

Influencia de la microestructura inicial en el grado de esferoidización en aceros AISI/SAE1045 y O-1

Pérez Fierro Luis Manuel, Sandoval Pérez Francisco, Altamirano Torres Alejandro*

Universidad Autónoma Metropolitana, Área de Ciencia de Materiales. Av. San Pablo No. 180, Azcapotzalco, Ciudad de México, C.P. 02200. México.

*Autor para correspondencia: aat@azc.uam.mx

Recibido:

29/febrero/2020

Aceptado:

31/octubre/2020

Palabras clave:

Martensita,
épsilon,
esferoidizado

Keywords:

Martensite,
epsilon,
spheroidized

RESUMEN

La presente investigación se enfoca en la influencia de la microestructura inicial de los aceros AISI 1045 y O-1, sometidos a un proceso de esferoidización a 700°C X 1,3,5 y 7 hrs, con la finalidad de analizar el grado de esferoidización con respecto al tamaño de grano, morfología y tiempo. Se encontró que una microestructura con granos finos de perlita llega a favorecer la esferoidización, debido al rápido rompimiento de las laminillas, por otro lado, con una microestructura martensítica, durante la esferoidización, da como resultado la pérdida de la tetragonalidad de ésta fase, ocasionando la formación del carburo de transición épsilon, utilizado como centro de nucleación para la formación de los carburos globulares en los aceros 1045 y O1. A mayores tiempos de tratamiento, menor dureza de los aceros, debido al crecimiento del tamaño de grano de la fase ferrita (α), aunado a un proceso de coalescencia de carburos.

ABSTRACT

The present research focuses on the influence of the initial microstructure in AISI 1045 and O-1 steels, subjected to a spheroidization process at 700°C for 1, 3, 5 and 7 hours, in order to analyze the spheroidization grade regarding the grain size, morphology and time. It was found that a microstructure with fine pearlite grain favors spheroidization because of the fast breaking of the lamellae, on the other hand, with a martensitic microstructure, during the spheroidization, it results on a lossing of the tetragonality of this phase, causing the formation of a epsilon transition carbide used as nucleation centers for the formation globular carbides in the 1045 and O-1 steels. At longer treatment times the lower the hardness of the steels, due to the increase in the grain size of alpha ferrite phase, together with a carbide coalescence process.

Introducción

Los aceros AISI/SAE 1045 y O-1 son aceros simples y aleados que tienen una importancia en diferentes áreas, como lo es: la ingeniería, construcción, uso doméstico, etc. Estos tipos de aceros son de las aleaciones comúnmente utilizadas para uso industrial en términos de calidades térmicas y económicas, y que obtienen este grado de importancia, debido a la facilidad de fabricación y un amplio rango de propiedades mecánicas. Considerando que el gran número de propiedades mecánicas que se pueden modificar a los aceros, son en su gran mayoría el resultado de los tratamientos térmicos a los que pueden sujetarse estos materiales metálicos, es necesario entender la gran importancia que tienen estos en su proceso de conformado. (Avner S. H. 1979; Atanu S., Dipak K.M., Joydeep M 2017)

El tratamiento térmico de esferoidización tiene como objetivo proporcionar una ductilidad y dureza mínima a los aceros, debido a la formación de carburos de cementita (Fe_3C), también definidos como Fe_3C esferoidal, que se encuentran distribuidas en una matriz ferrítica, ofreciendo poca resistencia a la deformación y proporcionando una mejora en las propiedades mecánicas de la aleación. Esta transformación tiene lugar mediante difusión del carbono sin cambiar la composición o las cantidades relativas de fases ferrita y cementita. La fuerza impulsora de esta transformación radica en la disminución del límite de fase α Fe_3C . (O. Altuntas, A. Güral 2017; Kumar. S. A. 2003)

La característica primordial de una microestructura esferoidizada es su estabilidad microestructural, debido a que presenta ferrita libre de formación y Fe_3C en forma esférica; presentando menor área intersticial por volumen de partículas, dando como resultado una buena ductilidad y baja dureza, que son propiedades fundamental para los aceros que serán sometidos a deformaciones severas en frío o acabado superficiales previo al su acabado final. (Askeland. D. R., Wriqth. W. J. 2017; Atanu S., Dipak K.M., Joydeep M 2017)

