

## SIMULACIÓN TÉRMICA EN COSMOSWORKS DE UN ACERO SOMETIDO A UN ENSAYO DE TEMPLABILIDAD JOMINY.

### Thermal simulation in cosmosworks of steel put under test of hardenability jominy

#### RESUMEN

A continuación se presentan los resultados de la simulación por elementos finitos de un ensayo de templabilidad Jominy para un acero AISI-SAE 4140H. El estudio se realizó en CosmosWorks versión 2006, se analizaron las curvas de velocidad de enfriamiento y caída de temperaturas en distintas posiciones de la probeta. Se situaron los resultados en un diagrama de transformación isotérmica comparando los resultados con la validación de la prueba y las diferentes durezas obtenidas.

**PALABRAS CLAVES:** Ensayo Jominy, Templabilidad, Acero AISI – SAE 4140H, Cosmos, FEM.

#### ABSTRACT

*Next the results of the simulation are presented by finite elements of a hardenability Jominy test for a steel AISI-SAE 4140H. The study was carried out in CosmosWorks version 2006, the curves of cooling speed and fall of temperatures were analyzed in different positions of the test specimen. The results were located in a diagram of isothermic transformation comparing the results with the validation of the test and the different obtained hardness.*

**KEYWORDS:** SolidWorks, Cosmos, FEM, hardenability, Jominy test, steel AISI - SAE 4140H.

#### 1. INTRODUCCIÓN

Los programas de CAE (Ingeniería Asistida por Computador) permiten realizar estudios físicos de diferentes situaciones físicas, permitiendo prever un comportamiento o estado. Estas herramientas normalmente trabajan con FEM (Método de Elementos Finitos) el cual es un método de cálculo matemático que ayuda en el diseño. Con este, se puede simular el comportamiento estático, dinámico, térmico, magnético y de fluidos.

El presente artículo fue dirigido a estudiar el ensayo de templabilidad Jominy desde el punto de vista de transferencia de calor y su respectiva incidencia en el comportamiento microestructural del acero al ser sometido a un temple diferencial. El siguiente estudio se desarrollará en CosmosWorks herramienta integrada al programa de dibujo mecánico en 3D SolidWorks v2006. Se generará una probeta Jominy con sus respectivas dimensiones de acuerdo a la norma ASTM A 255-02, la cual simulará un acero. Se dispondrán las condiciones térmicas iniciales de este ensayo donde se tendrá presente la convección forzada generada por el chorro de agua en la base de la probeta y la convección natural del aire en el

#### OSCAR FABIÁN HIGUERA COBOS

Ingeniero Metalúrgico, M.Sc.  
Profesor Auxiliar  
Facultad de Ingeniería Mecánica  
Universidad Tecnológica de Pereira  
osfahico@utp.edu.co

#### JOSÉ LUÍS TRISTANCHO REYES

Ingeniero Metalúrgico, M.Sc.  
Profesor Auxiliar  
Facultad de Ingeniería Mecánica  
Universidad Tecnológica de Pereira  
josetris@utp.edu.co

#### LUÍS CARLOS FLOREZ GARCÍA

Ingeniero Mecánico, M.Sc.  
Profesor Auxiliar  
Facultad de Ingeniería Mecánica  
Universidad Tecnológica de Pereira  
luiscar@utp.edu.co

#### GRUPO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES AVANZADOS (GIMAV-UTP)

resto de su superficie. Finalmente, los datos generados por el estudio se minarán para verificar el comportamiento térmico en función del tiempo y de acuerdo a este se analizará el comportamiento microestructural del acero y se correlacionarán con las durezas obtenidas para el acero AISI-SAE 4140H.

#### 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

**2.1. Métodos de elementos finitos (FEM).** Este método consiste básicamente en sustituir el elemento o la pieza por un modelo formado por líneas rectas o curvas conectadas en puntos comunes, llamados nodos y así formar una geometría en 2D o 3D, usualmente llamada malla. Esta sustitución geométrica después de ciertas condiciones y restricciones al sistema, genera una aproximación al comportamiento real de este. Los resultados o soluciones contienen aproximaciones debido a la discretización al sustituir el sistema real por un modelo aproximado.

