



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica

**TRATAMIENTOS CRIOGÉNICOS Y LA PROPUESTA DE SU ENSAYO COMO  
PRÁCTICA DEL LABORATORIO DE METALURGIA Y METALOGRAFÍA**

**Luis Rodolfo Gómez Corzo**

Asesorado por el Ing. Hugo Leonel Ramírez Ortiz

Guatemala, julio de 2010

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**TRATAMIENTOS CRIOGÉNICOS Y LA PROPUESTA DE SU ENSAYO COMO  
PRÁCTICA DEL LABORATORIO DE METALURGIA Y METALOGRAFÍA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

**LUIS RODOLFO GÓMEZ CORZO**

ASESORADO POR EL ING. HUGO LEONEL RAMÍREZ ORTIZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO**

GUATEMALA, JULIO DE 2010

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Luis Pedro Ortíz de León
VOCAL V	Agr. José Alfredo Ortíz Herincx
SECRETARIA (a.i.)	Inga. Mayra Grisela Corado

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Esdras Feliciano Miranda Orozco
EXAMINADOR	Ing. Luis Alfredo Asturias Zúñiga
EXAMINADOR	Ing. Guillermo Izaguirre Noriega
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **TRATAMIENTOS CRIOGÉNICOS Y LA PROPUESTA DE SU ENSAYO COMO PRÁCTICA DEL LABORATORIO DE METALURGIA Y METALOGRAFÍA,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, el 14 de febrero de 2008.

Luis Rodolfo Gómez Corzo

Guatemala 23 de Abril de 2010

Ingeniero  
Julio Cesar Campos Paiz  
Director  
Escuela de Ingenieria Mecánica  
USAC

Señor Director:

Por medio de la presente, informo a usted que he revisado el trabajo de graduación titulado: **“TRATAMIENTOS CRIOGÉNICOS Y LA PROPUESTA DE SU ENSAYO COMO PRÁCTICA DEL LABORATORIO DE METALURGIA Y METALOGRAFÍA”**, el cual fue realizado por el estudiante LUIS RODOLFO GÓMEZ CORZO, el cual lo encuentro satisfactorio.

Sin otro particular, me es grato suscribirme a usted.

Atentamente,



---

Ing. Hugo Leonel Ramirez Ortiz  
Colegiado 5545  
Asesor

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA**

El Coordinador del Área de Materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado **TRATAMIENTOS CRIOGÉNICOS Y LA PROPUESTA DE SU ENSAYO COMO PRÁCTICA DEL LABORATORIO DE METALURGIA Y METALOGRAFÍA**, del estudiante Luis Rodolfo Gómez Corzo, recomienda su aprobación.

**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez

Coordinador de Área

Guatemala, junio de 2010.

/bhdci

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA**

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, después de conocer el dictamen del asesor, con la aprobación del Coordinador del Área de Materiales, al Trabajo de Graduación titulado TRATAMIENTOS CRIOGÉNICOS Y LA PROPUESTA DE SU ENSAYO COMO PRÁCTICA DEL LABORATORIO DE METALURGIA Y METALOGRAFÍA del estudiante Luis Rodolfo Gómez Corzo, procede a la autorización del mismo.

**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

Ing. Julio César Campos Paiz  
**DIRECTOR**



Guatemala, julio de 2010

JCCP/behdei

Universidad de San Carlos  
De Guatemala



Facultad de Ingeniería  
Decanato

Ref. DTG. 243.2010

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al trabajo de graduación titulado: **TRATAMIENTOS CRIOGÉNICOS Y LA PROPUESTA DE SU ENSAYO COMO PRÁCTICA DEL LABORATORIO DE METALURGIA Y METALOGRAFÍA**, presentado por el estudiante universitario **Luis Rodolfo Gómez Corzo**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRIMASE.

Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos  
DECANO



Guatemala, julio de 2010

/gdech

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>DIOS</b>	Por Él vivimos y en Él morimos.
<b>VIRGEN MARÍA</b>	Por interceder por mí, a lo largo de mi vida.
<b>UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS</b>	Por abrirnos las puertas al conocimiento.
<b>FACULTAD DE INGENIERÍA</b>	En especial a la Escuela y al claustro de Ingeniería Mecánica.
<b>MIS PADRES RODOLFO Y ELVIRA</b>	Por enseñarme el camino para ser un hombre de bien y de progreso para mi país, ellos son los cimientos donde se edifica mi vida. Siempre serán mis héroes.
<b>MI HERMANA PAOLA</b>	Por ser mi amiga, mi apoyo incondicional y un gran ejemplo a seguir.
<b>MI NOVIA ALEJANDRINA</b>	Por el amor con el que caminamos juntos de la mano, apoyándonos en estos años de universidad.
<b>MONSEÑOR TOMAS BARRIOS</b>	Por su consejo y entusiasmo dado en el momento justo.
<b>A TODOS MIS FAMILIARES</b>	Por ser parte de mi desarrollo y mi éxito, ya que sin ellos no sería la persona que soy.

**FAMILIA MENDIA  
ORELLANA**

Por el apoyo, cariño y confianza, en todos estos años.

**A TODOS MIS  
AMIGOS**

Por la alegría y el apoyo brindado al andar estos senderos de luz.

**FAMILIARES Y  
AMIGOS QUE ESTAN  
EN EL CIELO**

Cada uno alentando desde lo alto:  
Bernardo Corzo, Marta Gatica de Corzo, Consuelo  
Corzo, Vicenta Corzo, Luis Corzo, Arturo Gómez, Juan  
Carlos Castillo Carin, José Fernando Méndez Flores.

## ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b>	<b>V</b>
<b>GLOSARIO</b>	<b>IX</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>XV</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>XVII</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>XIX</b>
<b>1 TRATAMIENTOS FRÍOS</b>	
1.1 Austenita "Retenida y endurecida"	2
1.2 Tratamiento en frío y la aplicación del temple	3
1.3 Limitaciones del proceso	5
1.4 Ensayos de dureza	5
1.5 Reducción diametral	6
1.6 Tensiones residuales	6
1.7 Características del tratamiento en frío	8
1.8 Ventajas del tratamiento en frío	9
1.9 Tiempo y temperatura	9
1.10 Equipo para la aplicación de tratamientos en frío	11
<b>2 TRATAMIENTOS CRIOGÉNICOS</b>	
2.1 Historia	16
2.2 ¿Cómo se realizan los tratamientos criogénicos?	20
2.2.1 Tratamiento criogénico multietapas	21
2.3 Medios de aplicación de los tratamientos criogénicos	23

2.4 Equipo de Aplicación de Tratamientos Criogénicos	24
2.4.1 Cámaras criogénicas	24
2.4.2 Contenedores de líquidos criogénicos	27
2.4.3 Tubería para líquidos criogénicos	30
2.5 Líquidos criogénicos	33
2.5.1 Nitrógeno líquido	36
2.5.2 Helio líquido	40
2.5.3 Dióxido de carbono líquido	46
2.5.4 Neón líquido	50
2.5.5 Peligros de salubridad	52
2.5.6 Inflamabilidad de los líquidos criogénicos	54
2.6 Materiales a los que se aplican los tratamientos criogénicos	55
2.6.1 Capacidad de aceros tratados criogénicamente	59
2.6.2 Resistencia al corte y a la abrasión	60
2.6.3 Resistencia a la fatiga y al desgaste	64
2.6.4 Resistencia a la corrosión	67
2.7 Usos y aplicaciones	70
2.7.1 Herramientas de mecanizado	72
2.7.2 Electroodos	73
2.7.3 Audio	74
2.7.4 Armas de fuego	74
2.7.5 Instrumentos musicales	75
2.7.6 Cuchillos	75
2.8 Ensayos no destructivos por medios criogénicos	75
2.8.1 Stair case	75
2.8.2 Desfase térmico	76
2.8.3 Choque térmico	77
2.9 Ventajas y desventajas	77
2.9.1 Aplicaciones exitosas de tratamientos criogénicos	80