La estructura de carburos globulares se puede obtener por un calentamiento prolongado, de materiales rolados, enfriados lentamente o normalizados, a una temperatura justo por debajo de la temperatura crítica inferior. Tal operación se conoce como “recocido subcrítico”. Unos de los parámetro de importancia es el tiempo de tratamiento que necesita para que se pueda dar el fenómeno de esferoidización en los aceros, ya que el tiempo estimando están entre las 15 a 60 horas de tratamiento, siendo un objeto de estudio debido a la importancia que es utilizar este tratamiento a nivel industrial para los procesos de conformado en frío. (Mangoonon. P. L 1999)

Existen distintos tipos de tratamientos esferoidizantes, el cual tiene el misma finalidad, la única variable es la temperatura en la cual se lleva el proceso.

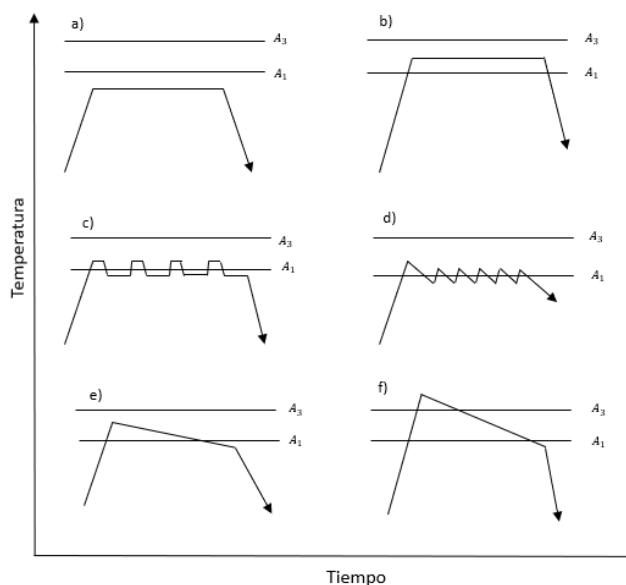


Figura 1. Diagrama esquemáticos de recocido de esferoidización

La esferoidización más simple se logra utilizando un recocido subcrítico prolongado, es decir, una permanencia prolongada de los aceros a una temperatura justo por debajo de A_{c1} , también se encuentra el recocido intercrítico justo por arriba A_{c1} , como se muestra en la figura 1-a y 1-b. Otro método consiste en calentar y enfriar alternativamente entre temperaturas justo por encima de A_{c1} y justo por debajo de A_{c1} . El número de ciclos necesarios para una esferoidización efectiva puede ser de hasta cuatro (ver figura 1-c y 1-d), por otra parte, un método alternativo consiste en enfriar a una velocidad adecuada desde la temperatura mínima a la que se disuelven todos los carburos, de modo que se evita la reforma de una red de carburo; y el recalentamiento posterior se realiza de acuerdo con el primer o segundo método (figura 1-e). Por último, el método de esferoidización utilizado con más frecuencia consiste en austenizar total o parcialmente y luego enfriar muy lentamente en el horno o mantener el trabajo a una temperatura justo por debajo del punto A_{c1} como se muestra en la figura 1-f. (Kumar. S.A. 2003).

La finalidad de esta presente investigación es analizar el grado de esferoidización a distintos tiempo de recocido subcrítico y revenido, debido a la influencia de la microestructura inicial de las fases presentes y del tamaño de grano en los acero al carbono y grado herramienta, obtenidas por diferentes tratamientos térmicos y como ésto llega atribuir en el cambio de las propiedades de los aceros.

Metodología

Para estudiar el grado de esferoidización en los aceros al carbono y grado herramienta primero se sometieron a distintos tratamientos térmicos para poder modificar su microestructura inicial, con el objetivo de obtener una microestructura ferrítico-perlítica para el acero 1045 y perlítica-cementita para el acero O-1, al igual que una microestructura martensítica para ambos aceros. La información de los aceros y especificaciones para el cambio microestructural con respecto a los tratamientos térmicos que serán sometidos se muestran en las siguientes tablas:

Tabla. 1. Composición química (% en peso) de los acero al carbono y grado herramienta de los aceros seleccionados.

