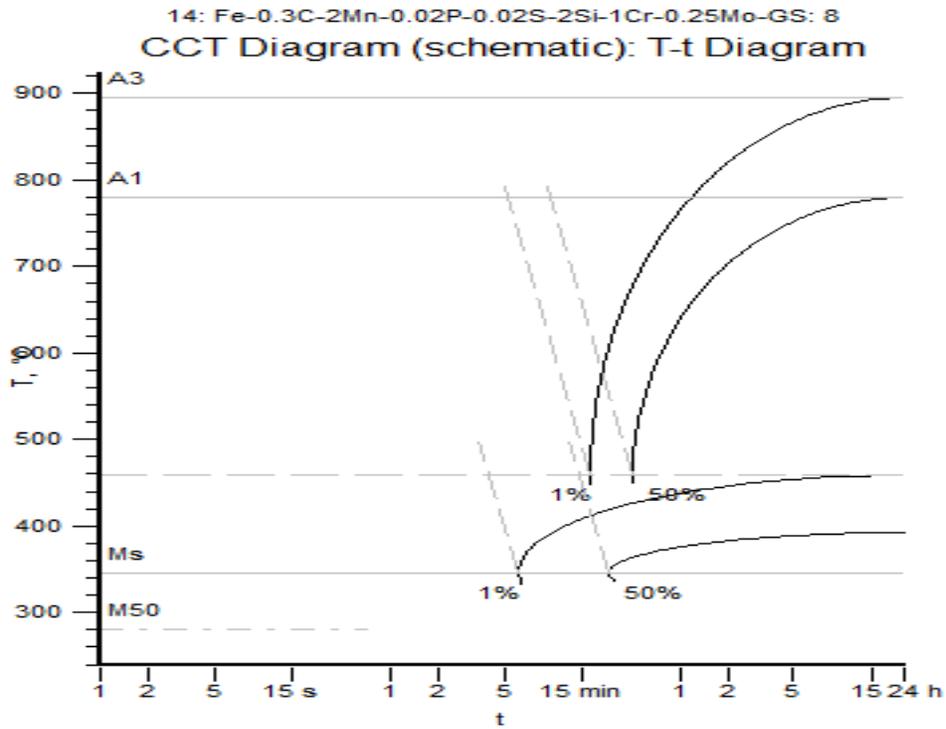


Figura A.10: Diagrama CCT para la aleación 14.

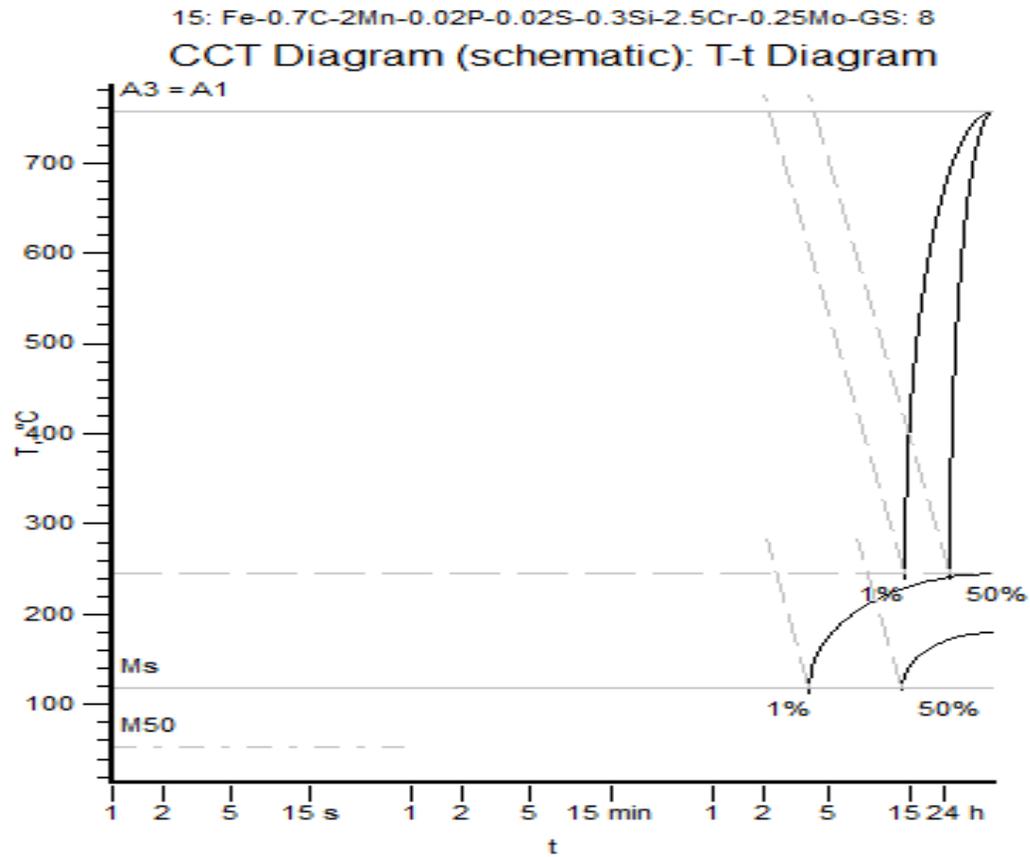


Figura A.11: Diagrama CCT para la aleación 15.

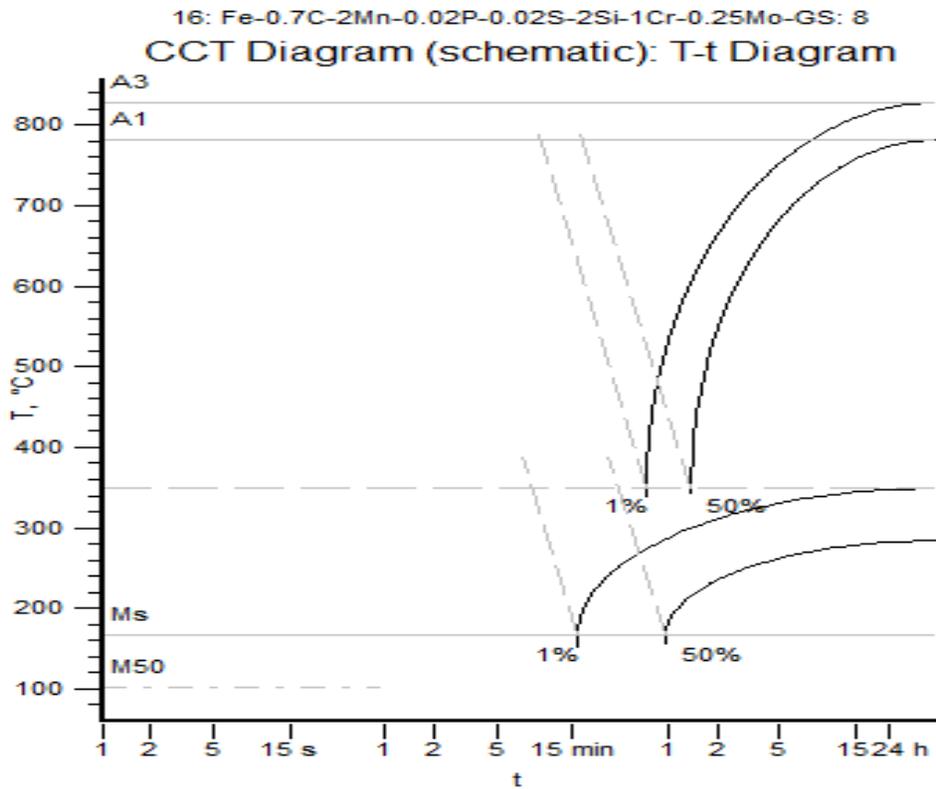


Figura A.12: Diagrama CCT para la aleación 16.

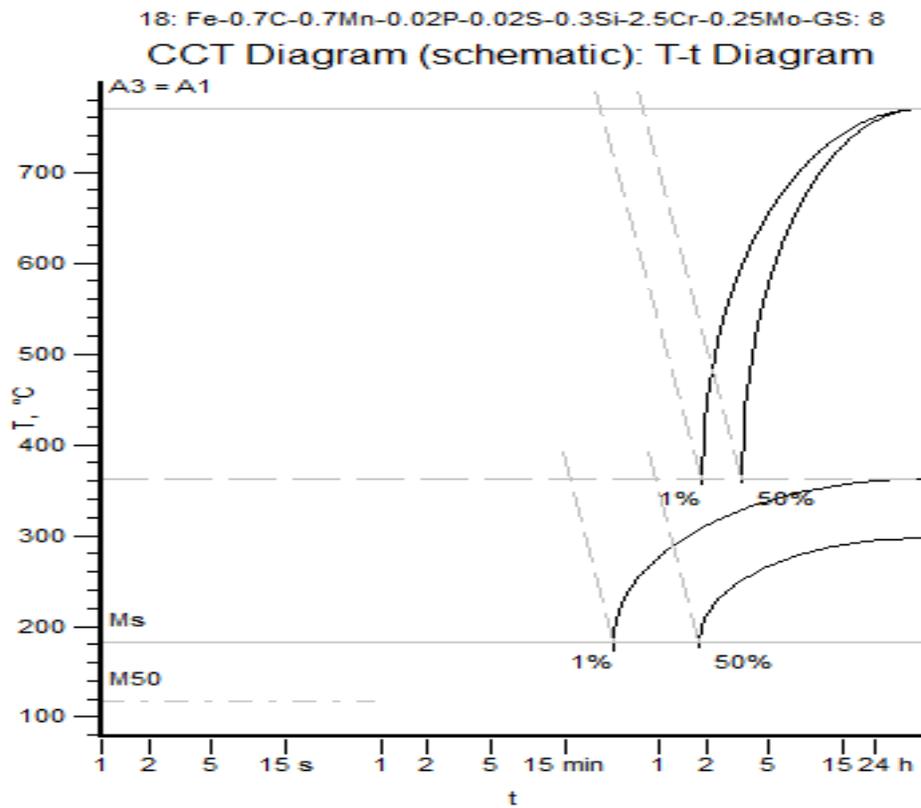


Figura A.13: Diagrama CCT para la aleación 18.