El uso de FEM permite la predicción del comportamiento de las piezas sin necesidad de prototipos, la posibilidad de corregir errores en la fase de diseño y la reducción de costos ya que se han probado antes de su producción.

Es necesario recordar que el FEM es una herramienta que no debe ser usada como estudio único, esta debe ser verificada con otros tipos de estudios o pruebas, tales como pruebas de campo donde puedan ser corroborados los resultados del análisis.

➤ **Análisis Térmico.** Con el análisis térmico transitorio se determina la variación de la temperatura en diferentes instancias de tiempo de forma discreta, el análisis de transferencia de calor se realizó utilizando las siguientes ecuaciones: [1].

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

$$Q_{\text{convección}} = hA(T_s - T_f) \quad (2)$$

$$Q_{\text{conducción}} = KA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3)$$

El cálculo del coeficiente de convección para este caso se determinó por medio del número de Nusselt (4), siendo diferente el cálculo para chorros de choque y para flujos externos de convección libre y se calculó según la ecuación:

$$N_U = \frac{hD_h}{k} \quad (4)$$

**2.2. Templabilidad.** [1, 2, 8] La templabilidad del acero es la propiedad que determina la profundidad y la distribución de la dureza inducida por el temple. Según los metalurgistas, la templabilidad es una expresión mecánica y retrospectiva de los procesos y fenómenos que ocurren en los productos de acero cuando se enfrían desde la temperatura de austenización. La templabilidad depende de las características de transformación, es decir, del diagrama de enfriamiento continuo o de TTT y, por ende, de la composición y el tamaño de grano.

En una pieza de acero, las velocidades de enfriamiento no son las mismas en la superficie que en el centro, debido a la transferencia de calor a través de la masa. La diferencia entre esas velocidades se incrementa al aumentar la velocidad de enfriamiento, o sea, la severidad de temple del medio templante.

➤ **Selección del medio templante.** [8, 11] El principal factor que debe tenerse en cuenta al seleccionar un medio templante es la templabilidad del acero, la cual esta determinada por su composición y se manifiesta en la curva TTT. Al empezar el enfriamiento el medio debe enfriar la pieza con tal rapidez que evite la nariz perlítica

para que de esta manera la pieza permanezca austenítica hasta que llegue a Ms (inicio de transformación martensítica); después la velocidad de enfriamiento debe ser menor para que la transformación martensítica sea lo suficientemente lenta y evitar así el agrietamiento y minimizar la distorsión.

➤ **Curvas de enfriamiento.** [9] Las curvas de enfriamiento describen gráficamente los cuatro estados de transferencia de calor, desde un sólido caliente a un líquido frío.

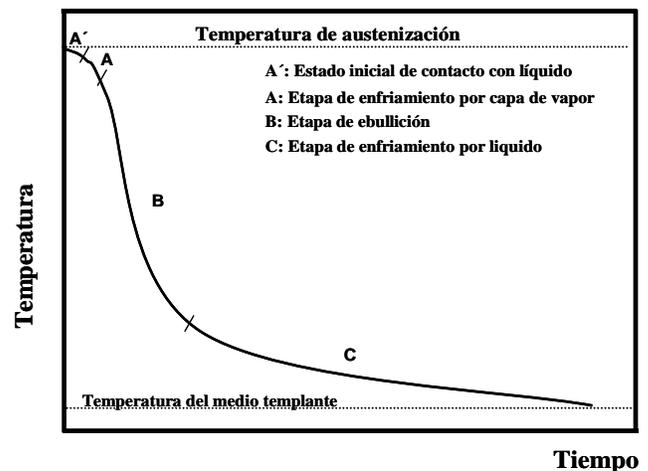


Figura 1. Curvas de enfriamiento características de temple. [8]

En la Figura 1 se observan las 4 etapas presentes durante el enfriamiento de una probeta sometida al tratamiento térmico de temple.

**Etapa A':** Denominada también estado inicial de contacto con el líquido; se caracteriza por la formación de burbujas de vapor. La etapa A' dura solo 0.1 s, es poco importante en la evaluación del medio de enfriamiento y es difícil de detectar con un equipo corriente.

