

Efecto del Tamaño de Grano Austenítico en el Comportamiento Mecánico para los Aceros AISI 1045 y 4140 Mediante Experimentación y Modelado

Effect of Austenite Grain Size on Mechanical Behavior for AISI 1045 and 4140 Steels by Experimentation and Modeling.

Ricardo D. López^{a*}, Araceli Maldonado^a, Carlos E. López^a, Juan E. Guzmán^a, Mario A. García^{b+}

^a Departamento de Metal-Mecánica, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Cd. Victoria, Blvd. Emilio Portes Gil No. 1301 Pte, Ciudad Victoria Tamps., México C.P. 87010.

^b Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Cd. Victoria, Blvd. Emilio Portes Gil No. 1301 Pte, Ciudad Victoria Tamps., México C.P. 87010.

Resumen

Los aceros de medio C son ampliamente utilizados en la fabricación de piezas y componentes mecánicos tales como engranajes, ejes, pernos, acoplamientos, husillos, ruedas dentadas, bielas y cigüeñales, debido a su buena resistencia mecánica, tenacidad y resistencia al desgaste. Muchas investigaciones para este tipo de aceros se han enfocado en estudiar el comportamiento al desgaste, deformación y análisis de propiedades mecánicas a temperaturas elevadas. Sin embargo, existen pocos estudios que se han enfocado en evaluar su comportamiento mecánico en función del tamaño de grano austenítico (TGA). En esta investigación, se presentan los resultados experimentales y mediante modelado numérico, del efecto del TGA antes del temple en dos aceros de medio C, AISI 1045 y 4140, con la finalidad de determinar las condiciones óptimas de procesamiento para obtener las propiedades mecánicas deseadas. El tamaño de grano fue evaluando entre 5 y 110 μm . Se utilizaron técnicas experimentales para determinar la microestructura, resistencia a la cedencia, resistencia a la tensión, la dureza y pruebas de dilatometría de temple para determinar su deformación. Los resultados simulados fueron obtenidos mediante el software JMatPro. De estos resultados se pueden mencionar que el TGA juega un papel importante en la evolución de las propiedades mecánicas para los aceros estudiados. Cuando el TGA fue superior a 15 y 45 μm para los aceros AISI 4140 y 1045 respectivamente, las propiedades mecánicas estuvieron en rangos más elevados. Los resultados mediante JMatPro estuvieron muy cercanos a los obtenidos experimentalmente, validando la simulación numérica en la predicción de las propiedades mecánicas estudiadas.

Palabras Clave:

Simulación, Tratamiento Térmico, Tamaño de Grano Austenítico, Propiedades Mecánicas.

Abstract

Medium-carbon steels are widely used in the making of mechanical pieces and components, such as gears, shafts, bolts, couplings, spindles, sprockets, connecting rods and crankshafts, because of their good mechanical resistance, toughness, and wear resistance. Many research has been focused on studying the behavior of wearing off, deformation and analysis of mechanical properties at high temperatures. However, little has been studied about evaluating its mechanical behavior related to the austenitic grain size (AGS). In this research, experimental results of the effect of AGS before quenched of two medium-C steels AISI 1045 y 4140, are presented through the numerical modeling, in order to determine the optimal processing conditions to obtain the desired mechanical properties. The grain size was evaluated between 5 y 110 μm . Experimental techniques were used to determine the microstructure, tensile strength, yield strength, hardness, and dilatometry to determine its deformation. The simulated results were obtained through the JMatPro. From the results, it can be mentioned that the AGS has an important role in the evolution of mechanical properties for the studied steels. When the AGS was higher than 15 and 45 μm for the steels AISI 4140 and 1045 respectively, the mechanical properties were in higher levels. The results through JMatPro were very close to the ones obtained experimentally, validating the numeric simulation in the prediction of the studied mechanical properties.

Keywords:

Simulation, Thermal Treatment, Austenite Grain Size, Mechanical Properties.

+ Alumno de Licenciatura de la carrera de Ingeniería Mecánica

*Autor para la correspondencia: Ricardo.lopez@itvictoria.edu.mx; rdlgitecv@hotmail.com

Correo electrónico: Ricardo.lopez@itvictoria.edu.mx; rdlgitecv@hotmail.com (Ricardo D. López)

1. Introducción

La posibilidad de modificar sus propiedades mecánicas a través de diseños de tratamientos térmicos, ha provocado que materiales como los aceros sean utilizados ampliamente en la ingeniería. Las aplicaciones de los aceros de medio carbono (AISI 4140 y 1045), incluyen la industria automotriz, la construcción y la industria de manufactura para la fabricación de ejes, engranes, pernos, bielas, cigüeñales entre otros. Lo anterior debido a que sus propiedades mecánicas pueden manipularse en un amplio rango modificando su microestructura y obteniendo aplicaciones más específicas (Ulutan, 2010; Meysami, 2010; Taghizadeh, 2013; Ruffing, 2016). Por lo tanto, este tipo de aceros se han convertido en materiales destacados industrialmente para aplicaciones donde la resistencia mecánica y el desgaste son propiedades críticas a controlar.

