

## Transformaciones de fases durante el tratamiento térmico de austemperizado en un acero 0.41%C - 0.7%Mn - 2.15%Si - 0.013%Al

### Phase Transformations during heat treatment of austempering of a steel 0.41%C - 0.7%Mn - 2.15%Si - 0.013%Al

A.K García Ramírez <sup>a,\*</sup>, V.M López Hirata <sup>a</sup>, M.L Saucedo Muñoz <sup>a</sup>, J. De Jesús García <sup>a</sup>, Enrique Meza García <sup>a</sup>

<sup>a</sup> ESIQIE, Instituto Politécnico Nacional, 07300, Zacatenco, CDMX, México

#### Resumen

En este trabajo se analizó las transformaciones de fase que ocurren durante el tratamiento térmico de austemperizado en un acero avanzado de alta resistencia (AHSS) 0.41%C - 0.7%Mn - 2.15%Si - 0.013%Al, que se emplea en la industria automotriz para la fabricación de chasis y carrocería debido a sus óptimas propiedades mecánicas como absorción de energía de impacto y tenacidad. El software Thermo-Calc permitió predecir las fases presentes como ferrita y carburos en estado inicial y la presencia de austenita, ferrita, bainita y carburos después del tratamiento térmico. Los diagramas calculados por Thermo Calc; TTT, pseudobinario y cantidad de todas las fases vs temperatura, concuerdan con lo observado en las micrografías y DRX. Los resultados de M.O y DRX del tratamiento térmico de austemperizado indican una microestructura compuesta de bainita fina, austenita retenida y carburos  $M_7C_3$ , mejorando sus propiedades mecánicas, principalmente dureza y resistencia máxima a la tensión, 61 HR30N y 1513 MPa, respectivamente, en comparación con el estado inicial, 45 HR30N y 856 MPa.

**Palabras Clave:** Aceros Avanzados de alta resistencia, Austemperizado, Transformaciones de Fase, Tratamiento térmico, Alto Silicio.

#### Abstract

This work analyzed the phase transformations that occur in the *advanced high strength steel during heat treatment of austempering (AHSS)* 0.41%C- 0.7%Mn- 2.15%Si - 0.013%Al, this material is widely applied to the automobile industry for manufacture vehicle's body and chassis as a result their excellent mechanical properties such as impact energy absorption and toughness. The Thermo-Calc software enabled us to predict the formation of the following phases: ferrite and carbides from received steel and the presence from austenite, bainite and carbides after heat treatment. The Thermo-Calc calculated results; TTT diagram agrees with micrographs and XRD. The results from austempering heat treatment present a microstructure composed of fine bainite, retained austenite and carbides  $M_7C_3$ , improving their mechanical properties, mainly hardness and ultimate tensile strength, 61 HR30N and 1513 MPa, respectively, compared to the initial condition, 45 HR30N and 856 MPa.

**Keywords:** AHSS, Austempering, Phase Transformations, Heat Treatment, High Silicon.

#### 1. Introducción

Los productores de acero para la industria automotriz han desarrollado aceros avanzados de alta resistencia (AHSS) que tienen un mejor conjunto de propiedades mecánicas como alta tenacidad, absorción de energía de impacto y resistencia mecánica, en comparación con los aceros tradicionales como el bajo carbono, aceros al manganeso y aceros micro aleados (Maisuradze & Ryzhkov, 2018) Las propiedades mecánicas en estos aceros se determinan principalmente por la composición química, tratamiento térmico que se les efectúa (Bhadeshia & Edmonds, 1983), Un método alternativo cuyo fin es evitar la

distorsión y el agrietamiento asociados al temple y revenido convencional es el tratamiento térmico de austemperizado. El proceso implica la transformación de austenita en bainita, dando como resultado una mejor ductilidad, niveles altos de dureza y una mayor resistencia al impacto (Rowe, 2016) y (Rajan et al., 2012). Debido que estos aceros son relativamente nuevos se siguen desarrollando estudios de las transformaciones de fases para analizar su cambio microestructural y procesos termo mecánicos que incrementen las propiedades mecánicas del material (Zhao & Jiang, 2018). Por lo tanto, el objetivo del trabajo es el análisis microestructural de forma experimental y numérica del acero