**Etapa A:** Llamada etapa de enfriamiento por capa de vapor; en este paso se forma una capa continua de vapor que rodea toda la probeta. Ocurre porque el suministro de calor desde la superficie de la pieza excede la cantidad necesaria para formar el máximo de vapor por unidad de área de la pieza. Aquí el enfriamiento es lento porque la envoltura de gas actúa como aislante y el enfriamiento ocurre principalmente por radiación a través de la película. En las operaciones de temple este comportamiento es indeseable porque puede permitir la formación de constituyentes blandos, que es lo que se busca evitar.

**Etapa B:** Denominada etapa de enfriamiento por transporte de vapor; produce la velocidad mas alta de transferencia de calor; empieza cuando la temperatura ha

rebajado y la capa de vapor se rompe; cuando nuevo líquido entra en contacto con la pieza se presenta ebullición y el calor se remueve como calor de vaporización. El punto de ebullición del líquido determina la duración de esta etapa.

**Etapa C:** Denominada etapa de enfriamiento por líquido; la velocidad de enfriamiento de esta etapa es mas lenta que en la anterior. Termina cuando la temperatura es igual o menor a la de ebullición y el enfriamiento ocurre por conducción y convección en el líquido.

### 3. DESARROLLO DE LA SIMULACIÓN TÉRMICA

**3.1. Materiales.** La validación experimental de la simulación desde el punto de vista microestructural se realizó utilizando un acero AISI SAE 4140H sometido a la prueba Jominy. La validación se realizó mediante la toma de dureza a las distancias 1, 2, 5 10, 20, 30, 50 y 80 mm. La probeta se dimensiona de acuerdo a la norma ASTM A 255-02, ver Figura 2.

Durante la prueba Jominy, el chorro de agua golpea la parte inferior de la probeta y se simula como pérdida de calor por convección en la base de esta. Finalmente, en los costados y la cabeza de la probeta la perdida de calor por convección se debe al aire. En la Tabla 1 observamos las condiciones físicas de la probeta.

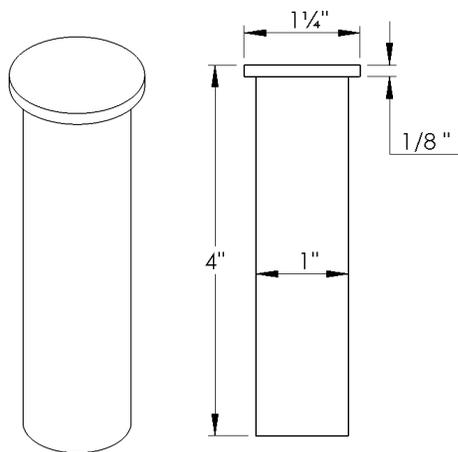


Figura 2. Dimensiones probeta Jominy según norma ASTM A 255-02. [13, 11]

**3.2. Configuración de la simulación.** Para obtener la variación de la temperatura en el tiempo se realizó una solución en régimen transitorio, este discretiza el problema físico en los puntos a evaluar. [3,6]

	PROPIEDAD	VALOR
ACERO	Coefficiente de dilatación térmica	$1,5 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$
	Conductividad Térmica	47 W/(m K)
	Calor Específico	420 J/(kg K)
	Densidad	7900 kg/m <sup>3</sup>

Tabla 1. Propiedades térmicas del material utilizadas en la simulación. [3,4]

Se realizan tres simulaciones buscando un refinamiento de los datos debido a la alta tasa de enfriamiento en un corto periodo de tiempo que se producen en los puntos que se encuentran cerca del chorro de agua. Las simulaciones se corrieron de acuerdo a las configuraciones descritas en la Tabla 2

Estudio	Tiempo Total a Simular (s)	Incremento de Tiempo (s)	Convergencia
1	5	0,02	0,1%
2	95	0,5	0,1%
3	500	5	0,1%

Tabla 2. Configuración de las simulaciones.

**3.3. Condiciones Iniciales.** La probeta Jominy se extrae del horno a una temperatura de 840°C, por lo que la simulación se inicia inmediatamente con esta temperatura, con la convección del chorro de agua y la del aire. El chorro de agua se modela a una temperatura ambiente de 21°C constante en el tiempo con un coeficiente de convección de 15000 W/(m<sup>2</sup> K), en la base de la probeta. Se definió la temperatura ambiente a 21°C y un coeficiente de convección  $h = 200 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ , de acuerdo a [5,7].

