

**ESTUDIO DEL EFECTO DEL TRATAMIENTO CRIOGÉNICO SOBRE LAS
PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN ACERO RÁPIDO (HSS) AISI M7**

Ing. DIANA YASMÍN CASERTA CÁRDENAS



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
MAESTRIA EN INGENIERIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA
2012**

**ESTUDIO DEL EFECTO DEL TRATAMIENTO CRIOGÉNICO SOBRE LAS
PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN ACERO RÁPIDO (HSS) AISI M7**

DIANA YASMÍN CASERTA CÁRDENAS

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de Magister
en Ingeniería y Ciencia de los Materiales**

Director

PhD DARÍO YESID PEÑA B.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
MAESTRIA EN INGENIERIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2012

DEDICATORIA

A Dios por permitirme dar este gran paso en mi vida, a mis padres y mis hermanos por estar ahí siempre que los necesito y por todo su amor, a mi esposo por su confianza y apoyo incondicional, y nuevamente a Dios porque el es el ser maravilloso que siempre nos impulsa a ser mejores y que nos da la fortaleza para no desfallecer ante las dificultades.

A TODOS LOS AMO.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

Dios por ser la fuerza que siempre me acompaña y me impulsa a ser mejor persona.

Mis padres y hermanos por confiar en mí y por su apoyo incondicional.

Mi esposo por todo su amor y por consentirme siempre que lo necesito.

Las empresas TRANSEJES y GKN MÉXICO por brindarme el espacio, el tiempo, y la ayuda para la realización de las pruebas de este proyecto de investigación.

Doctor Nicolás Duarte Presidente de la empresa Transejes por su confianza y por su valiosa colaboración para la realización de este proyecto de investigación.

Ingeniero Mario Morales Gerente de calidad y procesos de la empresa Transejes por toda su comprensión y permisos para la realización de esta maestría.

Y por último y no menos importante, **al Doctor Darío Peña** por haber aceptado dirigir este proyecto, por sus enseñanzas y por su soporte incondicional.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
2. OBJETIVOS	20
2.1 OBJETIVO GENERAL	20
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
3. MARCO TEÓRICO	21
3.1 ACEROS DE HERRAMIENTAS	21
3.1.1 Aceros rápidos	24
3.2 TRATAMIENTOS TÉRMICOS	26
3.2.1 Tratamientos térmicos para aceros de herramientas.	29
3.2.2 Tratamiento Criogénico	31
3.2.2.1 Cinética del tratamiento criogénico	32
3.2.3 Equipos para tratamientos criogénicos.	35
3.2.3.1 Sistema de intercambiador de calor	35
3.2.3.2 Sistema por pulverización directa	35
3.2.3.3 Sistema por inmersión gradual	36
3.3 PROPIEDADES MECÁNICAS	36
3.3.1 Desgaste	36
3.3.1.1 Desgaste abrasivo	36
3.3.1.2 Desgaste adhesivo.	37
3.4 ESTADO DEL ARTE	38

4. DESARROLLO EXPERIMENTAL	42
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	52
5.1 CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL	52
5.1.1 Microscopia óptica.	52
5.1.2 Microscopia electrónica de barrido.	57
5.2 PROPIEDADES MECÁNICAS	63
5.2.1 Durezas y microdurezas	63
5.2.2 Resistencia al desgaste.	68
5.3 MORFOLOGÍA DE LAS SUPERFICIES	72
5.4 DETERMINACIÓN DE VIDA ÚTIL	77
CONCLUSIONES	80
RECOMENDACIONES	83
BIBLIOGRAFÍA	84
ANEXOS	87

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Composición química promedio de un acero AISI M7	24
Tabla 2. Parámetros operación centradora	47
Tabla 3. Valores de los ciclos térmicos de criogenia	48
Tabla 4. Diseño factorial completo 22 con un punto intermedio y plan de experimentación	49
Tabla 5. Resumen de los ciclos criogénicos realizados a las brocas de centrado	50
Tabla 6. Resumen porcentaje de estructuras	60
Tabla 7. Valores de dureza y microdureza pieza sin tratamiento criogénico	63
Tabla 8. pérdida en masa brocas luego de ensayo pin on disk.	69
Tabla 9. Resumen de los resultados de vida útil de las brocas	77

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Herramientas de corte usadas para procesos de mecanizado	21
Figura 2. Microestructuras de aceros de herramientas obtenidos por procesos convencionales (a) y pulvimetalúrgico (b)	23
Figura 3. Diagrama Hierro-Carbono	26
Figura 4. Temperaturas Ms y Mf en función del contenido de carbono para aceros al carbono. Los elementos de aleación disminuyen aún más las temperaturas Ms y Mf	29
Figura 5. Operaciones para producir un acero de herramientas (a) procesos termomecánicos (b) tratamiento de endurecimiento	30
Figura 6. Ciclo tratamiento térmico para acero SAE M7	31
Figura 7. Diagrama de temperatura Vs tiempo para procesos de tratamiento criogénico	32
Figura 8. Arreglo molecular de una estructura templada antes (Izquierda) y después (derecha) del tratamiento criogénico	34
Figura 9. Dispositivo Pin on Disk	38
Figura 10. Microscópio electrónico de transmisión U de Antioquía	43
Figura 11. Microscopio óptico de empresa Transejes	43
Figura 12. Microdurómetro de empresa Transejes	44
Figura 13. Microdurómetro Zwick Roell suministrado por la empresa Transejes	45
Figura 14. Montaje empleado para la prueba Pin-On-Disk	47
Figura 15. Micrografías por microscopia óptica a 100 y 400 aumentos de una broca sin tratamiento criogénico	52
Figura 16. Micrografías por microscopia óptica a 100 y 400 aumentos de una broca del ciclo criogénico 1	53

Figura 17. Micrografías por microscopía óptica a 100 y 400 aumentos de una broca del ciclo criogénico 2	54
Figura 18. Micrografías por microscopía óptica a 100 y 400 aumentos de una broca del ciclo criogénico 3	54
Figura 19. Micrografías por microscopía óptica a 100 y 400 aumentos de una broca del ciclo criogénico 4	55
Figura 20. Micrografías por microscopía óptica a 100 y 400 aumentos de una broca del ciclo criogénico 5	55
Figura 21. Micrografías por microscopía óptica a 100 y 400 aumentos de una broca del ciclo criogénico 6	56
Figura 22. Micrografías por microscopía óptica a 100 y 400 aumentos de una broca del ciclo criogénico 7	56
Figura 23. Micrografías por microscopía óptica a 100 y 400 aumentos de una broca del ciclo criogénico 8	57
Figura 24. Micrografía por SEM broca sin tratamiento criogénico y EDX.	57
Figura 25. Micrografías por SEM de la broca tratada con el ciclo criogénico 1 (izquierda) y el ciclo criogénico 2 (derecha)	58
Figura 26. Micrografías por SEM de la broca tratada con el ciclo criogénico 3 (izquierda) y el ciclo criogénico 4 (derecha)	58
Figura 27. Micrografías por SEM de la broca tratada con el ciclo criogénico 5 (izquierda) y el ciclo criogénico 6 (derecha)	59
Figura 28. Micrografías por SEM de la broca tratada con el ciclo criogénico 7 (izquierda) y el ciclo criogénico 8 (derecha)	59
Figura 29. Imagen de programa estadístico statgraphics donde se evidencia influencia del tiempo y la temperatura sobre el porcentaje de carburos	61
Figura 30. Imagen de programa estadístico statgraphics donde se evidencia influencia del tiempo y la temperatura sobre la microdureza de las brocas tratadas criogénicamente.	65

Figura 31. Imagen de programa estadístico statgraphics donde se evidencia influencia del tiempo y la temperatura sobre la dureza de las brocas tratadas criogénicamente	67
Figura 32. Curvas de pérdida en masa de las brocas después del ensayo de pin on disk	68
Figura 33. imagen de programa estadístico statgraphics donde se evidencia influencia del tiempo y la temperatura sobre la pérdida de masa de las brocas tratadas criogénicamente	71
Figura 34. Superficies de la broca sin tratamiento criogénico antes y después del ensayo de pin on disk (4X)	73
Figura 35. Superficies de la broca del ciclo criogénico 1 antes y después del ensayo de pin on disk (4X)	73
Figura 36. Superficies de la broca del ciclo criogénico 2 antes y después del ensayo de pin on disk (4X)	74
Figura 37. Superficies de la broca del ciclo criogénico 3 antes y después del ensayo de pin on disk (4X)	74
Figura 38. Superficies de la broca del ciclo criogénico 4 antes y después del ensayo de pin on disk (4X)	75
Figura 39. Superficies de la broca del ciclo criogénico 5 antes y después del ensayo de pin on disk (4X)	75
Figura 40. Superficies de la broca del ciclo criogénico 6 antes y después del ensayo de pin on disk (4X)	76
Figura 41. Superficies de la broca del ciclo criogénico 7 antes y después del ensayo de pin on disk (4X)	76
Figura 42. Superficies de la broca del ciclo criogénico 8 antes y después del ensayo de pin on disk (4X)	77
Figura 43. Imagen de programa estadístico statgraphics donde se evidencia influencia del tiempo y la temperatura sobre la vida útil de las brocas tratadas criogénicamente	79

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Ficha técnica de Acero AISI M7 con la cual se fabrican las brocas	87
Anexo B. Fotos de las instalaciones de la Cámara Criogénica en GKN Celaya	88
Vista exterior de la cámara criogénica	89
Vista interna de la cámara criogénica.	89
Anexo C. Micrografías de Superficies de desgaste a 800 aumentos donde se observan ralladuras superficiales con desprendimiento de material (desgaste abrasivo)	90

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO DEL EFECTO DEL TRATAMIENTO CRIOGÉNICO SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN ACERO RÁPIDO (HSS) AISI M7*

AUTOR: Diana Yasmín Caserta Cárdenas **

PALABRAS CLAVES: Tratamientos criogénicos, acero rápido, brocas de centrado.

RESUMEN:

El presente trabajo de investigación presenta el estudio realizado a brocas de centrado fabricadas con acero rápido (HSS high speed steels) AISI M7 usadas en la empresa Transmisiones Homocinéticas de Colombia, después de aplicarles distintos tratamientos criogénicos en los cuales se modificaron las variables tiempo y temperatura de criogenización. Se trabajó con nitrógeno líquido a temperaturas de -100, -143 y -185°C y tiempos de exposición a estas temperaturas de 10,17 y 24 horas respectivamente, esto como resultado de un diseño de experimentos. Se realizaron pruebas tribológicas, mecánicas y metalográficas para verificar los resultados de los tratamientos. Como resultado se observó que la vida útil de las brocas aumentó al comparar piezas sin tratamiento criogénico versus brocas con todos los tratamientos criogénicos planteados, esto originado por el aumento de dureza, la menor pérdida en masa de las brocas después de la realización del ensayo de pin on disk, la conformación de una matriz con carburos distribuidos uniforme y homogéneamente lo cual conlleva a una estructura molecular densa y por ende a una mayor resistencia al desgaste.

Todos los ciclos criogénicos mejoraron la vida útil de las brocas, aspecto muy importante para las industrias que buscan mayor competitividad. Sin embargo no se encontró un ciclo en particular que presentará un mejor comportamiento frente a los otros, esto se pudo corroborar mediante el uso del programa estadístico statgraphics centurion donde se observó que la influencia de las variables tiempo y temperatura varía de acuerdo a la característica o propiedad que se evalúe.

* Tesis de maestría

** Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Maestría en Ingeniería de Materiales. Director: PhD. Darío Yesid Peña Ballesteros.

ABSTRACT

TITLE: RESEARCH OF THE EFFECT OF THE CRYOGENIC TREATMENT ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE HIGH SPEED STEEL (HSS) AISI M7 *

AUTHOR: CASERTA CÁRDENAS, Diana Yasmín **

KEY WORDS: Cryogenic treatments, high speed steel, centering drills.

ABSTRACT:

The present research studies the behavior of the centering drills, after of the application of different cryogenic treatments. Time and temperature of cryogenization were modified. The centering drills were fabricated of AISI M7 steel (HSS high speed steel) and are used in the company TRANSEJES, Transmisiones homocinéticas de Colombia. Liquid Nitrogen was used to reduce the temperatures to -100,-143 y -185°C. The exposures times at these temperatures were 10, 17 and 24 hours respectively; according to the experimental design Metallographic, tribological and mechanical tests were used to evaluate the treatments. After the cryogenic treatments the duration of the centering drills increased comparing with the centering drills without cryogenic treatments, all this as a result of the hardness increase, lower lost mass after pin on disk test, and the conformation of a matrix with carbides uniformly and homogeneously distributed, which means a dense molecular structure more resistant to wear. All the cryogenic treatments improve the duration of the centering drills, which is very important for any industry that is looking for increase productivity in their process. However, It was not found a special cycle that present a better behavior compared with the others. This was corroborated using Statgraphics centurion program, where it was observed that the influence of time and temperature of cryogenization change according to the characteristic evaluated.

* Master Thesis

** Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Maestría en Ingeniería de Materiales .Director: PhD. Darío Yesid Peña Ballesteros

INTRODUCCIÓN

En los procesos de maquinado de los metales, la condición de las herramientas de corte juega un papel muy importante tanto en la calidad del producto final así como en los costos de manufactura. Herramientas de corte como brocas e insertos en muchas ocasiones presentan desgastes prematuros, que se evidencian en su corta vida útil y por supuesto en el alto consumo de ellos.

El tratamiento criogénico es un proceso a bajas temperaturas (temperaturas bajo cero), cuyo propósito principal es aumentar la resistencia al desgaste de los aceros de herramientas para prolongar su tiempo de vida útil.

En Colombia y en general en el mundo, la aplicación de este tratamiento térmico en la industria de los metales es muy limitada, está sólo enfocado a las industrias alimenticia y de salud. Las pocas investigaciones realizadas en aceros de herramientas han brindado algunas hipótesis de los posibles beneficios de este tratamiento. Sin embargo, aún se encuentra bajo discusión los posibles fundamentos teóricos que originan el aumento de resistencia en este tipo de aceros.

Por lo tanto, este proyecto pretende contribuir a la industria y a la investigación aplicada mediante el estudio de la influencia del tratamiento criogénico sobre las propiedades mecánicas y tribológicas de brocas de centrado fabricadas de acero AISI M7, mediante el desarrollo de un ciclo térmico apropiado que permita mejorar la vida útil de estas herramientas.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Hoy en día, las empresas para poder subsistir en el mercado deben ser lo más competitivas posibles, deben enfocarse a trabajar con productividad, que se define como hacer más con lo mismo o menos si es posible, teniendo en cuenta no abandonar la calidad. La productividad mide la relación entre el producto obtenido y los INSUMOS empleados, medidos en términos reales. En las industrias donde se llevan a cabo procesos de mecanizado uno de los rubros más significativos, en cuanto a términos de costos, son los fungibles, donde se encuentra herramientas para corte tales como brocas de centrado, y otras para torneado, como es el caso de los insertos.

En la práctica se ha observado que este tipo de herramientas sufren desgastes excesivos, que conlleva a la disminución de su vida útil, lo que ocasiona su mayor consumo. Sin embargo, existen una serie de tratamientos térmicos como son la nitruración y el temple con enfriamiento criogénico, que pueden aumentar la vida útil de los aceros de herramientas.¹

El tratamiento de temple con enfriamiento criogénico, conocido también como simplemente tratamiento criogénico, es una de las alternativas más recomendables, pues el método empleado no requiere de altas inversiones en equipos, ni infraestructuras muy sofisticadas. La criogenia se lleva a cabo como una modificación a la forma de templar la pieza, una vez que ésta se ha homogenizado dentro del rango de temperatura de austenización del acero de herramienta empleado. Este tipo de enfriamiento permite incrementar la

¹ ASM HANDBOOK, Heat treating. Volume 4, Cold Treating and Cryogenic Treating and Cryogenic treatment of steel. 2001. p 204-205

transformación de austenita en martensita eliminando puntos blandos en la superficie, los cuales disminuyen las propiedades de las piezas.

De igual forma busca homogenizar condiciones de dureza de la pieza y mejorar el alivio de esfuerzos de partes maquinadas, los cuales en ocasiones contribuyen a la falla de las piezas.

En la literatura del tema se ha encontrado información en donde se muestra las bondades de este procedimiento. Al investigar la resistencia al desgaste de varios aceros se obtiene que mediante un tratamiento en frío, calentamiento hasta austenización y enfriamiento hasta -84°C , se mejora la resistencia al desgaste entre un 18 y un 104%, pero mediante el tratamiento criogénico, calentamiento hasta austenización y enfriamiento hasta -190°C se mostró una mejora del 104 hasta 560%, con relación a los tratamientos convencionales de enfriamiento hasta temperatura ambiente.²

Se ha encontrado información de estudios de efectos de la criogenia en varias clases de acero; Sin embargo no se evidencian estudios sobre el acero AISI M7 que es el acero usado por KEO en USA para la fabricación de las brocas de centrado a estudiar.

Con este proyecto se pretende evidenciar el efecto del tratamiento criogénico sobre las propiedades mecánicas de un acero AISI M7, y de acuerdo a los resultados obtenidos, mejorar la vida útil de estas herramientas mediante el desarrollo de un ciclo térmico conveniente.

El acero AISI M7 es el acero con el que se fabrican las brocas de centrado, herramientas de corte que se evaluarán en el presente proyecto cuyo estimado de vida útil esta alrededor de 1000 piezas por broca en las centradoras de la

² Ibíd.

empresa Transejes, empresa que suministrará insumos y donde se llevarán a cabo algunos de los ensayos del presente proyecto de investigación.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la influencia de un tratamiento criogénico sobre un acero templado HSS AISI M7, mediante la determinación de propiedades mecánicas y tribológicas, para mejorar su vida útil.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar un ciclo térmico criogénico que mejore la vida útil del acero M7 mediante ensayos que involucren variaciones en tiempos y / o temperaturas como parámetros únicos modificables.
- Estudiar mecanismos de transformación de fases durante el proceso criogénico mediante estudio de las microestructuras existentes en el acero M7 antes y después del tratamiento criogénico.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 ACEROS DE HERRAMIENTAS

Un acero de herramienta es el acero al carbono o aleado, capaz de ser templado y revenido; se utilizan en aplicaciones donde la resistencia al desgaste es importante. En este grupo se incluyen todos los aceros que normalmente se emplean para la fabricación de útiles o herramientas destinadas a modificar la forma, tamaño y dimensiones de los materiales por cortadura, por presión o por arranque de viruta (Figura 1).

Figura 1. Herramientas de corte usadas para procesos de mecanizado



Fuente: PRESENTACIÓN GKN CELAYA.

En general, un acero de herramientas posee una o más de las siguientes propiedades:³

- Resistencia al desgaste a temperatura ambiente o resistencia a la abrasión.

³ VALENCIA, Asdrúbal. Tecnología del tratamiento térmico de los metales. Segunda Edición. Editorial Universidad de Antioquia.1992.

- Resistencia al desgaste a temperatura elevada o dureza en rojo.
- Resistencia al impacto o la tenacidad.
- Estabilidad durante el tratamiento térmico.
- Buena maquinabilidad.