\*Autor para la correspondencia: akaren241@gmail.com

Correo electrónico: akaren241@gmail.com (Ana Karen García Ramírez), vmlopezh@ipn.mx (Victor Manuel López Hirata), msaucedom@ipn.mx (Maribel Leticia Saucedo-Muñoz), dejesusgarciajorge@gmail.com (Jorge de Jesús García), Enrique Meza García (kikeipn@yahoo.com).

0.41%C- 0.7%Mn- 2.15%Si - 0.013%Al, así como su efecto en las propiedades mecánicas.

## 2. Procedimiento Experimental

### 2.1. Material

El acero de estudio es un acero avanzado de alta resistencia (AHSS) y su composición química se presenta en la Tabla 1. Las muestras fueron obtenidas de una placa con un espesor de 0.3 mm, seccionadas de manera transversal al material de origen, con dimensiones de 10 x 60 mm.

Tabla 1: Composición química del acero, % peso

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Al
0.41	2.15	0.7	1.33	0.039	0.054	0.013

### 2.2. Tratamiento Térmico

Las condiciones de tratamiento térmico de austemperizado inicio con un austenizado a 950 °C durante 72 minutos, seguido de un baño de sales fundidas a 310 °C durante 120 min y posteriormente enfriado al aire, las sales utilizadas fueron una mezcla de 45% NaNO<sub>3</sub> y 55% de KNO<sub>3</sub>.

### 2.3. Caracterización Microestructural y Mecánica.

Las muestras usadas para la caracterización microestructural tienen un tamaño aproximado de 5x 10 mm. Ambas muestras fueron preparadas mecanográficamente siguiendo la norma ASTM E3. Las micrografías fueron obtenidas por un microscopio óptico (OM) Nikon®, modelo ECLIPSE MA200 y el patrón de difracción de rayos X fue obtenido por un difractómetro usando cobalto como fuente de radiación.

La caracterización mecánica se realizó con un ensayo de dureza 30 HRN mediante la norma ASTM E18 y una prueba de tensión en donde las dimensiones y estándares del ensayo fueron obtenidos de la norma ASTM E8M.

## 3. Simulación Numérica

Con la base de datos TCFel1 y MobFe6, composición química y temperatura se calculó; el diagrama pseudobinario, el diagrama de cantidad de todas las fases vs temperatura y el diagrama tiempo- temperatura - transformación (TTT) con el programa de simulación numérica Thermo-Calc y adicionalmente tiempo para su módulo TC-Prisma.

## 4. Resultados y discusión

### 4.1. Acero en condición inicial

Las Figuras 1 (a y b) corresponden a las micrografías obtenidas por el M.O del material original. La microestructura está constituida de ferrita que son zonas blancas y con carburos M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> dispersados de manera intergranular e intragranular. Con un tamaño de grano de 17 μm. Esto concuerda con lo predicho por Thermo-Calc con los diagramas; pseudobinarios y

cantidad de todas las fases vs temperatura. En la Figura 2 se presenta el patrón de difracción de rayos X (DRX).