19: Fe-0.3C-0.7Mn-0.02P-0.02S-2Si-1Cr-0.25Mo-GS: 8
 CCT Diagram (schematic): T-t Diagram

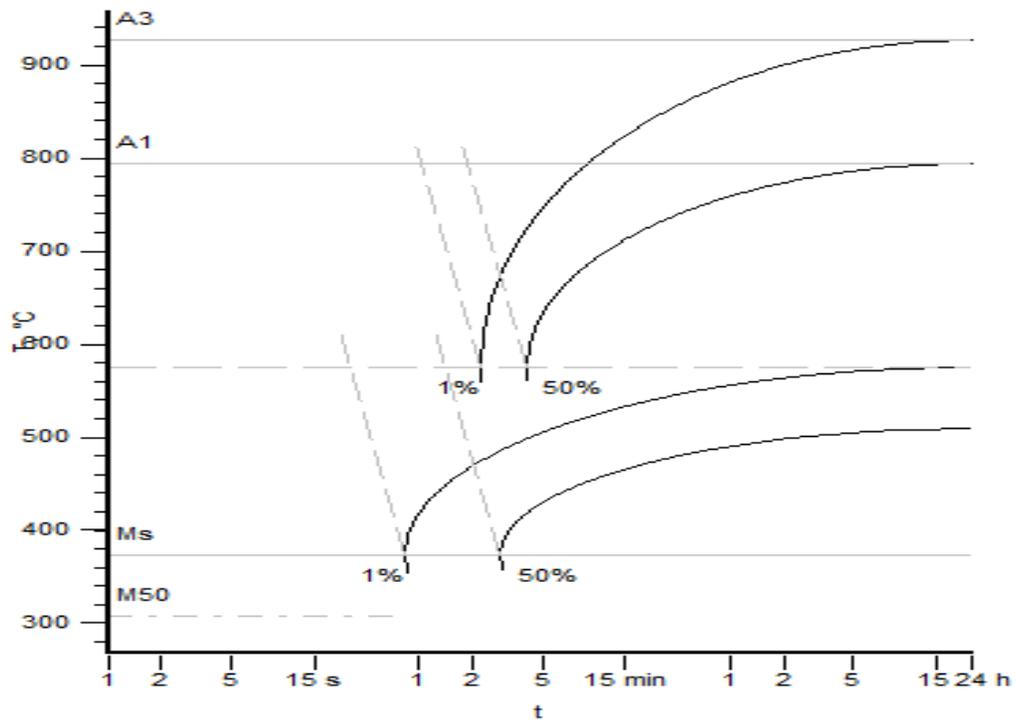


Figura A.14: Diagrama CCT para la aleación 19.

20: Fe-0.7C-2Mn-0.02P-0.02S-2Si-2.5Cr-0.25Mo-GS: 8
 CCT Diagram (schematic): T-t Diagram

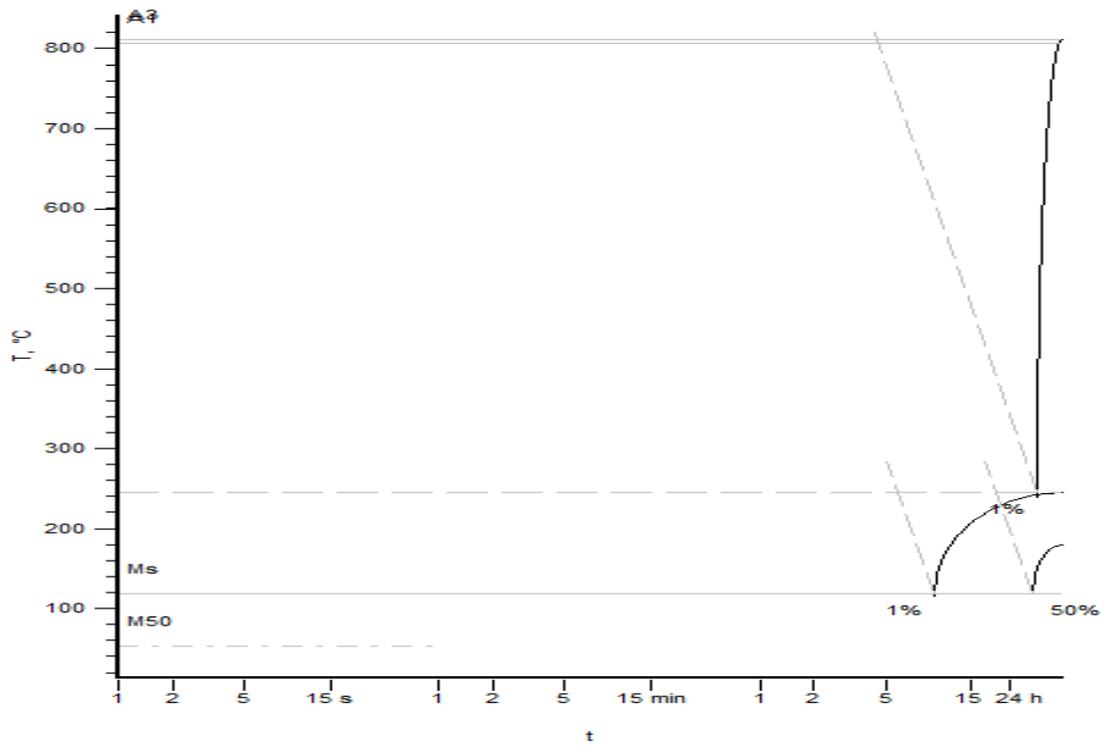


Figura A.15: Diagrama CCT para la aleación 20.

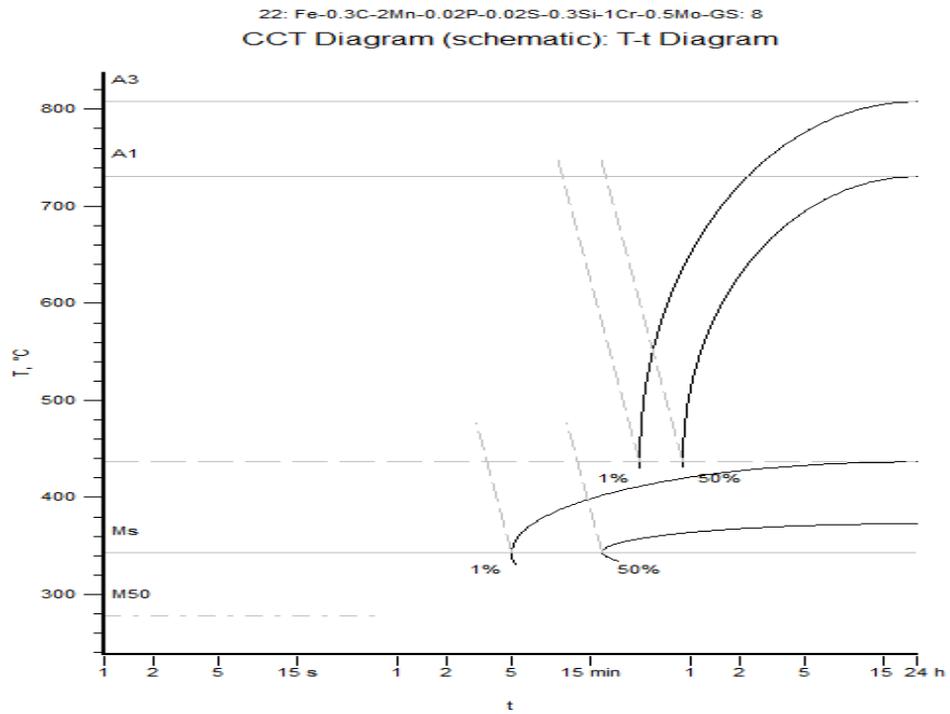


Figura A.16: Diagrama CCT para la aleación 22.

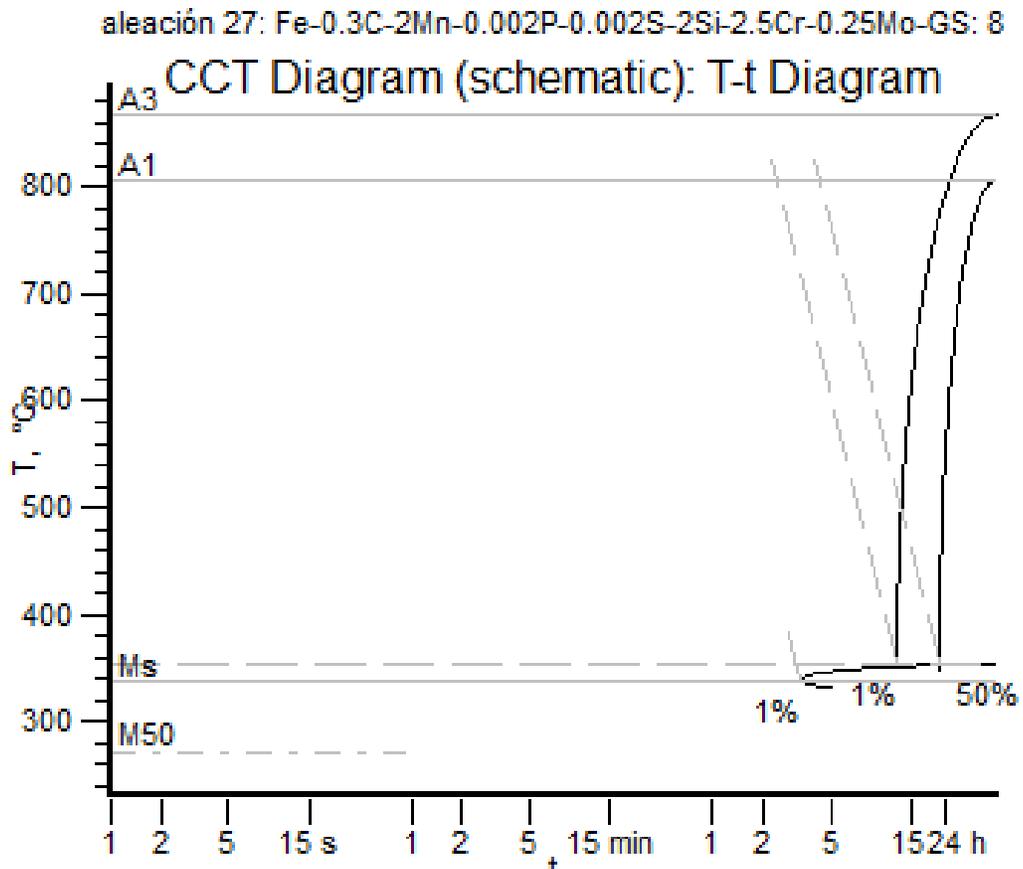


Figura A.17: Diagrama CCT para la aleación 27.

