

# Correlación entre la microestructura y la dureza en el acero AISI/SAE 1045 sometido a diferentes ciclos térmicos empleando un ensayo Jominy modificado

Carlos Fosca Pastor<sup>1</sup>, Victor Cupe Missa<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento Académico de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú. Email: cfosca@pucp.edu.pe

<sup>2</sup>Departamento Académico de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú. Email: vcupe@pucp.edu.pe

## Resumen

El presente estudio se aborda la correlación entre la microestructura y la dureza en un acero AISI/SAE 1045 sometido a diferentes ciclos térmicos incluyendo temperaturas en el rango de austenización incompleta. Para ello, se utilizó el ensayo Jominy modificado, se estimó las velocidades de enfriamiento, se realizó mediciones de dureza y se analizó las microestructuras por cada condición de ciclo térmico. El resultado es un patrón de microestructuras vs dureza que pueden ayudar a comprender las condiciones de ciclo térmico a las que pueda haber sido expuesto dicho acero en condiciones que simulen una exposición severa al fuego. Además, para determinados ciclos térmicos y a igualdad de dureza medida, la microestructura observada puede presentar grandes diferencias en microconstituyentes, concluyendo que, en estas condiciones, la medición de dureza no es suficiente para evaluar el nivel de deterioro al que puede haber estado sometido el material por exposición a elevada temperatura.

**Palabras clave:** evaluación de daño por fuego; transformaciones del acero; ensayo Jominy; cambios microestructurales del acero.

## Abstract

The present study focuses on the correlation between microstructure and hardness in an AISI/SAE 1045 steel exposed to different thermal cycles including temperatures in the range of incomplete austenitization. For this purpose, the modified Jominy test was used, cooling rates were estimated, hardness measurements were performed, and microstructures were analyzed for each thermal cycling condition. The result is a pattern of microstructures vs. hardness that can help to understand the thermal cycling conditions to which such steel may have been exposed under conditions simulating severe fire exposure. In addition, for certain thermal cycles and at the same measured hardness, the microstructure observed may present greater differences in microconstituents, concluding that, under these conditions, the hardness measurement is not sufficient to evaluate the level of deterioration to which the material may have been in exposure to high temperature.

**Keywords:** fire damage assessment, steel transformations, Jominy test, microstructural changes of steel.

## 1. Introducción

Los aceros son el material metálico de mayor relevancia en el campo de la ingeniería debido a su amplia variedad de cambios microestructurales mediante la aplicación de tratamientos térmicos o termo-mecánicos. Esto conlleva a una gran variedad de propiedades mecánicas como son: la alta resistencia mecánica y tenacidad [1]. Es así como la aplicación controlada de la temperatura (incluso a temperaturas en el rango intercrítico) y a deformación, dan origen a los aceros avanzados, en particular, los Dual Phase Steel o Advanced High Strength Steels [2]. En estas condiciones, se promueve la nucleación de nuevos granos y junto a un enfriamiento rápido, la austenita se transforma en martensita [3].

Sin embargo, cuando los aceros son expuestos a temperaturas elevadas y a diferentes ciclos térmicos en situaciones imprevistas, como la exposición al fuego en un incendio, se producen una gran variedad de microestructuras que no corresponden a las asociadas con la mayoría de los procesos de fabricación o tratamientos térmico, que pueden afectar de manera significativa sus propiedades mecánicas.

Por esta razón, en el análisis de adecuación al servicio (Fitness for Service) de componentes expuestos a daño por fuego, se utilizan mediciones de dureza en campo y análisis metalográfico por réplicas [4] para evaluar el grado de afectación del material. Sin embargo, muchas veces la medición de dureza puede indicar un grado de afectación y los cambios microestructurales otro.

Los ciclos térmicos generados en el acero por su exposición al fuego pueden producir una variedad y combinación de fases y microconstituyentes como son: ferrita alotriomórfica, ferrita Widmanstätten, perlita fina, perlita globular, bainita y martensita. La observación precisa de estos microconstituyentes a través de la metalografía por réplicas no es sencilla y en consecuencia, la capacidad de establecer conclusiones exactas disminuye, aumentando los riesgos de cometer errores durante la inspección y en el análisis de los resultados de campo.

Por esta razón, con la finalidad de establecer patrones microestructurales y de dureza en el rango de temperaturas intercríticas y austenización completa, se empleó los procedimientos establecidos en la norma ASTM A 255 para el ensayo Jominy, pero variando las condiciones de temperatura de calentamiento. De esta manera, las probetas fueron sometidas a tres temperaturas de calentamiento (890°C, 760°C y 740°C) y a diferentes velocidades de enfriamiento, producidas por el enfriamiento cuasi uni dimensional de la probeta Jominy para obtener así una variación de microestructuras y de valores de dureza a lo largo de su generatriz, a fin de establecer una correlación entre ellas para el acero AISI/SAE 1045.

La correlación entre las propiedades mecánicas y su microestructura ayudarán a una mejor interpretación de los resultados obtenidos en campo como en la identificación de las fases o microconstituyente formados y su valor de dureza y a la consolidación de conclusiones para la toma de decisiones cruciales como la puesta fuera de servicio del elemento, su reparación o su continuidad en operación.

## 2. Metodología

Se utilizaron 7 probetas Jominy con la geometría establecida por la norma ASTM A255-20a [5] cuya composición química en peso se muestra en la tabla 1.

