

Influencia de un tratamiento criogénico en las propiedades mecánicas de un acero para herramientas AISI T-2000

Joan Morales^a, Luís F. Sidorovas^{*b}

^aEscuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela

^bCentro de Investigaciones en Mecánica CIMEC, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela

Resumen.-

En esta investigación se evaluó el efecto del tratamiento criogénico sobre las propiedades mecánicas y microestructurales de acero para herramientas AISI T 2000. Los ensayos (Tracción, Impacto, Dureza, Microscopia) y Tenacidad se llevaron a cabo a las probetas Con y Sin Tratamiento Térmico Criogénico, este tratamiento se realizó sumergiendo las probetas en nitrógeno líquido a -194°C durante 24 horas, para compararlas con las que no fueron tratadas criogénicamente. Las características de la fractura de las muestras fueron evaluadas por Microscopia Electrónica de Barrido (MEB), siendo el mecanismo de fractura predominante el clivaje. Se evidenció que las propiedades mecánicas mejoraron notablemente en las probetas con tratamiento criogénico con relación a las probetas no tratadas. La microestructura antes y después del tratamiento permitió observar la transformación de la austenita retenida en martensita, lo cual es un factor clave para mejorar las propiedades mecánicas y microestructurales del acero.

Palabras clave: Tratamiento criogénico, Acero para herramienta, Austenita retenida, Tenacidad de impacto.

A cryogenic treatment influence on steel tool AISI T-2000 mechanical properties

Abstract.-

This paper evaluated the effect of cryogenic treatment on the mechanical properties and microstructure of AISI tool steel T 2000. The tests (Tensile, Impact, Hardness, Microscopy) and toughness were carried out to the specimens with and without Cryogenic Heat Treatment, this treatment is carried out by immersing the samples in liquid nitrogen at -194°C for 24 hours, for comparison with the cryogenically not treated. The fracture characteristics of the samples were evaluated by Scanning Electron Microscopy (SEM), with the predominant mechanism of cleavage fracture. Evidenced that the mechanical properties improved significantly in the samples with cryogenic treatment relative to untreated samples. The microstructure before and after treatment possible to observe the transformation of retained austenite to marten site, which is a key to improve the mechanical properties and microstructure of the steel.

Keywords: Cryogenic treatment, Tool steel, Retained austenite, Impact toughness.

Recibido: Junio 2014

Aceptado: Julio 2014.

1. Introducción

La constante búsqueda por el mejoramiento en los aceros para optimizar sus condiciones de trabajo ha sido relevante en las últimas décadas, creando sistemas más precisos para la mezcla de los microconstituyentes en las coladas, controles de temperaturas y hasta el desarrollo de nuevas

* Autor para correspondencia

Correo-e: lsidorovas@uc.edu.ve (Luís F. Sidorovas)

aleaciones que permiten ir cumpliendo con las distintas necesidades que se presentan en la industria

Por otro lado, para mejorar los beneficios de los aceros se le aplican tratamientos térmicos. Estos buscan un objetivo en común, producir cambios en las propiedades mecánicas del material hasta llevarlo a las condiciones ideales de trabajo según sea el uso al que va a ser sometido. Los aceros para herramientas, además de utilizarse para la fabricación de elementos de máquinas, se emplean para la fabricación de útiles destinados a modificar la forma, tamaño y dimensiones de los materiales por arranque de viruta. El acero para herramienta AISI T.2000 [1], es muy utilizado como herramienta de corte y se le aplica tratamiento de temple y revenido para hacerlo más duros. Pero el problema con el tratamiento térmico convencional de estos aceros es el contenido de austenita retenida, que es blanda e inestable a baja temperatura y se transforma en martensita frágil durante el servicio [2]. Se ha establecido el uso del tratamiento térmico criogénico como medio de obtener estructuras más coherentes y uniformes. Mejorando las propiedades mecánicas y microestructurales, debido a la necesidad de obtener componentes y piezas de acero con altos valores de dureza, como consecuencia de sumergir el material a una temperatura tan baja, donde se transforma el porcentaje de austenita retenida en martensita.