aleación 30: Fe-0.7C-2Mn-0.002P-0.002S-2Si-2.5Cr-0.5Mo-GS: 8

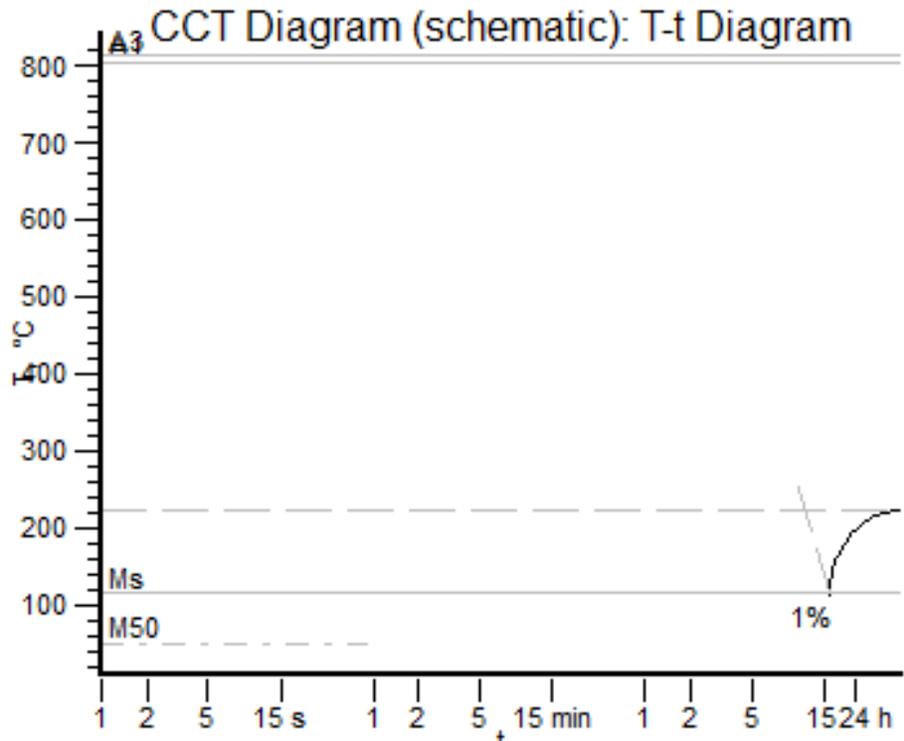


Figura A.18: Diagrama CCT para la aleación 30.

aleación 32: Fe-0.3C-0.7Mn-0.002P-0.002S-0.3Si-2.5Cr-0.5Mo-GS: 8

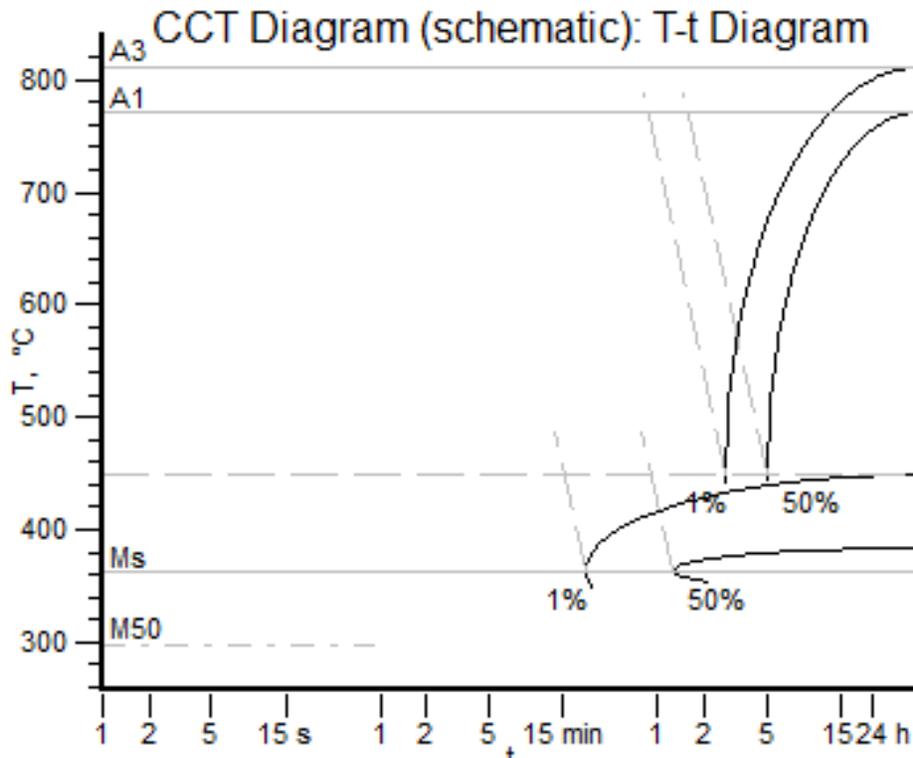


Figura A.19: Diagrama CCT para la aleación 32.

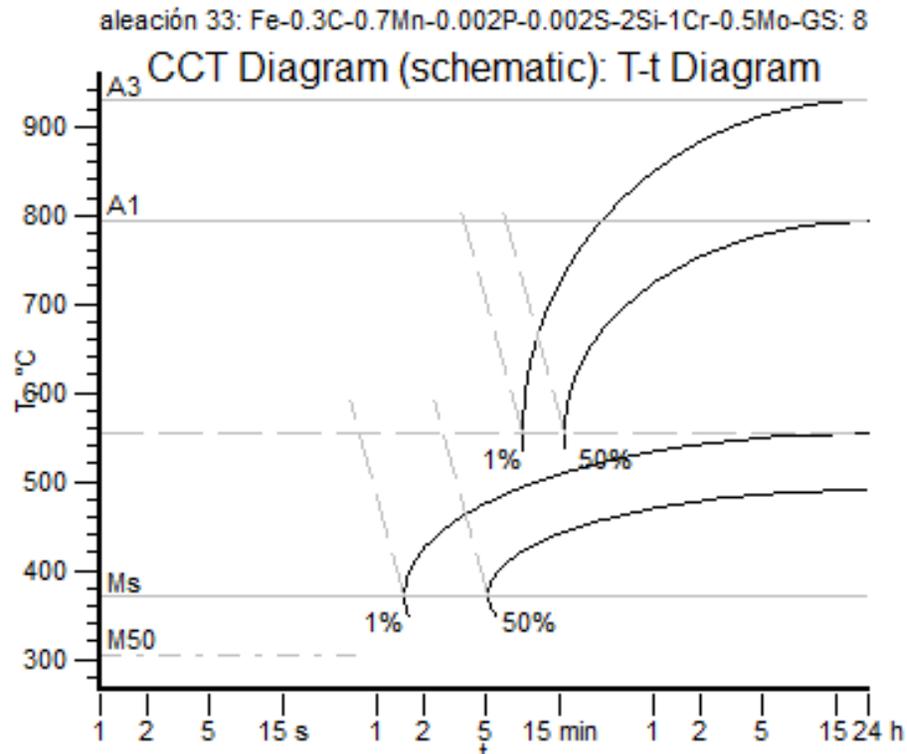


Figura A.20: Diagrama CCT para la aleación 33.

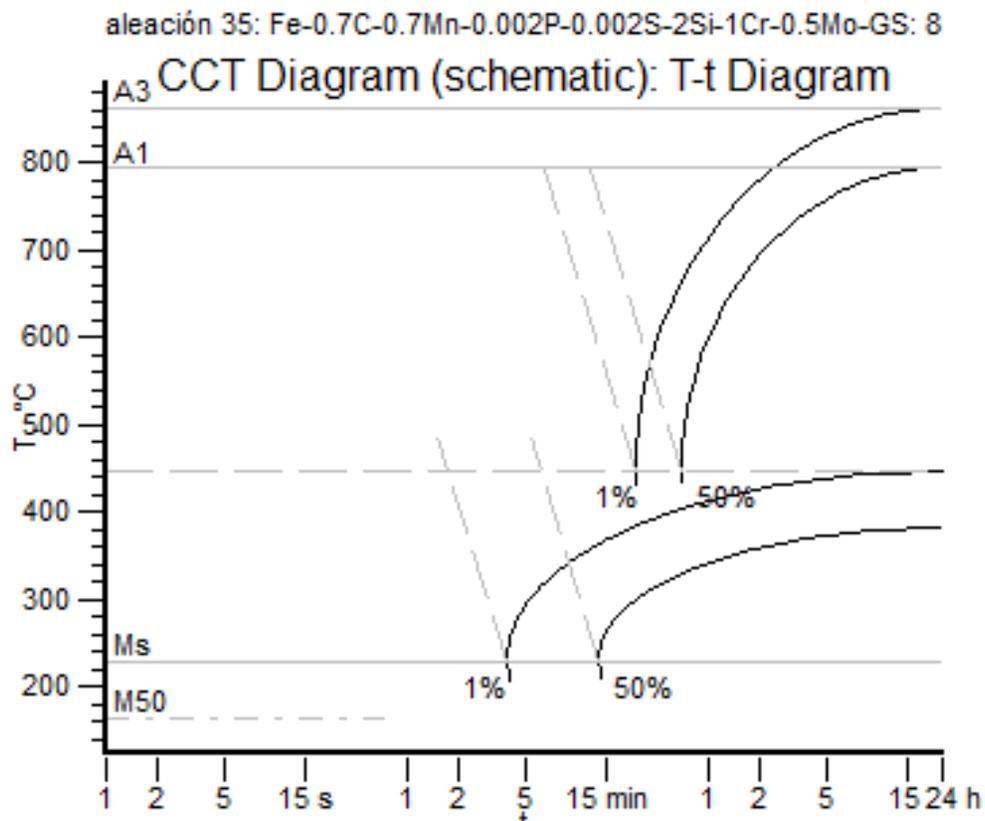


Figura A.21: Diagrama CCT para la aleación 35.