El temple, es uno de los tratamientos térmicos, más utilizados en la industria (Kang, 2007; Şimşir, 2008; Porto de Oliveira, 2010; Jung, 2012; Feulvarch, 2013) al proporcionar un incremento en las propiedades mecánicas en los componentes utilizados. Lo anterior es debido, a la alta velocidad de enfriamiento (≈ 50 °C/s) que se obtiene mediante este proceso para lograr la transformación austenita-martensita, esta última la fase deseable en los aceros templados (Bhadeshia, 2008). Aunado a la velocidad de enfriamiento, el crecimiento del tamaño de grano durante la etapa de permanencia en el tratamiento térmico, representa una de las variables más importantes a controlar, debido al efecto en la cinética de transformación de fases y la microestructura final (Prawoto, 2012; Zhao, 2018 and Celada-Casero C, 2019).

La martensita es la microestructura típica resultante del proceso de temple, y está íntimamente relacionada con las propiedades mecánicas del material, tales como el esfuerzo de cedencia, la resistencia a la fatiga, la dureza, resistencia a la tracción, la elongación y la resistencia al impacto (Lee, 2008). Muchas investigaciones se han enfocado en estudiar el efecto del tamaño de grano austenítico en las propiedades mecánicas de piezas templadas (Celada, 2019; Bialobrzaska, 2017; Prawoto, 2012; Yang, 2009). La mayoría de los resultados encontrados han demostrado que, para tamaños de grano más pequeños cercanos a $10 \mu\text{m}$ o menores, tanto el esfuerzo necesario para comenzar el proceso de dislocaciones en el material aumenta; de la misma manera a temperatura ambiente incrementa, la dureza, el límite elástico, la resistencia a la tracción, la resistencia a la fatiga y la resistencia al impacto.

Comprender la relación entre la deformación elástica-plástica y el tamaño de grano, ayuda a predecir el comportamiento de los acero cuando están sometidos a diversas condiciones de trabajo (Moleejane, 2014; Frihat, 2015). El proceso de tratamiento térmico de temple involucra tres etapas importantes: la velocidad de calentamiento, el tiempo de permanencia a la temperatura de austenizado (generalmente 50 °C por encima de Ac3 donde existe austenita completa, y está relacionada con la composición química del acero y en específico del contenido de carbono) y la velocidad de enfriamiento. La segunda determina el tamaño de grano y la última es responsable de la microestructura al final del proceso. Durante cada etapa existen un número importante de variables involucradas y que son difícil de controlar y predecir,

lo que implica largos y costosos ensayos de laboratorio (López, 2016; Yaakoubi, 2013).

Por tal motivo, una alternativa para la obtención de estos resultados es haciendo uso de software especializados que se enfocan en la obtención de las propiedades del material simulado, y se basan por lo general en su composición química. Para una confiable predicción de las propiedades, cualquier simulación debe ser capaz de tener un acoplamiento de la transferencia de calor, las transformaciones de fase, la composición química y las deformaciones presentes.

Para el presente trabajo, se utilizó JMatPro versión 6.0 el cual es un software versátil capaz de predecir con exactitud diferentes propiedades mecánicas, físicas y térmicas tales como: densidad, dureza, resistencia a la tensión, esfuerzo de cedencia, módulo de elasticidad, transformaciones de fase, coeficiente de expansión térmica, conductividad térmica y calor específico. Así mismo, puede calcular los diagramas tiempo-temperatura-transformación (TTT) y transformación con enfriamiento continuo (CCT). Los datos iniciales requeridos para la simulación son: composición química, tamaño de grano, temperatura de austenizado y velocidad de enfriamiento. Trabajos previos (Guo, 2009; Saunders, 2003; Trzaska, 2009), han demostrado la exactitud para el cálculo de diferentes propiedades de los materiales ensayados utilizando el software JmatPro. Los análisis se han enfocado básicamente en determinar los diagramas TTT y CCT, así como evaluar las propiedades térmicas y mecánicas de diferentes aceros.

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar el comportamiento del tamaño de grano austenítico antes del temple en las propiedades mecánicas para dos aceros de medio-C AISI 4140 y 1045 utilizando software numérico. Los resultados obtenidos a través de las simulaciones serán validados mediante resultados experimentales a través de ensayos mecánicos, dureza, microscopía óptica y dilatometría de temple.

2. Material y Procedimiento Experimental

2.1. Materiales

La Tabla I, muestra la composición química de los aceros utilizados en el presente estudio AISI 4140 y 1045.

Tabla I.- Composición química de los aceros estudiados.

Elemento	C	Mn	P	Si	S	Cr	Mo
(% e.p)							
4140	0.4	0.9	0.015	0.3	---	1.0	0.2
1045	0.45	0.75	0.040	0.25	0.050	---	-
--							

Los resultados fueron obtenidos por la técnica de combustión LECO en un instrumento modelo CS-244 para el C y S, y para los demás elementos se utilizó espectrometría de emisión óptica por chispa en un espectrómetro marca SPECTRO modelo LABS. Para los ensayos de tensión se utilizaron muestras cilíndricas de los aceros con dimensiones de 200 mm de longitud y 12.5 mm de diámetro, y de 10 mm y 12.5 mm de longitud y diámetro respectivamente para las pruebas de tratamiento térmico.