El tratamiento criogénico consiste en enfriar por inmersión en nitrógeno líquido los materiales una temperatura de -196°C dentro de la cámara criogénica tipo tanque, mantener esta temperatura por un intervalo de 24 horas y por último dejar regresar el material a temperatura ambiente por convección natural [1].

Se aplicó el tratamiento térmico criogénico a la herramienta de corte en la condición de temple y revenido original, para evaluar los cambios en las propiedades mecánicas como: dureza, resistencia a la tracción y ductilidad en relación con las herramientas de corte sin tratamiento térmico criogénico.

2. Tenacidad de fractura

Ciertas relaciones empíricas entre los valores de KIC y CVN han sido propuestas en base a los resultados de diferentes investigaciones. Barsom y Rolfe [3] observaron que el efecto de la temperatura y la velocidad de carga en los valores de CVN y KIC son las mismas, las cuales sugieren la posibilidad de establecer ciertas relaciones empíricas entre los resultados de estos dos ensayos. La relación propuesta por Barsom y Rolfe [3] es la Ecuación (1)

$$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_y}\right)^2 = \left(\frac{5}{\sigma_y}\right)\left(CVN - \left(\frac{20}{\sigma_y}\right)\right), \quad (1)$$

dónde

K_{IC} es el factor de intensidad de esfuerzo crítico bajo condiciones de estado plano de deformación en $Ksi \cdot pu \cdot lg^{\frac{1}{2}}$,

σ_y el esfuerzo de fluencia en unidades de Ksi,

CVN lanergía absorbida por impacto en unidades de pie.lb.

Para la determinación del tamaño crítico de grieta se utiliza la Ecuación 2 donde se relaciona el factor de intensidad de esfuerzo (K_{IC}) con el tamaño crítico de grieta a .

$$K_{IC} = \sigma_y Y \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

dónde: Y es un parámetro que involucra la geometría de la grieta y del componente,

σ_y la función que representa la magnitud del esfuerzo en el componente,

a es el tamaño crítico de grieta.

3. Metodología

3.1. Material Acero T 2000.

Fue suministrado por la empresa "Di Lorenzo, C.A." en total cuatro (4) barras de $10 \times 10 \times 200 \text{ mm}^3$ y tres (3) barras de $10 \times 2 \times 200 \text{ mm}^3$. Cuya composición química se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Composición Química del acero para herramientas AISI T.2000 (% Peso).

C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W	Co
1,28	0,45	0,40	4,15	3,55	3,25	9,50	10,0

3.2. Equipos, materiales y herramientas

Equipos

Las propiedades mecánicas del material fueron determinadas con una máquina de ensayo de tracción de marca SERVOSIS, Modelo ME 405/30 posee una capacidad de 30 toneladas.

La dureza fue determinada mediante el uso de un durómetro marca Macromet para dureza Rockwell, Se le aplica una precarga de 150 Kgf, durante 15 segundos, utilizando un indentador con punta de diamante.

Máquina de Tracción

El ensayo de tracción se llevó a cabo en la máquina de ensayo de tracción de marca SERVOSIS, Modelo ME 405/30 posee una capacidad de 30 toneladas.

Ensayo de Impacto

La prueba de impacto se realizó en una maquina marca FRANK, con un intervalo de 0 hasta 30 Kp.m.

Tratamiento Térmico Criogénico

Este tratamiento térmico criogénico se efectuó dentro de una cámara criogénica tipo tanque de nitrógeno líquido. Sumergiendo las muestras en nitrógeno líquido a una temperatura aproximada de -196°C (temperatura de ebullición del nitrógeno) durante un periodo de tiempo de 24 horas

Diseño Experimental

Después de la adquisición del material, se fabricaron las probetas mediante corte por chorro de agua para los diferentes ensayos.