aleación 40: Fe-0.3C-0.7Mn-0.002P-0.002S-2Si-2.5Cr-0.5Mo-GS: 8

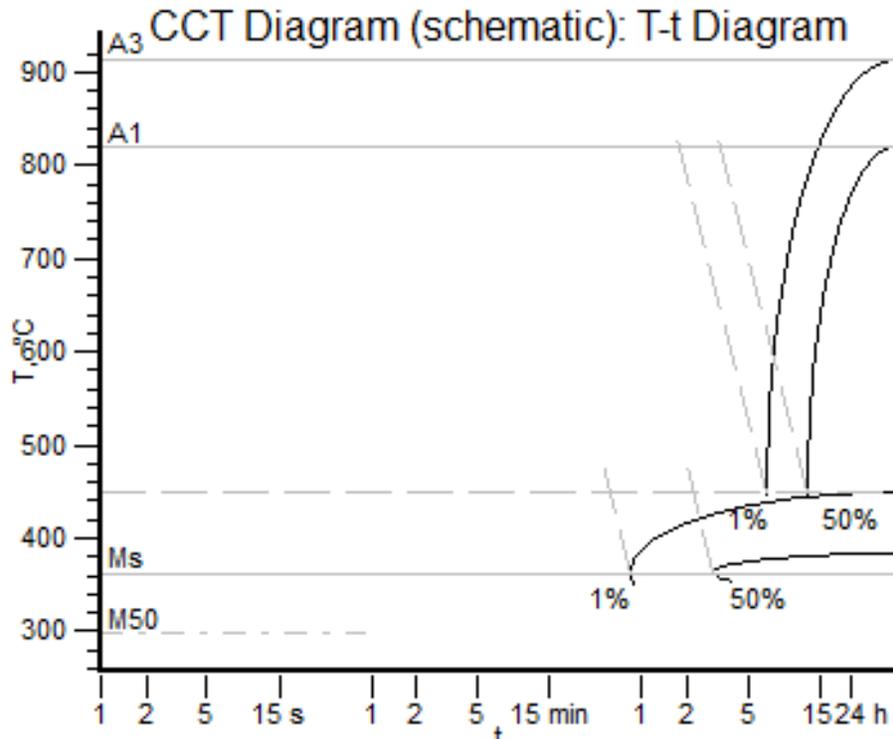


Figura A.22: Diagrama CCT para la aleación 40.

aleación 44: Fe-0.7C-2Mn-0.002P-0.002S-0.3Si-2.5Cr-0.5Mo-GS: 8

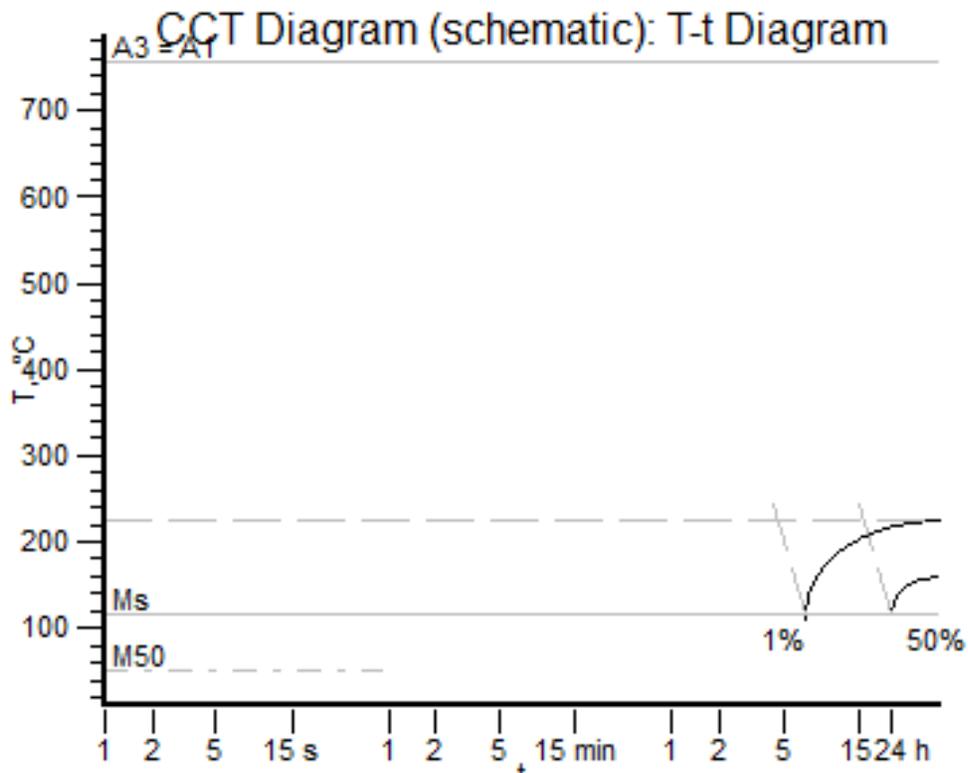


Figura A.23: Diagrama CCT para la aleación 44.

aleación 45: Fe-0.7C-2Mn-0.002P-0.002S-0.3Si-1Cr-0.25Mo-GS: 8

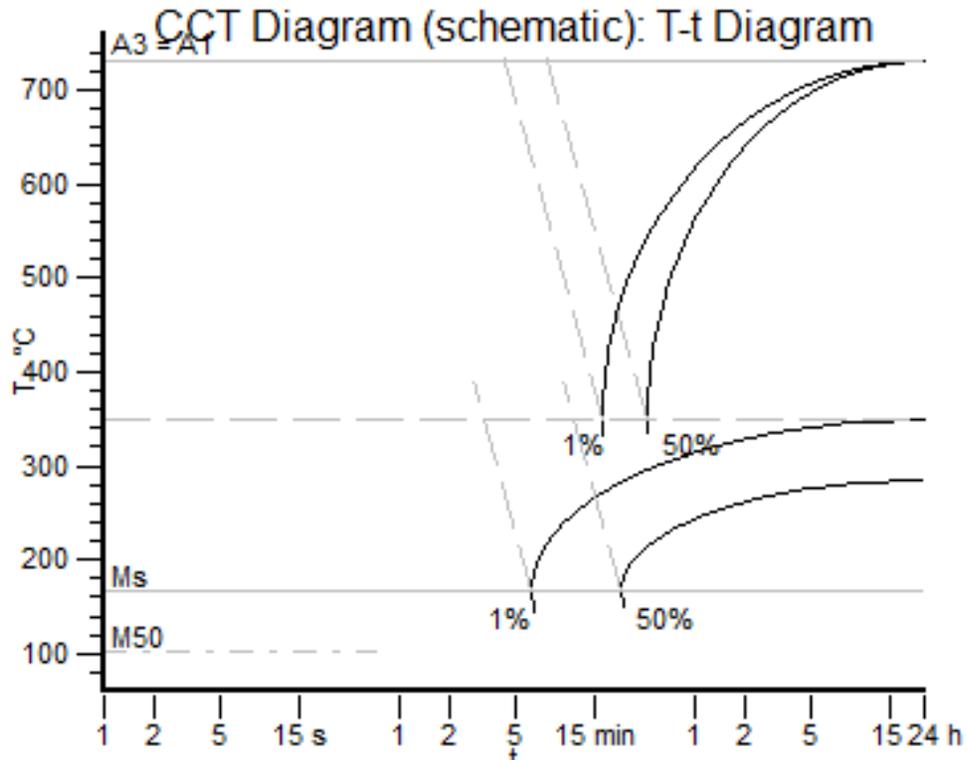


Figura A.24: Diagrama CCT para la aleación 45.

aleación 47: Fe-0.7C-2Mn-0.002P-0.002S-0.3Si-1Cr-0.5Mo-GS: 8

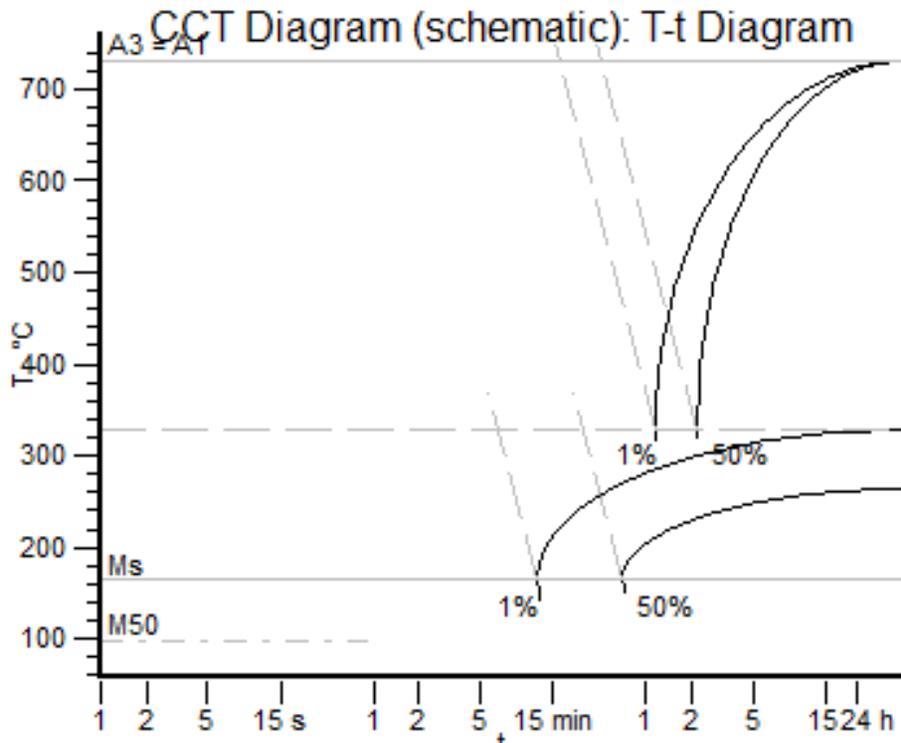


Figura A.25: Diagrama CCT para la aleación 47.