Siendo cada una de estas más o menos importantes de acuerdo a su aplicación particular. Por ejemplo en el caso particular de las herramientas de corte, los aceros para servicio requieren resistencia a la abrasión, retención de la dureza a temperaturas elevadas y tenacidad para evitar la rotura de las herramientas.

Estas propiedades se ven influenciadas por aspectos tales como tipo material y tratamiento térmico entre otros. Los aceros de herramienta tienen una microestructura formada por martensita revenida, con un mayor o menor porcentaje de carburos de elementos de aleación como cromo, molibdeno, wolframio y vanadio.

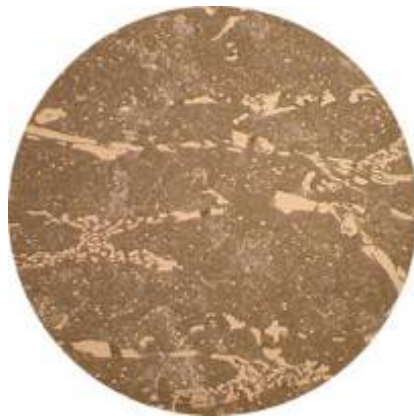
El porcentaje de carburos es principalmente función de la composición química del acero. En cambio su distribución, morfología y tamaño, dependen principalmente del proceso de obtención, bien sea por el proceso convencional o por el proceso pulvimetalúrgico.⁴

Los aceros obtenidos por el proceso pulvimetalúrgico (Figura 2), presentan un tamaño de los carburos muy fino y redondeados debido a la rápida solidificación que ha tenido lugar y al pequeño tamaño de los carburos obtenidos en los polvos que posteriormente se sinterizaran vía HIP (compactación isostática en caliente). También poseen una gran uniformidad y distribución de los carburos, reflejado en una gran isotropía en cuanto a la tenacidad obtenida, tanto en el sentido

⁴ RUSIÑOL, Marco. Efecto del tratamiento criogénico en las propiedades mecánicas de los aceros de herramienta de trabajo en frío, proyecto de grado ingeniería de materiales. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial. Barcelona. 2004.

longitudinal como en el transversal a la dirección de laminación o forja.⁴ En cambio, los aceros obtenidos por el proceso convencional, presentan un gran tamaño de los carburos y una marcada anisotropía, bandeamiento y segregación como consecuencia de la lenta solidificación que tuvo lugar en las lingoteras y los necesarios coeficientes de reducción desde el lingote de colada.

Figura 2. Microestructuras de aceros de herramientas obtenidos por procesos convencionales (a) y pulvimetalúrgico (b)⁵



(a). Proceso convencional



(b) Proceso pulvimetalúrgico

Fuente: RUSIÑOL, Marco, Efecto del Tratamiento Criogénico en las Propiedades Mecánicas de los Aceros de Herramienta de Trabajo en Frío. Proyecto de Grado Ingeniería de Materiales. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial. Barcelona. 2004.

Dentro del grupo de aceros de herramientas se encuentra un grupo conocido como aceros rápidos (HSS High Speed Steels). El acero de herramientas a estudiar en esta investigación hace parte de este grupo y es un acero **AISI M7** el cual corresponde a un acero rápido base molibdeno con la siguiente composición química promedio:

⁵ Ibíd.

Tabla 1. Composición química promedio de un acero AISI M7

C (%)	Cr (%)	V (%)	W (%)	Mo (%)	Mn(%)
1.02	3.80	1.90	1.80	8.60	0.30

Fuente: Anexo 1

3.1.1 Aceros rápidos

Los aceros rápidos forman un sistema de aleación altamente desarrollado, se caracterizan por propiedades comunes como son: la elevada dureza a temperatura ambiente, temperatura de austenización cercana al punto de fusión, gran dureza en rojo y buena resistencia al desgaste.⁶

En este siglo estos tipos de aceros se han venido empleando en herramientas que trabajan por arranque de viruta, debido a que presentan mayor tenacidad que otros materiales.⁷

En las operaciones de maquinado se genera, por fricción, una alta cantidad de calor. Estos materiales resisten esta acción de la temperatura, conservando la dureza y el filo cortante en caliente y permitiendo más altas velocidades de corte con iguales o mayores duraciones de la herramienta. Por eso se les denominó aceros rápidos.⁸ Las características de los aceros rápidos provienen de su microestructura y específicamente de los carburos.⁹ Los Carburos primarios se forman por precipitación durante el proceso de solidificación, los secundarios resultan de la descomposición de la austenita durante el temple o durante el revenido después del temple.

⁶ *Ibíd.*

⁷ *Ibíd.*

⁸ VALENCIA, Op. Cit.

⁹ *Ibíd.*

Los principales carburos presentes en los aceros rápidos son, además del tipo M_3C ,¹⁰ los siguientes:

MC: es un carburo con estructura tipo NCl, donde M puede ser W, Mo, V, Cr, Fe, en este caso el más común es el VC o V_4C_3 .

M_6C : es esencialmente un carburo terciario de hierro y molibdeno o tungsteno, aunque puede disolver muchos otros elementos.

$M_{23}C_6$: es un acero rico en cromo, puede ser $Cr_{23}C_6$, que tiene estructura cúbica compleja.

En resumen la composición del carburo en un acero rápido depende del contenido de aleantes.

Estos aceros rápidos al molibdeno comparados con otros aceros rápidos como los de tungsteno,¹¹ tienen las siguientes ventajas: son ligeramente más tenaces, tienen temperaturas de austenización más bajas; los carburos primarios son más pequeños y finos y por ello más solubles, son menos densos y tienen mejor conductividad térmica.

Pero tienen las siguientes desventajas: 1) Se descarburan más fácilmente. 2) Presentan una zona de austenización más estrecha.

El acero AISI M7 es un acero que tiene todas las características de un acero al molibdeno. Se caracteriza por tener una alta resistencia a la tenacidad y al desgaste. Su proceso normal de tratamiento térmico consta de un recocido, de un tratamiento de alivio de tensiones, de un proceso de endurecimiento en aceite o

¹⁰ Ibíd.

¹¹ Ibíd.

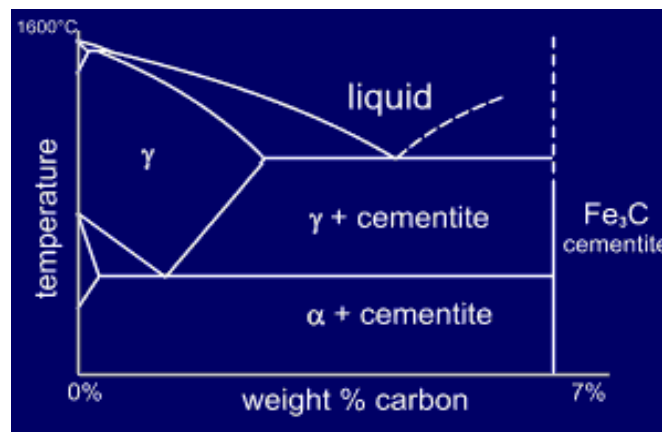
baño de sales y un proceso posterior de revenido en tres etapas con el fin de disminuir durezas y aliviar tensiones.

3.2 TRATAMIENTOS TÉRMICOS

El objetivo de estos procesos es que las herramientas posean suficiente tenacidad con una determinada dureza y resistencia al desgaste. Los tratamientos convencionales para obtener estas características son el TEMPLE Y REVENIDO.

En los aceros, La fase gamma se llama **austenita**, es una fase de alta temperatura y tiene una estructura cúbica centrada en las caras (FCC). La fase alfa se llama **ferrita**. La ferrita es un componente común en aceros y tiene una estructura cúbica centrada cuerpo (BCC). **El Fe_3C** se llama **cementita** y el eutéctico corresponde a la mezcla **ferrita + cementita** se denomina **perlita** (fig. 3).

Figura 3. Diagrama Hierro-Carbono



Fuente: BLOG LA TECNOMANU. Cateto cuadrado [En línea]. 2011. Disponible en Internet: <URL:www.catetocuadrado.wordpress.com>

La finalidad de los procesos de temple y revenido es originar cambios microestructurales como¹²:

1. Transformación de una estructura perlítica – ferrítica (aceros hipoeutectoides) ó perlítica – cementítica (aceros hipereutectoides) a una estructura martensítica.
- 2.
3. Formación de carburos después del proceso de revenido; esto con el fin de mejorar las propiedades, como por ejemplo la dureza.

El ciclo térmico de estos aceros altamente aleados consta generalmente de cuatro etapas:

1. PRECALENTAMIENTO: Minimizar tensiones que ocurren durante el temple.
2. AUSTENIZACIÓN: Transformar totalmente la matriz en una estructura austenítica, es un proceso dependiente de la temperatura y el tiempo. Altas temperaturas de austenización pueden proporcionar mayor dureza y resistencia al desgaste, pero menor tenacidad y mayor probabilidad de grietas, bajas temperaturas lo contrario.¹³
3. ENFRIAMIENTO HASTA TEMPERATURA AMBIENTE: Una vez austenizado el acero, enfriar a una velocidad mayor que la velocidad crítica de enfriamiento de la curva TTT del acero correspondiente.
4. REVENIDO: Después del temple, el acero presenta una microestructura consistente en martensita, austenita retenida y carburos. Las herramientas en este estado no tienen aún aplicación industrial por la gran fragilidad presentada por la

¹² IRIAS, Adrián y STACKPOLE, César. Aumento en la resistencia al desgaste de aceros para herramientas a través de la aplicación de tratamiento criogénico, proyecto de grado ingeniería de materiales. 2004.

¹³ Ibid.

martensita tetragonal resultante del temple y la posible transformación de la austenita retenida. Por tanto, es necesario realizarles un tratamiento de revenido para aumentar la tenacidad por medio de un distensionado y transformación de la martensita, y al mismo tiempo, asegurarse que no haya cambios dimensionales tanto en servicio como en la realización de posibles tratamientos adicionales.¹⁴

Cuando un acero de herramientas es templado, la matriz no se transforma completamente en martensita, ya que la temperatura de terminación de formación de la martensita se encuentra muchas veces por debajo de la temperatura ambiente (Figura 4) y los medios usados para templar como son el agua, el aceite o salmuera entre otros se encuentran a temperaturas superiores o iguales a esta temperatura originando una transformación incompleta y dando como resultado la presencia de alguna cantidad de austenita, la cual es denominada austenita retenida.¹⁵

Esta estructura es muy suave lo que origina menor resistencia al desgaste. La cantidad de austenita durante el temple aumenta al aumentar:¹⁶

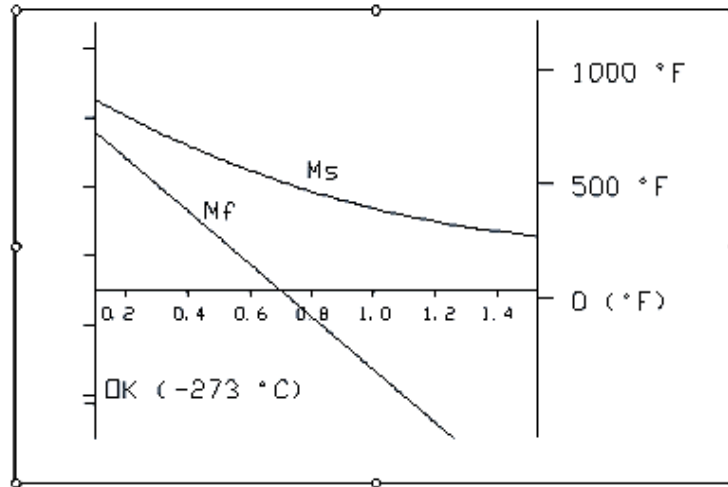
1. El contenido de elementos que hacen disminuir las temperaturas de inicio y fin de la martensita (Ms y Mf).
2. La temperatura y tiempo de austenización por disolver una mayor parte de elementos de aleación que estaba en forma de carburos.
3. El espesor de la pieza.

¹⁴ Ibíd.

¹⁵ Ibíd.

¹⁶ Ibíd.

Figura 4. Temperaturas Ms y Mf en función del contenido de carbono para aceros al carbono. Los elementos de aleación disminuyen aún más las temperaturas Ms y Mf



Fuente: RUSIÑOL, Marco. Efecto del Tratamiento Criogénico en las Propiedades Mecánicas de los Aceros de Herramienta de Trabajo en Frío. Proyecto de Grado Ingeniería de Materiales, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial. Barcelona. 2004.

3.2.1 Tratamientos térmicos para aceros de herramientas.

El desempeño de una herramienta en servicio depende principalmente de cuatro factores:¹⁷

1. El diseño apropiado de la herramienta.
2. La precisión con la cual la herramienta ha sido fabricada.
3. Selección del acero apropiado.
4. Aplicación de un tratamiento térmico apropiado.

Con muy pocas excepciones, todos los aceros de herramientas deben ser tratados térmicamente para desarrollar combinaciones de resistencia al desgaste,

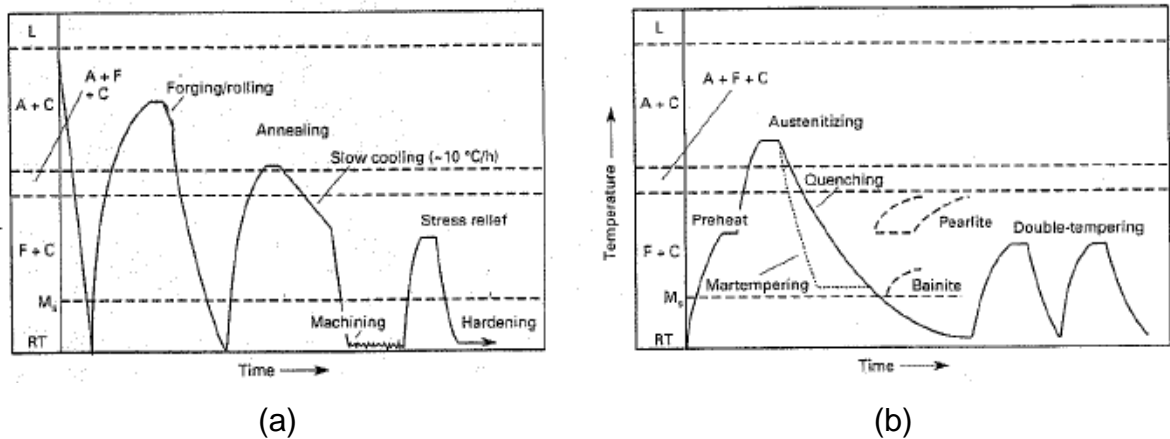
¹⁷ ASM HANDBOOK, Op. cit., p. 207-218.

resistencia a la deformación o rompimiento bajo altas cargas y resistencia al ablandamiento a altas temperaturas.¹⁸

En la figura 5 se muestra una secuencia de operaciones requeridas para producir aceros de herramientas. En la Figura 5 (a) procesos termomecánicos los cuales incluyen procesos de deformación tales como forjado, rolados y maquinados y en la Figura 5 (b) tratamiento térmico de endurecimiento donde se observan las etapas de precalentamiento, austenización y temple entre otras. Se observan las fases L, líquido; A, austenita; C, cementita; F, ferrita; Ms, temperatura a la cual la martensita empieza a formarse después del enfriamiento; RT Temperatura ambiente.⁷

La figura 5 muestra una gráfica de temperatura contra tiempo donde se observa la secuencia requerida para producir aceros de herramientas.

Figura 5. Operaciones para producir un acero de herramientas (a) procesos termomecánicos (b) tratamiento de endurecimiento



Fuente: ASM HANDBOOK, Heat treating. Volume 4, Introduction to heat treating of Tool steel. 2001. p. 711- 725.

¹⁸ Ibíd.

Los procesos térmicos de estos aceros manejan los mismos principios expuestos anteriormente en las definiciones de tratamientos térmicos. La figura 6 muestra el ciclo térmico recomendado para el acero AISI M7 sobre el cual se basa esta investigación.¹⁹

Figura 6. Ciclo tratamiento térmico para acero SAE M7

Type	Rate of heating	Hardening				Time at temperature, min	Quenching medium(a)	Tempering temperature	
		Preheat temperature		Hardening temperature				°C	°F
		°C	°F	°C	°F				
Molybdenum high-speed steels									
M1, M7, M10	Rapidly from preheat	730-845	1350-1550	1175-1220	2150-2225(b)	2-5	O. A. or S	540-595(c)	1000-1100(c)

Fuente: ASM HANDBOOK. Heat treating. Volume 4, Introduction to heat treating of Tool steel. 2001. p. 711- 725.

3.2.2 Tratamiento Criogénico

A los aceros de herramienta se les puede realizar distintos tratamientos adicionales al tratamiento clásico de temple y revenido con el fin principal de aumentar la vida útil en determinadas condiciones de trabajo, al permitir bajar el coeficiente de fricción y mejorar la resistencia al desgaste ya sea por micro dureza superficial, refinamiento de carburos entre otros. Uno de estos procesos es el tratamiento criogénico.²⁰

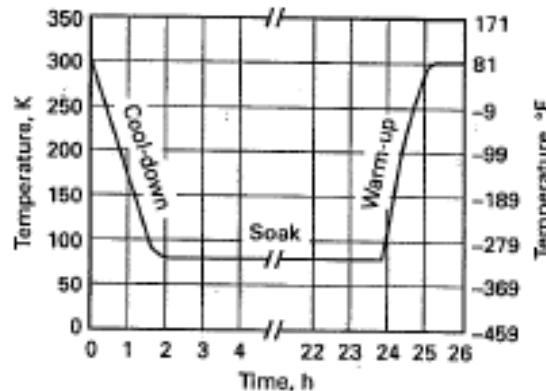
El tratamiento criogénico típico consiste de un enfriamiento lento (aproximadamente 2.5° C/min) desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de nitrógeno líquido. Cuando el material alcanza aproximadamente 80K, éste es sostenido por un tiempo apropiado (generalmente 24 horas). Al final

¹⁹ Ibíd.

²⁰ CRYOBEST INTERNATIONAL. El proceso Cryobest ® [En línea]. 2009. [Consultado el 20 de diciembre de 2011, 9:09 p.m.]. Disponible en Internet: <URL.http://www.cryobest.com/esp/0202.html>

del periodo de sostenimiento, el material es removido del nitrógeno líquido y empieza a calentarse hasta temperatura ambiente (Figura 7).²¹

Figura 7. Diagrama de temperatura Vs tiempo para procesos de tratamiento criogénico



Fuente: ASM HANDBOOK. Heat treating, Volume 4, cold treating and cryogenic treatment of steel, 2001. p. 204-205

Es importante tener en cuenta que cuando se lleva a cabo el enfriamiento, la temperatura debe ser controlada con precisión con el fin de no dañar el material debido al choque térmico que se presenta.

Usualmente se desarrolla un ciclo de revenido después del tratamiento criogénico con el fin de mejorar la resistencia al impacto, ciclos de revenidos dobles y triples son usados usualmente.⁽⁷⁾

3.2.2.1 Cinética del tratamiento criogénico. Existen varias teorías concernientes a los efectos del tratamiento criogénico. Una teoría involucra la transformación completa de austenita retenida a martensita. Esta teoría ha sido verificada por medidas de difracción de rayos X⁽⁷⁾. Otra teoría está basada en el aumento de resistencia del material debido a la precipitación de carburos submicroscópicos

²¹ Ibíd.

como resultado del tratamiento criogénico. Alineado a esta teoría se encuentra la reducción de tensiones internas en la martensita cuando ocurre la precipitación de los carburos submicroscópicos.²²

Una reducción de la tendencia de formación de microgrietas resultado de la reducción de las tensiones internas es otra razón para la mejora de las propiedades.