**Tabla 1.** Composición química de las probetas Jominy

%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Cr	%Ni	%Fe
0.46	0.71	0.01	<0.05	0.19	0.02	0.02	98.4
0.46	0.71	0.01	<0.05	0.19	0.02	0.02	98.4
0.46	0.71	0.01	<0.05	0.19	0.02	0.02	98.4
0.45	0.70	0.01	0.04	0.21	0.03	0.03	98.4
0.46	0.70	0.01	0.04	0.20	0.03	0.04	98.4
0.46	0.70	0.01	0.04	0.20	0.03	0.04	98.4
0.46	0.70	0.01	0.04	0.20	0.03	0.03	98.4

Fuente: elaboración propia.

## 2.1. Cálculo de temperaturas críticas

Se utilizaron las ecuaciones (1) y (2) definidas por Kasatkin (1984) [6], para el cálculo de las temperaturas críticas superior e inferior y los valores obtenidos se muestran en la tabla 2.

$$A1=723 - 7.08 \times Mn + 37.7 \times Si + 18.1 \times Cr + 44.2 \times Mo + 8.95 \times Ni + 50.1 \times V + 21.7 \times Al + 3.18 \times W + 297 \times S - 830 \times N - 11.5 \times C \times Si - 14 \times Mn \times Si - 3.10 \times Si \times Cr - 57.9 \times C \times Mo - 15.5 \times Mn \times Mo - 5.28 \times C \times Ni - 6 \times Mn \times Ni + 6.77 \times Si \times Ni - 0.80 \times Cr \times Ni - 27.4 \times V + 30.8 \times Mo \times V - 0.84 \times Cr^2 - 3.46 \times Mo^2 - 0.46 \times Ni^2 - 28 \times V^2 \quad (1)$$

$$A3=912 - 370 \times C - 27.4 \times Mn + 27.3 \times Si - 6.35 \times Cr - 32.7 \times Ni + 95.2 \times V + 190 \times T + 72 \times Al + 64.5 \times Nb + 5.57 \times W + 332 \times S + 276 \times P + 486 \times N - 900 \times B + 16.2 \times C \times Mn + 32.3 \times C \times Si + 15.4 \times C \times Cr + 48 \times C \times Ni + 4.32 \times Si \times Cr - 17.3 \times Si \times Mo - 18.6 \times Si \times Ni + 4.8 \times Mn \times Ni + 40.5 \times Mo \times V + 174 \times C^2 + 2.46 \times Mn^2 - 6.86 \times Si^2 + 0.322 \times Cr^2 + 9.90 \times Mo^2 + 1.24 \times Ni^2 - 60.2 \times V^2 \quad (2)$$

**Tabla 2.** Estimación de las temperaturas críticas (A1 y A3) para el acero en estudio

Probeta	Temperaturas críticas	
	A1 [°C]	A3 [°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

Fuente: elaboración propia.

De esta manera, se establece que las temperaturas de estudio en el rango intercrítico son 760°C y 740°C.

## 2.2. Ensayo Jominy

Las probetas fueron calentadas durante 1 hora dentro de la cámara del horno de la siguiente manera: 3 probetas hasta la temperatura de 890 °C (austenización completa) y 2 probetas por condición intercrítica (760°C y 740°C). Luego, se retiraron cada una de las probetas y se llevaron, en un lapso no menor a 5 segundos, hasta la máquina de enfriamiento mediante chorro de agua. Finalmente, se mantuvo la probeta Jominy enfriando durante 10 minutos.

### 2.3. Desarrollo del modelo computacional

Las curvas de enfriamiento se estimaron mediante análisis por elementos finitos (FEA) utilizando el software Ansys Student 2022 R1. Los parámetros utilizados del modelo se presentan a continuación:

#### 2.3.1. Condiciones iniciales

Se desarrolló el modelo tridimensional de la probeta Jominy con la geometría establecida por la norma ASTM A255-20a [5]. Asimismo, se establecieron las siguientes propiedades térmicas constantes durante el enfriamiento que se muestran en la tabla 3 y se consideró una conductividad térmica variable según lo establecido por M. Drake, 1972 [7].

**Tabla 3.** Propiedades térmicas del acero AISI/SAE 1045

Parámetro	Símbolo	Valor
Coefficiente de dilatación térmica	$\lambda$	$1.13 \cdot 10^{-5} 1/K$
Calor Específico	Cp	465 J/(kg·K)
Densidad	$\rho$	7800 kg/m <sup>3</sup>

Fuente: Oscar Higuera [1] y Cesar Nunura [8]

#### 2.3.2. Condiciones de borde

Se consideraron los coeficientes de convección entre el contacto del chorro de agua – base del extremo de la probeta Jominy y el aire – superficie lateral que se muestran en la tabla 4.

**Tabla 4.** Condiciones de borde del modelo computacional

Parámetro	Símbolo	Valor
Coefficiente de convección	$h_c$	10000 W/m <sup>2</sup> K
Temperatura del fluido	$T_\infty$	20 °C
Coefficiente de convección natural y radiación	$h_r$	35 W/m <sup>2</sup> K
Temperatura ambiente	$T_\infty$	20 °C

Fuente: Oscar Higuera [1] y Cesar Nunura [8]

#### 2.3.3. Mallado e incrementos de tiempo

Las propiedades del mallado para el modelo son las siguientes: se consideró un tipo de elemento tetraédrico parabólico con un tamaño de 3.2mm y, para los elementos refinados, 1 mm. De esta manera, se obtuvo una cantidad de 48856 elementos y 83245 nodos.

Los incrementos de tiempo para la toma de resultados se establecieron en 3 etapas: 0s-10s con un incremento de 0.02 segundos, 10s-100s con incrementos de 0.5s y de 100s-600s, incrementos de 5s.