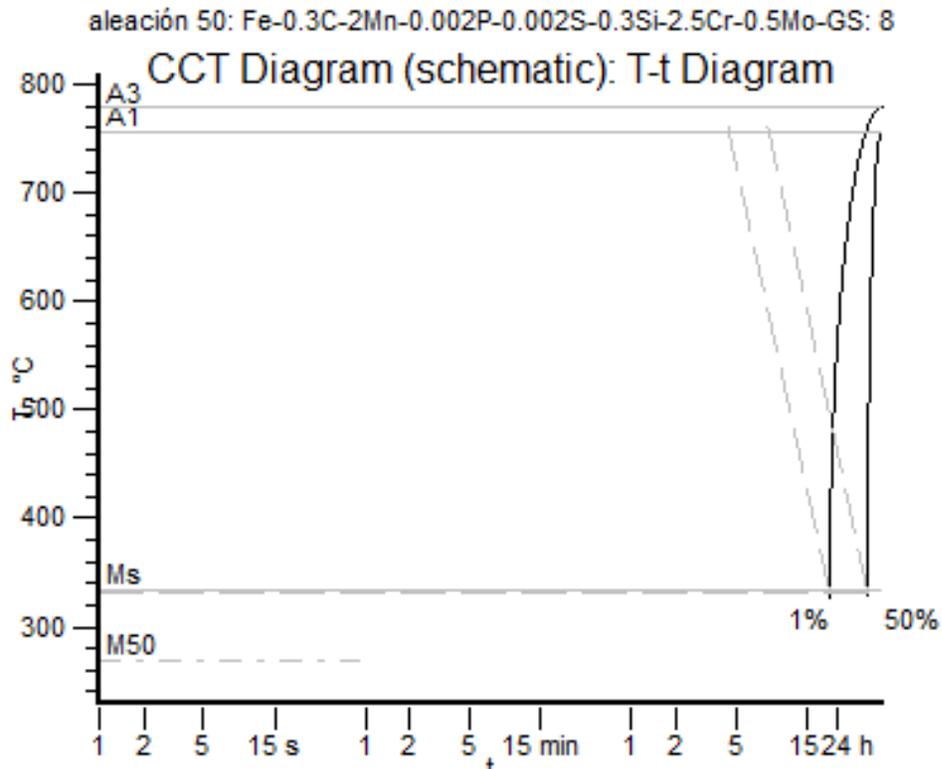


Figura A.26: Diagrama CCT para la aleación 50.

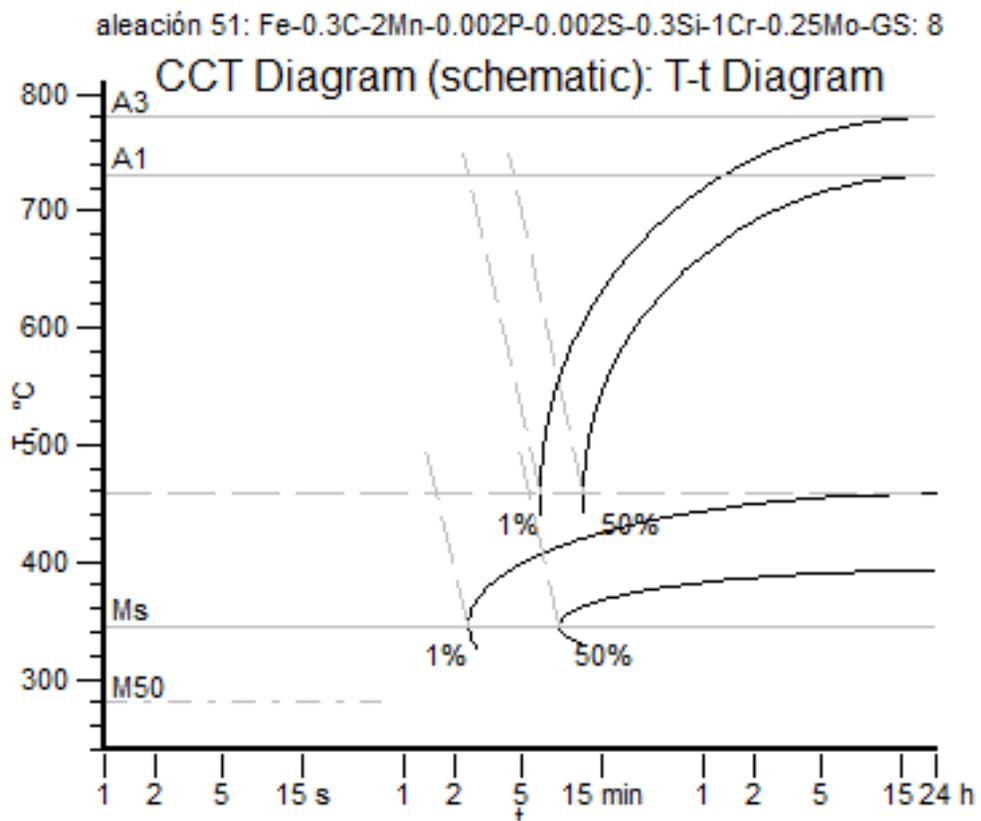


Figura A.27: Diagrama CCT para la aleación 3.

aleación 53: Fe-0.3C-0.7Mn-0.002P-0.002S-0.3Si-1Cr-0.25Mo-GS: 8

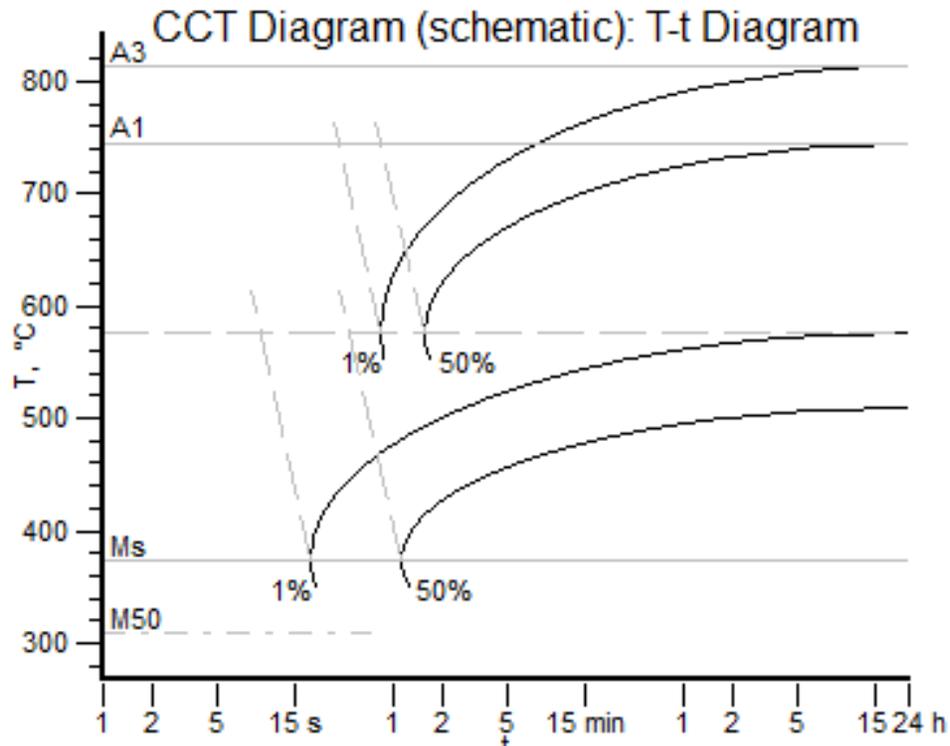


Figura A.28: Diagrama CCT para la aleación 53.

aleación 55: Fe-0.3C-2Mn-0.002P-0.002S-0.3Si-2.5Cr-0.25Mo-GS: 8

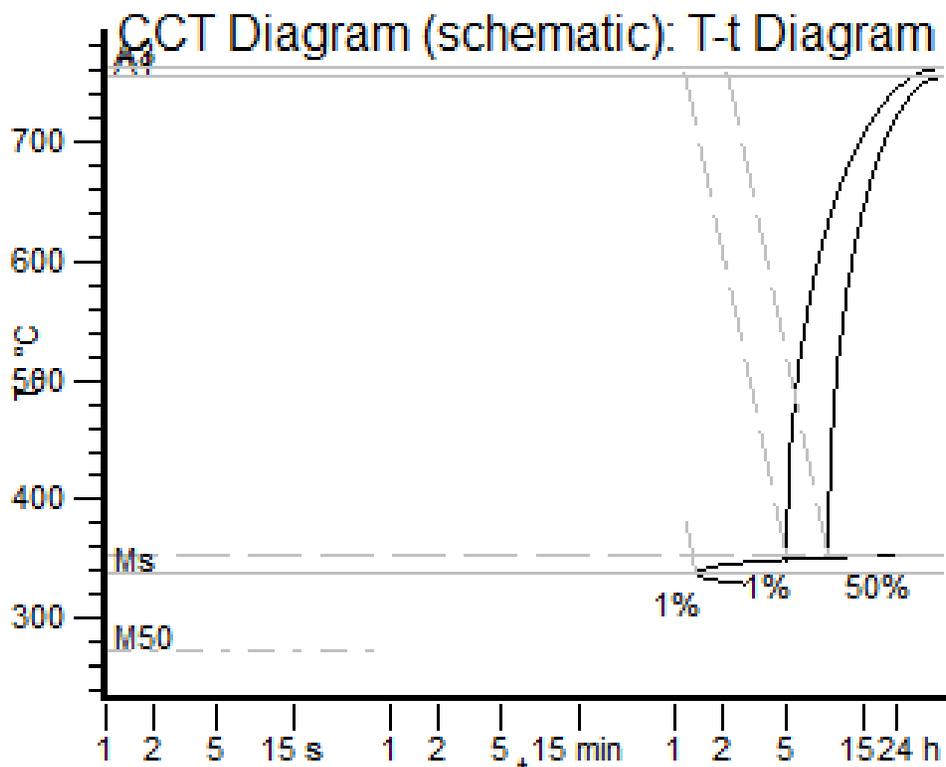


Figura A.29: Diagrama CCT para la aleación 55.