Bajo este tratamiento se obtienen los siguientes resultados:²³

1. Alrededor de los -80°C , se asegura la terminación de la transformación de la austenita en martensita para cualquier acero, por lo que se obtiene una estructura 100% martensítica. Esta estructura es dimensionalmente estable, ya que la martensita no se transforma en otra estructura a temperatura ambiente, además de ser más resistente al desgaste. Esta transformación es independiente del tiempo, solo es necesario que el material llegue a la temperatura M_f para que la transformación se lleve a cabo.²⁴

2. Bajo la exposición de la martensita a temperaturas criogénicas por tiempo prolongado, se forman millones de *et*carburos o carburos finos, cuya composición química depende de los elementos de aleación que contenga el material. Estos carburos hacen de la matriz una estructura más densa y homogénea, la cual es más resistente al desgaste.²⁵

3. Para cualquier otro material (no ferroso o ferroso sin tratamiento térmico), la estructura cristalina se perfecciona, eliminando vacancias, traslapes,

²² ASM HANDBOOK, Op. cit.

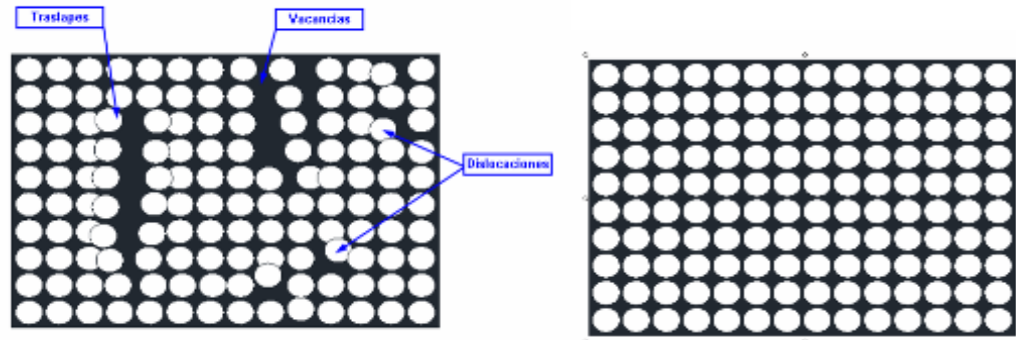
²³ BLOG, CCI CÁMARAS CLIMÁTICAS. Temple criogénico - Ciclado térmico [En línea]. México, 2009. [Consultado el 20 de diciembre de 2010, 10:00 p.m.]. Disponible en Internet: <URL: <http://cci-calidad.blogspot.com/2008/10/temple-criogenico-ciclado-termico.html>>

²⁴ Ibíd.

²⁵ Ibíd.

dislocaciones, etc., transformación que resulta en una liberación de esfuerzos residuales muy considerable, haciendo más tenaz al material tratado (Figura 8).²⁶

Figura 8. Arreglo molecular de una estructura templada antes (Izquierda) y después (derecha) del tratamiento criogénico



Nota: A la izquierda se observan vacancias y dislocaciones.

Fuente: IRIAS, Adrián; STACKPOLE, César. Aumento en la Resistencia al desgaste de aceros para herramientas a través de la aplicación de tratamiento criogénico, proyecto de grado ingeniería de materiales. 2004.

Este tratamiento es permanente y no es un sustituto del temple sino una continuación del mismo. Transforma la austenita retenida en martensita en los aceros templados y perfecciona la red molecular en todo el material.²⁷

Otra de las referencias bibliográficas²⁸ reporta que según el NBS (Nacional Bureau of Standards), cuando la forma alotrópica del carbono se precipita, el esfuerzo interno de la martensita se reduce, con lo cual se minimiza la sensibilidad a las microfisuras. Además el enfriamiento criogénico permite la formación de carburos metálicos, debido al aumento de la compactación estructural, lo cual redundará en una mayor resistencia al desgaste con una disminución de la fricción y el calentamiento.

²⁶ Ibíd.

²⁷ BLOG, CCI CÁMARAS CLIMÁTICAS; Op. cit.

²⁸ Ibíd.

Es importante dejar claro que el tratamiento criogénico para un caso particular seguirá la norma general de un tratamiento criogénico, pero el tiempo y la temperatura del tratamiento serán variables dependientes del acero particular, según su composición química, función a cumplir, condiciones de funcionamiento, entre otros. Para estos casos no existen normas o procesos fijos y toda la actividad debe enfocarse a la etapa experimental que debe incluir las diversas combinaciones de variación de los parámetros importantes, tiempo y temperatura, para lograr la determinación del tratamiento más conveniente.²⁹

3.2.3 Equipos para tratamientos criogénicos.

Los sistemas de nitrógeno líquido se han convertido en los métodos más comunes para alcanzar temperaturas criogénicas. Los dos tipos de sistemas son descritos a continuación.³⁰

3.2.3.1 Sistema de intercambiador de calor. En este sistema se hace pasar nitrógeno líquido a través de un intercambiador de calor y el gas de salida se recupera para utilizarlo como atmósfera en el horno. La atmósfera de esta cámara es aspirada hacia los serpentines por medio de un ventilador y se hace circular posteriormente a través de las piezas. Ni el nitrógeno líquido ni el nitrógeno gas seco entran en contacto con las piezas.

3.2.3.2 Sistema por pulverización directa. El sistema de pulverización directa pulveriza el nitrógeno líquido directamente dentro de la cámara, mientras un ventilador hace circular el gas por la misma. En este caso, el gas utilizado no se recupera y tampoco las piezas entran en contacto con el nitrógeno líquido.

²⁹ PINEDO, Julio y PARRA, Héctor. Tratamiento criogénico para cuchillas aleadas de uso en la industria del papel. Proyecto de Grado Ingeniería Mecánica. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 1973.

³⁰ SYDNEY H., Avner; Op. cit.

3.2.3.3 Sistema por inmersión gradual. En este sistema si hay inmersión de la pieza a temperatura ambiente en un líquido criogénico. Pasado el tiempo de mantenimiento a la temperatura del líquido criogénico, la pieza se retira del líquido e inmediatamente se somete a un flujo de aire hasta alcanzar la temperatura ambiente.³¹

3.3 PROPIEDADES MECÁNICAS

3.3.1 Desgaste

El desgaste es el daño de la superficie por remoción de material de una o ambas superficies sólidas en movimiento relativo o debido a una presión recíproca. Es un proceso en el cual las capas superficiales de un sólido se rompen o se desprenden de la superficie.³²

Hay diferentes tipos de desgaste, sin embargo las herramientas normalmente están expuestas a dos tipos principalmente el desgaste abrasivo, y el desgaste adhesivo.³³

3.3.1.1 Desgaste abrasivo. El desgaste abrasivo ocurre cuando partículas abrasivas como carburos, u otras inclusiones duras, bien sean del material a conformar, bien del acero de herramienta por desprendimiento previo o bien por partículas exteriores como polvo de la zona de trabajo, son forzadas contra las superficies en el proceso de conformado o corte produciendo surcos y arrancando parte del material de una o de las dos superficies.³⁴

³¹ *Ibíd.*

³² CRYOBEST, *Op. cit.*

³³ *Ibíd.*

³⁴ *Ibíd.*

3.3.1.2 Desgaste adhesivo. El desgaste adhesivo es el proceso por el cual se transfiere material de una a otra superficie durante su movimiento relativo, como resultado de soldado en frío en puntos de interacción de asperezas, en algunos casos parte del material desprendido regresa a su superficie original o se libera en forma de virutas o rebaba.³⁵

Hay distintos ensayos para evaluar desgaste de materiales como son: ⁽¹⁰⁾

1. Método de cilindros cruzados.
2. Ensayo pin on disk.

Durante este proyecto se usará el ensayo pin on disk para evaluar resistencia al desgaste (Fig.9). En este ensayo la probeta en forma de pin se presiona sobre el disco con una carga específica, y dicha probeta, se encuentra sujeta a un dispositivo posicionador con contrapesos, la máquina de pruebas causa que el pin o el disco giren entre sí. Como consecuencia de ello, se forma un camino de desgaste en el disco, los reportes de desgaste se realizan en términos de pérdida de volumen en milímetros cúbicos.³⁶

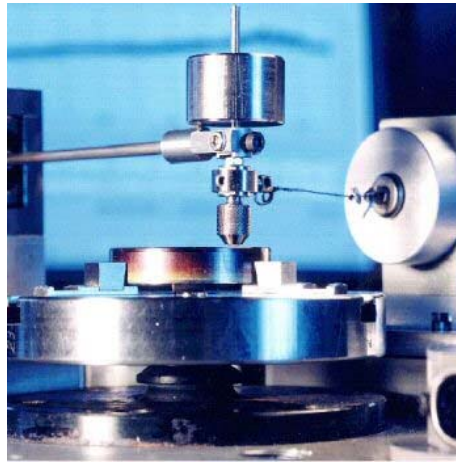
PARÁMETROS DEL ENSAYO: los parámetros de un ensayo tienen en cuenta las siguientes variables:

- Carga: Valores de la fuerza de contacto en Newtons.
- Velocidad: La velocidad relativa entre las superficies de deslizamiento en m/s.
- Distancia: La distancia acumulada de deslizamiento en m.
- Temperatura: La temperatura en las dos probetas en cercanía a la superficie de contacto.
- Atmósfera: La atmósfera (aire del laboratorio, humedad relativa, argón, lubricante, etc.), alrededor de la superficie de contacto.

³⁵ Ibíd.

³⁶ FUENTES, Rosalba. ¿Y El desgaste? [En línea]. Guanajato, México. 2006. Disponible em Internet: <URL:<http://quimica.ugto.mx/revista/2/Desgaste.htm>>

Figura 9. Dispositivo Pin on Disk



Fuente: SKF GROUP. Disponible en Internet: <URL:www.skf.com/cmimages/237678.jpg>

3.4 ESTADO DEL ARTE

Se presenta a continuación el resumen de algunas investigaciones anteriores en tratamientos criogénicos aplicados a distintos tipos de aceros.

TRATAMIENTO CRIOGÉNICO PARA CUCHILLAS ALEADAS DE USO EN LA INDUSTRIA DEL PAPEL. (1973) Julio Gómez y Héctor Parra en el año de 1973 pretendían conocer la influencia de las temperaturas criogénicas en el aumento de la resistencia al desgaste de las cuchillas para corte de papel usadas en la empresa Cartón de Colombia, su enfoque se basó en la regulación y control de temperaturas bajas y la selección del tratamiento criogénico más apropiado para aumentar la resistencia al desgaste. Usaron como líquido criogénico nitrógeno y realizaron nueve tratamientos a la misma temperatura pero variando los tiempos de enfriamiento, permanencia y calentamiento. Su forma de evaluación de los tratamientos fue mediante estudios de dureza y concluyeron que la mejor forma de homogeneizar dureza es con periodos de enfriamiento y calentamiento lentos, lo que conllevó a un incremento de vida útil de las cuchillas en un 30 %. En este

artículo se plantea que la mejora en las propiedades de las cuchillas se debió a la homogenización de durezas en la pieza que trataron térmicamente con periodos de enfriamiento y calentamiento lentos.

AUMENTO EN LA RESISTENCIA AL DESGASTE DE ACEROS PARA HERRAMIENTAS A TRAVÉS DE LA APLICACIÓN DEL TRATAMIENTO CRIOGÉNICO (2002).³⁷ Adrián Rendón y Cesar Stackpole en el 2002 realizaron un estudio sobre el aumento en la resistencia al desgaste de diez tipos de aceros para herramientas. Se realizaron pruebas tribológicas para los diez tipos de aceros y uno de ellos se utilizó en diferentes herramientas de campo. Los aceros fueron el A2, D2, D3, D6, H13, M2, O1, P20, S1, 420, todos los aceros analizados, excepto el D6, mostraron un aumento en la resistencia al desgaste estudio realizado mediante el ensayo de PIN ON DISK. El acero utilizado en campo aumentó su vida útil en un 182%. En este estudio se concluye que “la simulación de un sistema tribológico real en un laboratorio es prácticamente imposible, la mejor manera de evaluar un proyecto es bajo pruebas realizadas en campo, sin embargo expresan que si existe una relación entre el aumento en la resistencia al desgaste con la aplicación del tratamiento criogénico y la metalografía.

Los autores de este proyecto con sus estudios metalográficos atribuyen esta mejora a la precipitación de carburos y disminución de porcentaje de austenita retenida.

EFFECTOS DEL TRATAMIENTO CRIOGÉNICO PROFUNDO SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE ACEROS DE HERRAMIENTAS, (2007). Los autores de este artículo evaluaron los efectos del tratamiento criogénico (-196°C) sobre las propiedades de dos aceros de herramientas AISI M2 y AISI H13, encontraron que este tratamiento sobre aceros rápidos templados y revenidos mejora sus propiedades, en particular aumenta la dureza, mejora su

³⁷ ASM HANDBOOK, Op. cit.

homogeneidad, reduce el consumo de herramientas fabricadas con estos aceros y estos tratamientos criogénicos, disminuye la puesta a punto de los equipos y reduce un 50% en los costos de estas herramientas. Reportaron que mientras en el AISI M2 el incremento en la resistencia al desgaste puede ser atribuido al incremento de dureza, en el acero AISI H13 se le atribuye a la mejora en la tenacidad.

UNA REVISIÓN DEL ENFRIAMIENTO CRIOGÉNICO EN LOS PROCESOS DE MECANIZADO (2008), Yakup Yildiz, Muammer Nalbant concluyeron con su estudio lo siguiente: “La aplicación de un refrigerante en los procesos de corte puede incrementar la vida del herramental y la precisión dimensional, disminuyendo la temperatura de corte, la rugosidad de la superficie y la cantidad de potencia consumida en el proceso de corte de un metal y además la mejora de la productividad”; en este estudio, el nitrógeno líquido, como un refrigerante criogénico, fue investigado en detalle en término de métodos para su aplicación en las operaciones de remoción de material y sus efectos sobre las herramientas de corte y las propiedades del material a trabajar, temperatura de corte, vida/desgaste de la herramienta, rugosidad superficial, fuerzas de corte y fricción. En esta investigación concluyeron que el enfriamiento criogénico ha sido determinado como uno de los métodos más favorables para las operaciones de corte de material debido a su gran capacidad de mejorar considerablemente la vida de la herramienta a través del control de la temperatura de maquinado sobre la zona de corte.

En este artículo los autores destacan la importancia del nitrógeno líquido como agente reductor de temperatura en los procesos de mecanizado.

EFFECTOS DEL TRATAMIENTO CRIOGÉNICO SOBRE EL COMPORTAMIENTO ANTE EL DESGASTE DEL ACERO DE HERRAMIENTA D6. (NOV 28-2008). Los investigadores de este proyecto desarrollaron un ciclo térmico para este acero,

usaron dos temperaturas -63°C como temperatura criogénica suave y -185°C como temperatura criogénica profunda; se desarrollaron pruebas de desgaste usando el método de pin on disk con dos cargas diferentes y 3 velocidades diferentes; lograron aumentar la resistencia al desgaste de este acero atribuyendo el resultado a la disminución de porcentaje de austenita retenida y distribución de los carburos. Encontraron mejores resultados con el tratamiento criogénico profundo.

La mayoría de los artículos estudiados atribuyen mejoras de la resistencia al desgaste a la precipitación ó refinamiento de carburos y a la disminución del porcentaje de austenita retenida.

Es importante comentar que no se encontró ninguna información de tratamientos criogénicos sobre el acero que se va a estudiar en la presente investigación.

4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para la realización del presente trabajo se emplearon 7 fases las cuales se describen a continuación.

FASE 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Con el fin de obtener la adecuada documentación en este trabajo de grado se recopiló información de diversas fuentes tales como libros, artículos, páginas web y tesis teniendo en cuenta palabras claves como: criogenia, aceros de herramientas, aceros rápidos, ensayos de desgaste.

FASE 2: CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE BROCAS DE CENTRADO ANTES DEL PROCESO CRIOGÉNICO

Con el fin de evaluar las condiciones metalográficas de las brocas en su estado normal (antes del proceso criogénico) se tomaron algunas muestras y se verificó microestructura, presencia de austenita retenida, presencia y tamaño de carburos; Para estas evaluaciones se utilizó microscopía óptica realizada en la empresa Transejes, se usó un microscopio marca Olympus PME 3 y para la toma de las micrografías se usó un microdurómetro marca Zwick Roell también de la empresa Transejes y se trabajó con 100 y 400 aumentos. Para la microscopía electrónica de barrido se usó un equipo marca Jeol JSM-6490LV con un voltaje de aceleración de 20 KV, esta prueba fue realizada en la Universidad de Antioquia, las probetas fueron recubiertas con una película muy fina de oro para mejorar la conductividad y la lectura de resultados.

Figura 10. Microscópio electrónico de transmisión U de Antioquía



Fuente: Autor

Figura 11. Microscopio óptico de empresa Transejes



Fuente: Autor

Figura 12. Microdurómetro de empresa Transejes



Fuente: Autor

La preparación de las probetas para el análisis metalográfico se llevó a cabo según norma ASTM E3, y consistió en el desbaste húmedo con papel abrasivo de SiC de grano decreciente desde 80 hasta 600, posteriormente pulido fino con alúmina de 3 μ y 1 μ y con pasta de diamante de 1 μ . Finalmente el ataque para revelar microestructura que consistió en la inmersión durante 20 segundos en Nital al 2% se llevó a cabo de acuerdo a norma ASTM E 407 de 2007.

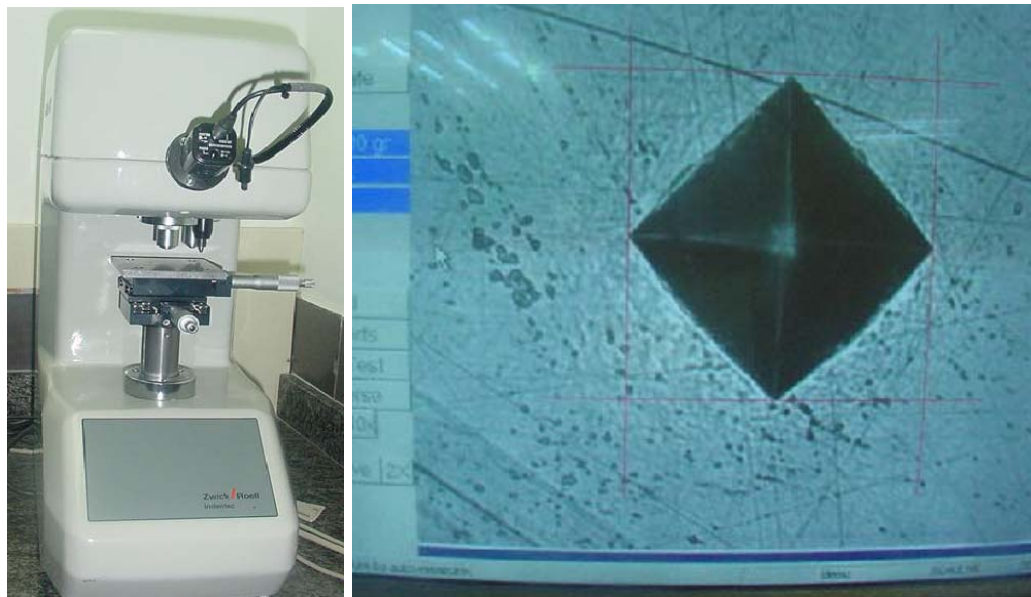
FASE 3: DETERMINACIÓN PROPIEDADES MECÁNICAS Y TRIBOLÓGICAS DE LAS BROCAS ANTES DEL TRATAMIENTO CRIOGÉNICO

En esta fase se verificó las condiciones de las brocas mediante la evaluación de sus propiedades mecánicas como son dureza, microdureza, y resistencia al desgaste para esto se utilizaron los siguientes equipos:

Durómetro indentec de la empresa Transejes, se usó dureza Rockwell C la cual es la recomendada para las piezas que son tratadas térmicamente.

