

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**ESTUDIO DE LAS MODIFICACIONES MICROESTRUCTURALES Y DE LA
DUREZA EN EL ACERO AISI/SAE 1045 EMPLEANDO EL ENSAYO JOMINY EN
EL RANGO DE TEMPERATURAS INTERCRÍTICAS**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecánico

AUTOR

Victor Manuel Cupe Missa

ASESOR

Dr. Ing. Carlos Abraham Fosca Pastor

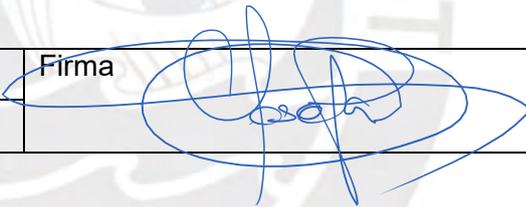
Lima, abril, 2024

Informe de Similitud

Yo, Carlos Abraham Fosca Pastor, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis titulado: ESTUDIO DE LAS MODIFICACIONES MICROESTRUCTURALES Y DE LA DUREZA EN EL ACERO AISI/SAE 1045 EMPLEANDO EL ENSAYO JOMINY EN EL RANGO DE TEMPERATURAS INTERCRÍTICAS del autor Victor Manuel Cupe Missa, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 17%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 08/04/2024.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima, 15 de abril de 2024

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: Fosca Pastor, Carlos Abraham	
DNI: 08739507	Firma 
ORCID: 0000-0003-3340-3917	

RESUMEN

El presente trabajo de tesis consistió en la caracterización de los cambios microestructurales y dureza al someter el acero AISI/SAE 1045 a temperaturas en el rango intercrítico (740°C, 760°C) y en el rango de austenización completa (890°C) enfriado a diferentes velocidades hasta temperatura ambiente empleando los lineamientos del ensayo Jominy (ASTM A255).

Para lograr este objetivo, inicialmente se revisó literatura acerca de los aceros, principalmente los cambios microestructurales en la zona intercrítica y mecanismos de transferencia de calor durante el enfriamiento del ensayo Jominy. Posteriormente, se estableció las propiedades térmicas del material, las condiciones iniciales y condiciones de contorno, para simular el comportamiento térmico de una probeta Jominy durante el enfriamiento mediante el método por elementos finitos y, de esta manera, correlacionar los valores de velocidades de enfriamiento, dureza y cambios microestructurales a lo largo de la generatriz de la probeta Jominy. Seguidamente, se estableció el procedimiento experimental del ensayo Jominy, análisis químico, metalografía y ensayo de dureza.

Como resultado de este estudio, se ha concluido que la exposición a diferentes velocidades de enfriamiento produce en la microestructura, una combinación fases y microconstituyentes diferentes, donde puede resultar en un mismo valor de dureza. Por esta razón, se ha desarrollado un patrón de microestructura-dureza el cual permite caracterizar mediante microscopía óptica, las principales fases y microconstituyentes obtenidos a partir de la exposición a diferentes velocidades de enfriamiento para las temperaturas de calentamiento de 740°C, 760°C y 890°C. Las durezas que se han tomado en cuenta para la elaboración de este patrón son: 58 HRC, 55 HRC, 50 HRC, 45 HRC, 40 HRC, 35 HRC, 30 HRC, 25 HRC, 20 HRC, 95 HRB y 90 HRB con una precisión de ± 1.5 HRC o ± 1.5 HRB según la escala de dureza correspondiente.

Palabras clave: Temperaturas intercríticas, ensayo Jominy, simulación térmica, dureza, micrografía, patrón microestructura-dureza.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	ii
ÍNDICE DE CONTENIDO	iii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
INTRODUCCIÓN.....	10
CAPITULO 1.....	13
FUNDAMENTOS TEORICOS	13
1.1. Aceros hipoeutectoides.....	13
1.1.1. Acero AISI/SAE 1045	13
1.2. Diagrama de Fe-C.....	14
1.2.1. Temperaturas críticas.....	14
1.2.2. Microconstituyentes primarios	16
1.3. Transformaciones fuera del equilibrio.....	19
1.3.1. Diagrama de temperatura-tiempo-transformación (TTT).....	20
1.3.2. Diagrama de transformación bajo enfriamiento continuo.....	20
1.3.3. Microconstituyentes fuera del equilibrio	21
1.4. Tratamientos térmicos.....	23
1.5. Templabilidad	24
1.6. Ensayo Jominy.....	24
1.6.1. Descripción	25
1.6.2. Curvas de templabilidad	26
1.6.3. Curvas de enfriamiento.....	28
1.6.4. Tasa de enfriamiento	29
1.6.5. Mecanismos de transferencia de calor en la probeta Jominy	30
1.7. Análisis por elementos finitos (FEA).....	34

CAPITULO 2.....	35
DESARROLLO DEL MODELO DEL ENSAYO JOMINY	35
2.1. Geometría de la probeta Jominy	35
2.2. Condiciones iniciales	36
2.2.1 Temperatura inicial de la probeta Jominy.	36
2.2.2. Parámetros térmicos de la probeta Jominy.....	36
2.3. Condiciones de borde.....	37
2.3.1. Chorro de agua.....	37
2.3.2. Medio ambiente.	37
2.4. Modelo de la probeta Jominy.....	37
2.5. Mallado	39
2.6. Incremento de tiempo	40
CAPITULO 3.....	41
DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	41
3.1. Material de trabajo	41
3.2. Ensayo Jominy.....	42
3.2.1. Equipos utilizados	42
3.2.2. Procedimiento del ensayo.....	42
3.3. Mecanizado de muestras	43
3.3.1. Muestras para el análisis químico.....	43
3.3.2. Muestras para el ensayo de dureza y metalografía	43
3.4. Análisis químico	45
3.4.1. Equipos utilizados	45
3.4.2. Preparación de las muestras.....	45
3.5. Ensayo de dureza	46
3.5.1. Equipos utilizados	46
3.5.2. Preparación de las muestras.....	46
3.5.3. Procedimiento de ensayo.....	47
3.6. Microscopía óptica.....	47
3.6.1. Equipos utilizados	47
3.6.2. Preparación de la muestra	48
3.6.3. Procedimiento	49

CAPITULO 4.....	50
ANALISIS DE RESULTADOS.....	50
4.1. Análisis químico.....	50
4.2. Ensayo de dureza	51
4.2.1. Barrido de durezas preliminar	51
4.2.2. Barrido de durezas para estudio de las velocidades de enfriamiento.....	55
4.3. Determinación de las curvas de enfriamiento durante el ensayo Jominy.....	57
4.3.1. Simulación del ensayo Jominy	57
4.3.2. Validación del modelo del ensayo Jominy	58
4.3.3. Curvas de enfriamiento.....	61
4.4. Velocidades de enfriamiento.....	63
4.5. Análisis de relación de la dureza y tasa de enfriamiento	66
4.6. Análisis de la microestructura	67
4.6.1. Análisis de la microestructura para un calentamiento de 890°C (austenización completa).....	67
4.6.1. Análisis de la microestructura para un calentamiento de 760°C (austenización incompleta)	79
4.6.3. Análisis de la microestructura para una calentamiento de 740°C (austenización incompleta)	91
4.7. Análisis de la correlación microestructura-dureza	106
4.8. Desarrollo de patrón de microestructura y dureza según condiciones de enfriamiento.....	107
CONCLUSIONES	112
BIBLIOGRAFÍA	114

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama de fases de Fe-C en la región correspondiente a los aceros	15
Figura 2. (a) Representación de las morfologías de la fase ferrita [43; 44] y (b) Morfologías de la fase ferrita presentes en una probeta Jominy AISI 1045 calentado a 890°C a 7.5 mm del extremo enfriado	17
Figura 3. (a) Representación del constituyente perlita y (b) Morfologías del constituyente perlita presentes en una probeta Jominy AISI 1045 calentado a 740°C a 9 mm del extremo enfriado	19
Figura 4. Diagrama TTT para un acero con un contenido de 0.5% de carbono.....	20
Figura 5. Diagrama de enfriamiento continuo para el acero AISI 1045.....	21
Figura 6. Microestructura de la bainita de una probeta Jominy AISI 1045 calentado a 890°C para una distancia de 3.5 mm desde el extremo enfriado (a) y calentado a 760 °C para una distancia de 4 mm desde el extremo enfriado (b).....	22
Figura 7. Microestructura de la bainita de una probeta Jominy AISI 1045 calentado a 890°C para una distancia de 2 mm desde el extremo enfriado (a) y calentado a 760 °C para una distancia de 2 mm desde el extremo enfriado (b).....	23
Figura 8. Flujograma de los principales tratamientos térmicos para los aceros.....	24
Figura 9. Geometría de la probeta del ensayo Jominy	25
Figura 10. Representación de la curva de templabilidad de la probeta Jominy.	25
Figura 11. Curva típica de templabilidad	27
Figura 12. Correlación entre la curva de templabilidad y las curvas de enfriamiento continuo.....	27
Figura 13. Etapas de enfriamiento característicos de un temple	29
Figura 14. Esquema de la tasa de enfriamiento máxima para una curva de enfriamiento	30
Figura 15. Mecanismos de transferencia de calor en la probeta Jominy	31
Figura 16. Conductividad de los aceros de bajo-medio carbono.	32
Figura 17. Resultado de la estimación por Function Specification Method (FMS) para Z=1mm	33
Figura 18. Geometría de la probeta Jominy.....	35
Figura 19. Modelo de la probeta del ensayo Jominy para la simulación.....	38
Figura 20. Mallado de la probeta Jominy obtenido por el software Ansys Student 2021 R2	39
Figura 21. Probeta Jominy	41
Figura 22. (a) Pinza de crisol de hierro, (b) Horno de cámara estándar CWF 1300, (c) Equipo de ensayo Jominy.....	42
Figura 23. (a) Indicaciones para el corte de la probeta Jominy, (b) Indicaciones de paralelismo para las caras de la muestra y (c) Muestra para análisis químico	43
Figura 24. (a) Muestra para mediciones de dureza y metalografía, (b) Indicaciones para corte, (c) Indicaciones para refrentado y (d) Indicaciones de paralelismo	44
Figura 25. Espectrómetro de Emisión Óptica BRUKER Q8 Magellan	45

Figura 26. (a) Medidor de Dureza tipo Rockwell LCR-500, (b) Indentadores Rockwell B y C y (c) Base de apoyo de muestras.....	46
Figura 27. Esquema de mediciones de dureza en la muestra	47
Figura 28. Microscopio Óptico LEICA MICROSYSYSTEM - Leica DMI5000	47
Figura 29. Pulidora Struers – LaboPol25	48
Figura 30. Esquema de división de la superficie a analizar en el microscopio óptico...	49
Figura 31. Curvas de templabilidad de las probetas Jominy 1,2 y 3 (T: 890°C).....	52
Figura 32. Variación de la dureza con la distancia al extremo inferior (en contacto directo con el chorro de agua) de las probetas Jominy, correspondiente a las probetas 4 y 5 calentadas a 760°C (austenización incompleta).....	53
Figura 33. Variación de la dureza con la distancia al extremo inferior (en contacto directo con el chorro de agua) de las probetas Jominy, correspondiente a las probetas 6 y 7 calentadas a 740°C (austenización incompleta).....	54
Figura 34. Gráfico de dureza vs distancia al extremo inferior de la probeta Jominy expuesto directamente al chorro de agua durante el ensayo	56
Figura 35. Estado térmico de la condición 1 (890°C) después de 10 segundos (lado derecho) y 120 segundos (lado izquierdo) de enfriamiento	57
Figura 36. Estado térmico de la condición 2 (760°C) después de 10 segundos (lado derecho) y 120 segundos (lado izquierdo) de enfriamiento	57
Figura 37. Estado térmico de la condición 3 (740°C) después de 10 segundos (lado derecho) y 120 segundos (lado izquierdo) de enfriamiento	58
Figura 38. Curvas de enfriamiento experimentales de acuerdo con C. Nunura [20] y curvas obtenidas por simulación empleando una temperatura de austenización de 900°C.....	59
Figura 39. Graficas de error vs tiempo a) Distancia de 1.6mm b) Distancia de 4.8mm, c) Distancia de 12.7mm del extremo templado de la probeta Jominy.....	60
Figura 40. Curvas de enfriamiento para la condición 1 (Tmax=890°C).....	61
Figura 41. Curvas de enfriamiento para la condición 2 (Tmax=760°C).....	62
Figura 42. Curvas de enfriamiento para la condición 3 (Tmax=740°C).....	62
Figura 43. Velocidad de enfriamiento vs distancia al extremo inferior de la probeta Jominy para las condiciones en estudio (890°C, 760°C y 740°C).....	64
Figura 44. (a) Esquema del circuito térmico durante el enfriamiento de la probeta Jominy y (b) Circuito térmico para un instante después del contacto del chorro de agua en el extremo inferior	65
Figura 45. Grafica de dureza vs velocidad de enfriamiento	66
Figura 46. Metalografía correspondiente a la probeta Jominy de la condición 1 (890°C) para las distancias de 2 mm, 3 mm, 3.5mm y 4 mm con respecto su extremo inferior. 70	
Figura 47. Metalografía correspondiente a la probeta Jominy de la condición 1 (890°C) para distancias de 4.5 mm, 5 mm, 6 mm y 7.5 mm con respecto su extremo inferior	¡Error! Marcador no definido.
Figura 48. Metalografía correspondiente a la probeta Jominy de la condición 1 (890°C) para distancias de 8 mm, 10 mm, 14 mm, 16.5 mm, 18 mm, 24 mm, 30 mm, 45 mm y 50 mm con respecto su extremo inferior	77

Figura 49. Diagrama CCT para un acero de medio carbono y las curvas de enfriamiento correspondientes a las distancias de 2 mm, 5mm y 50 mm respecto al extremo enfriado para la condición de austenización completa (890°C).	78
Figura 50. Zona de dominio bifásico de la ferrita y austenita ($\alpha + \gamma$) del diagrama Fe-C y ubicación de la temperatura de calentamiento de la condición 2 (760°C)	79
Figura 51. Metalografía correspondiente a la probeta Jominy de la condición 2 (760°C) para las distancias de 2 mm, 2.5 mm, 3 mm con respecto su extremo inferior	82
Figura 52. Metalografía correspondiente a la probeta Jominy de la condición 2 (760°C) para las distancias de 4 mm, 4.5 mm, 5 mm, 5.5 mm y 6 mm con respecto su extremo inferior	85
Figura 53. Metalografía correspondiente a la probeta Jominy de la condición 2 (760°C) para las distancias de 6.5 mm, 7 mm, 8 mm, 9 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm, 30 mm, 35 mm, 40 mm, 45 mm y 50 mm con respecto su extremo inferior	90
Figura 54. Zona de dominio bifásico de la ferrita y austenita ($\alpha + \gamma$) del diagrama Fe-C y ubicación de la temperatura de calentamiento de la condición 2 (760°C) y 3 (740°C) .	91
Figura 55. Micrografía de la probeta Jominy calentada a 740°C a una distancia de 5 mm con respecto al extremo inferior.....	92
Figura 56. Metalografía correspondiente a la probeta Jominy de la condición 3 (740°C) para distancias de 2 mm, 3 mm, y 4 mm con respecto su extremo inferior	94
Figura 57. Metalografía correspondiente a la probeta Jominy de la condición 3 (740°C) para distancias de 5 mm, 6 mm y 7 mm con respecto su extremo inferior	96
Figura 58. Metalografía correspondiente a la probeta Jominy de la condición 3 (740°C) para distancias de 8 mm y 9 mm con respecto a su extremo inferior.....	98
Figura 59. (a) Transformación eutectoide cooperativo (perlita laminar) y (b) DET (esferoidita).....	99
Figura 60. Morfología de la perlita en función de %C y temperatura de calentamiento	100
Figura 61. Metalografía correspondiente a la probeta Jominy de la condición 3 (740°C) para distancias de 10 mm, 13 mm, 14 mm, 17 mm, 22 mm, 25 mm, 30 mm, 35 mm, 40 mm, 45 mm y 50 mm con respecto su extremo inferior	105
Figura 62. Microscopía de campo (a) [45] y metalografía de campo empleando replicas metalográficas (b) [46]	108
Figura 63. Patrón de microestructuras para tres (3) condiciones de calentamiento (740°C, 760°C, 890°C).....	111

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Composición química del Acero AISI 1045.....	13
Tabla 2. Propiedades mecánicas del acero AISI/SAE 1045 normalizado.....	14
Tabla 3. Propiedades térmicas del acero AISI/SAE 1045	14
Tabla 4. Temperaturas críticas inferior y superior para el acero AISI/SAE 1045 calculadas según las ecuaciones de O. G. Kasatkin [34].....	16
Tabla 5. Temperaturas de normalización y austenización según el tipo de acero.....	26
Tabla 6. Temperatura inicial de cada ensayo	36
Tabla 7. Propiedades térmicas promedio del acero AISI/SAE 1045	36
Tabla 8. Coeficiente de conducción térmica en función de la temperatura.	36
Tabla 9. Condiciones de borde del chorro de agua	37
Tabla 10. Condiciones de borde del medio ambiente	37
Tabla 11. Propiedades del mallado para el modelo del ensayo Jominy	39
Tabla 12. Incremento de tiempo para las etapas de enfriamiento.....	40
Tabla 13. Análisis químico mediante OES del acero con el que se fabricaron las probetas Jominy	50
Tabla 14. Estimación de las temperaturas críticas (A_1 y A_3) para el acero en estudio...	51
Tabla 15. Barrido de durezas para la condición $T=890^{\circ}\text{C}$ (austenización completa)	52
Tabla 16. Barrido de durezas para la condición $T=760^{\circ}\text{C}$ (austenización incompleta) .	53
Tabla 17. Barrido de durezas para la condición $T=740^{\circ}\text{C}$ (austenización incompleta) .	54
Tabla 18. Barrido de durezas para estudio de las velocidades de enfriamiento.	55
Tabla 19. Velocidades de enfriamiento para cada condición estudiada.....	64
Tabla 20. Mediciones de dureza experimentales y sus condiciones de enfriamiento	106

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

Los aceros son el material metálico de mayor importancia en el campo de la ingeniería debido a que ningún otro ofrece una amplia variedad de cambios microestructurales y, por lo tanto, una gran variedad de propiedades mecánicas potenciales como: alta resistencia mecánica, tenacidad y conformabilidad [1]. En consecuencia, el desarrollo de nuevos procedimientos que permitan incrementar la resistencia mecánica de los aceros sin disminuir su tenacidad ha sido fundamental en los diferentes campos de la industria durante los últimos años, como por ejemplo en la industria automotriz, que busca aumentar la resistencia específica de la estructura para mejorar el rendimiento del consumo energético de los vehículos [2]. Es por esta razón que han surgido tratamientos térmicos y termo-mecánicos específicos que combinan los efectos de la temperatura y deformaciones mecánicas en el acero, en rangos de temperaturas poco tradicionales [3]. Concretamente, los aceros de bajo carbono sometidos a temperaturas intercríticas, es decir, en el rango de dominio bifásico donde coexiste ferrita y austenita, y a deformación mecánica como laminación, da origen a los aceros DP (Dual Phase Steel), a los aceros TRIP (Transformation-Induced Plasticity) entre otros, conocidos como aceros AHSS (Advanced High Strength Steels) [4]. El acero sometido a las condiciones anteriormente mencionadas favorece la nucleación y el crecimiento de nuevos granos reduciendo las dislocaciones presentes en la microestructura ablandando el material [5] y, mediante un enfriamiento rápido, transformar la austenita en martensita.

Definición del problema

Sin embargo, cuando los aceros son sometidos a temperaturas elevadas y a diferentes velocidades de enfriamiento en situaciones imprevistas, como la exposición al fuego en instalaciones o equipos, producen una gran variedad de microestructuras que no corresponde a las asociadas con la mayoría de los procesos de fabricación o tratamientos térmicos.

Por lo general estas microestructuras brindan propiedades mecánicas inferiores a las del material en estado de suministro. Por esta razón, cuando se realiza una inspección en campo de un componente o estructura metálica para caracterizar un material in situ, como parte de un análisis de adecuación al servicio (Fitness for Service) mediante ensayos no destructivos [6], la forma de apreciar una posible variación microestructural, como consecuencia de exposición a temperaturas elevadas, es mediante metalografía de campo o por réplicas.

En estas condiciones, el análisis de la microestructura puede contemplar condiciones de calentamiento a temperaturas intercríticas, cuyas microestructuras bajo condiciones fuera de equilibrio no son muy fáciles de diferenciar e identificar. Por otro lado, la correlación entre la dureza y la microestructura producida, en las condiciones anteriormente mencionadas, puede no ser muy específica y generar confusión con otras condiciones microestructurales. En consecuencia, la capacidad de formular conclusiones precisas disminuye, aumentando los riesgos de cometer errores durante la supervisión y el análisis de los resultados de campo.

Propuesta de solución

Por ello, con la finalidad de establecer patrones microestructurales y de dureza en este rango de temperaturas intercrítica, se propone emplear los procedimientos que establece la norma ASTM A 255 para el ensayo Jominy, que se utiliza para estudiar la templabilidad de los aceros, pero modificándolo en las condiciones de temperatura de temple. Las probetas serán sometidas a un rango propuesto de temperaturas y diferentes velocidades de enfriamiento para obtener una variación de microestructuras y propiedades mecánicas a lo largo de la generatriz de la probeta Jominy, a fin de estudiar la correlación entre ellas para el acero AISI/SAE 1045.

Justificación e Impacto

El estudio de la microestructura y su correlación con las propiedades mecánicas ayudarán a comprender mejor los resultados obtenidos en campo, en la interpretación microestructural y de la dureza con la finalidad de consolidar conclusiones para la toma de decisiones importantes en el análisis de la integridad estructural, para la puesta fuera de servicio de un componente, su reparación o la continuidad del mismo.

Alcance

En el presente trabajo se desarrollará un patrón de microestructuras y de durezas correspondiente para condiciones de calentamiento y diferentes velocidades de enfriamiento desde temperaturas en el rango intercrítico del diagrama Fe-C. Inicialmente, se definen los fundamentos teóricos correspondientes de los aceros, principalmente los cambios microestructurales en la zona intercrítica. Posteriormente, se realizará una simulación de la probeta Jominy mediante el método por elementos finitos para obtener curvas de enfriamiento a lo largo de su generatriz y correlacionar las velocidades de enfriamiento con los cambios microestructurales obtenidos y con los valores de dureza medidos. Seguidamente, se detallará el procedimiento experimental de los ensayos a realizar. Finalmente, se analizará los resultados de la composición química, microestructura, dureza y curvas de enfriamiento.

Objetivo general

Caracterizar los cambios microestructurales y dureza al someter el acero AISI/SAE 1045 a temperaturas en el rango intercrítico (740°C, 760°C) y en el rango de austenización completa (890°C) enfriado a diferentes velocidades hasta la temperatura ambiente empleando los lineamientos del ensayo Jominy (ASTM A255).

Objetivos específicos

- Definir los fundamentos teóricos de la microestructura de los aceros de bajo carbono en la zona intercrítica, templabilidad de los aceros, mecanismos de transferencia de calor en el ensayo Jominy y curvas de enfriamiento.
- Establecer la geometría, propiedades térmicas de la probeta Jominy, condiciones de simulación y procedimiento experimental del ensayo Jominy análisis químico, metalografía y ensayo de dureza.
- Estimar las velocidades de enfriamiento de la probeta Jominy mediante la simulación por elementos finitos.
- Analizar la correlación microestructura-dureza para las diferentes condiciones propuestas.
- Desarrollar un patrón de microestructuras y de dureza correspondiente para las condiciones de calentamiento y enfriamiento a diferentes velocidades desde temperaturas en el rango intercrítico (740°C, 760°C) y austenización completa (890°C).

CAPITULO 1.

FUNDAMENTOS TEORICOS

Los aceros son aleaciones de hierro-carbono donde el porcentaje de carbono existente en la aleación se encuentra entre el 0.008% y el 2% [7]. El hierro proporciona ductilidad al material, mientras que el carbono, resistencia y dureza. Además, la concentración de este último elemento en el acero modifica las propiedades mecánicas significativamente en estado de equilibrio y fuera de él [5].

Por esta razón, el acero se clasifica según diferentes criterios, entre ellos, el contenido de carbono. En esta clasificación, se encuentran los aceros hipoeutectoides, eutectoides e hipereutectoides.

1.1. Aceros hipoeutectoides

Los aceros denominados hipoeutectoides contienen un porcentaje en carbono en masa desde 0.002% hasta 0.8% [6]. Para el presente trabajo de tesis, se estudiará el acero AISI/SAE 1045.

1.1.1. Acero AISI/SAE 1045

El acero AISI/SAE 1045 se utiliza en la fabricación de cigüeñales, acoplamientos, pernos, barras de refuerzo de concreto, entre otros. Por esta razón, su adquisición es en forma de barras, perfiles y planchas.

1.1.1.1. Composición química

En la tabla 1 se especifica su composición química.

Tabla 1. Composición química del Acero AISI 1045

Grado	Composición, %			
	C	Mn	P máx.	S máx.
1045	0.43-0.50	0.60-0.90	0.04	0.05

Nota: De "Standard Specification for Seamless Carbon and Alloy Steel Mechanical Tubing" (p. 2), por ASTM Standards, 2023 [8].

1.1.1.2. Propiedades mecánicas

En la tabla 2 se especifica los valores de las propiedades mecánicas del acero AISI/SAE 1045 en estado de normalizado.

Tabla 2. Propiedades mecánicas del acero AISI/SAE 1045 normalizado

Grado	Resistencia a la tracción		Resistencia a la fluencia		Elongación a 50 mm	Dureza Rockwell B
	ksi	MPa	ksi	MPa		
1045	75	515	48	330	15%	80

Nota: De "Standard Specification for Seamless Carbon and Alloy Steel Mechanical Tubing" (p. 12), por ASTM Standards, 2023 [8].

1.1.1.3. Propiedades térmicas

En la tabla 3 se especifica los valores de las propiedades térmicas del acero AISI/SAE 1045 cuando se encuentra a condiciones ambientales.

Tabla 3. Propiedades térmicas del acero AISI/SAE 1045

Propiedad térmica	Símbolo	Valor	Unidad
Coefficiente de dilatación térmica	λ	$1.13 \cdot 10^{-5}$	1/K
Conductividad térmica	k	54	W/(m·K)
Calor Especifico	Cp	465	W/(kg·K)

Nota: De "Analysis of Heat and Mass Transfer" (p. 1), por R. M. Drake, 1972 [9].

1.2. Diagrama de Fe-C

El diagrama hierro-carbono es una representación gráfica de los cambios microestructurales que sufren los aceros al carbono y fundiciones de hierro con la temperatura, en condiciones de equilibrio, es decir, calentamientos y enfriamientos lentos [6]. En la figura 1 se muestra una porción del diagrama Fe-C que corresponde a los aceros, donde el eje de las abscisas representa el porcentaje de carbono existente en la aleación, desde 0% hasta 2%, mientras que el eje de las ordenadas, la temperatura [7]. En base al diagrama, se pueden identificar las diferentes regiones de dominio como la Ferrita, Austenita y la región intercrítica que corresponde a la región bifásica Ferrita + Austenita.

1.2.1. Temperaturas críticas.

Las temperaturas críticas, también denominadas temperaturas de transformación, representan el inicio y el final de la transformación de la austenita generalmente denominadas A_1 y A_3 [11], como se muestra en la figura 1. Para los aceros hipoeutectoides, la temperatura A_1 y A_3 representa la temperatura crítica inferior y la temperatura crítica superior respectivamente [7]. El rango de temperaturas que se encuentran entre A_1 y A_3 son conocidas como temperaturas intercríticas.

En este rango, la microestructura presenta un dominio bifásico compuesto por ferrita y austenita ($\alpha + \gamma$). Para el presente trabajo de tesis, se requiere conocer las temperaturas críticas para el acero AISI/SAE 1045 a fin de definir las temperaturas de calentamiento. O. G. Kasatkin (1984) [34] propone las siguientes expresiones para el cálculo de las temperaturas A_1 y A_3 para aceros de medio carbono:

$$A_1 = 723 - 7.08 \times \text{Mn} + 37.7 \times \text{Si} + 18.1 \times \text{Cr} + 44.2 \times \text{Mo} + 8.95 \times \text{Ni} + 50.1 \times \text{V} + 21.7 \times \text{Al} + 3.18 \times \text{W} + 297 \times \text{S} - 830 \times \text{N} - 11.5 \times \text{C} \times \text{Si} - 14 \times \text{Mn} \times \text{Si} - 3.10 \times \text{Si} \times \text{Cr} - 57.9 \times \text{C} \times \text{Mo} - 15.5 \times \text{Mn} \times \text{Mo} - 5.28 \times \text{C} \times \text{Ni} - 6 \times \text{Mn} \times \text{Ni} + 6.77 \times \text{Si} \times \text{Ni} - 0.80 \times \text{Cr} \times \text{Ni} - 27.4 \times \text{V} + 30.8 \times \text{Mo} \times \text{V} - 0.84 \times \text{Cr}^2 - 3.46 \times \text{Mo}^2 - 0.46 \times \text{Ni}^2 - 28 \times \text{V}^2 \quad (1)$$

$$A_3 = 912 - 370 \times \text{C} - 27.4 \times \text{Mn} + 27.3 \times \text{Si} - 6.35 \times \text{Cr} - 32.7 \times \text{Ni} + 95.2 \times \text{V} + 190 \times \text{T} + 72 \times \text{Al} + 64.5 \times \text{Nb} + 5.57 \times \text{W} + 332 \times \text{S} + 276 \times \text{P} + 486 \times \text{N} - 900 \times \text{B} + 16.2 \times \text{C} \times \text{Mn} + 32.3 \times \text{C} \times \text{Si} + 15.4 \times \text{C} \times \text{Cr} + 48 \times \text{C} \times \text{Ni} + 4.32 \times \text{Si} \times \text{Cr} - 17.3 \times \text{Si} \times \text{Mo} - 18.6 \times \text{Si} \times \text{Ni} + 4.8 \times \text{Mn} \times \text{Ni} + 40.5 \times \text{Mo} \times \text{V} + 174 \times \text{C}^2 + 2.46 \times \text{Mn}^2 - 6.86 \times \text{Si}^2 + 0.322 \times \text{Cr}^2 + 9.90 \times \text{Mo}^2 + 1.24 \times \text{Ni}^2 - 60.2 \times \text{V}^2 \quad (2)$$

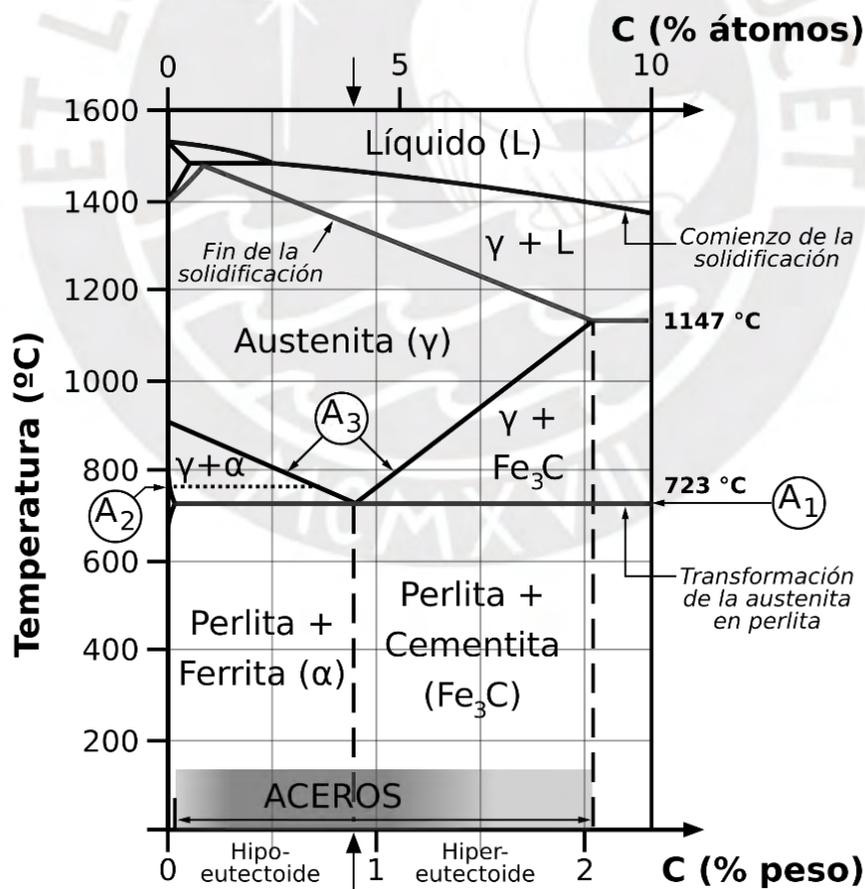


Figura 1. Diagrama de fases de Fe-C en la región correspondiente a los aceros
 Nota: Adaptado de "Aceros y fundiciones: Estructuras, transformaciones, tratamientos térmicos y aplicaciones" (p. 10), por F. J. Belzunce, 2001 [11].

En la tabla 4 se muestra los valores para A_1 y A_3 .

Tabla 4. Temperaturas críticas inferior y superior para el acero AISI/SAE 1045 calculadas según las ecuaciones de O. G. Kasatkin [34]

Temperatura	Símbolo	Valor	Unidad
Temperatura crítica superior	A_3	788	°C
Temperatura crítica inferior	A_1	727	°C

De acuerdo con la tabla 4, se propone para propósitos del presente trabajo de tesis, las siguientes temperaturas de calentamiento: dos (2) temperaturas en el rango intercrítico (740°C, 760°C) y una (1) temperatura en el rango de austenización completa (890°C).

1.2.2. Microconstituyentes primarios

Las principales fases en estado de equilibrio de los aceros al carbono son: ferrita (α), austenita (γ), cementita y el microconstituyente perlita [10].

a) Ferrita

Es una solución sólida compuesta por una red cristalina cubica centrada en el cuerpo con un pequeño porcentaje de carbono (0.008% máx.) disuelto en ella [13].

La ferrita posee la estructura más dúcil en el diagrama Fe-C y es ferromagnético. En promedio, posee las siguientes propiedades mecánicas: resistencia a la tracción de 28 kg/mm² (280MPa), elongación del 50% y dureza de 90 Brinell.

Para los aceros que contienen menor a 0.6% de carbono forman una red o malla que limita los granos de perlita [7]. Según el proceso de enfriamiento, la ferrita se forma de manera difusional o sin difusión [33] y sus morfologías se muestran en la figura 2.

Por un lado, los procesos de difusión permiten la movilidad atómica debido a que la velocidad de enfriamiento es suficientemente lenta, por ello, permite la formación de las siguientes fases:

- **Ferrita alotriomórfica:** se caracteriza de manera óptica por su superficie externa no regular y sin simetría, sin embargo, su fase es ordenada y cristalina en su interior. Esta fase se forma en los límites de grano de la austenita debido a que es una zona de nucleación bidimensional heterogénea [33]. Asimismo, se forma a altas temperaturas, y si está acompañado por una velocidad de enfriamiento mayor, formará en su periferia ferrita Widmanstätten secundaria [35].

- **Ferrita idiomórfica:** se caracteriza de manera óptica por su forma cristalina, es decir, una morfología equiaxial. Esta fase tiende a formarse de manera intragranular, preferiblemente en zonas con inclusiones o heterogeneas [33]. Además, a diferencia de la ferrita alotriomórfica, su formación es debido a una menor velocidad de enfriamiento [35].

Por otro lado, los procesos sin difusión no permiten la movilidad atómica debido a altas velocidades de enfriamiento, en consecuencia, incrementa la fuerza motora que genera un mecanismo de corte o displacivo [33]. Permite la formación de la siguiente fase:

- **Ferrita Widmanstätten:** se caracteriza de manera óptica por su forma acircular y puntas en su periferia. Esta fase se forma debido a velocidades de enfriamiento altas, sin embargo, produce una fuerza motora menor el cual es suficiente para permitir la difusión de carbono en un menor grado que un proceso con difusión durante su nucleación [36]. Existen 2 tipos de ferrita Widmanstätten las cuales son: Ferrita Widmanstätten primaria (formación en los límites de grano) y Ferrita Widmanstätten secundaria (formación en la periferia de ferrita alotriomórfica).

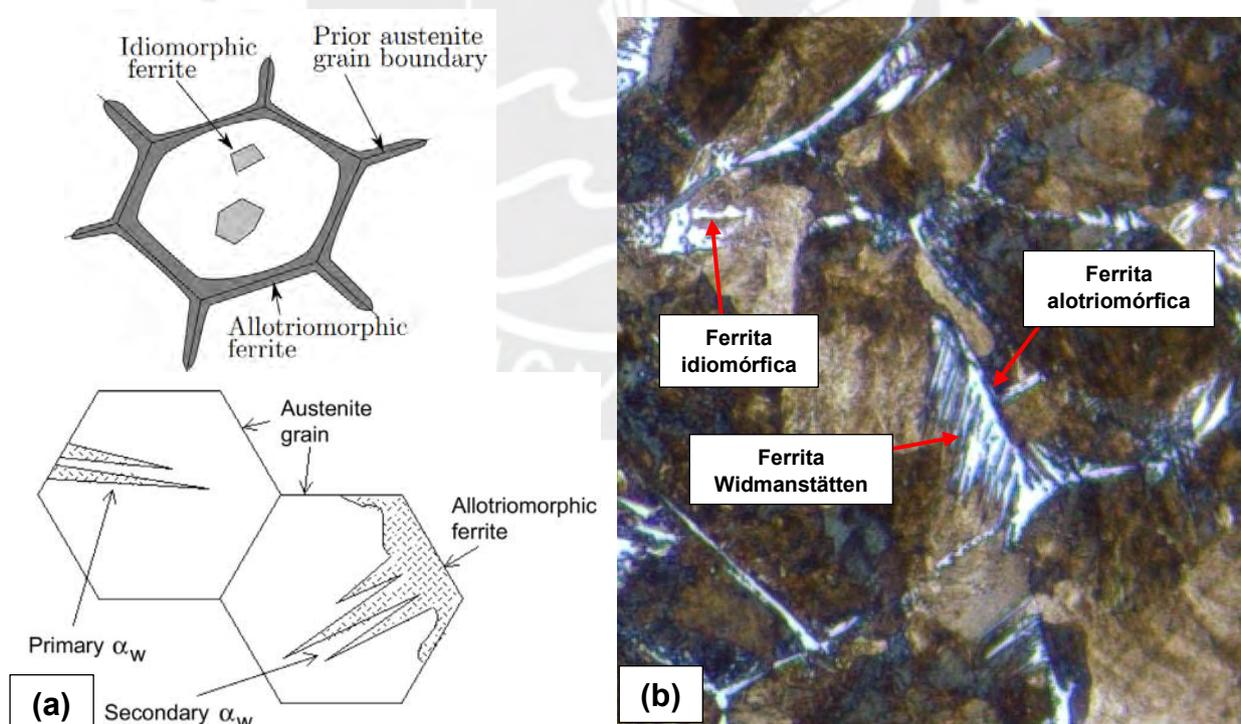


Figura 2. (a) Representación de las morfologías de la fase ferrita [43; 44] y (b) Morfologías de la fase ferrita presentes en una probeta Jominy AISI 1045 calentado a 890°C a 7.5 mm del extremo enfriado

b) Austenita

Es una solución sólida compuesta por una red cristalina cúbica centrada en las caras que permite contener una mayor cantidad de carbono que la ferrita, hasta un 2.06% a una temperatura de 1130 °C en el diagrama Fe-C[13]. La austenita posee la fase más densa del Diagrama Fe-C y no es ferromagnética. Para mantener dicha fase a temperatura ambiente, se requiere que se cumpla, por lo menos, 1 de las siguientes condiciones: alto contenido de carbono (y enfriamientos rápidos) o elementos gammágenos como el níquel, manganeso, cobalto, entre otros, en aceros aleados.

De acuerdo al contenido de carbono, la austenita posee las siguientes propiedades mecánicas a temperatura ambiente: resistencia a la tracción entre 88 kg/mm² y 105 kg/mm² (880 - 1050 MPa), elongación del 30% al 60% y dureza de 300 Brinell [14].

c) Cementita

La cementita es un compuesto de Fe₃C con un contenido de 6.67% de carbono y 93.33% de hierro en masa. Es la fase más dura presente en el Diagrama Fe-C con una dureza que supera los 68 HRC (Rockwell C) o los 700 de dureza Brinell, en consecuencia, es un microconstituyente muy frágil [7].

d) Perlita

La perlita es un microconstituyente formado por dos fases alternantes de ferrita (α) y cementita (Fe₃C) donde su proporción en peso son 88% y 12% respectivamente. En promedio, posee las siguientes propiedades mecánicas: resistencia a la tracción de 80 kg/mm² (800MPa), elongación del 15% y dureza de 250 Brinell [14]. La formación de perlita requiere un enfriamiento lento de la austenita o una transformación isotérmica de la austenita en el rango de temperaturas entre 650°C y 723°C [15]. De igual manera que la ferrita, de acuerdo con el proceso térmico sometido, la perlita puede presentar diferentes morfologías, como la perlita fina, perlita gruesa y perlita globular [37] y se muestra en la figura 3.

- **Perlita fina:** se forma a partir de velocidades de enfriamientos cercanas e inferiores a la velocidad crítica de temple. Está constituida por laminas muy finas de ferrita y cementita por lo cual no es posible diferenciarlos mediante el uso de microscopía óptica. Por esta razón, se observa como un grano oscuro [38]. Asimismo, la coloración oscura es debido a la alta presencia de límites de grano en el interior del grano de la perlita fina [37].

- **Perlita gruesa:** se forma a partir de enfriamientos más lentos. De igual manera, está compuesta por láminas de ferrita y cementita, pero con mayores espaciados interlaminares [37]. Por esta razón, la perlita gruesa es más dúctil debido a que hay menor restricción a la deformación plástica.
- **Perlita globular:** se forma cuando el material se calienta a temperaturas cercanas a la temperatura crítica inferior A_1 y se mantiene un tiempo prolongado, entre 15 a 24 horas [39]. Este tratamiento permite la formación de cementita en forma de glóbulos el cual vuelve más dúctil y tenaz al material [37].

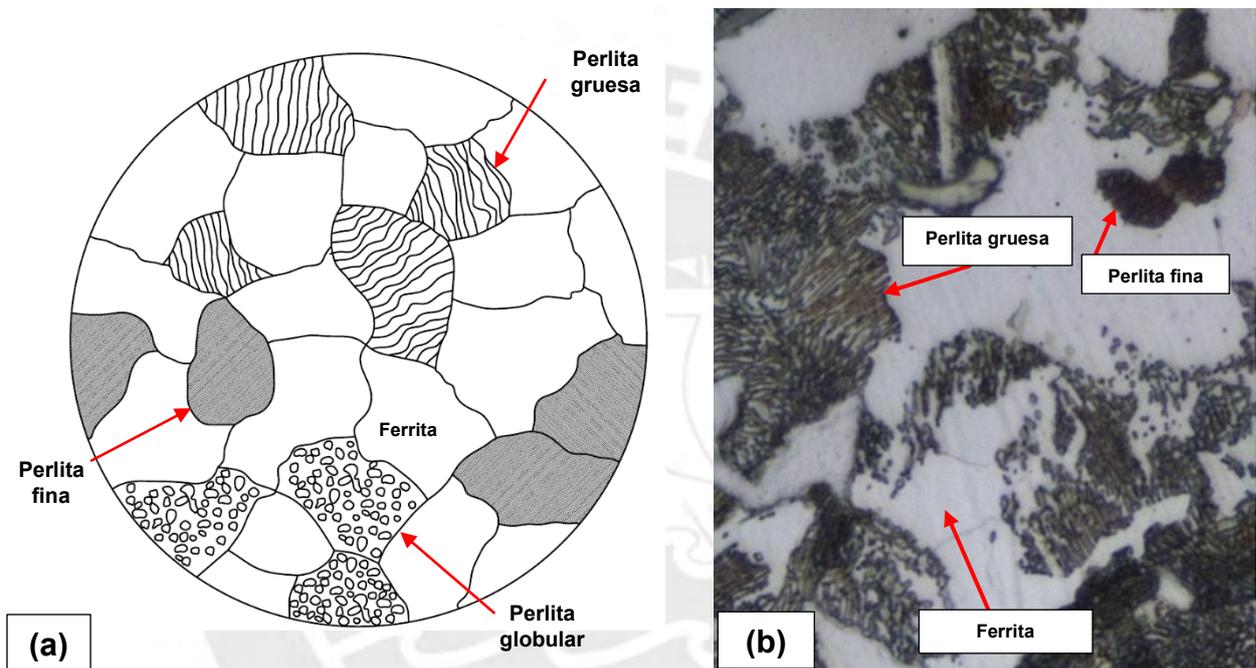


Figura 3. (a) Representación del constituyente perlita y (b) Morfologías del constituyente perlita presentes en una probeta Jominy AISI 1045 calentado a 740°C a 9 mm del extremo enfriado

1.3. Transformaciones fuera del equilibrio

Los aceros sometidos a enfriamientos y calentamientos suficientemente lentos, ocurren las transformaciones en equilibrio siguiendo las fases del diagrama Fe-C [16]. Sin embargo, este proceso no es recurrente en los procesos de fabricación debido a que el material se somete a enfriamientos rápidos o se mantienen a una temperatura durante un periodo de tiempo, por lo que no se produce una transformación de equilibrio. En consecuencia, aparecen nuevos microconstituyentes, en particular, la Martensita y la Bainita [17].

Además, para estudiar las fases anteriormente mencionadas se utilizan los diagramas temperatura-tiempo-transformación y diagramas de transformación bajo enfriamiento continuo.

1.3.1. Diagrama de temperatura-tiempo-transformación (TTT)

Los diagramas de temperatura-tiempo-transformación o diagramas de transformación isotérmica representan las posibles transformaciones de la austenita para cada acero para una determinada temperatura en función del tiempo. De esta manera, es posible conocer los microconstituyentes de un acero cuando es sometido a enfriamientos y mantenimientos a temperatura constantes [18]. A partir de la figura 4, se muestra que, para velocidades de enfriamiento muy lentas, se obtienen microconstituyentes perlíticos, para velocidades mayores se obtienen microconstituyentes bainíticos y para enfriamientos muy rápidos que no llegan a intersecar la curva TTT o curva S, se obtendrán estructuras martensíticas [18].

1.3.2. Diagrama de transformación bajo enfriamiento continuo.

Los diagramas de transformación bajo enfriamiento continuo permiten representar los cambios microestructurales de los aceros cuando son sometidos a un enfriamiento continuo, es decir, a una velocidad de enfriamiento constante. De esta manera, es posible conocer los microconstituyentes que se puede obtener después de someter un acero a diferentes procesos, como los tratamientos térmicos. En la figura 5 se muestra un ejemplo para el acero AISI 1045.

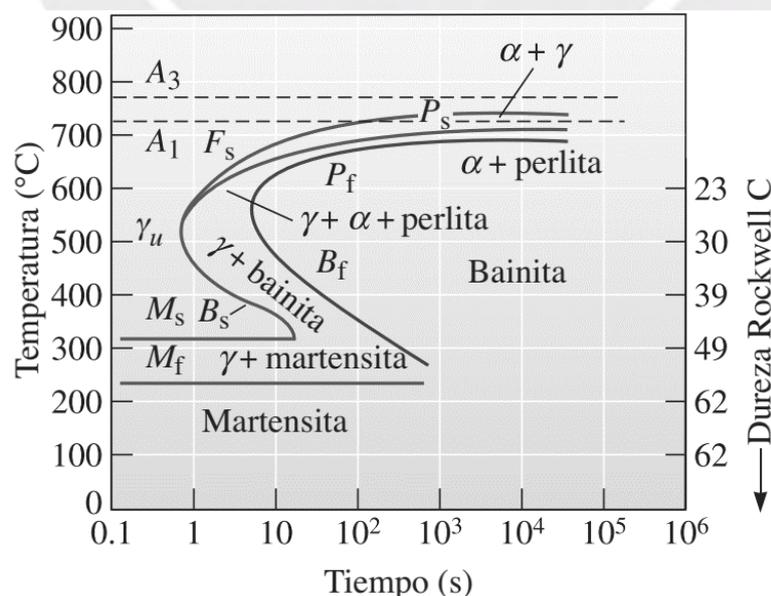


Figura 4. Diagrama TTT para un acero con un contenido de 0.5% de carbono.

Nota: De "Ciencia e Ingeniería de Materiales" (p. 469), por D. Askeland, 2018 [13].

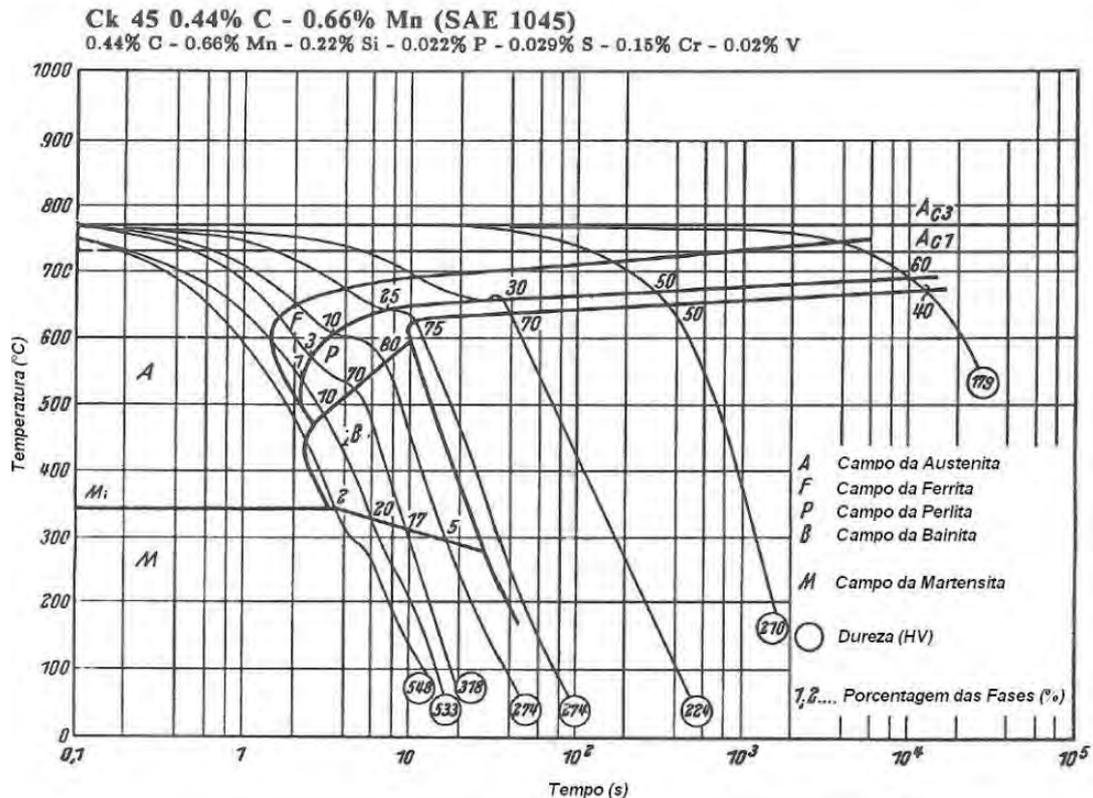


Figura 5. Diagrama de enfriamiento continuo para el acero AISI 1045

Nota: De "Aceros y fundiciones: Estructuras, transformaciones, tratamientos térmicos y aplicaciones" (p. 469), por F. Belzunce, 2001 [11].