AISI/SAE 1045				
C	Si	S	P	Mn
0.45%	0.25%	0.050%	0.040%	0.75%

AISI/SAE O-1				
C	Si	Mn	Cr	W
0.95%	0.30%	1.25%	0.50%	0.50%

Tabla. 2. Condiciones de tratamiento térmico para los aceros seleccionados.

Tratamiento termico	Aceros AISI	
	1045	O-1
Recocido completo	$T_A = 845^\circ\text{C}$ por 2 h, $T_E = 650^\circ\text{C}$ por 30 min. $M_E = \text{al aire}$	$T_A = 815^\circ\text{C}$ por 2 h. $M_E = \text{controlado}$
Normalizado	$T_A = 900^\circ\text{C}$ por 1h. $M_E = \text{al aire}$	$T_A = 870^\circ\text{C}$ por 40 min. $M_E = \text{al aire}$
Temple	$T_A = 845^\circ\text{C}$ por 1h. $M_E = \text{Agua}$	$T_P = 845^\circ\text{C}$ por 25 min, $T_A = 815^\circ\text{C}$ por 30 min. $M_E = \text{Aceite}$

$T_A = T^\circ$ de austenización, $T_E = T^\circ$ poscalentamiento, $T_P = T^\circ$ de precalentamiento, $M_E = \text{medio de enfriamiento}$

Posteriormente, fueron sometidos al tratamiento térmico de esferoidización a distintos tiempos, como se muestra en la tabla 3. Cabe mencionar que las probetas que fueron sometidas a un tratamiento de recocido completo y un normalizado, el tratamiento térmico de esferoidización correspondiente es un recocido sub crítico, y las probetas sometidas a un temple, el tratamiento de esferoidización es un revenido.

Tabla. 3. Condiciones del tratamiento térmico de esferoidización para los aceros seleccionados, que anteriormente, fueron sometidos a distintos tratamientos térmicos.

Tratamiento termico	Aceros AISI	
	1045	O-1
Recocido completo y normalizado	$C = 700^\circ\text{C}$ por 1, 3, 5 y 7 h. $M_E = \text{controlado}$	
Temple	$C = 650^\circ\text{C}$ por 1, 3, 5 y 7 h. $M_E = \text{al aire}$	$C = 700^\circ\text{C}$ por 1, 3, 5 y 7 hrs. $M_E = \text{Aceite}$

$C = \text{Calentar}$, $M_E = \text{medio de enfriamiento}$

Se realizó su respectiva preparación metalografica para poder así llevar acabo el análisis microestructural, posteriormente se determinó el número de tamaño de grano basándose en la norma ASTM-E112 las muestras sometidas a tratamiento térmico específicamente para su modificación microestructural, previo al tratamiento de esferoidización. Por igual se les realizaron los ensayos de durezas correspondientes en las escalas Rockwell B y C, baja la norma ASTM E18-19 a cada una de las muestras, para poder analizar el cambio de la dureza con base al tiempo de tratamiento de esferoidización.

Una de las partes fundamentales de esta investigación es el análisis del grado de esferoidización para cada muestra sometida a su respectivo tratamiento, con base a esto se realizó la cuantificación de las fases presentes con respecto al grado de esferoidización para las muestras sometidas a distintos tiempos de tratamiento, utilizando el Software Image Pro Plus, versión 4.1, a las microestructuras a 500X.

Resultados y discusión

Los resultados obtenidos proporcionan información sobre la influencia microestructural en el grado de esferoidización en los aceros AISI 1045 y O-1, con base al tiempo de tratamiento de globulizado. Las propiedades primordiales de los aceros dependen de su composición y el porcentaje de impurezas presente en la aleación. En la tabla 1 muestra la composición química de los aceros

utilizados en esta investigación, el cual, nos servirá como referencia para poder discutir los fenómenos presentes en el proceso de esferoidización de cada acero.