Para el ensayo de tracción se fabricaron cuatro probetas planas, mecanizadas por chorro de agua, tipo subsized según la norma ASTM A-370 por condición.

En el ensayo de dureza se realizaron seis indentaciones por condición.

Para el ensayo de Impacto se fabricaron dieciséis (16) probetas tipo Charpy ($55 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$) con entalla en V (ángulo 45° y 2 mm de profundidad), según las normas ASTM E-23 [4].

Luego del mecanizado de las probetas de tracción e impacto, fueron sometidas a un tratamiento criogénico para su estudio y posterior evaluación en relación su influencia sobre las propiedades mecánicas.

Microscopia óptica

Se prepararon metalográficamente las muestras de las barras de acero AISI T.2000 en su condición original, para revelar la microestructura (Figura 1)

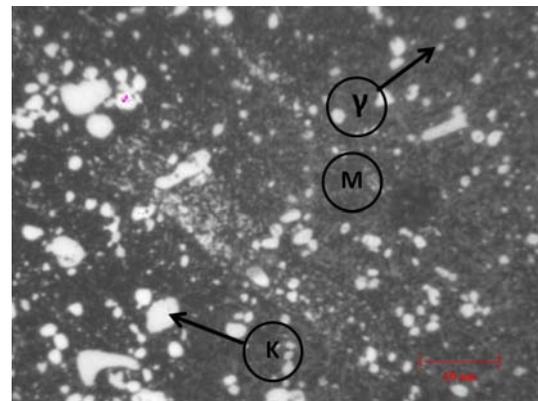


Figura 1: Microestructura presente en el acero AISI T42 atacada con Nital al 5% por 10 segundos con un aumento de 1000X.

Una vez determinadas cada una de las fases y constituyentes que el acero de herramientas contiene.

Se elaboró una rejilla de 100 puntos o intersecciones (Figura 2) y se colocó sobre la micrografía para el cálculo aproximado de la cantidad de: Martensita (M), Austenita (γ) y Carburo de Tungsteno (K) en el material [5].

Microscopia Electrónica de Barrido MEB.

Se observó la superficie de fractura por MEB con aumentos de 350X y 1500X para las muestras

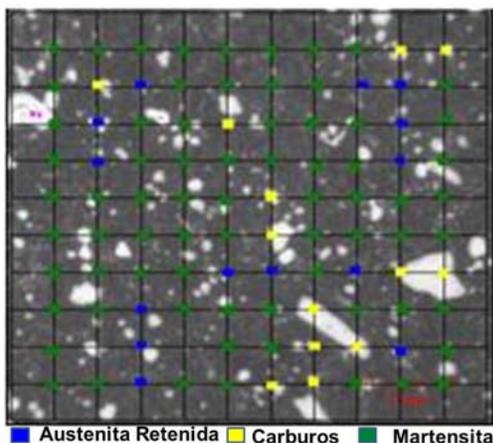


Figura 2: Plantilla de 100 puntos sobre fotomicrografía del acero T 2000. (1000X)

de impacto en la Figura 3; y de 200X para las muestras de tracción ilustradas en la Figura 4.

El análisis químico se efectuó por microscopia en un analizador EDS de rayos X del MEB a la microestructura para determinar y comparar los porcentajes de los principales elementos aleantes, como lo son el Cobalto (Co) y Tungsteno (W), este estudio se realizó para cada una de las condiciones.

Los resultados de los diferentes ensayos se presentan en las Figuras 5 y Figura 6.

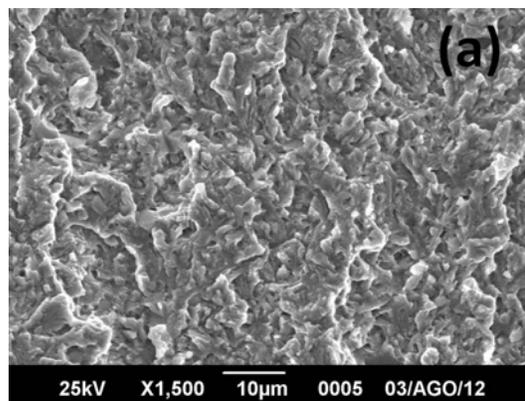
4. Resultados

Las propiedades mecánicas determinadas de los ensayos de tracción se encuentran tabuladas en la Tabla 2.