1.3.3. Microconstituyentes fuera del equilibrio

Los principales microconstituyentes fuera del equilibrio son los siguientes:

a) Bainita

La bainita (figura 6) está formada por agujas de ferrita paralelas entre sí y cristales de cementita Fe_3C [11,21]. Entre sus propiedades mecánicas se encuentran: elevada dureza y tenacidad y baja resistencia a la fatiga. Este microconstituyente se obtiene a partir de un enfriamiento rápido desde el campo de austenización completa, hasta llegar a temperaturas comprendidas entre 200°C hasta 600°C para mantenerlas por un determinado tiempo. De acuerdo con la temperatura que se mantenga el material, se distingue 2 tipos de bainita [17]:

- **Bainita superior:** La temperatura se mantiene entre 400°C y 550°C y posee una dureza aproximada de 45 HRC [17].
- **Bainita inferior:** La temperatura se mantiene entre los 250°C y 400°C y posee durezas más altas, aproximadamente 55 HRC [17].

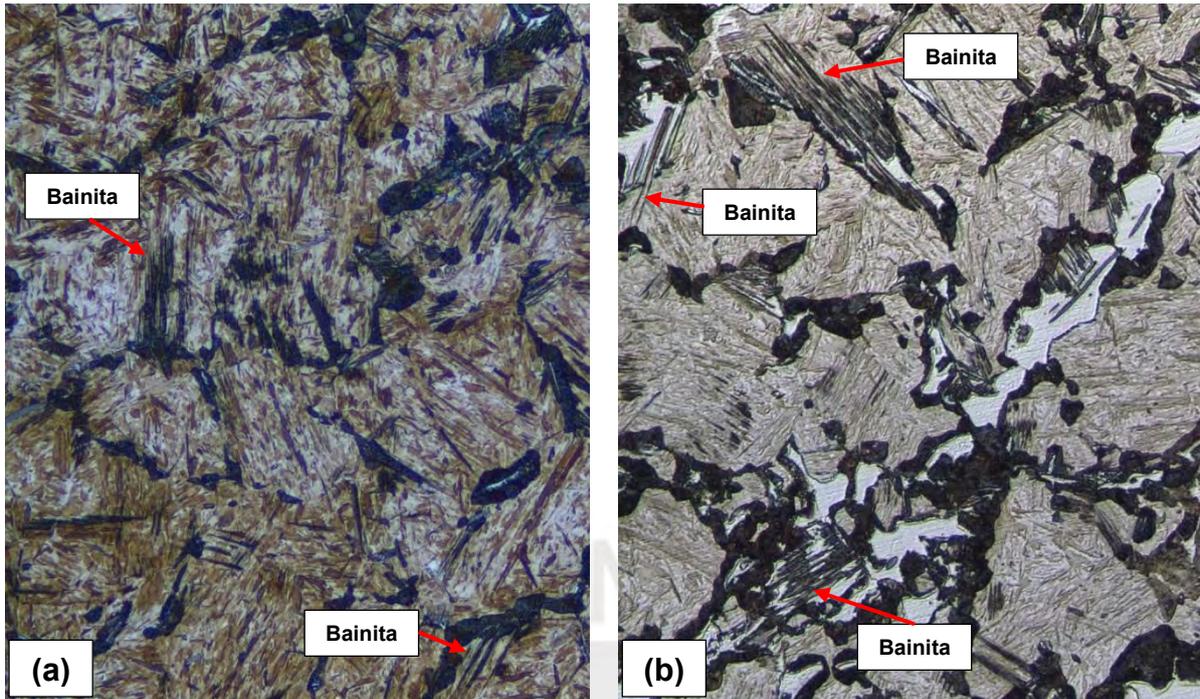


Figura 6. Microestructura de la bainita de una probeta Jominy AISI 1045 calentado a 890°C para una distancia de 3.5 mm desde el extremo enfriado (a) y calentado a 760 °C para una distancia de 4 mm desde el extremo enfriado (b)

b) Martensita

Es una solución sólida compuesta por una red tetragonal centrada en el cuerpo sobresaturada de carbono [11]. De acuerdo con el contenido de carbono, posee las siguientes propiedades mecánicas [19]:

- Resistencia a la tensión: [170, 250] kg/mm² o [1700, 2500] MPa
- Elongación: [0.5, 2.5] %
- Dureza: [58, 68] HRC

Por esta razón, brinda a los materiales las siguientes características: alta resistencia al desgaste por rozamiento, elevada fragilidad y alta resistencia [17].

Este microconstituyente (figura 7) se obtiene a partir de velocidades de enfriamientos mayores a la velocidad crítica de temple (curva de enfriamiento tangente a curva TTT perlítica) desde el campo de austenización completa [11].

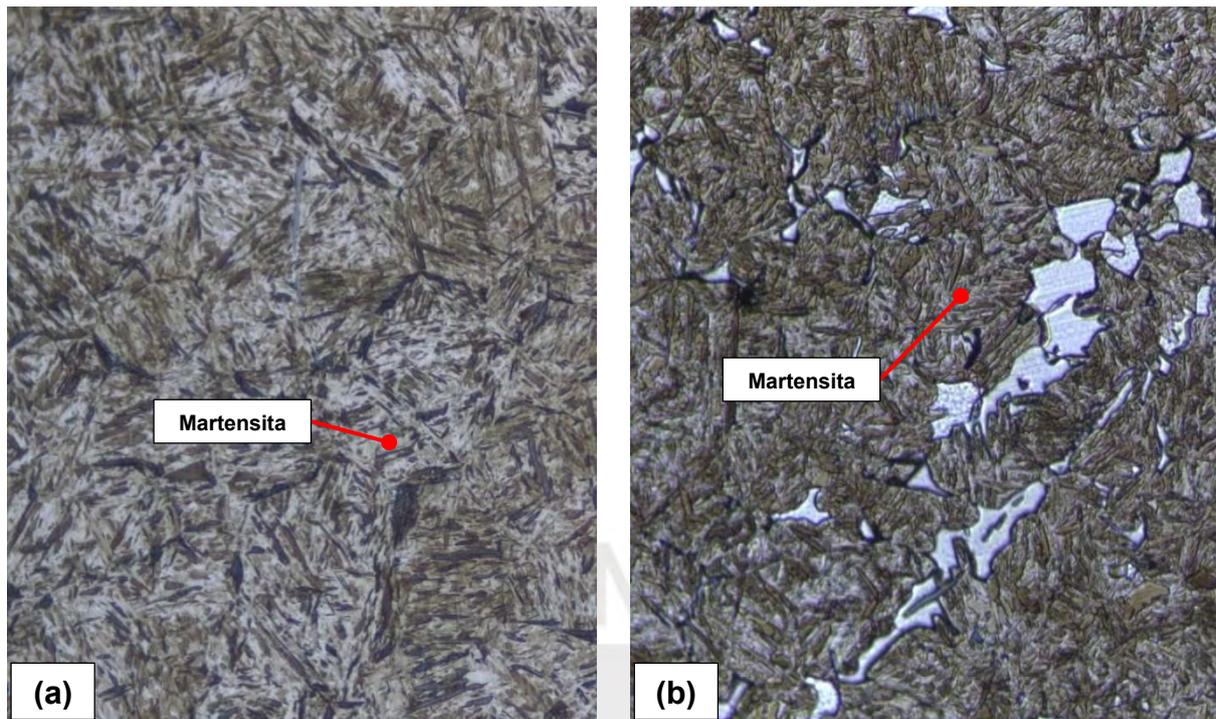


Figura 7. Microestructura de la martensita de una probeta Jominy AISI 1045 calentado a 890°C para una distancia de 2 mm desde el extremo enfriado (a) y calentado a 760°C para una distancia de 2 mm desde el extremo enfriado (b)

1.4. Tratamientos térmicos

Las propiedades mecánicas de los aceros están definidas por la composición química y la forma, tamaño y distribución de los microconstituyentes.

En consecuencia, para modificar las propiedades mecánicas es necesario modificar los aspectos anteriormente mencionados, para ello, se utilizan los tratamientos térmicos [19].

Los tratamientos térmicos son un conjunto de procedimientos donde el metal sólido o aleación se somete a calentamientos y enfriamientos para obtener determinadas propiedades. Los principales objetivos de los tratamientos térmicos que se aplican en los aceros son los siguientes [20]:

- Eliminar tensiones residuales presentes en la microestructura,
- Mejorar la maquinabilidad
- Mejorar la resistencia al desgaste y al impacto
- Mejorar la tenacidad, la resistencia y la ductilidad

En la figura 8 se muestra los principales tratamientos térmicos aplicados a los aceros:

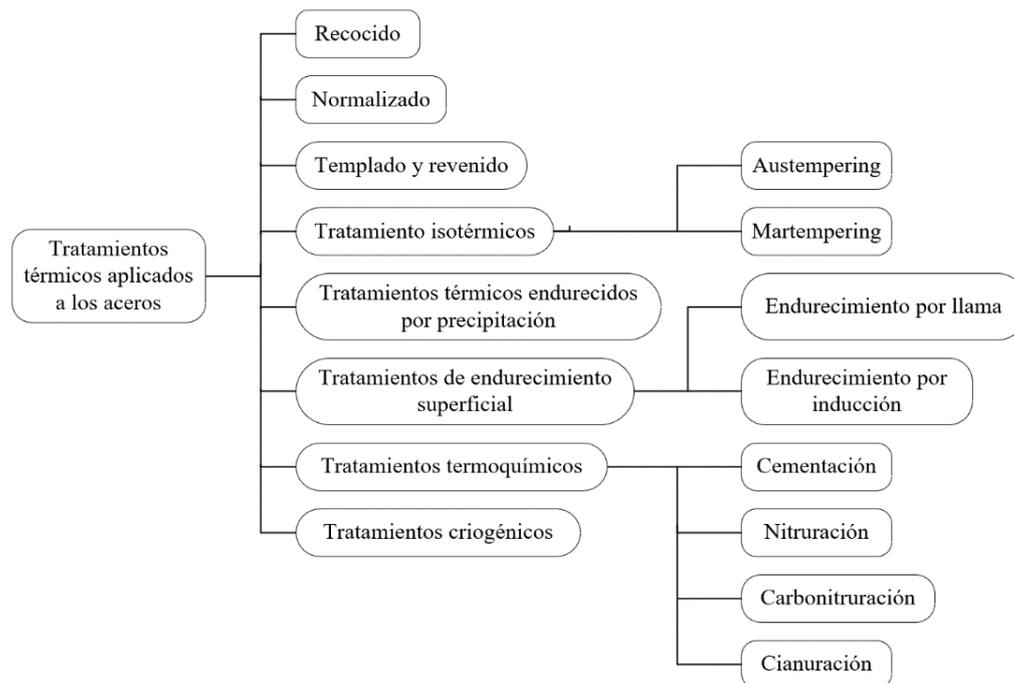


Figura 8. Flujograma de los principales tratamientos térmicos para los aceros

Nota: De "Correlação numérica e experimental da microestrutura, taxa de resfriamento e características mecânicas do aço ABNT 1045" (p. 25), por C. Nunura, 2009 [20]

1.5. Templabilidad

La templabilidad se define como la capacidad de los aceros de endurecer a profundidad por medio del tratamiento térmico de temple y depende de las velocidades de enfriamiento. Durante el templado, la superficie exterior presenta la mayor velocidad de enfriamiento y disminuye conforme se acerca al centro de la pieza metálica [21]. Una vez haya disminuido lo suficiente hasta alcanzar la velocidad crítica de temple, ya no permite la formación de martensita en la microestructura. Por esta razón, la dureza disminuye progresivamente. Los elementos aleantes, como el Níquel, permite desplazar la curva TTT hacia la derecha permitiendo la formación de martensita a menores velocidades de enfriamiento [13].

1.6. Ensayo Jominy

El ensayo Jominy es un método que se ha adoptado de manera casi universal para evaluar la templabilidad en los aceros, debido a que se somete una probeta a un amplio rango de velocidades de enfriamiento. Fue estandarizado por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales con el nombre de ASTM A255-20a [21].

1.6.1. Descripción

De acuerdo con la norma ASTM A255-20a [22], el procedimiento consiste en preparar probetas cilíndricas de diámetro de 1 pulgada (25.4 mm) y una generatriz de 4 pulgadas (101.6 mm) con una pestaña de 1/6 de pulgada (3.2 mm) como se muestra en la figura 9. Luego, calentar en un horno hasta cierta temperatura de acuerdo con el tipo de acero, como se muestra en la tabla 5. Inmediatamente después de transcurrir 10 minutos, enfriar un extremo de la probeta mediante un chorro de agua ubicado a 0.5 pulgadas (12.7 mm) del extremo de la probeta. Finalmente, realizar las mediciones de dureza Rockwell C a lo largo de la generatriz. para graficar la curva de templabilidad como se muestra en la figura 10.

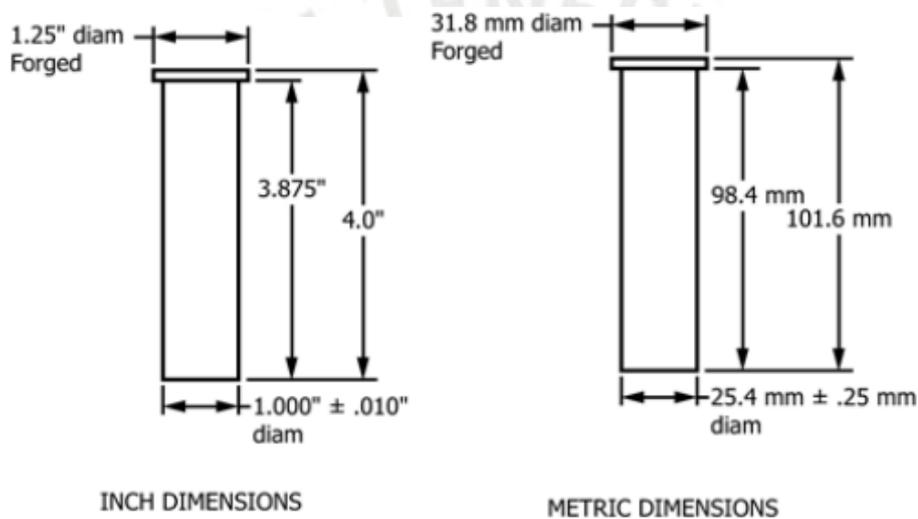


Figura 9. Geometría de la probeta del ensayo Jominy

Nota: De "Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel" (p. 2), por ASTM Standards, 2020 [22]

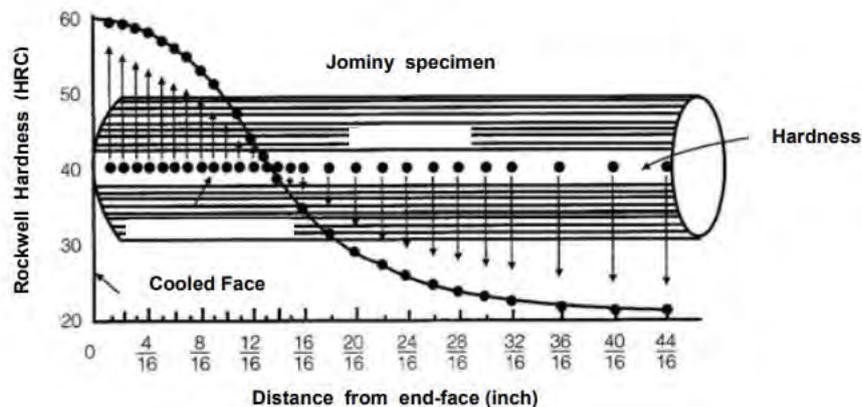


Figura 10. Representación de la curva de templabilidad de la probeta Jominy.

Nota: De "Heat Transfer Numerical Modeling During Jominy End-quench Test of The SAE 1045" (p. 2), por A. Geroldo 2008 [23]

Tabla 5. Temperaturas de normalización y austenización según el tipo de acero

Steel Series	Ordered Carbon Content, max, %	Normalizing Temperature, °F (°C)	Austenitizing Temperature, °F (°C)
1000, 1300, 1500, 3100, 4000, 4100	0.25 and under	1700 (925)	1700 (925)
4300, 4400, 4500, 4600, 4700, 5000, 5100, 6100, ^B 8100, 8600, 8700, 8800, 9400, 9700, 9800	0.26 to 0.36, incl	1650 (900)	1600 (870)
	0.37 and over	1600 (870)	1550 (845)
2300, 2500, 3300, 4800, 9300	0.25 and under	1700 (925)	1550 (845)
	0.26 to 0.36, incl	1650 (900)	1500 (815)
	0.37 and over	1600 (870)	1475 (800)
9200	0.50 and over	1650 (900)	1600 (870)

^A A variation of ± 10 °F (6 °C) from the temperatures in this table is permissible.

^B Normalizing and austenitizing temperatures are 50 °F (30 °C) higher for the 6100 series.

Nota: De "Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel" (p. 2), por ASTM Standards, 2020 [22]

Además, a través de termocuplas colocadas en la probeta Jominy, es posible registrar los cambios de temperatura a fin de graficar las curvas de enfriamiento a determinadas distancias medidas desde el extremo enfriado de la probeta.

1.6.2. Curvas de templabilidad

La curva de templabilidad determinada por el ensayo Jominy se obtiene a partir de las mediciones de dureza Rockwell para cada distancia medida desde el extremo enfriado de la probeta y se representa en una gráfica similar como se muestra en la figura 11. A partir de la curva de templabilidad y con apoyo de las curvas CCT, es posible trazar correlaciones con la formación de los microconstituyentes en la microestructura, como se muestra en la figura 12. Por un lado, la máxima dureza se encuentra en el extremo enfriado debido a la presencia de altas velocidades de enfriamiento y, para la mayoría de los aceros, el principal microconstituyente es la martensita [21]. Por otro lado, la dureza disminuye conforme la distancia a la base es mayor, debido a que las velocidades de enfriamiento son cada vez menores favoreciendo la formación de nuevos microconstituyentes como la bainita y perlita.

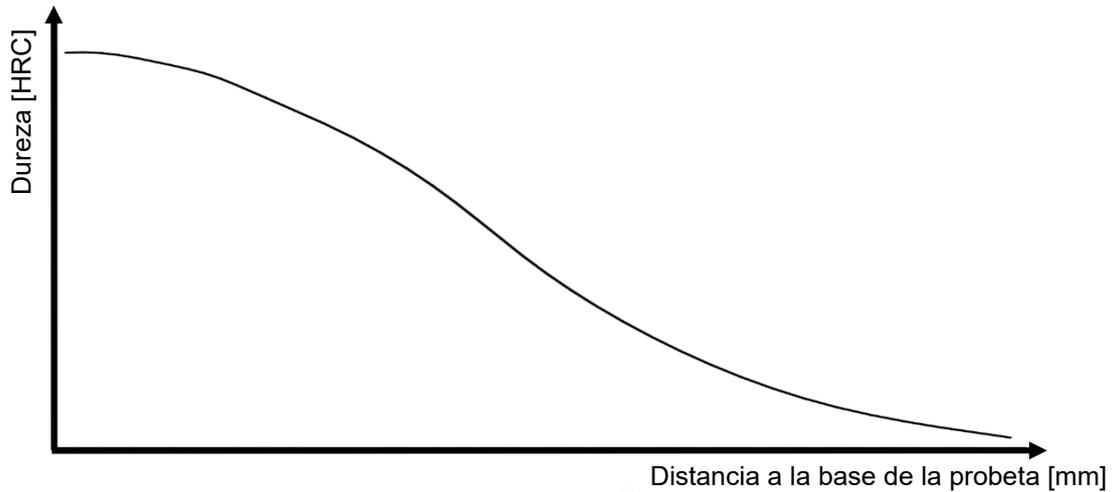


Figura 11. Curva típica de templabilidad

Nota: De "Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales" (p.342), por W. Callister, 2018 [25]

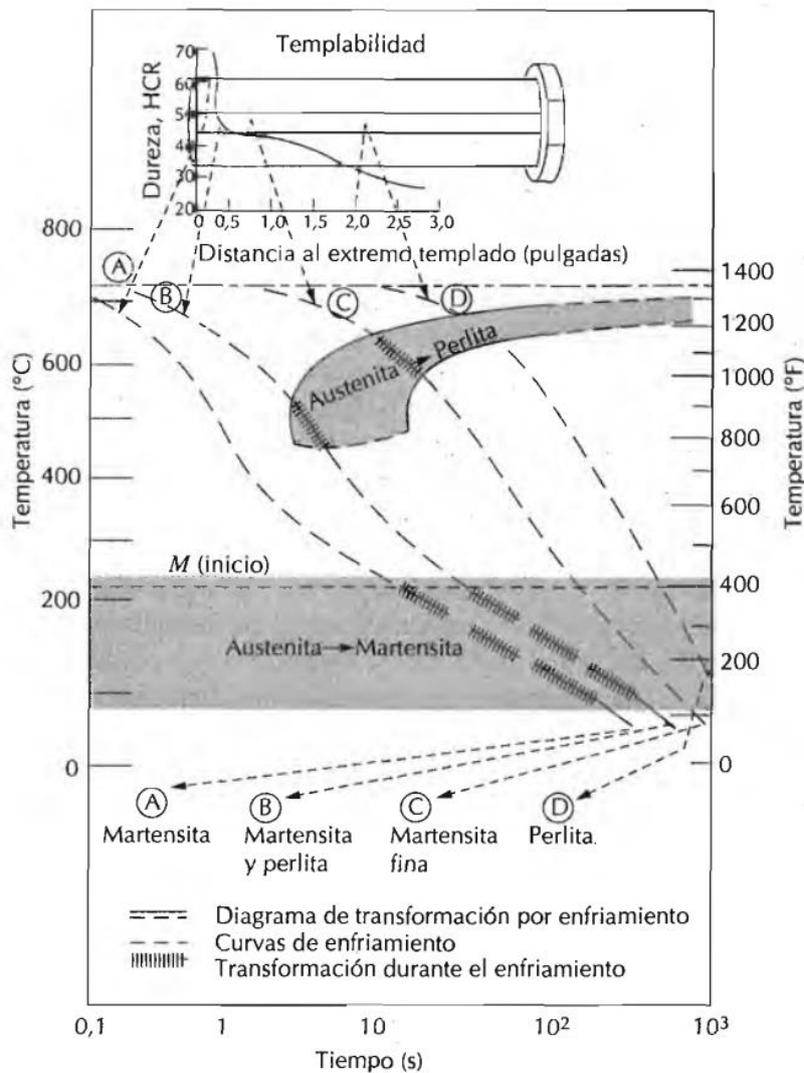


Figura 12. Correlación entre la curva de templabilidad y las curvas de enfriamiento continuo

Nota: De "Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales" (p.343), por W. Callister, 2018 [25]

1.6.3. Curvas de enfriamiento

Una curva de enfriamiento muestra la variación de la temperatura de un material a través del tiempo [13]. Por esta razón, permite diferenciar las etapas y mecanismos de transferencia de calor presentes en la probeta Jominy durante el templado, como se muestra en la figura 13.

De acuerdo con Valencia Girando (2009) [24], las etapas de enfriamiento son las siguientes:

a) Etapa A'

Durante esta etapa, se generan las primeras burbujas de vapor debido al contacto directo con el medio líquido. La duración es muy corta, alrededor de 0.1s y el mecanismo de transferencia de calor es por convección.

b) Etapa A

Durante esta etapa, se forma una capa de vapor continua debido a que el calor suministrado por la superficie caliente por unidad de área, excede la cantidad necesaria para la formación de vapor. Este gas envuelve a la superficie actuando como un aislante, generando velocidades de enfriamiento lentas que puedan favorecer a la formación de microconstituyentes blandos. Debido a que la superficie aún se encuentra a altas temperaturas, la transferencia de calor se da en mayor grado por radiación.

c) Etapa B

Durante esta etapa, la película de vapor es disuelta debido al contacto con el líquido permitiendo que el calor se remueva por ebullición. Por esta razón, produce velocidades de enfriamiento altas y la transferencia de calor se da por convección forzada, convección natural y conducción.

d) Etapa C

Durante esta etapa, el enfriamiento ocurre a menores temperaturas que la temperatura de ebullición, por ello, las velocidades de enfriamiento son más lentas. Los mecanismos de transferencia de calor presentes son la convección y conducción.

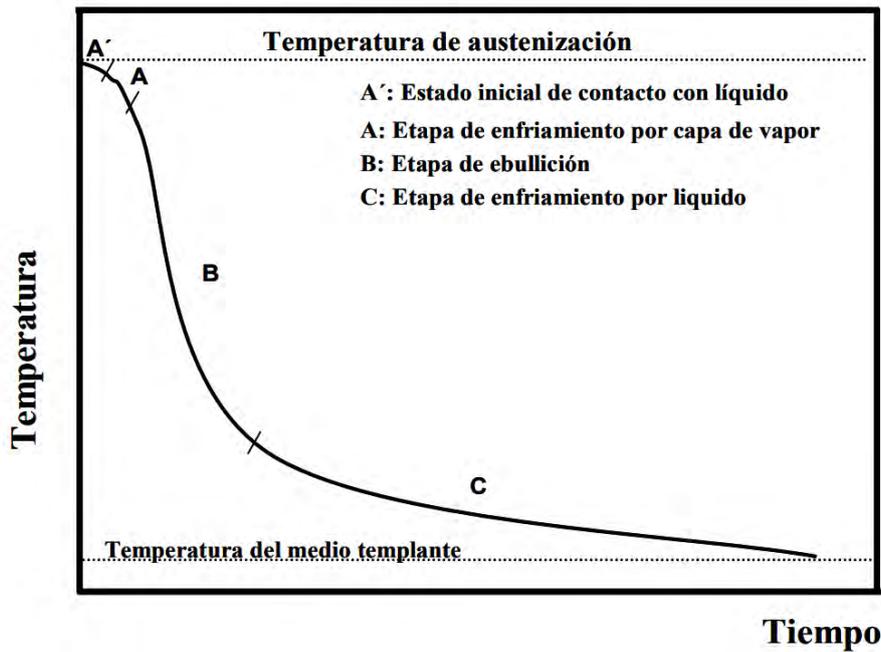


Figura 13. Etapas de enfriamiento característicos de un temple

Nota: De "Thermal simulation in Cosmosworks of Steel put under test of hardenability Jominy (p.2), por C. Nunura, 2007 [1]

1.6.4. Tasa de enfriamiento

La tasa de enfriamiento permite conocer la velocidad de enfriamiento de un material. Cesar Nunura (2009) [20] establece una propuesta para estimar la tasa de enfriamiento máxima para un punto medido desde el extremo enfriado de la probeta del ensayo Jominy a través de la siguiente ecuación:

$$\dot{T} = \frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{T_a - T_{MI}}{\Delta t} \quad (3)$$

Donde:

- T_a : Temperatura de austenización
- T_{MI} : Temperatura de inicio de la transformación martensítica
- Δt : Intervalo de tiempo desde T_a a T_{MI}

En el presente trabajo de tesis, dos temperaturas de calentamiento pertenecen al rango intercrítico, por esta razón, se reemplazará T_a por la temperatura de calentamiento. Asimismo, ASM HANDBOOK (2020) [32], establece el cálculo de T_{MI} mediante la siguiente expresión:

$$T_{MI} = 512 - 453 \times C - 16.9 \times Ni + 15 \times Cr - 9.5 \times Mo + 217 \times C^2 - 71.5 \times C \times Mn - 67 \times C \times Cr \quad (4)$$

Por lo tanto, de acuerdo con la tabla 1, se obtiene: $T_{MI} \cong 345 \text{ }^\circ\text{C}$

En la figura 14 muestra una curva de enfriamiento y la tasa de enfriamiento máxima.

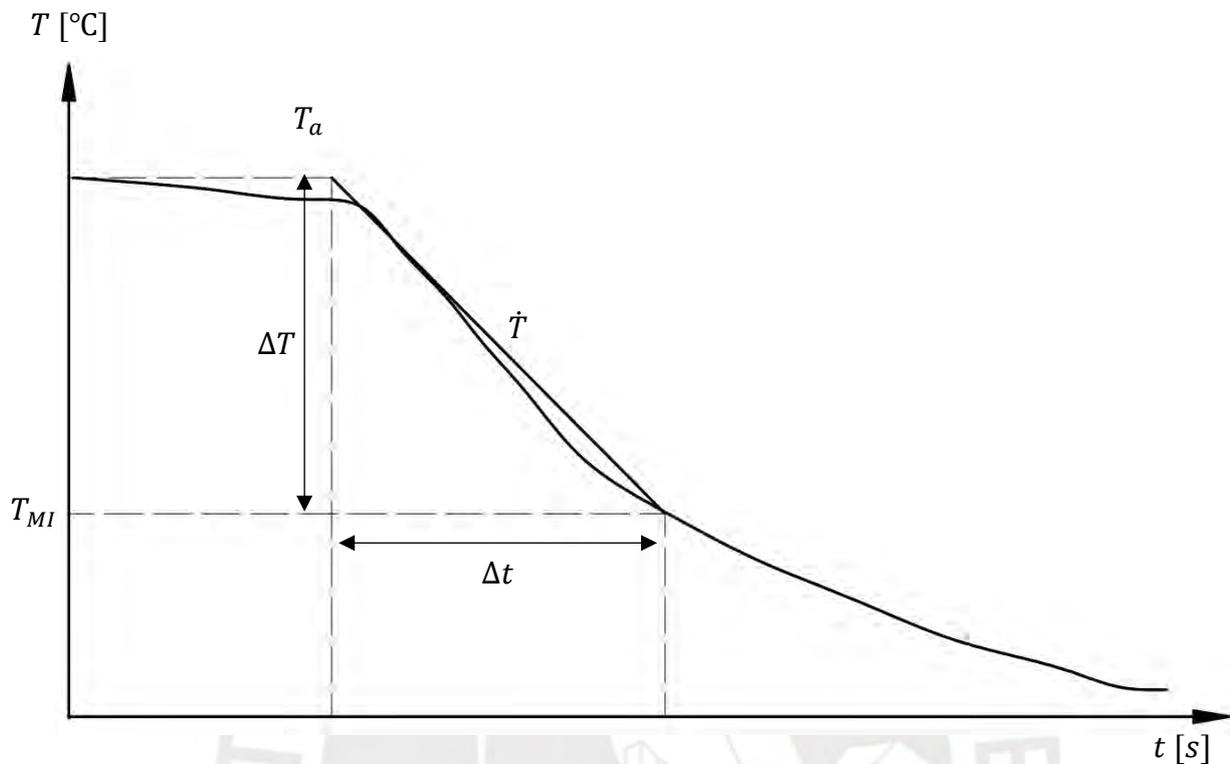


Figura 14. Esquema de la tasa de enfriamiento máxima para una curva de enfriamiento

Nota: De "Correlação numérica e experimental da microestrutura, taxa de resfriamento e características mecânicas do aço ABNT 1045" (p. 76), por C. Nunura, 2009 [20]

1.6.5. Mecanismos de transferencia de calor en la probeta Jominy

De acuerdo con Ozisik (1999) [27], la transferencia de calor durante el ensayo Jominy se produce en régimen transitorio debido a que la superficie exterior sufre un cambio repentino de temperatura y, por lo tanto, varía la temperatura interior con el tiempo hasta alcanzar una condición estacionaria.

Los mecanismos de transferencia de calor presentes durante el ensayo son los siguientes: convección forzada, conducción y convección del medio ambiente-radiación. En la figura 15 se presenta un esquema de los mecanismos anteriormente mencionados.

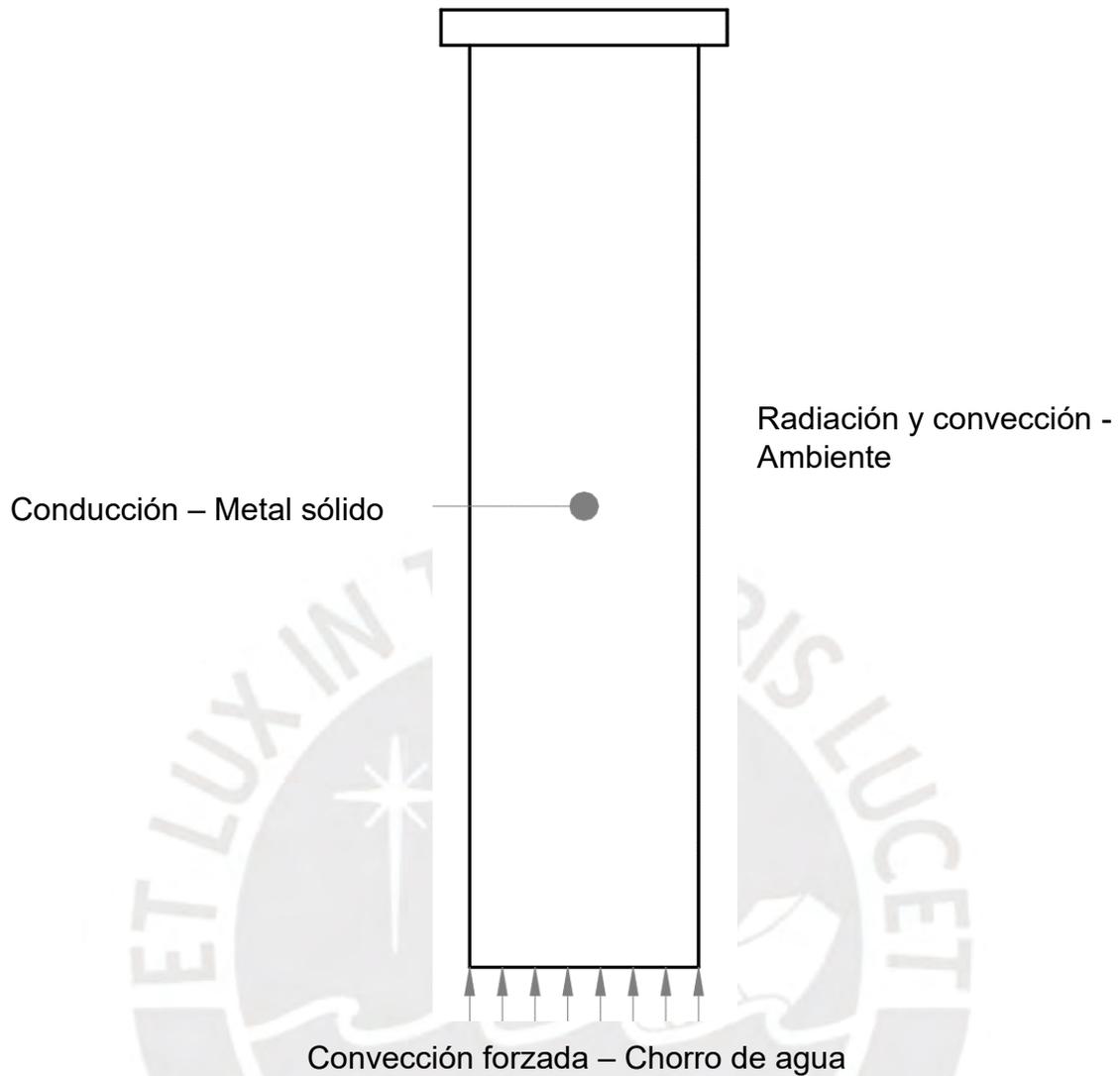


Figura 15. Mecanismos de transferencia de calor en la probeta Jominy

Nota: Adaptado de "Finite Difference Representation of Transfer Heat in the Hardenability of Steel SAE 1045" (p. 4), por E. López, 2009 [28]

a) Conducción

El acero es un medio sólido por la cual la energía térmica se transmite por comunicación directa molecular sin desplazamiento entre ellas. El coeficiente de conducción k varía según la temperatura a la que está sometido el material [29]. Para los aceros hipoeutectoides, presenta el siguiente comportamiento que se muestra en la figura 16.

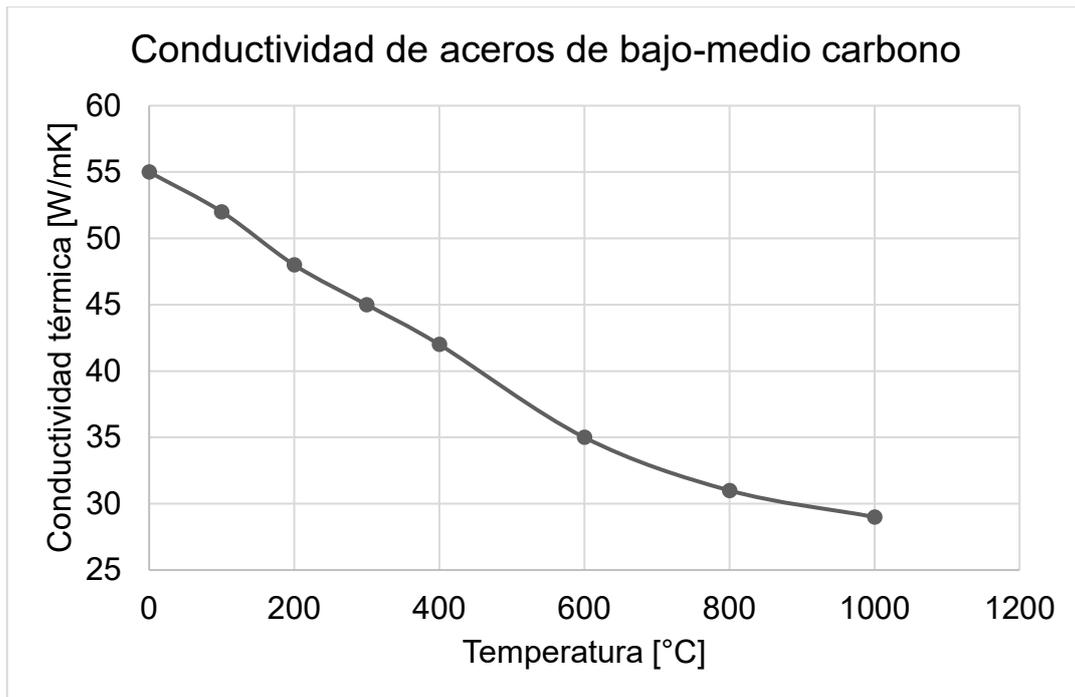


Figura 16. Conductividad de los aceros de bajo-medio carbono.

Nota: De "Analysis of Heat and Mass Transfer" (p. 1), por R. M. Drake, 1972 [9].

b) Convección forzada

La superficie exterior caliente de la probeta Jominy está en contacto con un flujo en movimiento que, para este caso es el chorro de agua a temperatura ambiente, provoca que la energía térmica se traslade por medio del fluido debido a la diferencia de temperaturas [29]. Diversos estudios se han enfocado en determinar el coeficiente de convección forzada durante el procedimiento del ensayo Jominy. Por un lado, López E. (2012) [26] determina el coeficiente de convección forzada a través del número de Nusselt:

$$Nu = 0.59(Gr \cdot Pr)^{0.25} \quad (5)$$

$$Nu = \frac{h_c \cdot L}{k_a} \quad (6)$$

Donde:

- Gr: Número de Grashoff
- Pr: Número de Prandtl
- h_c : Coeficiente de transferencia de calor por convección
- L: Altura de la probeta
- k_a : Conductividad térmica del aire

Por lo tanto, obtiene un valor de coeficiente de convección forzada de 10000 W/m²K.

Por otro lado, Le Masson (2002) [30], estimó el coeficiente de convección analizando la influencia en la transformación martensítica hasta 1 mm del extremo endurecido. Además, el método se planteó de forma bidimensional como se muestra en la figura 17. Como resultado, obtiene que el coeficiente de convección forzada promedio es de 15000 W/m²K.

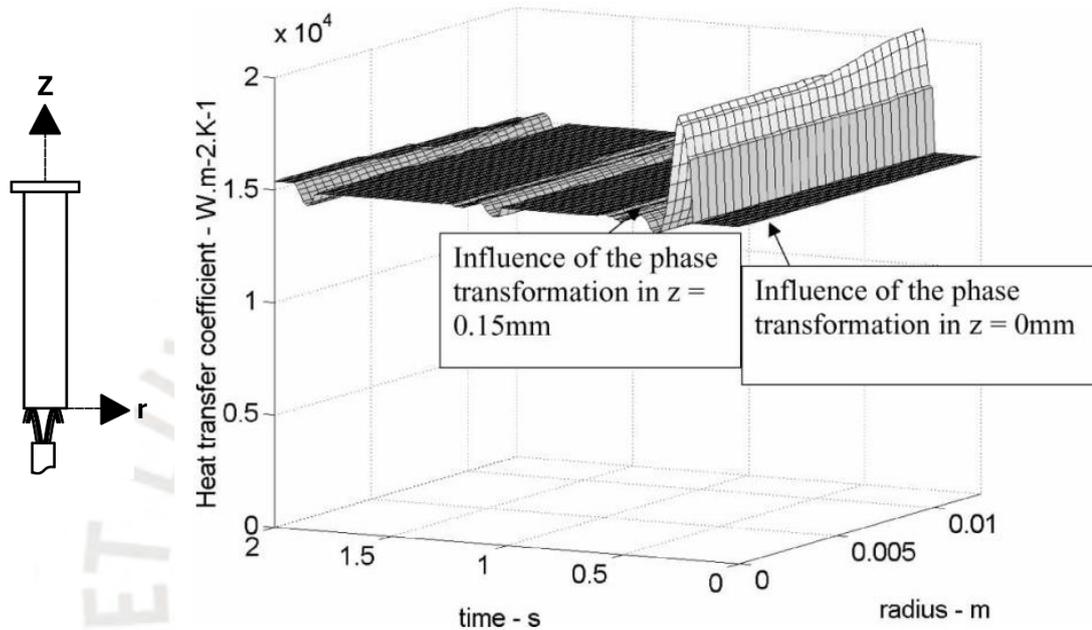


Figura 17. Resultado de la estimación por Function Specification Method (FMS) para Z=1mm

Nota: De "Estimations of a 2D convection heat transfer coefficient during a metallurgical Jominy end-quench test" (p. 16), por P. Le Masson, 2004 [30]

c) Radiación y convección del medio ambiente

El ambiente también influye durante el ensayo Jominy debido a la presencia de ondas electromagnéticas originadas por el sol donde la transmisión de calor se propaga por dicho medio [29]. Por un lado, J. B. Hernández (2012) [31] estima la contribución de la radiación a través de la siguiente ecuación:

$$h_{rad} = \varepsilon \left[\frac{\sigma(T^4 - T_f^4)}{T - T_f} \right] \quad (7)$$

Donde:

- ε : emisividad
- σ : coeficiente de Stefan-Boltzmann
- T_f : Temperatura del medio

De esta manera, obtiene un valor de coeficiente de convección forzada de $80 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Por otro lado, Higuera O. (2007) [1], utiliza un coeficiente de convección del ambiente de $200 \text{ W/m}^2\text{K}$ como condición de borde para realizar la simulación térmica del ensayo Jominy para el acero AISI/SAE 4140H, donde considera los efectos de la convección del aire y la radiación del ambiente.

1.7. Análisis por elementos finitos (FEA)

El análisis por elementos finitos (FEA) es un método computacional que permite el modelamiento de elementos o sistemas en un entorno virtual con la finalidad de predecir el comportamiento físico bajo la acción de efectos físicos como: esfuerzos mecánicos, fatiga, transferencia de calor, vibraciones, electrostática, entre otros [1]. FEA utiliza el método de elementos finitos (FEM) de manera práctica. Se identifica tres fases durante el análisis por elementos finitos [1]:

a) Pre-procesamiento

Durante esta fase, se realiza el modelamiento del elemento a analizar. Luego se sustituye el modelo por líneas o curvas conectadas entre sí a través de nodos. La geometría del modelo lleva por nombre de malla. El software permite afinar el tamaño de los elementos de la malla para obtener resultados más aproximados.

b) Modelamiento

Durante esta fase, se establece las condiciones y restricciones del sistema mediante parámetros para simular el comportamiento real de manera aproximada.

c) Post-procesamiento

Finalmente, se generan los resultados para ser estudiados a través de gráficas y en el entorno visual del software.

CAPITULO 2

DESARROLLO DEL MODELO DEL ENSAYO JOMINY

En el presente capítulo, se presenta los parámetros necesarios para realizar la simulación de la probeta Jominy estableciendo la geometría, las condiciones iniciales y de borde de los efectos físicos producidos por el aire y el chorro de agua por medio de los mecanismos de transferencia de calor, en particular, la conducción, convección forzada y convección natural y, finalmente, las propiedades del mallado.

2.1. Geometría de la probeta Jominy

De acuerdo con lo establecido por la norma ASTM A255-20a [5], la probeta Jominy se modela con la siguiente geometría que se muestra en la figura 18.

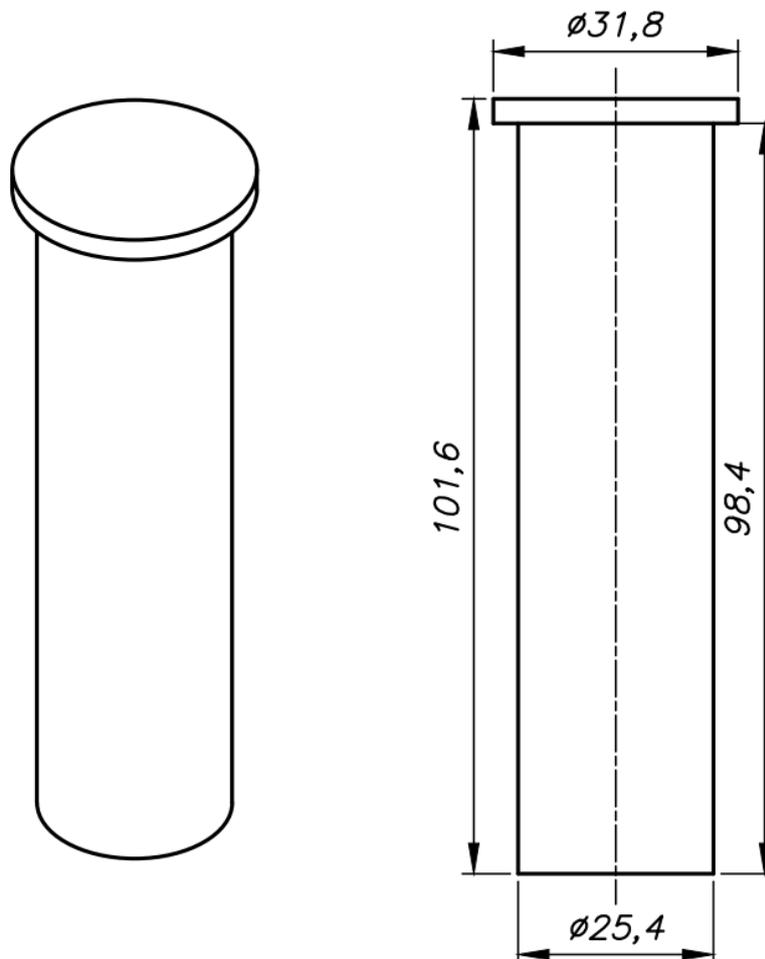


Figura 18. Geometría de la probeta Jominy

Nota: Adaptado de: "Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel", 2020 [8]

2.2. Condiciones iniciales

2.2.1 Temperatura inicial de la probeta Jominy.

Para el presente trabajo de investigación, las condiciones iniciales se establecen un instante después de que la probeta Jominy se haya retirado del horno. Además, se evaluarán tres condiciones iniciales diferentes que se presentan en la tabla 6.

Tabla 6. Temperatura inicial de cada ensayo

Ensayos	Temperatura inicial (Ti) [°C]
1	890
2	760
3	740

2.2.2. Parámetros térmicos de la probeta Jominy.

El acero AISI/SAE 1045 es el material por estudiar en el presente trabajo de investigación. Por lo tanto, se consideran los siguientes parámetros térmicos que se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Propiedades térmicas promedio del acero AISI/SAE 1045

Propiedad térmica	Símbolo	Valor	Unidad
Coefficiente de dilatación térmica	λ	$1.13 \cdot 10^{-5}$	1/K
Calor Específico	Cp	465	J/(kg·K)
Densidad	ρ	7800	kg/m ³

Nota: De "Analysis of Heat and Mass Transfer" (p. 1), por R. M. Drake, 1972 [9].

Además, la conductividad térmica es un parámetro que varía de acuerdo a la temperatura del material como se mencionó en el Capítulo 1. De esta manera, se muestra en la tabla 8 el valor de la conductividad térmica de acuerdo a la temperatura que se encuentra el material.

Tabla 8. Coeficiente de conducción térmica en función de la temperatura.

Conducción térmica [W/mK]	Temperatura [°C]
55	0
52	100
48	200
45	300
42	400
35	600
31	800
29	1000

Nota: De "Analysis of Heat and Mass Transfer" (p. 1), por R. M. Drake, 1972 [9].

2.3. Condiciones de borde

2.3.1. Chorro de agua

Para la presente simulación térmica, el contacto entre chorro de agua con el extremo de la probeta Jominy se considera solo el área de la superficie de la base del extremo enfriado [1,20,28], como se muestra en la figura 19.

Además, para modelar el contacto del fluido con la superficie inferior de la probeta, se considera un mecanismo de transferencia de calor por convección forzada en la superficie. Por lo tanto, se consideran las siguientes condiciones de borde que se muestran en la tabla 9.

Tabla 9. Condiciones de borde del chorro de agua

Propiedad térmica	Símbolo	Valor	Unidad
Coefficiente de convección	h_c	10000	W/m^2K
Temperatura del fluido	T_∞	20	$^\circ C$

Nota: Adaptado de "Thermal simulation in Cosmoworks of Steel put under test of hardenability Jominy" (p. 3), por Oscar Higuera [1] y "Correlação numérica e experimental da microestrutura, taxa de resfriamento e características mecânicas do aço ABNT 1045" (p. 79), por Cesar Nunura [20]

2.3.2. Medio ambiente.

Para modelar el medio ambiente, se considera el mecanismo conjunto de transferencia de calor por convección natural y por radiación a través de la superficie lateral de la probeta Jominy [1,20,28], como se muestra en la figura 19.