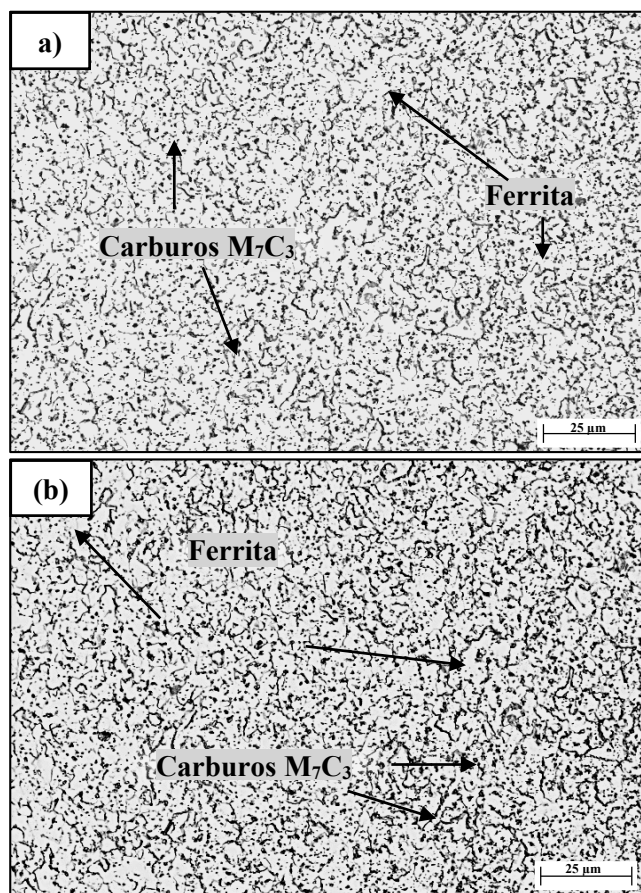


Figura 1: Micrografías obtenidas por Microscopía Óptica a) y b) condición inicial del material

Los picos principales corresponden a las fases de ferrita con estructura cristalina (bcc) y carburos M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> (hexagonal con grupo espacial P63/mc) que son consistentes con lo observado en las micrografías. Se debe señalar que el carburo M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> es un carburo aleado donde la M puede corresponder a Cr, Mo o Fe.

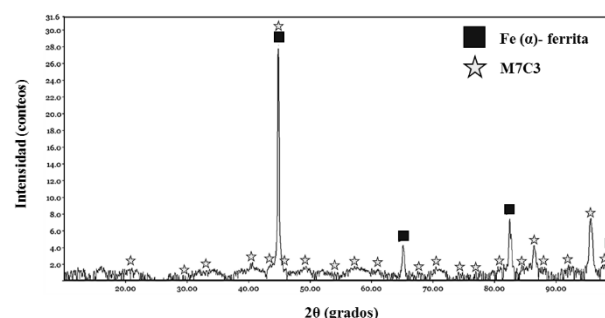


Figura 2: Patrón de difracción de rayos X para el acero en condición inicial

La curva esfuerzo- deformación ingenieril del material se muestra en la Figura 3, los datos obtenidos son; resistencia a cedencia de 592 MPa, resistencia máxima de 856 MPa y 24% de elongación, con una dureza de 45 HR30N, que son consistentes con lo reportado por literatura (Hilditch et al.,2015)

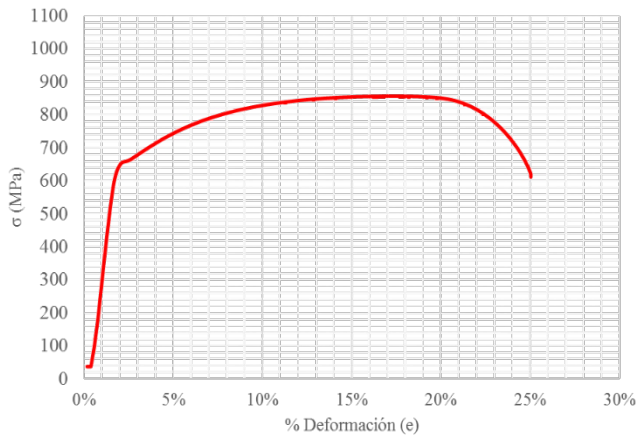


Figura 3: Curva esfuerzo vs. deformación ingenieril del acero en condición inicial

#### 4.2. Acero Austemperizado

Las Figuras 4 (a y b) corresponden a las micrografías obtenidas por el M.O del material de estudio después del tratamiento térmico de austemperizado.