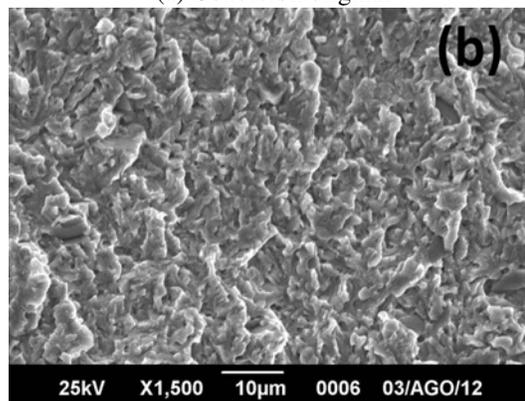
Tabla 2: Propiedades mecánicas promedio del acero para herramientas T.2000 para cada una de las condiciones.

Condición	Esfuerzo de Fluencia σ_{ys}	Esfuerzo Máximo $\sigma_{m\acute{a}x}$	Deformación Ingenieril
Original	514,55	763,95	1,03 %
Tratamiento Criogénico	460,58	820,097	0,62 %
	(MPa)	(MPa)	(%)

Para el ensayo de dureza se aprecian los valores obtenidos de los ensayos en la en función de



(a) Condición original



(b) Con tratamiento criogénico.

Figura 3: M.E.B. de la superficie de fractura de las probetas de Charpy.

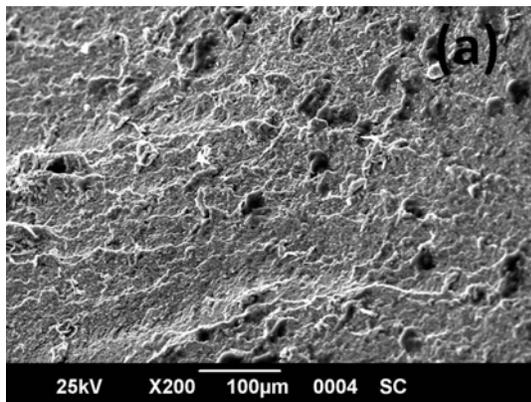
los tratamientos aplicados al material, acero AISI T.2000 (Tabla 3).

4.1. Ensayo de impacto

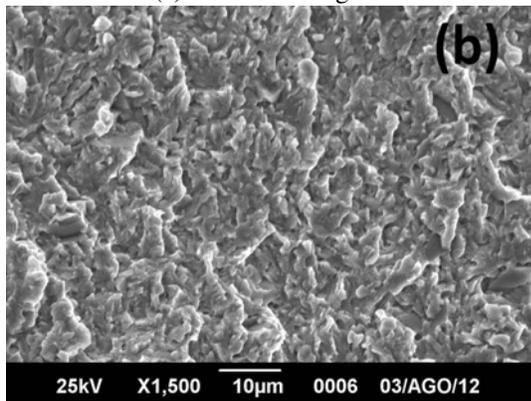
En la Tabla 4. Se observa que tanto los valores de la energía absorbida (CVN) y los valores del factor de intensidad de esfuerzo (K_{IC}) muestran una notable disminución de 10,92 por ciento respecto a la condición original, registrándose el valor máximo del factor de intensidad de esfuerzo para la condición original siendo este de $31,27 Ksi \cdot pulg^{\frac{1}{2}}$ y de manera para la energía absorbida por impacto de 3,92 J.