Se muestra en la figura 2 la microestructura inicial (muestras testigos) de los aceros AISI/SAE 1045 y O-1 antes de ser sometidas a los distintos procesos. El acero 1045 muestra una microestructura ferrítico-perlítica, donde la ferrita está precipitada en los límites del constituyente perlítico, obteniendo un número de tamaño de grano de 7 (ver tabla 4) y una dureza inicial de 19.9 HRC, y en el caso del acero O-1 se tiene una microestructura esferoidizada donde se observa la presencia de carburos aleados distribuidos uniformemente en una matriz ferrítica, presentando una dureza promedio de 87 HRB.

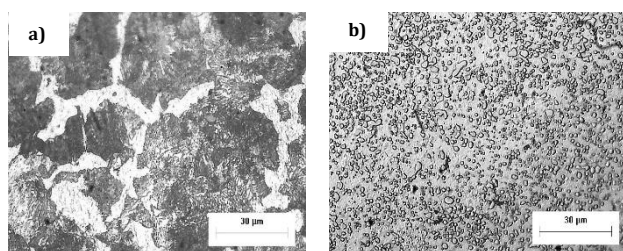


Figura 2. Microestructura inicial de los aceros AISI/SAE 1045 (a) y O-1(b). Atacada con Nital al 2%, a 20 X.

En las figuras 3 y 4 se muestran las microestructuras de los aceros 1045 y O-1 que fueron sometidas a distintos tratamientos térmicos para cambio microestructural inicial, antes de ser sometidos al proceso de esferoidización.

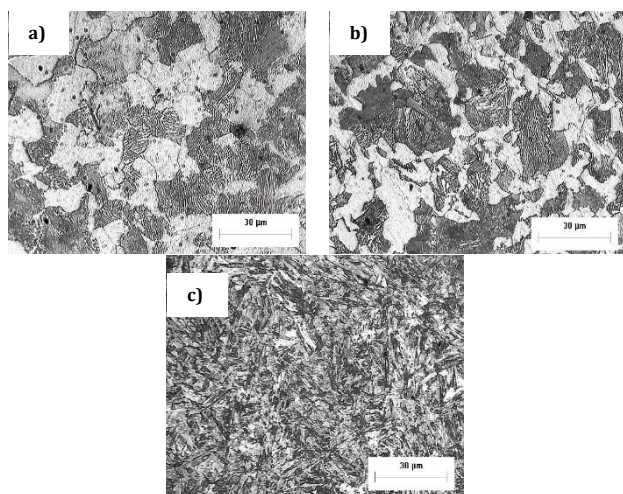


Figura 3. Microestructuras del acero AISI/SAE 1045 obtenidas de distintos tratamientos térmicos. a) Recocido completo con dureza de 89 HRB y número de tamaño de grano 7, b) Normalizado con dureza 94 HRB y tamaño #8 c) Temple con dureza 61 HRC. Atacada con Nital al 2%, tomadas en microscopio óptico.

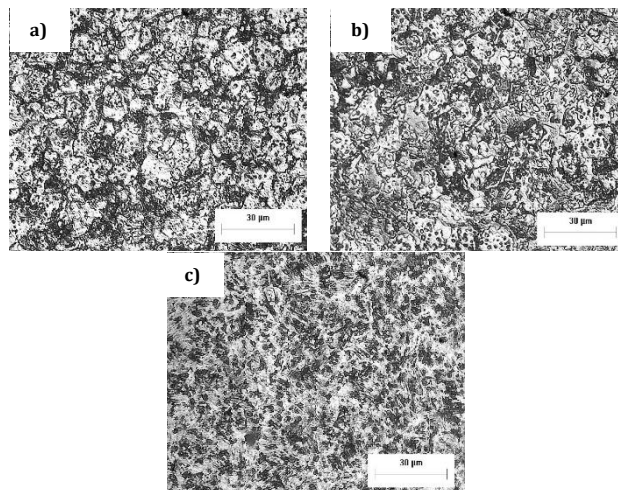


Figura 4. Microestructuras del acero AISI/SAE O-1 obtenidas de distintos tratamientos térmicos. a) Recocido completo con dureza de 92 HRB y tamaño #7, b) Normalizado con dureza 38 HRC y tamaño #8 c) Temple con dureza 66 HRC. Atacada con Nital al 2%, tomadas en microscopio óptico

En la Figura 4 y 5 se muestran las microestructuras esferoidizadas del acero AISI/SAE 1045 y O-1, especificando los tiempos 1 y 7 horas, los tiempos más representativos donde se nota el efecto del proceso.