2.9.2 Aplicaciones fallidas de tratamientos criogénicos	81
<b>3 PROPUESTA DE ENSAYO DE TRATAMIENTOS CRIOGÉNICOS</b>	
3.1 Materiales y equipo	83
3.1.1 Probeta de acero SAE 1045	83
3.1.2 Cámara criogénica	86
3.1.3 Horno de templado	87
3.1.4 Cubeta de agua	88
3.1.5 Durómetro	88
3.1.6 Rueda de esmeril de oxido de aluminio blanco (AA)	89
3.2 Materiales auxiliares	89
3.3 Procedimiento	90
3.4 Resultados	93
3.5 Reporte de laboratorio	96
3.6 Aplicaciones	97
3.7 Análisis de montaje de recinto criogénico	98
3.7.1 Disposiciones generales del recinto	98
3.7.2 Especificaciones técnicas del sistema	100
3.7.3 Análisis de inversión inicial de una cámara criogénica	103
3.7.4. Cámara recomendada para el laboratorio de metalurgia y metalografía "CI-420"	105
3.7.5. Manual de instalación y uso de la cámara criogénica	107
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>109</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>111</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>113</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>117</b>



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1. Representación de la estructura atómica de fase Austenítico y Martensíticos	14
2. Comparación de dos aceros trabajados a altas velocidades contra la resistencia al desgaste	18
3. Cámara criogénica de carga superior, CRYOFLEXTM–CBF	25
4. Cámara criogénica de carga frontal, CRYOFLEXTM–CCF	26
5. Cámara criogénica tipo túnel, CRYOFLEXTM –CTF	26
6. Unidad de almacenamiento tipo Deward con capacidad de 50 litros	27
7. Unidad de almacenamiento de tarima, con capacidad de 600 litros	28
8. Diagrama de instalación de un tanque de líquido criogénico de gran dimensión.	28
9. Contenedor de líquidos criogénicos tipo Deward	35
10. Diagrama interno de contenedor Deward	39
11. Modelo técnico de contenedor tipo Deward	43
12. Diagrama de seguridad de posición de válvulas	44
13. Diagrama de vaporizador de CO <sub>2</sub>	47
14. Sección de contenedor de CO <sub>2</sub>	47
15. Formación de carbonos	59
16. Aumento de la resistencia al desgaste, en algunos aceros, por medio de tratamientos criogénicos	63

17. Comportamiento al desgaste de aceros tratados criogénicos, en frío y sin tratamiento.	66
18. Turbina Golpeada Severamente por la Cavitación	68
19. Comparación de las Secciones Transversales de una turbina tratada y una no tratada	69
20. Medidas de probetas a usar en el ensayo	86
21. Cámara criogénica de carga superior CRYOFLEXTM–CBF	87
22. Durómetro	88
23. Partículas de óxido de aluminio blanco	89
24. Diagrama de proceso de tratamiento criogénico	90
25. Probeta para análisis de dureza	94
26. Probeta para análisis de desgaste	95
27. Cámara criogénica con sistema computarizado	104
28. Cámara criogénica cerrada	106
29. Cámara criogénica en operación	106
30. Cámara criogénica y sus respectivos Dewards	106
31. Interior cámara criogénica	106
32. Diagrama comparativo tiempo vrs. transformación de los tratamientos en frío y criogénicos	121
33. Diagrama tiempo vrs. transformación del tratamientos criogénico	121
34. Diagrama de transformación de martensita en el tratamiento criogénico	122
35. Efecto de la austenitización y del tiempo de permanencia en tratamientos criogénicos. Basados en el análisis del acero de herramienta D2.	123
36. Influencia de la temperatura criogénica en la resistencia al desgaste	124
37. Diagrama hierro carbono	125