2.2. Procedimiento experimental

El diseño de los tratamientos térmicos se muestra en la Figura 1, para esto se utilizó un horno eléctrico tipo mufla marca Thermolyne sin control de atmosfera. Las piezas para ambos aceros fueron calentadas a una velocidad de 10 °C/s hasta la temperatura de austenizado de 880 °C con austenita completamente transformada, con tiempos de permanencia entre 1 a 120 minutos para observar la evolución en el crecimiento de grano. El enfriamiento de las piezas se realizó en un baño de aceite a temperatura ambiente. La velocidad de enfriamiento fue determinada mediante termopares tipo-K colocados en el centro de la pieza sobre la superficie y los datos fueron obtenidos mediante una tarjeta de adquisición marca Omega de 16 canales. Para determinar el crecimiento de grano, se realizaron tratamientos térmicos, muestras de 1 x 1 cm ancho y longitud fueron calentadas por debajo de la temperatura de austenizado para cada acero, y el enfriamiento fue en agua a temperatura de 5 °C aproximadamente.

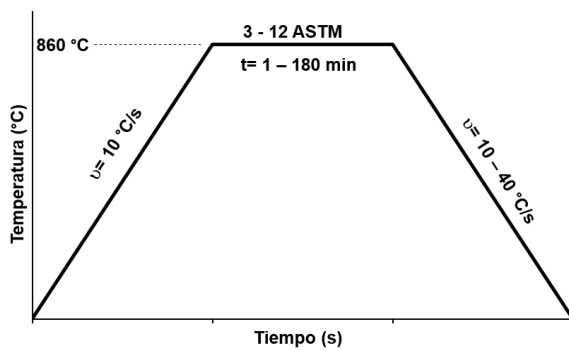


Figura 1.- Representación esquemática de las condiciones experimentales para los tratamientos térmicos.

Para determinar la dureza se aplicó la norma ASTM E92, utilizando un microdurómetro Vickers con una carga de 200 gf y tiempos de indentación de 30s por muestra, y un durómetro Rockwell marca TIME con indentador de punta de diamante y carga de 150 Kg. Las propiedades mecánicas como el último esfuerzo a la tensión (UTS) y el esfuerzo de cedencia (YS) se obtuvieron utilizando una máquina de ensayos universales marca Shimadzu de 5 KN las probetas se maquinaron de acuerdo a la norma ASTM E8. Para la preparación metalográfica las muestras se desbastaron con lijas de SiC con diferentes granulometrías, se pulieron con una solución de alúmina de 3 y 1 μm y pulidas con pasta de diamante. Para revelar la microestructura se utilizó nital al 2%. Mientras que para revelar el tamaño de grano austenítico se utilizó una solución saturada de ácido pícrico (7 gr de ácido y 250 ml de H₂O) el tiempo de inmersión de la probeta en el reactivo fue de 40 a 90 s, la temperatura del reactivo se mantuvo en el rango de 55 a 60 °C.

Las fases presentes en los aceros fueron determinadas utilizando un microscopio metalográfico Olympus con analizador de imágenes. Las propiedades analizadas en el presente trabajo fueron simuladas en el software JmatPro tales como: expansión lineal, dureza, UTS y YS, transformaciones de fases, y diagramas TTT y CCT. El software fue alimentado

con datos experimentales y obtenidos de la literatura (Caballero, 2004; Trzaska, 2009).

3. Resultados y Discusión

La variable más importante a determinar en el presente estudio, fue el crecimiento de grano austenítico, el cual está directamente relacionado con el tiempo de permanencia de la pieza a la temperatura de austenizado, que a su vez presentó una importante influencia en la cinética de transformaciones de fase en los aceros estudiados principalmente austenita – bainita ($\square \rightarrow B$) y austenita-martensita ($\square \rightarrow \alpha$).

La Figura 2, muestra el comportamiento en el crecimiento del tamaño de grano de los aceros AISI 4140 y 1045 estudiados a tiempos entre 1 y 120 min de permanencia a la temperatura de austenizado $\approx 880^\circ\text{C}$. Se puede observar que en los primeros minutos el tamaño de grano presenta una tendencia de crecimiento casi lineal hasta tiempos de 30 min, posterior a este tiempo la velocidad de crecimiento disminuye y para tiempos superiores de 90 minutos el tamaño de grano no presentó evidencia de crecimiento, sino que se mantuvo en tamaños de 95 μm aproximadamente. La evolución del tamaño de grano presentada en esta figura, se obtuvo con el promedio del análisis de 10 campos de cada muestra analizada. Tiempos cortos de permanencia presentan un grano muy fino cercano a 5 μm .