### 2.4. Velocidades de enfriamiento

Las velocidades de enfriamiento obtenidas a partir de las curvas de enfriamiento del modelo computacional se calcularon a partir de la ecuación (3) propuesta por Cesar Nunura (2009) [8]:

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

Donde:

- $T_a$ : Temperatura de austenización
- $T_{MI}$ : Temperatura de inicio transformación martensítica
- $\Delta t$ : Intervalo de tiempo desde  $T_a$  a  $T_{MI}$

Para las condiciones de calentamiento intercrítico se considera el valor de  $T_a$  como la temperatura máxima de calentamiento (760° o 740°C) y la ASM HANDBOOK (2020) [9], establece el cálculo de  $T_{MI}$  mediante la ecuación (4):

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

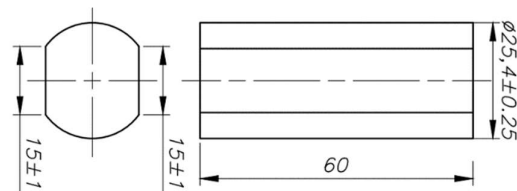
Por lo tanto, de acuerdo con la composición química de la tabla 1 se obtuvo que la temperatura de iniciación martensítica del material de las probetas es 345°C.

### 2.5. Ensayo de Dureza y metalografía

Se utilizaron los procedimientos y criterios de la norma ASTM E18-22 (2022) [10] para los ensayos de dureza y, para la preparación para metalografía, se utilizaron los procedimientos de la norma ASTM E3-11 [11].

Las muestras fueron desbastadas y pulidas hasta obtener una rugosidad de 1um. Además, se realizó un ataque químico a la superficie pulida de acuerdo con los criterios de la norma ASTM E407-07 [12].

Se obtuvieron las muestras a partir de un corte a 60 mm medido desde la base del extremo enfriado de la probeta. Luego, se realizaron 2 refrentados paralelos para que la base de apoyo tenga una medida de 15mm de ancho. La figura 1 muestra la representación geométrica de la muestra para dureza y metalografía.

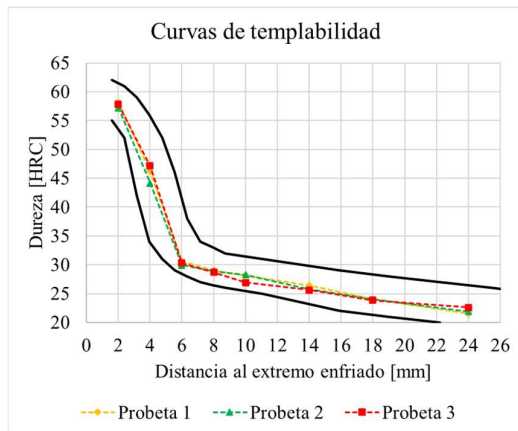


**Figura 1.** Muestra para ensayo de dureza y metalografía. Fuente: Elaboración propia

### 3. Resultados

#### 3.1. Ensayo de dureza

Se realizó un barrido de dureza desde el extremo enfriado utilizando el equipo Rockwell LCR-500 para las 7 probetas Jominy. Para la condición de austenización completa ( $890^{\circ}\text{C}$ ), los valores obtenidos a lo largo de la generatriz se encontraron dentro de las bandas de templabilidad del acero como se muestra en la figura 2, por lo que el procedimiento establecido y los resultados obtenidos se ajustan muy bien a los datos comúnmente aceptados.



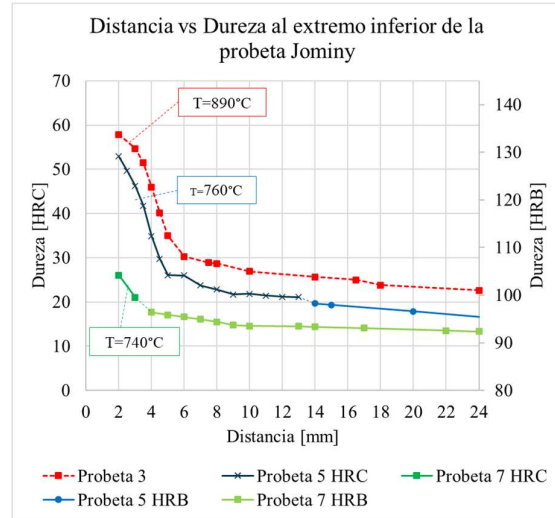
**Figura 2.** Mediciones de dureza en las probetas Jominy 1,2,3 para austenización completa ( $890^{\circ}\text{C}$ ).  
Fuente: Elaboración propia

De esta manera, se aplicó el mismo procedimiento de calentamiento y enfriamiento a las 2 condiciones de calentamiento intercrítico ( $760^{\circ}\text{C}$  y  $740^{\circ}\text{C}$ ). Luego, se realizaron las mediciones de dureza a las probetas restantes mostrando una buena reproducibilidad entre las muestras analizadas.

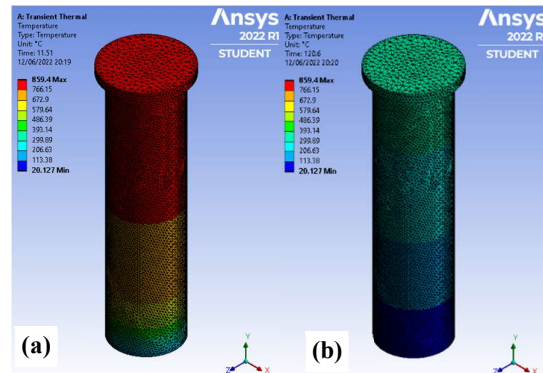
La figura 3 muestra la variación de la dureza con la distancia al extremo templado de las probetas Jominy para las tres condiciones analizadas. Como se puede apreciar, la temperatura máxima de exposición de un material influye de manera directa en la dureza y es consecuencia de los cambios microestructurales que se producen en el acero durante el enfriamiento. La forma de enfriamiento del ensayo Jominy permite además tener en una sola probeta un “continuum” de cambios microestructurales vinculados a las diferentes velocidades de enfriamiento que se alcanzan a lo largo de su longitud.