## TABLAS

I. Porcentaje del incremento en resistencia a la corrosión en materiales tratados criogénicamente	58
II. Comparativa de resistencia al desgaste en aceros	62
III. Propiedades físicas del acero SAE 1045	85
IV. Resultados de la práctica de laboratorio	96
V. Comparativo de especificación y costos de los equipos criogénicos	104
VI. Especificaciones CI-420	105
VII. Tabla comparativa del incremento a la resistencia a la corrosión de aceros tratados criogénicamente	117
VIII. Tabla resumen de aceros tratados criogénicamente	118
IX. Dureza de acero, en varios porcentajes de martensita	122
X. Microestructuras del acero	126
XI. Aceros de uso común en Guatemala	127



## GLOSARIO

- AUSTENITA** Es una solución sólida de carburo de hierro, dúctil y tenaz, blanda y resistente al desgaste. Ésta es la forma estable del hierro puro a temperaturas que oscilan entre los 900 a 1400 °C. Está formado por una disolución sólida del carbono de hierro, lo que supone un porcentaje máximo de C del 2%. Es la forma cúbica centrada en las caras (FCC) del hierro. También se le conoce como austenita. Admite el temple, mas no es magnético.
- BAINITA** Es una mezcla difusa de ferrita y cementita, que se obtiene al transformar isométricamente la austenita a una temperatura de 250°-500°C. Los detalles microestructurales de la bainita son tan finos que su resolución sólo es posible mediante el microscopio electrónico. Está compuesta de una matriz ferrítica y de partículas alargadas de cementita.
- CARBONO** Elemento químico sólido y no metálico que se encuentra en todos los compuestos orgánicos y en algunos inorgánicos. En su estado puro se presenta como diamante o grafito. Su símbolo es C y su número atómico es seis.

**CEMENTITA**

También conocida como carburo de hierro se produce por efecto del exceso de carbono sobre el límite de solubilidad. Si bien la composición química de la cementita es  $\text{Fe}_3\text{C}$ , la estructura cristalina es del tipo ortorrómbica con 12 átomos de hierro y 4 átomos de carbono por celda. La cementita es muy dura y frágil y, por lo tanto, no es posible de utilizar para operaciones de laminado o forja debido a su dificultad para ajustarse a las concentraciones de esfuerzos. Es el componente más duro de los aceros con dureza superior a 60Hrc con moléculas muy cristalizadas y por consiguiente frágiles.

**CORROSIÓN**

Es el deterioro de un material a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno. Es la tendencia general que tienen los materiales a buscar su forma más estable o de menor energía interna. Siempre que la corrosión esté originada por una reacción electroquímica (oxidación), la velocidad a la que tiene lugar dependerá en alguna medida de la temperatura, de la salinidad del fluido en contacto con el metal y de las propiedades de los metales en cuestión.

**CRIOGENIA**

Es el conjunto de técnicas utilizadas para enfriar un material a la temperatura de ebullición del nitrógeno o a temperaturas aún más bajas. La temperatura de ebullición del nitrógeno, es decir 77,36 K (o lo que es lo mismo  $-195,79\text{ }^\circ\text{C}$ ) se alcanza sumergiendo a una muestra en nitrógeno líquido. El uso de helio líquido en

lugar de nitrógeno permite alcanzar la temperatura de ebullición de éste, que es de 4,22 K (-268,93 °C).

**CRIOGÉNICO** Que produce o es relativo a la producción a bajas temperaturas.

**CRIOGÉNICOS** Rama de la física correspondiente a los efectos de las bajas temperaturas. Que produce temperaturas muy bajas.

**CRYO** Del griego Cryos, en referencia a lo frío o congelado.

**CRYOGEN** Sustancia obtenida a bajas temperaturas, se refiere a un líquido de tipo refrigerante, ejemplo nitrógeno líquido (LN<sub>2</sub>).

**ELASTICIDAD** Propiedad de los cuerpos que recobran su extensión y figura primitivas tan pronto como cesa la acción que las alteraba: elasticidad de la goma. Las deformaciones desaparecen cuando se anula el esfuerzo que las provoca.