4.2. Tamaño de grieta

En la Tabla 5 Se observa que hay una disminución de 40,15 % en el tamaño crítico de grieta respecto a la condición original, variación



(a) Condición original



(b) Con tratamiento criogénico.

Figura 4: M.E.B. de la zona de fractura de las probetas de Tracción.

que se presenta por la disminución del factor de intensidad de esfuerzo (KIC) y la disminución del esfuerzo de fluencia al aplicar el tratamiento a temperatura criogénica.

La cual permitió revelar a nivel microscópico la microestructura de los granos de austenita y la dispersión de partículas esféricas de carburos de tungsteno en una matriz martensítica como se muestra en la Figura 1.

Se obtuvo el porcentaje promedio de cada fase presente en el acero para herramientas al realizar un mapeo por las muestras preparadas metalográficamente como lo indica la norma ASTM E-562 [5], presentado en la Tabla 6, una vez determinado cada una de las fases y constituyentes que el acero de herramientas contiene, se observa que hay austenita retenida en un significativo porcentaje de 14 por ciento, como

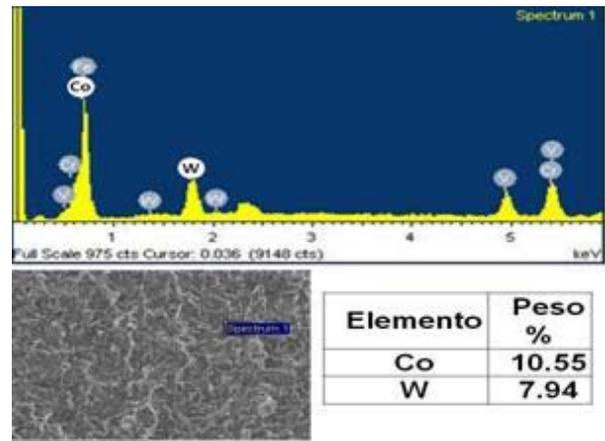


Figura 5: Análisis químico condición original.

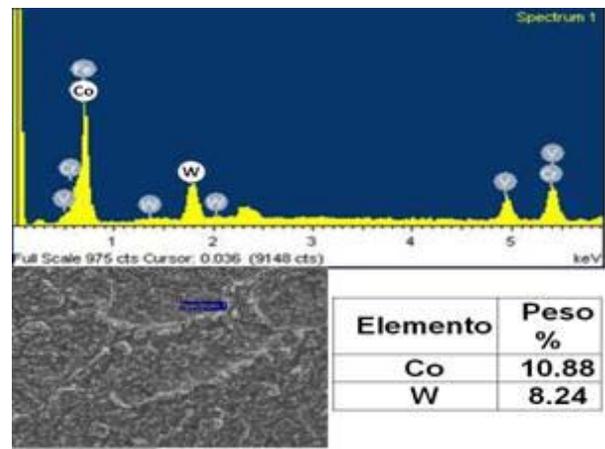


Figura 6: Análisis químico condición tratamiento criogénico.

se muestra en la Figura 2.

En la Figura 7 se observó la microestructura del acero para herramientas T 2000 para las condiciones de estudios.

4.3. Superficie de fractura

En la Figura 3 se observó la superficie de fractura por MEB con aumentos de 350X y 1500X para las muestras de impacto; y de 200X para las muestras de tracción ilustradas en la Figura 4. Se aprecia la separación de planos cristalográficos bien definidos en la superficie, lo que implica que el mecanismo de fractura presente es por clivaje y transgranular, confirmando así la presencia de una

Tabla 3: Valores de dureza Rockwell C (HRC) para cada condición de estudio. Carga = 150 Kg, Identaciones = 5, Identador = punta de diamante.

Indentación	Condición Original	Tratamiento Criogénico
1	67,60	68,60
2	68,10	69,00
3	68,10	69,90
4	67,70	70,00
5	68,00	69,10
6	67,90	60,30
Promedio	67,90	69,32

Tabla 4: Valores de Ensayo de Impacto.