#### 3.2. Velocidades de enfriamiento

Para determinar las velocidades de enfriamiento que se generan a lo largo de una probeta Jominy se hizo una simulación por elementos finitos.



**Figura 3.** Gráfico de dureza vs distancia al extremo inferior de la probeta Jominy expuesto directamente al chorro de agua durante el ensayo.  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 4.** Estado térmico de la condición 1 ( $890^{\circ}\text{C}$ ) después de 10 segundos (a) y 120 segundos (b) de enfriamiento. Fuente: Elaboración propia

A partir de las condiciones establecidas en la metodología, se simuló el modelo computacional en el software Ansys Student 2022 R1 como se muestra en la figura 4 donde se obtuvieron las curvas de enfriamiento.

Luego, se calcularon las velocidades de enfriamiento a partir de las expresiones (3) para cada distancia y condición las que se muestran en la tabla 6 donde, conforme la distancia del extremo enfriado con agua se hace mayor, las velocidades de enfriamiento disminuyen.

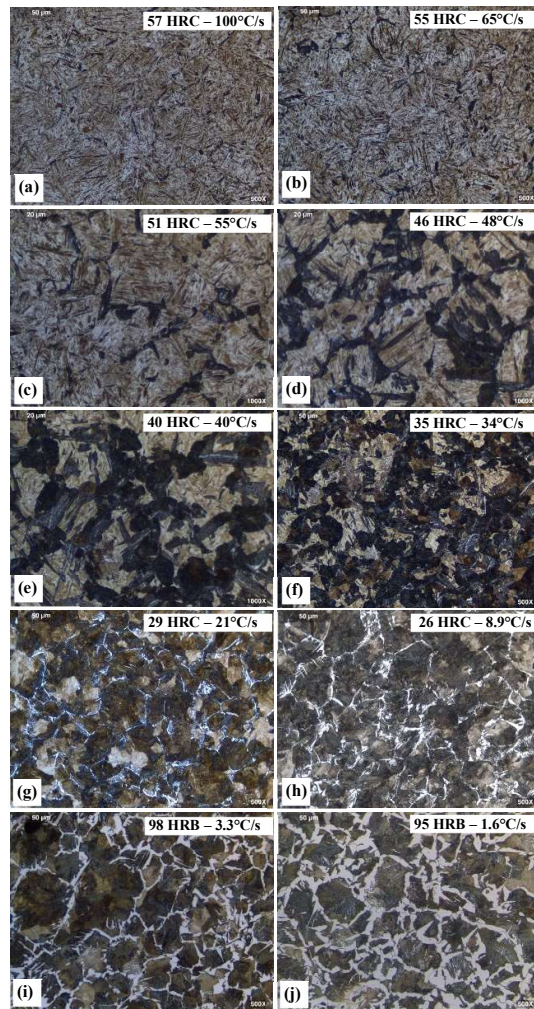
**Tabla 6.** Velocidades de enfriamiento

T <sub>c</sub> =890°C		T <sub>c</sub> =760°C		T <sub>c</sub> =740°C	
d [mm]	$\dot{T}[\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{s}}]$	d [mm]	$\dot{T}[\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{s}}]$	d [mm]	$\dot{T}[\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{s}}]$
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	-	-

Fuente: Elaboración propia

### 3.3. Análisis de la metalografía para T<sub>c</sub>=890°C

Se realizó el análisis de la metalografía para diferentes distancias medidas al extremo templado como se muestra en la figura 5. Las figuras 5(a) hasta (f) corresponden a distancias cercanas del extremo templado, donde inicia una matriz martensítica y, conforme se aleja del extremo templado (disminución de la velocidad de enfriamiento), se observa una reducción en su formación para dar lugar a estructuras bainíticas (acicular), perlíticas (poligonal) y ferríticas (Widmanstätten y aliotriomorfa) como consecuencia de la disminución de la velocidad de enfriamiento, dando a lugar a menores valores de dureza como lo observado en la figura 3. Para distancias más alejadas, la microestructura está compuesta por estructuras ferríticas (alioetriomorfa o idiomórfica) y perlíticas (equiaxiales) correspondientes a enfriamientos más lentos como se muestra en la figura 5 (g) hasta la (j).



**Figura 5.** Metalografía óptica de una probeta Jominy AISI 1045 calentada hasta 890°C para distancias medidas desde el extremo enfriado. (a) 2mm; (b) 3mm; (c) 3.5mm; (d) 4mm; (e) 4.5mm; (f) 5mm; (g) 7.5mm; (h) 14mm; (i) 30mm; (j) 50mm.