**FRAGILIDAD** Opuesta a la ductilidad, el material se rompe con deformación nula o despreciable.

**MARTENSITA** Es la fase cristalina BCT, en aleaciones ferrosas, dicha fase se genera a partir de una transformación de fases sin difusión, a una velocidad que es muy cercana a la

velocidad del sonido en el material. Es el constituyente de los aceros cuando están templados, es magnética y tiene una dureza de 50-60Hrc.

## **OXIDACIÓN**

Los metales en la construcción se oxidan por acción del oxígeno del aire. Hay metales impermeables en los cuales la pequeña capa de óxido o carbonato que se le forma en la superficie, protege al resto de metal, como es el caso del cobre, aluminio, plomo, estaño y cinc, entre otros. Hay otros metales, como el hierro, que son permeables y la oxidación penetra el metal hasta destruirlo.

## **PERLITA**

Es la microestructura formada por capas o láminas alternas de las dos fases ( $\alpha$  y cementita) durante el enfriamiento lento de un acero a temperatura eutectoide. Se le da este nombre porque tiene la apariencia de una perla al observarse microscópicamente a pocos aumentos. Compuesto formado por ferrita y cementita.

## **REVENIDO**

Tratamiento térmico que sigue al de temple, tiene como fin reducir las tensiones internas de la pieza originadas por el temple o por deformación en frío. Mejora las características mecánicas reduciendo la fragilidad, disminuyendo ligeramente la dureza.

- SALMUERA** Es agua con una alta concentración de sal disuelta (NaCl). Existen ríos y lagos salados de los que se extrae, principalmente para obtener su sal evaporando el agua en salinas. La salmuera puede ser venenosa para algunos animales. Es un medio de enfriamiento que se utiliza en los tratamientos térmicos.
- SUBCERO** Dícese de algo menor que cero. Temperatura menor a los cero grados.
- TEMPLE** Es un tratamiento térmico al que se somete al acero, concretamente a piezas o masas metálicas ya conformadas en el mecanizado, para aumentar su dureza, resistencia a esfuerzos y tenacidad. El proceso se lleva a cabo calentando el acero a una temperatura aproximada de 915°C en el cual la ferrita se convierte en Austenita, después la masa metálica es enfriada por lo general rápidamente (salvo algunos caso donde el enfriamiento es "lento" aceros auto-templables), sumergiéndola o rociándola en agua, en aceite, aire positivo o en otros fluidos o sales.



## RESUMEN

Los aceros constituyen la materia prima primordial, en la actualidad la mayoría de elementos que usamos en nuestras rutinas diarias están conformadas por piezas metálicas sus aplicaciones se han ido acrecentando a medida de nuestra necesidad y así los medios de producción han evolucionado también.

Para que los materiales ayuden a alcanzar estas metas, es necesaria la modificación de sus propiedades, desde hace muchos años mediante la aplicación de los tratamientos térmicos convencionales se lograba obtener una buena modificación de sus propiedades, al avanzar las necesidades es necesario cambiar los métodos y así los tratamientos de estos también han avanzado.

Un gran avance son los Tratamientos Criogénicos, sus aplicaciones da alcances que abren nuevas fronteras en el tratamiento de los materiales, múltiples y variadas aplicaciones que van desde aplicaciones recreativas, equipo de cocina, audio, hasta elementos aeroespaciales. Estos tratamientos los conoceremos a fondo mediante las prácticas de laboratorio, que con medios prácticos enseñan la aplicación de estos y conoceremos resultados reales con los que podremos sacar nuestras propias conclusiones.

Como ingenieros mecánicos el conocer las aplicaciones de los tratamientos térmicos convencionales y criogénicos, da nuevos alcances teóricos y técnicos en nuestras aplicaciones, así incrementar nuestros criterios profesionales de decisión.



## OBJETIVOS

### General:

Realizar un estudio teórico de Tratamientos Criogénicos y su conocimiento práctico, por medio de su ensayo como práctica del laboratorio de Metalurgia y Metalografía.