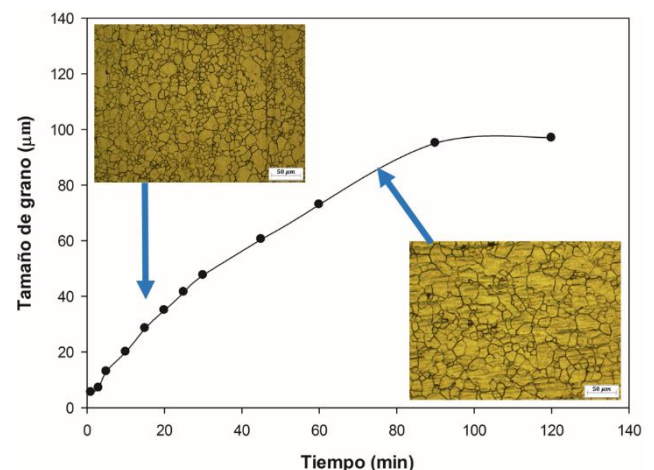


Figura 2.- Comportamiento de la evolución en el tamaño de grano austenítico en función del tiempo de permanencia a 880 °C.

Los resultados mostrados en las secciones siguientes, representan el análisis experimental y numérico del efecto del tamaño de grano austenítico para 3, 6, 9 y 12 ASTM de acuerdo a la norma E112 (equivalente a tamaños de 110, 40, 14 y 5 μm respectivamente) para los dos tipos de aceros estudiados AISI 4140 y 1045, sobre el comportamiento microestructural, la resistencia mecánica y la dureza. Es importante mencionar, que los tamaños de grano utilizados en la presente investigación fueron propuestos para estudiar y analizar el comportamiento tanto de tamaños de grano muy pequeños (5 μm) y muy grandes (110 μm) con la finalidad de establecer una relación microestructural y de propiedades mecánicas. Adicionalmente fueron calculados mediante simulación numérica los diagramas tiempo-temperatura-transformación (TTT) y transformación por enfriamiento continuo (CCT), presentando el efecto del tamaño de grano en las transformaciones de fase y la dureza al final del enfriamiento,

obteniendo una velocidad promedio para estos aceros de 25 °C/s.

3.1. Análisis Microestructural

Posterior al tratamiento térmico de temple, la microestructura de los aceros fue analizada mediante microscopía óptica para determinar las fases presentes. La Figura 3, corresponde a una muestra representativa de los aceros estudiados, donde se muestran fotomicrografías obtenidas de la sección transversal de las muestras. La Figura 3a, representa la microestructura del acero AISI 1045 y corresponde a las fases de ferrita y perlita en porcentajes promedio de 45 y 55 % respectivamente, de acuerdo a 10 campos medidos con ayuda del software Image ProPlus. Mientras la Figura 3b, representa la microestructura para el acero AISI 4140 donde la microestructura consiste principalmente de la fase martensita con morfología acicular (color café), agregados de bainita en forma de agujas y austenita retenida (color claro). La microestructura obtenida es producto de la transformación en estado sólido de la austenita a una alta velocidad de enfriamiento durante el tratamiento térmico de temple $\approx 25^\circ\text{C/s}$, la cual es la responsable de la alta dureza del material.

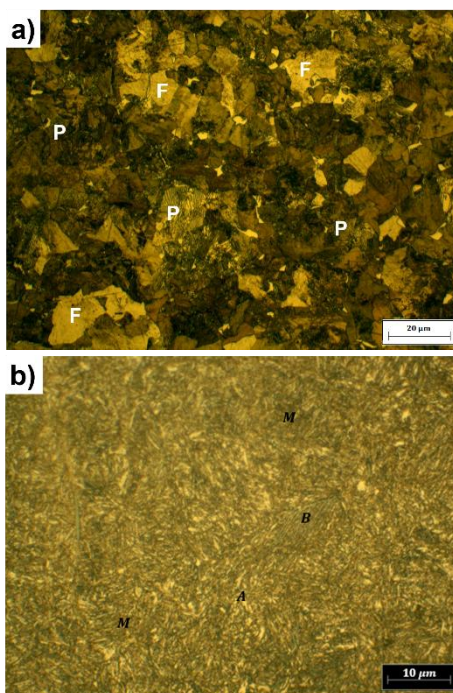


Figura 3.- Microestructura de los aceros (F=ferrita, P=perlita, M=martensita, B=bainita, A=austenita retenida) a) 1045 y b) 4140.

En las microestructuras analizadas para el acero AISI 4140 se observó que cuando el tamaño de grano de la austenita era más pequeño, las placas de martensita resultaban más finas, debido a la alta velocidad de enfriamiento requerido para la transformación. Además, se encontró austenita retenida en las muestras analizadas tanto experimentalmente como de manera simulada, en rangos entre 4 a 10%, y su presencia es debida a la fracción de austenita que no logró transformarse en martensita por la alta velocidad de enfriamiento que se requiere para suprimir las demás fases, permanece en la microestructura y su porcentaje dependerá básicamente del contenido de

carbono. Otra fase presente para estas condiciones, fue la bainita, encontrándose en el rango de 5 a 15% y también está en función de la velocidad de enfriamiento y del tamaño de grano. Un análisis del efecto del tamaño de grano austenítico en rangos entre 5 y 110 micras para los dos aceros estudiados mediante experimentación y simulación numérica son mostrados a continuación. La Figura 4, presenta el comportamiento de la evolución en las transformaciones de fases de martensita (M) y bainita (B) en función del tamaño de grano.