Es importante hacer notar que una microestructura inicial con laminillas finas y agudas en la perlítica, obtenidas por un proceso de normalizado, favorece el grado de esferoidización con respecto al tiempo de tratamiento, como se muestra en la figura 4-c y 4-d; debido al corto distanciamiento que hay entre la ferrita (α) y la cementita (Fe_3C) en el constituyente perlítico, al igual que su grosor, por lo tanto, cuando el tiempo de tratamiento de esferoidización va en incremento, la Fe_3C presente en la perlita llega a perder su morfología laminar, disolviéndose rápidamente y, por tanto, son susceptibles de formar carburos de Fe_3C globulares en una matriz ferrítica. Es evidente que hay un incremento en el grado de esferoidización en las microestructuras con laminillas finas de perlitas en comparación con laminillas gruesas (figura 4-a y 4-b).

Entre mayor sea el tamaño de grano (ver tabla 4), el distanciamiento y grosor que hay entre las laminillas de α y Fe_3C en el constituyente perlítico, mayor será la energía requerida para llegar a romper estas laminillas y más largo será el tiempo de tratamiento. La dureza que presentan las muestras al aumentar el tiempo de esferoidización se muestra en la Figura 6-a. Es de observar que el decremento de la dureza es debido al incremento del tamaño de grano de la ferrita y la esferoidización de la Fe_3C en la matriz.

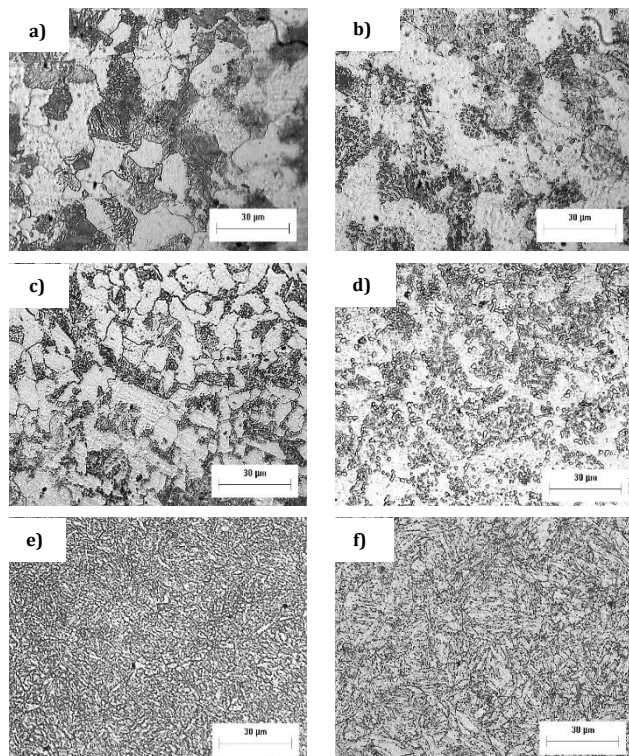


Figura 4. Micrográficas esferoidizadas a 700°C de un acero AISI/SAE 1045 por 1 y 7 h. a y b) Muestras recocidas, c y d) Muestras normalizadas; sometidas a un recocido subcrítico, y f y g) Muestra revenidas a 650°C. Atacada con Nital al 2%, tomadas en microscopio óptico.

Tomando como microestructura inicial la martensita en el acero 1045 (figura 4-f y 4-g) y sometida a un tratamiento de revenido a distintos tiempos; existe un proceso de difusión del elemento carbono, debido a que empieza a ver una pérdida de la tetragonalidad de la martensita. Durante el revenido empieza un proceso de segregación del carburo de transición épsilon ($\text{Fe}_{2.4}\text{C}$), siendo característico por ser más rico en carbono que la Fe_3C . Este tipo de carburo ($\text{Fe}_{2.4}\text{C}$), sirve como centro de nucleación para la formación de la Fe_3C globular en el acero 1045 a medida que el tiempo de tratamiento va aumentando, aunado a un decremento en su dureza debido a la precipitación del $\text{Fe}_{2.4}\text{C}$ y la difusión del carbono, como se muestra en la figura 6-b.