Microdurómetro ZWICK ROELL de la empresa Transejes, se trabajó con microdureza Vickers usando una carga de 1000 gramos.

Figura 13. Microdurómetro Zwick Roell suministrado por la empresa Transejes



Fuente: Autor.

Con el objetivo de evaluar la resistencia al desgaste del acero de herramientas AISI M7 antes y después de los tratamientos criogénicos se hizo uso de la máquina de desgaste Pin On Disk bajo la norma ASTM G99. Los parámetros de operación del ensayo siendo estos carga, velocidad lineal y distancia recorrida se determinaron con base en las condiciones de operación reales de las brocas de acero AISI M7 que dieron origen al desarrollo de esta investigación. El disco usado fue fabricado en acero 1050, acero con el cual se fabricaron las piezas que se mecanizan en la empresa Transejes en las cuales son usadas las brocas evaluadas en este estudio, la velocidad lineal empleada en la prueba se calculó teniendo en cuenta que las revoluciones por minuto (RPM) efectuadas por la

máquina centradora que hace uso de las brocas son 850 RPM, con base en lo anterior y tomando como referencia brocas con 0.2 cm de radio, se determinó que la velocidad lineal es equivalente a 13,35 cm/s, calculada así:

$$V = \frac{850 \text{ giros}}{1 \text{ minuto}} \left(\frac{1 \text{ minuto}}{60 \text{ s}} \right) \left(\frac{2\pi(0.2\text{cm})}{1 \text{ giro}} \right) = 13,35\text{cm/s}$$

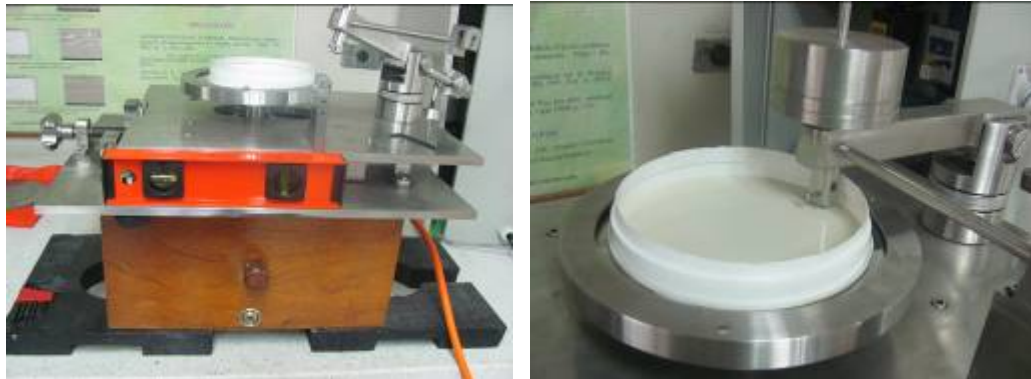
El tiempo de ensayo se estableció tomando como referencia la vida útil promedio de una broca como la estudiada, partiendo del hecho que la velocidad lineal es de 13.35cm/s, el tiempo que toma una perforación es de 8 segundos y el número promedio de perforaciones es de 650, calculándose de la siguiente forma:

$$\text{distancia} = d = \frac{0,1335\text{m}}{\text{s}} \cdot \frac{8\text{s}}{1 \text{ perforación}} \cdot 650 \text{ perforación} = 694.2\text{m}$$

Distancia que equivale a 5200 segundos de ensayo tomando como referencia la velocidad de 13,35cm/s recreada en el ensayo. Como carga se usaron 110 gramos correspondientes a 1.078 Newtons.

Los ensayos se realizaron en el equipo de la figura 14, dispuesto en el laboratorio del Grupo de Investigaciones en Corrosión de la Universidad Industrial de Santander.

Figura 14. Montaje empleado para la prueba Pin-On-Disk



Fuente: Autor.

Mediante este ensayo se determinó pérdida en peso de la muestra evaluada y se evaluó la morfología del desgaste mediante el uso de un microscopio Olympus BX41 ubicado en la sede de Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander.

De igual forma se hizo el montaje de algunas piezas en una centradora de la empresa Transejes para establecer un valor promedio de la duración de la vida útil de estas piezas mediante el conteo de piezas buenas fabricadas; los parámetros de la centradora se mantuvieron constantes y se resumen en la tabla 2.

Tabla 2. Parámetros operación centradora

PARÁMETRO	ESPECIFICACIÓN
Presión de anclaje	400+/- 50 PSI
Avances	0.80 +/- 0.1mm / seg
RPM	850

Fuente: Autor

FASE 4: DISEÑO CICLO TÉRMICO MEDIANTE UN DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Se tiene definido que las variables que afectan un proceso criogénico son básicamente tiempo y temperatura, por tal razón se desarrolló un diseño de experimentos de 2^2 con un punto intermedio, tomando como factores el tiempo y la temperatura de criogenización, asignando 3 niveles al primer factor y 3 al segundo respectivamente. En las tablas 3 y 4 se describe el diseño de experimentos.

Se establecieron 3 tiempos de criogenización, 10, 17 y 24 horas; y se varió la temperatura de criogenización entre -100,-142.5 y -185 °C.

Se escogieron 2 ciclos para repetir el de -100 y -185°C por 10 horas debido a que corresponde al ciclo más corto.

Tabla 3. Valores de los ciclos térmicos de criogenia

	DOMINIO EXPERIMENTAL		
FACTORES	Nivel inferior (0)	Nivel intermedio (1)	Nivel superior (2)
X_1 : Tiempo (Horas)	10	17	24
X_2 : Temperatura (grados centígrados)	-185	-142.5	-100

Fuente: El Autor.

Tabla 4. Diseño factorial completo 22 con un punto intermedio y plan de experimentación

MATRIZ DE EXPERIMENTOS			PLAN DE EXPERIMENTACIÓN		REPETICIONES
	X ₁	X ₂	Tiempo (horas)	Temperatura(°C)	
1	0	2	10	-100	2
2	0	0	10	-185	2
3	2	2	24	-100	1
4	2	0	24	-185	1
5	1	1	17	-142.5	2
TOTAL DE PROBETAS A EVALUAR					8

Fuente: Autor.

FASE 5: REALIZACIÓN DE PRUEBAS CON LOS DIFERENTES CICLOS CRIOGÉNICOS

Después del diseño de los ciclos criogénicos se viajó a la empresa GKN la cual se encuentra ubicada en la ciudad de Celaya en México, esta empresa cuenta con un equipo de criogenia mediante el uso nitrógeno líquido donde se procedió a realizar los tratamientos respectivos.

Primero que todo se llevó a cabo una evaluación del equipo con el fin de verificar que las variables críticas pudiesen ser controladas confiablemente y se pudo verificar que los parámetros son controlados mediante un PLC el cual contabiliza tiempo y controla temperatura mediante la inyección de nitrógeno líquido.

Durante cada ciclo se colocaban las brocas de centrado a evaluar dentro de la cámara y se programaba el respectivo ciclo. Es importante recalcar que el decrecimiento en la temperatura se hizo gradualmente con el fin de evitar choques térmicos que pudieran ocasionar fragilidad o fracturas en las piezas a evaluar.

Posterior al tratamiento criogénico se llevó a cabo un proceso de revenido a una temperatura de 190°C por un lapso de 4 horas con el fin de llevar a cabo un alivio de tensiones.

El detalle de los ciclos se describe en la tabla 5.

Tabla 5. Resumen de los ciclos criogénicos realizados a las brocas de centrado

Ciclo 1	T(°C)	25	-45	-73	-100	-45	25	190				
	t(horas)	1	1	1	10	1	0	4				
Ciclo 2	T(°C)	25	-45	-73	-100	-45	25	190				
	t(horas)	1	1	1	24	1	0	4				
Ciclo 3	T(°C)	25	-45	-73	-101	-116	-142	-156	-185	-45	25	190
	t(horas)	1	1	1	2	1	2	2	10	1	0	4
Ciclo 4	T(°C)	25	-45	-73	-101	-116	-142	-156	-185	-45	25	190
	t(horas)	1	1	1	2	1	2	2	24	1	0	4
Ciclo 5	T(°C)	25	-45	-73	-101	-116	-142	-156	-185	-45	25	190
	t(horas)	1	1	1	2	1	2	2	24	1	0	4
Ciclo 6	T(°C)	25	-45	-73	-100	-45	25	190				
	t(horas)	1	1	1	10	1	0	4				
Ciclo 7	T(°C)	25	-45	-73	-101	-116	-143	-45	25			
	t(horas)	1	1	1	2	1	17	1	0			
Ciclo 8	T(°C)	25	-45	-73	-101	-116	-143	-45	25			
	t(horas)	1	1	1	2	1	17	1	0			

Fuente: Autor.

FASE 6: CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE LAS BROCAS DESPUÉS DE LOS TRATAMIENTOS CRIOGÉNICOS

Con el fin de evaluar las condiciones metalográficas de las brocas después de los tratamientos criogénicos, se llevó a cabo la respectiva caracterización con el fin

de verificar aspectos como porcentaje de austenita retenida, condiciones de la martensita, refinamientos de carburos entre otros; Esta caracterización se hizo con microscopía electrónica de barrido en la universidad de Antioquía y microscopía óptica en la empresa Transejes, mismos equipos usados para la caracterización de las brocas sin los tratamientos criogénicos.

FASE 7: DETERMINACIÓN PROPIEDADES MECÁNICAS Y TRIBOLÓGICAS DE LAS BROCAS DESPUÉS DEL TRATAMIENTO CRIOGÉNICO

Adicional a las pruebas metalográficas anteriores, se verificó las condiciones de las brocas después de los tratamientos criogénicos mediante la evaluación de sus propiedades mecánicas como son dureza, microdureza, y resistencia al desgaste para esto se usaron los mismos equipos y los mismos parámetros con los que se caracterizó las brocas sin tratamiento criogénico. De igual forma se hizo el montaje de algunas piezas tratadas criogénicamente en la misma centradora de la fase 3 (iguales parámetros) para establecer un valor promedio de la duración de la vida útil de estas piezas mediante el conteo de piezas buenas fabricadas.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

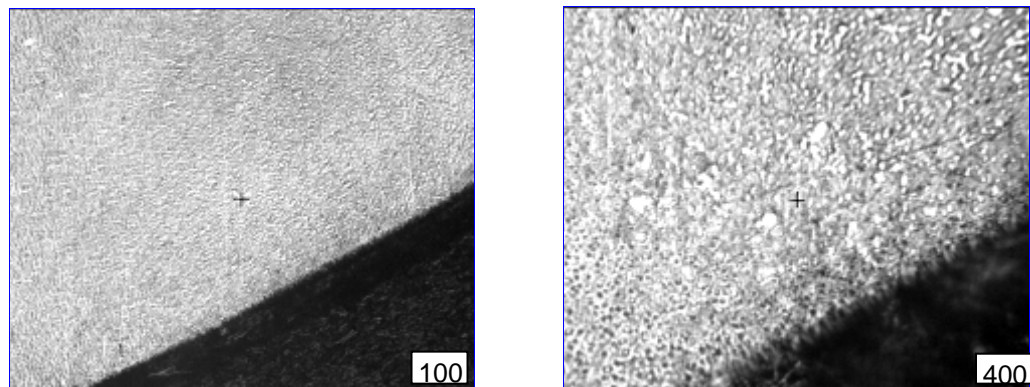
5.1 CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL

5.1.1 Microscopía óptica.

De cada ciclo realizado y de brocas sin tratamiento criogénico se llevó a cabo microscopía óptica, para esto se trabajó con lentes de 100 y 400 aumentos, en las figuras siguientes se verán cada una de las microestructuras obtenidas.

Las micrografías de la figura 15 corresponden al análisis metalográfico de una muestra en condiciones normales es decir sin tratamiento criogénico, en ellas se pueden observar carburos (fase blanca) en una matriz martensítica, en la evaluación realizada a la probeta no se observó presencia de austenita retenida.

Figura 15. Micrografías por microscopía óptica a 100 y 400 aumentos de una broca sin tratamiento criogénico



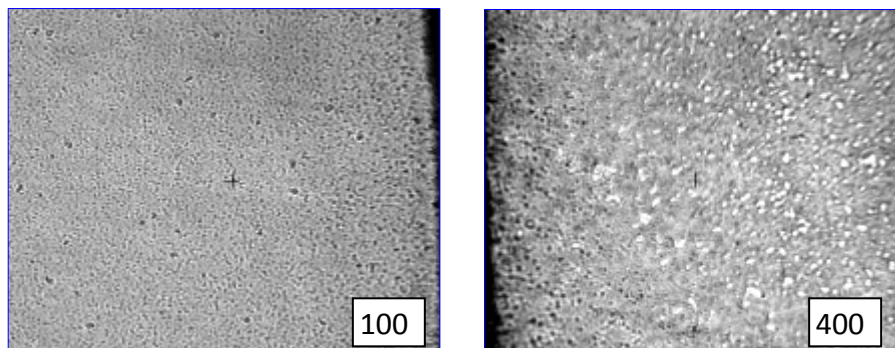
Nota: Se evidencia la presencia de carburos en una matriz martensítica.

Fuente: Autor.

Las micrografías de las figuras 16 a la 23 corresponden al análisis metalográfico de una broca de cada uno de los tratamientos criogénicos en ellas se pueden observar carburos (fase blanca) en una matriz martensítica, en la evaluación realizada a cada una de las probeta no se observó presencia de austenita retenida. Se consideran que los carburos son de Molibdeno por el alto contenido de este elemento en este tipo de acero.

Aunque la broca sin tratamiento criogénico no presentaba austenita retenida, es posible que algunas piezas sí la presenten y estos tratamientos garanticen la transformación completa de austenita en martensita aumentando la dureza y por ende la resistencia al desgaste,³⁸ sin embargo también se llevó a cabo microscopia electrónica de barrido para confirmar estos resultados.

Figura 16. Micrografías por microscopia óptica a 100 y 400 aumentos de una broca del ciclo criogénico 1

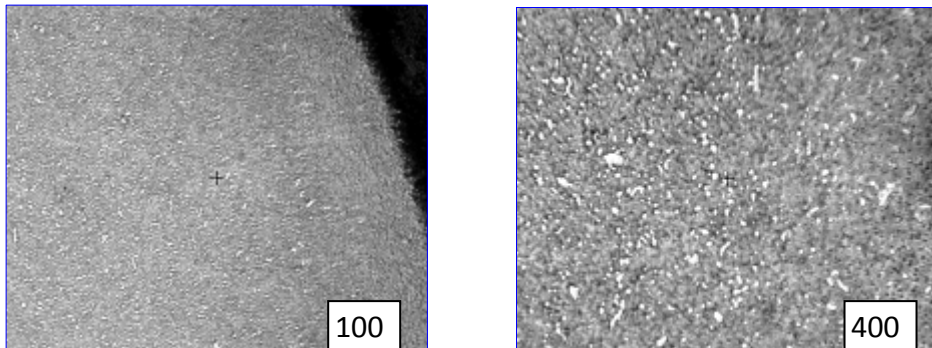


Nota: Se evidencia la presencia de carburos en una matriz martensítica.

Fuente: Autor.

³⁸ (1)

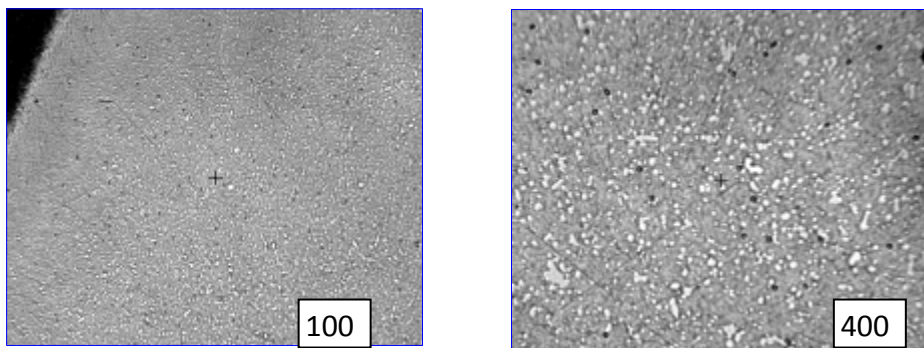
Figura 17. Micrografías por microscopía óptica a 100 y 400 aumentos de una broca del ciclo criogénico 2



Nota: Se evidencia la presencia de carburos en una matriz martensítica.

Fuente: El Autor.

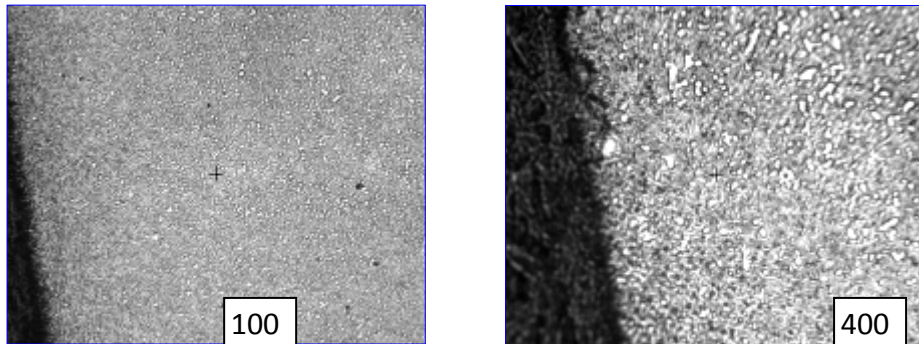
Figura 18. Micrografías por microscopía óptica a 100 y 400 aumentos de una broca del ciclo criogénico 3



Nota: Se evidencia la presencia de carburos en una matriz martensítica.

Fuente: Autor.

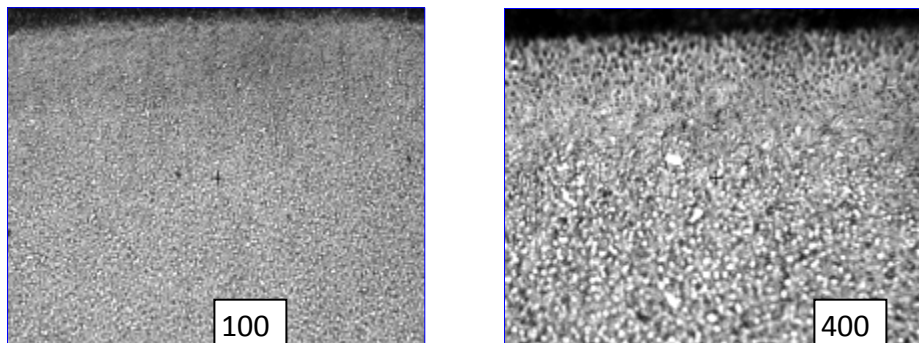
Figura 19. Micrografías por microscopía óptica a 100 y 400 aumentos de una broca del ciclo criogénico 4



Nota: Se evidencia la presencia de carburos en una matriz martensítica.