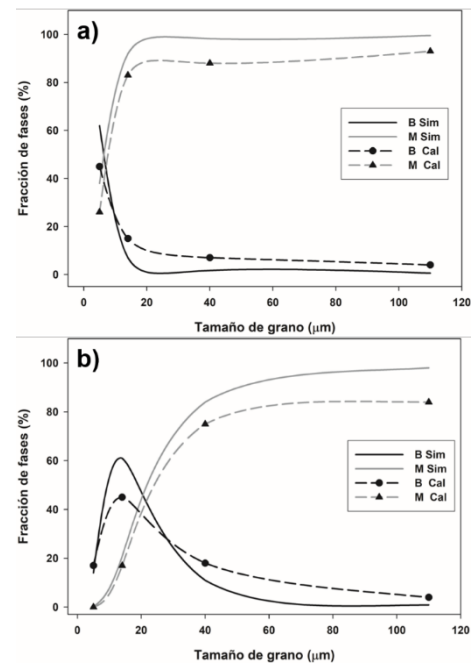


Figura 4.- Evolución de las transformaciones de fase (B=bainita, M=martensita) en función del TG, a) AISI 4140 y b) AISI 1045.

Se puede observar que los resultados obtenidos de la simulación numérica se encuentran muy cercanos a los experimentales con una desviación estándar menor del 7%. La Figura 4a, representa el comportamiento de las fases para el acero AISI 4140. Se hace evidente que para TG mayores a 18 μm se obtiene un porcentaje de martensita muy cercano al 90% y un bajo porcentaje de bainita en la microestructura final inferior al 8%. En los materiales que son sometidos a tratamiento térmico de temple es deseable obtener un alto porcentaje de martensita y la menor cantidad de bainita, con la finalidad de alcanzar altas propiedades mecánicas. La Figura 4b, representa la distribución de fases para el acero AISI 1045, se puede observar que para alcanzar niveles de martensita superiores a 80% el tamaño de grano debe ser superior a 40 μm, ya que tamaños de grano inferiores incrementa la formación de bainita indeseable en este tipo de aceros. Con lo mostrado en esta figura, es importante resaltar que se debe tener un control adecuado en la etapa 2 del tratamiento térmico con referente al tiempo de permanencia para obtener un tamaño de grano adecuado que garantice la obtención de propiedades mecánicas deseadas.

3.2. Propiedades Mecánicas

En la Figura 5, se muestra el comportamiento de los aceros estudiados sometidos a pruebas de tensión, donde se calculó el último esfuerzo a la tensión (UTS) y el esfuerzo de cedencia (YS) y los resultados experimentales son comparados con los obtenidos mediante simulación numérica. Se puede observar, que existe una buena relación entre los datos numéricos y los medidos experimentalmente, por lo tanto, es posible validar los resultados del software.

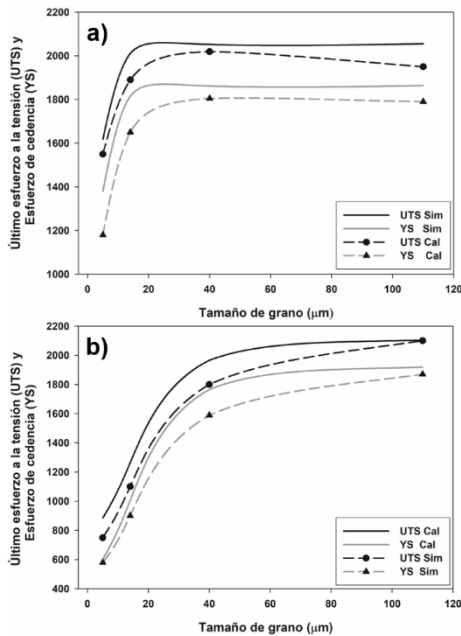


Figura 5.- Efecto del tamaño de grano en el último esfuerzo a la tensión (UTS) y esfuerzo de cedencia (YS), a) AISI 4140 y b) 1045.

La Figura 5a, corresponde al acero AISI 4140, y se puede observar que a partir de tamaños de grano de 20 µm el material alcanza un nivel máximo en la resistencia a la tensión (UTS) cercano a 2010 MPa, tamaños de grano mayores no presentaron cambios significativos. El YS por su parte se mantuvo en rangos de 1800 MPa para las mismas condiciones del tamaño de grano. Por otro lado, la Figura 5b, que corresponde al acero AISI 1045, se observa que para obtener altas propiedades mecánicas el tamaño de grano debe de estar cercano a 40 µm, tanto para el UTS y YS. Lo anterior nos indica que a medida que el tamaño de grano es mayor las propiedades mecánicas para ambos aceros incrementa.

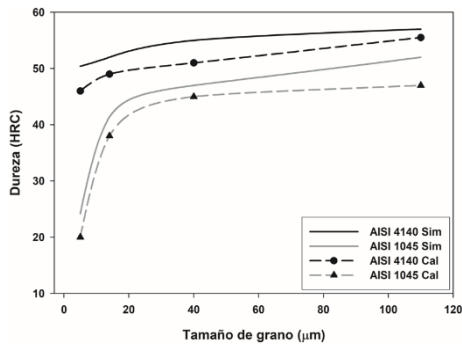


Figura 6.- Efecto del tamaño de grano en la evolución de la dureza para los aceros estudiados.