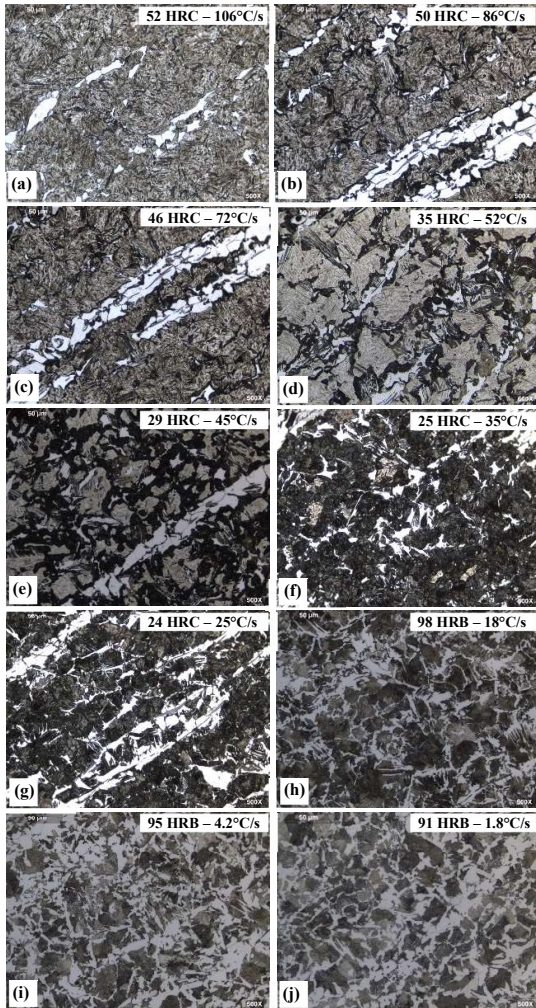
Fuente: Elaboración propia

### 3.4. Análisis de la metalografía para T<sub>c</sub>=760°C

Las figuras 6(a) hasta (e) corresponden a distancias cercanas al extremo enfriado, donde inicia una matriz martensítica (producto de altas velocidades de enfriamiento) junto a la fase ferrita pro-eutectoide (primaria) debido a la exposición del acero a esa temperatura al rango intercrítico (austenización incompleta), donde la microestructura presenta una forma bandeada que representa el proceso de fabricación (laminación en caliente). Asimismo, se identificó la misma tendencia del caso anterior donde, a medida que se reducen las velocidades de enfriamiento, se favorece la formación de estructuras bainíticas, y ferrítico-perlíticas, con una disminución de su dureza. Los menores valores de dureza observados en la Figura 3 se deben a la presencia de la



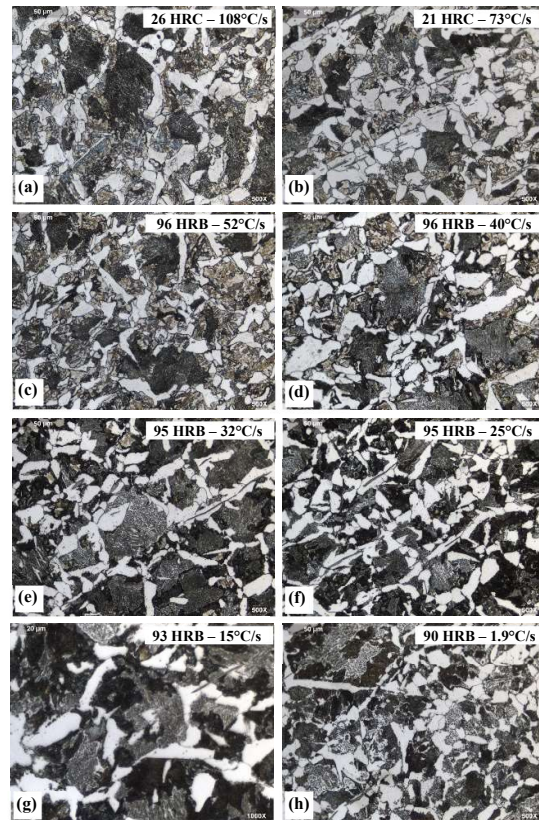
ferrita pro-eutectoide desde altas velocidades de enfriamiento debido a que a la temperatura de 760°C se produce una austenización incompleta del acero. Por otro lado, para distancias más alejadas, la matriz formada es ferrítico-perlítica como se muestra en la figura 6 (f) hasta (j).



**Figura 6.** Metalografía óptica de una probeta Jominy AISI 1045 calentada hasta 760°C para distancias medidas desde el extremo enfriado. (a) 2mm; (b) 2.5mm; (c) 3mm; (d) 4mm; (e) 4.5mm; (f) 5.5mm; (g) 7mm; (h) 15mm; (i) 25mm; (j) 50mm. Fuente: Elaboración propia

### 3.5. Análisis de la micrografía para $T_c=740^\circ\text{C}$

Las figuras 7 (a) hasta (e) corresponden a distancias cercanas del extremo enfriado, donde se observa una mayor formación de ferrita pro-eutectoide junto a la formación de estructuras martensíticas (altas velocidades de enfriamiento) y perlíticas (laminar). Este comportamiento es debido a la exposición a una menor temperatura intercrítica donde se redujo la transformación austenítica y, como consecuencia, disminuyó la dureza a lo largo de la generatriz como se muestra en la figura 3.



**Figura 7.** Metalografía óptica de una probeta Jominy AISI 1045 calentada hasta 740°C para distancias medidas desde el extremo enfriado. (a) 2mm; (b) 3mm; (c) 4mm; (d) 5mm; (e) 6mm; (f) 7mm; (g) 10mm; (h) 50mm.