**3.4 Mallado.** El mallado es una de las partes esenciales de la simulación, este debe ser más denso en las áreas más críticas o aquellas en las que se vaya a enfocar el análisis. Como podemos ver en la Figura 3, el mallado tiene más intensidad en la zona cilíndrica, de la cual deseamos obtener las variaciones de temperatura.

La malla generada en 3D está constituida de elementos sólidos tetraédricos parabólicos (elementos de segundo orden), donde cada elemento está definido por 4 nodos en las esquinas, seis nodos en la mitad de cada línea y seis líneas curvas, ver Figura 4. Estos elementos con líneas curvas producen una mejor aproximación matemática ya que representa los bordes de los elementos curvos de una forma más precisa.

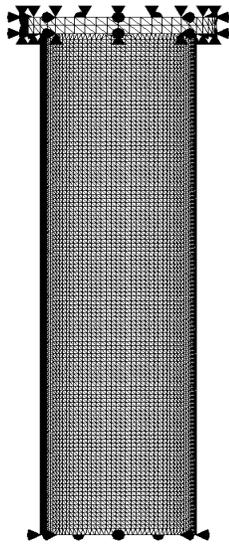


Figura 3. Mallado con mayor densidad en el cilindro, donde se van a realizar los análisis.

La cantidad de nodos afecta en la aproximación del resultado y en el tiempo de simulación, a un mayor número de nodos, mejor la aproximación, el estudio realizado en este artículo tiene el máximo número de elementos generados por el programa.

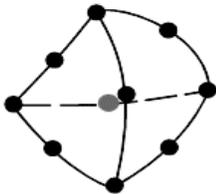


Figura 4. Elemento sólidos tetraédricos parabólicos, elementos de segundo orden.

Se debe precisar que como el análisis es térmico cada nodo tiene un grado de libertad, la temperatura. Los detalles del mallado se presentan en la Tabla 3

PROPIEDAD	VALOR
Tamaño de los elementos	1,88347 mm
Tolerancia	0,0941736 mm
Número total de nodos	142645
Número total de elementos	85809
Máxima relación de aspecto	122.16
Tamaño de los elementos en el cilindro (sección refinada)	0,8 mm

Tabla 3. Propiedades del mallado.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**4.1 Refinamiento de datos.** Los datos a trabajar son los de la superficie de la probeta, tomados a 1, 2, 5, 10, 20,

30, 50 y 80 mm de la base de la probeta. Del análisis se puede obtener la temperatura de la probeta a los 5s, Figura 5, Como se puede observar a los 2s las variaciones de temperatura en los puntos inferiores son muy altos lo que obliga al refinamiento de los datos, anteriormente mencionado, con esto logrando 540 datos enfocándose en los primeros 5 segundos del fenómeno físico donde es más crítica la variación de la velocidad de enfriamiento.

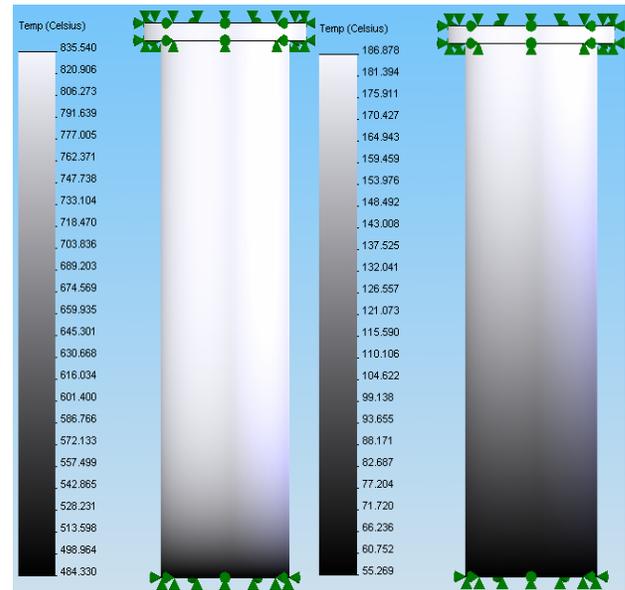


Figura 5. Estado térmico de la probeta después de 5 y 600 segundos de enfriamiento.