Fuente: Autor.

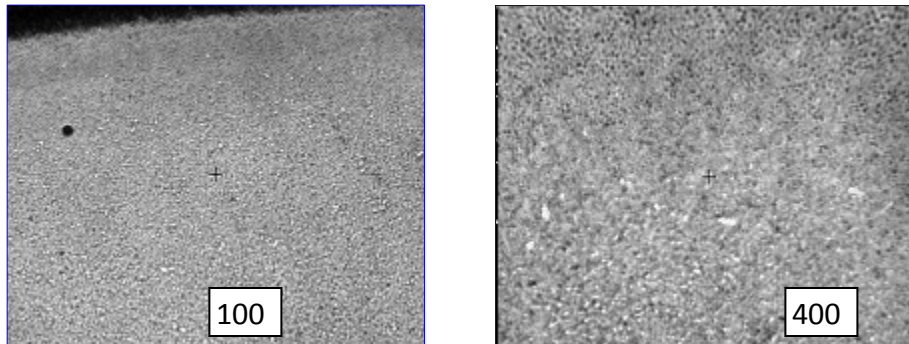
Figura 20. Micrografías por microscopía óptica a 100 y 400 aumentos de una broca del ciclo criogénico 5



Nota: Se evidencia la presencia de carburos en una matriz martensítica.

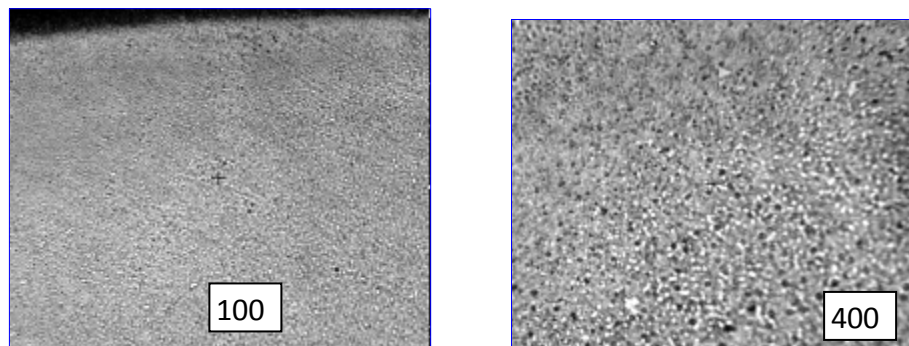
Fuente: El Autor.

Figura 21. Micrografías por microscopia óptica a 100 y 400 aumentos de una broca del ciclo criogénico 6



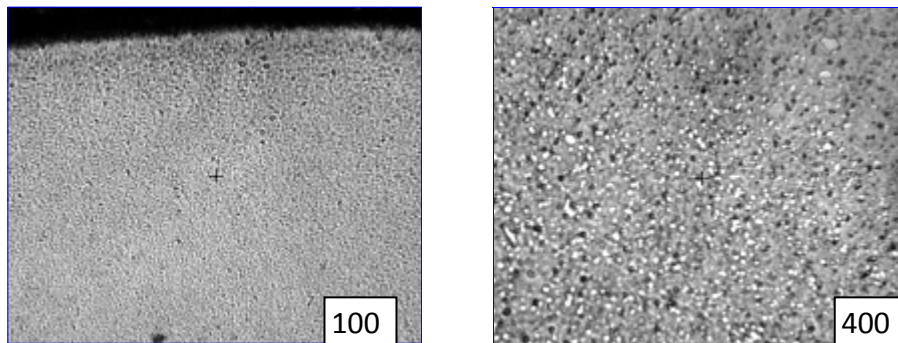
Nota: Se evidencia la presencia de carburos en una matriz martensítica.
Fuente: Autor.

Figura 22. Micrografías por microscopia óptica a 100 y 400 aumentos de una broca del ciclo criogénico 7



Nota: Se evidencia la presencia de carburos en una matriz martensítica.
Fuente: Autor.

Figura 23. Micrografías por microscopia óptica a 100 y 400 aumentos de una broca del ciclo criogénico 8



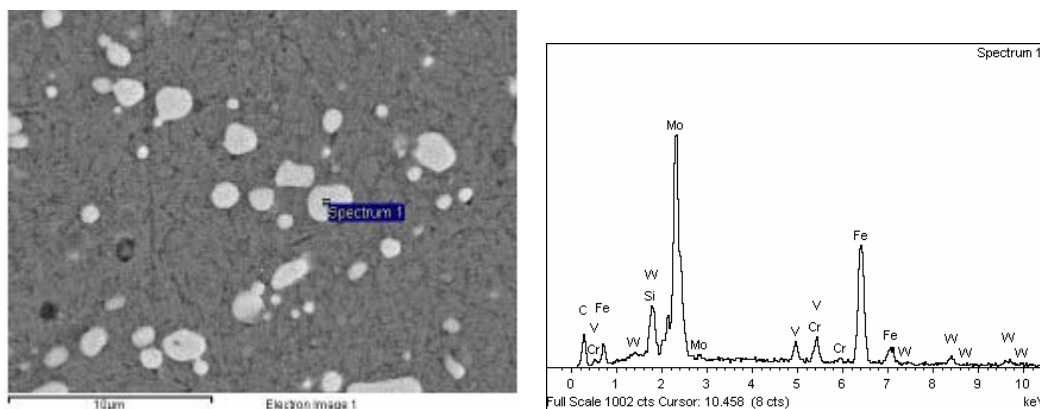
Nota: Se evidencia la presencia de carburos en una matriz martensítica.

Fuente: Autor.

5.1.2 Microscopia electrónica de barrido.

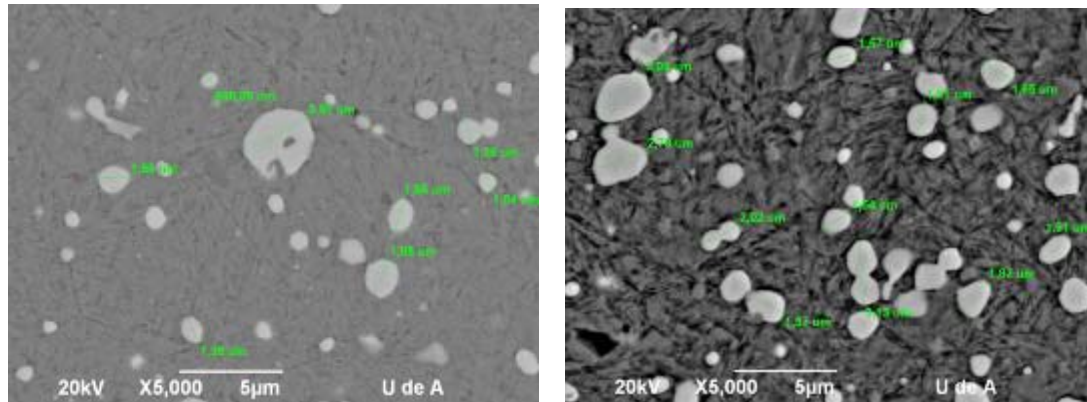
Con la microscopía electrónica de barrido, se confirmó la presencia de martensita revenida y carburos de Molibdeno en cada uno de los ciclos criogénicos, Además mediante esta técnica se llevó a cabo la medición de porcentaje de cada uno de estas fases, estos porcentajes se resumen en la tabla 6. De igual forma se anexan imágenes de cada una de las microestructuras encontradas para cada uno de los ciclos.

Figura 24. Micrografía por SEM broca sin tratamiento criogénico y EDX.



En el lado izquierdo se observa la microestructura de una broca sin tratamiento criogénico y al lado derecho el espectro químico donde se evidencian los carburos de molibdeno.

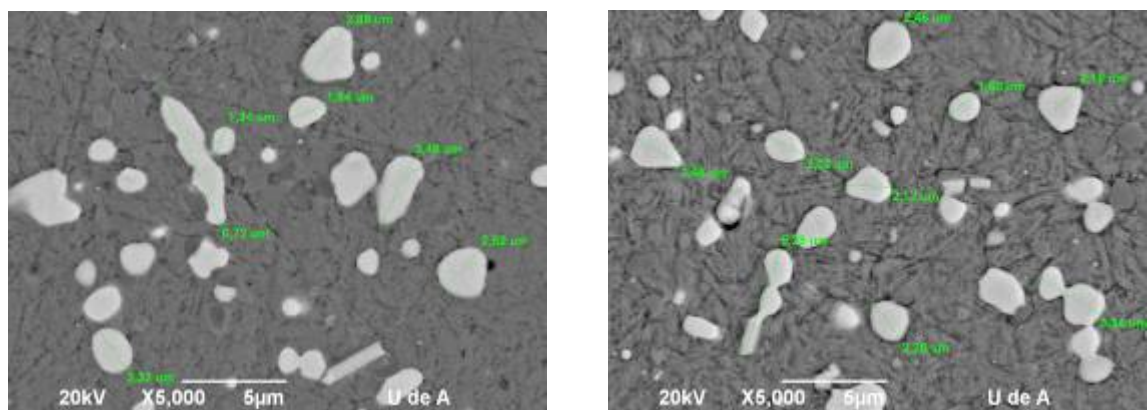
Figura 25. Micrografías por SEM de la broca tratada con el ciclo criogénico 1 (izquierda) y el ciclo criogénico 2 (derecha)



Nota: En Ambas imágenes se observa martensita revenida y carburos de molibdeno.

Fuente: Autor.

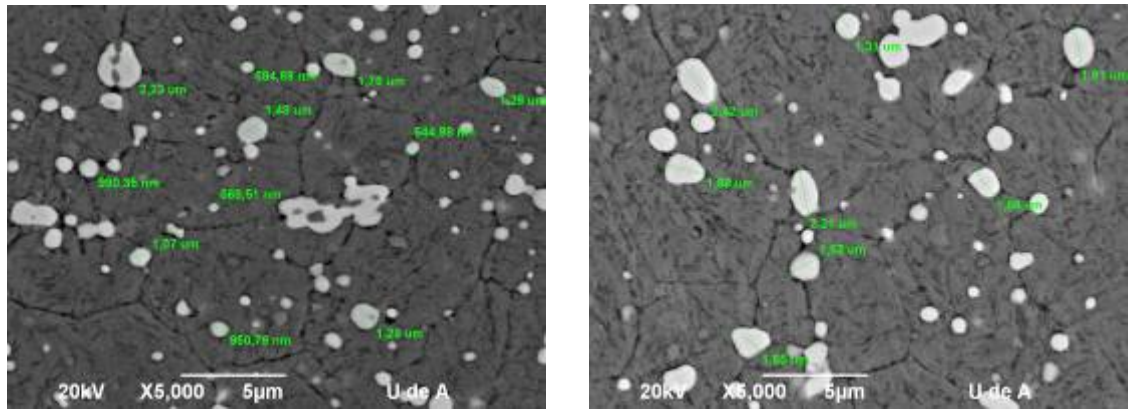
Figura 26. Micrografías por SEM de la broca tratada con el ciclo criogénico 3 (izquierda) y el ciclo criogénico 4 (derecha)



Nota: En Ambas imágenes se observa martensita revenida y carburos de molibdeno.

Fuente: Autor.

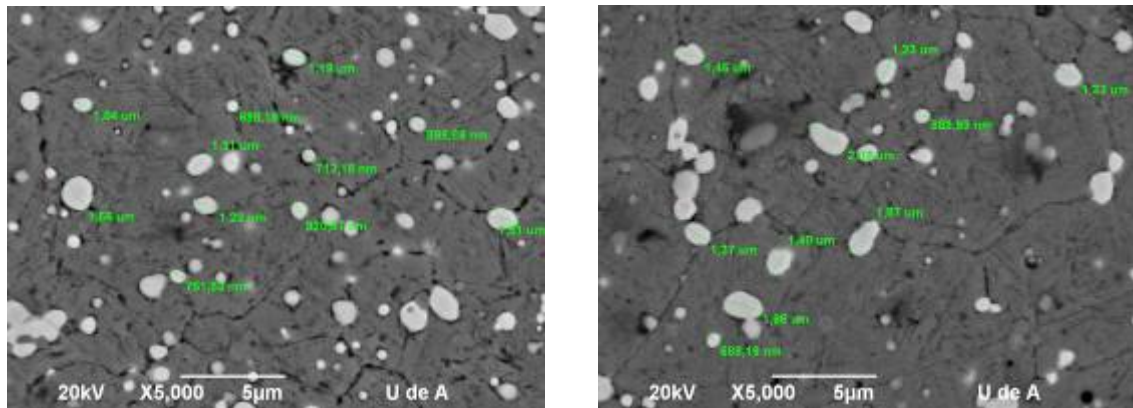
Figura 27. Micrografías por SEM de la broca tratada con el ciclo criogénico 5 (izquierda) y el ciclo criogénico 6 (derecha)



Nota: En Ambas imágenes se observa martensita revenida y carburos de molibdeno

Fuente: Autor.

Figura 28. Micrografías por SEM de la broca tratada con el ciclo criogénico 7 (izquierda) y el ciclo criogénico 8 (derecha)



En Ambas imágenes se observa martensita revenida y carburos de molibdeno.

Fuente: Autor.

Tabla 6. Resumen porcentaje de estructuras

TABLA RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE LOS CICLOS CRIOGÉNICOS			
Ciclo criogénico	% Austenita retenida	% Carburos de Molibdeno	% Martensita
Sin tratamiento	0	10,750	89,225
Ciclo 1	0	7,621	92,379
Ciclo 2	0	13,079	86,92
Ciclo 3	0	13,657	86,343
Ciclo 4	0	11,742	88,528
Ciclo 5	0	7,609	92,391
Ciclo 6	0	9,067	90,933
Ciclo 7	0	8,615	91,385
Ciclo 8	0	9,544	90,456

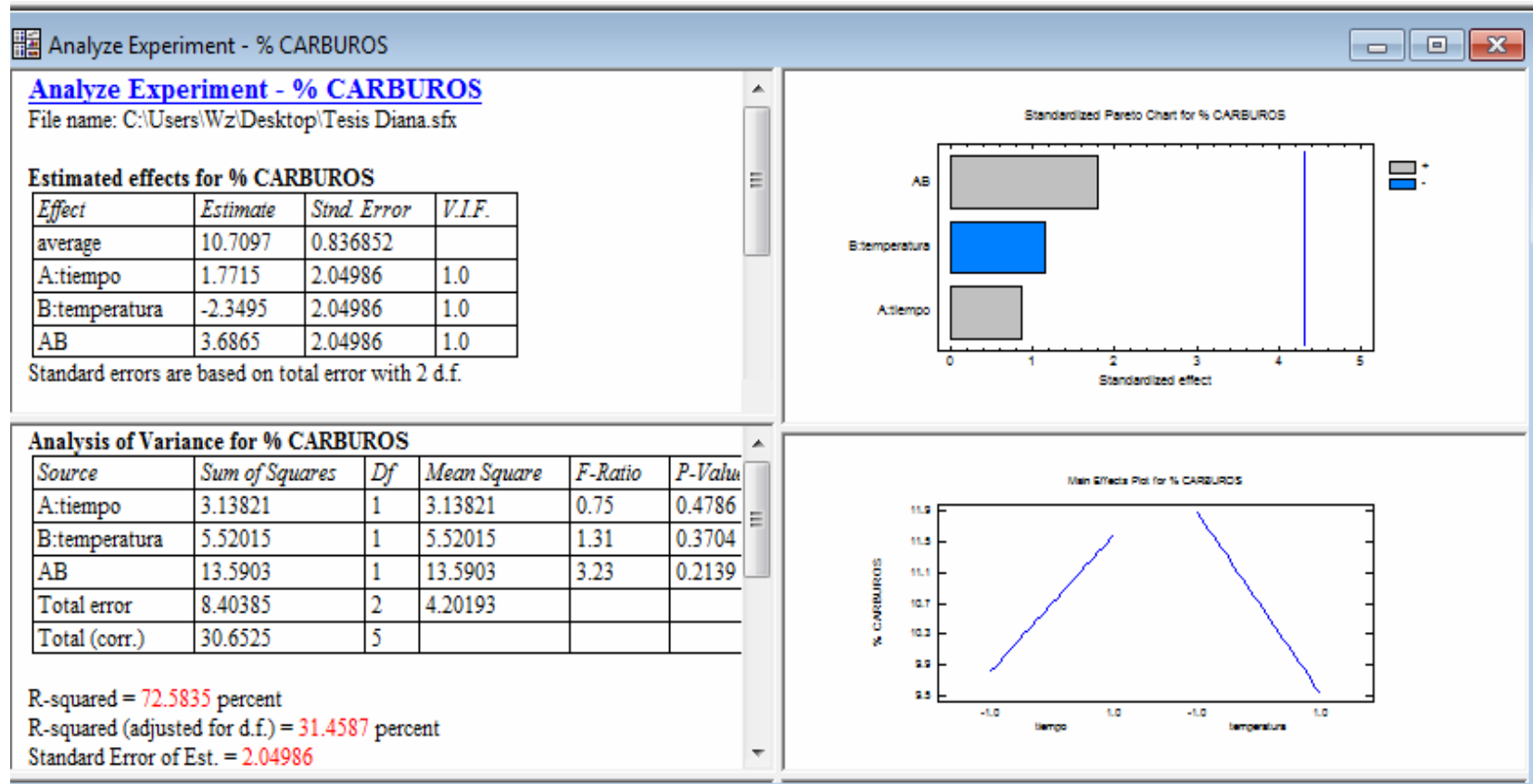
Fuente: Autor.

Los resultados de microscopía electrónica de barrido confirman la ausencia de austenita retenida en ninguna de las microestructuras. De igual forma comparando porcentaje de carburos antes y después de los tratamientos criogénicos se observa que hay precipitación de carburos en los ciclos 2, 3 y 4. En la broca sin tratamiento criogénico se puede observar que los carburos se encuentran localizados en ciertas regiones mientras que en las piezas que tienen tratamientos criogénicos los carburos presentan una distribución más uniforme y homogénea que conlleva a una estructura molecular densa, resultando una mayor superficie de contacto, reduciendo el calor, la fricción y el desgaste.³⁹ Mediante el uso de EDX se pudo confirmar que los carburos presentes son de Molibdeno.

Con el fin de observar la influencia de las variables tiempo y temperatura en la precipitación de carburos después de los tratamientos criogénicos fue usado un programa estadístico statgraphics. centurion.v 15.2.06; Los resultados se muestran a continuación.

³⁹ SYDNEY H., Avner. Op. cit.

Figura 29. Imagen de programa estadístico statgraphics donde se evidencia influencia del tiempo y la temperatura sobre el porcentaje de carburos



Analizando la gráfica obtenida se observa que tanto la temperatura como el tiempo afectan el porcentaje de carburos en las muestras evaluadas.