Fuente: Elaboración propia

La reducción de la velocidad de enfriamiento disminuye la presencia de martensita en la microestructura hasta alcanzar una estructura completamente ferrítico-perlítica. Por otro lado, a partir de la figura 7 (f) hasta la (h) se identifica una perlita en proceso de esferoidización donde diversos estudios en la literatura [14], establecen que es el resultado de la DET “Divorced Eutectoid Transformation”, la cual es favorecida por la formación de austenita no homogénea, el cual generalmente son partículas o núcleos preexistentes de cementita en la matriz austenítica producto de un calentamiento muy cercano a la temperatura crítica inferior  $A_{c1}=731.5^\circ\text{C}$  (calculado posteriormente mediante Calorimetría diferencial de Barrido “DSC”) y de bajas velocidades de enfriamiento ( $20^\circ\text{C/s}$ ).

### 3.6. 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 a 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 laminar, ferrita alotrópica 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.

De esta manera, se desarrolló el patrón de microestructura y dureza que se muestra en la figura 8, 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  $30 \pm 1$  HRC (figura 8) puede corresponder a dos microestructuras diferentes, mientras que una dureza de  $25 \pm 1$  HRC puede ser alcanzada por cinco diferentes condiciones microestructurales. Estas condiciones microestructurales pueden afectar de manera diferente otras propiedades como la tenacidad del material y la temperatura de transición dúctil-frágil (DBTT) aún cuando la dureza sea la misma en todos los casos. Esto resulta importante en el análisis de adecuación al servicio de un componente expuesto a fuego debido a que a través de los patrones microestructurales se puede correlacionar otras propiedades mecánicas más allá de las mediciones en campo de la dureza, haciendo más preciso el análisis de fitness for service.

#### 4. Conclusiones

Mediante la aplicación del ensayo Jominy modificado, permitió estudiar la correlación entre la microestructura y dureza sometiendo el acero AISI 1045 a diferentes ciclos térmicos para los siguientes calentamientos: 890 °C (austenización completa) y 760°C y 740°C (zona de dominio bifásico).

Para distancias muy cercanas al extremo enfriado, el material se expuso a altas velocidades de enfriamiento (100°C/s) donde se formó principalmente una matriz martensítica y acompañada de ferrita pro-eutectoide en las condiciones de calentamiento intercrítico junto a la perlita. A medida que se aumenta la distancia a partir del extremo enfriado, la dureza disminuye y se forman microestructuras de menor dureza, como son la bainita, perlita y ferrita. La dureza disminuye rápidamente hasta 5mm medido desde el extremo enfriado, luego disminuye gradualmente hasta los 50mm.

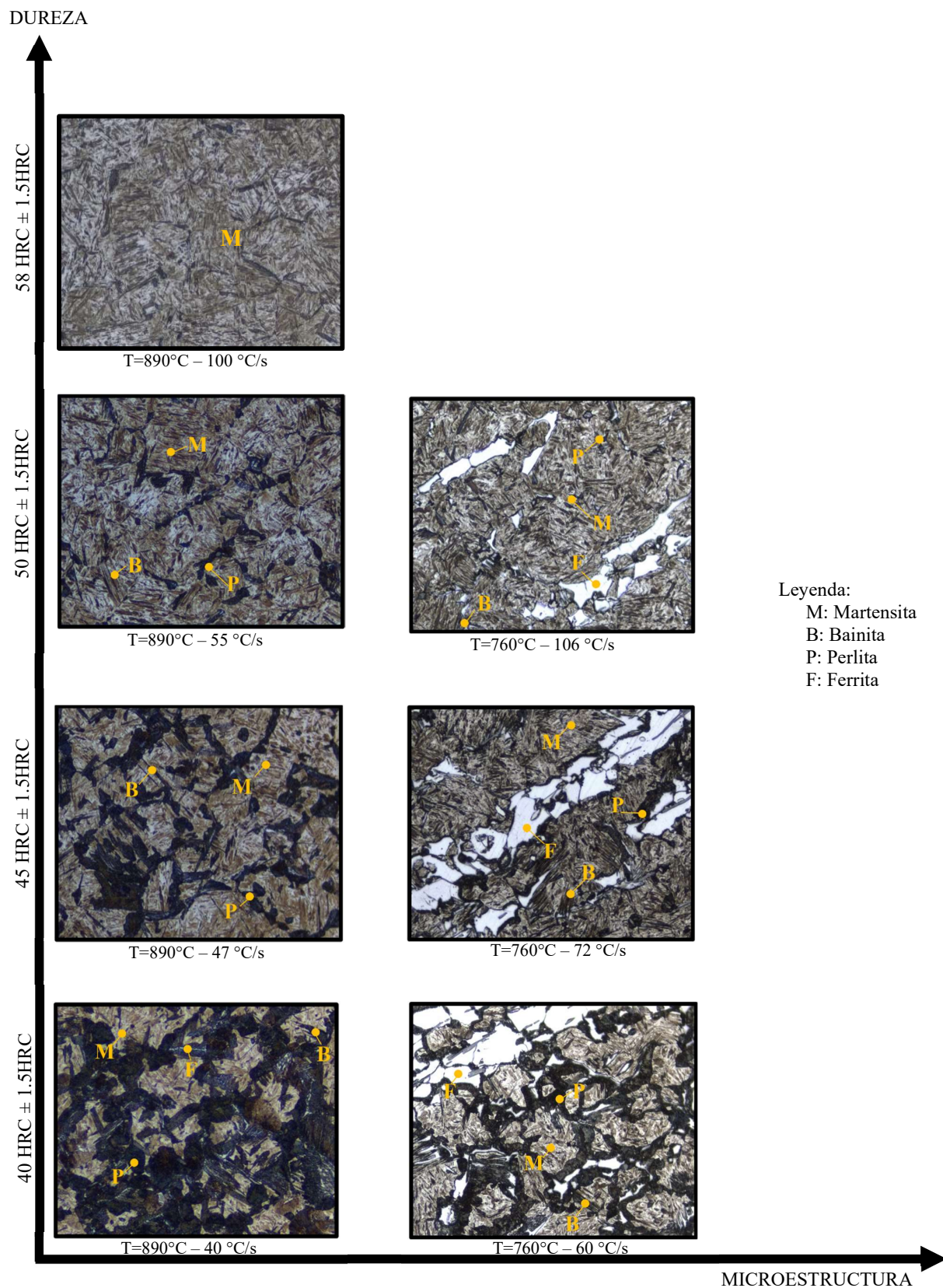
A partir de los valores de dureza, velocidades de enfriamiento y la microestructura, se desarrolló un patrón de microestructura-dureza el cual permite caracterizar mediante microscopía óptica los principales microconstituyentes obtenidos a partir de tres condiciones de temperatura máxima de exposición (890°C, 740°C y 760°C) y de las condiciones de enfriamientos producidas por los ensayos Jominy para