Por lo tanto, se consideran las siguientes condiciones de borde para el medio ambiente que se muestran en la tabla 10.

Tabla 10. Condiciones de borde del medio ambiente

Propiedad térmica	Símbolo	Valor	Unidad
Coefficiente de convección natural y radiación	h_r	35	W/m^2K
Temperatura ambiente	T_∞	20	$^\circ C$

Nota: Adaptado de "Thermal simulation in Cosmoworks of Steel put under test of hardenability Jominy" (p. 3), por Oscar Higuera [1] y "Correlação numérica e experimental da microestrutura, taxa de resfriamento e características mecânicas do aço ABNT 1045" (p. 79), por Cesar Nunura [20]

2.4. Modelo de la probeta Jominy

De acuerdo con las condiciones iniciales y de borde mencionadas anteriormente, la probeta del ensayo Jominy se modelará como se muestra en la figura 19.

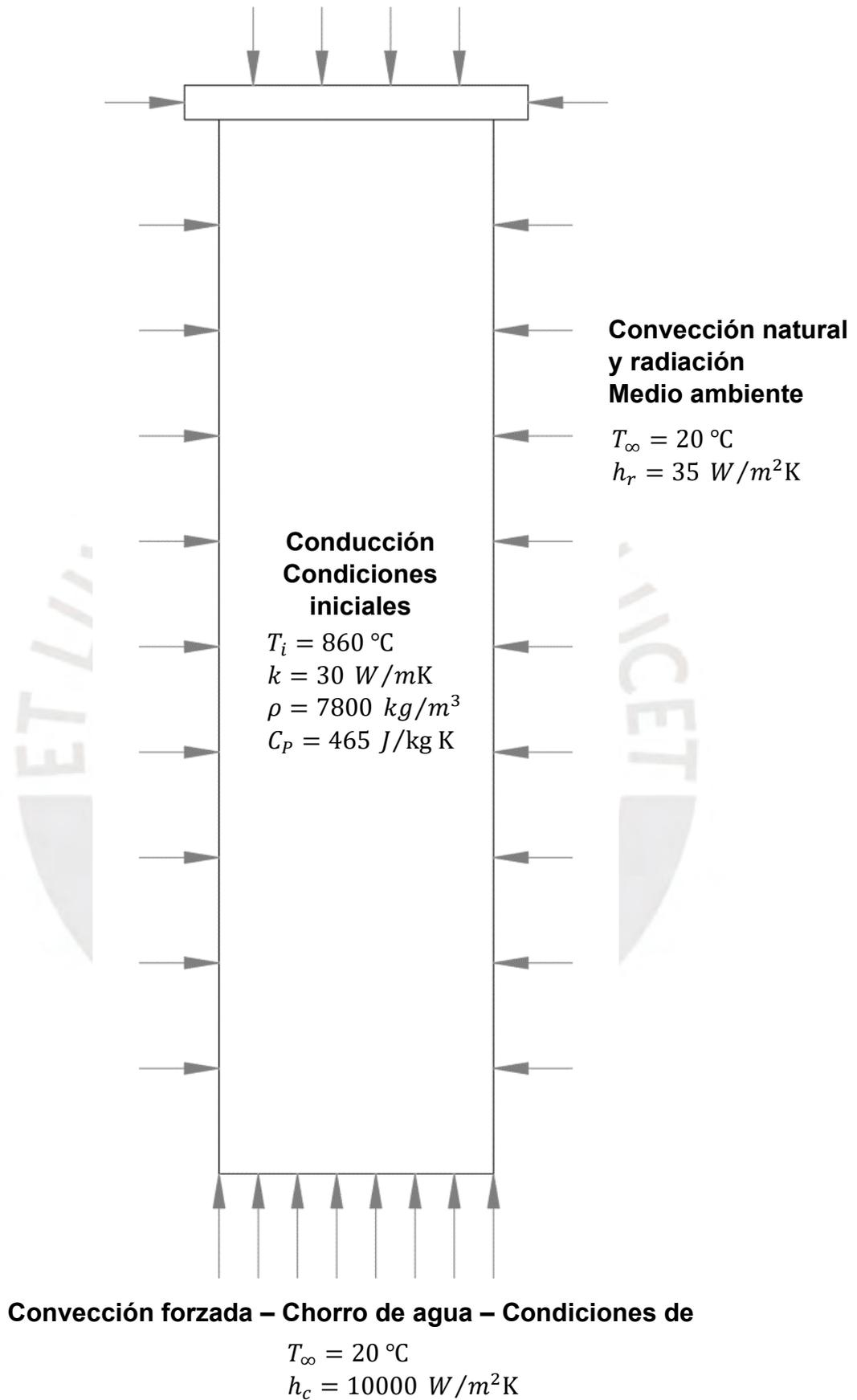


Figura 19. Modelo de la probeta del ensayo Jominy para la simulación

2.5. Mallado

El mallado constituye una parte esencial del modelo debido a que, de acuerdo con el tamaño del elemento, se obtendrán resultados más aproximados y definirán el tiempo de simulación. Por esta razón, el mallado es más denso en las áreas más críticas, en particular, la superficie lateral del cilindro y el área de la base del extremo enfriado. En la tabla 11 se muestra las propiedades del mallado y en la figura 20, el modelo con el mallado definido.

Tabla 11. Propiedades del mallado para el modelo del ensayo Jominy

Propiedades	Valor
Tipo de elemento sólido	Tetraédricos parabólicos
Tamaño de los elementos	3.2 mm
Cantidad de nodos	83245
Cantidad de elementos	48856
Tamaño de los elementos refinados	1 mm

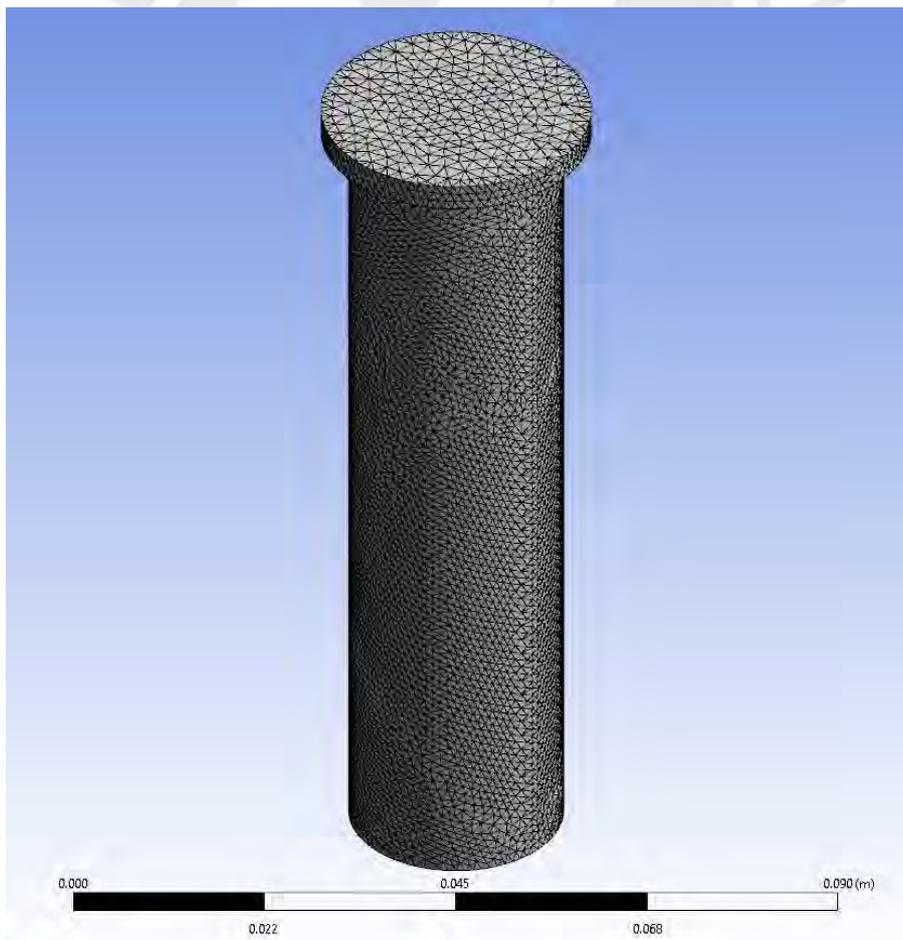


Figura 20. Mallado de la probeta Jominy obtenido por el software Ansys Student 2021 R2

2.6. Incremento de tiempo

El incremento de tiempo establece la precisión de los resultados, por esta razón, es necesario establecer diferentes periodos de tiempo a fin de obtener resultados óptimos de acuerdo con las etapas de enfriamiento que está presente en la probeta del ensayo Jominy. En la tabla 12 se muestra las etapas de enfriamiento junto a los incrementos de tiempo para la simulación.

Tabla 12. Incremento de tiempo para las etapas de enfriamiento

Etapas de enfriamiento	Tiempo de simulación	Incremento de tiempo	Convergencia
A'-A	0s-10s	0.02	0.10%
B	10s-100s	0.5	0.10%
C	100s-600s	5	0.10%



CAPITULO 3

DESARROLLO EXPERIMENTAL

En el presente capítulo se presentan los procedimientos necesarios para analizar las modificaciones microestructurales y de la dureza en el acero AISI/SAE 1045 para diferentes ciclos térmicos. Para ello, se utilizaron probetas Jominy y se realizaron los siguientes procedimientos y ensayos: ensayo Jominy, elaboración de las muestras, análisis químico, ensayo de dureza y microscopía óptica. Además, se describe la secuencia de los pasos realizados en cada procedimiento.

3.1. Material de trabajo

Se fabricaron probetas Jominy a partir de barras de acero AISI/SAE 1045 según la geometría establecida por la norma ASTM A255 [5] como se muestra en la figura 21.



Figura 21. Probeta Jominy

3.2. Ensayo Jominy

3.2.1. Equipos utilizados

Para realizar el ensayo Jominy, se utilizaron los siguientes equipos: pinza de crisol de hierro, horno de cámara estándar CARBOLITE CWF 1300, equipo de ensayo Jominy. En la figura 22 se muestra los equipos anteriormente mencionados.



Figura 22. (a) Pinza de crisol de hierro, (b) Horno de cámara estándar CWF 1300, (c) Equipo de ensayo Jominy

3.2.2. Procedimiento del ensayo

Se utilizó como base el procedimiento establecido por la norma ASTM A255-20a [5] y el procedimiento utilizado para el ensayo de las probetas es el siguiente:

1. Encender el horno, colocar la temperatura a estudiar y esperar por una (1) hora.
2. Ingresar la probeta Jominy al horno.
3. Mantener la probeta Jominy en el horno durante una (1) hora.
4. Extraer y trasladar la probeta Jominy hacia el equipo Jominy en un tiempo máximo de cinco (5) segundos, contabilizando desde el momento que se abre el horno hasta el primer contacto de la probeta con el chorro de agua.
5. Enfriar la probeta Jominy durante diez (10) minutos.

3.3. Mecanizado de muestras

Se mecanizó 2 tipos de muestras para cada probeta Jominy y son las siguientes:

3.3.1. Muestras para el análisis químico

Se realizaron los cortes 1 y 2 de acuerdo con las medidas e indicaciones de la figura 23a. Además, ambas superficies obtenidas deben ser paralelas como se indica en la figura 23b. En la figura 23 se observa una muestra para el análisis químico.

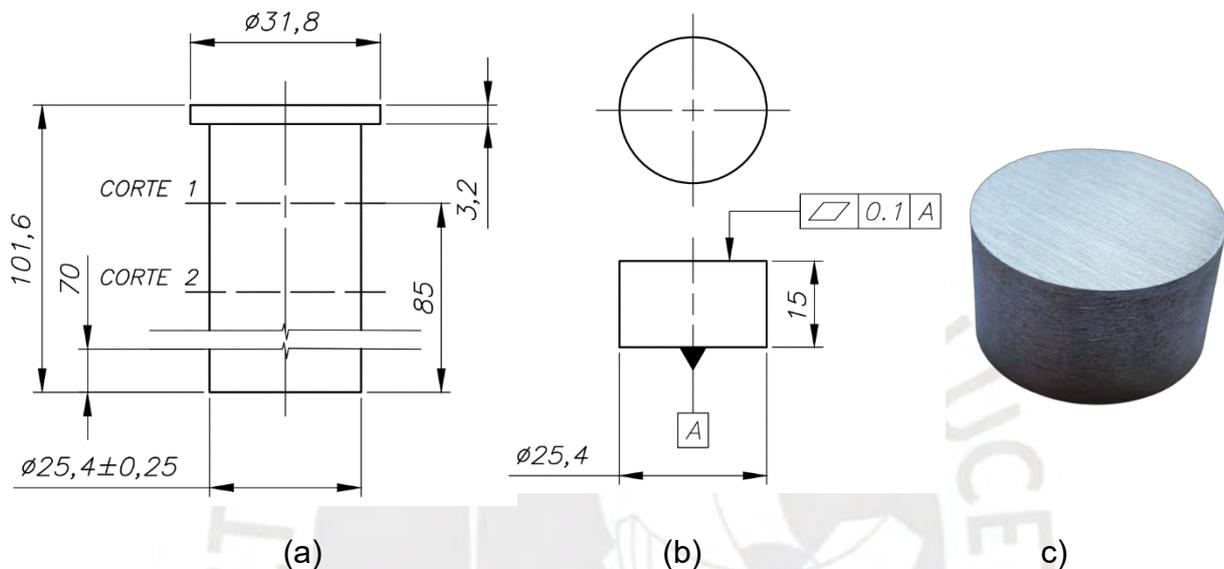


Figura 23. (a) Indicaciones para el corte de la probeta Jominy, (b) Indicaciones de paralelismo para las caras de la muestra y (c) Muestra para análisis químico

3.3.2. Muestras para el ensayo de dureza y metalografía

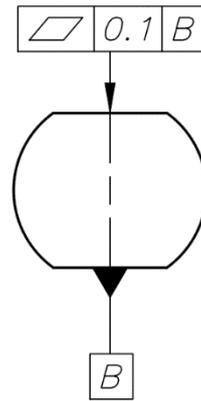
Una vez realizado el ensayo Jominy, se procedió a preparar la superficie de las probetas para la medición de la dureza y metalografía.

Para ello, se realizó el corte de acuerdo con las medidas e indicaciones de la figura 24b. Luego, se le realizaron dos refrentados para obtener una geometría como se indica en la figura 24c. Finalmente, se mecanizó ambas superficies a fin de garantizar paralelismo como se indica en la figura 24d.

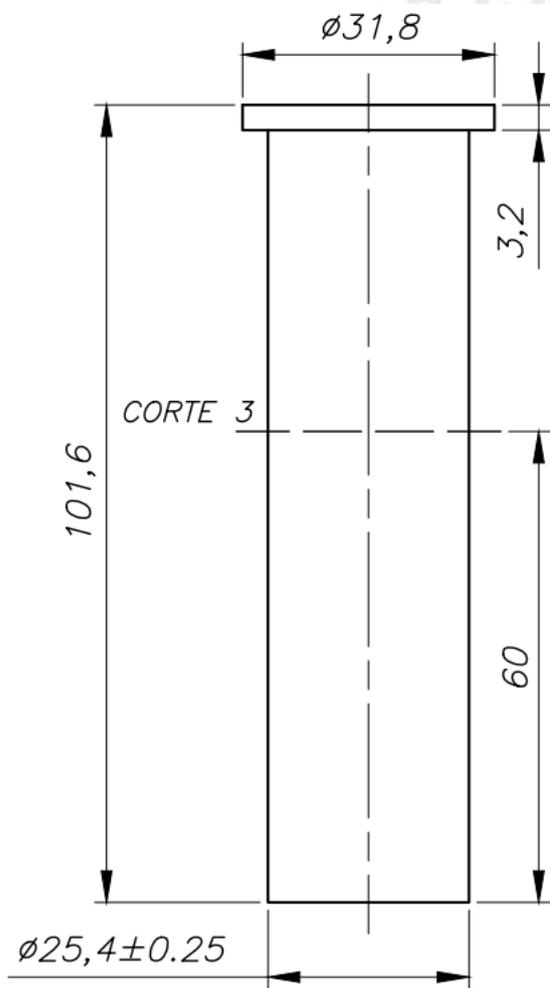
En la figura 24a se observa una muestra para el ensayo de dureza y metalografía.



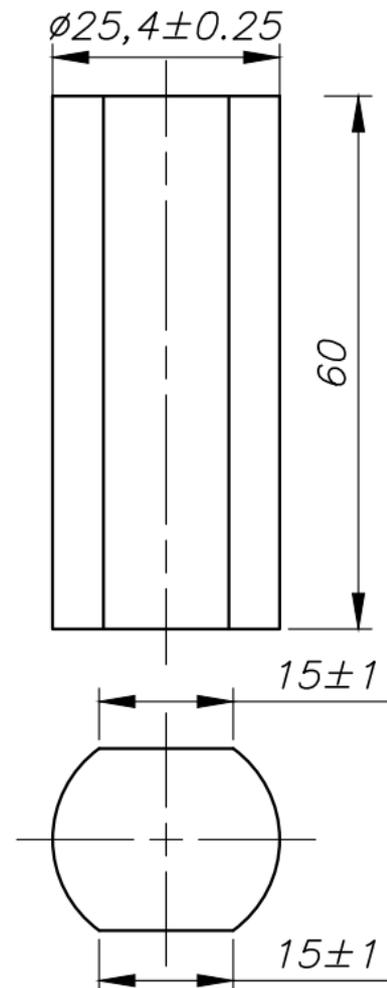
(a)



(d)



(b)



(c)

Figura 24. (a) Muestra para mediciones de dureza y metalografía, (b) Indicaciones para corte, (c) Indicaciones para refrentado y (d) Indicaciones de paralelismo

3.4. Análisis químico

La composición química del acero, objeto del estudio, fue determinada usando análisis químico elemental. Se utilizó los procedimientos y criterios establecidos por la norma ASTM E415-21 (2021) [47]

3.4.1. Equipos utilizados

Para realizar el análisis químico, se utilizó un Espectrómetro de Emisión Óptica BRUKER Q8 Magellan como se muestra en la figura 25.



Figura 25. Espectrómetro de Emisión Óptica BRUKER Q8 Magellan

3.4.2. Preparación de las muestras

Se realizó un desbaste para ambas superficies de la muestra para análisis químico utilizando lijas de carburo de silicio. Para la superficie de apoyo, se utilizaron lijas con granulometría 40 y 80, mientras que, para la superficie de análisis, se utilizaron lijas con granulometría 40, 80, 120, 180, 240 y 400. Asimismo, entre cada desbaste se realizó un lavado, enjuagado y secado de las muestras a fin de no contaminar la lija posterior.

3.5. Ensayo de dureza

Se utilizó los procedimientos y criterios establecidos por la norma ASTM E18-22 (2022) [40].

3.5.1. Equipos utilizados

Para realizar el ensayo de durezas, se utilizaron los siguientes equipos: Máquina de Dureza tipo Rockwell LCR-500, indentadores Rockwell B y C, base de apoyo. En la figura 26 se muestra los equipos anteriormente mencionados.



Figura 26. (a) Máquina de Dureza tipo Rockwell LCR-500, (b) Indentadores Rockwell B y C y (c) Base de apoyo de muestras

3.5.2. Preparación de las muestras

Se realizó un desbaste para ambas superficies de la muestra para dureza utilizando lijas de carburo de silicio. Para ambas superficies, se utilizaron lijas con granulometría 40 y 80. Asimismo, entre cada desbaste se realizó un lavado, enjuagado y secado de las muestras a fin de no contaminar la lija posterior.

3.5.3. Procedimiento de ensayo

Se realizaron las mediciones de dureza de acuerdo con el esquema de la figura 27. Para distancias cercanas al extremo templado, se establece una distancia entre medidas de 2 mm. Para las siguientes dos (2) medidas, un espaciamiento de 4mm. Luego, un espaciamiento de 6 mm y, finalmente, un espaciamiento de 20 mm.

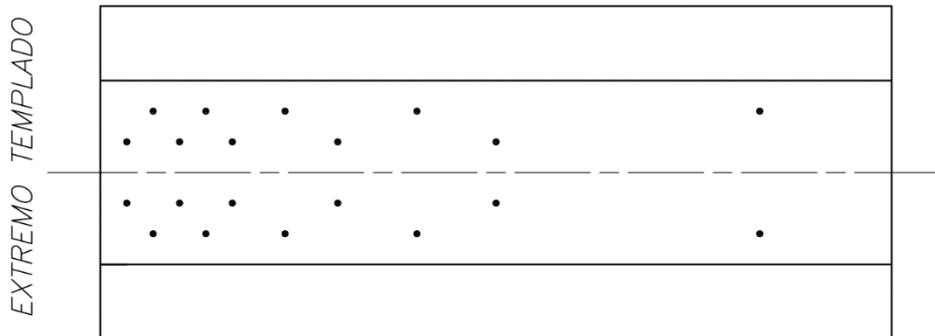


Figura 27. Esquema de mediciones de dureza en la muestra

3.6. Microscopia óptica

3.6.1. Equipos utilizados

Para realizar la microscopia óptica, se utilizó el equipo denominado Microscopio Óptico LEICA MICROSYSTEM - Leica DMI5000 M como se muestra en la figura 28.



Figura 28. Microscopio Óptico LEICA MICROSYSTEM - Leica DMI5000

3.6.2. Preparación de la muestra

Se utilizó los procedimientos y criterios establecidos por la norma ASTM E3-11 [41].

En primer lugar, se realizó un desbaste para ambas superficies de la muestra para metalografía utilizando lijas de carburo de silicio. Para la superficie de apoyo, se utilizaron lijas con granulometría 40 y 80, mientras que, para la superficie a analizar en el microscopio, se utilizaron lijas con granulometría 40, 80, 120, 180, 240, 400, 600 y 1500. Asimismo, entre cada desbaste se realizó un lavado, enjuagado y secado de las muestras a fin de no contaminar la lija posterior.

En segundo lugar, se realizó un pulido solo para la superficie a analizar, utilizando un equipo de pulido Struers como se muestra en la figura 29. Este equipo utiliza paños donde se le agrega un compuesto denominado: pasta de diamante. Se utilizaron pastas de 1 y 6 micras.

Finalmente, se realizó un ataque químico a la superficie pulida de las muestras de acuerdo con los criterios y recomendaciones de la norma ASTM E407-07 (2017) [42].



Figura 29. Pulidora Struers – LaboPol25

3.6.3. Procedimiento

Se estableció el registro fotográfico de acuerdo con las zonas que se muestra en la figura 30. Para distancias cercanas al extremo templado (Zona 1, 0-10 mm), se obtienen fotografías cada 0.5 mm. Para distancias medias (Zona 2, 10-20 mm), un registro fotográfico cada 1 o 2 mm. Finalmente, para distancias alejadas (Zona 3, 20-50 mm) se obtienen fotografías cada 5 mm.

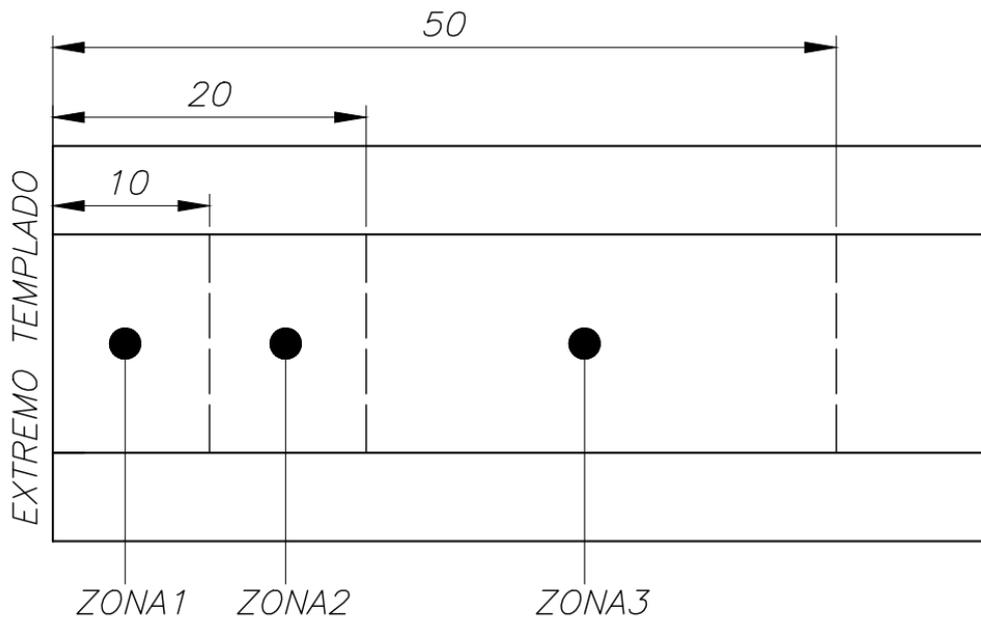


Figura 30. Esquema de división de la superficie a analizar en el microscopio óptico

CAPITULO 4.

ANALISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo, se presentan los resultados obtenidos para la caracterización del material, los cambios obtenidos en las propiedades mecánicas y en la microestructura, así como la simulación matemática del ciclo térmico que se produce durante el ensayo Jominy. El análisis comprende los siguientes aspectos: análisis químico, durezas, velocidades de enfriamiento (obtenido por simulación numérica), metalografía y el estudio de correlación entre las mismas.

4.1. Análisis químico

Los resultados del análisis químico del acero con que fueron fabricadas las siete probetas Jominy se muestran en la tabla 13.

Tabla 13. Análisis químico mediante OES del acero con el que se fabricaron las probetas Jominy

Probeta	Composición [% en peso]							
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Fe
1	0.458	0.709	0.013	0.05	0.188	0.024	0.02	98.41
2	0.46	0.71	0.013	0.05	0.186	0.024	0.02	98.41
3	0.462	0.708	0.013	0.05	0.186	0.024	0.02	98.41
4	0.446	0.7	0.014	0.041	0.207	0.026	0.034	98.41
5	0.456	0.702	0.014	0.038	0.197	0.028	0.035	98.41
6	0.461	0.703	0.014	0.043	0.201	0.025	0.036	98.41
7	0.458	0.702	0.013	0.039	0.204	0.027	0.034	98.41

De acuerdo con los resultados de la tabla 13, la composición química de cada probeta se encuentra dentro de los rangos establecidos por la norma ASTM A519 [8] que se muestra en la tabla 1 (capítulo 1) que corresponden a un acero AISI/SAE 1045.

Luego, a partir de la composición química de la tabla 13 y mediante las expresiones (1) y (2) definidas por Kasatkin (1984) [34], se obtuvieron las temperaturas críticas de las probetas en estudio y se muestran en la tabla 14:

$$A_1 = 723 - 7.08 \times \text{Mn} + 37.7 \times \text{Si} + 18.1 \times \text{Cr} + 44.2 \times \text{Mo} + 8.95 \times \text{Ni} + 50.1 \times \text{V} + 21.7 \times \text{Al} + 3.18 \times \text{W} + 297 \times \text{S} - 830 \times \text{N} - 11.5 \times \text{C} \times \text{Si} - 14 \times \text{Mn} \times \text{Si} - 3.10 \times \text{Si} \times \text{Cr} - 57.9 \times \text{C} \times \text{Mo} - 15.5 \times \text{Mn} \times \text{Mo} - 5.28 \times \text{C} \times \text{Ni} - 6 \times \text{Mn} \times \text{Ni} + 6.77 \times \text{Si} \times \text{Ni} - 0.80 \times \text{Cr} \times \text{Ni} - 27.4 \times \text{V} + 30.8 \times \text{Mo} \times \text{V} - 0.84 \times \text{Cr}^2 - 3.46 \times \text{Mo}^2 - 0.46 \times \text{Ni}^2 - 28 \times \text{V}^2 \quad (1)$$

$$A_3 = 912 - 370 \times \text{C} - 27.4 \times \text{Mn} + 27.3 \times \text{Si} - 6.35 \times \text{Cr} - 32.7 \times \text{Ni} + 95.2 \times \text{V} + 190 \times \text{T} + 72 \times \text{Al} + 64.5 \times \text{Nb} + 5.57 \times \text{W} + 332 \times \text{S} + 276 \times \text{P} + 486 \times \text{N} - 900 \times \text{B} + 16.2 \times \text{C} \times \text{Mn} + 32.3 \times \text{C} \times \text{Si} + 15.4 \times \text{C} \times \text{Cr} + 48 \times \text{C} \times \text{Ni} + 4.32 \times \text{Si} \times \text{Cr} - 17.3 \times \text{Si} \times \text{Mo} - 18.6 \times \text{Si} \times \text{Ni} + 4.8 \times \text{Mn} \times \text{Ni} + 40.5 \times \text{Mo} \times \text{V} + 174 \times \text{C}^2 + 2.46 \times \text{Mn}^2 - 6.86 \times \text{Si}^2 + 0.322 \times \text{Cr}^2 + 9.90 \times \text{Mo}^2 + 1.24 \times \text{Ni}^2 - 60.2 \times \text{V}^2 \quad (2)$$

Tabla 14. Estimación de las temperaturas críticas (A_1 y A_3) para el acero en estudio

Probeta	Temperaturas críticas	
	A_1 [°C]	A_3 [°C]
1	731.55	790.02
2	731.49	789.6
3	731.5	789.25
4	729.52	789.6
5	728.52	786.58
6	729.78	787.15
7	728.85	786.26

4.2. Ensayo de dureza

En el capítulo 1, se estableció que el estudio emplearía tres (3) temperaturas de calentamiento: una temperatura de austenización completa (890°C), para la cual se utilizaron 3 probetas Jominy (probetas 1, 2, y 3). Las dos temperaturas restantes correspondieron a la región intercrítica de acuerdo al diagrama Fe-C (760°C y 740°C), para las que se utilizaron las probetas 4 y 5 y las probetas 6 y 7, respectivamente.

4.2.1. Barrido de durezas preliminar

Una vez realizados el ensayo Jominy, se midió la dureza a lo largo de una generatriz de acuerdo con el procedimiento descrito en el capítulo 3. Los resultados del barrido de durezas para cada temperatura en estudio y para cada una de las probetas ensayadas se muestran en la tabla 15, tabla 16 y tabla 17 para las distancias establecidas en la figura 27 (capítulo 3).

Tabla 15. Barrido de durezas para la condición T=890°C (austenización completa)

Probeta 1			Probeta 2			Probeta 3		
d [mm]	Dureza		d [mm]	Dureza		d [mm]	Dureza	
	HRC	HRB		HRC	HRB		HRC	HRB
2	58.17	-	2	57.25	-	2	57.83	-
4	46.15	-	4	44.17	-	4	47.15	-
6	30.59	-	6	29.96	-	6	30.31	-
8	29.04	-	8	28.92	-	8	28.69	-
10	28.15	-	10	28.29	-	10	26.92	-
14	26.41	-	14	25.74	-	14	25.63	-
18	24.06	-	18	24.01	-	18	23.83	-
24	21.53	-	24	21.9	-	24	22.63	-
30	-	98.18	30	-	99.23	30	-	98.13
50	-	93.87	50	-	94.47	50	-	93.3

A partir de los resultados obtenidos de la tabla 15, se ha elaborado la curva de templabilidad del acero a 890°C como se muestra en la figura 31.

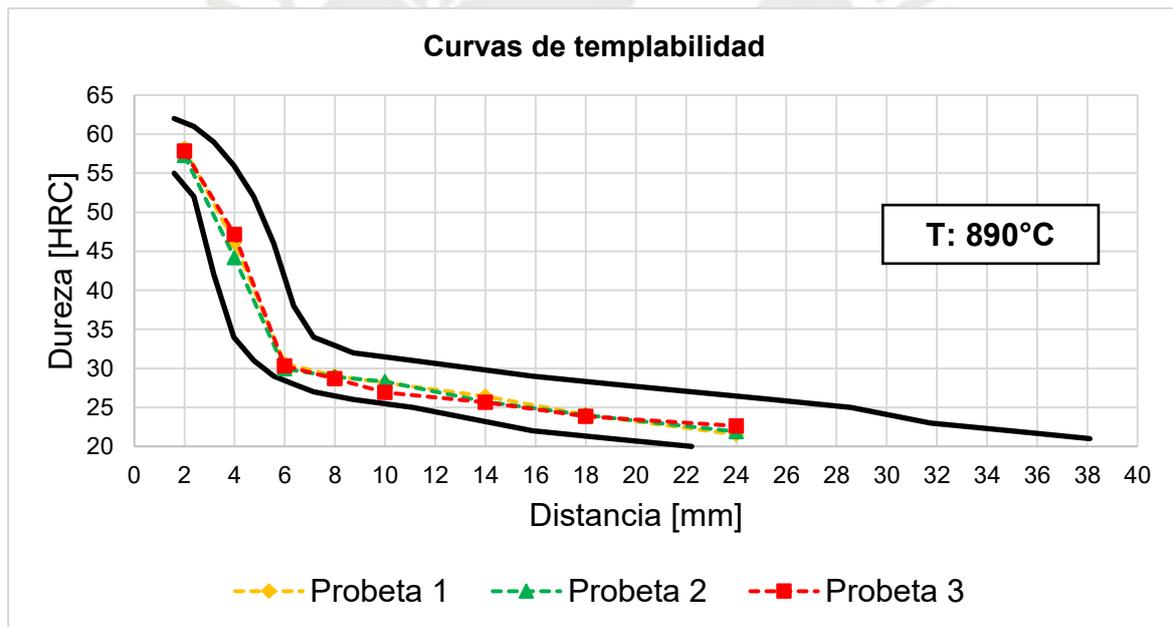


Figura 31. Curvas de templabilidad de las probetas Jominy 1,2 y 3 (T: 890°C)

De acuerdo con la figura 31, las curvas de templabilidad de las probetas estudiadas se encuentran dentro del rango establecido por la norma ASTM A255 [22]. Por lo tanto, el procedimiento de calentamiento y enfriamiento establecido para el ensayo Jominy, así como los resultados obtenidos en el material se ajustan muy bien a los datos comúnmente aceptados.

La tabla 16 muestra los resultados del ensayo Jominy para la temperatura de calentamiento de 760°C, se registraron 2 mediciones de durezas para la escala Rockwell C con la finalidad de obtener una mejor aproximación. Asimismo, a partir de los resultados de la tabla 16, se graficó la curva de dureza para cada probeta como se muestra en la figura 32, donde se observa que las mediciones obtenidas en ambas probetas son aproximadamente iguales, lo cual indica que el proceso de calentamiento y enfriamiento han sido similares en ambas probetas.

Tabla 16. Barrido de durezas para la condición T=760°C (austenización incompleta)

Probeta 4					Probeta 5				
d [mm]	Dureza			HRB	d [mm]	Dureza			HRB
	HRC		Promedio			HRC		Promedio	
	M1	M2				M1	M2		
2	50.42	53.92	52.17	-	2	51.86	54.7	53.28	-
4	32.87	35.79	34.33	-	4	34.67	36.89	35.78	-
6	24.74	27.21	25.97	-	6	25.95	27.75	26.85	-
8	22.03	23.67	22.85	-	8	23.24	23.84	23.54	-
10	21.57	22.11	21.84	-	10	21.87	22.07	21.97	-
14	21.08	21.21	21.14	-	14	21.37	21.47	21.42	-
18	-	-	-	96.98	18	-	-	-	96.98
24	-	-	-	94.97	24	-	-	-	95.74
30	-	-	-	93.65	30	-	-	-	94.49
50	-	-	-	90.95	50	-	-	-	90.83

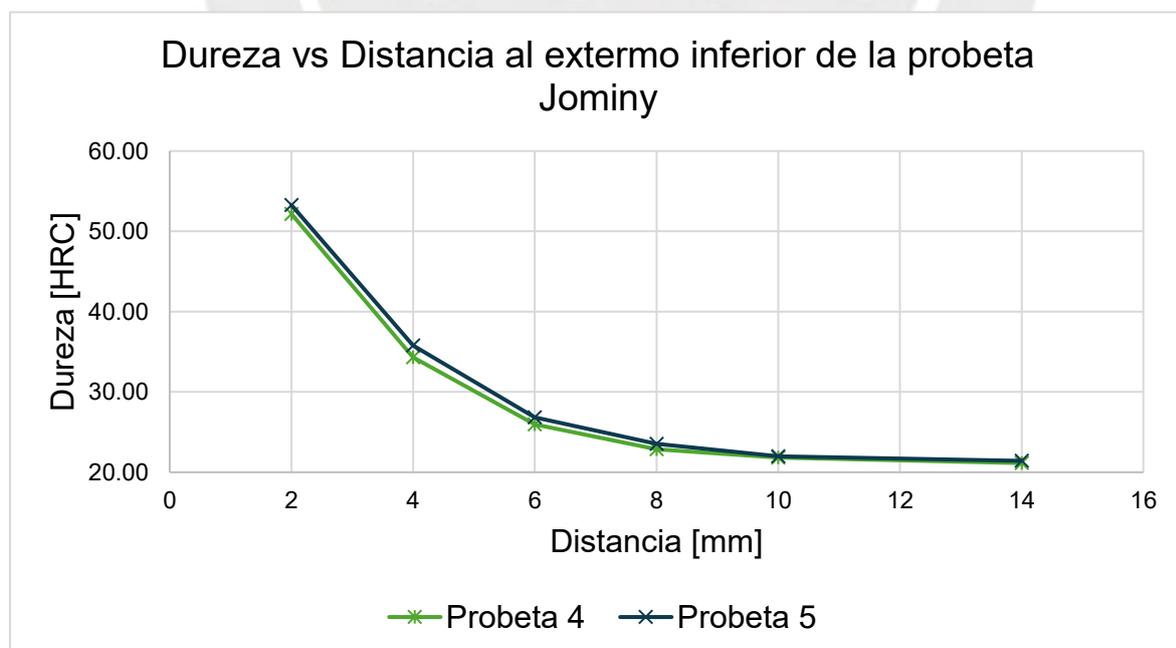


Figura 32. Variación de la dureza con la distancia al extremo inferior (en contacto directo con el chorro de agua) de las probetas Jominy, correspondiente a las probetas 4 y 5 calentadas a 760°C (austenización incompleta)

Tabla 17. Barrido de durezas para la condición T=740°C (austenización incompleta)

Probeta 6			Probeta 7		
d [mm]	Dureza		d [mm]	Dureza	
	HRC	HRB		HRC	HRB
2	26.06	-	2	25.85	-
4	-	96.4	4	-	97.84
6	-	95.46	6	-	94.26
8	-	94.37	8	-	94.36
10	-	93.54	10	-	92.41
12	-	93.53	12	-	93.35
14	-	93.37	14	-	92.38
20	-	92.6	20	-	91.06
25	-	92.36	25	-	90.57
50	-	89.91	50	-	88.45

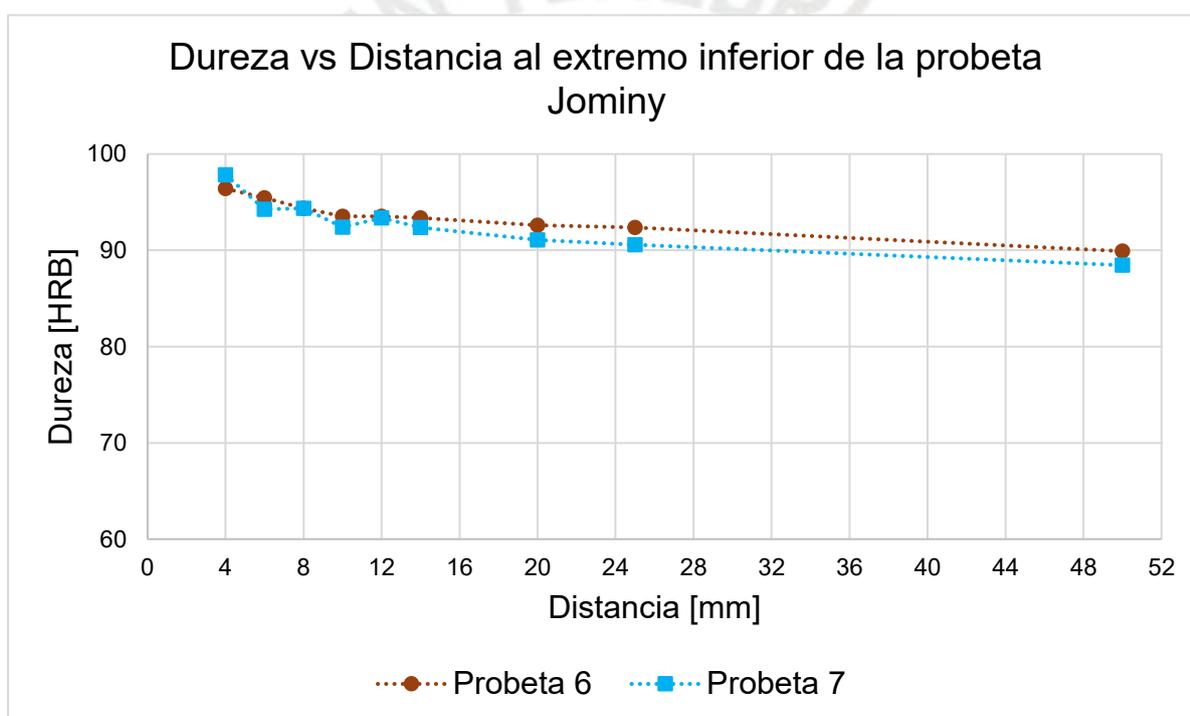


Figura 33. Variación de la dureza con la distancia al extremo inferior (en contacto directo con el chorro de agua) de las probetas Jominy, correspondiente a las probetas 6 y 7 calentadas a 740°C (austenización incompleta)

La tabla 17 muestra los resultados del ensayo Jominy para la temperatura de calentamiento de 740°C. Se observa, que los valores de dureza medidos se encuentran en la escala Rockwell B (a excepción de la distancia de 2 mm). Este comportamiento indica que hay una mayor formación de fases o microconstituyentes menos duros con respecto a la temperatura intercrítica anterior.

En la figura 33 se muestra la gráfica de las mediciones de dureza para las probetas 6 y 7, donde se observa que las mediciones obtenidas en ambas probetas son aproximadamente iguales, lo cual indica que el proceso de calentamiento y enfriamiento han sido similares en ambas probetas.

4.2.2. Barrido de durezas para estudio de las velocidades de enfriamiento

Con la finalidad de obtener datos experimentales más precisos respecto de la distancia al extremo de la probeta Jominy que se empleen luego en la simulación numérica de las velocidades de enfriamiento, se procedió a realizar nuevas mediciones de dureza manteniendo una distancia menor y constante entre cada medida. Se seleccionaron las siguientes probetas: probeta 3 (890°C), probeta 5 (760°C) y probeta 7 (740°C). En la tabla 18 se muestra la distribución de dureza.

Tabla 18. Barrido de durezas para estudio de las velocidades de enfriamiento.

Probeta 3 (T=890°C)			Probeta 5 (T=760°C)				Probeta 7 (T=740°C)			
d [mm]	Dureza		d [mm]	Dureza			HRB M1	d [mm]	Dureza	
	HRC	HRB		M1	M2	Prom.			HRC	HRB
2	57.83	-	2	51.45	54.41	52.93	-	2	26.06	-
3	54.67	-	2.5	48.35	50.99	49.67	-	3	21.07	-
3.5	51.47	-	3	45	47.5	46.25	-	4	-	96.4
4	45.95	-	3.5	40.65	42.87	41.76	-	5	-	95.86
4.5	40.17	-	4	33.7	36.16	34.93	-	6	-	95.46
5	34.94	-	4.5	28.71	30.73	29.72	-	7	-	94.92
6	30.31	-	5	25.1	26.96	26.03	-	8	-	94.37
7.5	28.91	-	6	25.14	26.8	25.97	-	9	-	93.72
8	28.69	-	7	23.05	24.51	23.78	-	10	-	93.54
10	26.92	-	8	22.29	23.41	22.85	-	13	-	93.45
14	25.63	-	9	21.27	22.11	21.69	-	14	-	93.37
16.5	24.98	-	10	21.49	22.19	21.84	-	17	-	93.11
18	23.83	-	11	21.09	21.75	21.42	-	22	-	92.53
24	22.63	-	12	21.09	21.29	21.19	-	25	-	92.36
30	-	98.13	13	21.1	21.18	21.14	-	30	-	91.95
45	-	95.96	14	-	-	-	98.23	35	-	91.28
50	-	94.64	15	-	-	-	97.92	40	-	90.93
-	-	-	20	-	-	-	96.58	45	-	90.35
-	-	-	25	-	-	-	95.13	50	-	89.91
-	-	-	30	-	-	-	93.46	-	-	-
-	-	-	35	-	-	-	92.98	-	-	-
-	-	-	40	-	-	-	92.65	-	-	-
-	-	-	45	-	-	-	91.74	-	-	-
-	-	-	50	-	-	-	90.91	-	-	-

Luego, en la figura 34 se muestra las curvas de distribución de dureza de las probetas anteriormente mencionadas en el cual, conforme se disminuye la temperatura máxima expuesta en la probeta Jominy, se obtiene una menor dureza a lo largo de la probeta.

Por lo tanto, la temperatura máxima a la que está sometido una probeta, influye de manera directa al comportamiento mecánico (dureza) lo que será estudiado en el análisis de la microestructura debido a que este comportamiento indica la presencia de fases con menor dureza en su microestructura lo que afecta a su comportamiento mecánico.

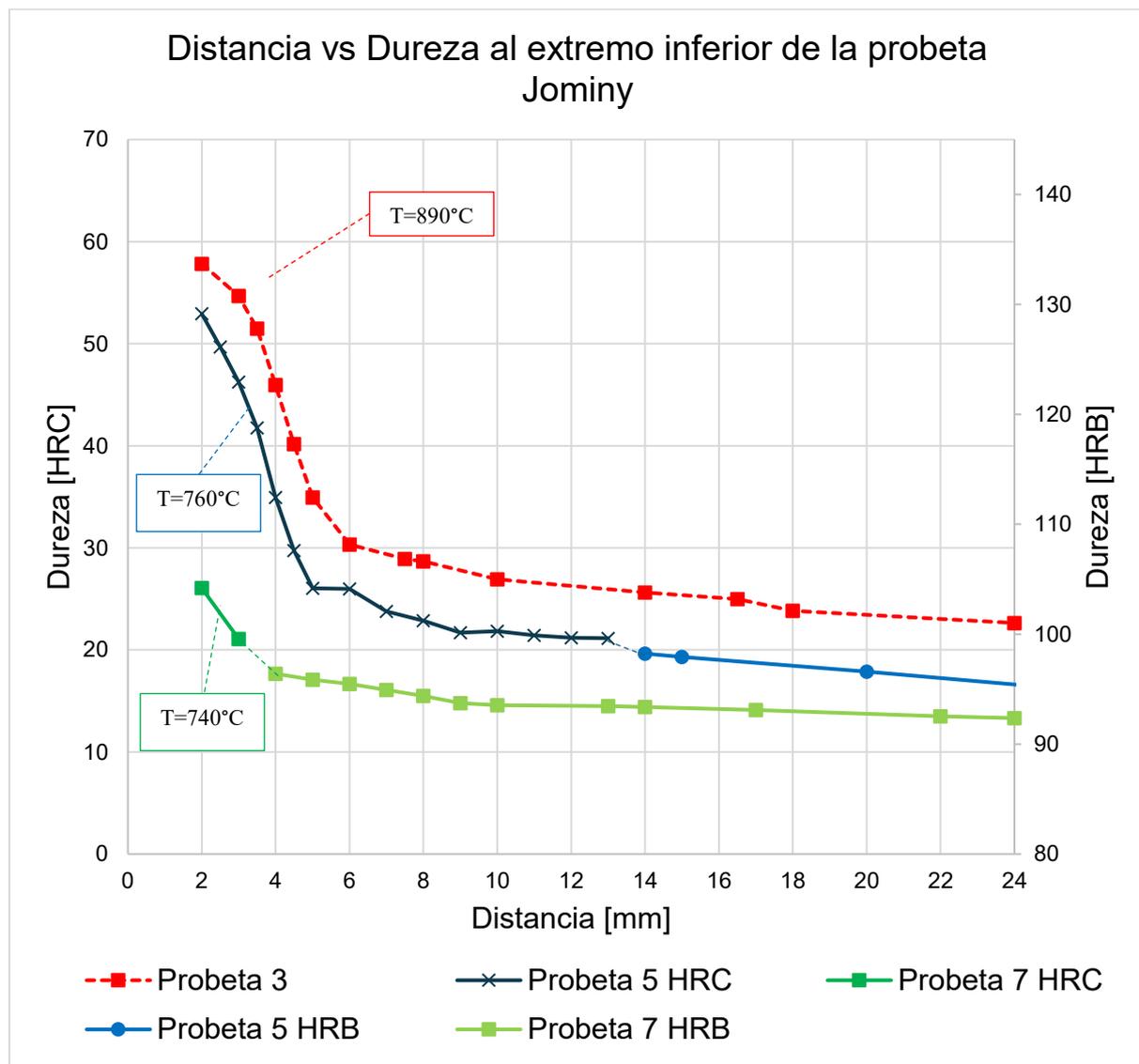


Figura 34. Gráfico de dureza vs distancia al extremo inferior de la probeta Jominy expuesto directamente al chorro de agua durante el ensayo

4.3. Determinación de las curvas de enfriamiento durante el ensayo Jominy

4.3.1. Simulación del ensayo Jominy

En las figuras 35, 36 y 37 se muestra los resultados de la simulación térmica de la probeta Jominy para las 3 condiciones de calentamiento, según las condiciones iniciales, condiciones de borde y propiedades físicas del material el cual se describió en el capítulo 2.