Debido a la composición que presenta el acero 0-1, basándose en su contenido de carbono y otros aleantes (Ver tabla 1), llega a favorecer el proceso de esferoidización, ya que los elementos como el cromo (Cr) y tungsteno (W) son considerados elementos alfacénicos llegando a favorecer la formación de carburos en forma esferoidal en el tratamiento de esferoidización, en comparación con un acero al carbono como lo es el 1045, que no llega a presentar estos tipos de elementos aleantes.

La cinética de crecimiento de los carburos, ya sea carburos de Fe_3C o aleados se debe a la unión de las esferoiditas de menor tamaño (partículas finas de carburos), dando un proceso de coalescencia, ya que la energía requerida es menor a comparación de hacer crecer un glóbulo por sí solo, con base al tiempo de tratamiento, como se muestran en la figura 5-e y 5-f.

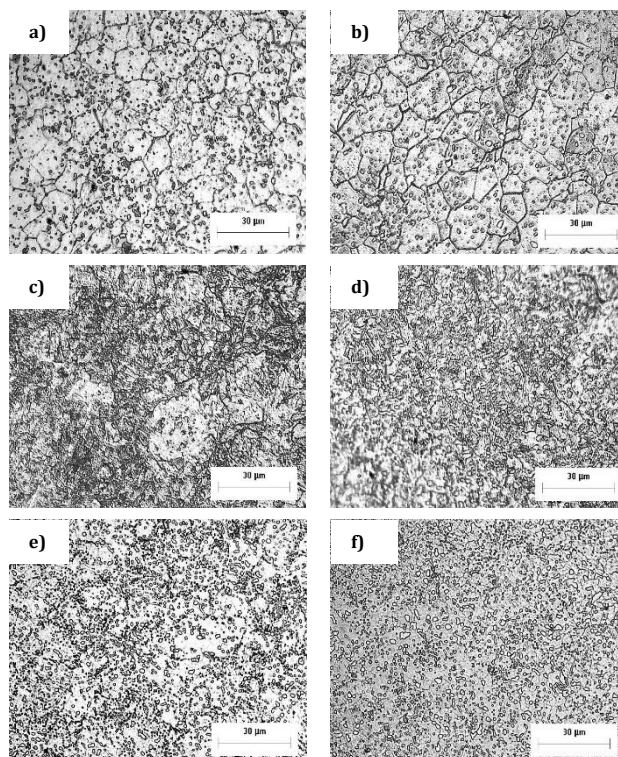


Figura 5. Micrográficas esferoidizadas a 700°C de un acero AISI/SAE 0-1 por 1 y 7 h. a y b) Muestras recocidas, c y d) Muestras normalizadas; sometidas a un recocido subcrítico, f y g) Muestra revenidas. Atacada con Nital al 2%, tomadas en microscopio óptico.

En este caso la segregación del carburo $\text{Fe}_{2.4}\text{C}$, dado por el revenido, llega a servir como centro de nucleación para la formación de carburos de cromo en vez de Fe_3C globular. Con base al bajo contenido de cromo en la aleación, los carburos que llegan a precipitar son tipo M_7C_3 , más específicamente Cr_7C_3 , como se puede observar en la 5-e y 5-f.

Con el incremento del tiempo de esferoidización a las temperaturas empleadas en cada muestra tratada, es notorio el cambio microestructural que se presenta para cada uno de los casos, pero también es el cambio de sus propiedades. En la figuras 6 y 7 se muestran los gráficos de durezas obtenidas para las muestras esferoidizadas a los distintos tiempos de tratamiento de los aceros AISI/SAE 1045 y 0-1.