N° de Probeta	Condición Original	Tratamiento Criogénico
1	0,40	0,20
2	0,50	0,30
3	0,50	0,30
4	0,20	0,20
5	0,40	0,20
Promedio (Kpm)	0,40	0,24
Promedio (J)	3,92	2,35
KIC ($Ksi \cdot pulg^{\frac{3}{2}}$)	31,27	21,86

fractura frágil. La alta reflectividad óptica de estas facetas es la que caracteriza macroscópicamente una fractura frágil.

El análisis químico se efectuó por microscopia de rayos X (EDX) a la microestructura para determinar y comparar los porcentajes de los principales elementos aleantes, como lo son el Cobalto (Co) y Tungsteno (W), este estudio se realizó para cada una de las condiciones.

En las Figura 5 y 6 se observa que en las superficies estudiadas no se evidenciaron pérdidas significativas en los porcentajes en peso tanto para el Cobalto (Co) como para el Tungsteno (W), presentándose un incremento de 3.12 por ciento para el Cobalto y de 3.64 por ciento para el Tungsteno, después de aplicar el tratamiento criogénico.

5. Discusión

Al relacionar el esfuerzo de fluencia con el tratamiento criogénico aplicado, se percibe que

Tabla 5: Valores del tamaño crítico de grieta.

Condición	$a_{critico}$ mm
Original	1,27
Tratamiento Criogénico	0,76

Tabla 6: Fracción volumétrica presente de las fases en el acero T 2000 tratada a temperatura criogénica (% fracción de volumen).

Fracción	Constituyente		
	Martensita	Carburo de Tungsteno	Austenita Retenida
Original	73	13	14
Tratamiento Criogénico	90	6	4

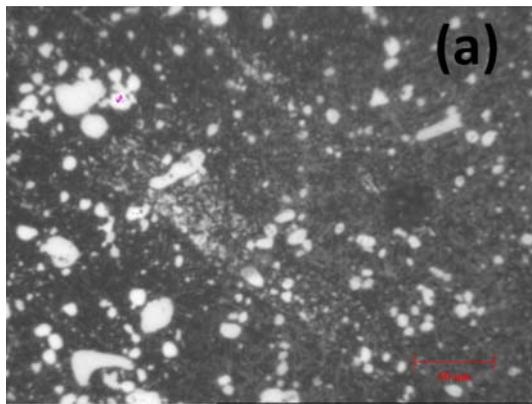
el esfuerzo de fluencia es de 460,58 MPa, este disminuye en 11,69 por ciento respecto a la condición original.

Un comportamiento similar ocurre cuando se analiza la relación esfuerzo máximo en función del tratamiento aplicado, donde al igual se presenta una variación del esfuerzo máximo entre las condiciones de estudio pero con un incremento del 7, 30 por ciento con respecto a la condición original.

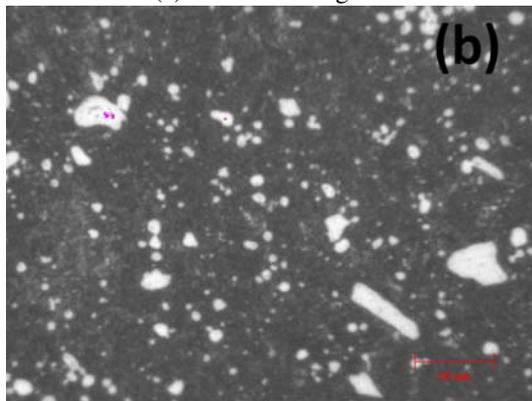
En el caso de la deformación ingenieril se observa como disminuye de un valor de 1,03 por ciento en la condición original a 0,62 por ciento con el tratamiento a temperatura criogénica, lo que se traduce en un endurecimiento del material que disminuye la capacidad de deformación plástica por efecto del tratamiento, disminuyendo así las posibilidades de deformación plástica

Se puede observar que el comportamiento del material sigue siendo de forma frágil, es decir, la condición de tratamiento criogénico presenta un incremento de 2,04 por ciento respecto a la condición original. El 1,42 HRC de dureza aumentada se atribuye a una mayor cantidad de austenita retenida transformada en martensita. Algunos investigadores afirman que la transformación de la austenita retenida en martensita, lleva asociado un ligero aumento de la dureza [3, 6].