La Figura 6, presenta las curvas de dureza obtenidas experimentalmente (línea discontinua) y estimadas (línea continua) por simulación numérica para los cuatro tamaños de grano estudiados (110, 40, 14 y 5 µm) y para ambos aceros AISI 4140 y 1045. Se puede observar, que existe un buen acuerdo entre los diferentes resultados obtenidos, la variación en la desviación estándar resulto menor al 4%.

Con los resultados obtenidos, es evidente que existe una relación directa entre el tamaño de grano austenítico antes del temple y la dureza obtenida al final del enfriamiento. De acuerdo a esta figura y con los resultados mostrados anteriormente, es importante hacer notar que a partir de tamaños de grano de 40 µm para ambos aceros, se alcanzan niveles de dureza que sigue permaneciendo a tamaños de grano mayores. Para el acero AISI 1045 con tamaños de grano menores a 20 µm la dureza del material se presenta muy por debajo de lo esperado para las aplicaciones de este tipo de aceros, ya que en estado de templado se estima entre 50 y 55 HRC. Lo anterior debido principalmente a la falta de elementos de aleación tales como Cr y Mo los cuales son formadores de carburos e incrementan las propiedades de la aleación.

3.3. Cinética de transformaciones de fase.

En la Figura 7, se presentan los diagramas TTT obtenidos mediante simulaciones por JMatPro en función del tamaño de grano para los aceros estudiados, donde se muestran las transformaciones de fase y las velocidades de enfriamiento necesarias para inhibir la formación de bainita indeseable en estos aceros.

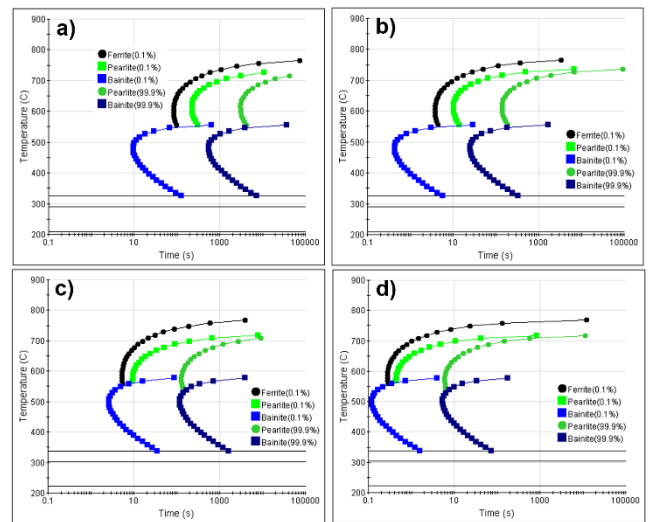


Figura 7.- Efecto del tamaño de grano austenítico (110 y 5 µm) en la cinética de transformaciones de fase, a y b) AISI 4140 y, c y d) AISI 1045.

Los resultados demostraron un comportamiento similar para ambos aceros estudiados, el AISI 4140 que representa a la (Figura 7a y b) y AISI 1045 para la (Figura 7c y d), ambos analizados para tamaños de grano de 110 y 5 µm. Se puede observar, en los diagramas obtenidos, una fuerte influencia del tamaño de grano sobre el tiempo requerido para iniciar la transformación austenita-martensita. Para el tamaño de grano de 110 µm las curvas de inicio (Bs) y fin (Bf) de la transformación de bainita se encuentran desplazadas hacia la

derecha del diagrama (Figuras 7a y c), lo que indica que se cuenta con mayor tiempo que se traduce en una reducción de la velocidad crítica de enfriamiento necesaria para evitar la formación de bainita en la microestructura. Mientras que para tamaños de grano de $5\ \mu\text{m}$ (Figuras 7b y d), estas curvas se desplazan al lado izquierdo en el diagrama provocando que para alcanzar un porcentaje alto de martensita se requiere utilizar altas velocidades de enfriamiento. Con lo anterior se puede determinar, que incrementando el tamaño de grano en las aleaciones, se favorece en la obtención de martensita con mayor porcentaje en la microestructura final, utilizando velocidades de enfriamiento menos severas, evitando la aparición de grietas y fracturas durante el enfriamiento.

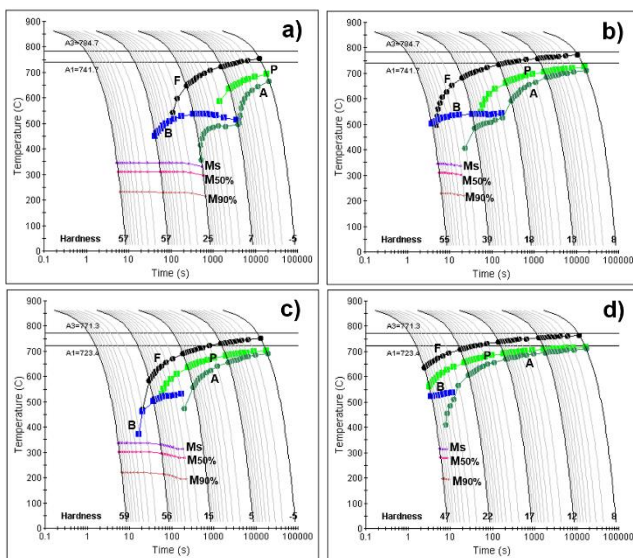


Figura 8.- Efecto del tamaño de grano austenítico (110 y $5\ \mu\text{m}$) y la velocidad de enfriamiento en la dureza final para; a y b) AISI 4140 y, c y d) AISI 1045.