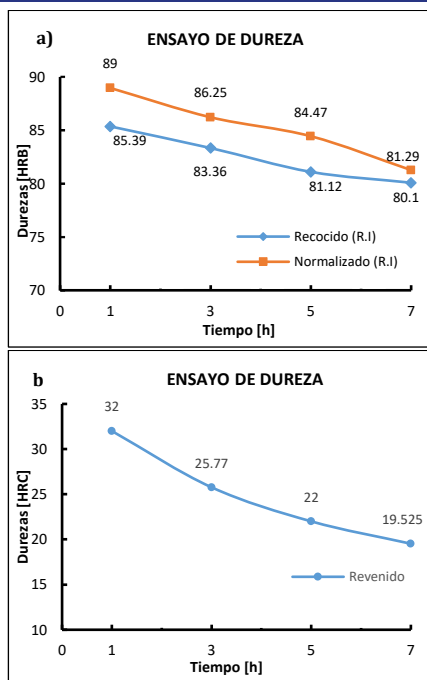


Figura 6. Efecto del tiempo de tratamiento de esferoidización en la dureza para el acero AISI/SAE 1045. a) Muestras recocidas y normalizadas sometidas a un recocido isotérmico de esferoidización (R.I), b) Muestras Templadas sometidas a un revenido.

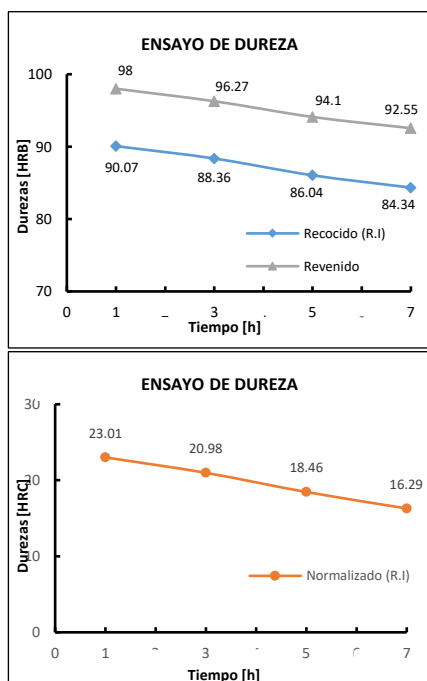


Figura 7. Efecto del tiempo de tratamiento de esferoidización en la dureza para el acero AISI/SAE O-1. a) Muestras recocidas y templadas, posteriormente sometidas a un proceso de recocido isotérmico de esferoidización (R.I) y revenido, b) Muestras normalizadas y sometidas a un recocido isotérmico de esferoidización (R.I).

Tabla 4. Número de tamaño de grano del acero AISI/SAE 1045 y O-1 utilizando el método de comparación bajo la norma A.S.T.M-E112.

Acero	Probeta testigo	No. De tamaño de grano	Granos/mm ²
1045	Testigo	7	992
	Recocida	6	496
	Normalizada	8	1984
O-1	Recoocida	7	992
	Normalizada	8	1984

Cabe destacar que en el tiempo de tratamiento de esferoidización de 7 horas, para las muestras normalizadas y revenidas, donde los glóbulos presentes son de mayor tamaño, provocando que el grado de esferoidización aumente debido al crecimiento y distribución de los mismos en una matriz ferrítica a medida que el tiempo va aumentando, esto puede corroborarse en la siguiente tabla, donde se presenta la cuantificación de fases en las probetas que presentaron un proceso de esferoidización.

Tabla 5. Cuantificación de fases con respecto al tiempo de tratamiento de esferoidización para los aceros seleccionados.

Tiempo de esferoidización [h]	Aceros AISI	
	1045 Normalizado (R.I)	O-1 Revenido
1	31.68506%	30.52837%
3	39.61076%	36.43659%
5	33.35342%	32.92664%
7	29.92427%	30.73806%

Conclusiones

El grado de esferoidización es mayor con microestructura inicial martensítica en comparación de una perlítica, ya que hay una mayor difusión del elemento carbono en el tratamiento de esferoidización, dando a la segregación del carburo de transición épsilon ($\text{Fe}_{2.4}\text{C}$) a la temperatura de revenido, sirviendo como centros de nucleación para los tipos de carburos esferoidales para cada acero. La disolución y descomposición de las laminillas de Fe_3C en una microestructura perlítica fina, se da a menor tiempo en comparación con una microestructura perlítica gruesa, atribuido al distanciamiento y el grosor que presenta entre las fases, provocando que la tasa de



esferoidización sea mayor con base a esta microestructura.