Muchos investigadores creen que dependiendo del material, la transformación completa se consiga a la temperatura más baja [7].



(a) Condición original



(b) Con tratamiento criogénico.

Figura 7: Microscopía óptica del Acero T 2000 (1000X).

Además del efecto de la transformación de la austenita retenida en martensita, con el consiguiente aumento en la dureza, el tratamiento criogénico profundo, tiene un efecto en la martensita en el recalentamiento, con cambios cristalo-gráficos y microestructural que resultan en la precipitación de una distribución más fina de carburos en la microestructura templada, con aumentos posteriores en tanto la dureza y la resistencia al desgaste [8].

5.1. Ensayo de impacto

Se observa que hay una disminución de 40,15 por ciento en el tamaño crítico de grieta respecto a la condición original, variación que se presenta por la disminución del factor de intensidad de esfuerzo (KIC) y la disminución del esfuerzo de fluencia al aplicar el tratamiento a temperatura criogénica.. Esto debido a que se endurece el material y conduce a menor energía absorbida.

Las muestras (Figura 7) que fueron sometidas al tratamiento criogénico presentan a diferencia del material en su estado original:

- Un menor tamaño de los carburos debido a la contracción que sufre la estructura.
- Distribución más heterogénea de los carburos, presentando regiones con y sin carburos primarios.
- Presencia numerosa de martensita, lo que se traduce en los elevados valores de dureza.

De acuerdo con la literatura acerca de tratamientos criogénicos de aceros para herramientas, la mejora de las propiedades mecánicas se puede atribuir a fenómenos diferentes:

- La transformación completa de la austenita retenida en martensita;
- La precipitación dispersa de carburos finos.
- La eliminación de tensiones residuales.

Se sabe que casi todos los aceros a -193°K transforman la austenita en martensita. El uso de tratamiento en frío ha sido desarrollado inicialmente en aceros martensíticos de herramientas con el fin de eliminar austenita retenida con beneficios sobre la dureza.

Para cuantificar lo observado anteriormente, en la Tabla 6 están los resultados que se obtuvieron al determinar la fracción de volumen presente en la muestra como se observa en la Figura 7. Logrando obtener hasta un 90 por ciento de martensita en el acero estudiado.

Esto se atribuye a la mejora a un mecanismo denominado “acondicionamiento a baja temperatura de la martensita”, que tiene lugar normalmente a la temperatura del nitrógeno líquido, a partir del cual se promueve la precipitación de carburos de tamaño microscópico más homogéneamente distribuidos a lo largo de la matriz de martensita. Esto en general, viene asociado a un incremento de la resistencia frente al desgaste [9, 10].

El tratamiento Criogénico no ha sido ampliamente adoptado por las industrias debido a la falta de comprensión de los fundamentales mecanismos

metalúrgicos y debido a la amplia variación en resultados de las investigaciones reportadas, demostrando el efecto del tratamiento criogénico y el fenómeno subyacente, pero para entender por qué se produce este fenómeno, se requiere equipos sofisticados y analítica y extensa conocimiento metalúrgico [11].

Sin embargo, los mecanismos de cambios de microestructura de las aleaciones de diversos tratamientos todavía no se entienden completamente [12].

6. Conclusiones

Los valores de las propiedades mecánicas estudiadas luego de la aplicación de las temperaturas criogénicas, resultó ser la variable predominante a la hora de establecer conclusiones sobre la investigación, de esta manera se pudo determinar la influencia del tratamiento térmico criogénico con nitrógeno líquido en el proceso de enfriamiento, que sirve como un tratamiento adicional a los de temple y revenido realizados en el acero T.2000.