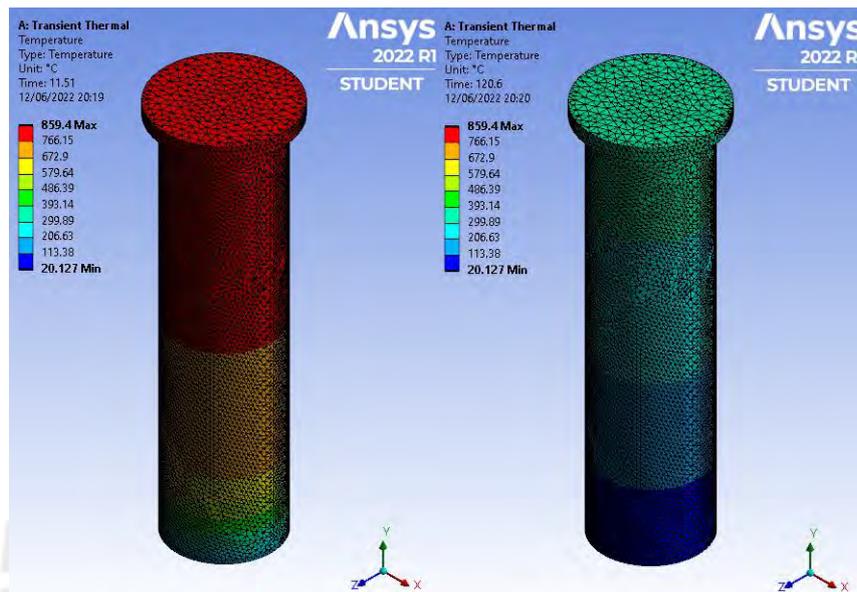


Figura 35. Estado térmico de la condición 1 (890°C) después de 10 segundos (lado derecho) y 120 segundos (lado izquierdo) de enfriamiento

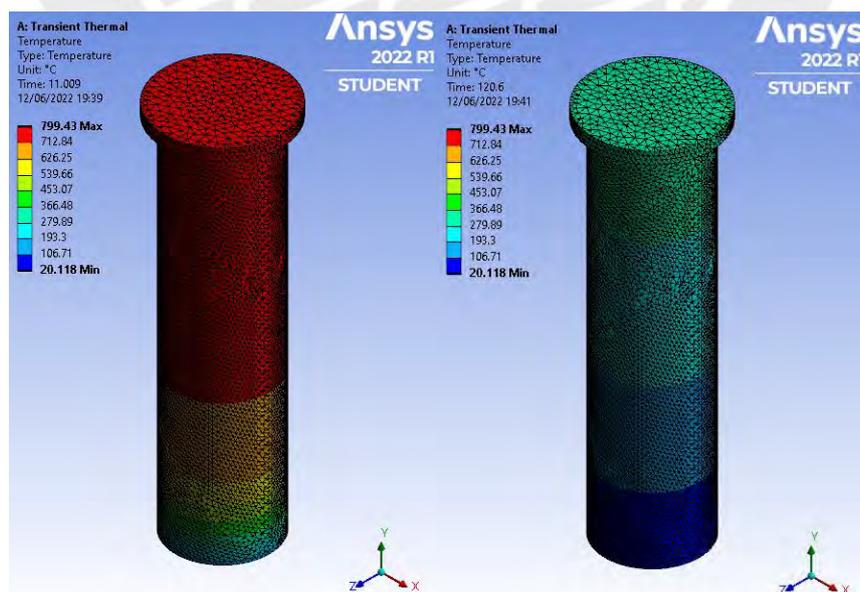


Figura 36. Estado térmico de la condición 2 (760°C) después de 10 segundos (lado derecho) y 120 segundos (lado izquierdo) de enfriamiento

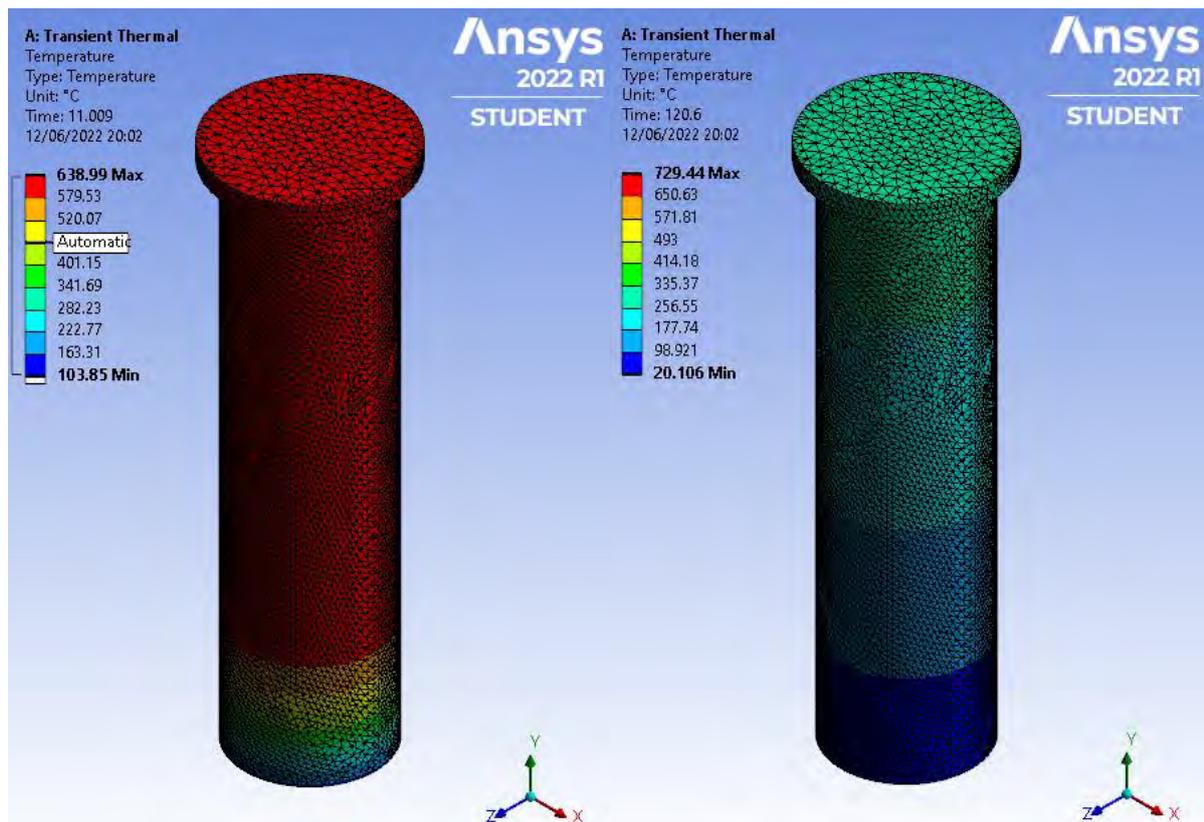


Figura 37. Estado térmico de la condición 3 (740°C) después de 10 segundos (lado derecho) y 120 segundos (lado izquierdo) de enfriamiento

4.3.2. Validación del modelo del ensayo Jominy

Se utilizaron datos experimentales obtenidos por el autor Cesar Nunura [20] donde registró las curvas de enfriamiento de una probeta Jominy austenizado a una temperatura de 900°C.

Las curvas de enfriamiento evaluadas por el autor anteriormente mencionado son obtenidas a partir de distancias de 1.6mm, 4.8mm y 12.7mm al extremo templado. La grafica de los resultados experimentales de dicho autor y los resultados obtenidos por la simulación numérica del presente estudio, a través de las condiciones propuestas en el capítulo 2 y empleando una temperatura de austenización de 900°C, se muestran en la figura 38.

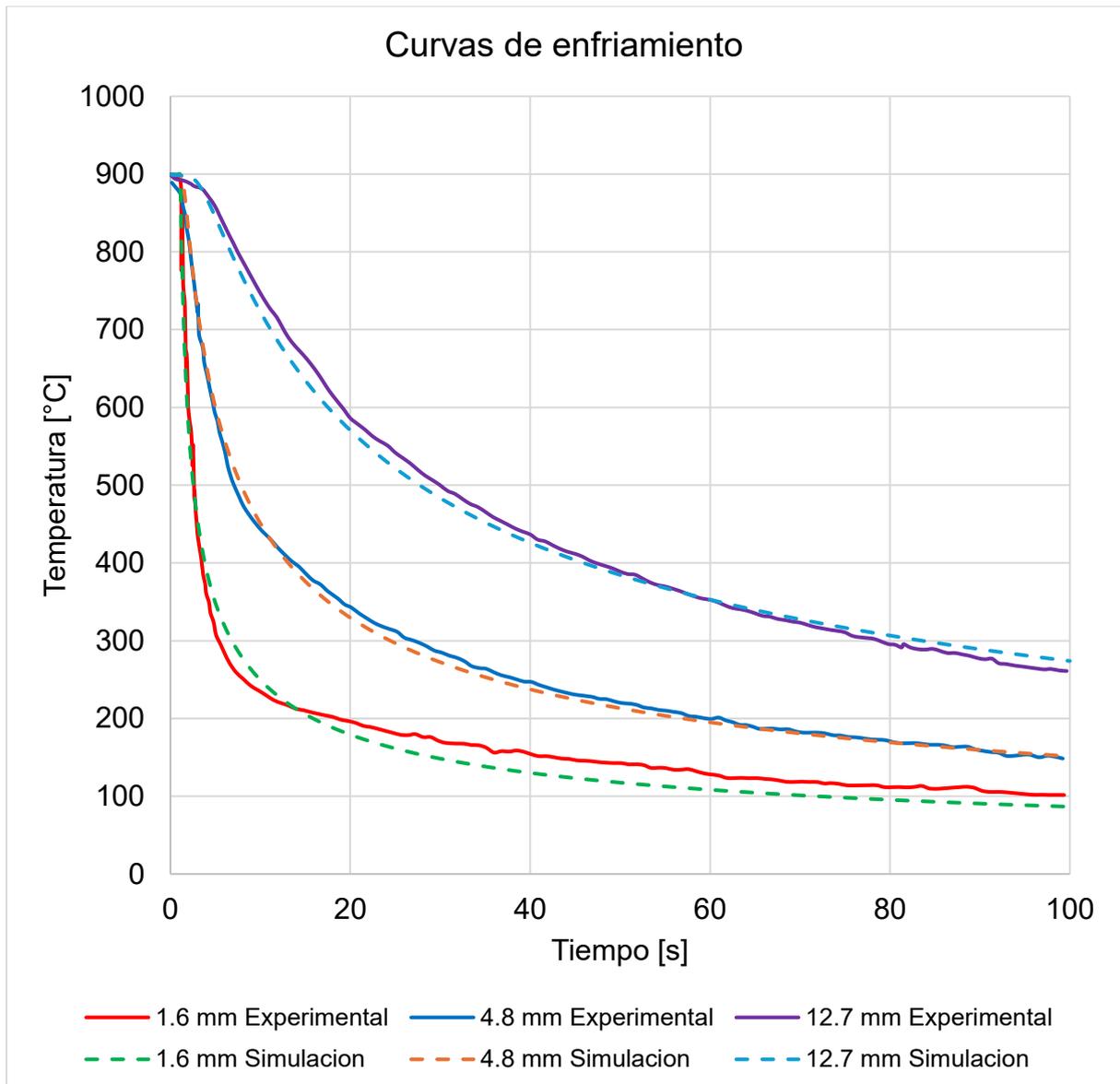


Figura 38. Curvas de enfriamiento experimentales de acuerdo con C. Nunura [20] y curvas obtenidas por simulación empleando una temperatura de austenización de 900°C.

Se observa en la figura 38, que las curvas experimentales y simuladas mantienen valores aproximadamente iguales a lo largo del tiempo. Para evaluar el error del modelo, se extrajo una muestra de 20 valores que se encuentran entre la temperatura máxima (900°C) y la temperatura de inicio de la transformación martensítica (345°C) para cada distancia debido a que es el rango de interés.

En la figura 39 se muestra la variación del error con respecto al tiempo para cada distancia.

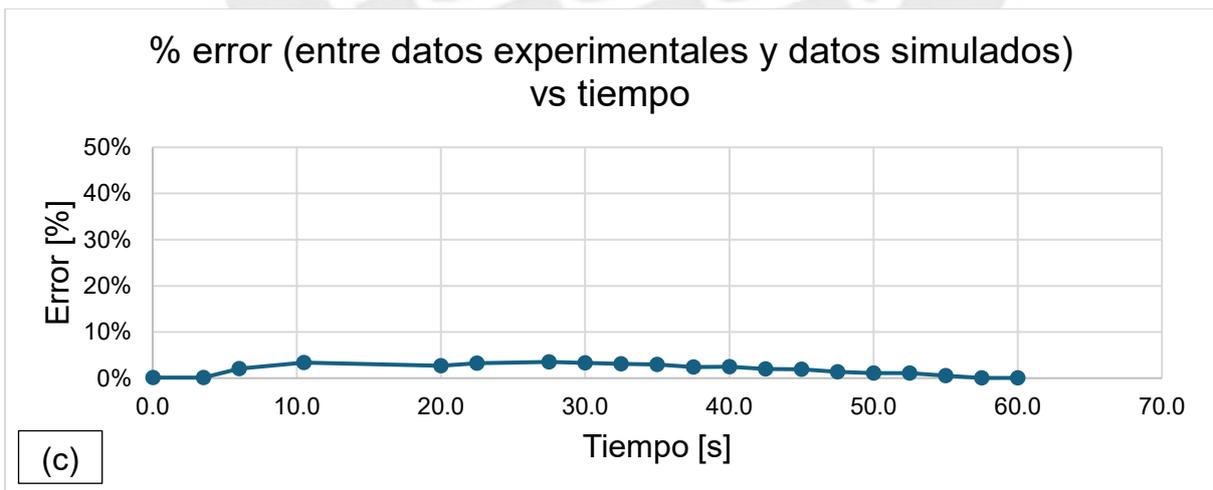
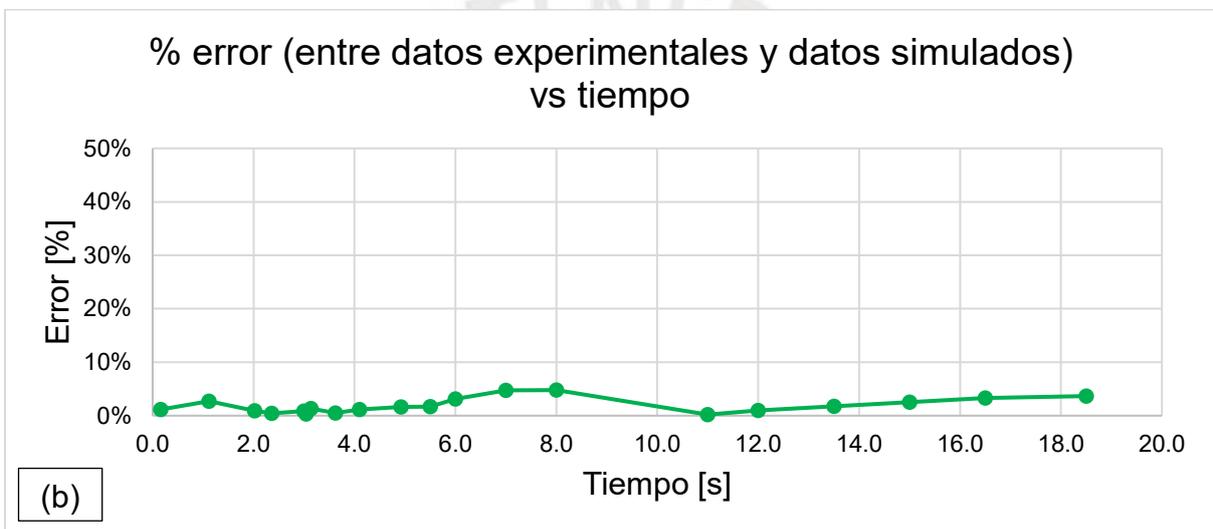
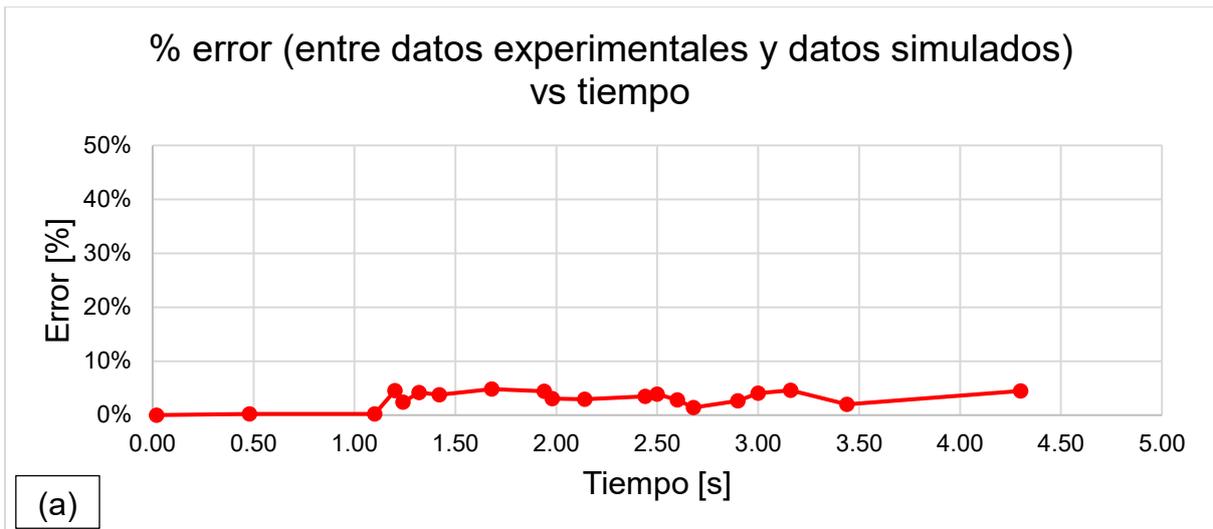


Figura 39. Graficas de error vs tiempo a) Distancia de 1.6mm b) Distancia de 4.8mm, c) Distancia de 12.7mm del extremo templado de la probeta Jominy.

Se observa en la figura 39 que el error entre los datos experimentales y los datos obtenidos por simulación numérica, para cada distancia al extremo templado, no sobrepasa el 5% lo cual indica que los valores de temperatura obtenidas mediante simulación tendrán un error máximo del 5% entre la temperatura máxima y la temperatura de inicio de la transformación martensítica. De esta manera, los resultados obtenidos a partir de la simulación tendrán una confianza del 95% para los casos a evaluar.

4.3.3. Curvas de enfriamiento

Las curvas de enfriamiento fueron obtenidas a partir de las distancias evaluadas en las mediciones de dureza de la tabla 18. Las curvas de enfriamiento para cada condición de estudio se muestran en las figuras 40, 41 y 42.

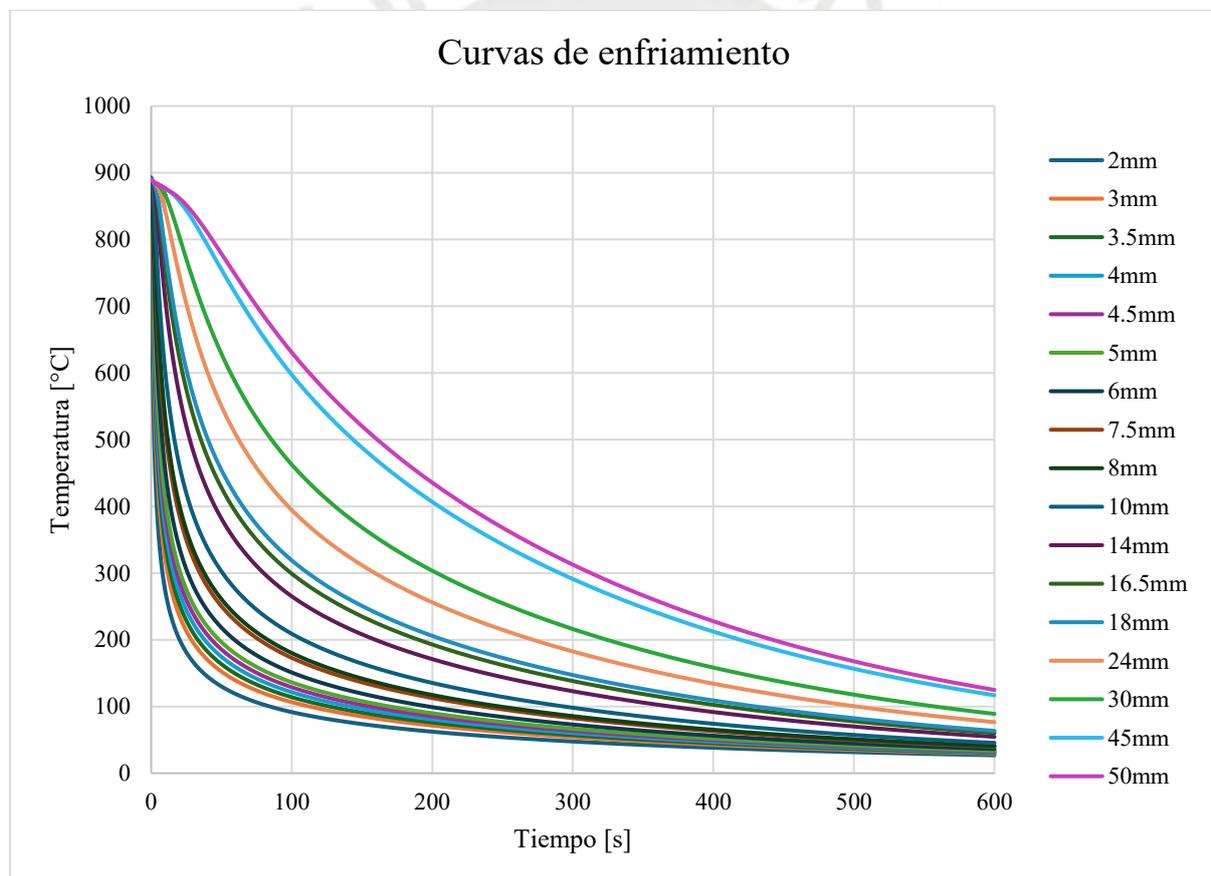


Figura 40. Curvas de enfriamiento para la condición 1 ($T_{max}=890^{\circ}\text{C}$)

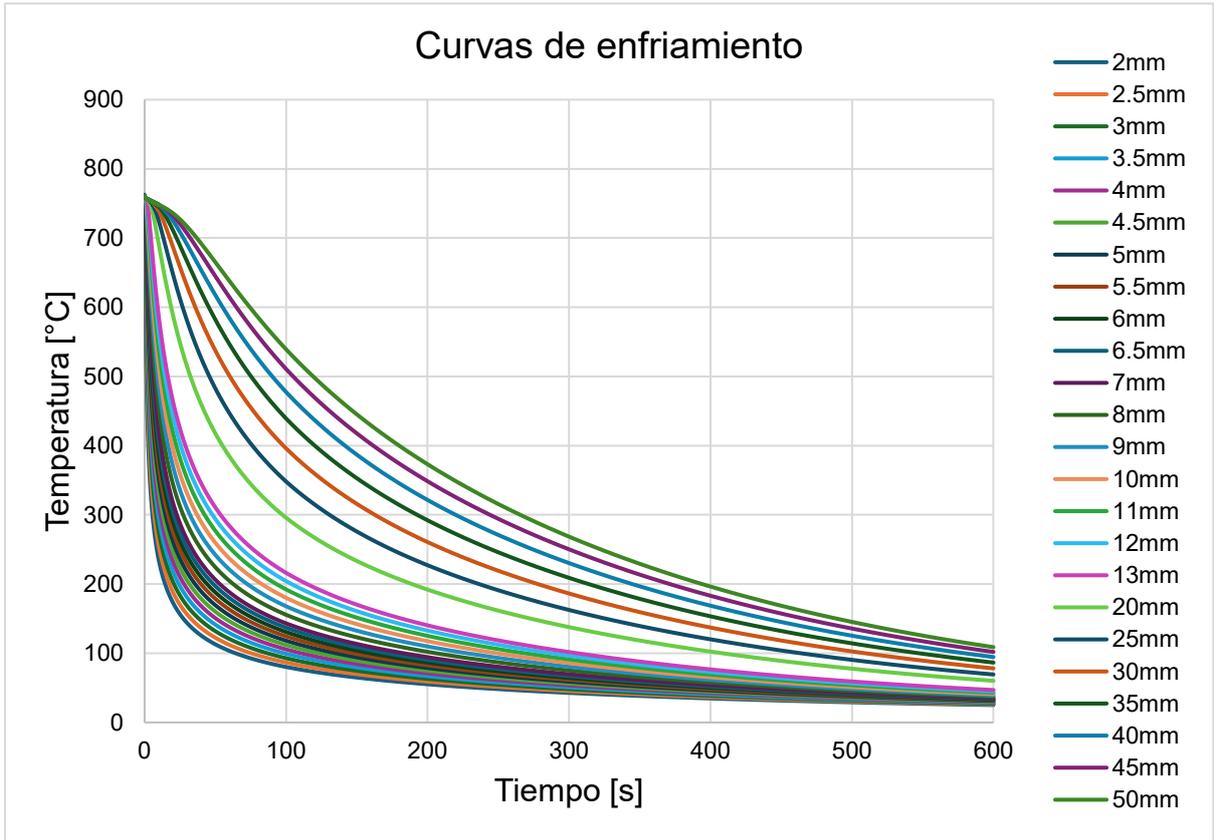


Figura 41. Curvas de enfriamiento para la condición 2 ($T_{max}=760^{\circ}\text{C}$)

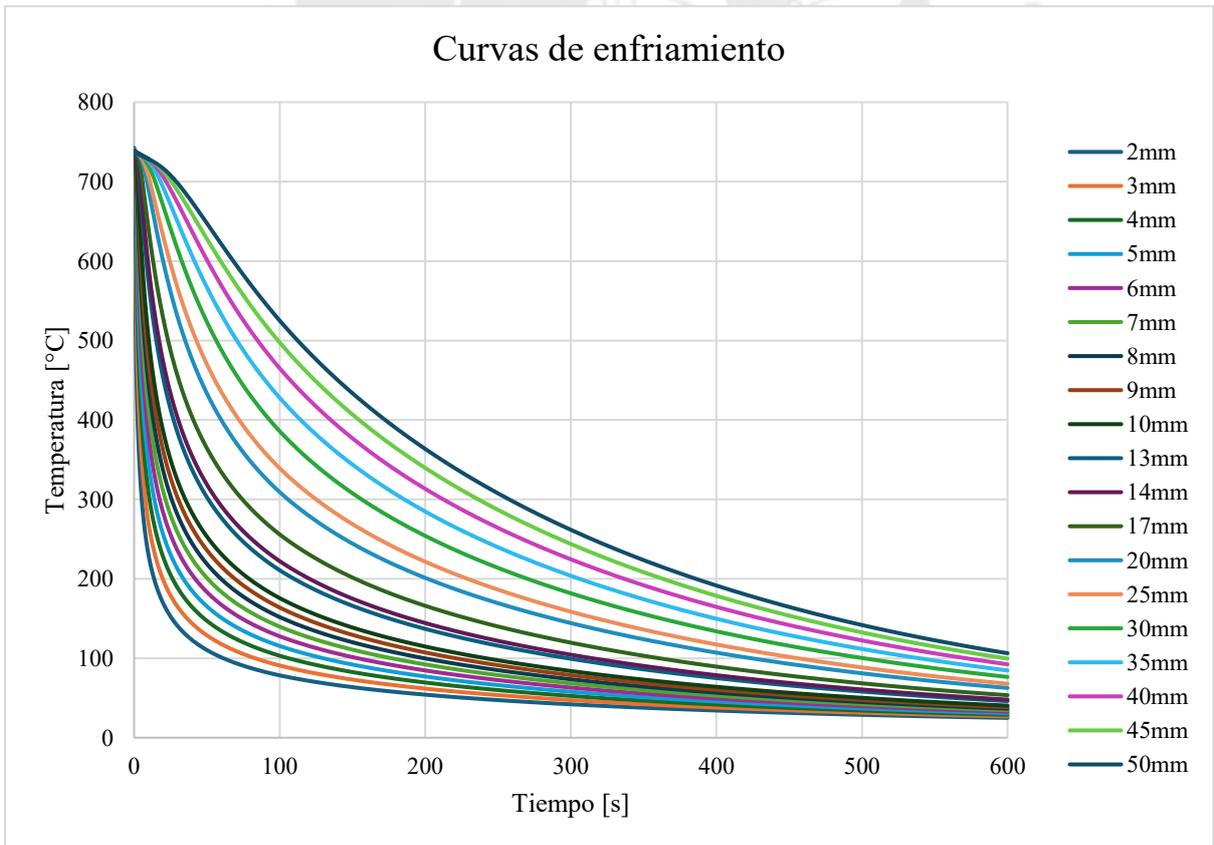


Figura 42. Curvas de enfriamiento para la condición 3 ($T_{max}=740^{\circ}\text{C}$)

A partir de las gráficas de las curvas de enfriamiento, se observa durante los primeros 200-300 segundos y para distancias cercanas al extremo templado, grandes cambios de temperatura por lo cual el mecanismo de transferencia de calor que predomina en este rango es por convección forzada. Asimismo, se observa que el enfriamiento es más lento a partir de los 200 segundos y conforme la distancia se aleja del extremo templado. Por ello, el mecanismo de transferencia de calor que predomina es la convección natural del ambiente.

4.4. Velocidades de enfriamiento

A partir de los resultados obtenidos de las curvas de enfriamiento para cada condición (temperaturas de ensayo Jominy de 890°, 760°, 740°C) y mediante la expresión (3) propuesta por Cesar Nunura [20], se calcularon las velocidades de enfriamiento para cada distancia empleada en la medición de la dureza después del ensayo Jominy y se muestra en la tabla 18.

$$\dot{T} = \frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{T_a - T_{MI}}{\Delta t} \quad (3)$$

Donde:

- T_a : Temperatura de austenización o calentamiento
- T_{MI} : Temperatura de inicio de la transformación martensítica
- Δt : Intervalo de tiempo desde T_a a T_{MI}

La figura 43 muestra los resultados obtenidos de la tabla 19 donde las velocidades de enfriamiento a lo largo de la generatriz de la probeta Jominy, son prácticamente similares para las 3 condiciones en estudio.

La razón de este comportamiento es debido a que, para el modelo numérico desarrollado del enfriamiento de la probeta Jominy, se ha considerado los mismos parámetros térmicos (propiedades del material) y las mismas condiciones de transferencia de calor (convección forzada, natural y radiación del ambiente) para las 3 temperaturas de calentamiento.

Tabla 19. Velocidades de enfriamiento para cada condición estudiada

Condición 1		Condición 2		Condición 3	
d [mm]	\dot{T} [°C/s]	d [mm]	\dot{T} [°C/s]	d [mm]	\dot{T} [°C/s]
2	100	2	106.4	2	108.52
3	64.5	2.5	86.1	3	72.61
3.5	54.77	3	71.6	4	52.53
4	47.39	3.5	60.3	5	39.82
4.5	40.52	4	51.7	6	31.6
5	35.16	4.5	44.8	7	25.48
6	28.68	5	39.5	8	20.79
7.5	21.37	5.5	34.6	9	17.95
8	19.46	6	30.7	10	15.19
10	14.34	6.5	27.7	13	10.39
14	8.93	7	25.2	14	9.29
16.5	7.12	8	20.8	17	7.05
18	6.3	9	17.7	20	4.88
24	4.36	10	15.1	25	4.09
30	3.3	11	13.2	30	3.16
45	2.22	12	11.7	35	2.63
50	1.58	13	10.4	40	2.26
-	-	20	5.6	45	2.03
-	-	25	4.2	50	1.84
-	-	30	3.2	-	-
-	-	35	2.7	-	-
-	-	40	2.3	-	-
-	-	45	2	-	-
-	-	50	1.8	-	-

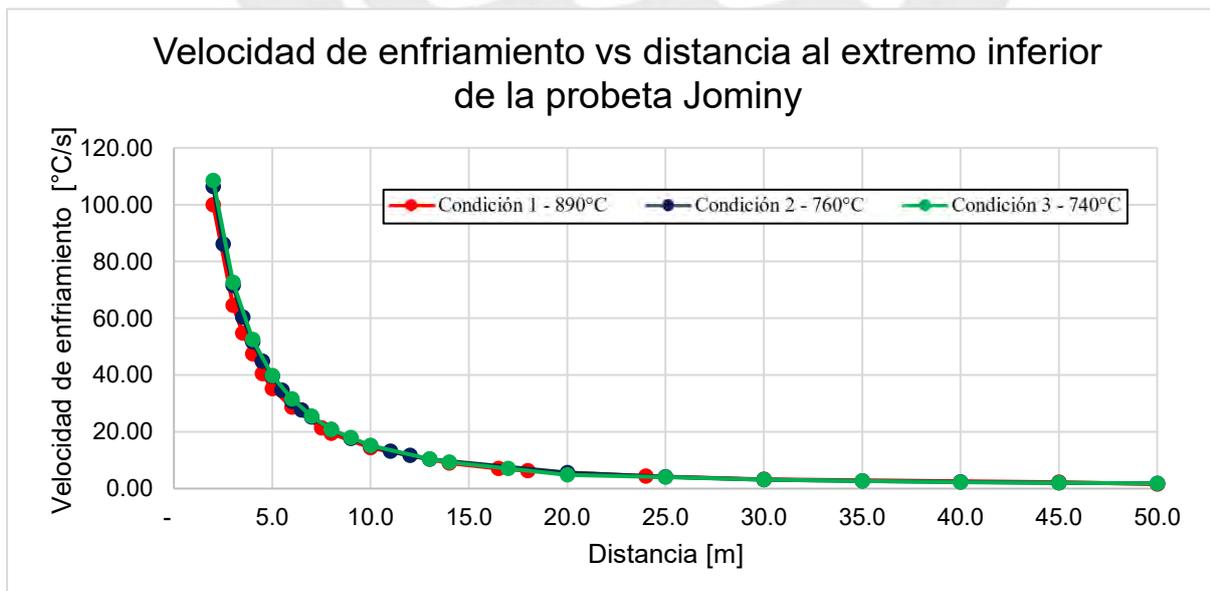


Figura 43. Velocidad de enfriamiento vs distancia al extremo inferior de la probeta Jominy para las condiciones en estudio (890°C, 760°C y 740°C)

En la figura 44.a se muestra el circuito térmico donde la energía térmica $[\dot{Q}]$ se conduce a través del material hasta alcanzar los límites de la probeta (extremo inferior y área lateral) dando a lugar a los mecanismos de convección forzada $[R_{conv,agua}]$ (contacto entre el chorro de agua y material), convección natural $[R_{conv,aire}]$ (contacto entre el material y aire ambiental) y radiación del ambiente.

Luego, en la figura 44.b, para un instante después de iniciar el enfriamiento y para una distancia cercana al extremo inferior de la probeta Jominy, un mayor porcentaje del flujo de calor $[\dot{Q}]$ se transmite hacia el agua (95%) debido a una menor resistencia al flujo de calor que este mecanismo posee. Por esta razón, se observa altas velocidades de enfriamiento a distancias cercanas al extremo templado y, conforme la distancia se aleja de este extremo, su efecto disminuye, dando a lugar enfriamientos más lentos propio de la convección natural y radiación del ambiente, lo cual corresponde a lo observado en la figura 43.

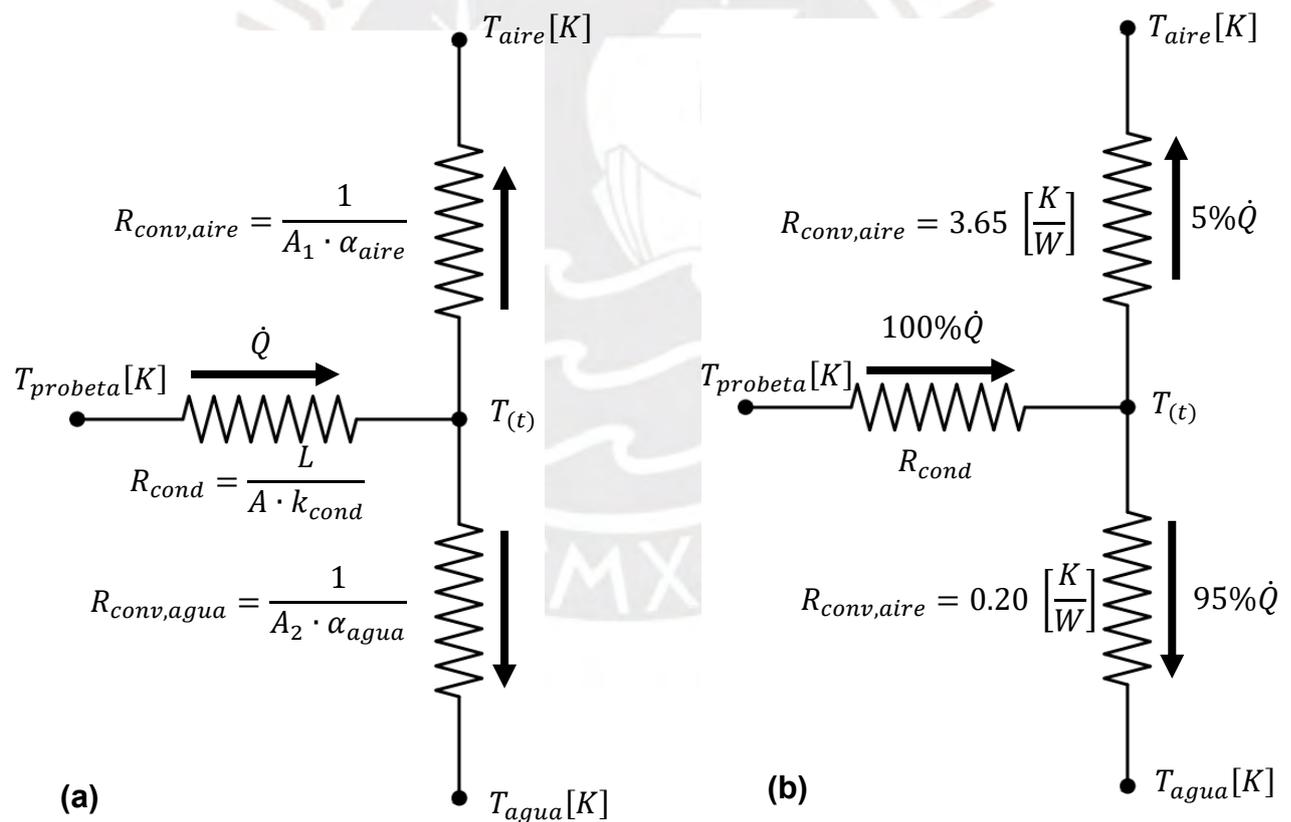


Figura 44. (a) Esquema del circuito térmico durante el enfriamiento de la probeta Jominy y (b) Circuito térmico para un instante después del contacto del chorro de agua en el extremo inferior

4.5. Análisis de relación de la dureza y tasa de enfriamiento

A partir de los resultados de la dureza y tasas de enfriamiento para las condiciones en estudio, se obtiene la siguiente figura:

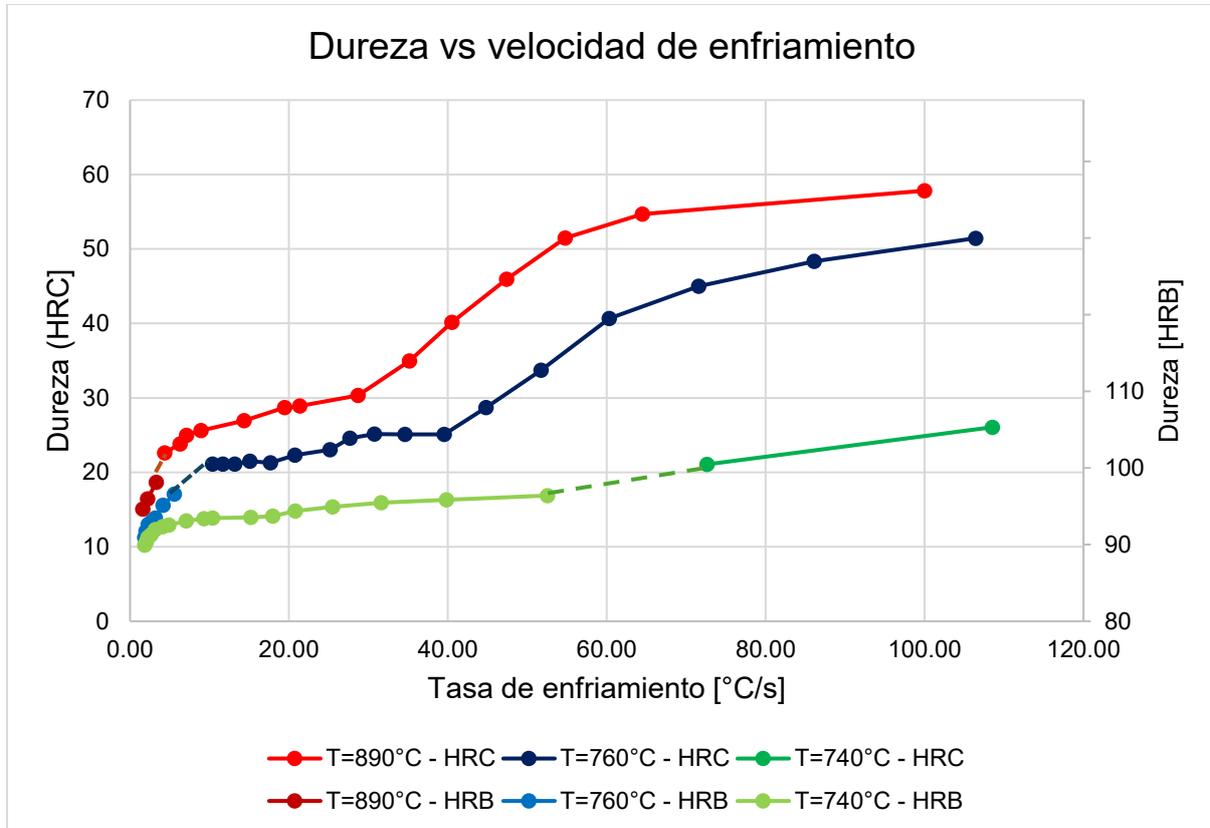


Figura 45. Grafica de dureza vs velocidad de enfriamiento

Se observa en la figura 45 un aumento creciente de la dureza conforme se aumenta la velocidad de enfriamiento para las condiciones estudiadas. Este comportamiento es el esperado debido a que la presencia de altas velocidades de enfriamiento favorece la formación de fases más duras como se estudiará en el inciso 4.6. Por otro lado, se observa que, diferentes velocidades de enfriamiento y condiciones iniciales (temperaturas de calentamiento) pueden producir condiciones microestructurales en el material que tengan durezas similares. Así, por ejemplo, de los resultados obtenidos se aprecia que una dureza de 25 HRC, se puede obtener por medio de una temperatura de calentamiento de 740°C y una alta velocidad de enfriamiento (100°C/s), o a través de una temperatura de 760°C y una velocidad media-alta (20-40 °C/s) o con una temperatura de calentamiento de 890°C con una velocidad de enfriamiento media-baja (10 °C/S). Este comportamiento se estudiará a más detalle en el inciso 4.7.

4.6. Análisis de la microestructura

Las siguientes micrografías que se aprecian en este inciso, constituyen el registro fotográfico de la microestructura representativa para cada distancia (al extremo inferior de la probeta Jominy) en estudio y para las 3 condiciones de calentamiento bajo las cuales se realizó el ensayo Jominy. En el lado izquierdo se observa la micrografía, indicando las fases presentes, mientras que, en el lado derecho, se describe su dureza, la velocidad de enfriamiento obtenida mediante simulación numérica, y la distancia con respecto al extremo inferior de la probeta.

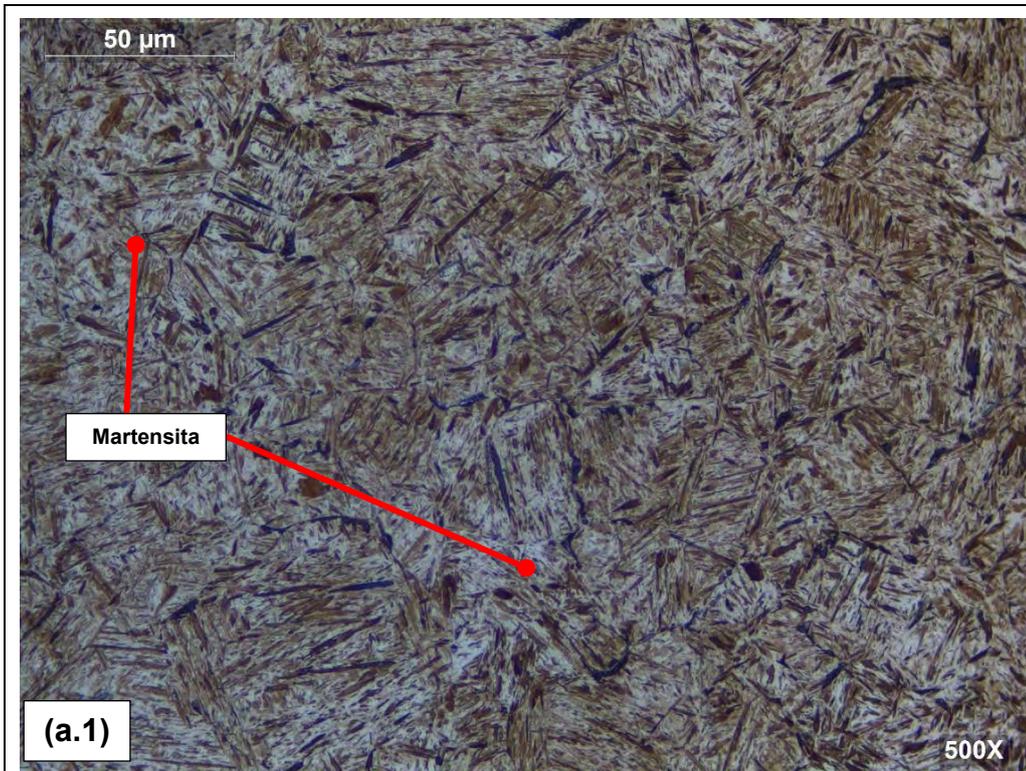
4.6.1. Análisis de la microestructura para un calentamiento de 890°C (austenización completa)

A continuación, se analizarán las micrografías obtenidas para la condición de calentamiento a 890°C para cada distancia indicada en la tabla 18.

Para un calentamiento de 890°C y a distancias muy cercanas al extremo de la probeta Jominy que estuvo en contacto con el chorro de agua (extremo templado), se observó una microestructura constituida principalmente por una matriz martensítica (figura 46.a) donde se además parecen identificarse pequeñas zonas de bainita que, a diferencia de la perlita, presenta una morfología acircular (agujas) (figura 46.b.1), debido a la exposición a velocidades de enfriamiento altas (figura 43). Esto tiene buena correspondencia con los altos valores de dureza medidos en esa zona y que se observan en la figura 34. Asimismo, se identificó la formación de un microconstituyente adicional, la perlita, debido a que posee una morfología aproximadamente poligonal y nuclea en los límites de grano de la austenita previa (figura 46.b.2 y figura 46.b.3).

Se reconoce una tendencia decreciente de la formación de la martensita para dar lugar a una mayor formación de perlita y bainita (morfología acircular o agujas), pero esta última en un menor grado para las distancias en estudio de la figura 46.

Este comportamiento corresponde a la reducción de la velocidad de enfriamiento, donde esta misma no es suficientemente alta para alcanzar la velocidad crítica de temple, dando a lugar a los microconstituyentes anteriormente mencionados.