En el caso de la variable temperatura se puede observar que a las temperaturas más bajas hay mayor precipitación de carburos de Molibdeno los cuales pueden reducir los contenidos de aleantes y carbono en la matriz, lo cual conlleva a una matriz con mayor tenacidad y sumado a los altos contenidos de carbono a una mayor resistencia al desgaste.⁴⁰

Esta precipitación de carburos⁴¹ se debe a la transformación de austenita retenida a martensita y a la diferencia de contracciones térmicas entre la martensita y los carburos lo que conlleva a una alta cantidad de dislocaciones lo cual estimula fuerzas conductoras para la migración de carbono y, posteriormente, agrupaciones de éste junto a finos precipitados de carburos los cuales se evidenciaron en el análisis de la microestructura. De igual forma esta precipitación de carburos conlleva a la reducción en esfuerzos internos en la martensita lo cual reduce la tendencia a la formación de microgrietas de la matriz relativa a las fases carburo formadas durante el enfriamiento.⁴²

Referente al tiempo se puede observar que mayores tiempos de sostenimiento conllevan a la mayor precipitación de carburos. Esto puede ser originado por el hecho que estas piezas estaban revenidas antes del tratamiento criogénico por lo cual sus fases ya estaban estabilizadas, y debido a esto, requieren suficiente grado de enfriamiento y tiempo para ser transformadas a fases estables más duras y tenaces que ofrezcan mejores resistencia al desgaste.⁴³

⁴⁰ HUANG, j; ZHU Y.T; LIAO, X.Z, BEYERLIN I.J; Microstructure of cryogenic treated M2 tool steel. En: Elsevier. 2003, p. 241-244.

⁴¹ KELKAR ,P; NASH,P; The mechanism of property enhancement in M2 tool steel by cryogenic treatment. En: Elsevier. 2004, p. 108-109.

⁴² ASM HANDBOOK, Op. cit., p. 711-725

⁴³ MOHAN, D; RENGANARAYANAN, S; KALANIDHI, A. Cryogenic treatment to augment wear resistance of tool and die steels. En: Elsevier. Marzo, 2001. p.149-155.

5.2 PROPIEDADES MECÁNICAS

5.2.1 Durezas y microdurezas

En la tabla 7 se observan las medidas de dureza y microdureza de las brocas sin y con los distintos ciclos criogénicos, estas durezas y microdurezas fueron tomadas en puntos al azar a lo largo de toda las respectivas probetas.

Tabla 7. Valores de dureza y microdureza pieza sin tratamiento criogénico

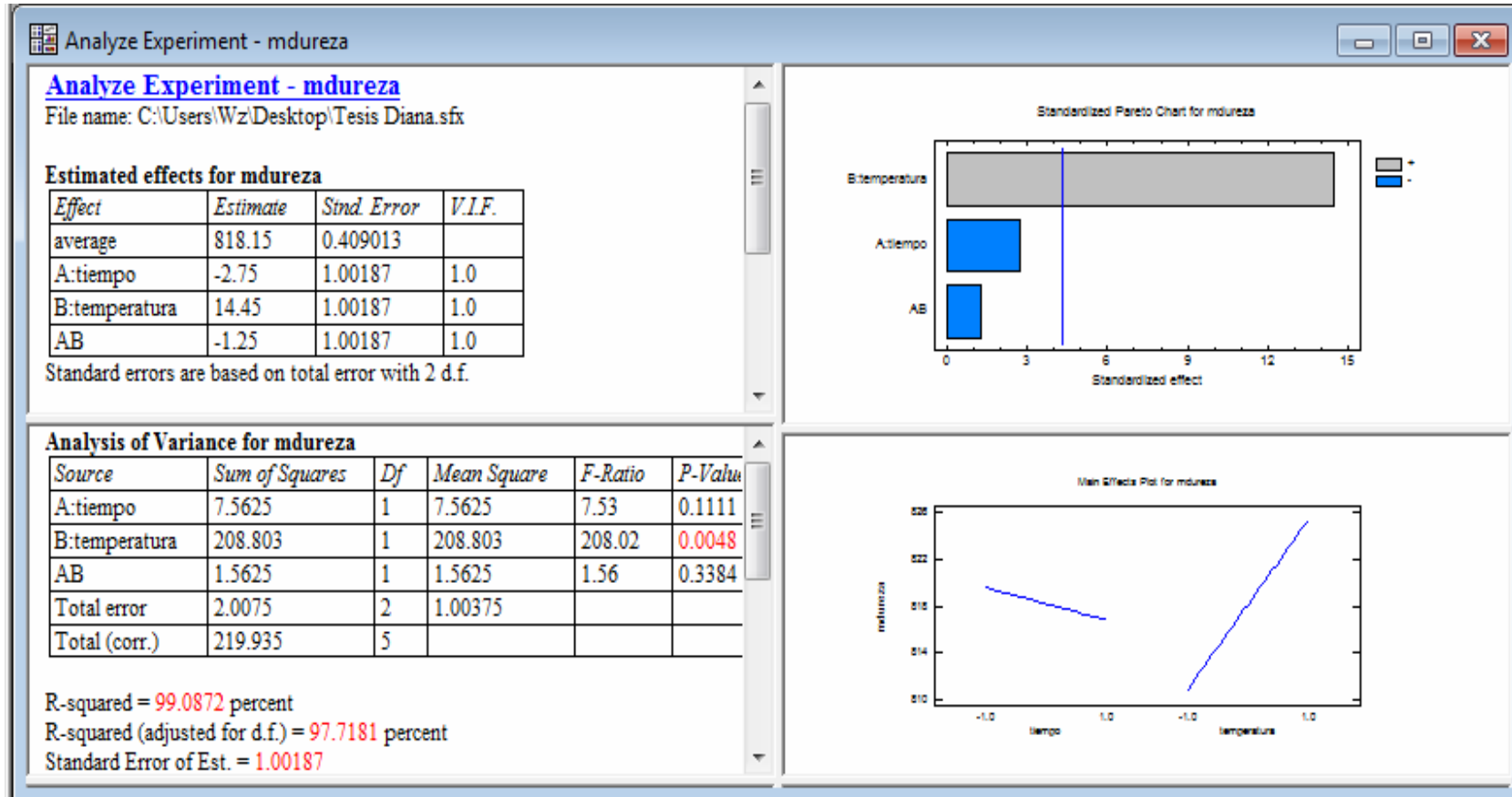
CICLO CRIOGENICO	DUREZA (HRC)	MICRODUREZ A (HV)	CICLO CRIOGENICO	DUREZ A (HRC)	MICRODUREZ A (HV)
SIN CICLO	60,7	817	5	61,3	844
	61,1	791		61,5	840
	58,7	794		59,9	809
	61,7	792		62	813
PROMEDIO	60,5	798,5	PROMEDIO	61,2	826,5
1	62,2	836	6	61,2	820
	60,5	824		61,2	813
	61,6	820		61,1	824
	60,1	828		61,3	828
PROMEDIO	61,1	827	PROMEDIO	61,2	821,3
2	60,8	824	7	60,8	828
	61,8	824		60,9	809
	61,7	828		61,6	824
	61,4	816		60,2	816
PROMEDIO	61,4	823	PROMEDIO	60,9	819,3
3	62,1	805	8	60,7	813
	62,1	817		60	820
	62,1	810		60,3	824
	61,7	813		61,1	817
PROMEDIO	62	811,3	PROMEDIO	60,5	818,5
4	61,5	809			
	61,7	801			
	61,5	809			
	62,1	820			
PROMEDIO	61,7	809,8			

Fuente: Autor.

Estos resultados muestran que existe un pequeño incremento en la dureza y la microdureza de las brocas con tratamientos criogénicos comparado con las que no tienen estos procesos, lo que origina una mayor resistencia al desgaste.

Con el fin de evaluar la influencia de los parámetros tiempo y temperatura en estas dos variables se uso el programa estadístico Statgraphics Centurion, donde se analizó lo siguiente:

Figura 30. Imagen de programa estadístico statgraphics donde se evidencia influencia del tiempo y la temperatura sobre la microdureza de las brocas tratadas criogénicamente.

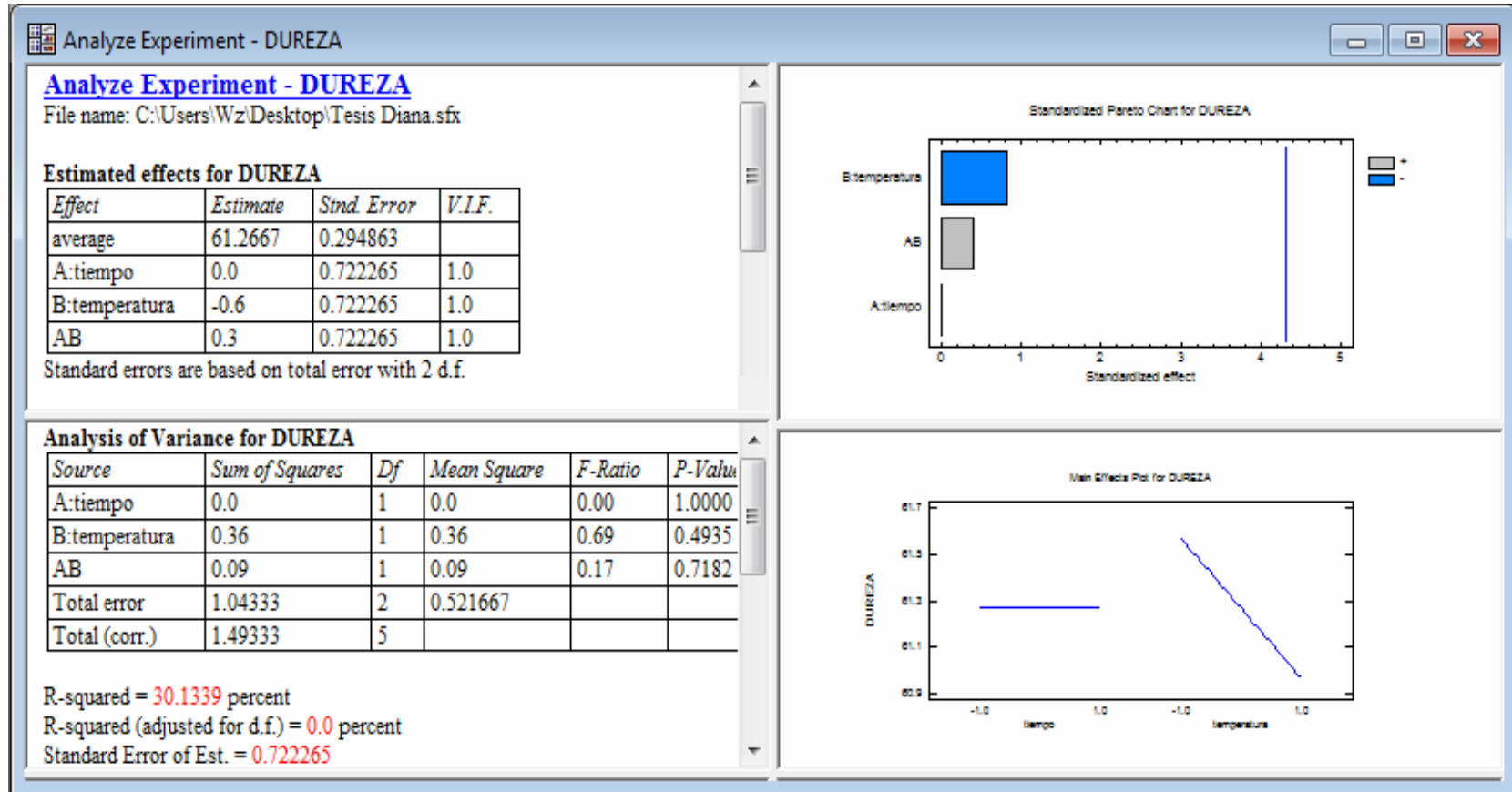


En el caso de la microdureza (figura 30) se puede observar que la temperatura juega un papel importante en esta variable y es la que más influye en los resultados, a temperaturas más altas (menos frías) se observan microdurezas más altas, en cuanto al factor tiempo se observa que a mayores tiempos la microdureza va disminuyendo. Este fenómeno no es muy claro sin embargo en bibliografía se encuentra que los valores bajos de dureza corresponden a austenita retenida y además ha sido probado que un simple tratamiento en frío a -80°C ⁽¹⁴⁾ es suficiente para transformar la austenita en martensita. Es importante recalcar que estos valores de microdureza pudiesen haber sido tomados sobre agujas de martensita o carburos de molibdeno lo que puede no permitir comparar los resultados.

En el caso de la dureza (figura 31) se puede observar que la temperatura influye considerablemente en este resultado a temperaturas más bajas (más frías) se observan las mejores condiciones de dureza. El tiempo no es un factor que afecte esta propiedad. Lo que comenta la bibliografía acerca de este tema es que alrededor de los -80°C se asegura la terminación de la transformación de la austenita en martensita para cualquier acero, por lo que se obtiene una estructura 100% martensítica. Esta transformación es independiente del tiempo, solo es necesario que el material llegue a la temperatura M_f para que la transformación se lleve a cabo.

La influencia de la temperatura en la dureza tiene el mismo comportamiento que en la precipitación de carburos.

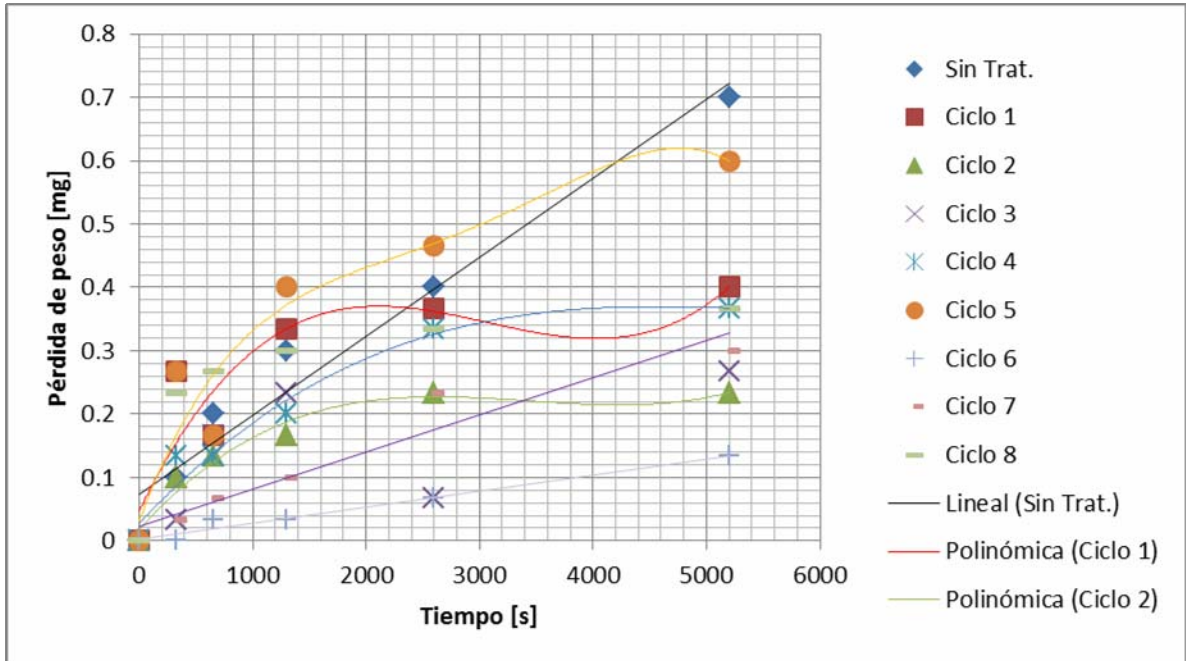
Figura 31. Imagen de programa estadístico statgraphics donde se evidencia influencia del tiempo y la temperatura sobre la dureza de las brocas tratadas criogénicamente



5.2.2 Resistencia al desgaste.

El detalle de la pérdida en masa se encuentra en la tabla 8 y en la figura 32.

Figura 32. Curvas de pérdida en masa de las brocas después del ensayo de pin on disk



En las curvas se puede observar la pérdida en masa que sufrieron las brocas después de lapsos de tiempo a medida que se iba realizando el ensayo de pin on disk. Se puede observar que la broca sin tratamiento criogénico fue la que presentó mayor pérdida en masa, es decir la de menor resistencia al desgaste, debido a que tiene la menor dureza y microdureza. Se observó que el comportamiento que el comportamiento de las brocas en cuanto a pérdida en peso, varía entre ciclo y ciclo, algunas brocas de ciclos que fueron repetidos presentan un comportamiento diferente entre ellos, su pérdida en masa varía considerablemente.

Se esperaba que esta pérdida de masa fuera inversamente proporcional a las durezas y microdurezas obtenidas sin embargo no se observó este comportamiento, algunas piezas con durezas más altas que otras presentaron pérdida en peso mayor, probablemente por la condición de la superficie de la broca al ser mecanizada para el ensayo.

Ejemplo de esto se puede observar en las tablas de pérdida en masa y durezas. Con el programa estadístico statgraphics se analizó la influencia de las variables tiempo y temperatura sobre la pérdida en masa, el resultado se muestra en la figura 33.

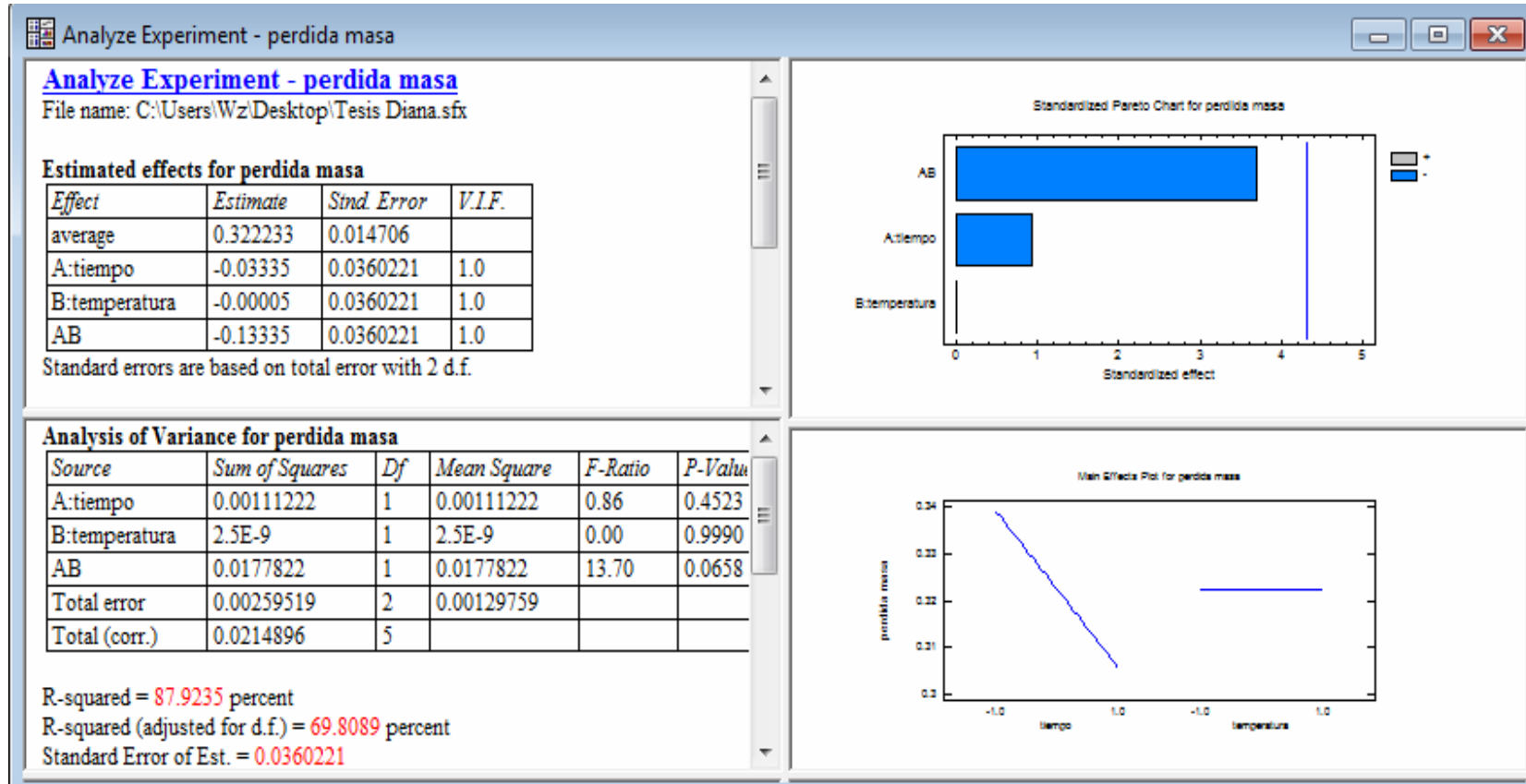
Al analizar el resultado de pérdida en masa se puede observar que la temperatura no tiene ninguna influencia en el comportamiento de la pérdida en masa, mientras que el tiempo si, aquellos ciclos donde el tiempo de sostenimiento es más largo presentan menos pérdida en masa esto puede ser relacionado con la explicación dada para el porcentaje de carburos en la cual se concluye que mayores tiempos de sostenimiento para permitir la precipitación de los carburos finos.