**4.2 Curvas de temperatura y velocidad de enfriamiento.** Los datos de temperaturas obtenidos por la simulación en cada uno de los puntos evaluados en la simulación se presentan en la Figura 6.

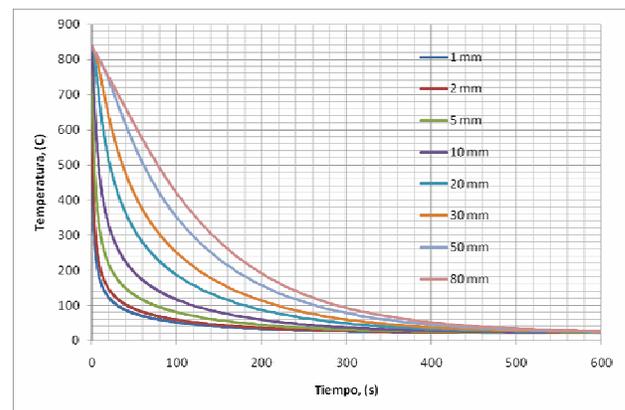


Figura 6. Tiempo de enfriamiento de varios puntos en la superficie medidos desde la base de la probeta.

En la Figura 6 se observa curvas características de enfriamiento en las cuales se pueden diferenciar las diferentes etapas. Durante la prueba Jominy las dos primeras etapas de enfriamiento no son significantes

debido al flujo turbulento al cual es sometida la probeta durante su enfriamiento. La etapa determinante durante esta prueba es la de ebullición que es la que determina la velocidad crítica de temple. Además, se observa como al aumentar la distancia al extremo templado varía la pendiente de la curva de enfriamiento obteniéndose constituyentes blandos al final de la probeta.

Los datos anteriores se grafican a escala con el fin de calcular las velocidades de enfriamiento, ver Figura 7, en esta se puede observar que las abscisas se encuentran en escala logarítmica en base diez, para evitar que las velocidades de los puntos mas lejanos de la corriente de agua se vieran como líneas verticales.

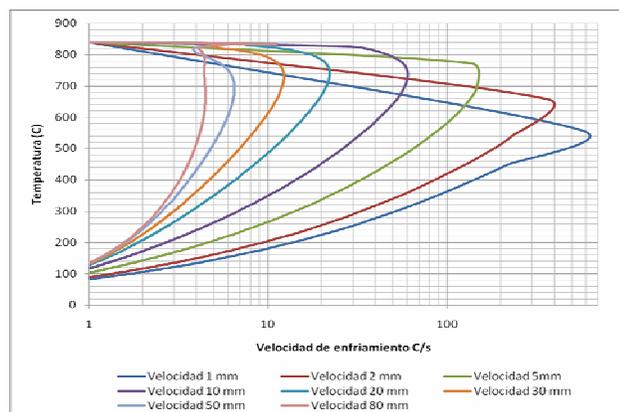


Figura 7. Velocidad de enfriamiento en escala logarítmica de varios puntos en la superficie medidos desde la base de la probeta.

En la Figura 7 se resumen las curvas de velocidad de enfriamiento donde se observa un comportamiento coherente con el observado en la práctica, en donde las mayores velocidades de enfriamiento se presentan en los puntos más cercanos al extremo de la probeta sometido al contacto directo con el medio templante.

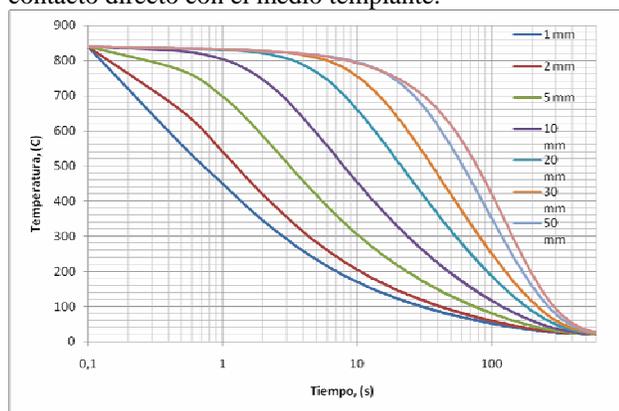


Figura 8. Curvas de enfriamiento en escala logarítmica de varios puntos en la superficie medidos desde la base de la probeta obtenidos por la simulación.