En la Figura 8, se muestran los diagramas CCT obtenidos mediante simulaciones por JMatPro, donde se presentan los perfiles de enfriamiento para obtener las diferentes fases de los aceros estudiados, además de predecir el comportamiento en la dureza dependiente del tamaño de grano y la velocidad de enfriamiento.

La Figura 8a y b, corresponden al acero AISI 4140 para tamaños de grano de 110 y $5\ \mu\text{m}$ respectivamente. Los resultados muestran, que para obtener una transformación casi completa de martensita además de alta dureza no se requiere una alta velocidad de enfriamiento, y disminuye esta velocidad a medida que el tamaño de grano es mayor. Con tamaños de grano de $110\ \mu\text{m}$, la velocidad crítica de enfriamiento es aproximadamente $10\ ^\circ\text{C/s}$, sin embargo, al reducir el tamaño de grano a $5\ \mu\text{m}$ se obtiene una completa transformación austenita-martensita siempre y cuando la velocidad de enfriamiento sea superior a $90\ ^\circ\text{C/s}$. Altas velocidades de enfriamiento están asociadas con fenómenos de distorsión, aparición de grietas y fracturas que disminuyen la calidad de las piezas y componentes.

La Figura 8c y d, corresponden al acero AISI 1045 para tamaños de grano de 110 y $5\ \mu\text{m}$ respectivamente. Se puede observar en la Figura 8c, para un tamaño de grano de $110\ \mu\text{m}$, se requiere de una velocidad de enfriamiento cercana $30\ ^\circ\text{C/s}$

para inhibir la formación de bainita y obtener una transformación completa de austenita-martensita alcanzando una dureza aproximada de $57\ \text{HRC}$. Sin embargo, para este mismo acero cuando el tamaño de grano es más fino $5\ \mu\text{m}$ la velocidad de enfriamiento necesaria para evitar la formación de bainita está muy cercana a $100\ ^\circ\text{C/s}$. Esta velocidad es muy alta y la posibilidad de formar grietas y fracturas en las piezas se hace más probable perjudicando su calidad y precisión dimensional.

4. Conclusiones

De los resultados obtenidos mediante las diferentes pruebas experimentales y las simulaciones a través de JMatPro, donde se evaluó el efecto del TGA antes del temple sobre la microestructura, las propiedades mecánicas y la cinética de las transformaciones de fase a través de los diagramas TTT y CCT para los aceros AISI 4140 y 1045, se puede concluir lo siguiente:

El tamaño de grano austenítico evaluado bajo las condiciones mostradas en la parte experimental, presentan un crecimiento casi lineal en los primeros minutos de prueba, y posteriormente se ve frenado cuando los tiempos de tratamiento térmico son superiores a 60 minutos. El tiempo para incrementar el tamaño de grano en los aceros representa un costo a nivel industrial, por ello la importancia de determinar las condiciones óptimas donde se obtengas las propiedades deseadas.

El tamaño de grano austenítico juega un papel importante en la cinética de las transformaciones de fase y las propiedades mecánicas al final del enfriamiento para los aceros estudiados. Aunque la variación en el tamaño de grano afecta en mayor medida y de manera negativa al acero AISI 1045 cuando el tamaño de grano es menor de $15\ \mu\text{m}$.

Cuando el TGA es más grande y de acuerdo a los diagramas TTT obtenidos mediante simulación, se observó que las curvas del inicio de la fase (bainita) son desplazadas hacia la derecha del diagrama, lo que indica que se requiere una menor velocidad crítica de enfriamiento para lograr una completa transformación de martensita en la microestructura, evitando emplear altas velocidades de enfriamiento las cuales son responsables de la formación de grietas y fracturas en el material durante el enfriamiento.

Después de analizar y comparar los resultados experimentales y simulados, se puede mencionar que están muy cercanos, y que las predicciones realizadas a través del software son válidas para la toma de decisiones, durante el diseño de tratamientos térmicos de templeado.

Agradecimientos

Los autores de esta investigación quieren agradecer al Tecnológico Nacional de México y al Instituto Tecnológico de Ciudad Victoria por las facilidades brindadas para utilizar los laboratorios y realizar la parte experimental. Así mismo, al CINVESTAV Unidad Saltillo por el uso de una licencia del software JMatPro para realizar la simulación numérica.

Referencias

Bhadeshia, H.K.D.H., 2008. *Mathematical Models in Materials Science, Materials Science and Technology* 24: 128-135.