### Específicos:

1. Conocer los tratamientos criogénicos y sus aplicaciones, sus ventajas y sus desventajas comparado con los tratamientos térmicos convencionales.
2. Conocer los cambios estructurales que promueven los tratamientos criogénicos y así mejorar las capacidades del material.
3. Conocer los métodos de aplicación de los tratamientos criogénicos, así como su equipo básico para su manipulación y riesgos de salubridad.
4. Ampliar nuestros conocimientos científicos prácticos en las prácticas de laboratorio, para aumentar así las habilidades prácticas y destrezas de taller.



## INTRODUCCIÓN

Las características que definen el desempeño de un ingeniero mecánico, se pueden resumir en el diseño y la creación de nuevos elementos que innoven el desempeño de nuevas maquinarias, debemos estar entonces avanzando con la ciencia moderna y las nuevas oportunidades de desarrollo que estas nos brindan.

Con el objetivo de conocer nuevas técnicas de trabajo de materiales en el área de metalurgia y metalografía, conoceremos en este trabajo final de graduación uno de los avances más simbólicos en estos últimos años, los tratamientos criogénicos.

En el capítulo número uno, como preámbulo a los tratamientos criogénicos, nos enfocaremos en los precursores, los cuales abrieron las puertas a la experimentación, los tratamientos en frío, los cuales demostraron los primeros resultados del efecto del frío en los aceros.

La aplicación de los tratamientos en frío mostró avances en comparación con los tratamientos térmicos convencionales como incrementar la fuerza del material ante distintos esfuerzos, con una mejora en su microestructura mostrando un grano mayor estabilidad dimensional, lo cual se ve reflejado en el material con una mejor resistencia al desgaste y un alivio en las tensiones residuales de la microestructura.

En el capítulo número dos de este trabajo de graduación se conocerá el tratamiento criogénico también llamado temple criogénico o transformaciones criogénicas, el cual utiliza bajas temperaturas para modificar la micro-estructura de los metales y otros materiales, convirtiendo estas en estructuras más homogéneas a través de la conversión de Austenita a la deseada Martensita. Los tratamientos criogénicos son una extensión a los tratamientos térmicos a altas temperaturas ya que la aplicación de estos se complementa directamente, en los materiales tratados se observan muchos cambios y beneficios en su rendimiento y estructura.

Al aplicar los tratamientos criogénicos, no sólo obtenemos una mejora sensible en los materiales a los que se les aplica, también obtenemos una mejora en problemas que obtenemos al trabajar y utilizar piezas de acero, además de evitar los problemas como el desgaste abrasivo, desgaste corrosivo y el desgaste erosivo, obteniendo así una mayor vida útil en los aceros tratados frente a los aceros que no.

La aplicación de tratamiento criogénico adicional promueve la transformación de la austenita retenida en martensita casi a un 90% lo cual puede ser analizado mediante rayos X y SEM (microscopio electrónico de barrido) en muestras de acero antes y después del tratamiento criogénico, todos los metales, no sólo el acero, sino también el aluminio, cobre, aleaciones de fundición, etc., se ven beneficiados de la liberación de tensiones residuales mediante los tratamientos criogénicos.

En el capítulo número tres conoceremos de forma práctica la aplicación de los tratamientos criogénicos, como una práctica enfocada para ser impartida en el laboratorio de metalurgia y metalografía, de esta manera conocer nuevas tecnologías y actualizarnos cada día más.

# 1. TRATAMIENTOS FRÍOS

Los tratamientos en frío aplicado en aceros tiene una amplia aceptación dentro de la profesión metalúrgica como tratamiento complementario que se utiliza para mejorar la transformación de austenita a martensita, y mejorar la liberación de tensiones de las piezas fundidas o piezas mecanizadas.

En la práctica común se identifica que la temperatura óptima para los tratamientos en frío se encuentra aproximadamente en  $-84^{\circ}\text{C}$  ( $-120^{\circ}\text{F}$ ), a estas temperaturas se empiezan a ver en el material los cambios estructurales internos que sufre, para poder incrementar sus características.

El tratamiento en frío de acero consiste en exponer el material ferroso a temperaturas bajo cero, para mejorar las condiciones o propiedades de los materiales.