La disminución de la dureza con respecto al tiempo de tratamiento de esferrización es muy notoria, esto se llega atribuir al aumento del tamaño de grano de la ferrita, aunado a un proceso de coalescencia de carburos, provocando que el tamaño de los carburos vaya en incremento, formando carburos de mayor tamaño aumentando el grado de esferrización en el proceso, teniendo así una microestructura más dúctil y tenaz.

El aumento y tipo de carburos que se presenta en los aceros está relacionado con la cantidad y calidad de los elementos formadores de carburos presentes en la aleación, ya que, con base a esto, será el tamaño, cantidad, tipo y distribución de estos mismos, obteniendo así un cambio en las propiedades mecánicas del material.

Es de suma importancia seguir con las investigaciones basadas en la disminución del tiempo de tratamiento de esferrización, ya que es uno de los tratamientos más utilizados industrialmente para el conformado de materiales tendiendo así una excelente base para una área de estudio más extensa.

Agradecimientos

Agradecimiento a mis asesores de proyecto de investigación, ya que por su conocimiento, sabiduría y experiencia en el tema sirviéndome para mi formación profesional y a la Universidad Autónoma Metropolitana.

Referencias

Askeland D.R., Wrigth W.J. (2017) Science and engineering of materials. 7th Ed. Cengage Learning, p.462-488

Atanu S., Dipak K.M., Joydeep M (2017). Effect of cyclic heat treatment on microstructure and mechanical properties of 0.6 wt% carbon Steel. *Elsevier volumen 527*. Pag 4001-4007.

Avner S. H. (1979). Introduction to physical metallurgy. 2nd Ed. McGRAW-HIL, p. 225-422.

Erderal Karadeniz (2007). Influence of different initial microstructure on the process of spheroidization in cold forging. Elsevier. Materials & Design, p. 251-256.

H.L. Yi,Z.Y. Hou, Y.B. Xu, D. Wu and G.D. Wang. (2012). Acceleration of spheroidization in eutectoid steels by the addition of aluminum. Elsevier Volmen 67, p. 645.648.

Hoon Hwang and Bruno C. De Cooman. (2015) Influence of the Initial Microstructure on the Spheroidization of Sae 52100 Bearing Steel. Steel Research. Steel Research, p. 112-125.

Karadeniz E, O' zgin MC, Findik F, Og' ur A. (1995) Investigation of the spheroidization of hypoeutectoid steels with different method. In: 6th Denizli materials symposium, proceedings, Denizli, Turkey, p. 170-225.

Kumar S.A. (2003). Physical metallurgy handbook. 1st Ed. Kenneth P. McCombs, p. 460-1559.

Mangoonon. P. L (1999). Science of materials selection and design. 2nd Ed Copyright, p. 270-377

O. Altuntas, A. G'ural. (2017). Effect of spheroidizing heat treatment on the microstructure, hardness and toughness of high carbon powder metallurgy steel. Kovove Mater, p. 303-310.

N.V Luzginova, L. Zhao y J. Sietsma. (2008) The Cementite Spheroidization Process in High-Carbon Steels with Different Chromium Contents. Metallurgical and materials transactions. Volume 39. March, p. 513-521

Xia ngdong Huo, Lin Guo, Kuangnian He and Rui Huang Tech (2012). Effect of spheroidizing annealing time on microstructure and hardness of GCr15 bearing Steel. *Advanced Materials Research*, p.928-931

Young-WonLee, Young-I., Seok-J. (2013). Microstructure and mechanical properties of spheroidized D6AC steel. *Elsevier. Vol 585* November 2013. Pag 94-99.

Z.Q. Lv, B.Wang, Z.H.Wang, S.H.Sun, W.T.Fu. (2013) Effect of cyclic heat treatments on spheroidizing behavior of cementite in high