Los datos de las curvas de enfriamiento de la Figura 6 se pasaron a escala logarítmica con el fin de colocarlos en el diagrama de transformación isotérmica del acero AISI

SAE 4140 para su posterior análisis, estos datos son resumidos en la Figura 8. Este acero fue sometido a la prueba jominy con el fin de validar los datos con los obtenidos en la simulación. Los datos de dureza determinados experimentalmente son resumidos en la Tabla 4 y son coherentes con el comportamiento predicho por la simulación y que se resume en la Figura 9.

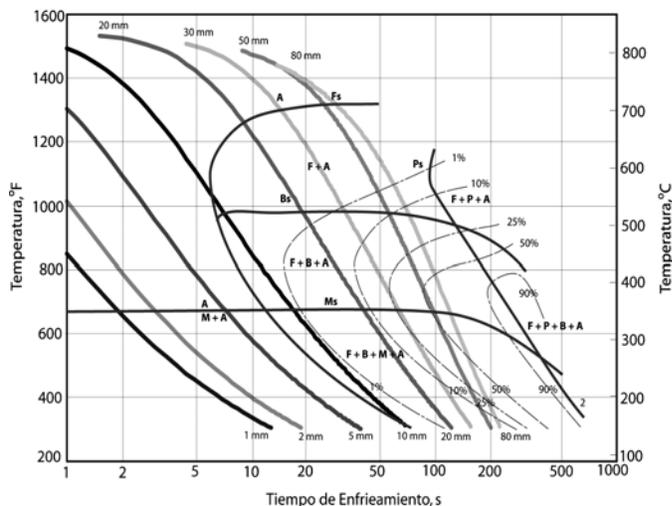


Figura 9. Diagrama de enfriamiento continuo acero AISI SAE 4140 obtenido con los datos de la simulación.

Al situar las curvas de temperatura en el diagrama de transformación isotérmica, Figura 9. Se observó un comportamiento coherente con lo obtenido en la práctica, en la cual se obtuvieron microestructuras a 1, 2 y 5mm de 100% de martensita aproximadamente. A distancias superiores a 5 mm se obtuvieron microestructuras como martensita, bainita inferior y bainita superior. Esto es coherente con los resultados obtenidos en el laboratorio, los cuales son resumidos en la Figura 10. Se observa como se presenta un descenso en la dureza del material a medida que aumenta la distancia al extremo templado debido a una variación microestructural pasando de martensita, fase metaestable del acero con alta dureza a una combinación de martensita y bainita tanto superior como inferior, Este comportamiento se resume en la Tabla 4.

Distancia extremo templado	Dureza (HRC)
1mm	59
2mm	59
5mm	58
10mm	56
20mm	50
30mm	49
50mm	41
80mm	36

Tabla 4. Valores de dureza obtenidos experimentalmente durante la prueba Jominy al acero AISI SAE 4140.