Como objetivo primordial y beneficio que obtenemos del tratamiento en frío consideramos:

- Incrementar la fuerza del material.
- Mayor estabilidad dimensional o microestructural.
- Mejor resistencia al desgaste.
- Alivio de tensiones residuales.

La aplicación del tratamiento en frío es relativamente simple, con la exposición del material por un lapso de una hora por cada pulgada de sección transversal es suficiente para lograr los resultados deseados.

Debido a la eliminación de la austenita retenida y martensita que no ha sido templada, el tratamiento en frío endurece y mejora a los aceros, al punto de presentar una mejora en la reducción en su tendencia a desarrollar grietas y así optimizar su resistencia a la fractura.

Los tratamientos en frío trazaron el camino para iniciar la aplicación de los tratamientos criogénicos, son precursores de estos dando paso al inicio de la investigación de los efectos positivos de la aplicación de temperaturas bajo cero en los elementos mecánicos.

### **1.1. Austenita "Retenida y endurecida"**

Cuando se realiza un endurecimiento por medio de tratamientos térmicos a altas temperaturas, deseamos la transformación total de austenita a martensita durante el temple, sin embargo se ha comprobado en la práctica que esto se logra muy rara vez, debido a muchas condiciones externas que influyen en el proceso del temple.

El tratamiento en frío en muchos casos puede ser útil para mejorar el porcentaje de transformación y, por tanto, para mejorar las propiedades de los materiales.

En los tratamientos en frío durante el endurecimiento se desarrolla martensita como un proceso continuo desde el principio martensita Inicial (Ms) hasta el final, martensita final (Mf), siguiendo los rangos de valores de formación de martensita.

En algunos casos de aceros aleados, la martensita empieza a formarse por encima de la temperatura ambiente y en muchos casos, la transformación es completada cuando se alcanza la temperatura ambiente.

Al finalizar el proceso la austenita retenida tiende a estar presente en cantidades pequeñas y variables, sin embargo, cuando se considera excesiva para una aplicación particular, según los criterios de diseño se debe hacer la transformación a martensita por tratamientos en frío y luego revenirse.

## **1.2. Tratamiento en frío y la aplicación del temple.**

Inmediatamente se finaliza el tratamiento en frío y la pieza empieza a calentarse para alcanzar la temperatura ambiente para su recuperación, el material ofrece la mejor oportunidad de obtener el máximo de transformación a martensita, esto lo logramos aplicando un tratamiento de temple, sin embargo, en algunos casos existe el riesgo de que esto pueda producir agrietamiento y rupturas de algunas partes.

Por lo tanto, es importante asegurarse de que el grado de acero y el diseño de los productos toleren el tratamiento en frío y el temple posterior, ya que las características del diseño de los materiales tales como esquinas y cambios bruscos en su forma, pueden crear concentración de tensiones y

promover la ruptura. En muchos casos, el tratamiento en frío no se hace antes del temple, en varios tipos de aplicaciones industriales el templado es seguido por tratamiento en frío y se aplica un tratamiento de revenido sin demora.

Por ejemplo, algunas piezas como:

- Calibradores patrón.
- Guías de maquinara.
- Ejes.
- Mandriles.
- Cilindros, pistones.
- Rodamientos de bolas y de rodillos.

Estos son tratados de esta manera para mejorar su estabilidad dimensional, así mismo se utilizan ciclos múltiples de tratamientos en frío para ciertas aplicaciones críticas.

El tratamiento en frío, se utiliza para mejorar la resistencia al desgaste en materiales, como las herramientas de acero de alto carbono, aceros inoxidables, y de aleaciones de acero y carbono para aplicaciones en las que la presencia de austenita retenida puede dar lugar a un desgaste excesivo.

El proceso de transformación para una pieza en servicio puede causar grietas y/o cambios dimensionales que pueden promover la falla, en algunos casos, se ha observado más del 50% de austenita retenida, en tales casos, no debe existir demora en aplicar el templado después del tratamiento en frío, ya que se pueden desarrollar fallas fácilmente.