El tratamiento criogénico a una temperatura -196°C influye directamente en el acero y en los valores de sus propiedades de dureza, tenacidad y resistencia tensil. Esto se determinó por medio de los ensayos mecánicos en un universo de 20 probetas de ensayo Charpy, tracción y dureza. Donde los valores finales obtenidos al mantener la pieza 24 horas en una cámara cerrada repleta de nitrógeno líquido son

- Dureza 69,32 HRC
- Resistencia máxima de 820 MPa
- Resistencia al Impacto 13,53 J

Queda establecido de esta manera el aumento de los valores de dureza y resistencia máxima al aplicar temperaturas de -194°C , sin embargo estas mejoras obtenidas en las propiedades señaladas se lograron a costa de la disminución de los valores de tenacidad de impacto.

Esta disminución en la tenacidad de impacto se presenta como un problema menor que surge como consecuencia al producir mejoras en otros aspectos

del acero, por lo que se hace imprescindible establecer las propiedades principales que se necesitan antes de aplicar el enfriamiento en nitrógeno líquido, entendiendo la limitación que presenta el proceso para piezas sometidas a altos impactos.

En la microestructura se observaron las fases austenita y martensita, así como también las partículas esferoidales de carburos, y poca dispersión en los porcentajes de peso de los elementos aleantes Cobalto (Co) y Tungsteno (W) que conforman estas fases a través de un análisis químico por EDX, pero es representativo en las fases fueron afectadas por el tratamiento.

En la superficie de fractura de los ensayos de tracción se caracteriza por presencia de diferentes planos, presentando un mecanismo de clivaje manteniéndose constante en las condiciones de estudio.

Reconocimiento

Esta investigación fue seleccionado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería como uno de los mejores Trabajos Especiales de grado del año 2013 y lo recomendó para su publicación.

Referencias

- [1] Dutta Das D and Ray KK. AK. Influence of varied cryotreatment on the wear behavior of aisi d2 steel. *Wear*, 266:297–309, 2009.
- [2] Kalpakjian S. and Schmid S.R. *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Editorial Pearson Education, México, 5 edition, 2008.
- [3] John M Barsom and Stanley T Rolfe. *Fractura y fatiga en estructuras de control: Aplicación de la Mecánica de la Fractura*. Prentice Hall. Inc., EE. UU., 2 edition, 1987.
- [4] ASTM. *ASTM E23 – 12c Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*. West Conshohecken, PA: ASTM International Committee on Standards, Philadelphia, 2012.
- [5] ASTM. *ASTM E-562 11. Método de prueba estándar para determinar la fracción de volumen por conteo sistemático de puntos manual*. West Conshohecken, PA: ASTM International Committee on Standards, Philadelphia, 2011.

- [6] Collins D. N. and Dormer J. Deep cryogenic treatment of an asp 23 high speed steel. In Harry W. Walton, editor, *Heat Treating 1998: Proceedings of the 18th Conference*, pages 255–262. Heat Treating Society, 1999.
- [7] Nirmal S Kalsi, Rakesh Sehgal, and Vishal S Sharma. Cryogenic treatment of tool materials: a review. *Materials and Manufacturing Processes*, 25(10):1077–1100, 2010.
- [8] DN Collins and J. Dormer. Deep cryogenic treatment of a d2 cold-worked tool steel. *Heat Treatment of Metals*, 3:71–74, 1997.
- [9] M. Pellizzari and A. Molinari, editors. *6th International tooling Conference*, 2002.
- [10] M. Pellizzari and A. Molinari, editors. *7th International tooling Conference*, 2006.
- [11] Linde Gas. Sub-zero treatment technology, processes and equipment. In *libro White Paper*. 2010.
- [12] Simranpreet Singh Gill, Harpreet Singh, Rupinder Singh, and Jagdev Singh. Cryoprocessing of cutting tool materials—a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 48(1–4):175–192, 2009.