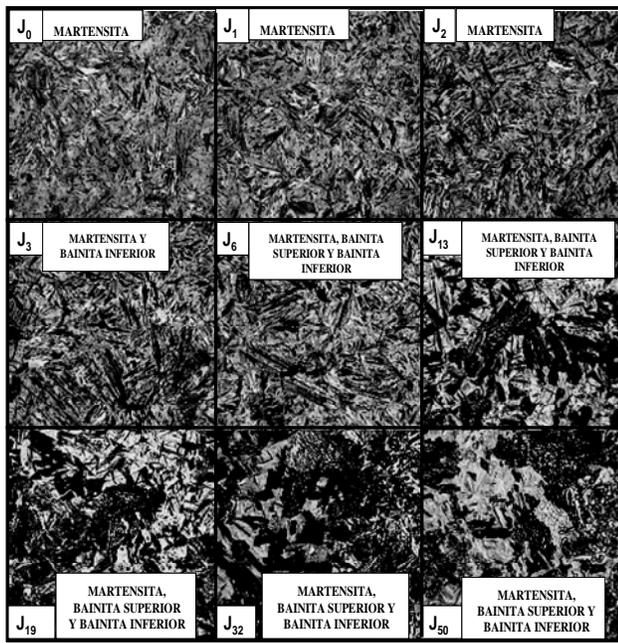


Figura 10. Cambios microestructurales del acero AISI / SAE 4140 sometido a la prueba Jominy. Ataque nital al 2%, aumentos 1000X.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos por el análisis de elementos finitos para 142645 nodos y 85809 elementos genera resultados con una buena aproximación a las curvas de enfriamiento obtenidas en la literatura, debido a la cantidad tan alta de elementos.

Se observó un buen comportamiento en las curvas de enfriamiento entregadas por el programa COSMOS y luego ubicadas en el diagrama de transformación isotérmica del acero AISI-SAE 4140H el cual nos corroboró datos experimentales obtenidos durante la prueba Jominy.

En los datos obtenidos experimentalmente no se notó a 1, 2 y 5 mm. del extremo templado, un cambio de dureza significativo, debido a que las curvas de enfriamiento caen dentro del rango de la zona de estabilidad de martensita.

Para los puntos superiores a 5mm se observa un decrecimiento en la dureza debido a la presencia de microconstituyentes blandos como la bainita superior e inferior y un decrecimiento en el porcentaje de martensita.

Se determinó que el comportamiento de las curvas de enfriamiento de la probeta sometida a la prueba del extremo templado (Jominy) es comandada por la etapa de ebullición, debido a que el enfriamiento en el extremo de la probeta es realizado bajo flujo forzado. Por lo que no es determinante la etapa de capa vapor dentro del

comportamiento microestructural del acero. Además, se observa que la etapa de enfriamiento por líquido para todas las curvas presenta un comportamiento similar para todas las distancias Jominy.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

### Referencias de publicaciones periódicas:

- [1] D.H. Herring. "Jominy testing: The practical side," *Industrial Heating*, pp. 81-86, Oct. 2001.
- [2] J.R. Tarpani, M.H.P.Braz. "Microstructural and fractographic characterization of a thermally embrittled nuclear grade steel: part II- quenching and tempering," *Materials Research*, pp.365.371, July 2002.

### Referencias de libros:

- [3]. INCROPERA, Frank P. y DeWITT, David P., "Fundamentos de Transferencia de Calor", 4ta ed., Editorial Prentice Hall, Mexico, 1999. ISBN: 970-17-0170-4. P 391, 492 y 493.
- [4]. MARTIN, H., "Heat and Mass Transfer between Impinging Gas Jets and Solid Surfaces", en J.P., Hartnett y T.F. Irvine, Jr., eds., *Advances in Heat Transfer*, vol. 13, Academic Press, Nueva York, 1977.
- [5]. CHURCHILL, S.W. y H. H. S. Chu, "Correlating Equations for Laminar and Turbulent Free Convection from a Vertical Flat Plate," *ASME*, p 78, 435, 1975.
- [6]. KUROWSKI, Paul M. Ph.D., "Engineering Analysis with COSMOSWorks," Editorial SDC Publications, 2004.
- [7]. SCHICHT Jonatan Walter, *Modelo termo-metalúrgico aplicado al enfriamiento de aceros*, Universidad de Buenos Aires, 2004.
- [8] A. Valencia, *Tecnología del tratamiento térmico de los metales*, 2nd ed., Editorial Universidad de Antioquia, 1992, p.62 Y 123.
- [9] A. Valencia, *Transformaciones de fase en metalurgia*, 2nd ed., Editorial Universidad de Antioquia, 1998, p.69 Y 136.
- [10] ASM international, *Metal Handbook, Properties and selection: irons, steel and high performance alloys*. Vol. 1, 1990. p. 449.
- [11] ASM international, *Metal Handbook, Heat treating*. Vol. 4, 1991. p.35, 67 y 207.

### Normas:

- [12] A-255. Standard test methods for determining hardenability of steel. ASTM Standard. 2002.