Tabla 8. pérdida en masa brocas luego de ensayo pin on disk.

Pérdida de Masa en POD [Gramos]						
Tiempo [seg]	0	325	650	1300	2600	5200
Sin Tratamiento	4.0810	4.0809	4.0808	4.0806	4.0805	4.0803
	4.0809	4.0808	4.0807	4.0807	4.0805	4.0802
	4.0809	4.0808	4.0807	4.0806	4.0806	4.0802
4.0809	0	0.1000	0.2000	0.3000	0.4000	0.7000
Ciclo 1	4.2694	4.2692	4.2692	4.2692	4.2691	4.2691
	4.2695	4.2692	4.2694	4.2691	4.2692	4.269
	4.2695	4.2692	4.2693	4.2691	4.2690	4.2691
4.2695	0	0.2667	0.1667	0.3333	0.3667	0.4000
Ciclo 2	4.2582	4.2581	4.2582	4.2582	4.2579	4.2581
	4.2583	4.2581	4.258	4.2581	4.258	4.258
	4.2582	4.2582	4.2581	4.2579	4.2581	4.2579
4.2582	0	0.1000	0.1333	0.1667	0.2333	0.2333
Ciclo 3	4.0781	4.0781	4.0781	4.0781	4.0782	4.0779

Pérdida de Masa en POD [Gramos]						
Tiempo [seg]	0	325	650	1300	2600	5200
	4.0782	4.0781	4.0779	4.0779	4.078	4.0781
	4.0782	4.0782	4.078	4.0778	4.0781	4.0777
4.0782	0	0.0333	0.1667	0.2333	0.0667	0.2667
Ciclo 4	4.2566	4.2565	4.2566	4.2565	4.2563	4.2563
	4.2567	4.2566	4.2565	4.2564	4.2563	4.2563
	4.2567	4.2565	4.2565	4.2565	4.2564	4.2563
4.2567	0	0.1333	0.1333	0.2000	0.3333	0.3667
Ciclo 5	4.4621	4.4619	4.4619	4.4616	4.4616	4.4615
	4.4621	4.4618	4.4621	4.4617	4.4617	4.4615
	4.4622	4.4619	4.4619	4.4619	4.4617	4.4616
4.4621	0	0.2667	0.1667	0.4000	0.4667	0.6000
Ciclo 6	4.2366	4.2366	4.2366	4.2366	4.2365	4.2365
	4.2366	4.2366	4.2365	4.2366	4.2366	4.2364
	4.2366	4.2366	4.2366	4.2365	4.2365	4.2365
4.2366	0	0.0000	0.0333	0.0333	0.0667	0.1333
Ciclo 7	3.8601	3.8601	3.8601	3.86	3.8598	3.8598
	3.8601	3.8601	3.86	3.86	3.8599	3.8598
	3.8601	3.86	3.86	3.86	3.8599	3.8598
3.8601	0	0.0333	0.0667	0.1000	0.2333	0.3000
Ciclo 8	3.0785	3.0782	3.0782	3.0782	3.0782	3.0782
	3.0785	3.0783	3.0782	3.0782	3.0782	3.0781
	3.0785	3.0783	3.0783	3.0782	3.0781	3.0781
3.0785	0	0.2333	0.2667	0.3000	0.3333	0.3667

Figura 33. imagen de programa estadístico statgraphics donde se evidencia influencia del tiempo y la temperatura sobre la pérdida de masa de las brocas tratadas criogénicamente



5.3 MORFOLOGÍA DE LAS SUPERFICIES

La evaluación de la morfología de las superficies fue realizada antes y después del ensayo de pin on disk. Esta evaluación fue realizada a 40 aumentos, en todas las superficies después del ensayo se pudo evidenciar huellas de desgaste tanto abrasivo como adhesivo ocasionados por el contacto entre la broca y el material base, lo que se refleja en las superficies de las brocas son rayaduras irregulares, algunas profundas y otras superficiales con incluso desprendimiento de material, señales claves de estos tipos de desgastes. Con estos aumentos no es posible observar alguna característica adicional a las ya mencionadas (figuras 34 a la 42).

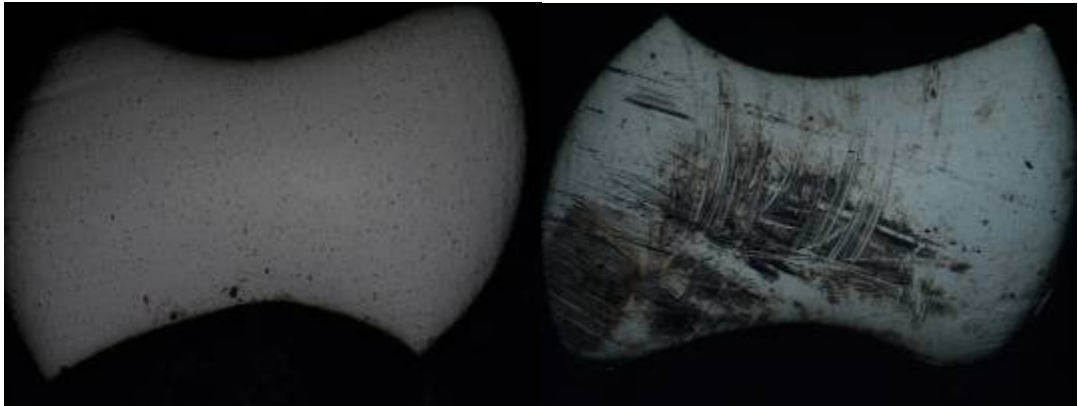
El desgaste abrasivo es ocasionado por los carburos duros dispersados en la microestructura de las brocas al entrar en contacto con las superficies a mecanizar.⁴⁴

Adicionalmente la bibliografía⁴⁵ recomienda que las superficies deben ser evaluadas por microscopía electrónica de barrido con el fin de observar la profundidad de las huellas o rayaduras producidas por el ensayo, o con el fin de observar presencia de deformación plástica o mecanismos de desgaste adhesivo como ruinas (debris) de desgaste.

⁴⁴ MOLINARY, A.; PELIZARRI, S; GIALANELLA, G. Effect of deep cryogenic treatment on the mechanical properties of tool steels. En: Elsevier,2001,p. 350-355.

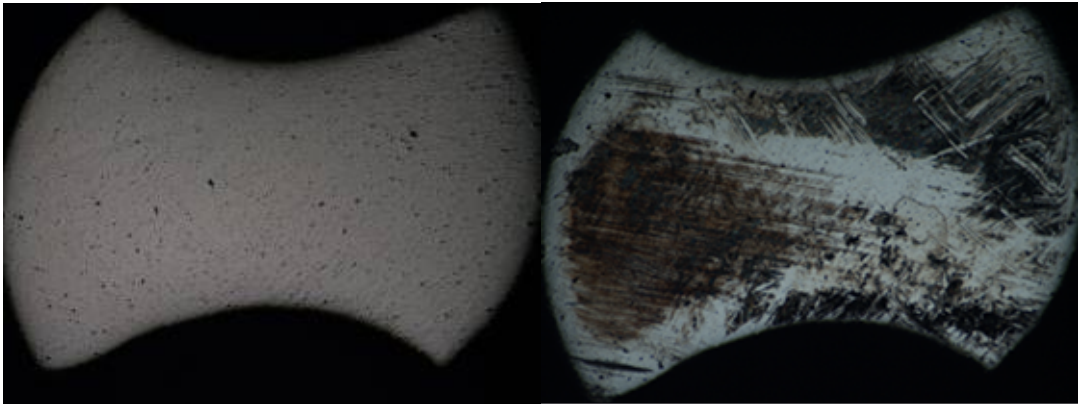
⁴⁵ AKHBARIZADEH, A; SHAFYEI, A; GOLOZAR ,M. Effect of cryogenic treatment on wear behavior of D6 tool steel. En: Elsevier. 2009. p.3259-3264.

Figura 34. Superficies de la broca sin tratamiento criogénico antes y después del ensayo de pin on disk (4X)



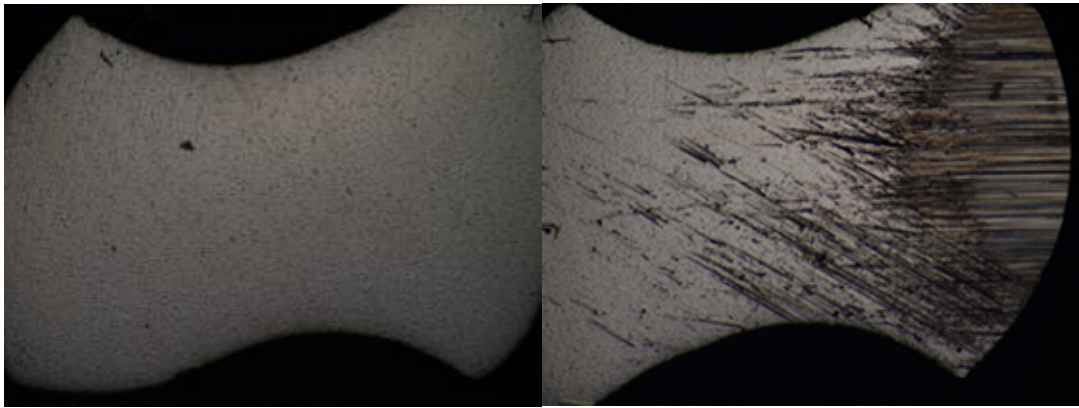
Fuente: Autor.

Figura 35. Superficies de la broca del ciclo criogénico 1 antes y después del ensayo de pin on disk (4X)



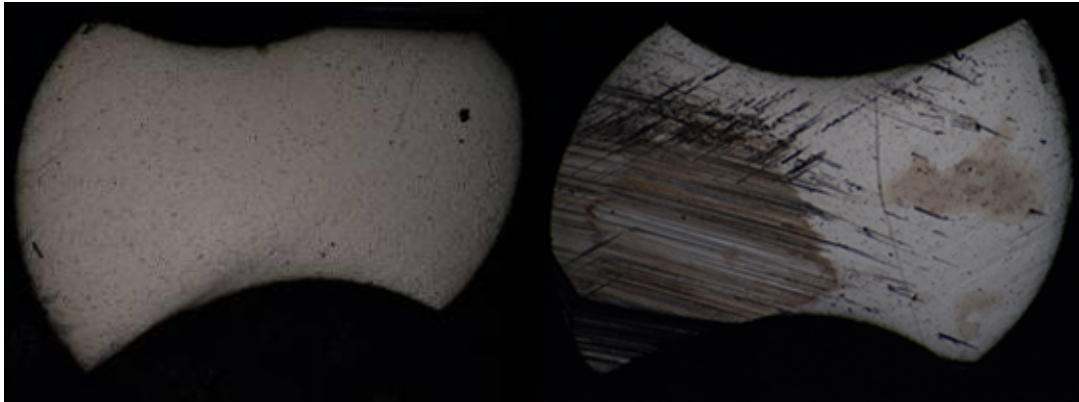
Fuente: Autor.

Figura 36. Superficies de la broca del ciclo criogénico 2 antes y después del ensayo de pin on disk (4X)



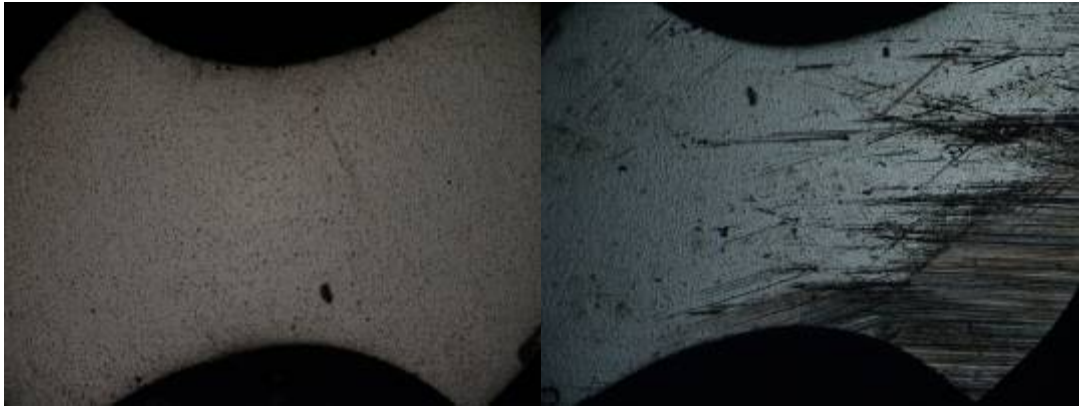
Fuente: Autor.

Figura 37. Superficies de la broca del ciclo criogénico 3 antes y después del ensayo de pin on disk (4X)



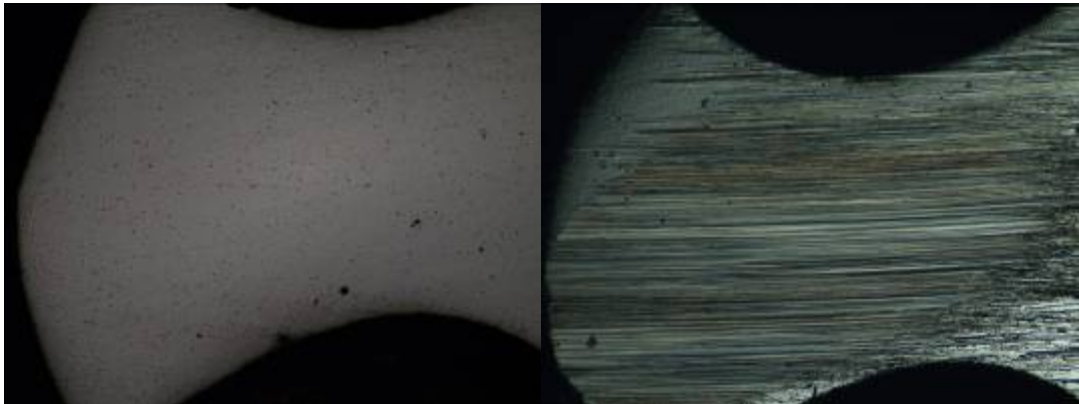
Fuente: Autor.

Figura 38. Superficies de la broca del ciclo criogénico 4 antes y después del ensayo de pin on disk (4X)



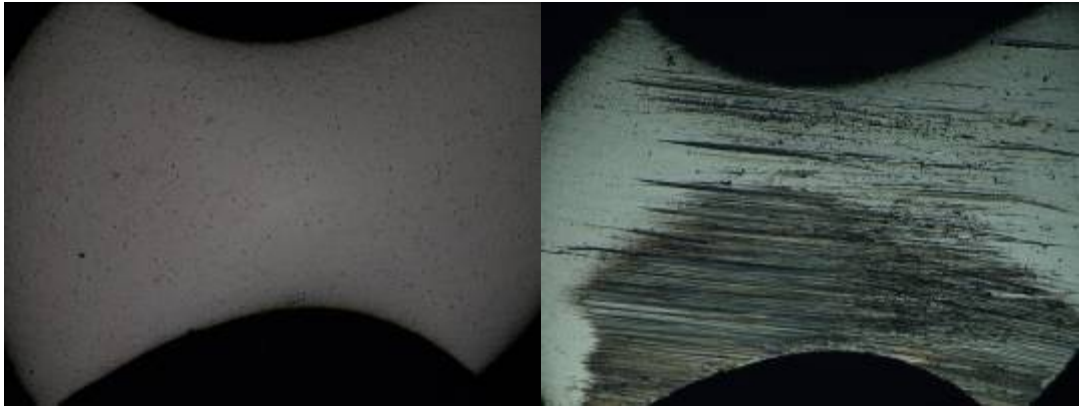
Fuente: Autor.

Figura 39. Superficies de la broca del ciclo criogénico 5 antes y después del ensayo de pin on disk (4X)



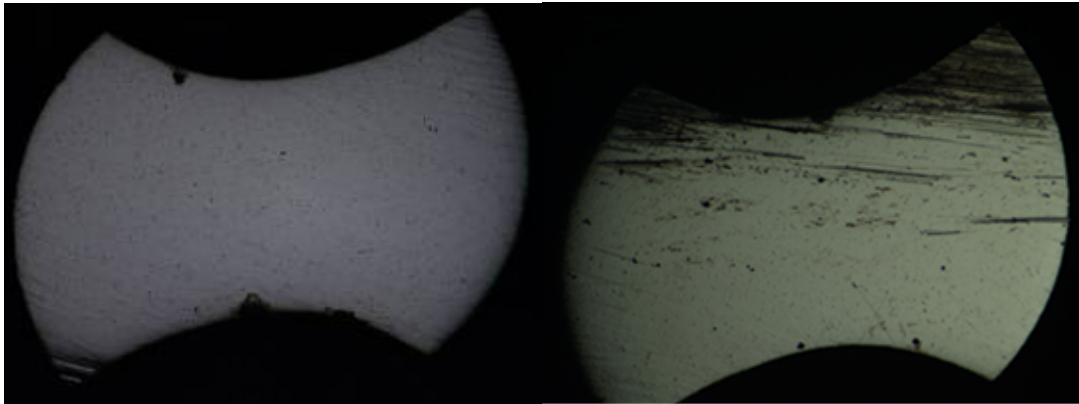
Fuente: Autor.