aleación 57: Fe-0.3C-0.7Mn-0.002P-0.002S-2Si-2.5Cr-0.25Mo-GS: 8

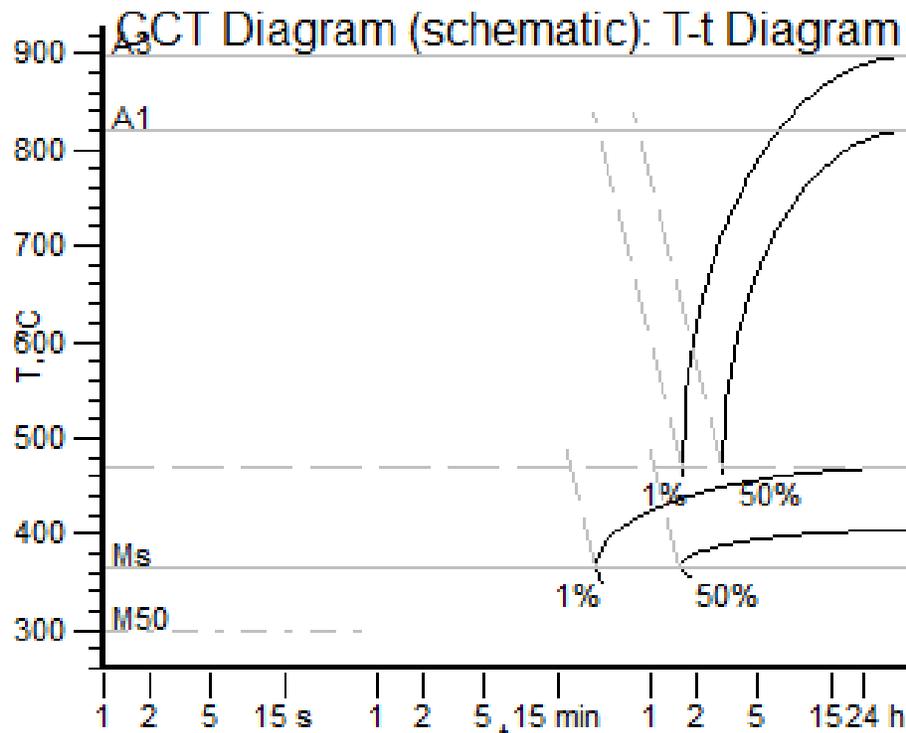


Figura A.30: Diagrama CCT para la aleación 57.

aleación 58: Fe-0.7C-2Mn-0.002P-0.002S-2Si-1Cr-0.5Mo-GS: 8

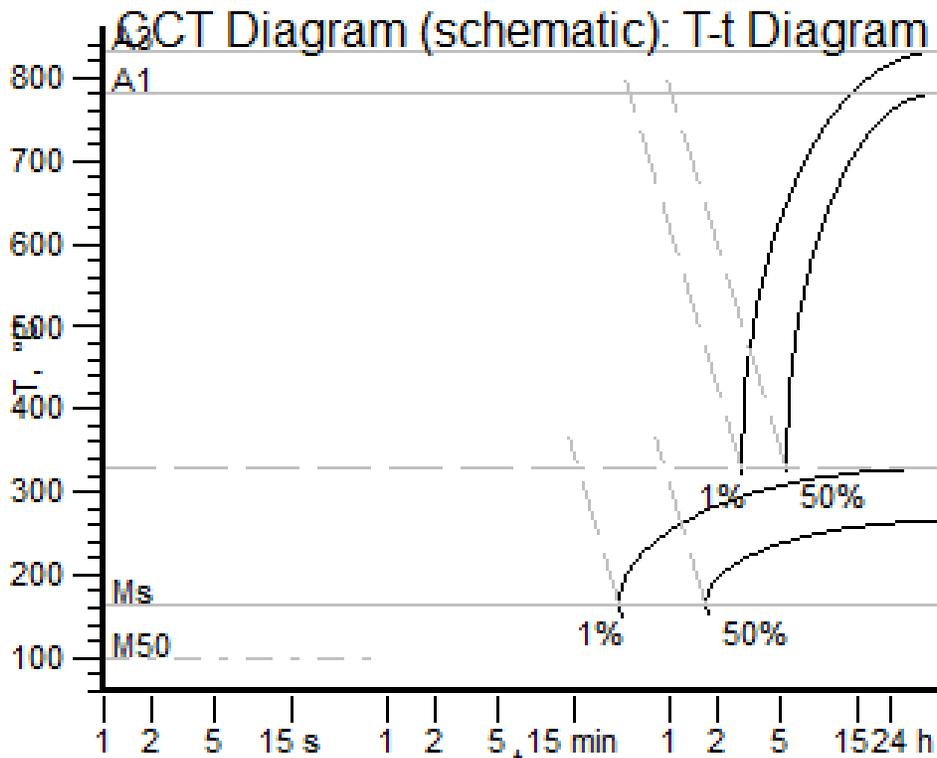


Figura A.31: Diagrama CCT para la aleación 58.

aleación 59: Fe-0.7C-0.7Mn-0.002P-0.002S-0.3Si-2.5Cr-0.5Mo-GS: 8

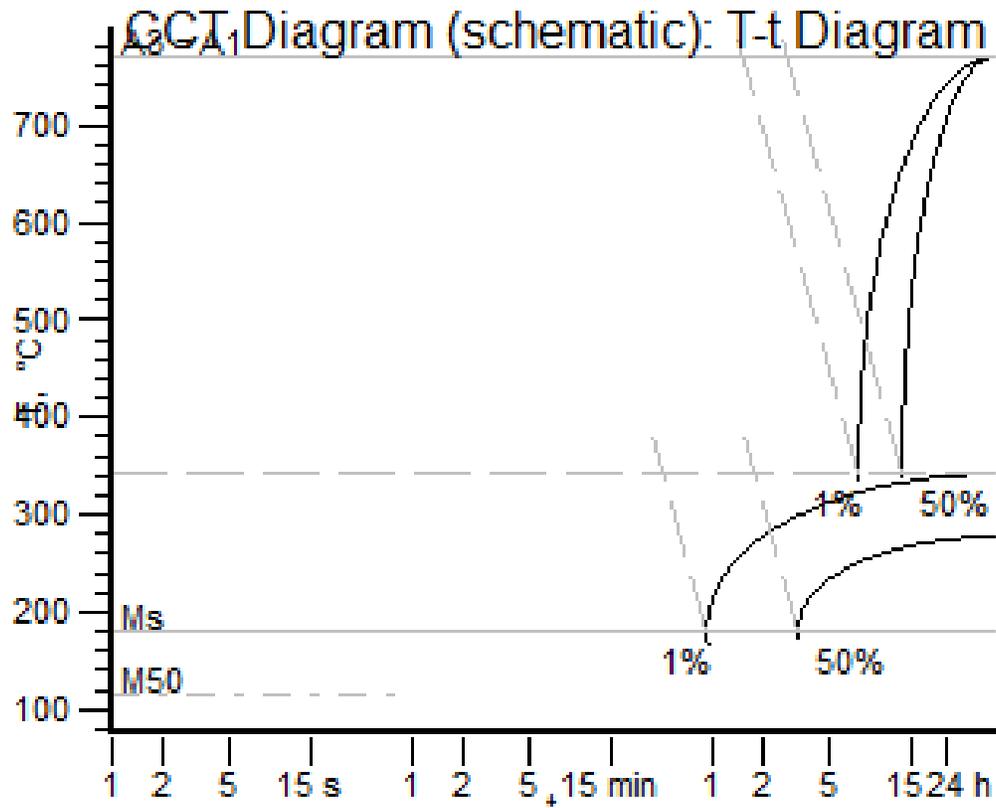


Figura A.32: Diagrama CCT para la aleación 59.

Anexo B

B. Aporte en dureza de los elementos aleantes en aceros martensíticos

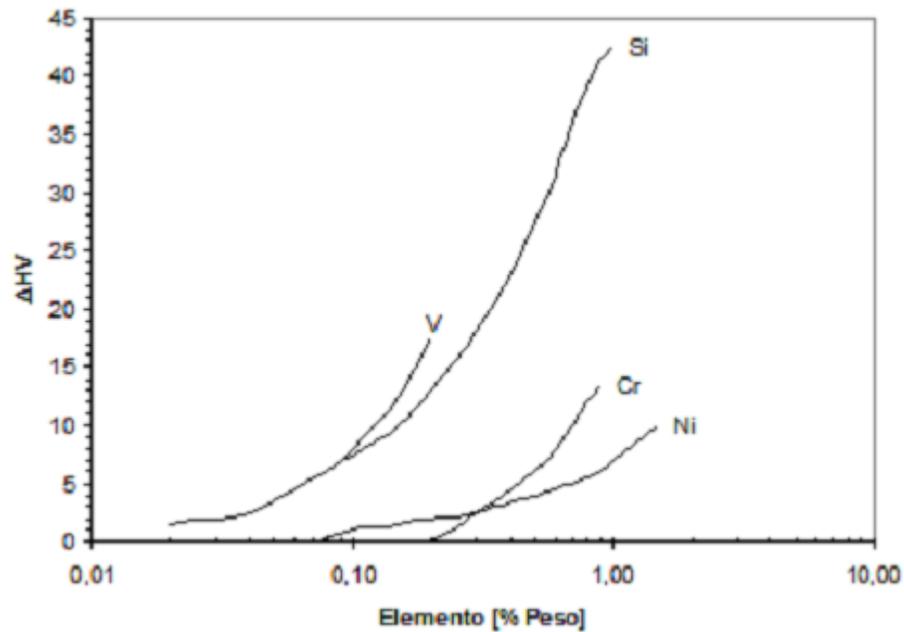


Figura B.1: Contribución de elementos aleantes a la dureza de la martensita revenida a 400°C por una hora.