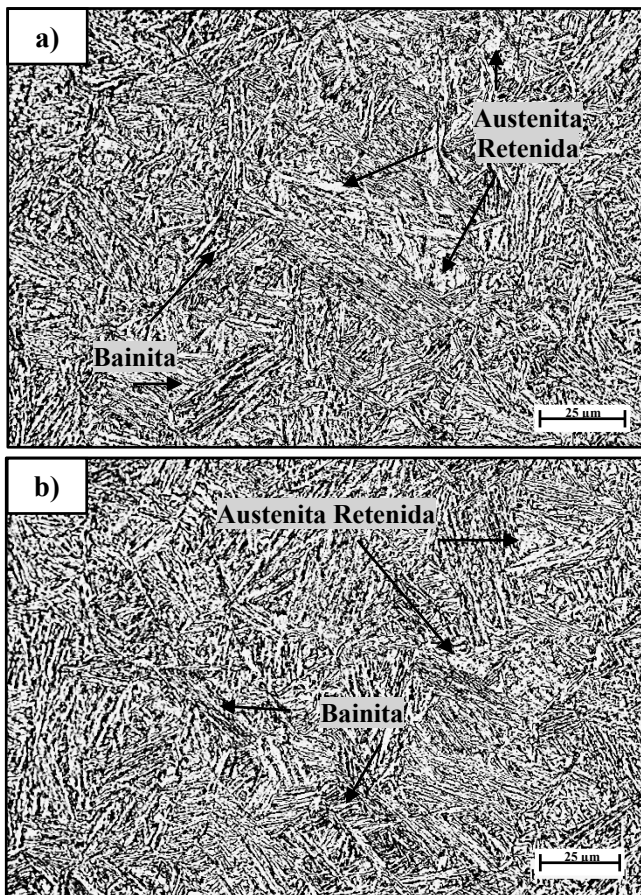


Figura 4: Micrografías obtenidas por Microscopía Óptica a) y b) después de tratamiento térmico de austemperizado

La microestructura está constituida de austenita retenida que son las zonas blancas, placas de ferrita finas (bainita) y con pequeñas cantidades de carburos  $M_7C_3$ . Esto concuerda con lo

calculado por Thermo-Calc con el diagrama TTT. En la Figura 5 se presenta el patrón de difracción de rayos X (DRX).

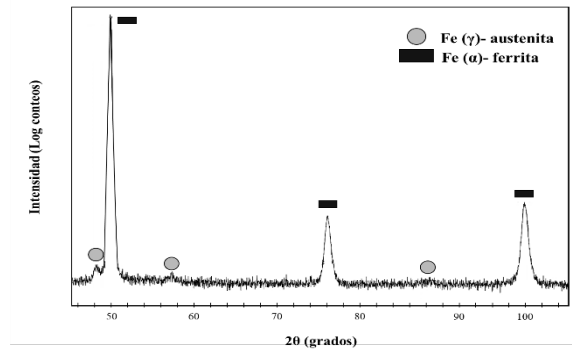


Figura 5: Patrón de difracción de rayos X del acero austemperizado

Los picos principales corresponden a las fases de ferrita y austenita retenida que son consistentes con lo observado en las micrografías.

La curva esfuerzo- deformación ingenieril del material se muestra en la Figura 6, los datos obtenidos son: resistencia a la cedencia de 1436 MPa, resistencia máxima a la tensión es 1760 MPa, 52% de elongación, y una dureza de 61 HR30 N que son consistentes con lo reportado por literatura (Avishan et al., 2017).