Figura 40. Superficies de la broca del ciclo criogénico 6 antes y después del ensayo de pin on disk (4X)



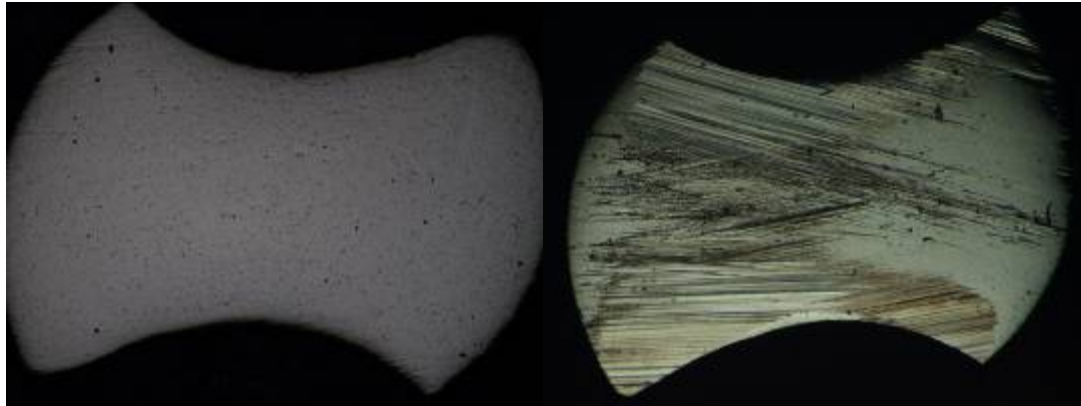
Fuente: Autor.

Figura 41. Superficies de la broca del ciclo criogénico 7 antes y después del ensayo de pin on disk (4X)



Fuente: Autor.

Figura 42. Superficies de la broca del ciclo criogénico 8 antes y después del ensayo de pin on disk (4X)



Fuente: Autor.

5.4 DETERMINACIÓN DE VIDA ÚTIL

Brocas sin y con los tratamientos criogénicos fueron montadas en una centradora de la empresa Transejes. Los resultados se resumen en la tabla 9. Los parámetros de la centradora se mantuvieron constantes.

Tabla 9. Resumen de los resultados de vida útil de las brocas

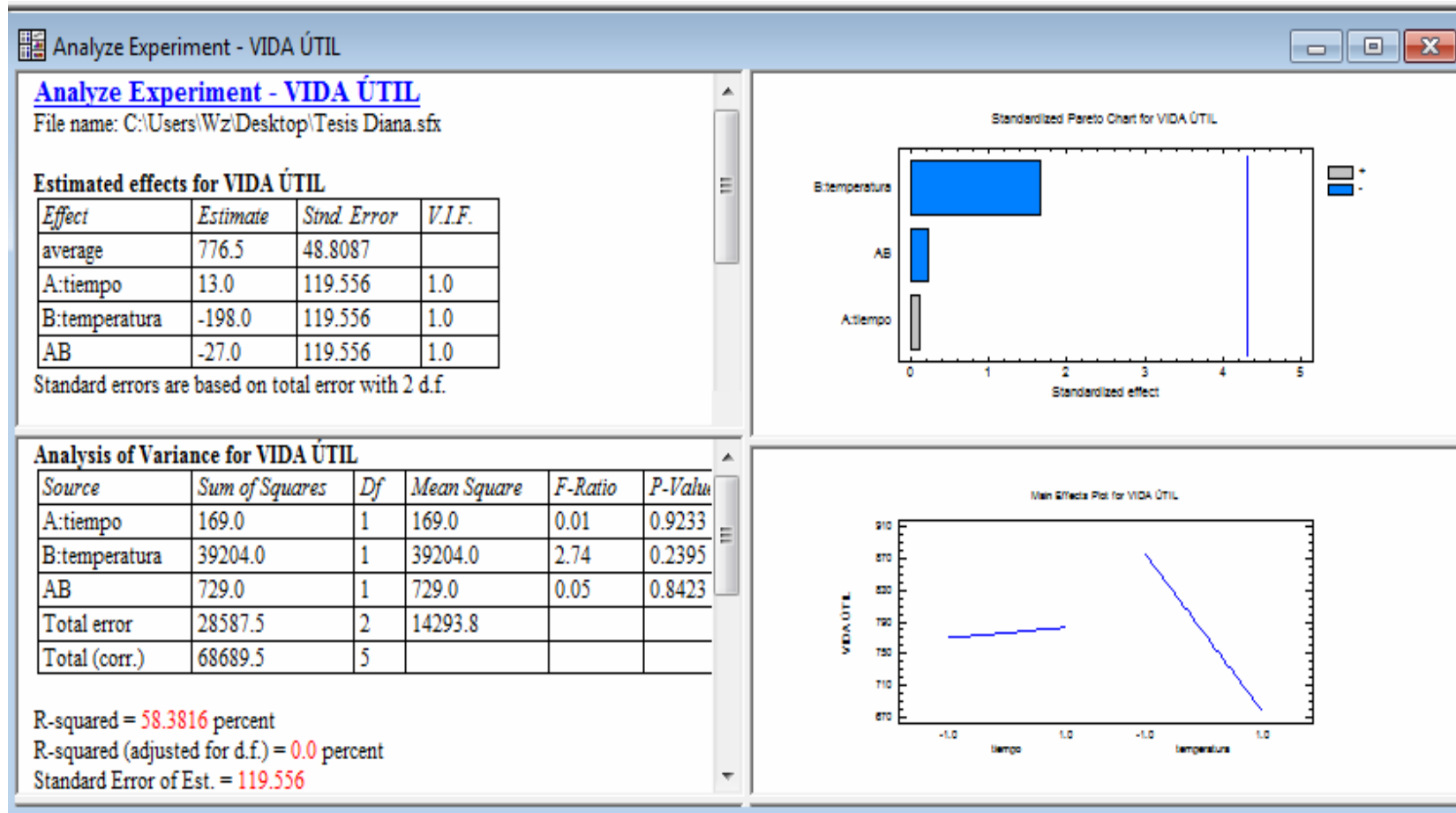
NÚMERO DE BROCA	CICLO CRIOGÉNICO	DURACIÓN (FILO 1)	DURACIÓN (FILO 2)	PROMEDIO DE PIEZAS POR CICLO
1	1	710	700	705
2	2	689	693	691
3	3	853	800	876
4	3	950	900	
5	4	932	900	916
6	5	820	800	692
7	5	630	518	

NÚMERO DE BROCA	CICLO CRIOGÉNICO	DURACIÓN (FILO 1)	DURACIÓN (FILO 2)	PROMEDIO DE PIEZAS POR CICLO
8	6	1270	950	900
9	6	688	690	
10	7	740	736	844
11	7	1000	900	
12	8	600	650	627
13	8	657	600	
14	sin ciclo	641	539	590

Con esta evaluación se encontró que existe mucha variación en la duración de las brocas, en algunos casos donde se montaron brocas del mismo ciclo tal como la broca número 8 y la número 9 se observa una diferencia significativa en su duración. Por tal razón se concluye que este ensayo no es muy diciente pues puede haberse afectado por el montaje de la broca, estado del portaherramientas, entre otros. Sin embargo se comprueba que los tratamientos criogénicos si mejoraron la duración de las piezas al compararlas con brocas sin tratamientos criogénicos, esto atribuible al aumento de la dureza y microdureza.

Mediante el programa estadístico statgraphics se analizó la influencia del tiempo y la temperatura sobre esta característica y se encontró que la temperatura tiene una gran influencia, el comportamiento es el mismo mostrado para la dureza y el porcentaje de carburos, los mismos mecanismos descritos anteriormente aplican a este comportamiento.

Figura 43. Imagen de programa estadístico statgraphics donde se evidencia influencia del tiempo y la temperatura sobre la vida útil de las brocas tratadas criogénicamente



CONCLUSIONES

Los tratamientos criogénicos mejoraron las propiedades mecánicas de las brocas de acero rápido HSS AISI M7, se observó aumento en la dureza, microdureza, vida útil, resistencia al desgaste entre otros.

Todos los ciclos criogénicos mejoraron la vida útil de las brocas, aspecto muy importante para las industrias que buscan mayor competitividad. Sin embargo no se encontró un ciclo en particular que presentará un mejor comportamiento frente a los otros, esto se pudo corroborar mediante el uso del programa estadístico statgraphics donde se observó que la influencia de las variables tiempo y temperatura varía de acuerdo a la característica o propiedad que se evalúe.

La obtención de mayor porcentaje de carburos es influenciada por el uso de las temperaturas criogénicas más bajas y los tiempos de exposición más largos esto debido que a temperaturas más bajas hay mayor precipitación de carburos de Molibdeno los cuales pueden reducir los contenidos de aleantes y carbono en la matriz, lo cual conlleva a una matriz con mayor tenacidad y sumado a los altos contenidos de carbono a una mayor dureza y por ende a una mayor resistencia al desgaste que se ve reflejado en la mayor vida útil de las brocas. De igual forma el mayor tiempo puede ser originado por el hecho que estas piezas estaban revenidas antes del tratamiento criogénico por lo cual sus fases ya estaban estabilizadas y debido a esto requieren suficiente grado de enfriamiento y tiempo para ser transformadas a fases estables más duras y tenaces que ofrezcan mejores resistencia al desgaste.

La dureza de las brocas criogénicas se ve influenciada por menores temperaturas de criogenización y no por el tiempo, pues según la bibliografía esta característica

se ve influenciada por la austenita retenida y aunque en la broca sin tratamiento criogénico no se observó tal vez por que estaba en muy pequeñas proporciones, temperaturas por debajo de -80°C aseguran la terminación de la transformación de la austenita en martensita, esta transformación es independiente del tiempo.⁴⁶

En la morfología de las superficies después del ensayo de pin on disk se evidenció huellas de desgastes tanto adhesivo como abrasivo reflejados por las rayaduras superficiales e irregulares e incluso desprendimiento de material.

El principio físico que explica la mejora de las propiedades mediante la criogenia es la transformación de la austenita retenida en martensita, además de la conformación de una matriz con carburos distribuidos uniforme y homogéneamente que conlleva a una estructura molecular densa, resultando una mayor superficie de contacto, reduciendo el calor, la fricción y el desgaste.⁴⁷

De igual forma es posible que la mejora de las propiedades sea atribuible al perfeccionamiento de la estructura cristalina, mediante la eliminación de vacancias, traslapes, dislocaciones, etc., Transformación que resulta en una liberación de esfuerzos residuales muy considerable, haciendo más tenaz al material tratado.⁴⁸

Los resultados de los tratamientos criogénicos sobre las brocas de acero M7 son casi impredecibles pues estos pueden verse afectados por material, tratamientos térmicos anteriores, entre otros.

La vida útil o duración de las brocas de centrado aumento entre un 18 y un 55% lo que conlleva a mejoras en productividad al igual que en reducción de costos para

⁴⁶ CCI CÁMARAS CLIMÁTICAS; Op. cit.

⁴⁷ SYNED H., Avner, Op. cit.

⁴⁸ CCI CÁMARAS CLIMÁTICAS; Op. cit.

las empresas que usan estas brocas de acero AISI M7 para los procesos de centrado.

El ciclo criogénico que se recomienda en definitiva para aumentar la vida útil es el correspondiente a -185°C durante 24 horas a esta temperatura.

RECOMENDACIONES

Se observa mucha dispersión en los datos obtenidos en cada uno de los ciclos criogénicos, por tal motivo se recomienda hacer un estudio más detallado con mayor cantidad de muestras con el fin de corroborar el fenómeno que genera la mejora de las condiciones de las piezas después de los tratamientos criogénicos.

Es muy importante a su vez llevar a cabo pruebas con ciclos criogénicos antes del revenido de las piezas con el fin de evaluar la respuesta de las piezas con este método, algunos autores ¹⁴ comentan que no es conveniente revenir antes de este tratamiento pues el revenido estabiliza los carburos e inhibe la transformación durante el tratamiento criogénico.

Revenidos a temperaturas mayores a la usada en este proyecto o dobles revenidos pueden mejorar la precipitación de carburos y garantizar la transformación de la austenita retenida en martensita. Se recomienda hacer estos ensayos.

BIBLIOGRAFÍA

AKHBARIZADEH, A; SHAFYEI, A; GOLOZAR ,M. Effect of cryogenic treatment on wear behavior of D6 tool steel. En: Elsevier. 2009. p.3259-3264.

AKHBARIZADEH, A; SHAFYEI, A; GOLOZAR, M; Effect of cryogenic treatment on wear behavior of D6 tool steel. En: Elsevier. 2008.

ASM HANDBOOK, Heat treating. Volume 4, Cold Treating and Cryogenic Treating and Cryogenic treatment of steel. 2001. p 204-205

BLOG, CCI CÁMARAS CLIMÁTICAS. Temple criogenico - Ciclado térmico [En línea]. México, 2009. [Consultado el 20 de diciembre de 2010, 10:00 p.m.]. Disponible en Internet: <URL: <http://cci-calidad.blogspot.com/2008/10/temple-criogenico-ciclado-termico.html>>

BOURNE, G, R., SAWYER, W, G., KAUFMAN, M, J. Effects of cryogenic treatment of AISI D2 tool steel. STLE, Annual Meeting 2003.

CRYOBEST INTERNATIONAL. El proceso Cryobest ® [En línea]. 2009. [Consultado el 20 de diciembre de 2011, 9:09 p.m.]. Disponible en Internet: <URL:<http://www.cryobest.com/esp/0202.html>>

CRYOINFRA, S.A. Tratamiento Térmico Subcero N2 [En línea]. México, 2010. [20 de diciembre de 2011, 9:33 p.m.]. Disponible en Internet: <URL:<http://www.cryoinfra.com/aplicaciones/item/87-tratamiento-t%C3%A9rmico-subcero-n2>>

FUENTES, Rosalba. ¿Y El desgaste? [En línea]. Guanajato, México. 2006. Disponible em Internet: <URL:<http://quimica.ugto.mx/revista/2/Desgaste.htm>>

FUENTES, Rosalba. ¿Y El desgaste? [En línea]. Guanajato, México. 2006. Disponible em Internet: <URL:<http://quimica.ugto.mx/revista/2/Desgaste.htm>>

GKN. Celaya, Presentación confidencial de avances criogénicos en herramientas de corte.

HUANG, J; ZHU' Y.T; LIAO, X.Z, BEYERLIN I.J; Microstructure of cryogenic treated M2 Tool Steel. En: Elsevier. 2003.

IRIAS, Adrián y STACKPOLE, César. Aumento en la resistencia al desgaste de aceros para herramientas a través de la aplicación de tratamiento criogénico, proyecto de grado ingeniería de materiales. 2004.

KELKAR, P.; NASH, P. The mechanism of property enhancement in M2 tool steel by cryogenic treatment. En: Elsevier. 2004, p. 108-109.

KHAN, A; AHMED,M; Improving tool life using cryogenic cooling. En: Elsevier. 2007.

MARTINEZ, R, Aplicaciones del criogénico en las herramientas de corte. México. 2008.

MOHAN, D; RENGANARAYANAN, S; KALANIDHI, A. Cryogenic treatment to augment wear resistance of tool and die steels. En: Elsevier. Marzo, 2001. p.149-155.

MOHAN, D; RENGANARAYANAN, S; KALANIDHI, A: Cryogenic treatment to augment wear resistance of tool and die steels. (2001). (Artículo revista Elsevier)

MOLINARY, A.; PELIZARRI, S; GIALANELLA, G. Effect of deep cryogenic treatment on the mechanical properties of tool steels. En: Elsevie. 2001. p. 350-355.

PINEDO, Julio y PARRA, Héctor. Tratamiento criogénico para cuchillas aleadas de uso en la industria del papel. Proyecto de Grado Ingeniería Mecánica. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 1973.

RUSIÑOL, Marco. Efecto del tratamiento criogénico en las propiedades mecánicas de los aceros de herramienta de trabajo en frío, proyecto de grado ingeniería de materiales. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial. Barcelona. 2004.

SKF GROUP. Disponible en Internet: <URL:www.skf.com/cmimages/237678.jpg>

SYDNEY H., Avner. Introducción a la metalurgia física. Segunda Edición. Mc Graw Hill.

VALENCIA, Asdrúbal. Tecnología del tratamiento térmico de los metales. Segunda Edición. Editorial Universidad de Antioquia.1992.

ANEXOS

Anexo A. Ficha técnica de Acero AISI M7 con la cual se fabrican las brocas

BÖHLER S400

Eigenschaften

Hochlegierter Molybdän - Schnellarbeitsstahl mit hohem Verschleißwiderstand und hoher Zähigkeit.

Properties

High alloyed molybdenum high speed steel with good resistance and high toughness.

Verwendung

Gewinde- und Spiralbohrer, Reibahlen, Fräser, Räumwerkzeuge und Kaltfließpreßstempel.

Applications

Taps, twist drills, reamers, milling tools, broaches tools, cold extrusion dies.

Chemische Zusammensetzung

(Anhaltswerte in %)

C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W
1,02	0,40	0,30	3,80	8,60	1,90	1,80

Chemical analysis

(Average values, in %)

Normen

DIN / EN
< 1.3348 >
HS2-9-2

AISI
M7

UNE
F6607
2-9-2

UNI
HS2-9-2

Standards

UNS
T11307

JIS
SKH58

AFNOR
Z100DCWV09-04-02-02

Anexo B. Fotos de las instalaciones de la Cámara Criogénica en GKN Celaya

Recinto donde se encuentra la cámara criogénica



Panel de control de variables de los procesos criogénicos



Vista exterior de la cámara criogénica



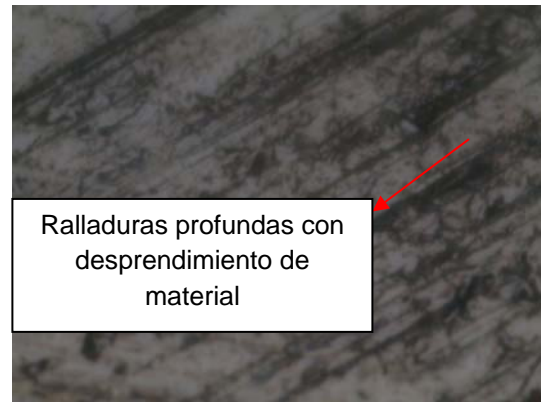
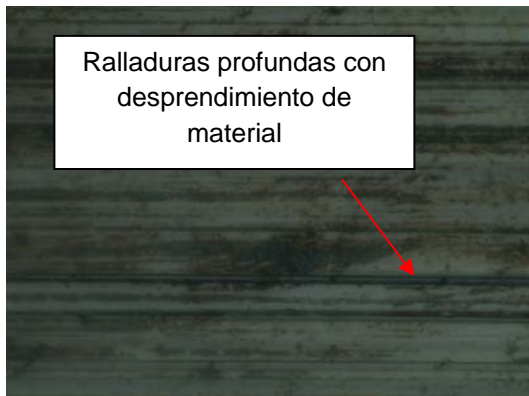
Vista interna de la cámara criogénica.



ANEXO C. Micrografías de Superficies de desgaste a 800 aumentos donde se observan ralladuras superficiales con desprendimiento de material (desgaste abrasivo)



Morfología superficie ciclo 2.



Morfología superficie ciclo 1.