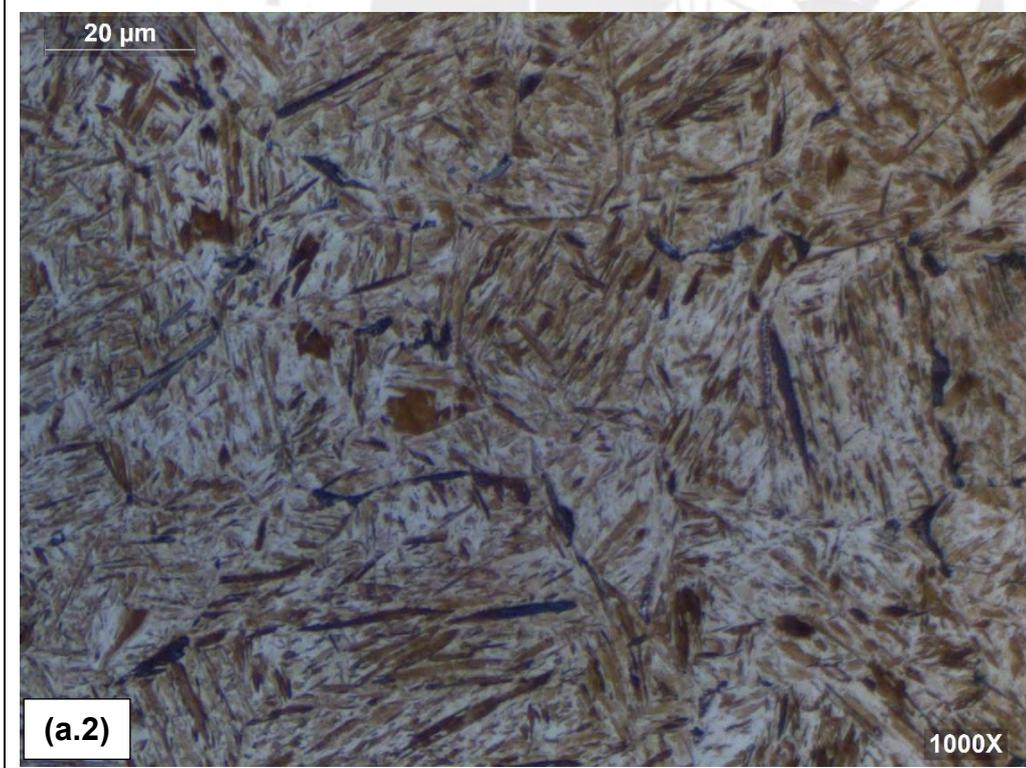
Distancia: 2mm

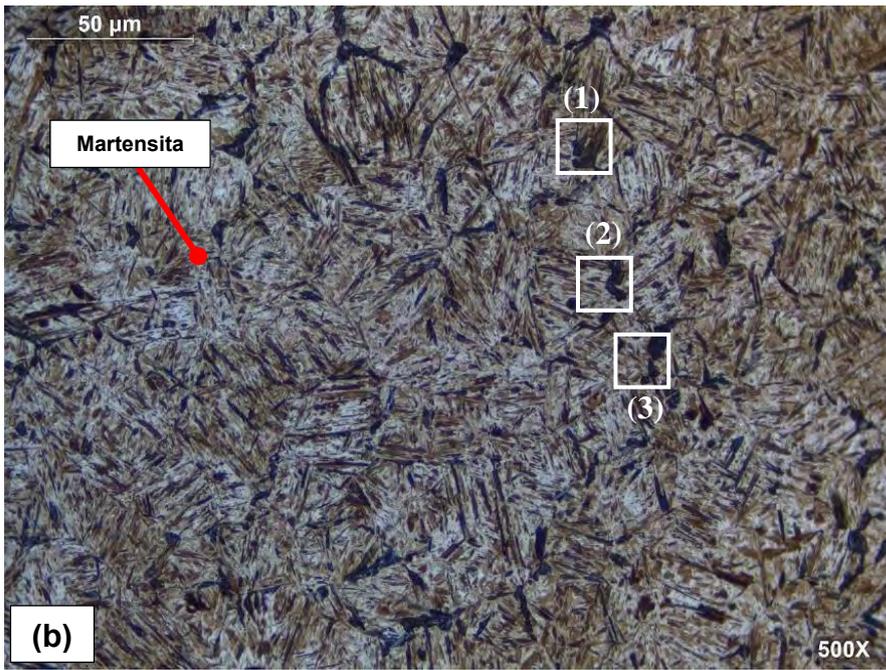
Dureza: 57.83 HRC

$\dot{T} = 100 \text{ }^\circ\text{C/s}$

Fases presentes:

- Martensita





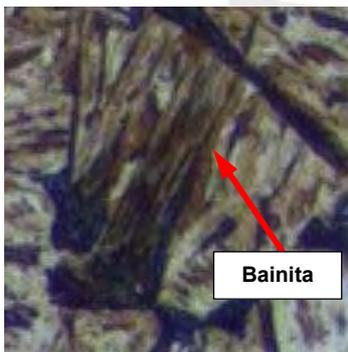
Distancia: 3mm

Dureza: 54.67 HRC

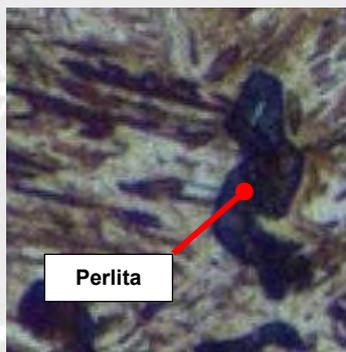
$\dot{T} = 64.5 \text{ } ^\circ\text{C/s}$

Fases presentes:

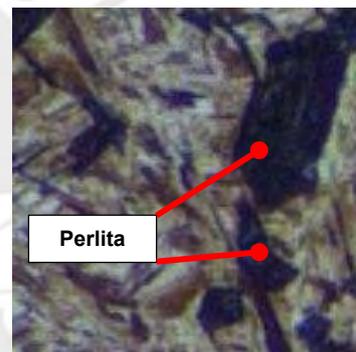
- Martensita
- Bainita
- Perlita



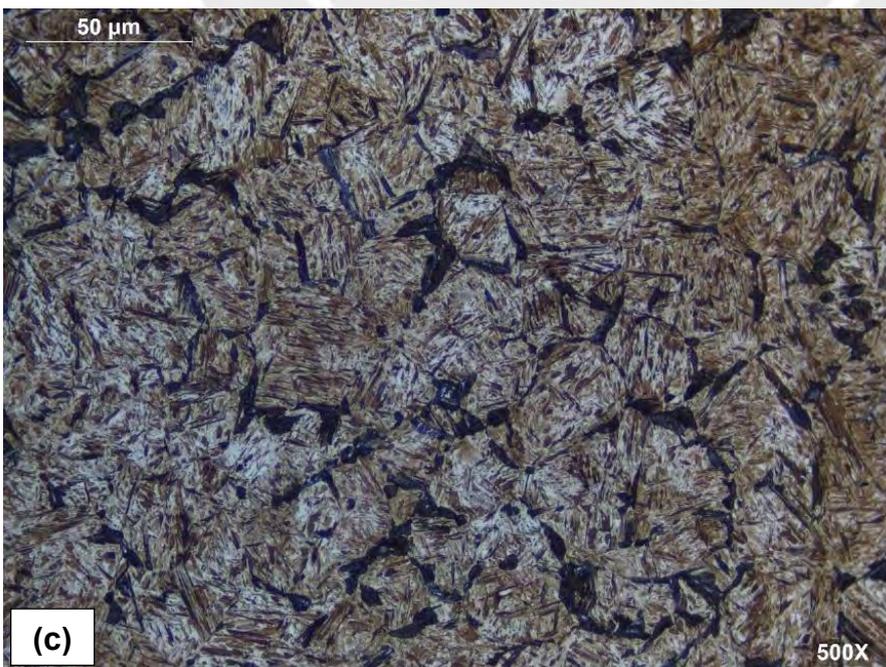
(1)



(2)



(3)



Distancia: 3.5mm

Dureza: 51.47 HRC

$\dot{T} = 54.77 \text{ } ^\circ\text{C/s}$

Fases presentes:

- Martensita
- Bainita
- Perlita

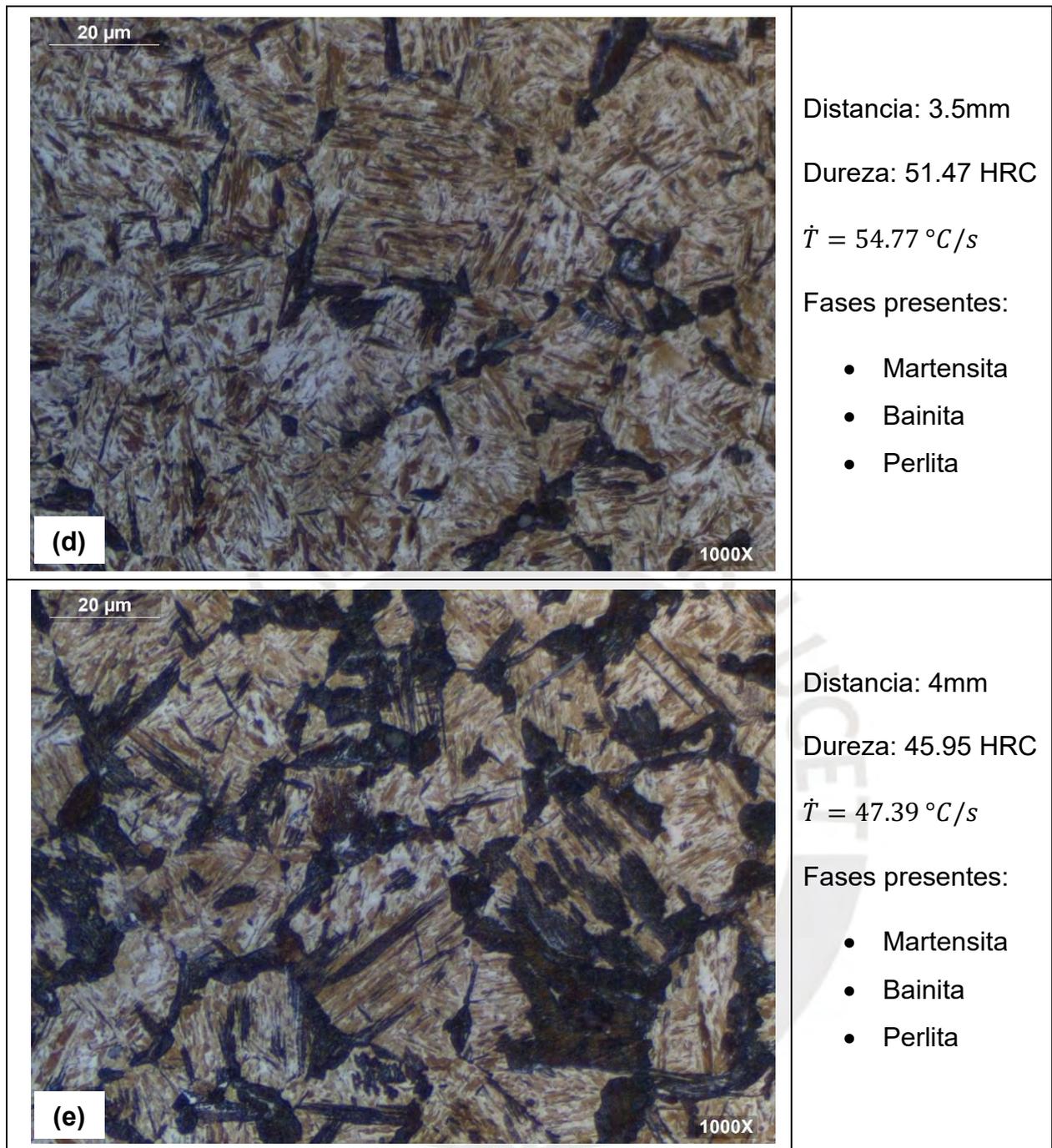
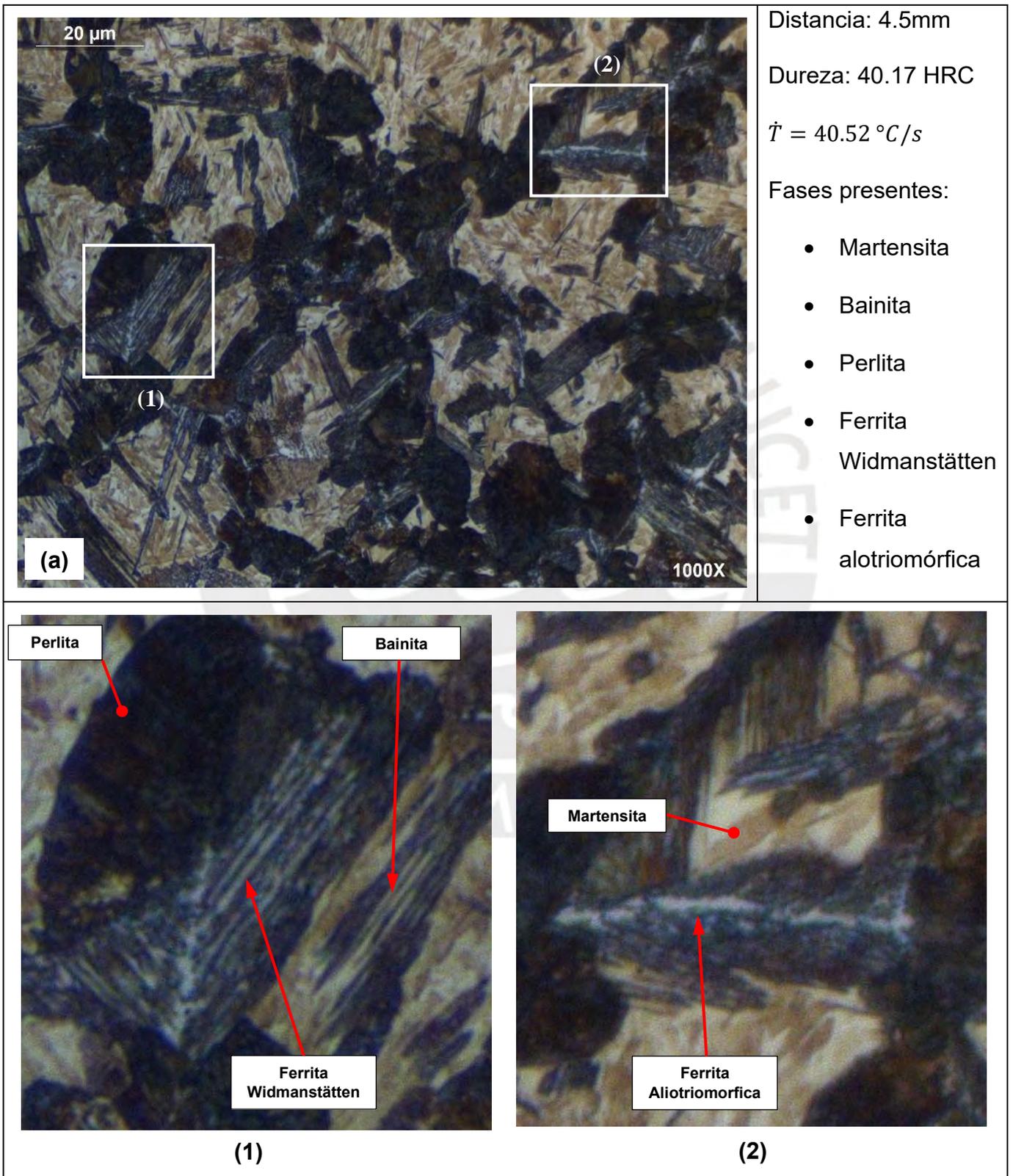
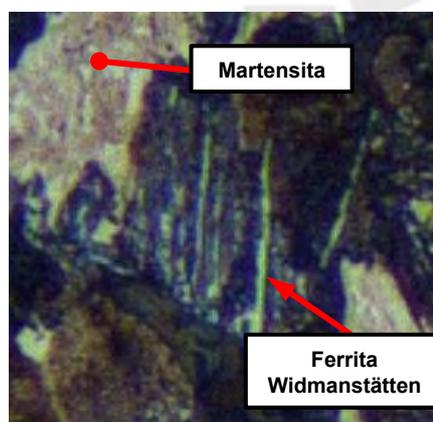
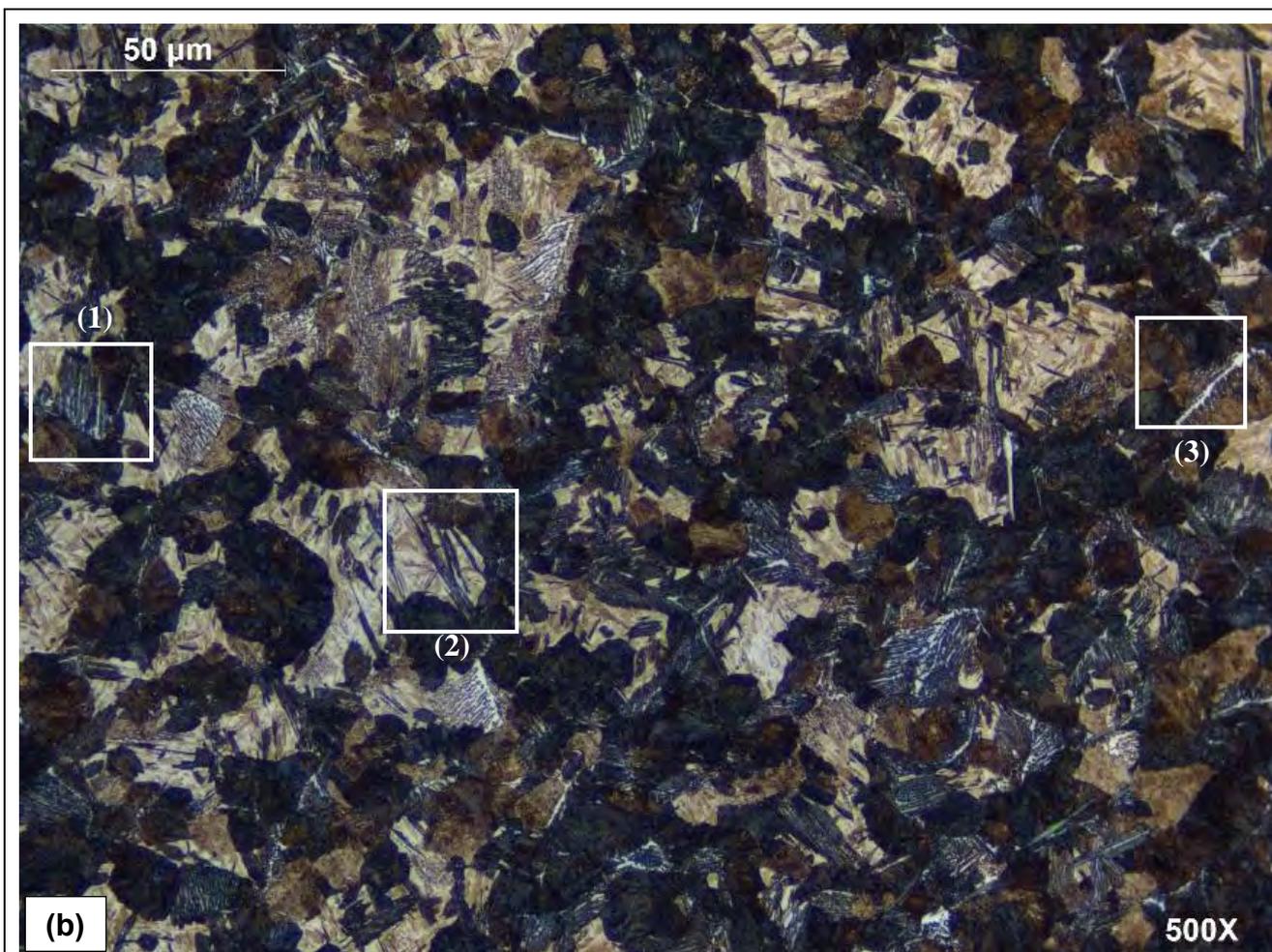


Figura 46. Metalografía correspondiente a la probeta Jominy de la condición 1 (890°C) para las distancias de 2 mm, 3 mm, 3.5mm y 4 mm con respecto su extremo inferior

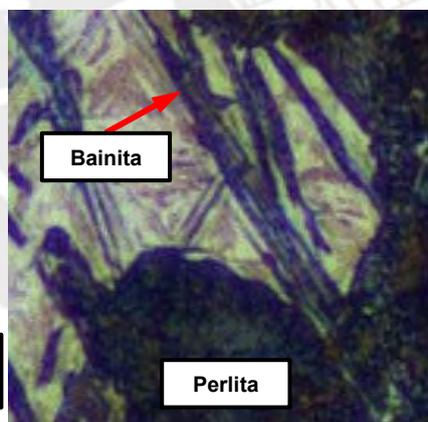
Para velocidades de enfriamiento menores a 40°C/s, se mantiene la formación de martensita, perlita y aparentemente bainita (figura 47.b); y se identificó la formación de un microconstituyente adicional, la ferrita, en dos tipos de morfología: ferrita Widmanstätten y ferrita aliotriomorfa.

La ferrita aliotriomorfica (figura 47.a.2) se formó en los límites de grano de la austenita previa, y, a partir de sus bordes, la ferrita Widmanstätten secundaria (figura 47.a.1). La ferrita Widmanstätten primaria (figura 47.c.1) se identificó por su morfología acircular, pero sin la presencia de ferrita alotriomórfica.





(1)



(2)



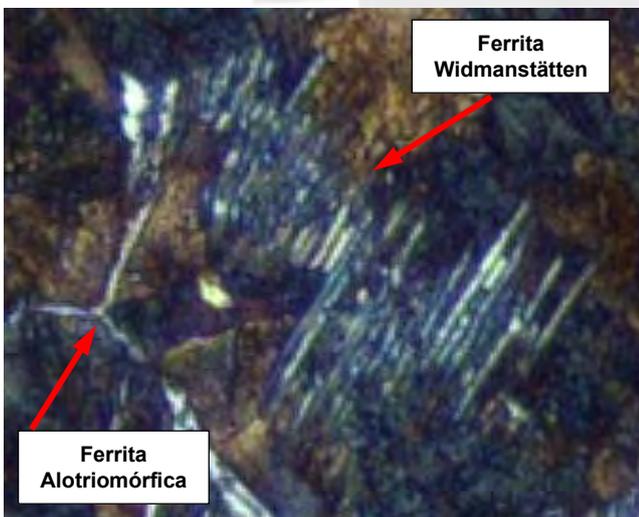
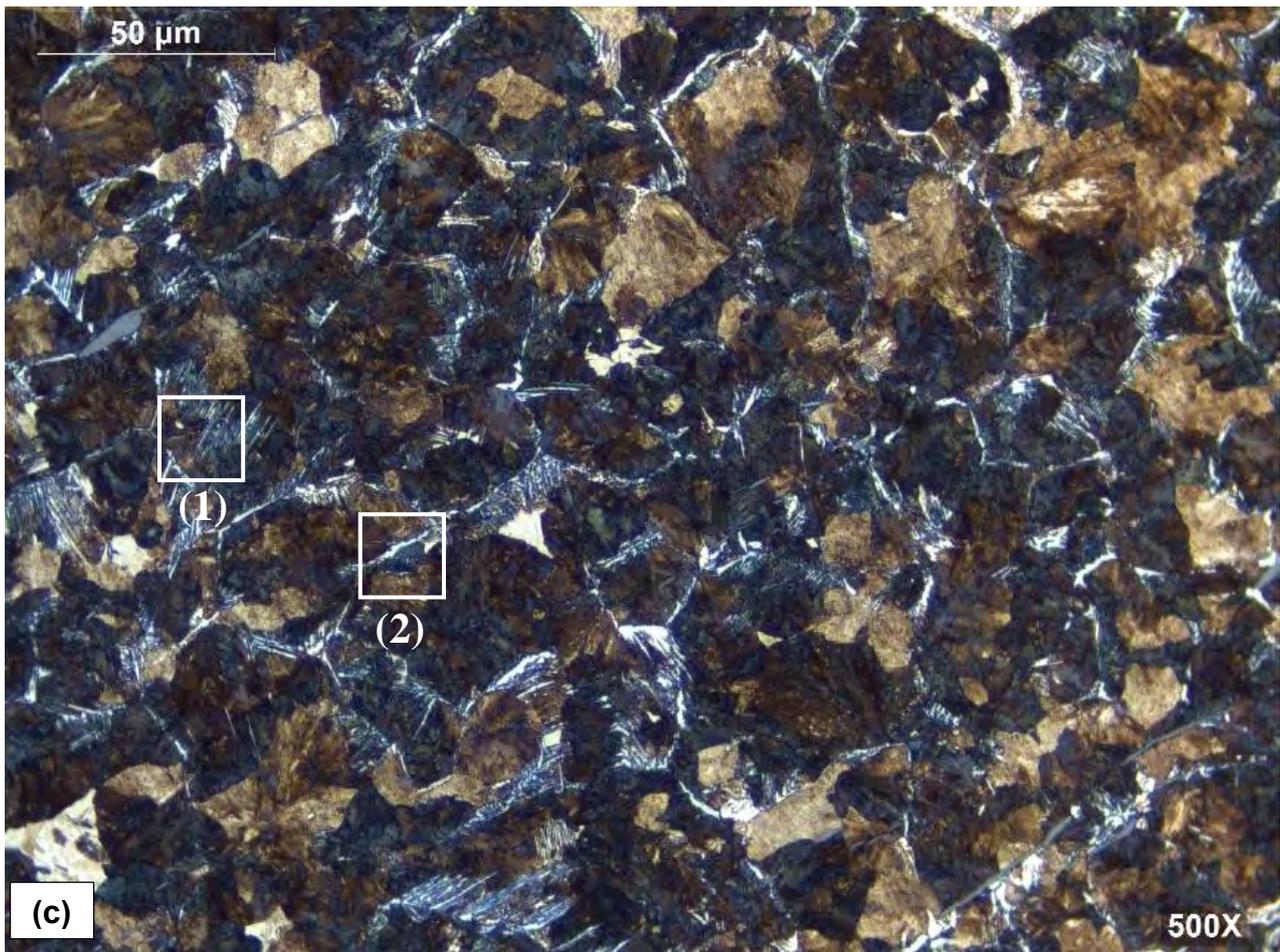
(3)

Distancia: 5mm
 Dureza: 34.94 HRC
 $\dot{T} = 35.16 \text{ } ^\circ\text{C/s}$

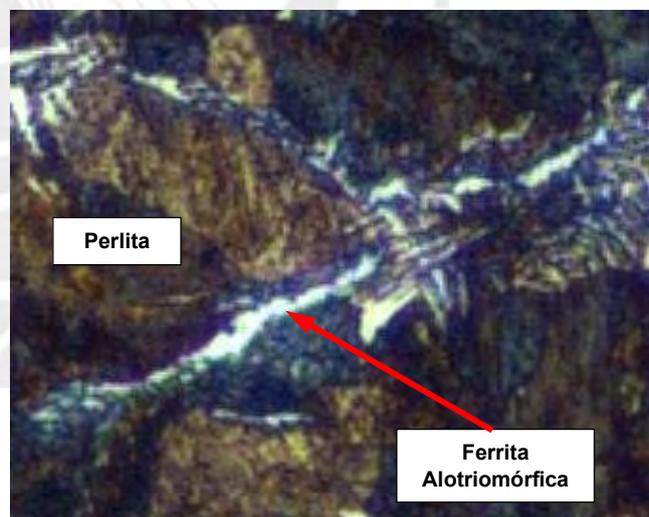
Fases presentes:

- Martensita
- Bainita

- Perlita
- Ferrita Widmanstätten
- Ferrita alotriomórfica



(1)



(2)

Distancia: 6mm
 Dureza: 30.31 HRC
 $\dot{T} = 28.68 \text{ } ^\circ\text{C/s}$

Fases presentes:

- Martensita
- Perlita

- Ferrita Widmanstätten
- Ferrita Alotriomórfica

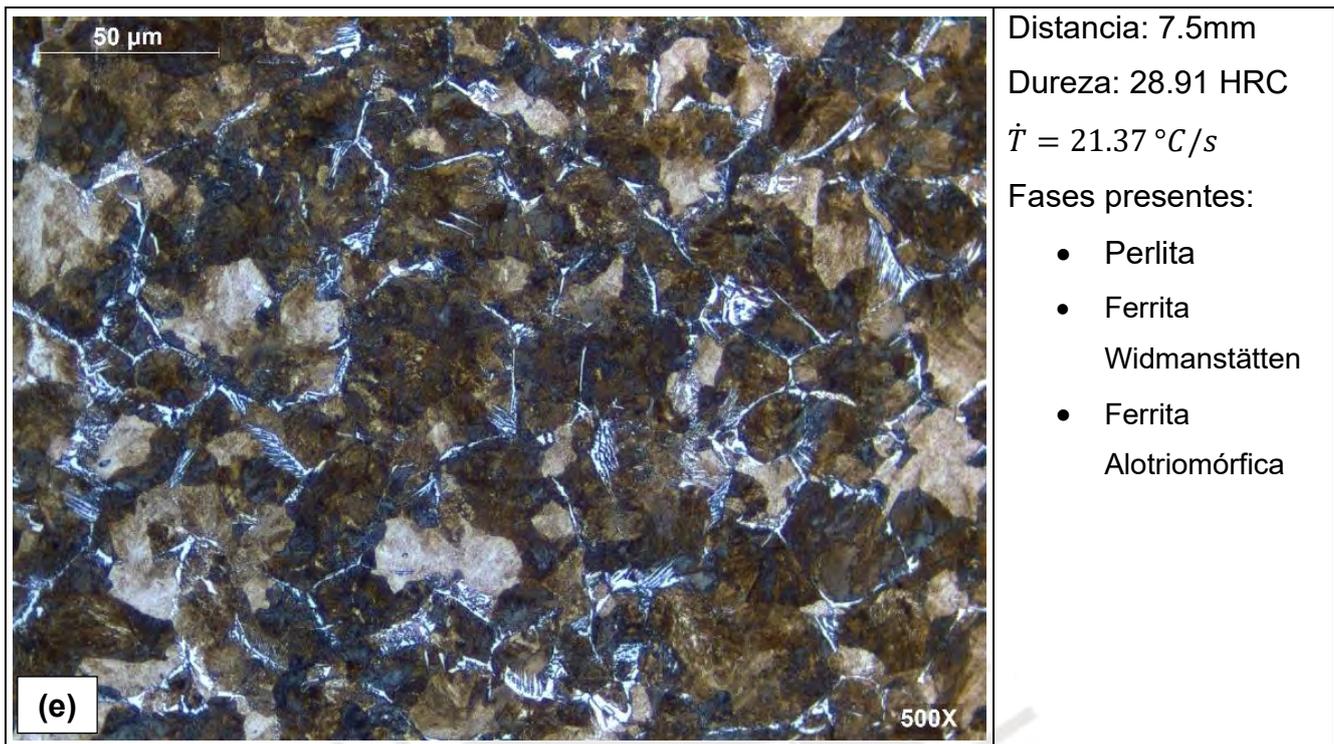
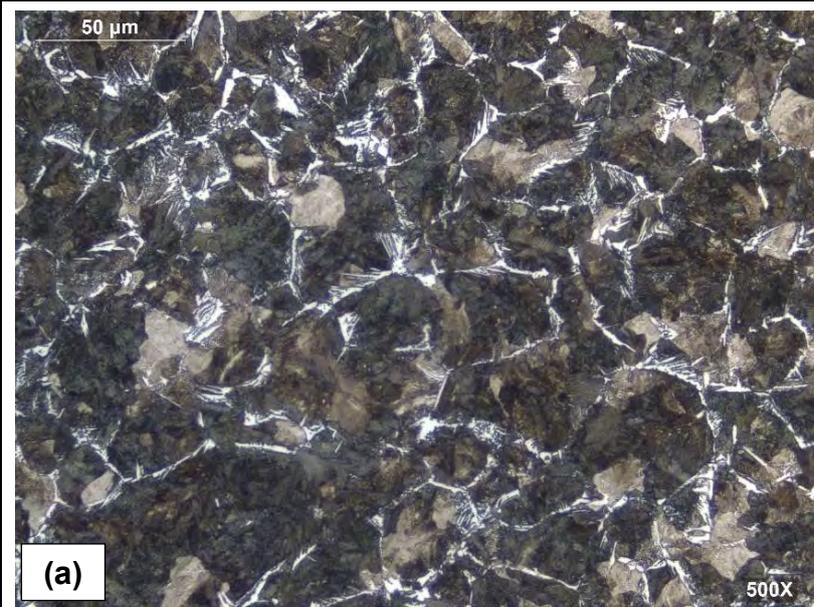


Figura 47. Metalografía correspondiente a la probeta Jominy de la condición 1 (890°C) para distancias de 4.5 mm, 5 mm, 6 mm y 7.5 mm con respecto su extremo inferior

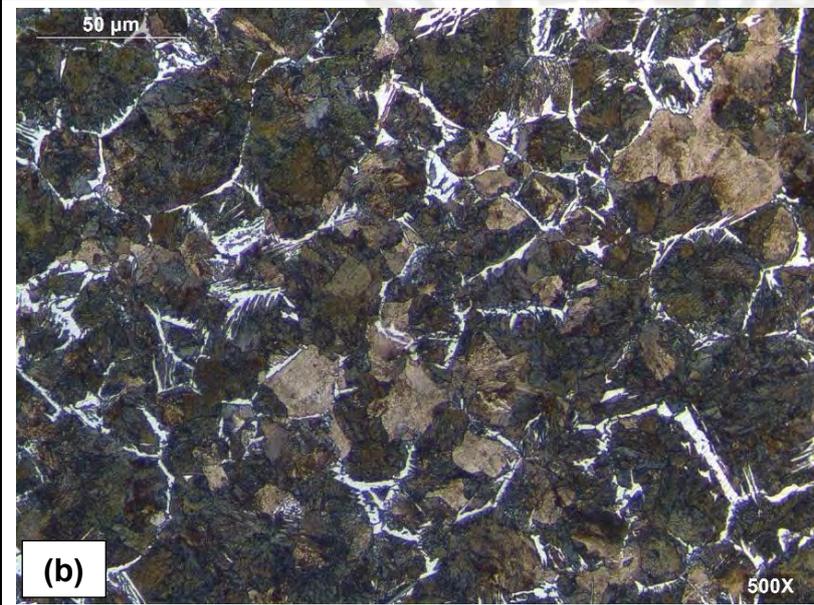
De la micrografía de las figuras 46 y 47, se observó la variación microestructural que comenzó a partir de una matriz martensítica (figura 46.a) hasta formar matriz perlítico-ferrítico (figura 47.d). En consecuencia, se redujo considerablemente la dureza, desde 58 HRC hasta 30 HRC, respectivamente, debido a la disminución de la velocidad de enfriamiento.

A partir de una velocidad de enfriamiento menor a 20°C/s, se aprecia únicamente la formación de perlita y ferrita en la microestructura (figura 48), cuya presencia de esta última va en aumento conforme se disminuye la velocidad de enfriamiento, por esta razón, la disminución de la dureza posee una pendiente menos pronunciada, para durezas menores de 30 HRC.



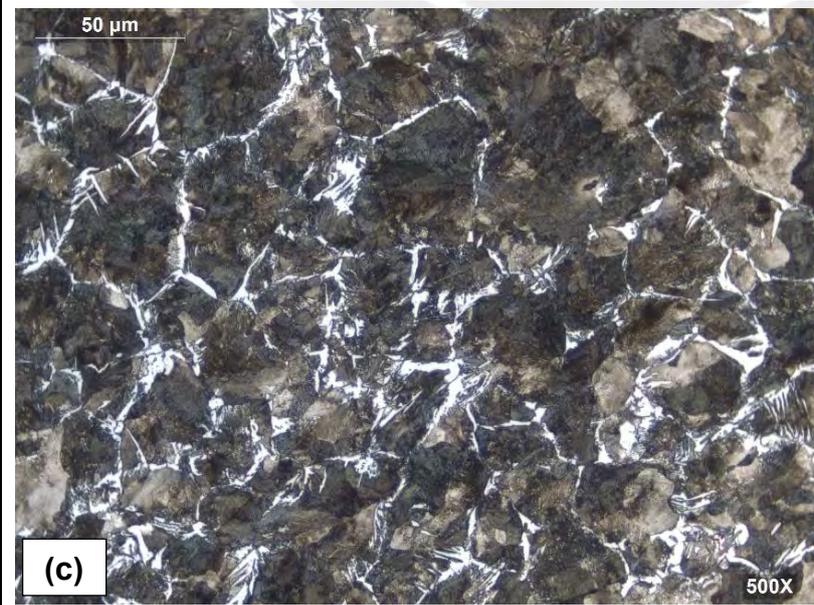
Distancia: 8 mm
 Dureza: 28.69 HRC
 $\dot{T} = 19.46 \text{ } ^\circ\text{C/s}$
 Fases presentes:

- Perlita
- Ferrita
alotriomórfica
- Ferrita
Widmanstätten



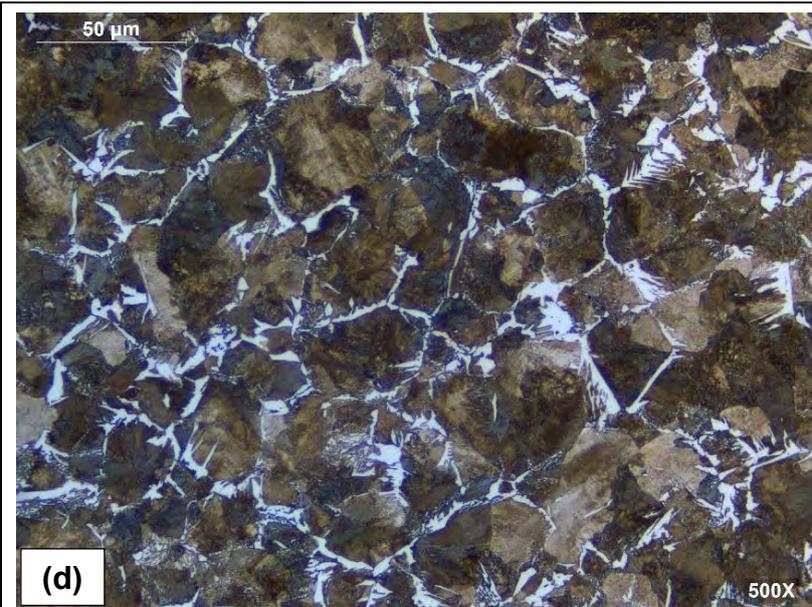
Distancia: 10 mm
 Dureza: 26.92 HRC
 $\dot{T} = 14.34 \text{ } ^\circ\text{C/s}$
 Fases presentes:

- Perlita
- Ferrita
alotriomórfica
- Ferrita
Widmanstätten



Distancia: 14 mm
 Dureza: 25.63 HRC
 $\dot{T} = 8.93 \text{ } ^\circ\text{C/s}$
 Fases presentes:

- Perlita
- Ferrita
alotriomórfica
- Ferrita
Widmanstätten



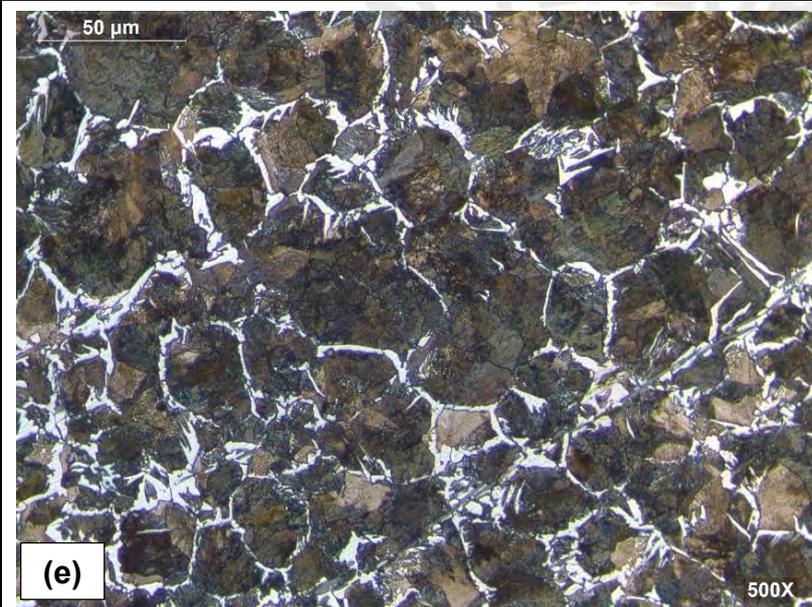
Distancia: 16.5 mm

Dureza: 24.98 HRC

$$\dot{T} = 7.12 \text{ } ^\circ\text{C/s}$$

Fases presentes:

- Perlita
- Ferrita
alotriomórfica



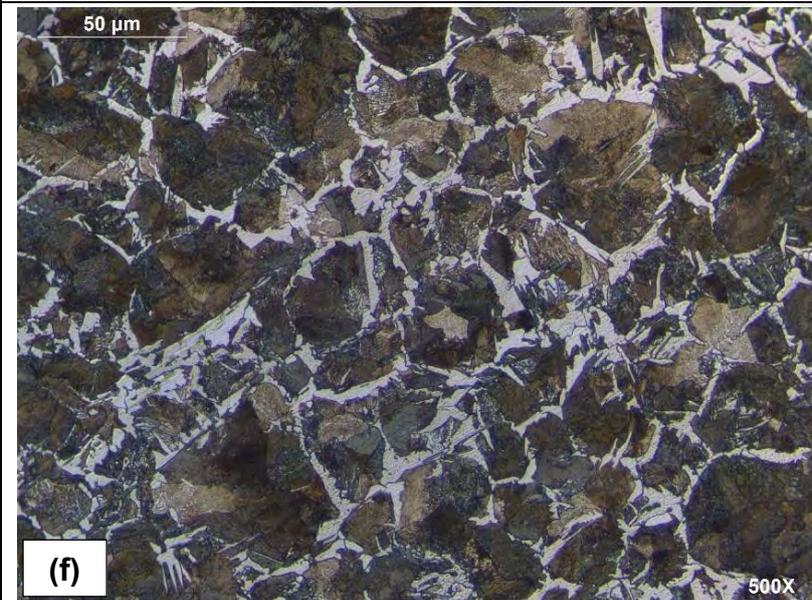
Distancia: 18 mm

Dureza: 23.83 HRC

$$\dot{T} = 6.30 \text{ } ^\circ\text{C/s}$$

Fases presentes:

- Perlita
- Ferrita
alotriomórfica



Distancia: 24 mm

Dureza: 22.63 HRC

$$\dot{T} = 4.36 \text{ } ^\circ\text{C/s}$$

Fases presentes:

- Perlita
- Ferrita
alotriomórfica

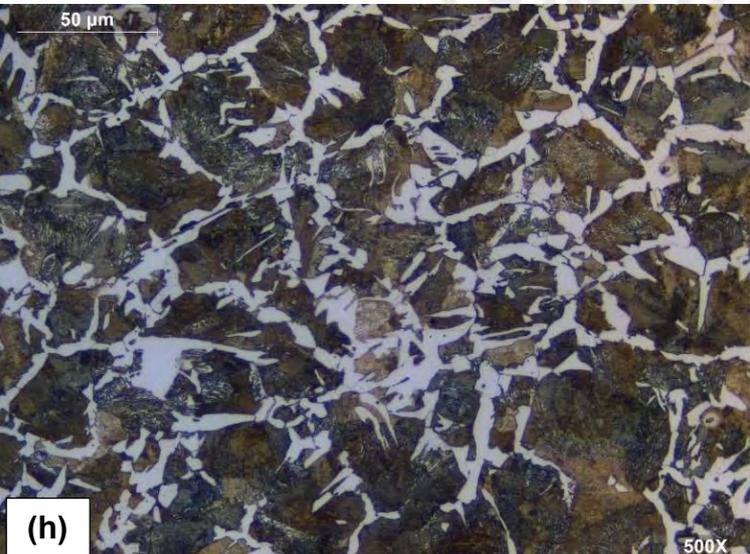
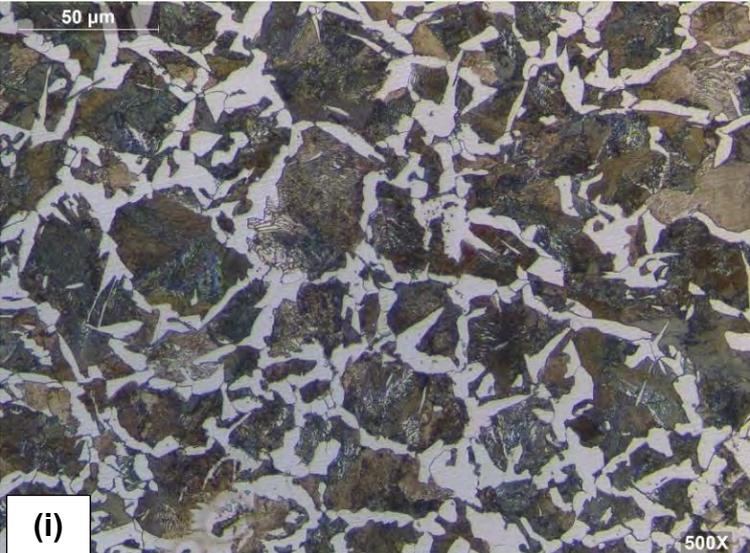
 <p>(g)</p>	<p>Distancia: 30 mm Dureza: 98.13 HRC $\dot{T} = 3.3 \text{ } ^\circ\text{C/s}$ Fases presentes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Perlita • Ferrita alotriomórfica
 <p>(h)</p>	<p>Distancia: 45 mm Dureza: 95.96 HRB $\dot{T} = 2.22 \text{ } ^\circ\text{C/s}$</p> <ul style="list-style-type: none"> • Perlita • Ferrita alotriomórfica • Ferrita idiomórfica
 <p>(i)</p>	<p>Distancia: 50 mm Dureza: 94.64 HRB $\dot{T} = 1.58 \text{ } ^\circ\text{C/s}$ Fases presentes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Perlita • Ferrita alotriomórfica • Ferrita idiomórfica

Figura 48. Metalografía correspondiente a la probeta Jominy de la condición 1 (890°C) para distancias de 8 mm, 10 mm, 14 mm, 16.5 mm, 18 mm, 24 mm, 30 mm, 45 mm y 50 mm con respecto su extremo inferior

Finalmente, para velocidades de enfriamiento menores a 2°C/s (figura 48.i) se observa que su microestructura se aproxima a una morfología correspondiente a un tratamiento térmico de normalizado (ferrita + perlita, de manera uniformemente distribuida).

Adicionalmente, se utilizó el diagrama CCT de un acero de medio carbono para colocar las curvas de enfriamiento pertenecientes a las distancias de 2 mm, 5 mm y 50 mm respecto al extremo inferior de la probeta como se muestra en la figura 49. Para una distancia de 2mm, la curva de enfriamiento atraviesa los campos de ferrita, bainita y martensita, siendo estas dos últimas los principales microconstituyentes observados de manera óptica en el presente análisis (figura 43.a). Para una distancia de 5 mm, la curva de enfriamiento atraviesa los campos de ferrita, perlita, bainita y martensita, el cual corresponde con lo visto en la figura 47.b. Para una distancia de 50 mm, la curva de enfriamiento atraviesa los campos de ferrita y perlita el cual corresponde con lo visto en la figura 48.i. En consecuencia, la utilización del modelo numérico del enfriamiento de la probeta Jominy junto al diagrama CCT de un acero de medio carbono, permite la predicción de las fases y microconstituyentes presentes en la microestructura de manera cualitativa.

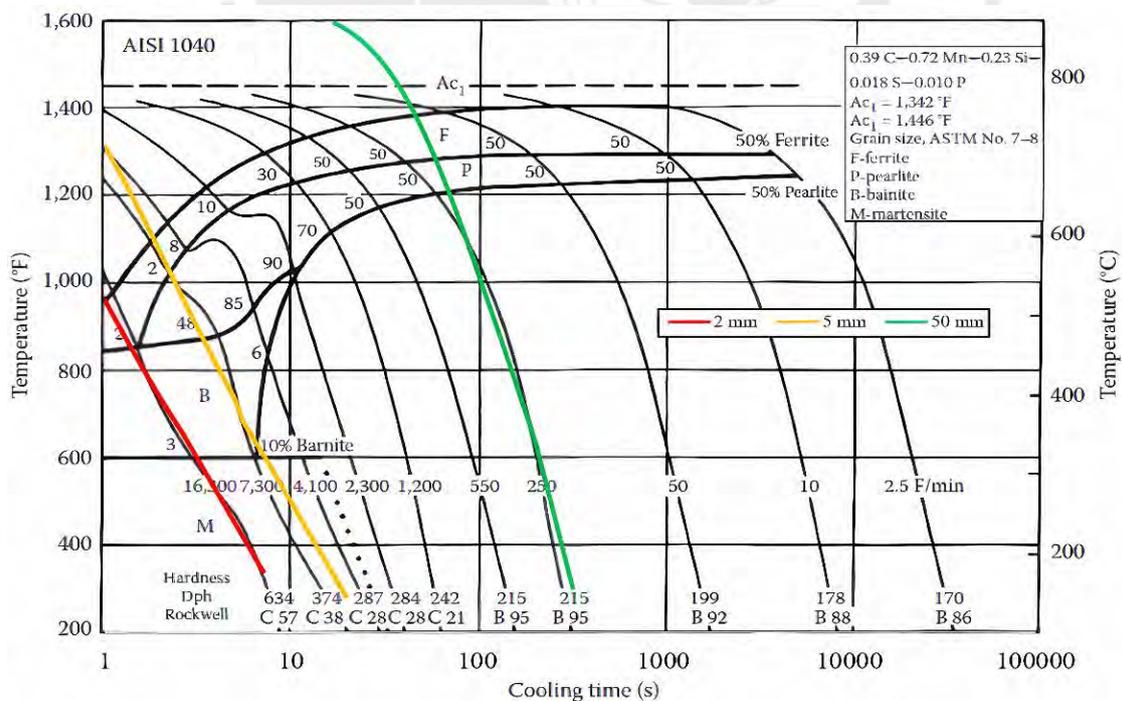


Figura 49. Diagrama CCT para un acero de medio carbono y las curvas de enfriamiento correspondientes a las distancias de 2 mm, 5mm y 50 mm respecto al extremo enfriado para la condición de austenización completa (890°C).

4.6.1. Análisis de la microestructura para un calentamiento de 760°C (austenización incompleta)

A continuación, se analizarán las micrografías obtenidas para la condición de calentamiento a 760°C para cada distancia indicada en la tabla 18.

Para un calentamiento de 760°C y a distancias muy cercanas al extremo de la probeta Jominy que estuvo en contacto con el chorro de agua, se observó que, una parte de la microestructura es semejante a la temperatura de calentamiento de 890°C, constituida por una matriz martensítica (figura 51.a) y pequeñas zonas de perlita y bainita (figura 51.b.1 y figura 51.b.1), debido a la exposición a altas velocidades de enfriamiento (figura 43). Sin embargo, se identifica adicionalmente la fase ferrita el cual corresponde a una fase pro-eutectoide debido que la temperatura de calentamiento corresponde a la zona bifásica (figura 50), y como consecuencia, parte de la ferrita no se transformó en austenita durante el calentamiento.