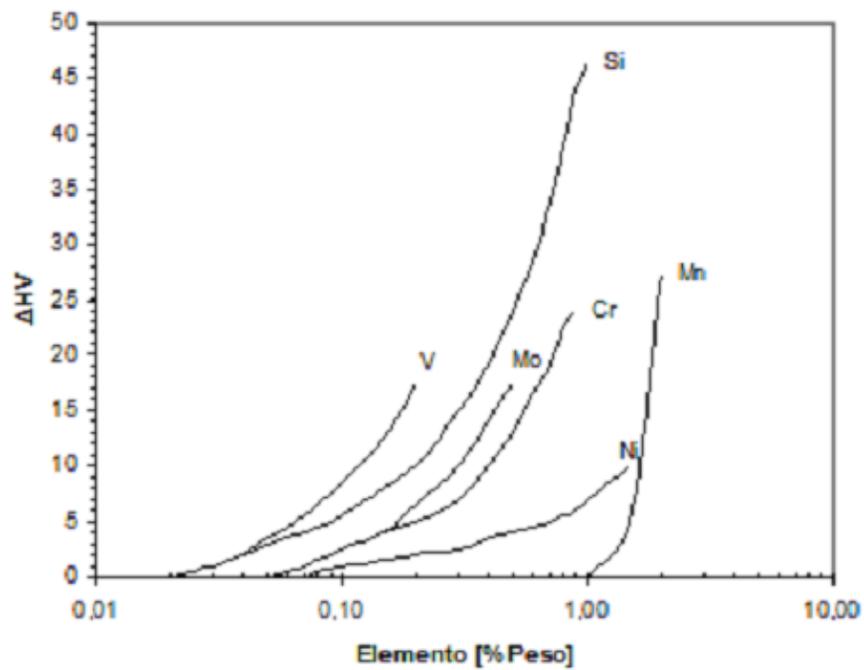


Figura B.2: Contribución de elementos aleantes a la dureza de la martensita revenida a 500°C por una hora.

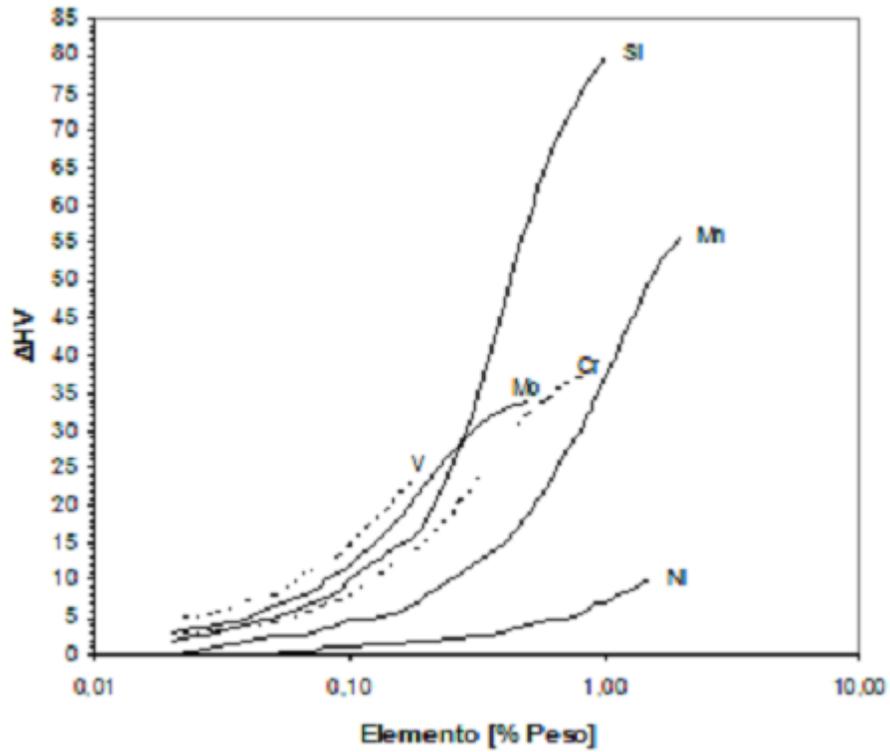


Figura B.3: Contribución de elementos aleantes a la dureza de la martensita revenida a 600°C por una hora.

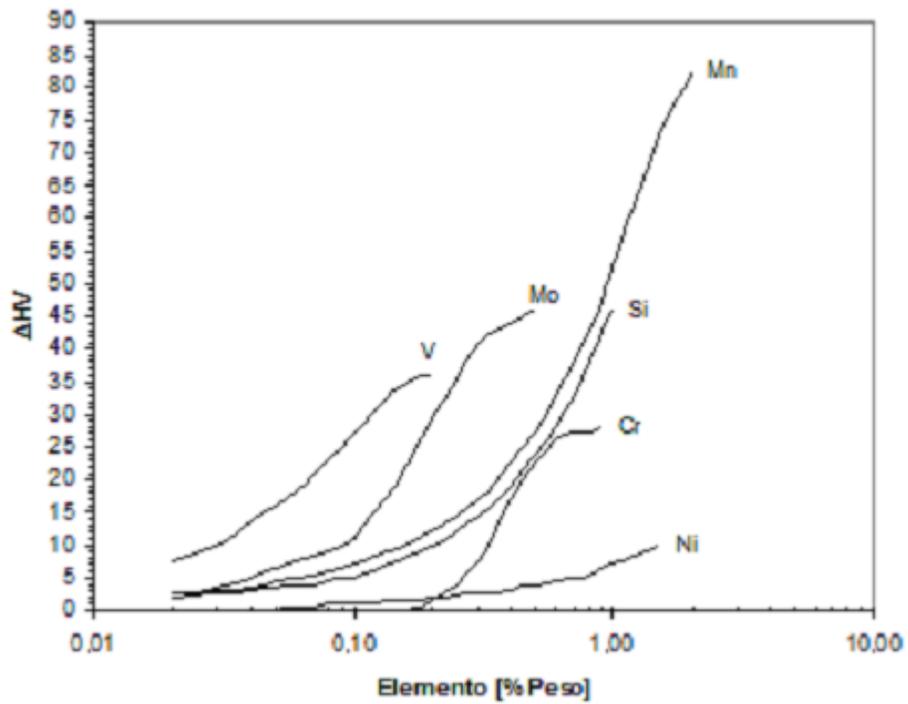


Figura B.4: Contribución de elementos aleantes a la dureza de la martensita revenida a 700°C por una hora.

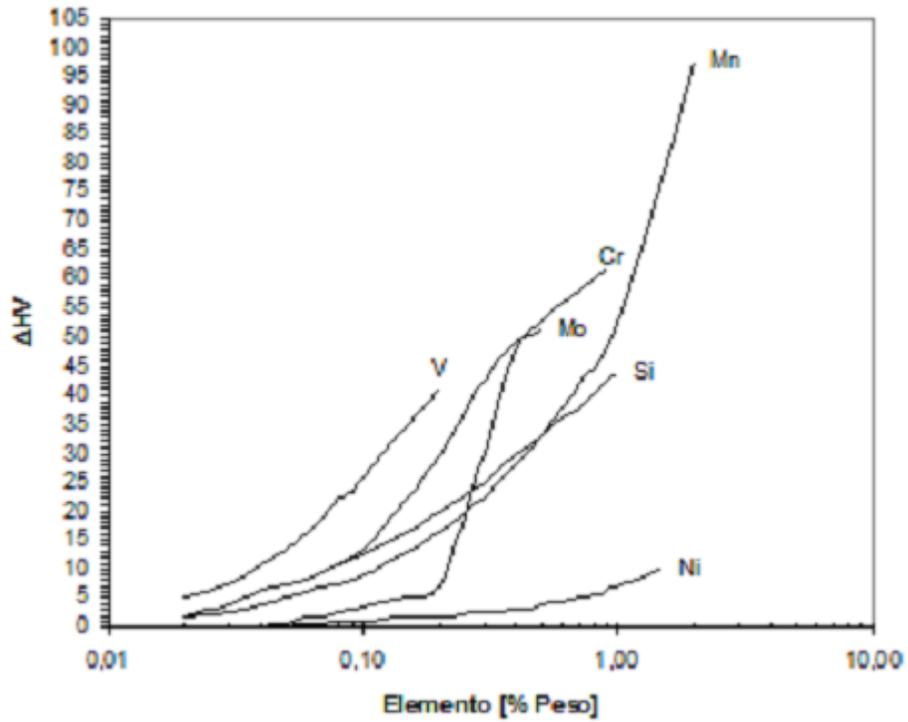


Figura B.5: Contribución de elementos aleantes a la dureza de la martensita revenida a 800°C por una hora.