un acero AISI 1045. 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  $\pm 1.5$  HRC o  $\pm 1.5$  HRB según la escala de dureza correspondiente.

#### 5. Referencias

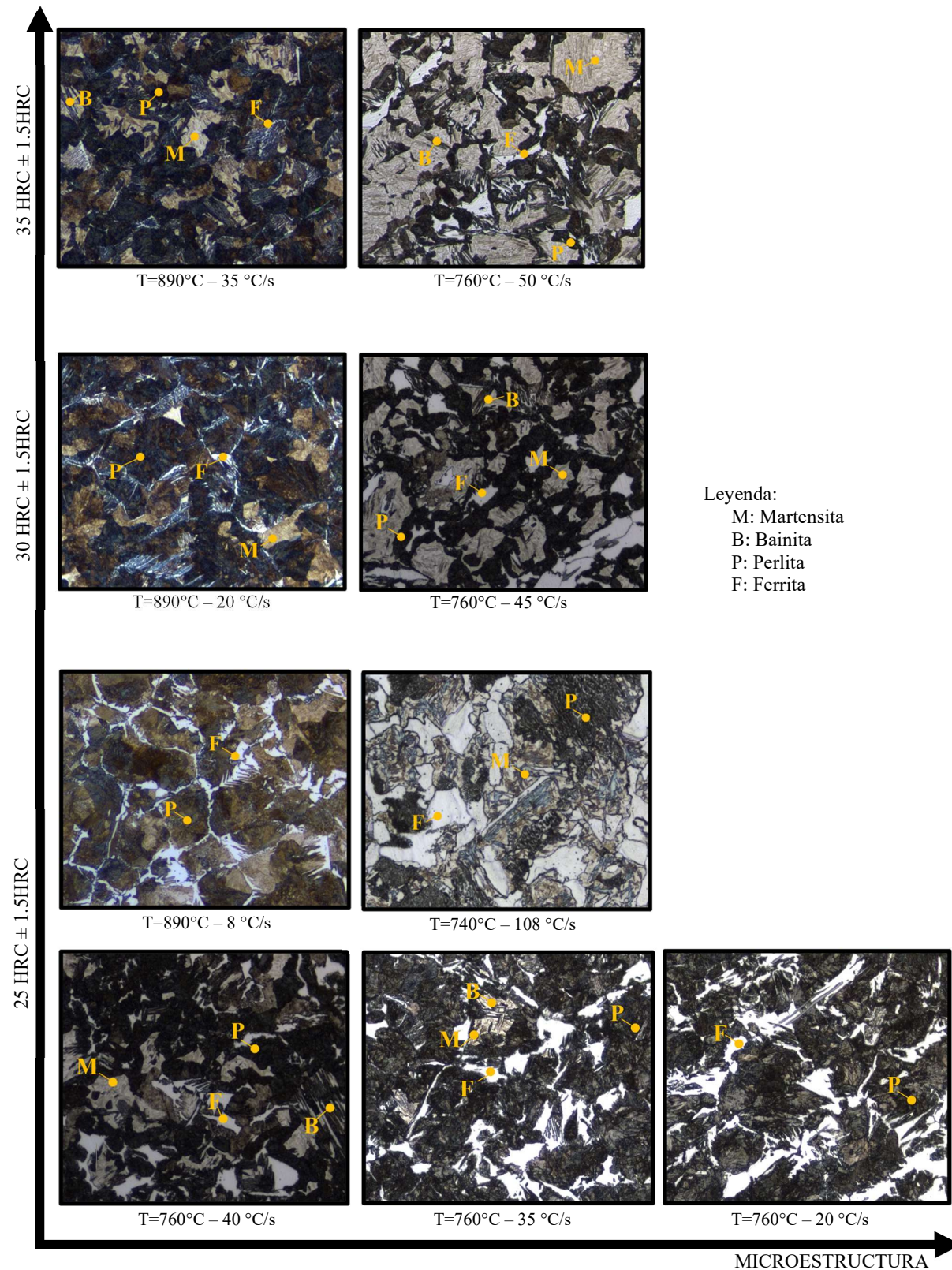
- [1] O. Higuera. "Thermal simulation in Cosmoworks of Steel put under test of hardenability Jominy". *Scientia et Technica* Año XIII. Colombia, vol. 1, num. 25, pp. 231 – 236, 2007. Disponible: <https://hdl.handle.net/11059/192>
- [2] E. Lopez. "Predicción del perfil de dureza en probetas Jominy de aceros de medio y bajo carbono". *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. México, vol. 12, núm. 3, pp. 609 – 619, 2016. Disponible: [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1665-27382013000300022](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-27382013000300022)
- [3] R. Ramos. Estudio de la soldabilidad de la unión disimilar de un cobre con 5 % de Zn con acero estructural ASTM A36, Lima, Perú, 2013. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12404/5315>
- [4] G. Quiros. Nuevo Tratamiento Térmico de Recocido Intercrítico de Aceros Resistentes al Desgaste con Boro de Bajo Impacto Medioambiental, Madrid, España, 2021. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14352/11708>
- [5] ASTM A255-20a. Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel, 2020.
- [6] O. G. Kasatkin. "Calculation models for determining the critical point of steel". *Met Sci Heat Treat. Russia*, vol. 26, num. 1, pp. 27 – 31, 1984. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/BF00712859>
- [7] R. M. Drake. "Analysis of Heat and Mass Transfer", New York, 1972.
- [8] C. Nunura. Correlação numérica e experimental da microestrutura, taxa de resfriamento e características mecânicas do aço ABNT 1045, Porto Alegre, 2009. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10183/72939>
- [9] ASM HANDBOOK, Volume 4D: Heat Treating Irons & Steels, 2020.
- [10] ASTM E18-22. Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials, 2022.
- [11] ASTM E3-11. Standard Test Methods for Preparation of Metallographic Specimens, 2011.
- [12] ASTM E407-07. Standard Test Methods for Microetching Metals and Alloys, 2007.
- [13] J. D. Verhoeven. "The Divorced Eutectoid Transformation in Steel". *METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A*. United States, vol. 29A, pp. 1181 – 1189, 1998. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11661-998-0245-4>