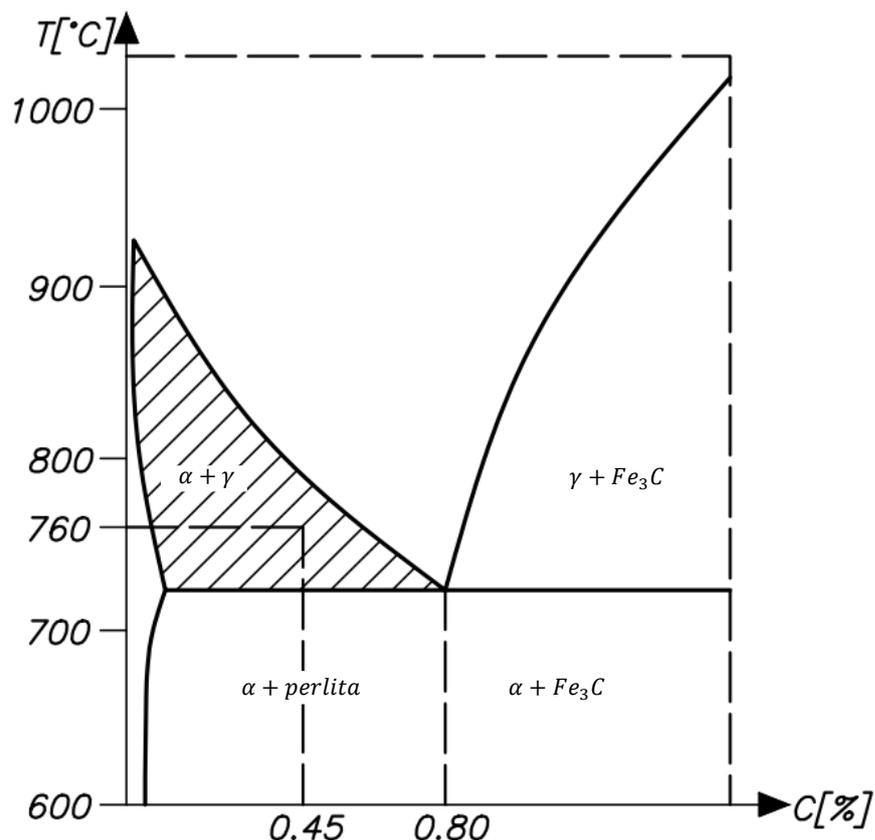
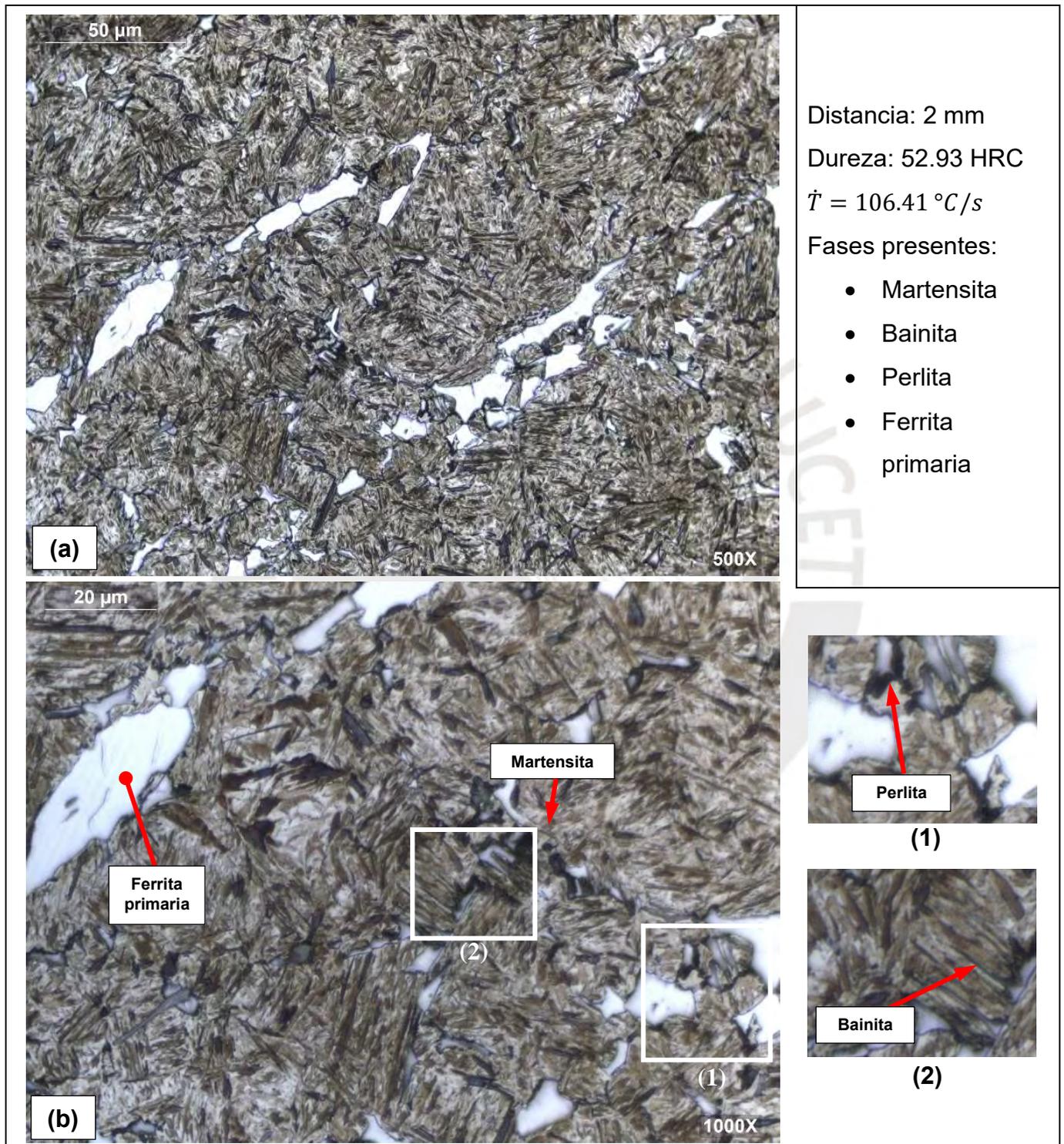
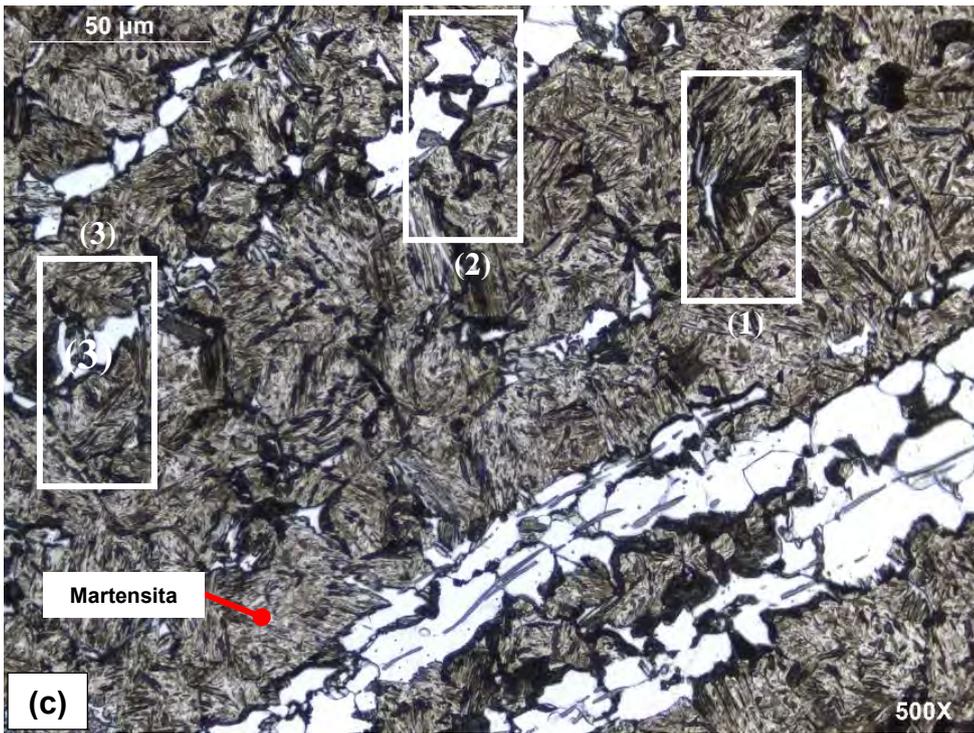


Figura 50. Zona de dominio bifásico de la ferrita y austenita ($\alpha + \gamma$) del diagrama Fe-C y ubicación de la temperatura de calentamiento de la condición 2 (760°C)

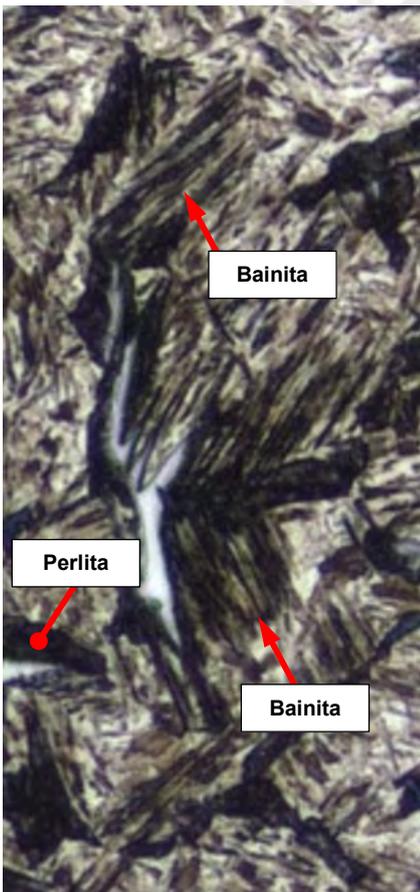
Asimismo, esta fase pro-eutectoide presentó una forma bandeada que sigue la orientación del proceso de fabricación de laminación en caliente. Esta orientación se encuentra presente en todas las micrografías obtenidas para esta condición (760°C) y, para su posterior reconocimiento, la morfología de esta fase es poligonal.





Distancia: 2.5 mm
 Dureza: 49.67 HRC
 $\dot{T} = 86.10 \text{ } ^\circ\text{C/s}$
 Fases presentes:

- Martensita
- Bainita
- Perlita
- Ferrita primaria



(1)



(2)



(3)

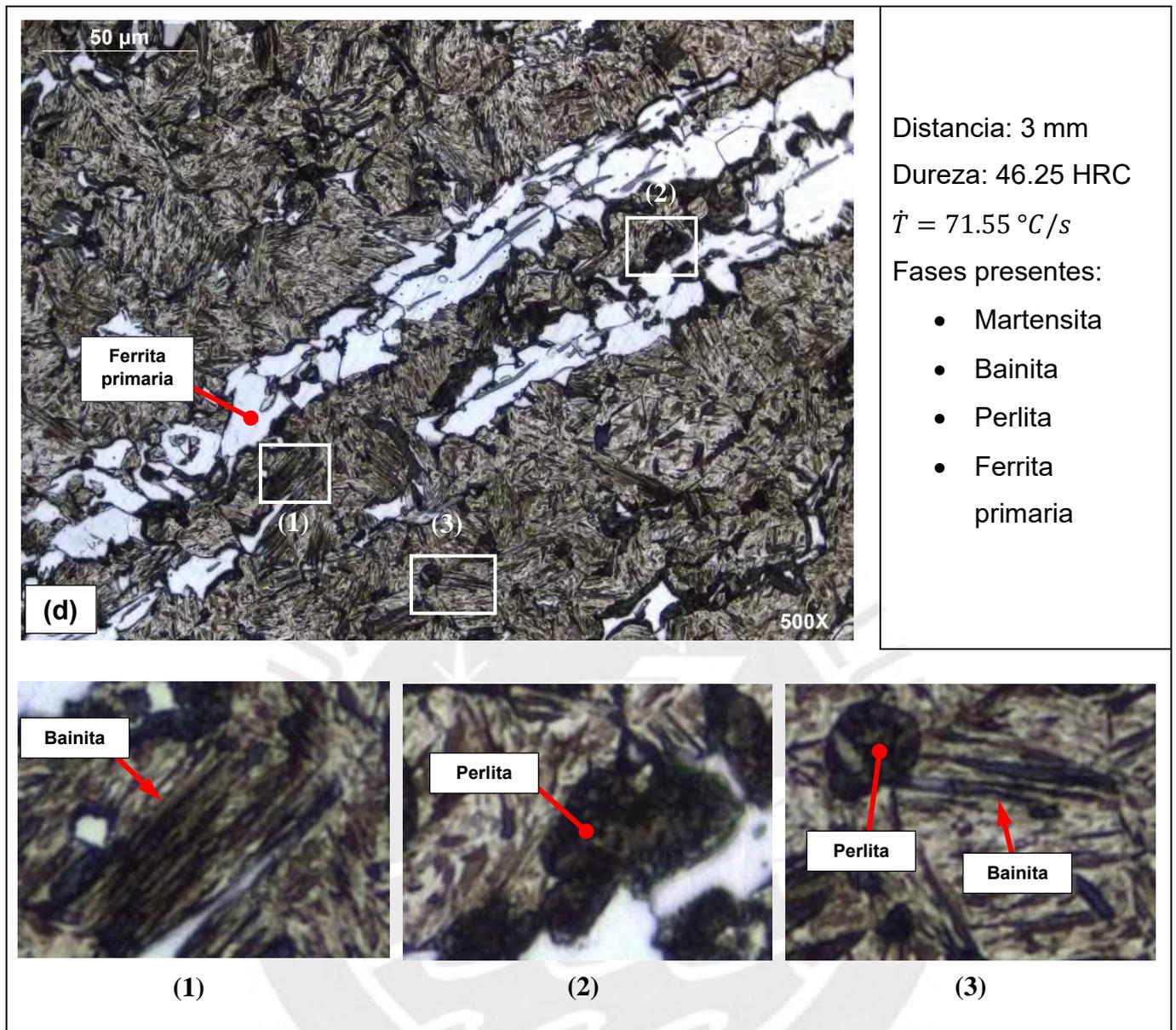
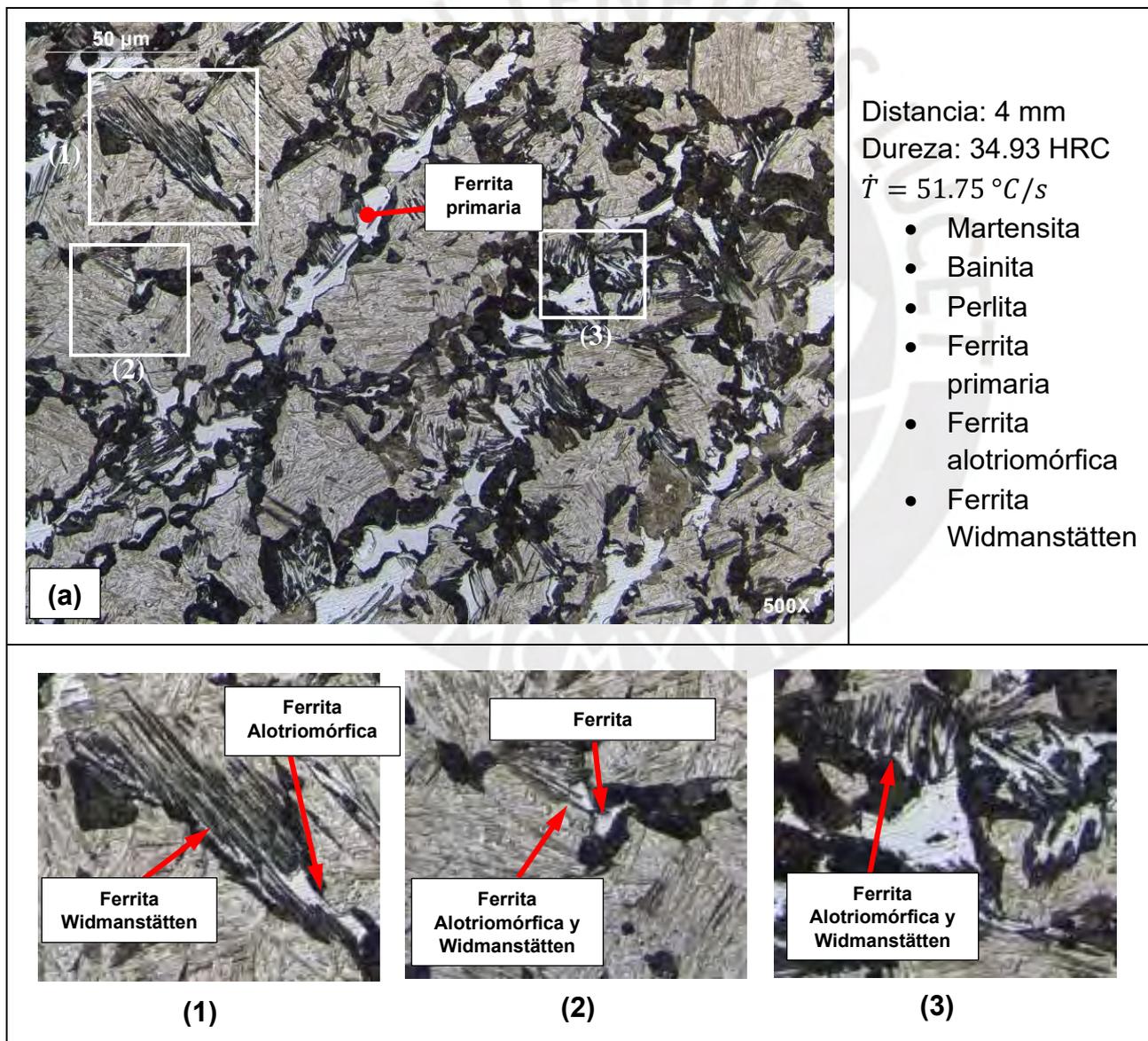


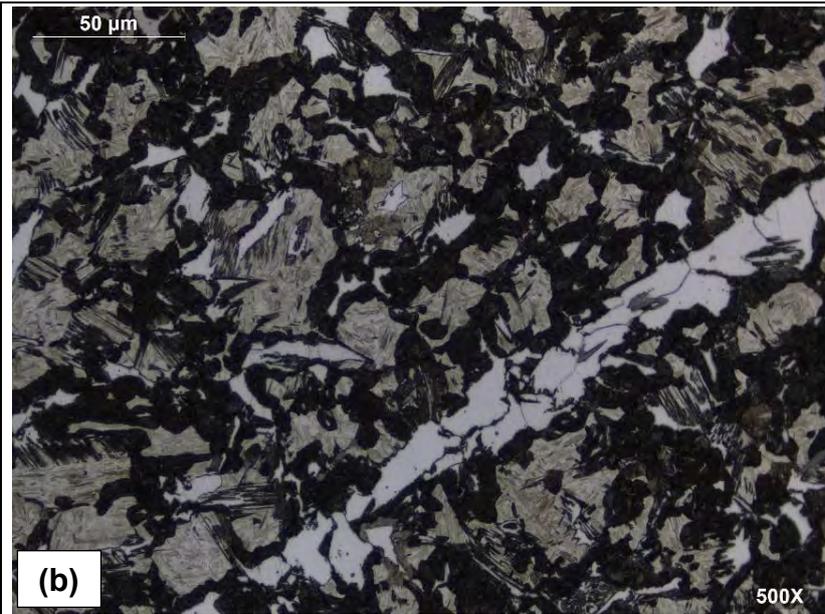
Figura 51. Metalografía correspondiente a la probeta Jominy de la condición 2 (760°C) para las distancias de 2 mm, 2.5 mm, 3 mm con respecto su extremo inferior

A partir de una velocidad de enfriamiento menor a 85°C/s (figura 51.c), se observa una mayor formación de perlita y aparentemente bainita (figura 51.c.1, figura 51.c.2 y figura 51.c.3) y se mantiene las bandas de ferrita pro-eutectoide (figura 51.d.). Por esta razón, la tendencia a la formación de martensita es decreciente, de manera similar a la anterior temperatura de calentamiento (890°C). Este comportamiento corresponde a la reducción de la velocidad de enfriamiento el cual provoca el aumento de la formación de los microconstituyentes anteriormente mencionados.

Esto tiene buena correspondencia con los altos valores de dureza medidos en esa zona, sin embargo, son menores con respecto a los valores obtenidos a la temperatura de la condición 1 (890°C) que se observan en la figura 34. Por lo tanto, la presencia de ferrita pro-eutectoide y la disminución de la martensita resultó en la reducción de la dureza.

La formación de martensita, bainita y perlita se mantiene hasta una velocidad de enfriamiento de 35°C/s (figura 52.b) donde se identifica una tendencia creciente de la formación perlita conforme la velocidad de enfriamiento disminuye. Asimismo, se mantiene las bandas de ferrita pro-eutectoide para las distancias en estudio de la figura 52.

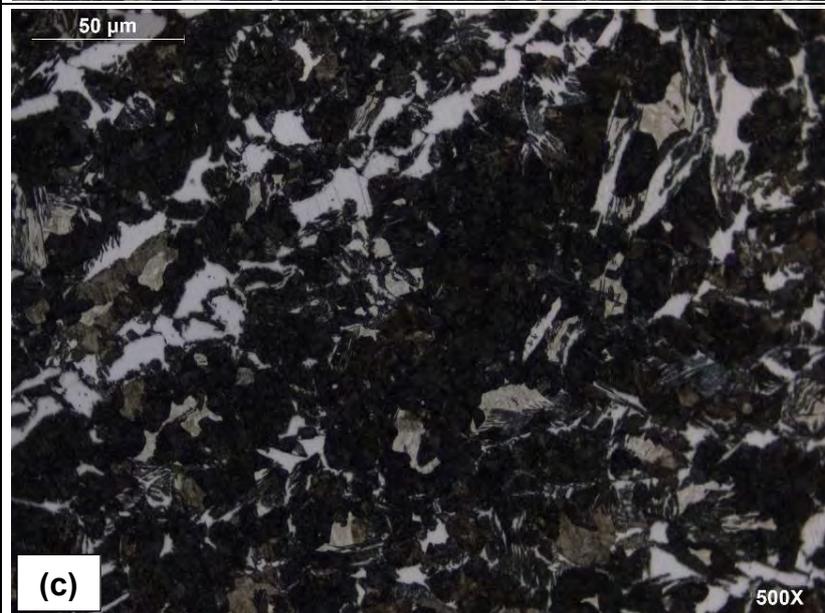




Distancia: 4.5 mm
 Dureza: 28.71 HRC
 $\dot{T} = 44.8 \text{ } ^\circ\text{C/s}$

- Martensita
- Bainita
- Perlita
- Ferrita primaria
- Ferrita alotriomórfica
- Ferrita

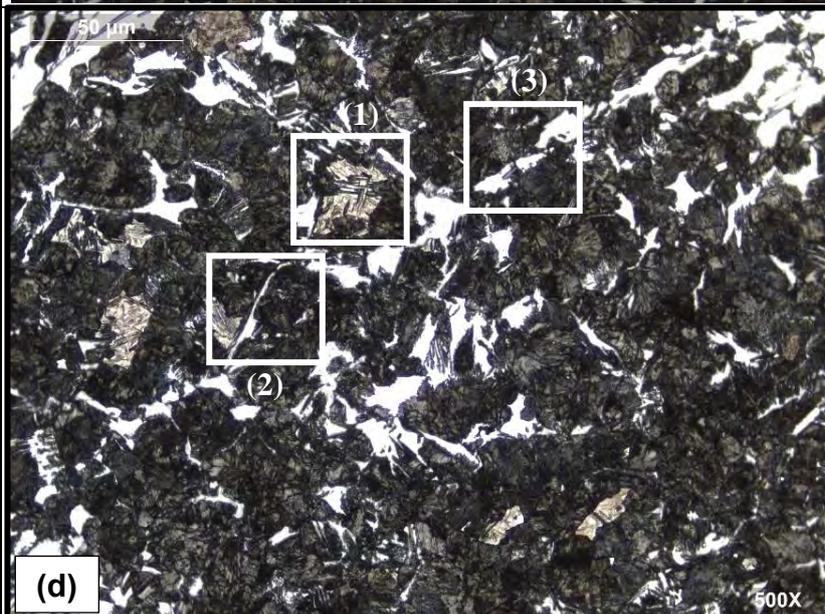
 Widmanstätten



Distancia: 5 mm
 Dureza: 25.1 HRC
 $\dot{T} = 39.5 \text{ } ^\circ\text{C/s}$

- Martensita
- Bainita
- Perlita
- Ferrita primaria
- Ferrita alotriomórfica
- Ferrita

 Widmanstätten



Distancia: 5.5 mm
 Dureza: 25.11 HRC
 $\dot{T} = 34.6 \text{ } ^\circ\text{C/s}$

- Martensita
- Bainita
- Perlita
- Ferrita primaria
- Ferrita alotriomórfica
- Ferrita

 Widmanstätten

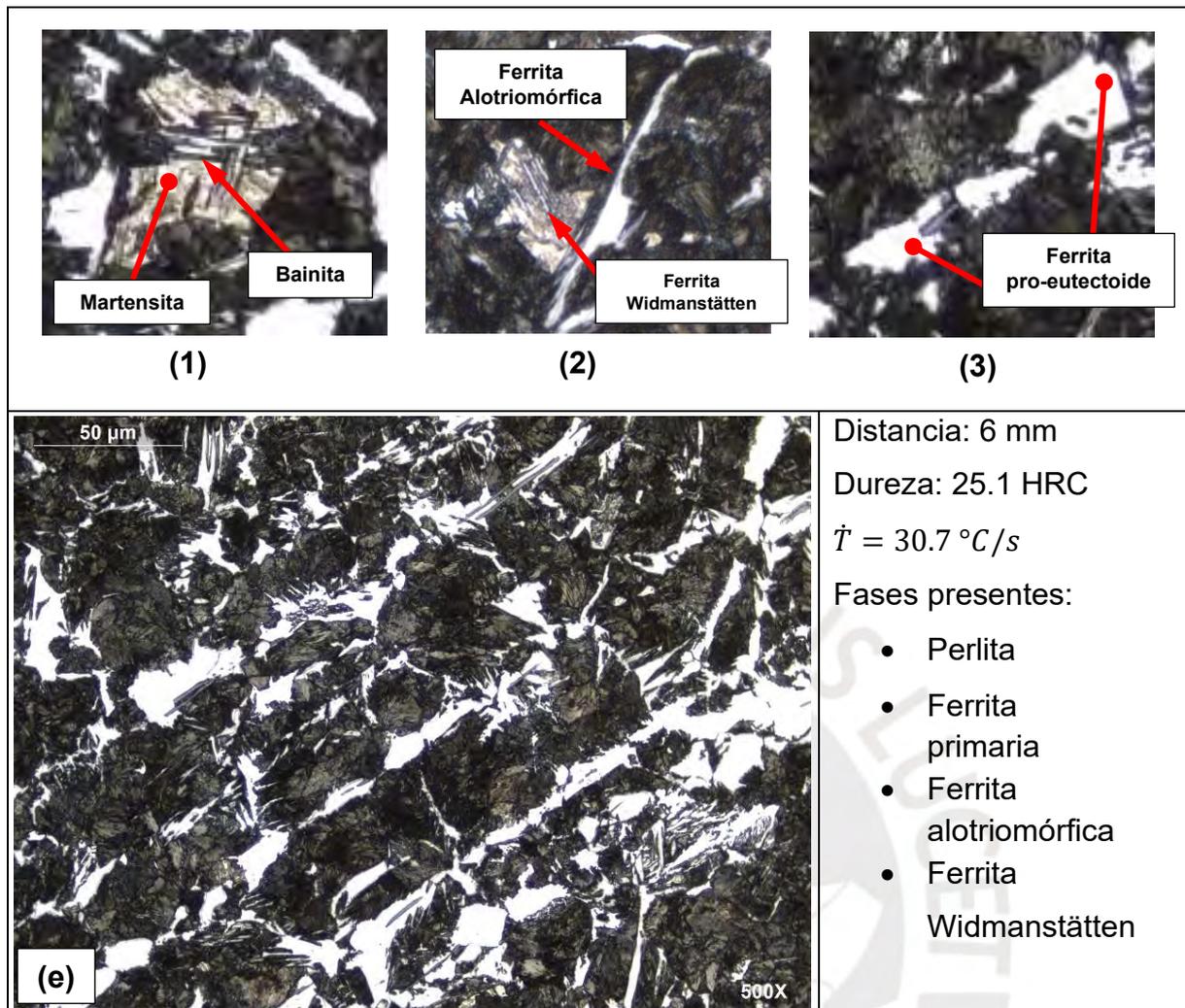


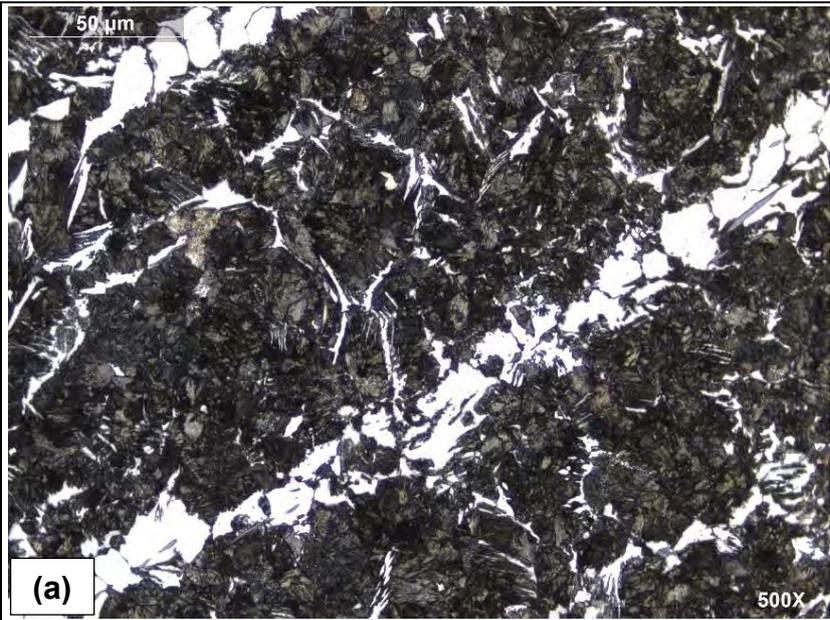
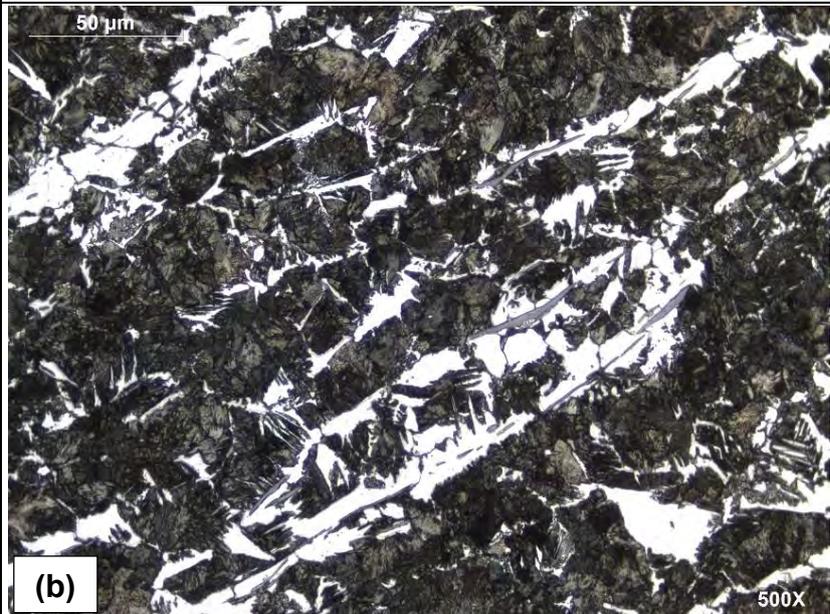
Figura 52. Metalografía correspondiente a la probeta Jominy de la condición 2 (760°C) para las distancias de 4 mm, 4.5 mm, 5 mm, 5.5 mm y 6 mm con respecto su extremo inferior

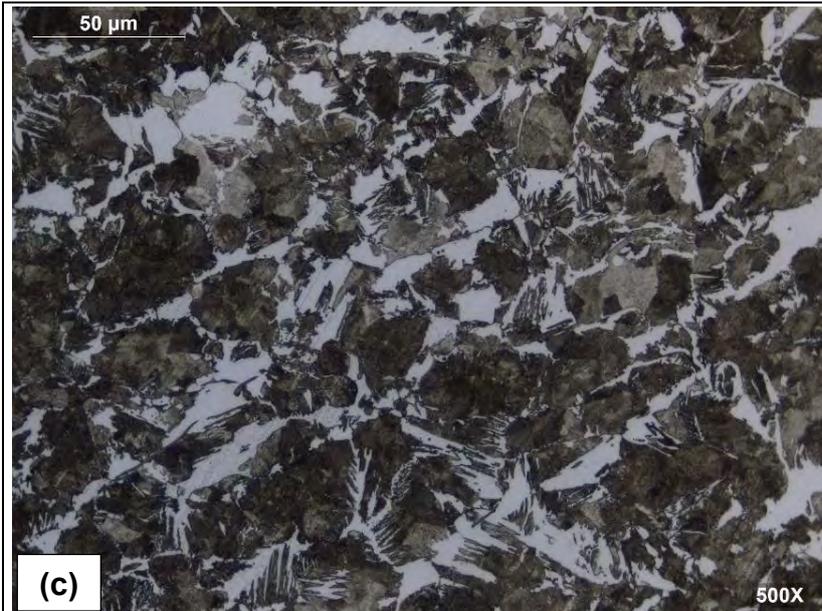
Para una velocidad de enfriamiento de 50 °C/s (figura 52.a), se identificó la formación de dos morfologías adicionales de la ferrita (ferrita Widmanstätten y ferrita aliootriomorfa) producto del enfriamiento de la austenita. La ferrita aliootriomorfa (figura 52.a.2) se formó en los límites de grano de la austenita previa y, a partir de sus bordes, la ferrita Widmanstätten secundaria (figura 52.a.3). La ferrita Widmanstätten primaria (figura 52.a.1) se identificó por su morfología acircular, pero sin la presencia de ferrita aliootriomorfa.

De la micrografía de las figuras 51 y 52, se observó la variación microestructural que comenzó a partir de una matriz martensítica y ferrita pro-eutectoide (figura 51.a) hasta formar matriz perlítico- ferrítico (figura 52.d).

En consecuencia, se redujo considerablemente la dureza, desde 53 HRC hasta 25 HRC, respectivamente, debido a la disminución de la velocidad de enfriamiento.

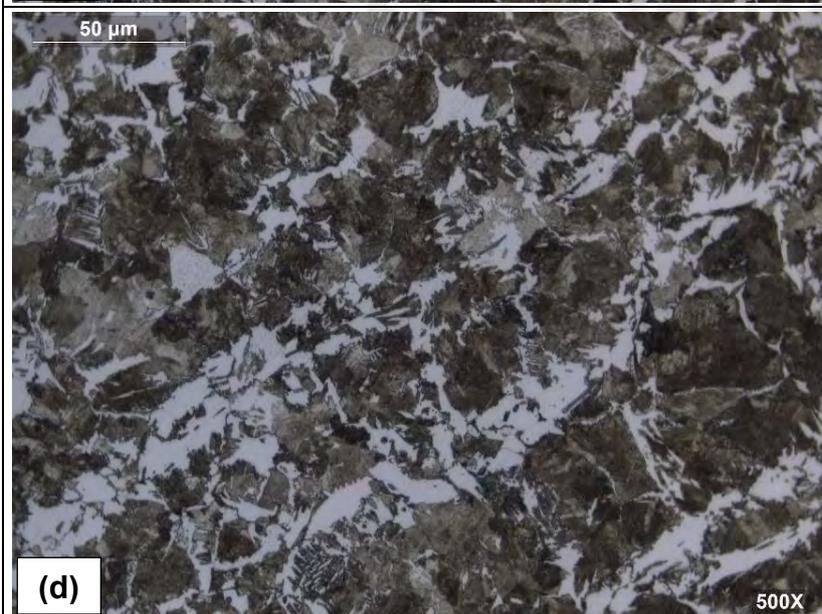
A partir de una velocidad de enfriamiento menor a 30°C/s, se aprecia únicamente la formación de perlita y ferrita en la microestructura (figura 53), cuya presencia de esta última va en aumento conforme se disminuye la velocidad de enfriamiento, por esta razón, la disminución de la dureza posee una pendiente menos pronunciada, manteniendo sus valores entre 98 HRB y 93 HRB.

 <p>(a)</p>	<p>Distancia: 6.5 mm Dureza: 24 HRC $\dot{T} = 27.67 \text{ }^\circ\text{C/s}$ Fases presentes:</p> <ul style="list-style-type: none">• Perlita• Ferrita primaria• Ferrita alotriomórfica
 <p>(b)</p>	<p>Distancia: 7 mm Dureza: 23.78 HRC $\dot{T} = 25.15 \text{ }^\circ\text{C/s}$ Fases presentes:</p> <ul style="list-style-type: none">• Perlita• Ferrita primaria• Ferrita alotriomórfica



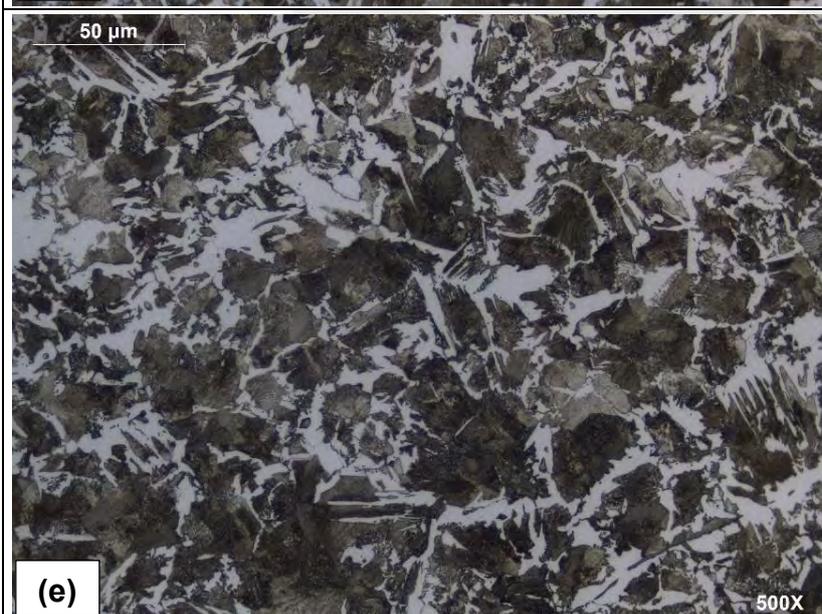
Distancia: 8 mm
 Dureza: 22.85 HRC
 $\dot{T} = 20.75 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$
 Fases presentes:

- Perlita
- Ferrita primaria
- Ferrita alotriomórfica



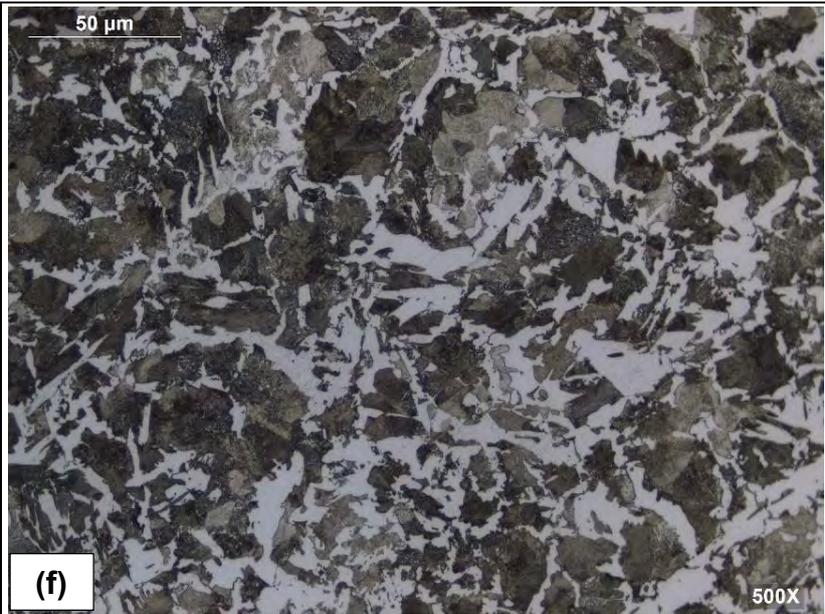
Distancia: 9 mm
 Dureza: 21.69 HRC
 $\dot{T} = 17.66 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$
 Fases presentes:

- Perlita
- Ferrita primaria
- Ferrita alotriomórfica



Distancia: 15 mm
 Dureza: 97.92 HRB
 $\dot{T} = 10.38 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$
 Fases presentes:

- Perlita
- Ferrita primaria
- Ferrita alotriomórfica



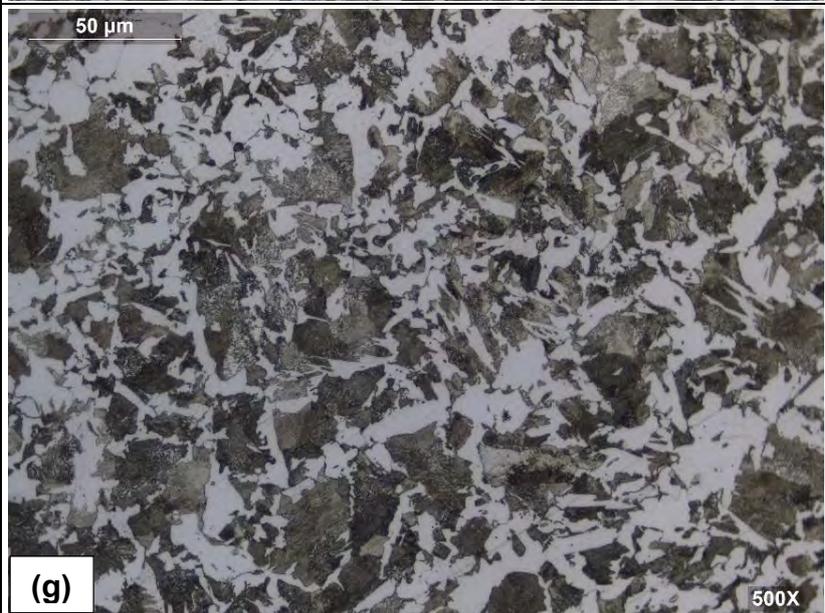
Distancia: 20 mm

Dureza: 96.58 HRB

$$\dot{T} = 5.57 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$$

Fases presentes:

- Perlita
- Ferrita primaria
- Ferrita alotriomórfica



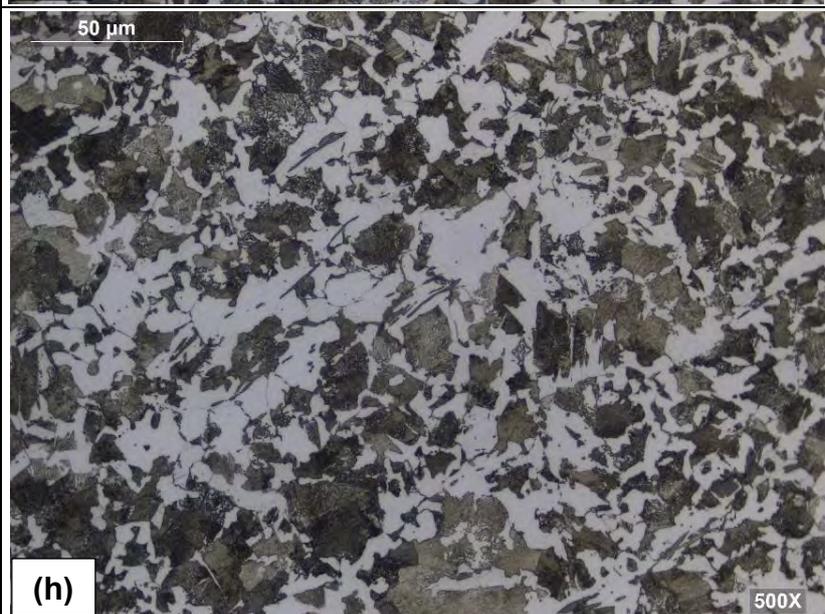
Distancia: 25 mm

Dureza: 95.13 HRB

$$\dot{T} = 4.15 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$$

Fases presentes:

- Perlita
- Ferrita primaria
- Ferrita alotriomórfica



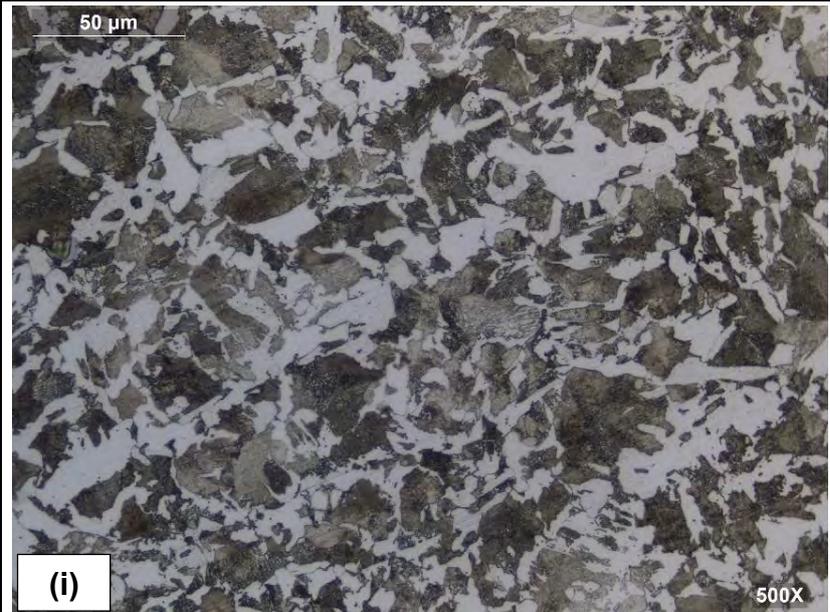
Distancia: 30 mm

Dureza: 93.46 HRB

$$\dot{T} = 3.19 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$$

Fases presentes:

- Perlita
- Ferrita primaria
- Ferrita alotriomórfica



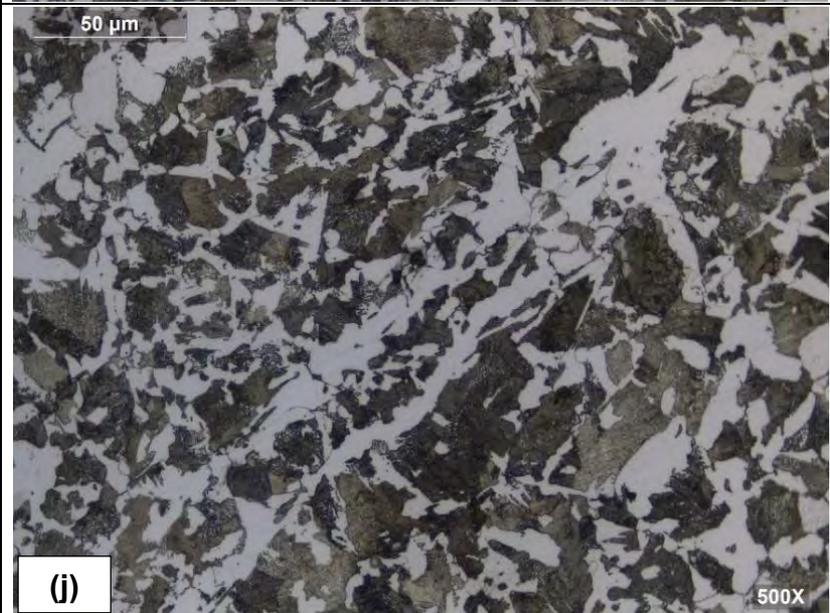
Distancia: 35 mm

Dureza: 92.98 HRB

$$\dot{T} = 2.68 \text{ }^\circ\text{C/s}$$

Fases presentes:

- Perlita
- Ferrita primaria
- Ferrita alotriomórfica



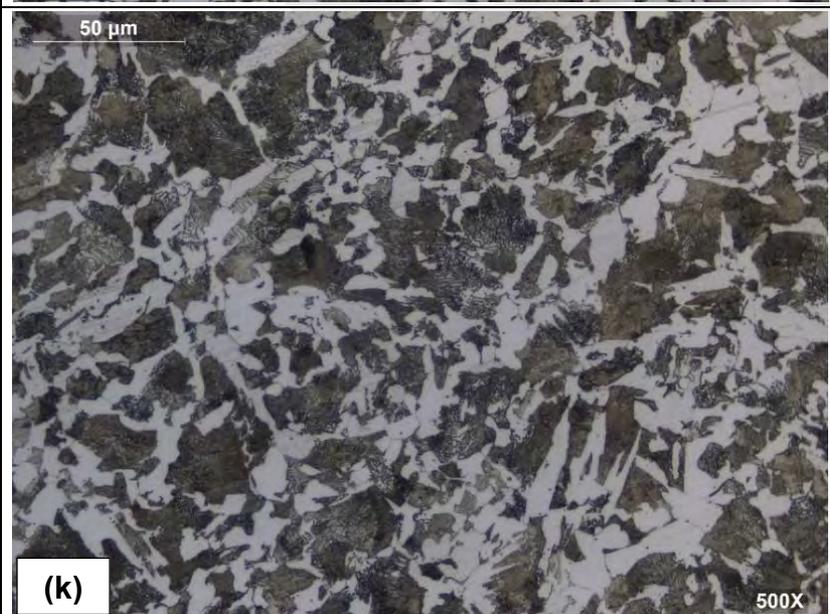
Distancia: 40 mm

Dureza: 92.65 HRB

$$\dot{T} = 2.31 \text{ }^\circ\text{C/s}$$

Fases presentes:

- Perlita
- Ferrita primaria
- Ferrita alotriomórfica



Distancia: 45 mm

Dureza: 91.74 HRB

$$\dot{T} = 2.02 \text{ }^\circ\text{C/s}$$

Fases presentes:

- Perlita
- Ferrita primaria
- Ferrita alotriomórfica
- Ferrita idiomórfica

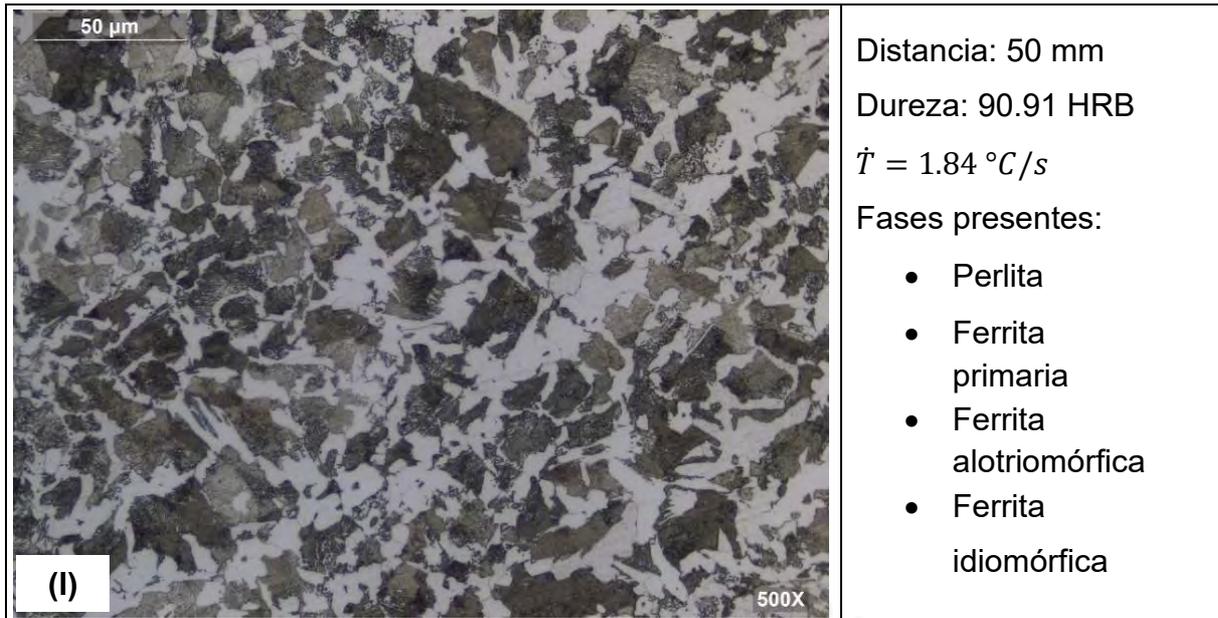


Figura 53. Metalografía correspondiente a la probeta Jominy de la condición 2 (760°C) para las distancias de 6.5 mm, 7 mm, 8 mm, 9 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm, 30 mm, 35 mm, 40 mm, 45 mm y 50 mm con respecto su extremo inferior

Finalmente, para velocidades de enfriamiento menores a 2°C/s (figura 53.I) se observa que su microestructura se aproxima a una morfología correspondiente a un tratamiento térmico de normalizado (ferrita + perlita, de manera uniformemente distribuida) aunque se puede apreciar los granos orientados de la ferrita primaria y los granos de la ferrita secundaria de tipo alotriomórfico que se nuclea sobre los límites de grano de la austenita previa. Asimismo, se observa un mayor contenido de ferrita con respecto a la temperatura de calentamiento de la condición 1 (890°C) para una misma distancia (50mm). En consecuencia, disminuyó el valor de dureza de 95 HRB (890°C) a 90 HRB (760°C).

4.6.3. Análisis de la microestructura para un calentamiento de 740°C (austenización incompleta)

A continuación, se analizarán las micrografías obtenidas para la condición de calentamiento a 740°C para cada distancia indicada en la tabla 18.