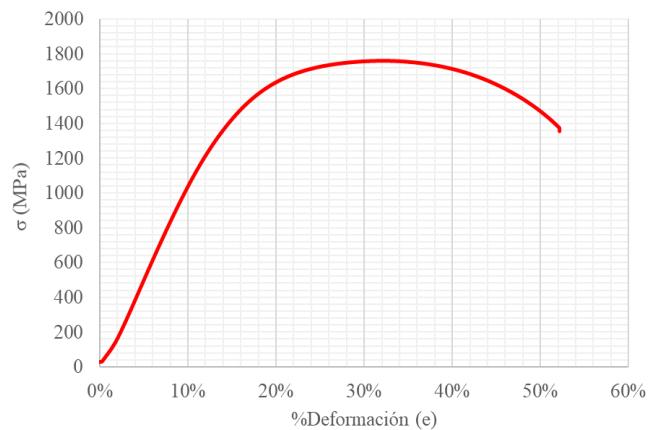


Figura 6: Curva esfuerzo vs. Deformación ingenieril del acero después del tratamiento térmico de austemperizado

Se asume que, si bien sus propiedades iniciales no son malas, se pueden mejorar considerablemente con el tratamiento térmico de austemperizado, a casusa del cambio microestructural del material debido a la presencia de bainita y a la austenita retenida.

#### 4.3. Resultados calculados por simulación numérica

Para determinar las condiciones de tratamiento térmico del material se emplearon los diagramas: pseudobinarios, cantidad de todas las fases vs. temperatura y el TTT; calculados por Thermo-Calc. En la figura 7, se presenta el diagrama de cantidad de todas las fases vs temperatura, donde se indica que después del líquido se forma hierro delta y a continuación la austenita. La temperatura de  $A_3$  esta en un valor aproximado de  $820^{\circ}C$  iniciando la transformación de la ferrita, cementita y



carburos  $M_7C_3$  en donde estos precipitan a temperaturas menores a  $650^\circ\text{C}$ .

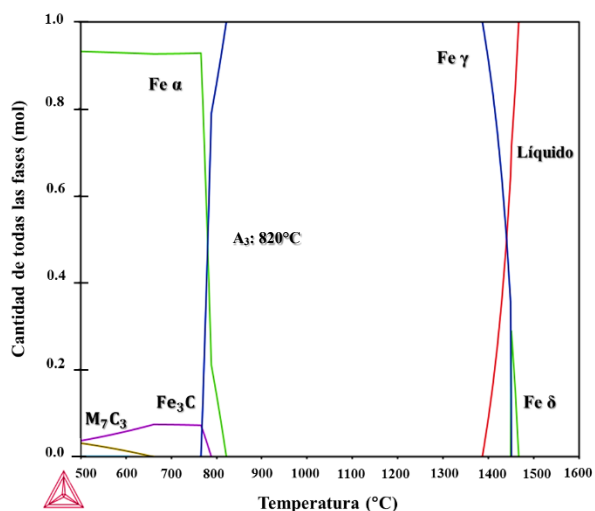


Figura 7: Diagrama calculado por Thermo-Calc cantidad de todas las fases vs temperatura del acero de estudio

El diagrama pseudobinario (Figura 8) es similar al diagrama de cantidad de todas las fases, explica el comportamiento que tendrá el material según el porcentaje de carbono que contenga, en este caso es  $0.41\%C$ . Presentando las fases en equilibrio presentes según decrece la temperatura