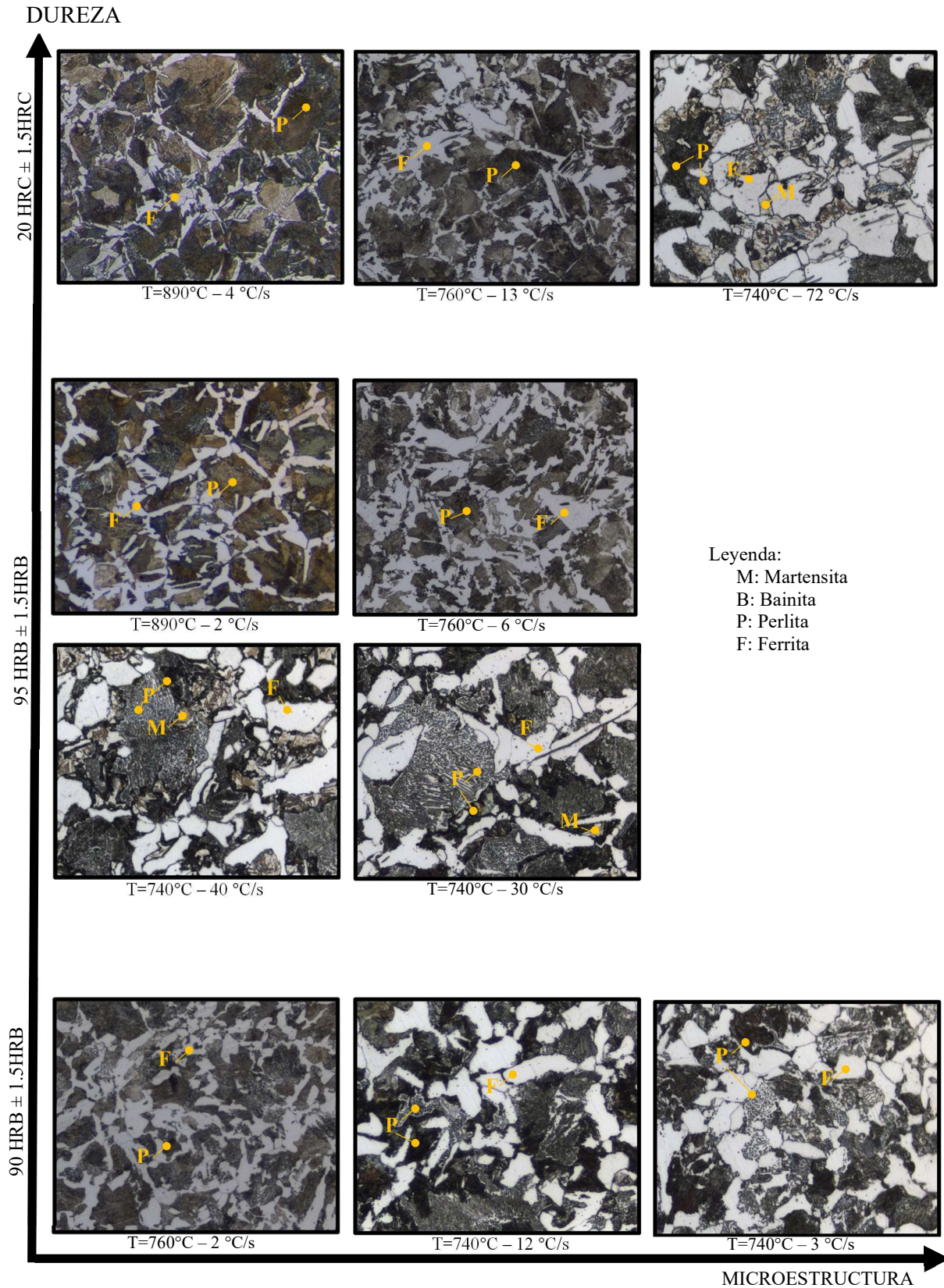




DUREZA







**Figura 8.** Patrón de microestructuras para tres (3) condiciones de calentamiento (740°C, 760°C, 890°C)  
 Fuente: Elaboración propia