Para un calentamiento de 740°C y a distancias muy cercanas al extremo de la probeta Jominy que estuvo en contacto con el chorro de agua, se observó que la microestructura está constituida principalmente por ferrita primaria, perlita y martensita, con un aumento de la ferrita pro-eutectoide con respecto a la condición anterior (760°C) comparando la figura 51.a (760°C) y figura 56.a (740°C).

Este aumento resultó como consecuencia de calentar a una menor temperatura intercrítica con respecto a la condición 2 (760°C) como se muestra en la figura 54, como resultado, se formó una menor cantidad de austenita durante el calentamiento. Asimismo, la ferrita pro-eutectoide formó bandas que sigue la orientación del proceso de fabricación de laminado en caliente como se muestra en la figura 55. Sin embargo, la orientación no se distingue en las micrografías obtenidas para esta condición (740°C) debido al aumento utilizado (figuras 56, 57 y 58). Por esta razón, al observar la ferrita pro-eutectoide, la morfología es poligonal.

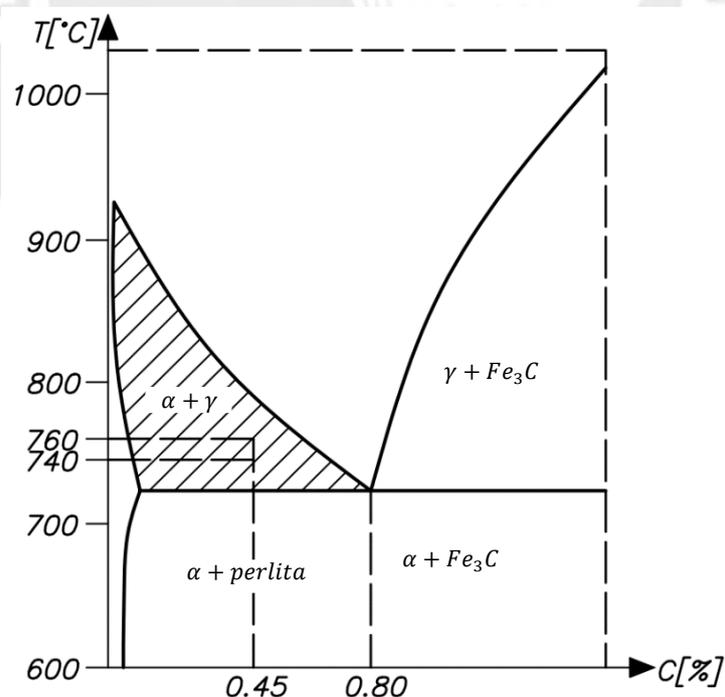


Figura 54. Zona de dominio bifásico de la ferrita y austenita ($\alpha + \gamma$) del diagrama Fe-C y ubicación de la temperatura de calentamiento de la condición 2 (760°C) y 3 (740°C)

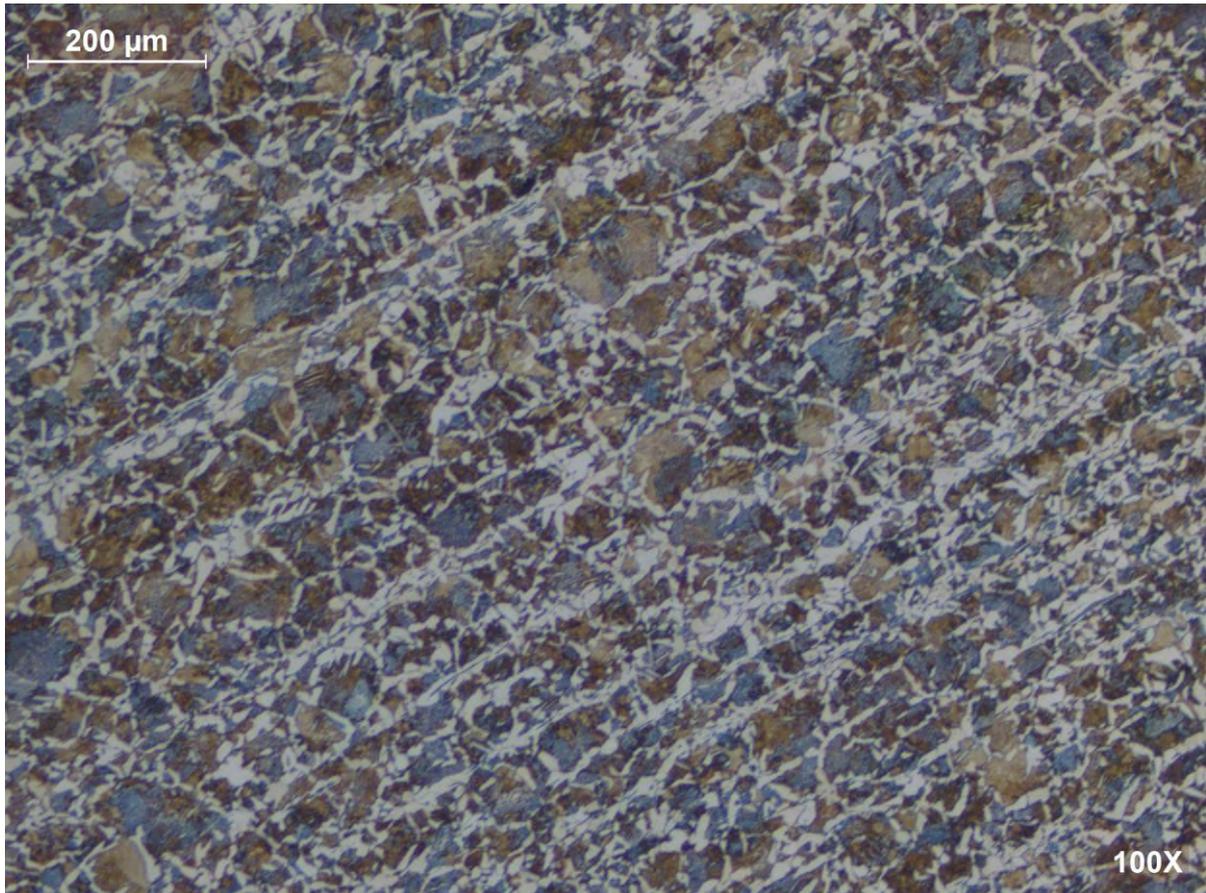
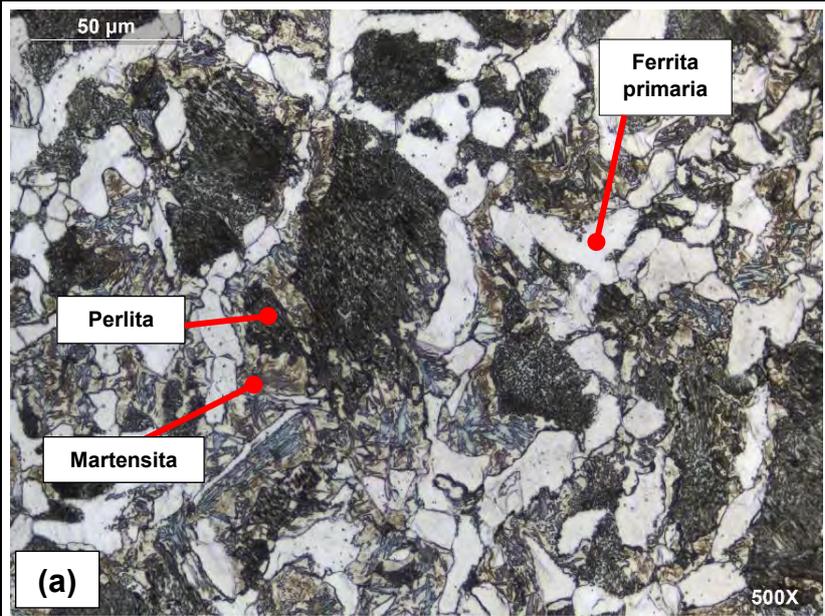


Figura 55. Micrografía de la probeta Jominy calentada a 740°C a una distancia de 5 mm con respecto al extremo inferior

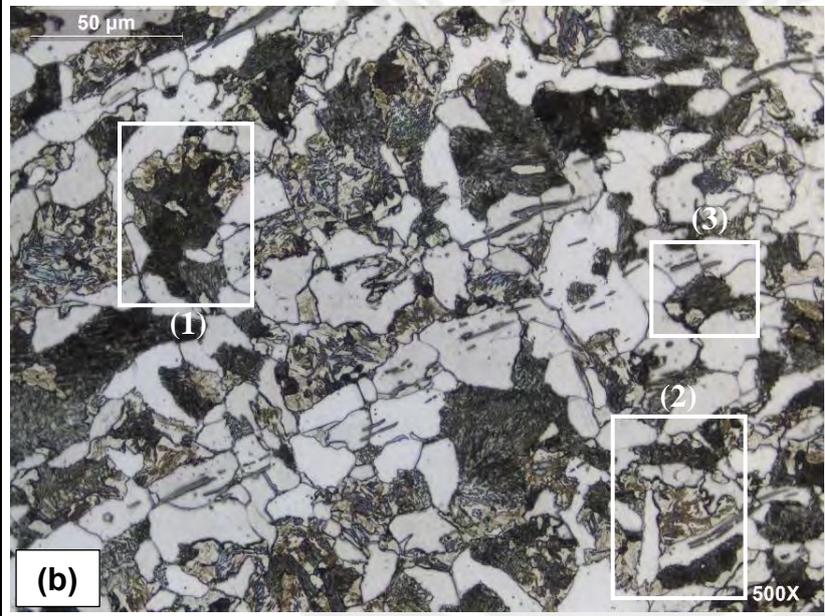
Adicionalmente de la ferrita y martensita, se identificó la formación de perlita laminar para altas velocidades de enfriamiento (figura 56.b) en 2 morfologías: perlita fina (figura 56.b.1) y perlita gruesa (figura 57.b).

Asimismo, a pesar de una exposición a altas velocidades de enfriamiento (figura 40), el valor de la dureza disminuyó significativamente para distancias muy cercanas al extremo de la probeta Jominy que estuvo en contacto con el chorro de agua, donde se obtuvo un máximo de 26 HRC (figura 31), aproximadamente la mitad de las condiciones anteriormente evaluadas (760°C y 860°C). Esto tiene buena correspondencia con lo observado en las micrografías de la figura 51, donde hay una mayor composición de ferrita primaria, disminuyendo de esta manera, el valor de la dureza.



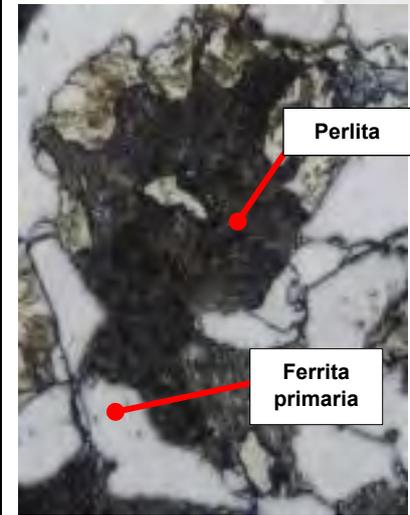
Distancia: 2 mm
 Dureza: 26.06 HRC
 $\dot{T} = 108.52 \text{ } ^\circ\text{C/s}$
 Fases presentes:

- Martensita
- Perlita
- Ferrita primaria

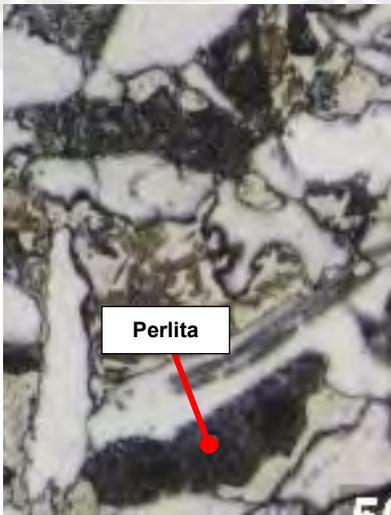


Distancia: 3 mm
 Dureza: 21.07 HRC
 $\dot{T} = 72.61 \text{ } ^\circ\text{C/s}$
 Fases presentes:

- Martensita
- Perlita
- Ferrita primaria



(1)



(2)



(3)

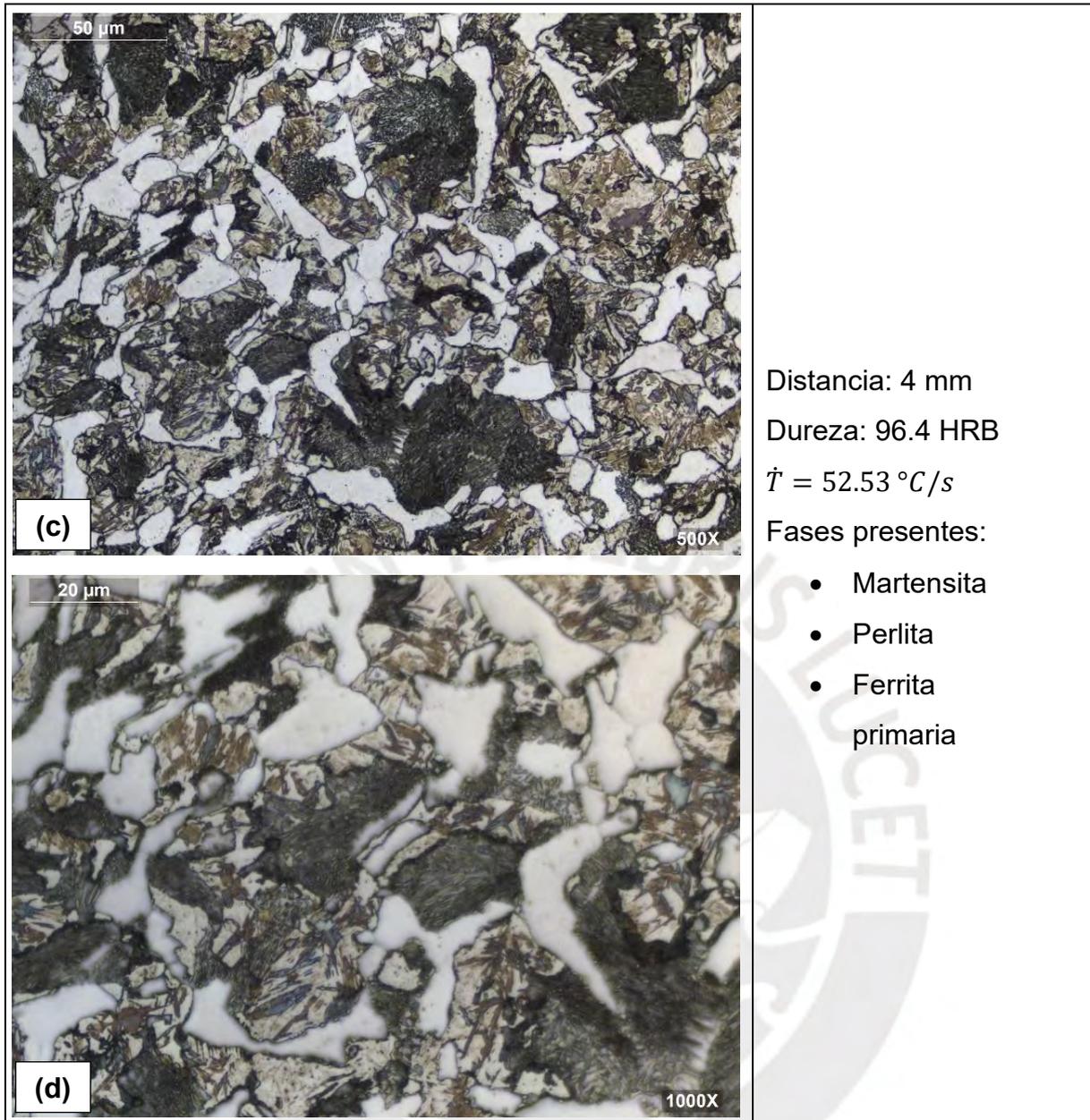


Figura 56. Metalografía correspondiente a la probeta Jominy de la condición 3 (740°C) para distancias de 2 mm, 3 mm, y 4 mm con respecto su extremo inferior

Para velocidades de enfriamiento menores a 40°C/s (figura 57.a), se mantiene la formación de martensita, pero en menor grado debido a la disminución de la velocidad de enfriamiento (figura 43). Por ello, se identifica un aumento de la formación de la perlita, donde se observa una perlita compuesta por laminas gruesas debido a que es posible su reconocimiento de manera óptica (figura 57.b.1) y perlita fina debido a su tonalidad más oscura cercanos a los límites de grano (figura 57.b.2).



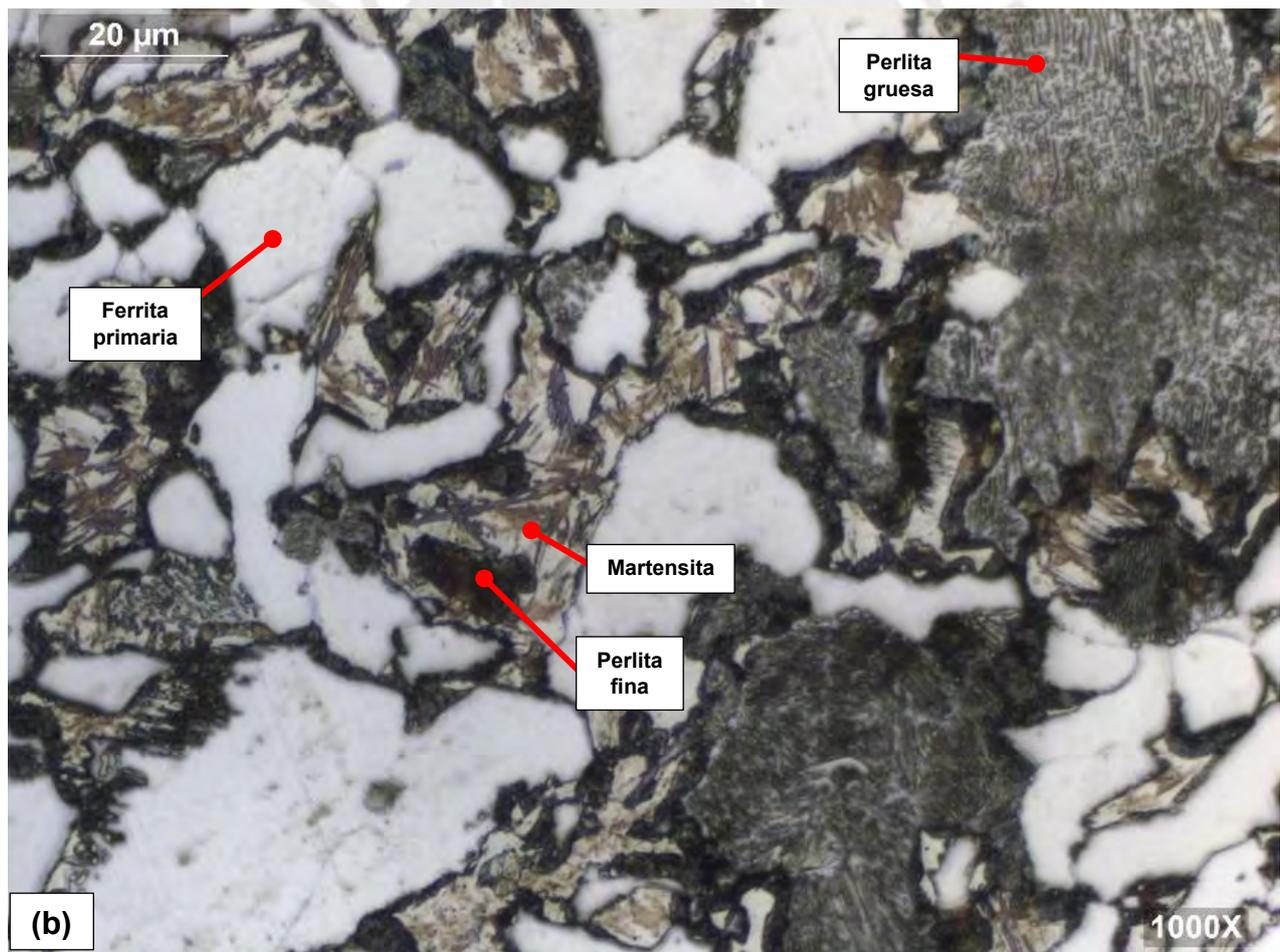
Distancia: 5 mm

Dureza: 95.86 HRB

$\dot{T} = 39.82 \text{ } ^\circ\text{C/s}$

Fases presentes:

- Martensita
- Perlita gruesa
- Perlita fina
- Ferrita primaria



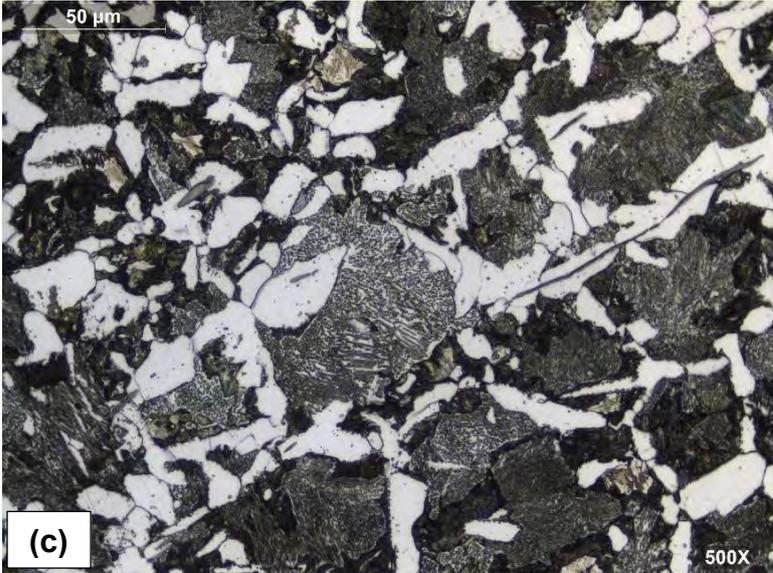
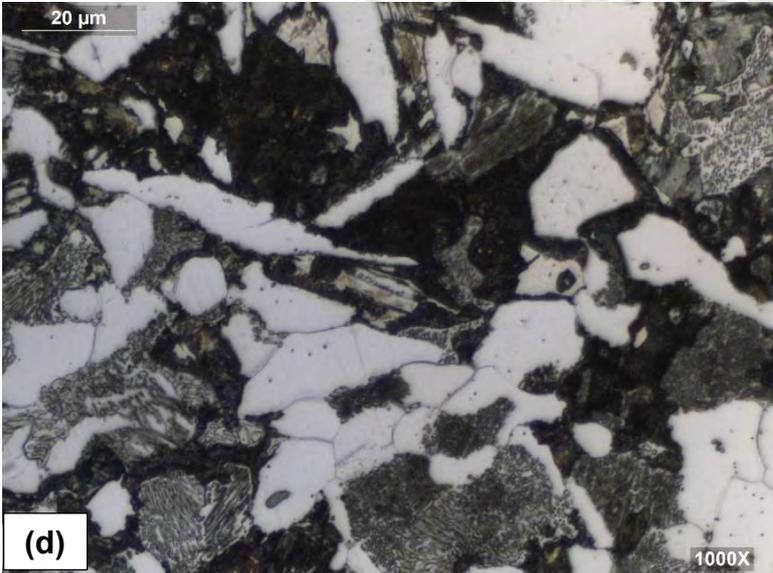
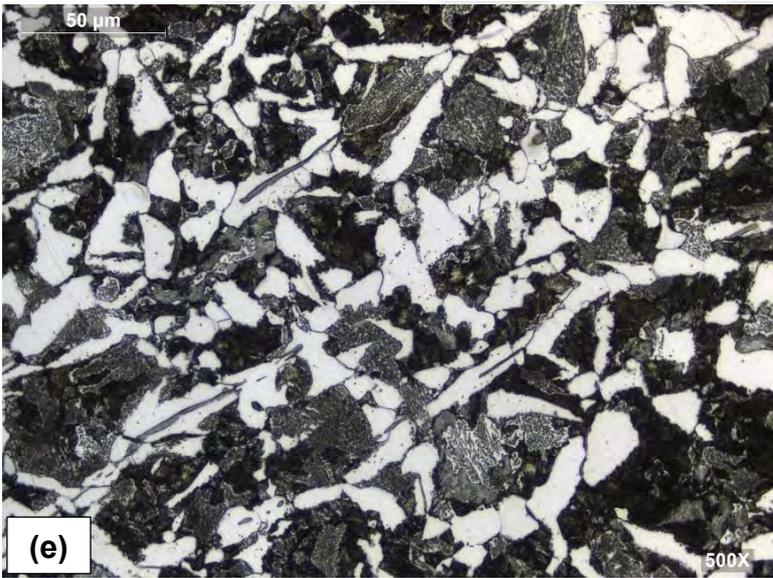
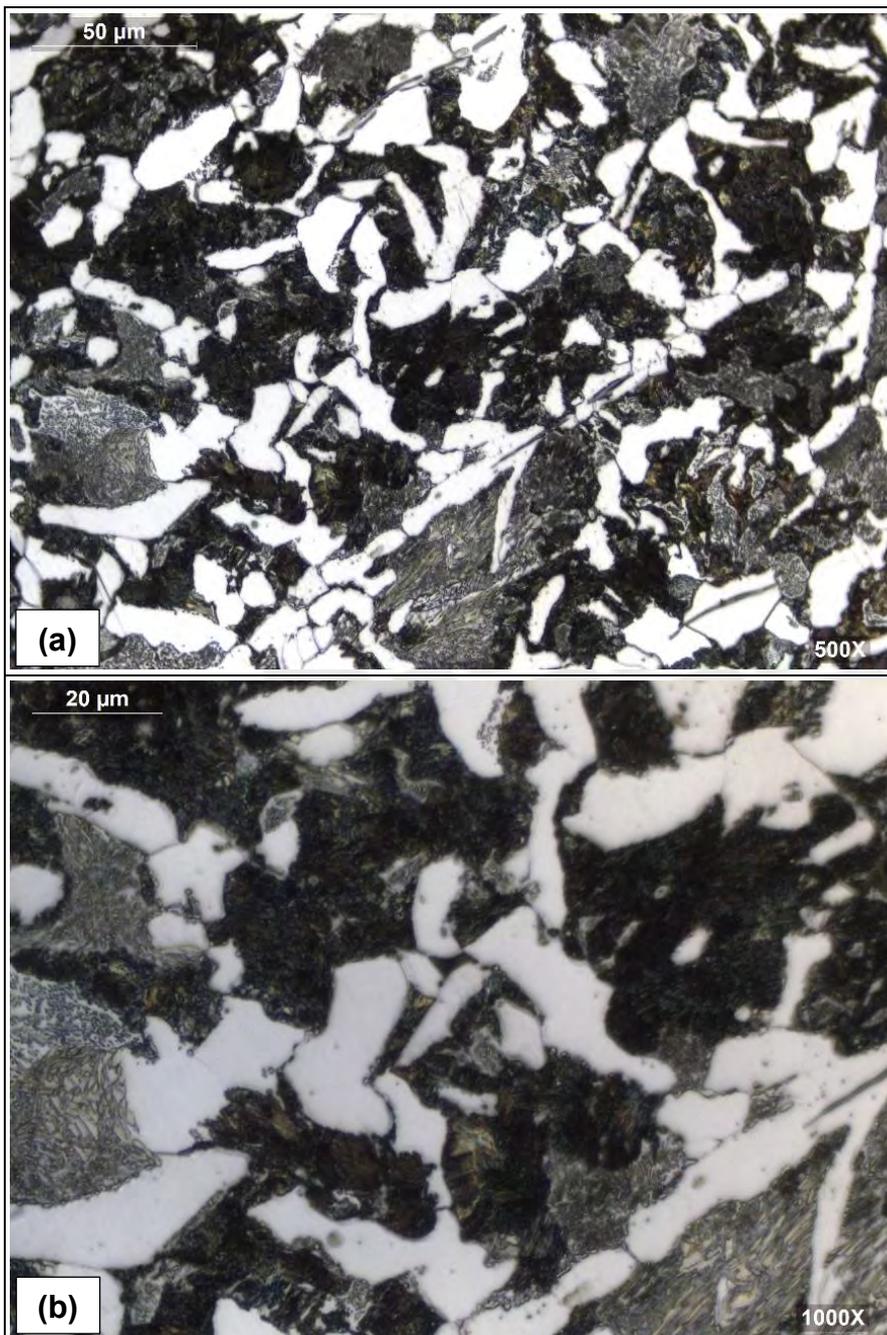
 <p>(c)</p>	<p>Distancia: 6 mm Dureza: 95.46 HRB $\dot{T} = 31.6 \text{ } ^\circ\text{C/s}$</p> <p>Fases presentes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Martensita • Perlita gruesa • Perlita fina • Ferrita primaria
 <p>(d)</p>	<p>Distancia: 6 mm Dureza: 95.46 HRB $\dot{T} = 31.6 \text{ } ^\circ\text{C/s}$</p> <p>Fases presentes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Martensita • Perlita gruesa • Perlita fina • Ferrita primaria
 <p>(e)</p>	<p>Distancia: 7 mm Dureza: 94.92 HRB $\dot{T} = 25.48 \text{ } ^\circ\text{C/s}$</p> <p>Fases presentes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Perlita gruesa • Perlita fina • Ferrita primaria

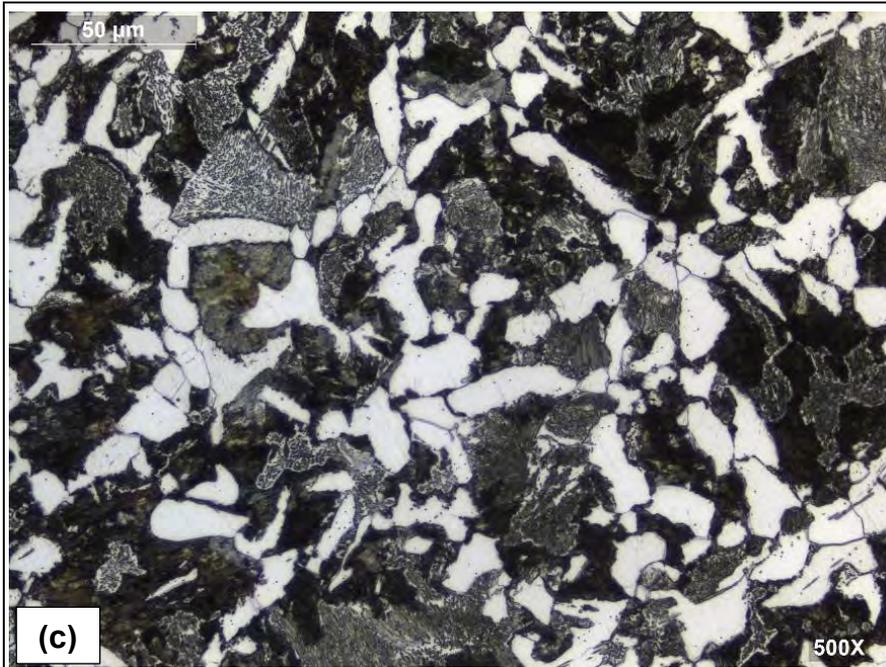
Figura 57. Metalografía correspondiente a la probeta Jominy de la condición 3 (740°C) para distancias de 5 mm, 6 mm y 7 mm con respecto su extremo inferior

De la micrografía de las figuras 56 y 57, se observó una microestructura compuesta por ferrita, perlita y martensita (figura 56.a) que va modificándose hasta alcanzar una microestructura ferrítico-perlítica (figura 57.e). Sin embargo, los valores de dureza disminuyeron en esta zona junto a una pendiente menos pronunciada para esta condición (740°C) en comparación con las anteriores temperaturas de calentamiento (760°C y 890°C). Por lo tanto, la presencia de ferrita pro-eutectoide, la disminución de la martensita y la formación de perlita, para altas velocidades de enfriamiento (100°C/s), resultó en la disminución de la dureza.



Distancia: 8 mm
 Dureza: 94.37 HRB
 $\dot{T} = 20.79 \text{ } ^\circ\text{C/s}$
 Fases presentes:

- Perlita gruesa
- Perlita fina
- Ferrita primaria



Distancia: 9 mm

Dureza: 93.72 HRB

$\dot{T} = 17.95 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{s}$

Fases presentes:

- Perlita gruesa
- Perlita fina
- Perlita globular
- Ferrita primaria

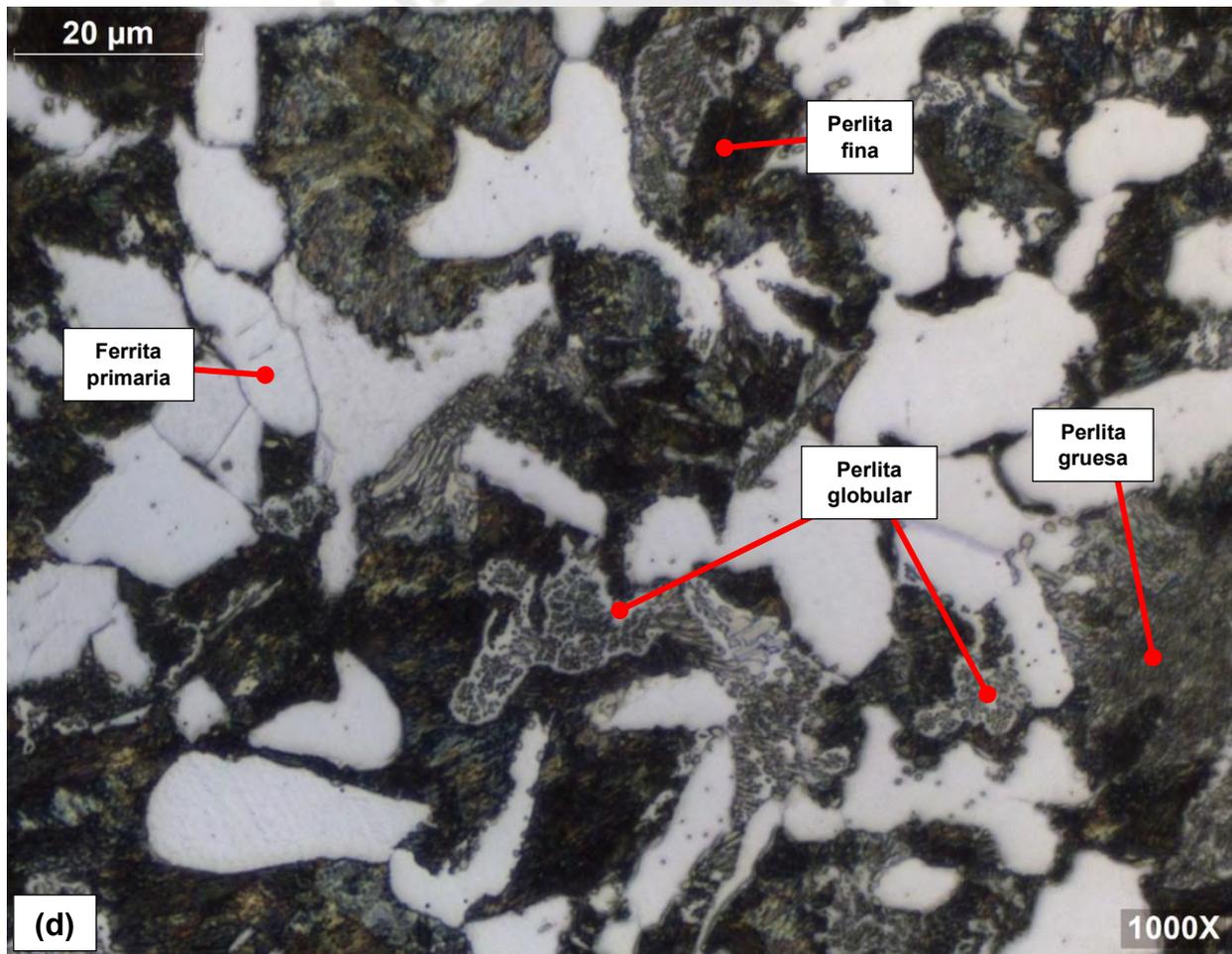


Figura 58. Metalografía correspondiente a la probeta Jominy de la condición 3 (740°C) para distancias de 8 mm y 9 mm con respecto a su extremo inferior

Para velocidades de enfriamiento menores a 20°C/s, se identificó la formación de una morfología adicional de la perlita (figura 58.d), donde el microconstituyente está compuesto por una matriz ferrítica y partículas de cementita en proceso de esferoidización.

La transformación eutectoide se divide en 2 tipos de crecimiento, cooperativo y no cooperativo [48] (figura 59). El crecimiento cooperativo produce perlita laminar (figura 59.a) a partir de la austenita, mientras que el no cooperativo, conocido como “Divorced Eutectoid Transformation” (DET), produce una matriz ferrítica compuesta por partículas de cementita (figura 59.b) [52].

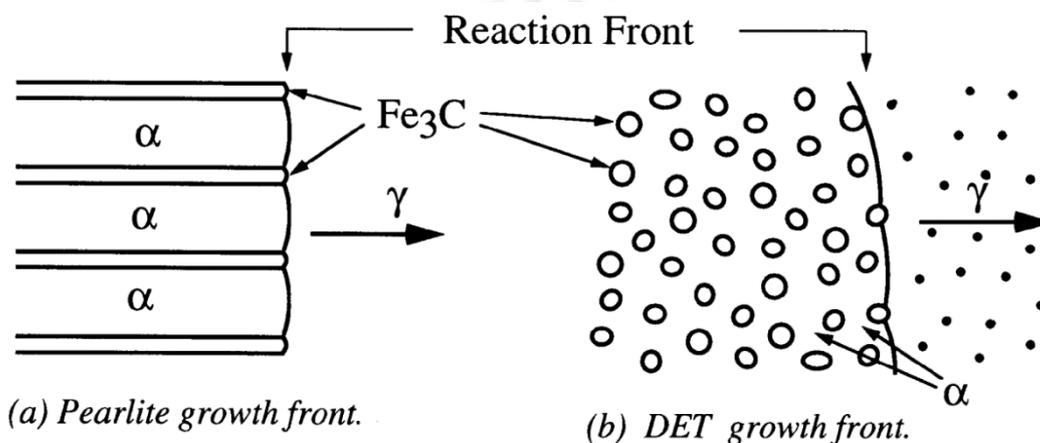


Figura 59. (a) Transformación eutectoide cooperativo (perlita laminar) y (b) DET (esferoidita)

Nota: De “The Divorced Eutectoid Transformation in Steel” (p.2), por J. D. Verhoeven, 1998 [48].

Diversos estudios de la literatura indican que esta transformación (DET) es favorecida por la formación de austenita no homogénea, el cual generalmente son partículas o núcleos preexistentes de cementita en la matriz austenítica [49 – 52].

Whiteley [53] utilizó aceros hipoeutectoides que fueron austenizados a temperaturas menores para proporcionar partículas de cementita residual en la matriz austenítica para luego exponerlas a velocidades de enfriamientos altas y bajas.

De esta manera, demostró que la formación de perlita laminar está sujeta a mayores velocidades de enfriamiento y observó una transición de la DET para menores velocidades de enfriamiento, donde las partículas de cementita se agrandan cuando ocurre la transición eutectoide.

Honda y Saito [54], evaluaron aceros exponiéndolos a temperaturas de calentamiento por encima de A_1 y manteniéndolas por 20 minutos para luego enfriarlas lentamente. Luego, examinó las microestructuras obteniendo las siguientes morfologías de la perlita que se muestra en la figura 60. De esta manera, concluyó que para una menor temperatura de austenización y cercano a la temperatura crítica A_1 , mayor es la tendencia a formar perlita esferoidal (DET).

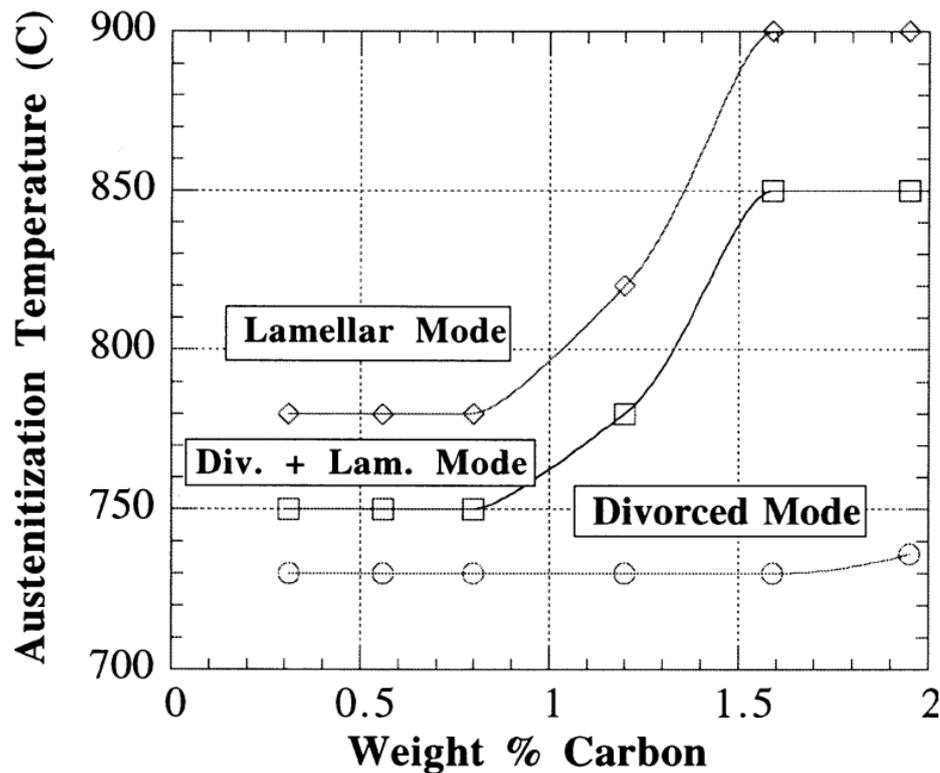


Figura 60. Morfología de la perlita en función de %C y temperatura de calentamiento
 Nota: De "The Divorced Eutectoid Transformation in Steel" (p.2), por J. D. Verhoeven, 1998 [48].

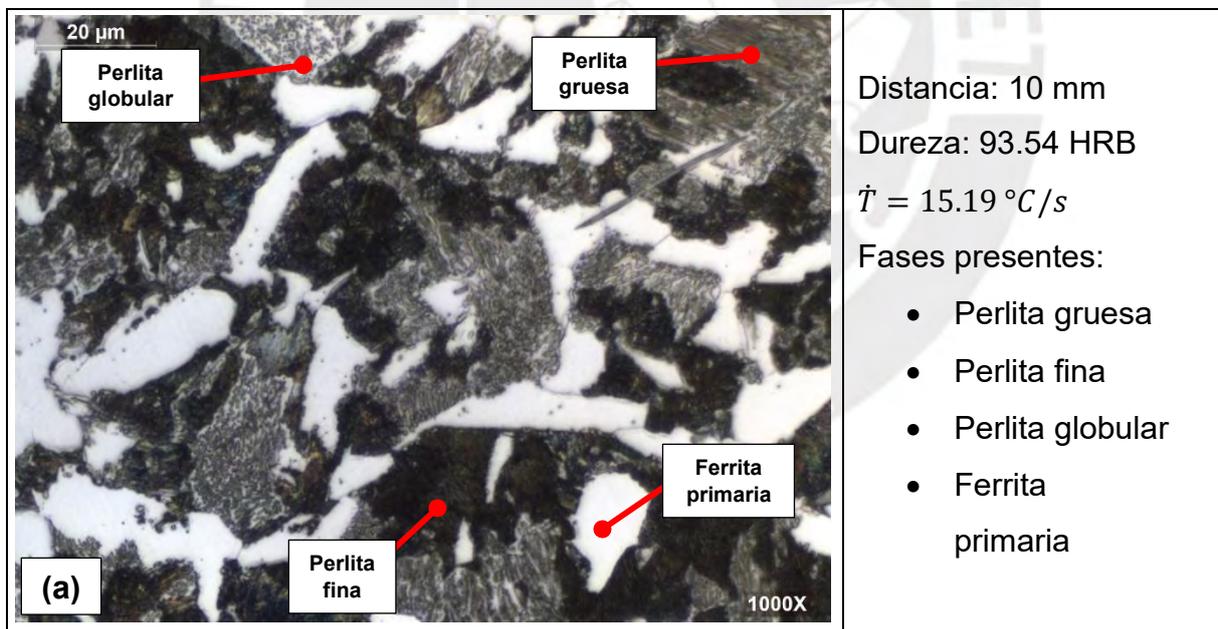
De acuerdo con los autores anteriormente mencionados, la condición de austenización a bajas temperaturas o intercrítico y exponer el material a bajas velocidades de enfriamiento [55], favorece la esferoidización de cementita, es decir, favorece la DET.

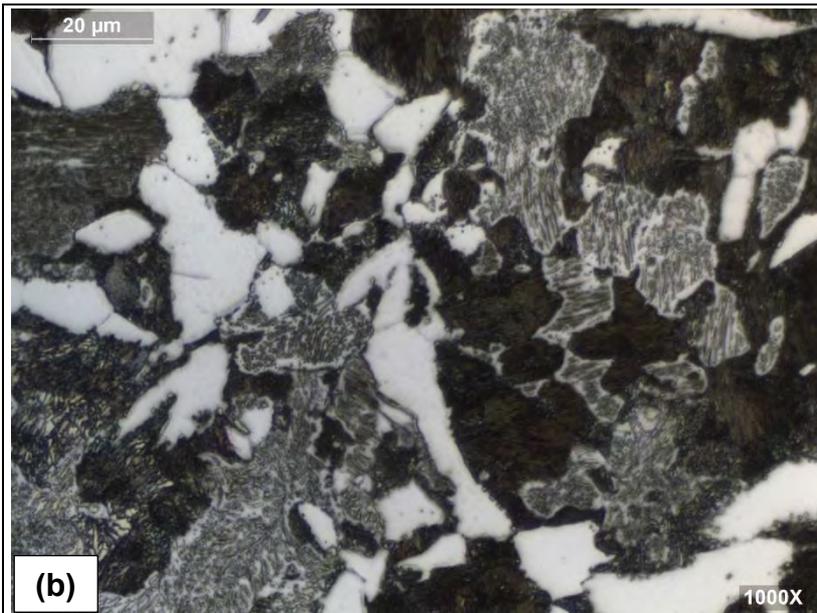
De estudios posteriores realizados por el autor, se determinó la temperatura crítica inferior A_1 de la probeta 7 mediante la técnica analítica "Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)". Como resultado de este estudio, se determinó que la temperatura crítica inferior promedio de 3 muestras obtenidas a partir de la probeta 7 es 731.5°C.

Asimismo, de acuerdo con el diagrama propuesto (figura 60) por Honda y Saito [54], para un acero AISI 1045 austenizado a 740°C y expuesto a bajas velocidades de enfriamiento, la morfología de la perlita formada luego de la transformación eutectoide es una combinación de ambas posibles transformaciones, laminar y esferoidal.

De esta manera, la condición de calentamiento a 740 °C (intercrítico), la exposición a esta temperatura durante 1 hora y la cercanía a la temperatura crítica inferior, indicaría que hubo partículas de cementita residuales en la austenita formada durante el calentamiento debido a que, junto a bajas velocidades de enfriamiento, dichas partículas de cementita se agrandarían durante la transformación eutectoide el cual coincide con los observado en la figura 58.

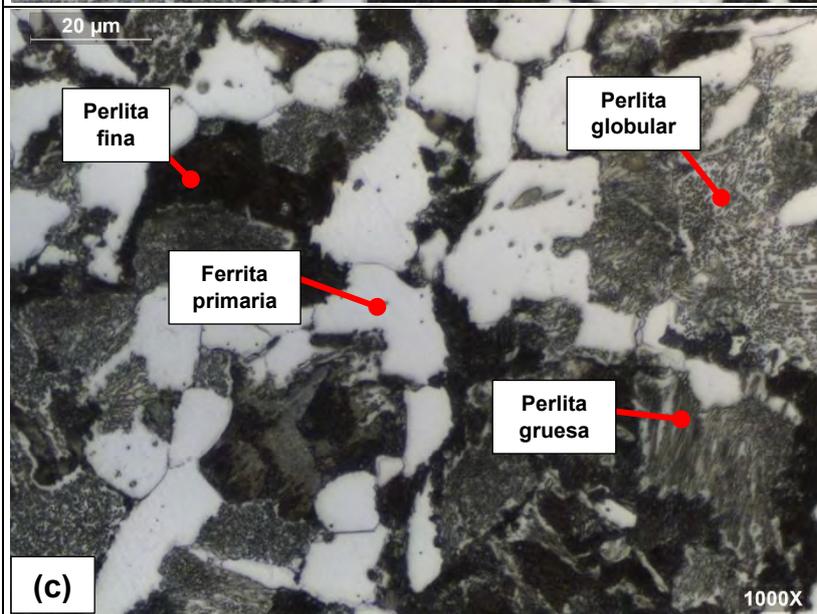
Por esta razón, para la condición en estudio (740°C) y para una velocidad de enfriamiento menor a 20°C/s (figura 58.c y figura 61), favoreció la formación de perlita laminar y la esferoidización del cementita a partir del grano de austenita previa.