- Białobrzaska B, Konat Ł and Jasiński R., 2017. The influence of austenite grain size on the mechanical properties of low-alloy steel with boron. *Metals* 7: 26-45.
- Caballero FG, Santofimia MJ, García-Mateo C and García de Andrés C., 2004. Time-Temperature-Transformation diagram within the bainite temperature range in a medium carbon steel. *Materials Transactions* 45 (12): 3272-3281.
- Celada-Casero C, Sietsma J and Santofimia M.J., 2019. The role of the austenite grain size in the martensitic transformation in low carbon steels. *Materials and Design* 167: 107625-107634.
- Feulvarch E, Fontaine M and Bergheau JM., 2013. XFEM investigation of a crack path in residual stresses resulting from quenching. *Finite Element in Analysis and Design* 75: 62-70.
- Frihat M., 2015. Effect of heat treatment parameters on the mechanical and microstructure properties of low-alloy steel. *Journal of Surface engineering Materials and Advanced Technology* 4: 214-227.
- Guo Z, Saunders N, Miodownik P and Schillé J. P., 2009. Modelling Phase Transformation and Material Properties Critical to the Prediction of Distortion During the Heat Treatment of Steels. *International Journal Microstructure and Materials Properties* 4: 197-195.
- Jung M, Kang M and Lee Y.K., 2012. Finite-element simulation of quenching incorporating improved transformation kinetics in a plain medium-carbon steel. *Acta Materialia* 60: 525-536.
- Kang SH and Im Y.T., 2007. Three-dimensional thermo-elastic-plastic finite element modelling of quenching process of plain-carbon steel in couple with phase transformation. *International Journal of Mechanical Science* 49: 423-439.
- Lee S.J, Park J.S and Lee Y.K., 2008. Effect of austenite grain size on the transformation kinetics of upper and lower bainite in a low-alloy steel. *Scripta Materialia* 59: 87-90.
- López-García R.D, García-Pastor F. A, Castro-Roman M.J, Alfaro-López E and Acosta-González F., 2016. Effect of immersion routes on the quenching distortion of a long steel component using a finite element model. *Transaction of the Indian Institute of Metals* 69(9): 1645-1656.
- Meysami A.H, Ghasemzadeh R, Seyedein S.H and Aboutalebi M.R., 2010. An investigation on the microstructure and mechanical properties of direct-quenched and tempered AISI 4140 steel. *Materials and Design* 31: 1570-1575.
- Moleejane C. M, Sanusi K.O, Ayodele O.L and Oliver G.J., 2014. Microstructural features and mechanical behaviour of unalloyed medium carbon steel (EN8 Steel) after subsequent heat treatment," *Proceedings of the World Congress of Engineering and Computer Science*, vol. 2: 1-6.
- Porto de Oliveira W, Amorim Savi M, Lopes Pacheco PMC and Guimarães de Souza LF., 2010. Thermomechanical analysis of steel cylinders quenching using a constitutive model with diffusional and non-diffusional phase transformations. *Mechanics of Materials* 42: 31-43.
- Prawoto Y, Jasmawati N and Sumeru K., 2012. Effect of prior austenite grain size on the morphology and mechanical properties of martensite in medium carbon steel. *Journal of Materials Science and Technology* 25(5): 461-466.
- Ruffing C, Ivanisenko Y and Kerscher E., 2016. A comparison of the fatigue and fracture behavior of high strength ultrafine grained medium carbon steel SAE 1045 with high strength bearing steel SAE 52100. 21st European Conference on Fracture, ECF21, 20-24 June 2016, Catania, Italy. *Procedia Structural Integrity* 2: 3240-3247.
- Saunders N, Guo Z, Li X, Miodownik A.P and Schillé J., 2003. Using JMatPro to model materials properties and behavior. *Journal of the Minerals, Metals and Materials Society* 55: 60-65.
- Şimşir C and Gür CH., 2008. 3D FEM simulation of steel quenching and investigation of the effect of asymmetric geometry on residual stress distribution. *Journal of Materials Processing Technology* 207: 211-221.
- Taghizadeh S, Safarian A, Jalali S and Salimiasl A., 2013. Developing a model for hardness prediction in water-quenched and tempered AISI 1045 steel through an artificial neural network. *Materials and Design* 51: 530-535.
- Trzaska J, Jagiello A and Dobrzanski L.A., 2009. The calculation of CCT diagrams for engineering steel. *Archives of Materials Science and Engineering* 39: 13-20.
- Ulutun M, Osman N, Celik, H. G and Umit E. 2010. Effect of different surface treatment methods on the friction and wear behavior of AISI 4140 steel. *Journal of Materials Science & Technology* 26(3): 251-257.
- Yaakoubi M, Kchaou M and Dammak F., 2013. Simulation of the thermomechanical and metallurgical behavior of steels by using ABAQUS software. *Computational Materials Science* 68: 297-306.
- Yang H.S and Bhadeshia H.K.D.H., 2009. Austenite grain size the martensite-start temperature. *Scripta Materialia* 6: 493-495.
- Zhao H and Palmiere EJ., 2018. Effect of austenite grain size on acicular ferrite transformation in a HSLA steel. *Materials Characterization* 145: 479-489.