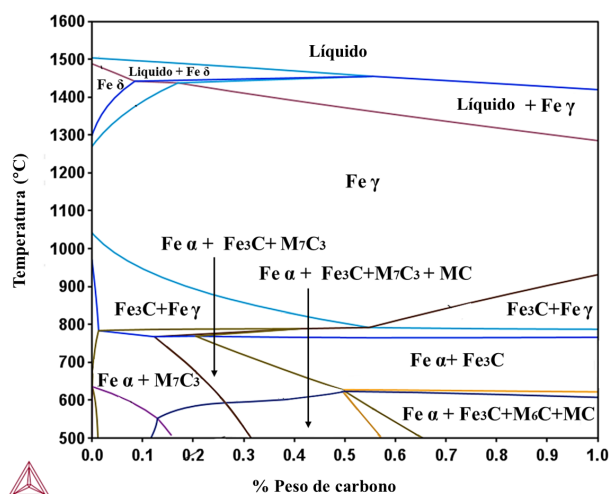


Figura 8: Diagrama Pseudobinario calculado por Thermo-Calc del material

El diagrama Tiempo- Temperatura- Transformación (TTT), corresponde a la Figura 9 se muestra las transformaciones de fases del acero a partir de la austenita, tiempo y temperatura, por lo tanto, se encuentra la presencia de la ferrita, formación de perlita, bainita y la temperatura de transformación de inicio de martensita ( $M_s$ ). El diagrama sugiere que, si se requiere hacer un tratamiento de austemperizado y obtener una microestructura con bainita se debe trabajar en cerca del rango de tiempo de  $10^4$  segundos, obteniendo adicionalmente una cantidad de austenita retenida que brindará la tenacidad que estamos buscando en el material.

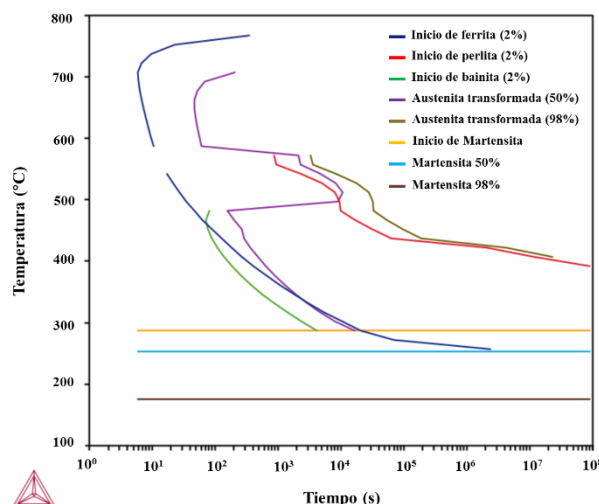


Figura 9: Diagrama Tiempo- Temperatura- Transformación (TTT) calculado por Thermo-Calc

## 5. Conclusiones

1. Las fases presentes en las micrografías y en los patrones de difracción concuerdan con lo calculado por Thermo-Calc
2. El tratamiento térmico de austemperizado dio como resultado un incremento en las propiedades mecánicas del material con una dureza de 61 HR30N y 1513 MPa de resistencia máxima en comparación a su estado inicial de 45 HR30N y 856 MPa.

## Agradecimientos

Los autores agraden el apoyo por parte de los proyectos Conacyt A1-S-9682, SIP-IPN y Beifi-IPN

## Referencias

- Avishan, B., Tavakolian, M., & Yazdani, S. (2017). Two-step austempering of high-performance steel with nanoscale microstructure. *Materials Science and Engineering: A*, 693, 178 – 185.
- Bhadeshia, H. K. D. H., & Edmonds, D. V. (1983). Bainite in silicon steels: new composition- property approach Part 1. *Metal Science*, 411-419.
- Hilditch, T. B., de Souza, T., & Hodgson, P. D. (2015). 2 -Properties and automotive applications of advanced high-strength steels (AHSS). Woodhead Publishing García, F. pp 9-28.
- Maisuradze, M. V., & Ryzhkov, M. A. (2018). Thermal Stabilization of Austenite During Quenching and Partitioning of Austenite for Automotive Steels. *Metallurgist*, pp 337–347.
- Rajan, T. V., Sharma, C. P., & Ashok Sharma. (2012). Heat treatment: principles and techniques, Phi Learning, 104.
- Rowe, J. (2016). *Advanced materials in automotive engineering*. Woodhead Publishing, pp 5-27
- Zhao, J., & Jiang, Z. (2018). Thermomechanical processing of advanced high strength steels. *Progress in Materials Science*, 94, 174–242.