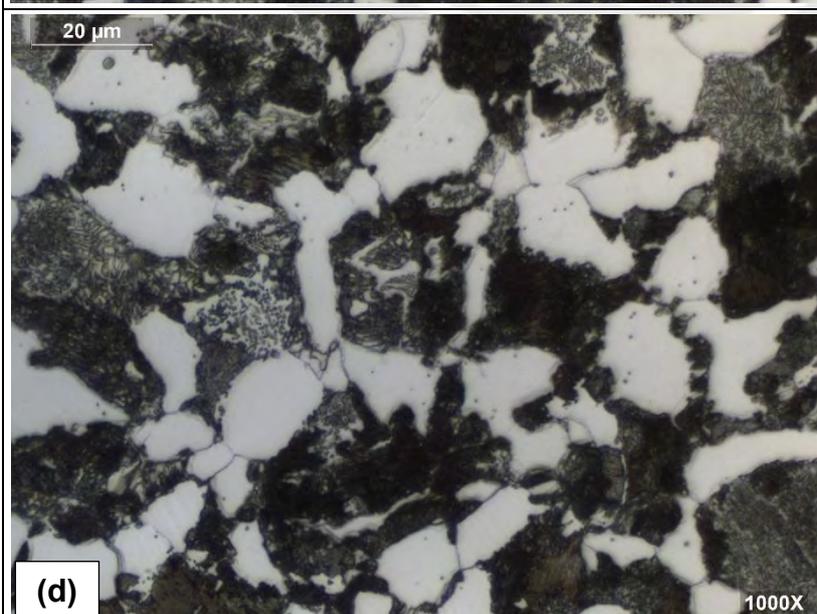
Distancia: 13 mm
 Dureza: 93.45 HRB
 $\dot{T} = 10.39 \text{ }^\circ\text{C/s}$
 Fases presentes:

- Perlita gruesa
- Perlita fina
- Perlita globular
- Ferrita primaria



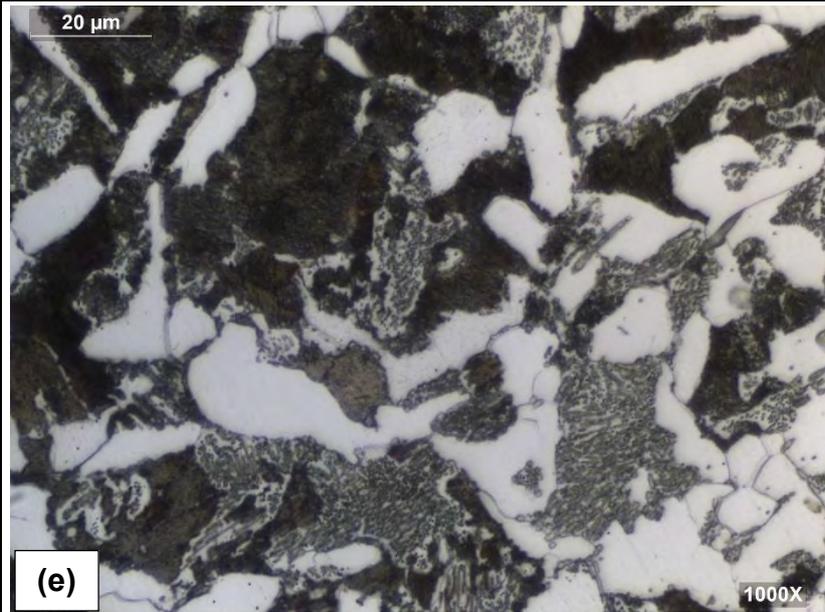
Distancia: 14 mm
 Dureza: 93.37 HRB
 $\dot{T} = 9.29 \text{ }^\circ\text{C/s}$
 Fases presentes:

- Perlita gruesa
- Perlita fina
- Perlita globular
- Ferrita primaria



Distancia: 17 mm
 Dureza: 93.11 HRB
 $\dot{T} = 7.05 \text{ }^\circ\text{C/s}$
 Fases presentes:

- Perlita gruesa
- Perlita fina
- Perlita globular
- Ferrita primaria



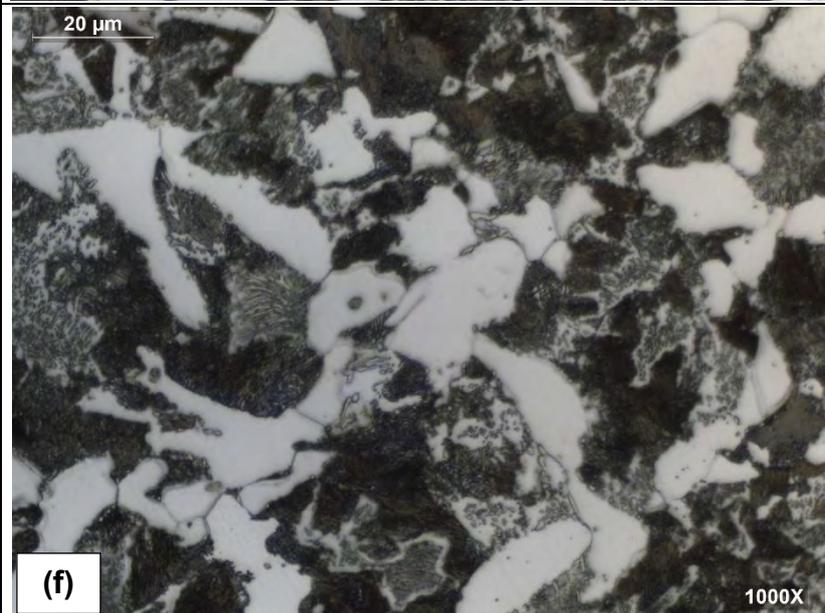
Distancia: 22 mm

Dureza: 92.53 HRB

$\dot{T} = 4.88 \text{ }^\circ\text{C/s}$

Fases presentes:

- Perlita gruesa
- Perlita fina
- Perlita globular
- Ferrita primaria



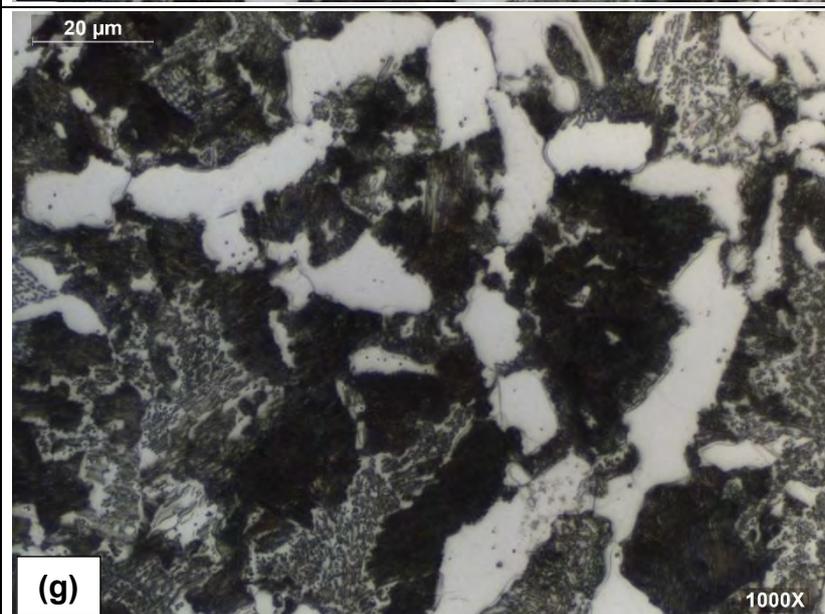
Distancia: 25 mm

Dureza: 92.36 HRB

$\dot{T} = 4.09 \text{ }^\circ\text{C/s}$

Fases presentes:

- Perlita gruesa
- Perlita fina
- Perlita globular
- Ferrita primaria



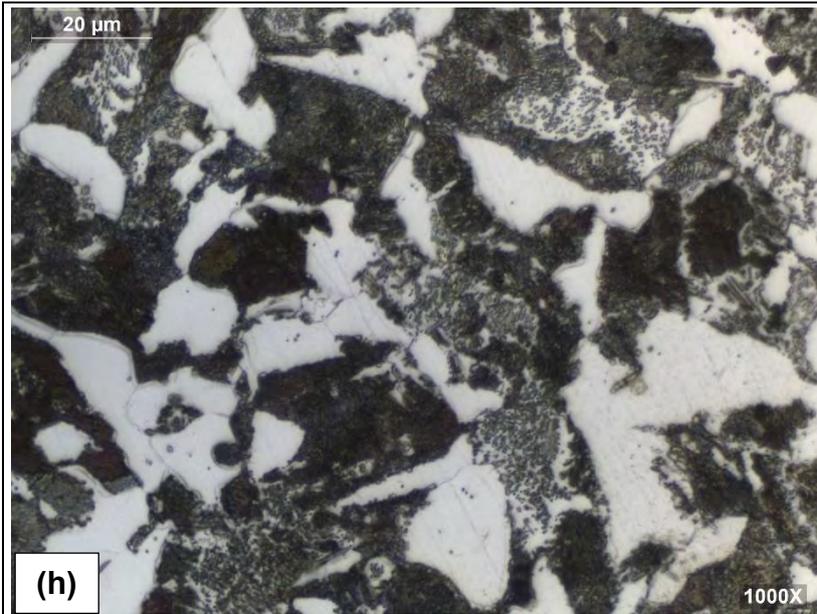
Distancia: 30 mm

Dureza: 91.95 HRB

$\dot{T} = 3.16 \text{ }^\circ\text{C/s}$

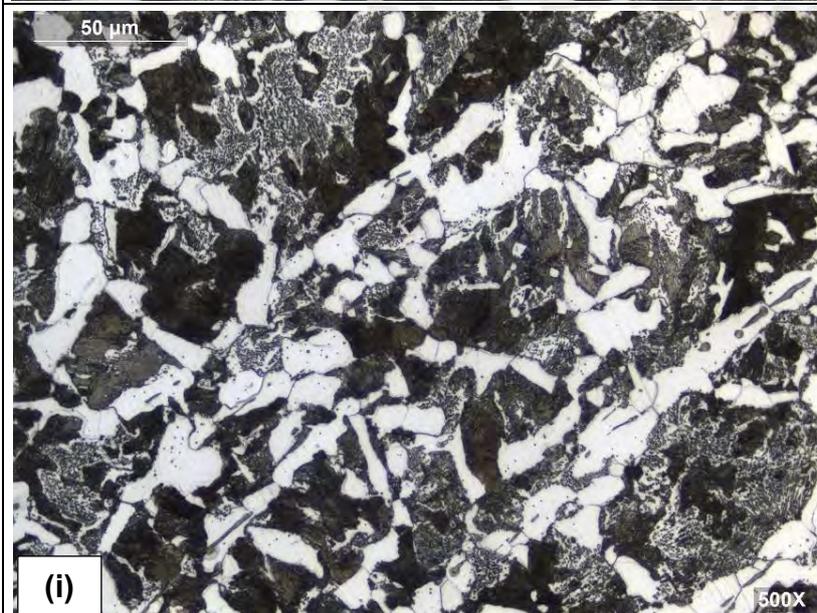
Fases presentes:

- Perlita gruesa
- Perlita fina
- Perlita globular
- Ferrita primaria



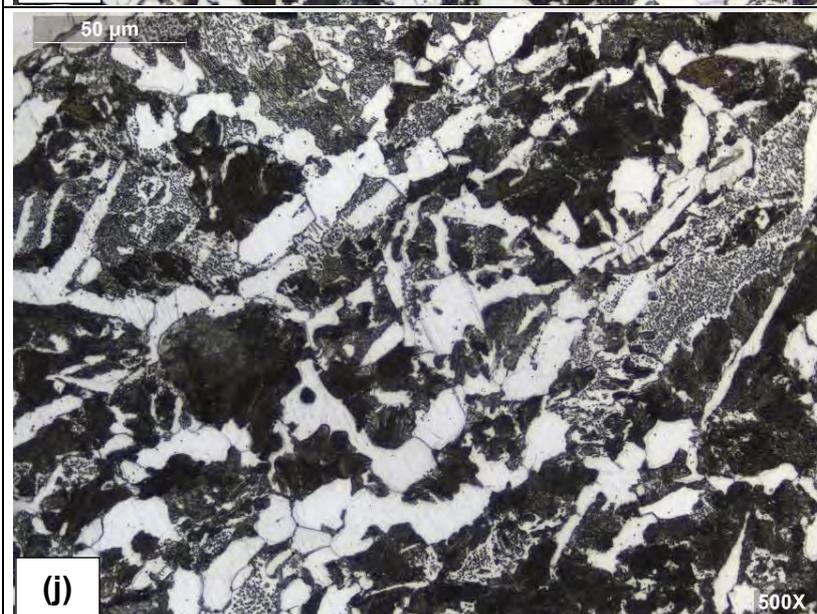
Distancia: 35 mm
 Dureza: 91.28 HRB
 $\dot{T} = 2.68 \text{ } ^\circ\text{C/s}$
 Fases presentes:

- Perlita gruesa
- Perlita fina
- Perlita globular
- Ferrita primaria



Distancia: 40 mm
 Dureza: 90.93 HRB
 $\dot{T} = 2.26 \text{ } ^\circ\text{C/s}$
 Fases presentes:

- Perlita gruesa
- Perlita fina
- Perlita globular
- Ferrita primaria



Distancia: 45 mm
 Dureza: 90.35 HRB
 $\dot{T} = 2.03 \text{ } ^\circ\text{C/s}$
 Fases presentes:

- Perlita gruesa
- Perlita fina
- Perlita globular
- Ferrita primaria

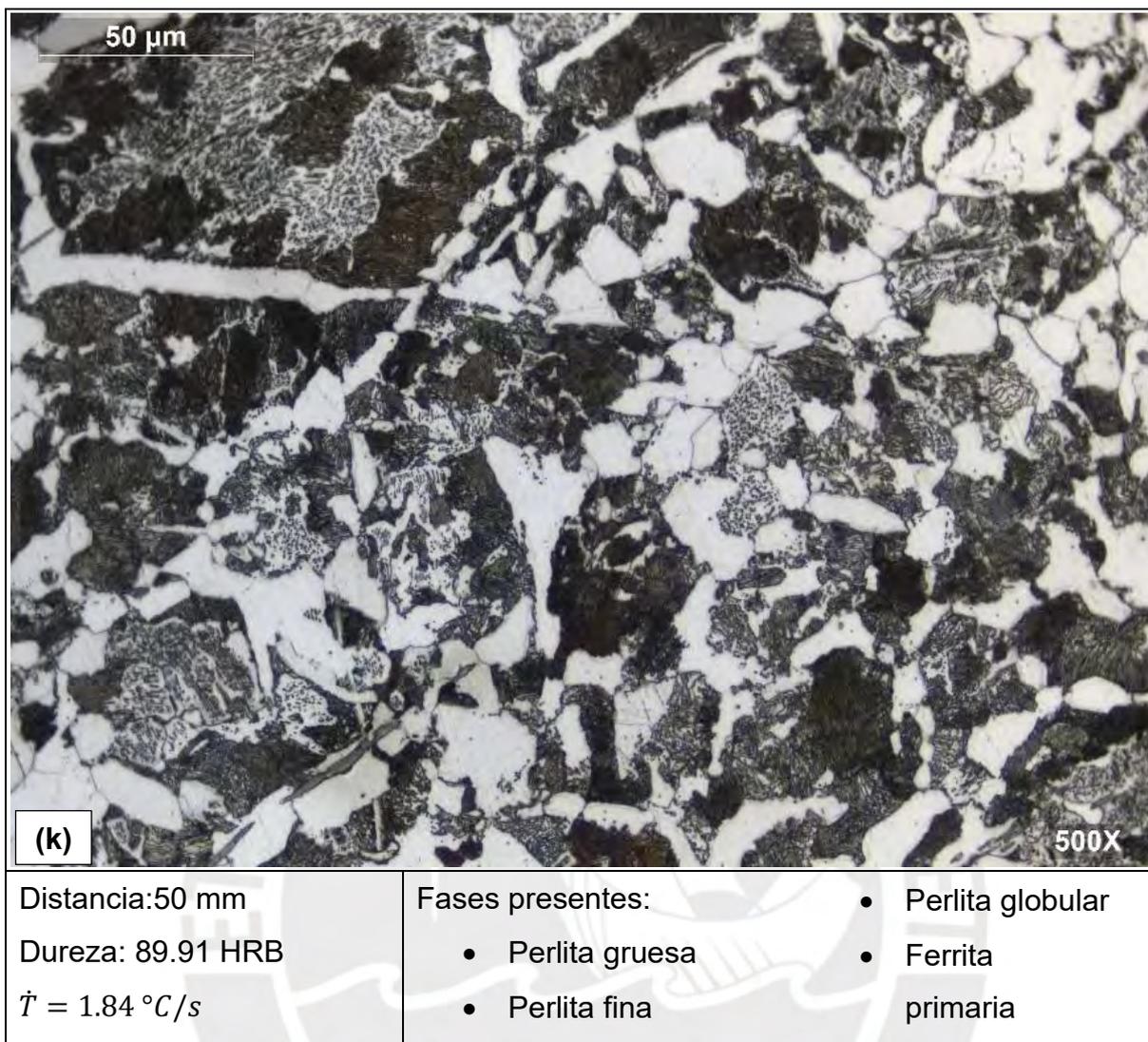


Figura 61. Metalografía correspondiente a la probeta Jominy de la condición 3 (740°C) para distancias de 10 mm, 13 mm, 14 mm, 17 mm, 22 mm, 25 mm, 30 mm, 35 mm, 40 mm, 45 mm y 50 mm con respecto su extremo inferior

A partir de una velocidad de enfriamiento menor a 20°C/s, se aprecia únicamente la formación de ferrita, perlita laminar (fino y grueso), perlita esferoidal o en proceso de esferoidización en la microestructura (figura 58.c figura 58.d y figura 61), cuya presencia de estas dos últimas va en aumento conforme se disminuye la velocidad de enfriamiento, por esta razón, la disminución de la dureza posee una pendiente menos pronunciada, manteniendo sus valores entre 95 HRB y 90 HRB. Finalmente, para velocidades de enfriamiento menores a 2°C/s (figura 61.k) se observa que su microestructura es completamente diferente a las condiciones anteriormente evaluadas, debido a la presencia de perlita gruesa.

4.7. Análisis de la correlación microestructura-dureza

La variación microestructural a lo largo de la probeta Jominy para las condiciones en estudio es consecuencia de su exposición de diferentes velocidades de enfriamiento conforme las zonas del material se van alejando del borde “templado”. Por esta razón, se produce la formación de diferentes fases y microconstituyentes: martensita, bainita, perlita fina, perlita gruesa, ferrita alotriomórfica y ferrita Widmanstätten. Como consecuencia de ello, se produce una variación significativa en las propiedades mecánicas, en particular, la dureza, la cual está directamente relacionada con las fases y microconstituyentes presentes y la proporción de estas en la microestructura.

Por tanto, se puede decir que la dureza final del acero es la ponderación de los valores de dureza de cada fase y/o microconstituyente, tomando en cuenta la proporción de ellas en la microestructura. Esto puede llevar a que una combinación diferente de fases y/o microconstituyentes brinden valores de dureza similares, como ya se había advertido en la figura 45 donde se apreciaban los mismos valores de dureza para diferentes condiciones de enfriamiento. Con el análisis de las microestructuras observadas en el inciso 4.6 y sus valores de dureza, se puede constatar que valores de dureza similares pueden provenir de diferentes fases y/o constituyentes formados durante el enfriamiento.

Por lo tanto, con el fin de desarrollar un patrón de microestructura a igualdad de dureza, se ha ordenado en la tabla 20, los valores de dureza similares obtenidos en los ensayos Jominy, caracterizando para cada una de ellas sus respectivos ciclos de enfriamiento (temperatura de calentamiento y velocidad de enfriamiento).

Tabla 20. Mediciones de dureza experimentales y sus condiciones de enfriamiento

Dureza	Mediciones experimentales			Velocidad de enfriamiento [°C/s]		
	T=890°C	T=760°C	T=740°C	T=890°C	T=760°C	T=740°C
58 HRC	57.83	-	-	100	-	-
50 HRC	51.47	51.45	-	54.77	106.41	-
45 HRC	45.95	45	-	47.39	71.55	-
40 HRC	40.17	40.65	-	40.52	60.32	-
35 HRC	34.94	33.7	-	35.16	51.75	-
30 HRC	29.3	28.71	-	20.42	44.82	-
25 HRC	25.31	25.12	26.06	8.03	34.93	108.52
20 HRC	20	21.21	21.07	-	13.6	72.61
95 HRB	95.3	95.85	95.66	2.22	5.57	35.1
90 HRB	-	91.33	90.4	-	1.93	2.04

4.8. Desarrollo de patrón de microestructura y dureza según condiciones de enfriamiento

Tomando como referencia los datos ordenados en la tabla 20, se desarrolló el siguiente patrón de microestructura y dureza, donde su principal enfoque es poner en relieve que un valor de dureza puede corresponder a diferentes condiciones microestructurales en el acero sometido a diferentes ciclos térmicos.

Por ejemplo, para las condiciones analizadas, una dureza de 30 ± 1 HRC (figura 60) puede corresponder a dos microestructuras diferentes, mientras que una dureza de 25 ± 1 HRC puede ser alcanzada por cinco diferentes condiciones microestructurales.

Conforme se analicen otras condiciones de ciclo térmico (temperatura de calentamiento y velocidad de enfriamiento) es de esperar que haya un mayor número de combinaciones microestructurales que arrojen un mismo valor de dureza.

Pero las propiedades mecánicas de un acero para una microestructura determinada no se pueden caracterizar únicamente por el valor de dureza obtenido. Esto es particularmente importante cuando el comportamiento en servicio del acero depende de otras propiedades mecánicas como la tenacidad y su temperatura de transición dúctil/frágil especialmente a bajas temperaturas.

Una de las motivaciones del presente estudio era poder contribuir con patrones microestructurales a la evaluación "in situ" que se pueda realizar en componentes y equipos que hayan sido sometidos a ciclos térmicos no controlados debido a situaciones imprevistas como incendios. La exposición al fuego de componentes y estructuras de acero y su control y extinción a través de agua o de espuma para enfriar el material, expone al mismo a ciclos térmicos que pueden conducir a diferentes condiciones microestructurales. Cuando se evalúa la integridad estructural de un componente mecánico que ha estado expuesto al fuego o a condiciones térmicas anómalas, se suele efectuar primero un análisis "in situ" del material de manera no destructiva, de modo que el componente sea intervenido (alterado) lo menos posible, para que pueda continuar operando en servicio (si el análisis de integridad así lo permite).

El código API 579-1/ASME FFS-1 (Part 11 – Assessment of fire damage) considera necesaria la recopilación de datos y medidas en componentes en las zonas de exposición al calor donde pueden haber ocurrido cambios en las propiedades mecánicas. Estas mediciones incluyen la dureza y el análisis metalográfico “in situ” (figura 62).

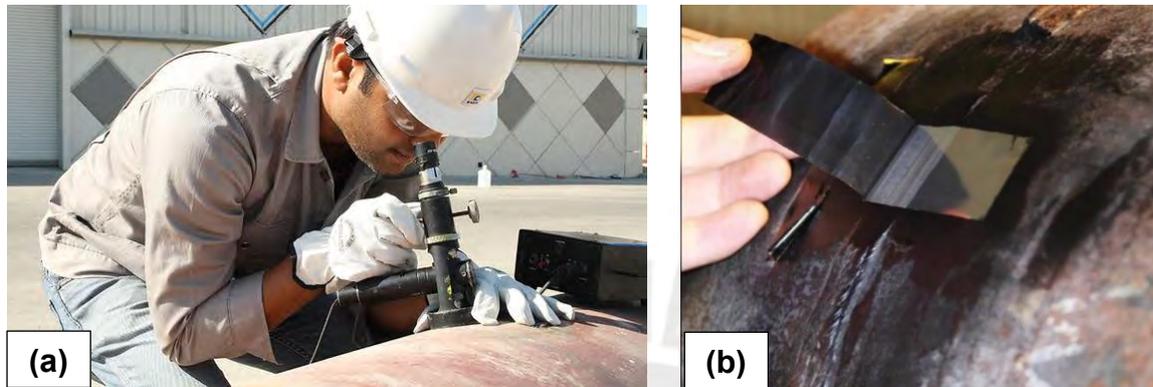


Figura 62. Microscopia de campo (a) [45] y metalografía de campo empleando replicas metalográficas (b) [46]

Sin embargo, la resolución de una réplica metalográfica obtenida en campo o la observación directa a través de un microscopio portátil con un aumento máximo de 500X puede hacer muy compleja la identificación de microconstituyentes complejos, como los observados en muchas de las diferentes condiciones de ciclo térmico del presente estudio.

Es por ello, qué para facilitar el análisis metalográfico del acero expuesto a ciclos térmicos con temperaturas de calentamiento dentro del rango de estudio, se ha elaborado este patrón de microestructuras. Ello permitirá que los análisis microestructurales, especialmente aquellos que se realizan en condiciones difíciles como son las realizadas en campo, tengan referencias micrográficas que ayuden a su identificación y su correlación con los valores de dureza medidos.

La evaluación de otras propiedades mecánicas en el material como la tenacidad, medida a través de la energía absorbida en el ensayo de impacto Charpy, y su correlación con la microestructura y la dureza, resulta también un campo de estudio muy interesante, pero no forma parte de los alcances de este proyecto, aunque no se descarta que en el futuro se pueda abordar tomando como base los resultados del presente estudio.

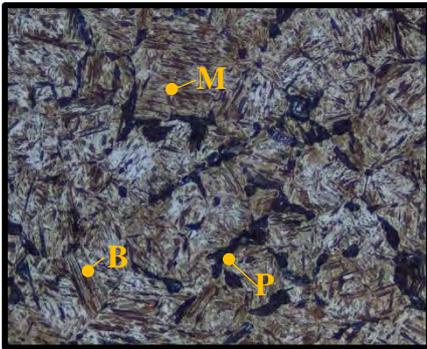
DUREZA

58 HRC ± 1.5HRC

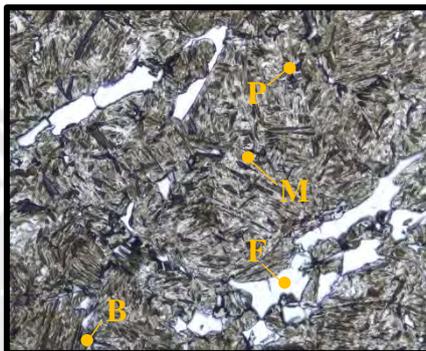


T=890°C – 100 °C/s

50 HRC ± 1.5HRC

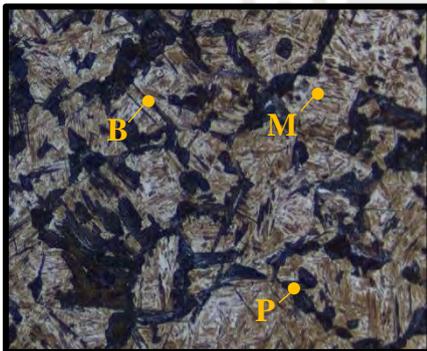


T=890°C – 55 °C/s

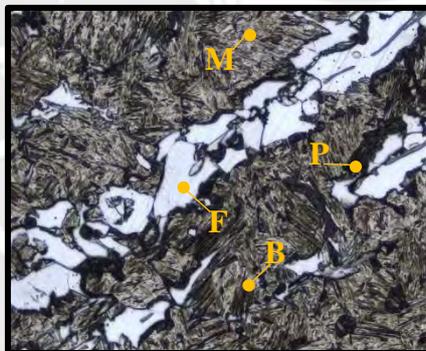


T=760°C – 106 °C/s

45 HRC ± 1.5HRC

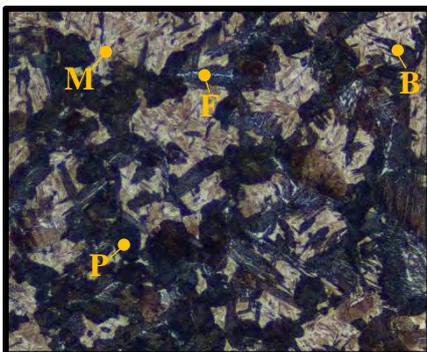


T=890°C – 47 °C/s

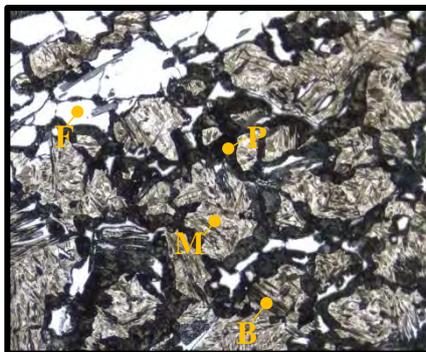


T=760°C – 72 °C/s

40 HRC ± 1.5HRC



T=890°C – 40 °C/s



T=760°C – 60 °C/s

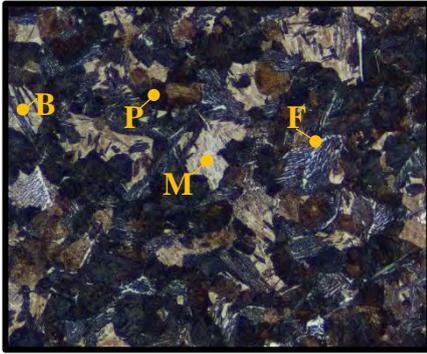
Leyenda:

- M: Martensita
- B: Bainita
- P: Perlita
- F: Ferrita

MICROESTRUCTURA

DUREZA

35 HRC \pm 1.5HRC

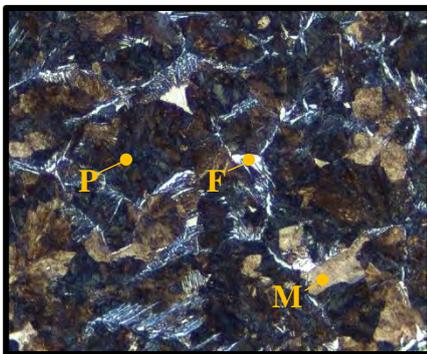


T=890°C - 35 °C/s

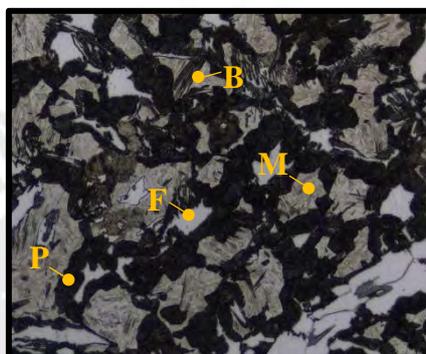


T=760°C - 50 °C/s

30 HRC \pm 1.5HRC



T=890°C - 20 °C/s

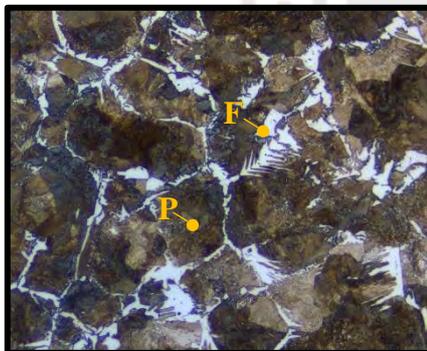


T=760°C - 45 °C/s

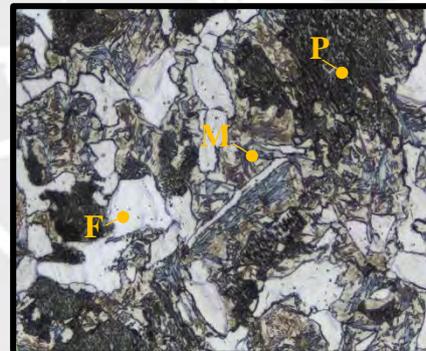
Legenda:

- M: Martensita
- B: Bainita
- P: Perlita
- F: Ferrita

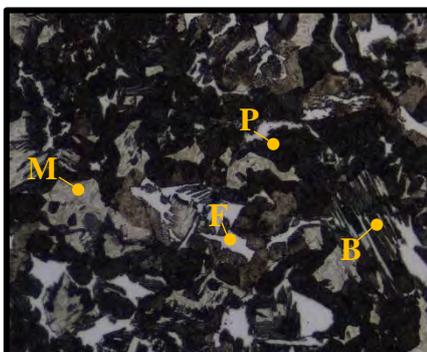
25 HRC \pm 1.5HRC



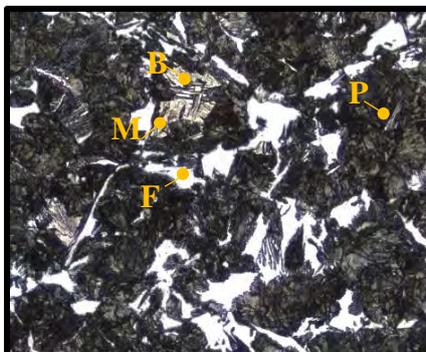
T=890°C - 8 °C/s



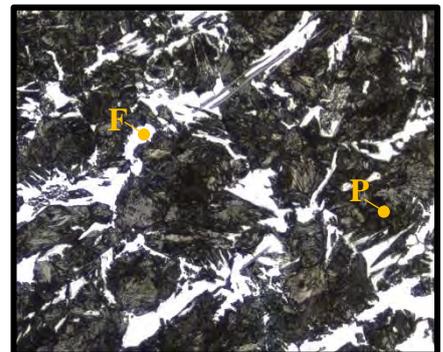
T=740°C - 108 °C/s



T=760°C - 40 °C/s



T=760°C - 35 °C/s



T=760°C - 20 °C/s

MICROESTRUCTURA

DUREZA

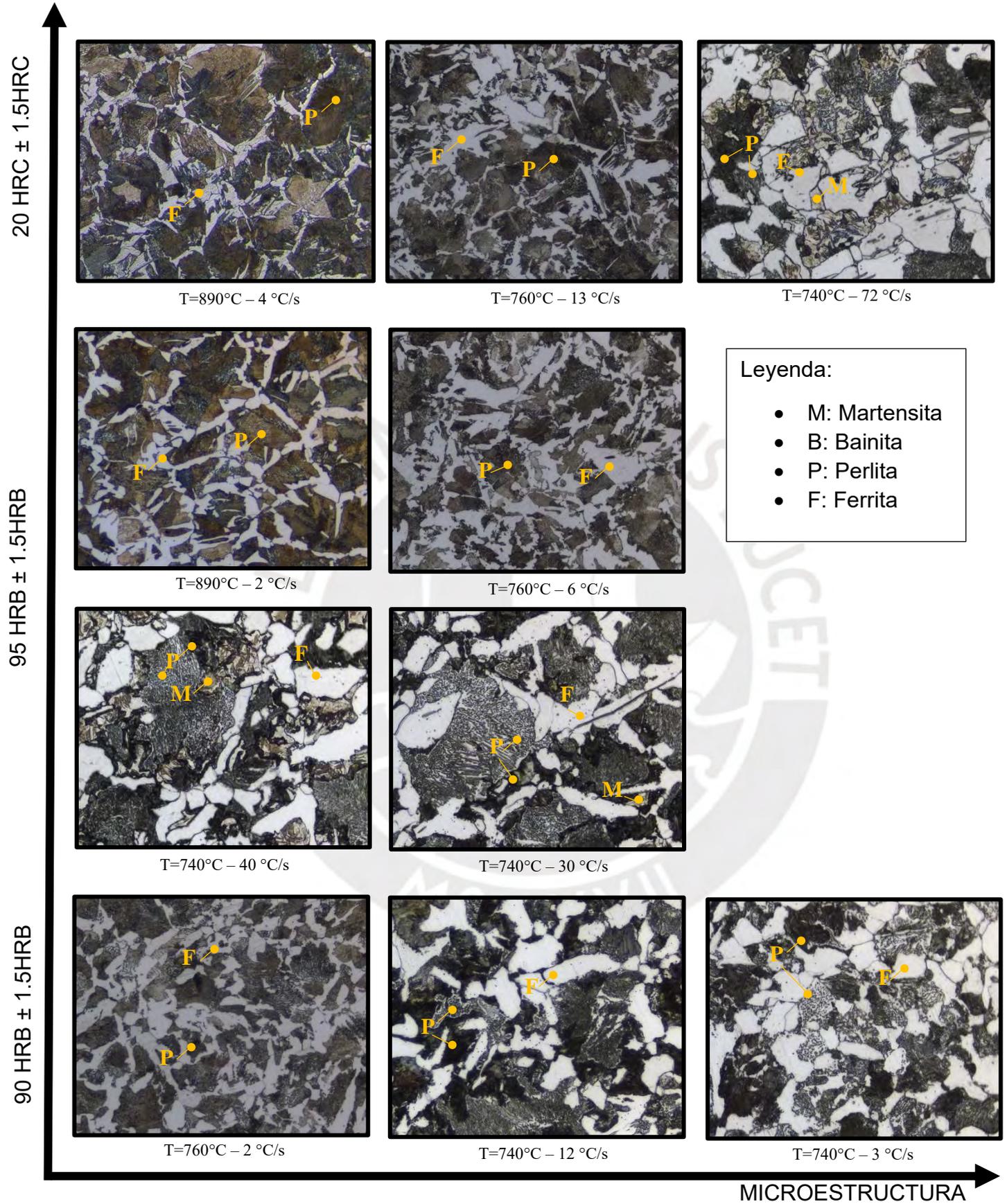
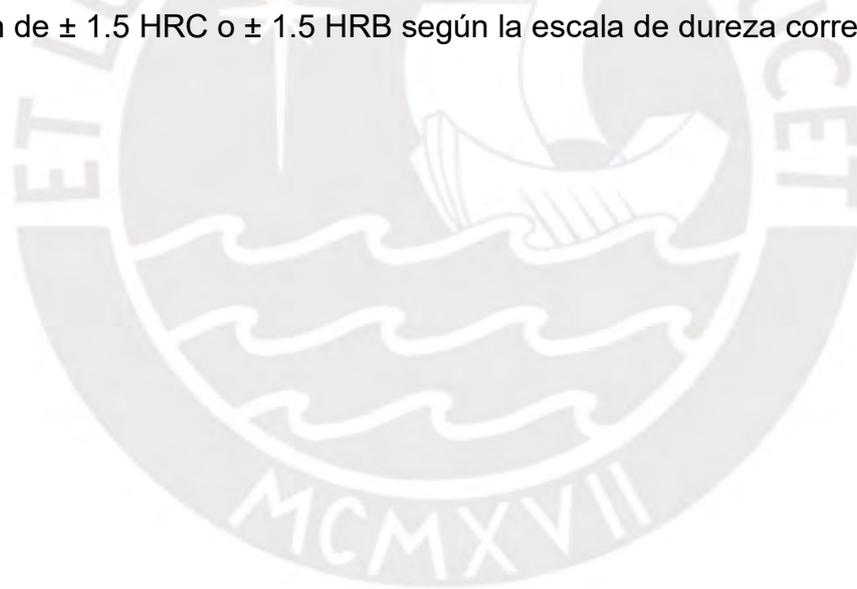


Figura 63. Patrón de microestructuras para tres (3) condiciones de calentamiento (740°C, 760°C, 890°C)

CONCLUSIONES

- En el presente trabajo de tesis se elaboró un patrón de microestructura-dureza donde se caracterizó las variaciones microestructurales y de dureza para el acero AISI/SAE 1045 de acuerdo con determinados ciclos térmicos. Para ello, se efectuaron ensayos Jominy “modificado” a dos (2) temperaturas en el rango intercrítico (740°C y 760°C) y una (1) temperatura de austenización completa (890°C) empleando los lineamientos de la norma ASTM A255, así como la evaluación de los resultados a través de ensayos de dureza Rockwell (ASTM E18) y metalografía. Adicionalmente se determinaron las velocidades de enfriamiento en cada punto de las probetas a través de simulación numérica del ciclo térmico en las condiciones de estudio.
- Se desarrolló un modelo computacional del ciclo térmico del ensayo Jominy durante la etapa de enfriamiento empleando parámetros de los mecanismos de transferencia de calor (conducción, convección natural y forzada y radiación) propuestos por los autores Nunura, C.; Higuera, O. y Le Masson, P. La verificación del modelo se realizó a través de la comparación de los resultados experimentales del autor Nunura, C. con respecto a los resultados obtenidos de la simulación térmica. De esta manera, el modelo posee un error máximo del 5% en el rango de temperaturas que se encuentren entre la temperatura de calentamiento y la temperatura de iniciación de la transformación martensítica.
- De los resultados obtenidos por simulación, se concluye que la máxima velocidad de enfriamiento se encuentra alrededor de los 100°C/s para las condiciones evaluadas y a 2 mm del extremo enfriado de la probeta Jominy. Adicionalmente, de acuerdo con los resultados experimentales, los microconstituyentes formados a estas velocidades de enfriamiento fueron: martensita para la condición de austenización completa (890°C) y, adicionalmente a la anterior, perlita fina y ferrita primaria para temperaturas de calentamiento intercríticos.
- De los resultados obtenidos por simulación, se concluye que a partir velocidades de enfriamiento menor a 20°C/s para las condiciones evaluadas, la microestructura se constituye principalmente por una matriz perlítico-ferrítico de acuerdo con los resultados experimentales obtenidos.

- Se concluye para un mismo valor de dureza, la formación de diferentes combinaciones de fases y microconstituyentes el cual están sujetas a diferentes condiciones de enfriamiento y temperatura máxima de calentamiento. Adicionalmente, los microconstituyentes identificados son los siguientes: martensita, bainita (aparentemente), perlita fina, perlita gruesa, perlita esferoidal o en proceso de esferoidización, ferrita pro-eutectoide, ferrita aliotriomorfa, ferrita Widmanstätten y ferrita idiomórfica
- Se desarrolló un patrón de microestructura-dureza el cual permite caracterizar mediante microscopía óptica los principales microconstituyentes obtenidos a partir de tres condiciones de temperatura máxima de exposición (890°C, 740°C y 760°C) y de las condiciones de enfriamientos producidas por los ensayos Jominy. Las durezas que se han tomado en cuenta para la elaboración de este patrón son: 58 HRC, 55 HRC, 50 HRC, 45 HRC, 40 HRC, 35 HRC, 30 HRC, 25 HRC, 20 HRC, 95 HRB y 90 HRB. Asimismo, los valores de durezas propuestos poseen una precisión de ± 1.5 HRC o ± 1.5 HRB según la escala de dureza correspondiente.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] HIGUERA, Oscar
2007 “Thermal simulation in Cosmoworks of Steel put under test of hardenability Jominy”. *Scientia et Technica* Año XIII. Colombia, vol. 1, num. 25, pp. 231 – 236.
- [2] DE LA TORE, Leonor
2011 “Velocidad de enfriamiento: su determinación en problemas de templado”. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*. Argentina, vol. 18, núm. 1, pp. 57 – 64.
- [3] PATIÑO, Hernan
2016 “Tratamiento térmico de temple, influencia del medio de enfriamiento”. *Jornal de Ciencia e Ingeniería*. Colombia, vol. 8, núm. 1, pp. 52 – 58.
- [4] LOPEZ, E.
2016 “Predicción del perfil de dureza en probetas Jominy de aceros de medio y bajo carbono”. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. México, vol. 12, núm. 3, pp. 609 – 619.
- [5] RAMOS, Ricardo
2013 Estudio de la soldabilidad de la unión disimilar de un cobre con 5 % de Zn con acero estructural ASTM A36. Tesis de licenciatura en Ciencias e Ingeniería con mención en Ingeniería Mecánica. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería.

- [6] QUEIRÓS, Growene
- 2021 Nuevo Tratamiento Térmico de Recocido Intercrítico de Aceros Resistentes al Desgaste con Boro de Bajo Impacto Medioambiental. Tesis de doctorado en Ciencias con mención en Química. Madrid: Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Químicas.
- [7] AYALA, Daniel
- 2011 Análisis de la zona afectada por el calor en aceros hipoeutectoides. Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico. Quito: Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica.
- [8] ASTM A519/A199M
- 2023 Standard Specification for Seamless Carbon and Alloy Steel Mechanical Tubing.
- [9] DRAKE, R. M.
- 1972 "Analysis of Heat and Mass Transfer". New York: McGraw-Hill.
- [10] GARITANO, Cristina
- 2020 Caracterización de diagramas CCT para aceros microaleados con Nb. Proyecto de fin de grado. Gipuzkoa: Tecnun Universidad de Navarra.
- [11] BELZUNCE, F.
- 2001 Aceros y fundiciones: Estructuras, transformaciones, tratamientos térmicos y aplicaciones. España. Universidad de Oviedo.

- [12] REYES, Alberto
2012 “Aceros, estructuras y tratamientos térmicos”. Izcalli. Universidad Nacional Autónoma de México.
- [13] ASKELAND, Donald
2018 Ciencia e Ingeniería de Materiales. Séptima edición. México: Cengage Learning.
- [14] MORENO, Sender
2018 Comparación microestructural de los aceros 1020, 1045 y 8620 templados desde temperaturas intercríticas y revenidos. Tesis de licenciatura en Ingeniería Mecánica. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad Tecnológica Ingeniería Mecánica.
- [15] AYALA, Jhon
2018 Metallographic Analysis of Thermal Treatment of Steel SAE 1040. Perú. Universidad Nacional de Ingeniería.
- [16] SERRANO, Raquel
2014 “Transformaciones fuera de equilibrio, tratamientos térmicos”. Material del curso de Tecnología de Materiales. España: Universidad de Málaga.
- [17] UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
2015 “Transformaciones de la austenita fuera del equilibrio”. Material del curso de Metalografía y Tratamientos Térmicos . Argentina.
- [18] VICENTE, Alex
2021 Simulación y validación de un tratamiento térmico de un acero. Tesis de licenciatura en Ingeniería Mecánica. España: Universidad de Vigo, Facultad de Ingeniería y Arquitectura .

- [19] CRIADO, Antonio
- 2008 Estructuras metalográficas de aleaciones hierro-carbono: aceros al carbono y fundiciones. Madrid: Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Ciencias Químicas.
- [20] NUNURA, César
- 2009 Correlação numérica e experimental da microestrutura, taxa de resfriamento e características mecânicas do aço ABNT 1045. Tesis para optar el grado académico de Magister en Ingeniería. Porto Alegre: Universidad Federal do Rio Grande do Sul, Escuela de Post-Graduados en Ingeniería de Mina, Metalúrgica de los Materiales.
- [21] LOBIANA, Pabel
- 2012 Determinación de la curva Jominy del acero 30ГC. Trabajo de diplomatura. Santa Clara: Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Facultad de Ingeniería Mecánica.
- [22] ASTM A255-20a
- 2020 Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel.
- [23] GEROLDO, Augusto
- 2008 “Heat Transfer Numerical Modeling During Jominy End-quench Test of The Sae 1045”. Ponencia presentada en 12th Brazilian Congress of Thermal Engineering and Sciences. ABCM - Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas. Belo Horizonte, 14 de noviembre.
- [24] BLANCO, Marly
- 2014 “Curso de tratamientos térmicos”. Material de curso.
- [25] CALLISTER, William
- 2016 Ciencia e Ingeniería de Materiales. Segunda edición. México: Reverté.

- [26] LOPÉZ, E.
2013 “Mathematical model of heat transfer to predict distribution of hardness through the Jominy bar”. *Revista de Metalúrgica*. Mexico, vol. 49, num. 2, pp. 111 – 121.
- [27] OZISIK, M.
1999 “Transferência de calor: um texto básico”. Segunda edición. Rio de Janeiro: Guanabara.
- [28] LOPÉZ, E.
2011 “Finite Difference Representation of Transfer Heat in the Hardenability of Steel SAE 1045”. *Revista I+i Investigación Aplicada e Innovación*. Mexico, vol. 5, num. 5, pp. 33 – 41.
- [29] BARRANTES, Enrique
2021 “Introducción a los mecanismos de transferencia de calor”. Material del curso de Transferencia de Calor. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería.
- [30] LE MASSON, P.
2004 “Estimations of a 2D convection heat transfer coefficient during a metallurgical “Jominy end-quench” test: comparison between two methods and experimental validation”. *Inverse Problems in Science and Engineering*. Mexico, vol. 12, num. 6, pp. 595 – 617.
- [31] HERNANDEZ, J.
2013 “Prediction of hardness profiles in medium and low carbon steel Jominy probes”. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. Mexico, vol. 12, num. 3, pp. 609 – 619.
- [32] ASM HANDBOOK
2020 Volume 4D: Heat Treating Irons & Steels. Treinta y nueve volúmenes. ASM International

- [33] NOVAKOVIC, Rodolfo
2006 “Aleaciones de Fierro”. En *Nuestras Investigaciones*. Consulta: 10 de abril de 2023.
- [34] KASATKIN, O. G.
1984 “Calculation models for determining the critical point of steel”. *Met Sci Heat Treat. Russia*, vol. 26, num. 1, pp. 27 – 31.
- [35] GARCIA, Camilo
2009 Efecto de la deformación en las transformaciones de fase de un acero AISI/SAE 1045 templado desde temperaturas intercríticas y revenido. Proyecto curricular de Tecnología e Ingeniería Mecánica. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad Tecnológica, Tecnología e Ingeniería Mecánica.
- [36] BHADESHIA, H. K.
1990 “Nucleation of Widmanstätten”. *Materials Science and Technology*. Inglaterra, vol. 6, num. 1, pp. 781 – 784.
- [37] HERNANDEZ, J.
2013 “Metalografía”. *Revista digital para profesionales de la enseñanza*. España, vol. 12, num. 3, pp. 609 – 619.
- [38] UNIVERSIDAD COMPLUTENSE MADRID
s/f *Proyecto de Innovación Atlas Metalográfico*. Consulta: 10 de abril de 2023.
- [39] HERNANDEZ, Fernanda
2014 *Propiedades de la esferoidita* [diapositiva]. Consulta: 10 de abril de 2023.

- [40] ASTM E18-22
2022 Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials.
- [41] ASTM E3-11
2011 Standard Test Methods for Preparation of Metallographic Specimens.
- [42] ASTM E407-07
2007 Standard Test Methods for Microetching Metals and Alloys.
- [43] H.K.D.H. BHADESHIA
2014 "Physical Metallurgy of Steels". United Kingdom: University of Cambridge.
- [44] NEIL, Christopher
2016 The Thermal Stability of Bulk Nanocrystalline Steels. Tesis para optar el grado académico de Doctor en Filosofía. Reino Unido: Cambridge University.
- [45] TRC ARABIA
2019 ASSET INTEGRITY MANAGEMENT. Consulta: 6 de julio de 2023
- [46] Xpert Engineering Solution Sdn Bhd
2019 In-situ Metallography Replica Testing in Malaysia. Consulta: 6 de julio de 2023
- [47] ASTM E415-21
2021 Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Allow Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry

- [48] VERHOEVEN, J. D.
1998 “The Divorced Eutectoid Transformation in Steel”. METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A. United States, vol. 29A, pp. 1181 – 1189.
- [49] OYAMA, T.
1984 “Application of the divorced eutectoid transformation to the development of fine-grained, spheroidized structures in ultrahigh carbon steels”. Scripta METALLURGICA. United States, vol. 18, pp. 799 – 804.
- [50] SYN, C. K.
1994 “Influence of Microstructure on Tensile Properties of Spheroidized Ultrahigh-Carbon (1.8 Pct C) Steel”. METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A. United States, vol. 25, pp. 1481 – 1493.
- [51] LESUER, D.
1994 “Pearlite in ultrahigh carbon steels: Heat treatments and mechanical properties”. METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A. United States, vol. 27A, pp. 111 – 118.
- [52] ANKIT, K.
2014 “Deviations from cooperative growth mode during eutectoid transformation: Insights from a phase-field approach”. Acta Materialia. Germany, vol. 81, pp. 204 – 210.
- [53] WHITELEY, JH.
1922 “The formation of globular pearlite”. J. Iron Steel Institute. vol. 105, pp. 339 – 357.

[54] HONDA, K.

1920 "On the formation of spheroidal cementite". J. Iron Steel Institute.
vol. 102, pp. 261 – 269.

[55] VERHOEVEN, J. D.

2000 "The Role of the Divorced Eutectoid Transformation in the
Spheroidization of 52100 Steel". METALLURGICAL AND
MATERIALS TRANSACTIONS A. vol. 31A, pp. 2431 – 2438.