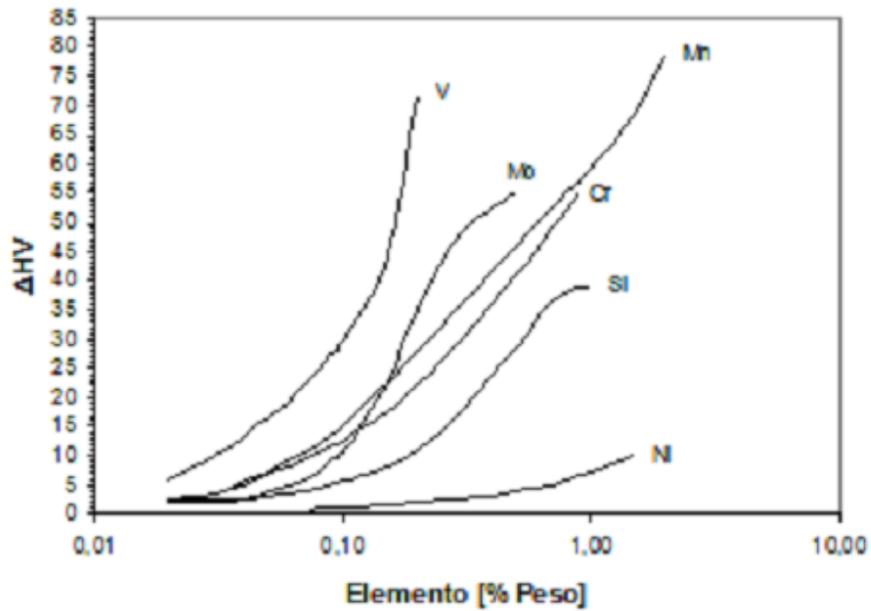


Figura B.6: Contribución de elementos aleantes a la dureza de la martensita revenida a 900°C por una hora.

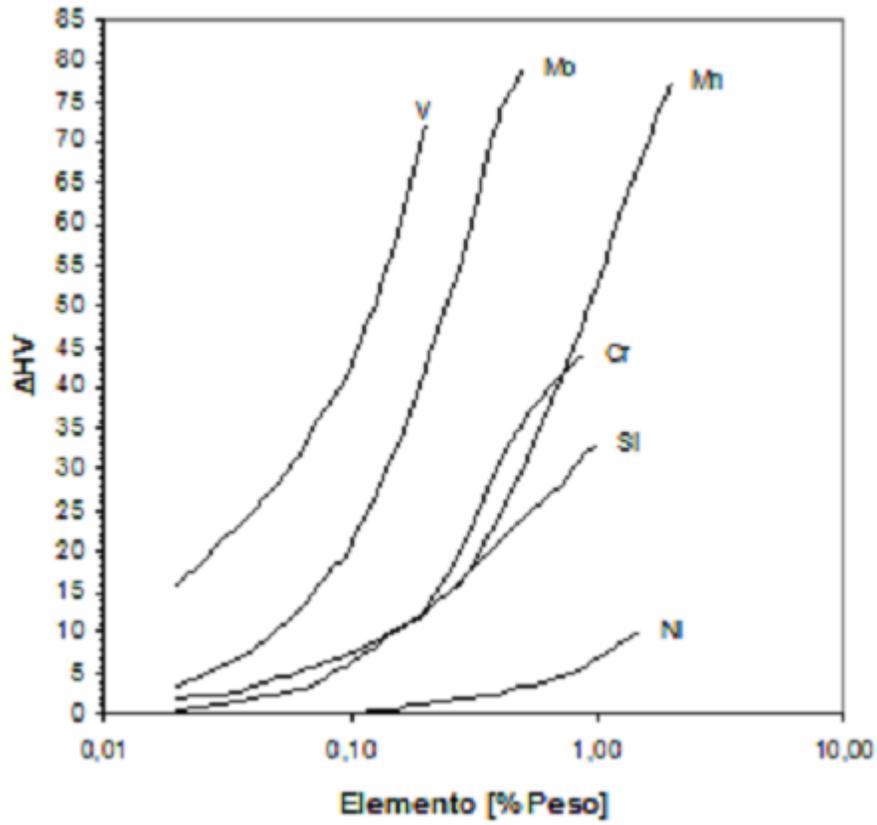


Figura B.7: Contribución de elementos aleantes a la dureza de la martensita revenida a 1000°C por una hora.

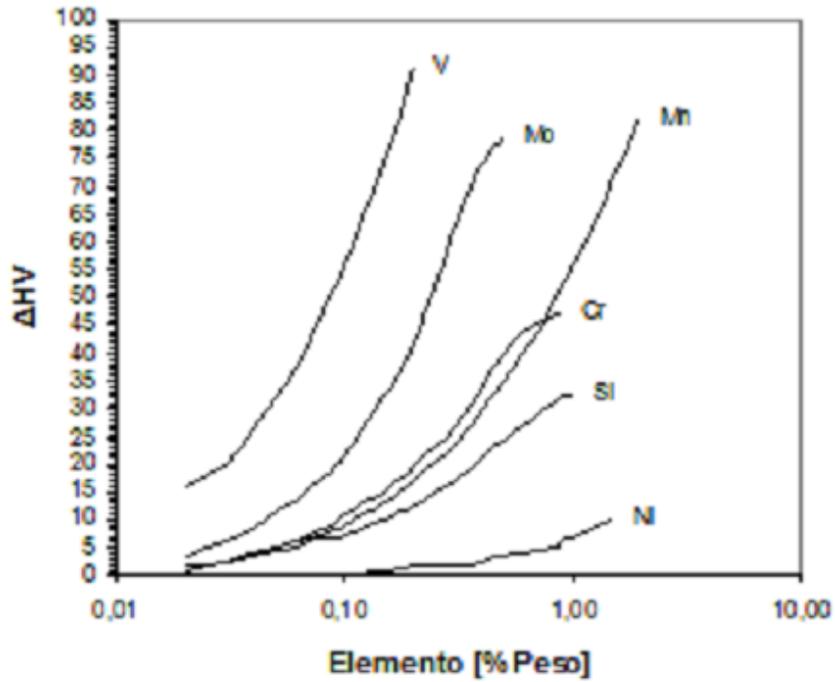


Figura B.8: Contribución de elementos aleantes a la dureza de la martensita revenida a 1100°C por una hora.

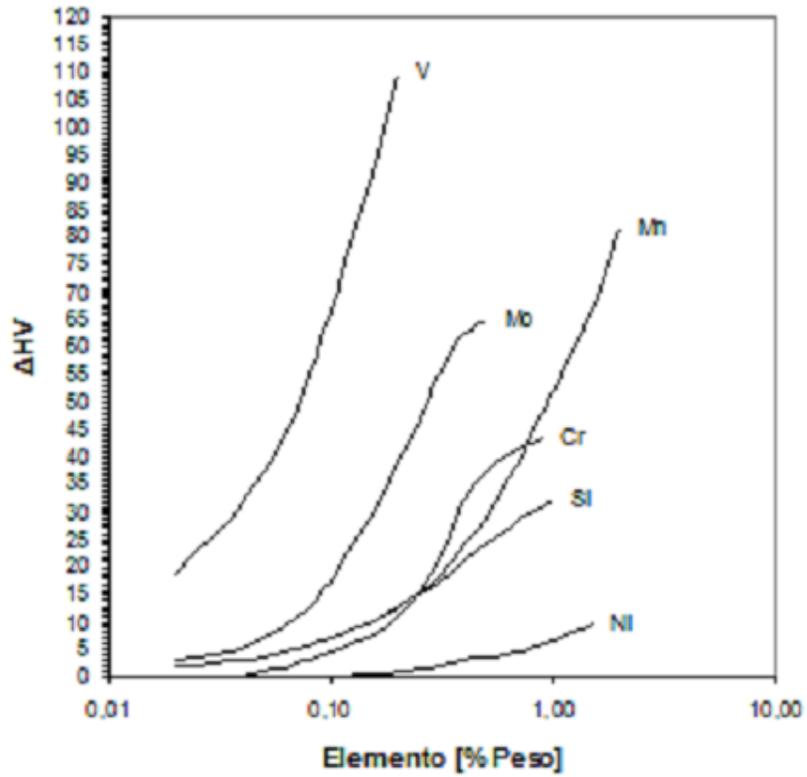


Figura B.9: Contribución de elementos aleantes a la dureza de la martensita revenida a 1200°C por una hora.

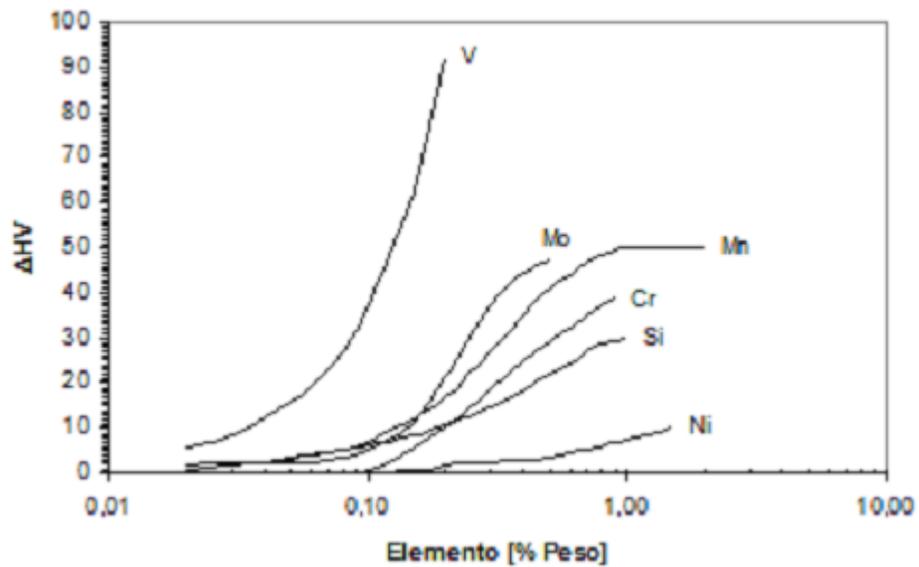


Figura B.10: Contribución de elementos aleantes a la dureza de la martensita revenida a 1300°C por una hora.