### **1.3. Limitaciones del proceso.**

El proceso de tratamiento en frío se ve limitado en algunas aplicaciones en las que las cantidades de austenita retenida deben mantenerse debido a que resultan beneficiosas según las condiciones de diseño en donde el tratamiento en frío podría ser perjudicial.

Además, en otros casos es más conveniente realizar en la pieza múltiples temple, en lugar de ciclos de enfriamiento seguido por temple, esto puede resultar en algunas condiciones más prácticas para la transformación de austenita retenida tales son los casos de:

- Aceros de alta velocidad.
- Aceros de alto carbono.
- Aceros de alto cromo.

### **1.4. Ensayos de dureza.**

Para determinar el grado de dureza alcanzado por nuestra pieza para conocer si obtuvimos los resultados deseados en nuestro proceso le realizamos a la pieza ensayos de dureza y así obtener lecturas Rockwell C.

Si estas lecturas son inferiores a las previstas para la aplicación del material puede indicar excesiva austenita retenida en la pieza, así mismo los aumentos significativos en estas lecturas, como resultado de un tratamiento en frío indican la conversión de austenita a martensita.

### **1.5. Reducción diametral**

El enfriamiento del núcleo de la pieza debajo de la temperatura ambiente puede ser una forma útil de proporcionar un cambio significativo en la reducción diametral de la pieza, condiciones que se deben considerar en el diseño de la pieza y en su campo de aplicación para que no falle.

Al aplicar un tratamiento en frío con estos fines, se debe tener cuidado para evitar la falla por fragilidad la cual se puedan desarrollar cuando el núcleo de la pieza, aunque este esté tratado con altas temperaturas, presente altas cantidades de austenita retenida, las cuales al convertirse a martensita a temperaturas bajo cero causen la reducción diametral creando además fallas internas.

### **1.6. Tensiones residuales**

Las tensiones residuales contribuyen constantemente a la falla de los elementos y son el resultado de los cambios de temperatura que se producen durante la expansión térmica y cambios de fase, como consecuencia de los cambios de volumen.

En condiciones normales, los gradientes de temperatura producen en las piezas dimensiones no uniformes y cambios en su volumen estructural. Por ejemplo, en piezas fundidas las tensiones de compresión se desarrollan más fácilmente en las zonas de menor volumen, ya que éstas son las que se enfrían primero, y las tensiones de tracción se desarrollan más fácilmente en las zonas de mayor volumen las cuales son las últimas que se enfrían.

También se desarrollan en la pieza zonas con tensiones de ambas formas tensión y compresión, incluso en las grandes piezas de fundición y piezas mecanizadas de espesor uniforme la superficie se enfría primero y el núcleo de último, en estos casos, las tensiones son causadas como resultado del cambio de fase (volumen) entre la transformación de las capas superiores y del núcleo el cual se transforma de último.

Cuando en una pieza de sección transversal irregular ocurren estos cambios de fase y de volumen, las tensiones normales que se generan durante el enfriamiento son opuestas debido a la expansión durante la transformación, las tensiones residuales resultantes se mantendrán hasta que se aplique un medio de liberación de tensiones a la pieza, como un normalizado.

Este tipo de estrés se desarrolla con más frecuencia en los aceros durante el enfriamiento después del temple, ya que la superficie se convierte en martensita antes que lo haga el interior, de cualquier forma el interior austenítico se tensa con el afán de alcanzar el cambio de fase en la superficie, posteriormente las expansiones en el interior dan lugar a tensiones en la superficie martensítica de la pieza, cuando el núcleo austenítico se transforma, debido a este intercambio de tensiones se pueden derivar cambios en los aceros de alto carbono.

El uso de tratamiento de frío ha resultado beneficioso en la liberación de tensiones de piezas fundidas y piezas mecanizadas, incluso aquellas con sección transversal no uniforme.

## 1.7. Características del tratamiento en frío

Los tratamientos en frío representan una mejora sustancial en la vida útil de los elementos tratados, existen características del tratamiento que debemos conocer, para su correcta aplicación:

- La transformación de todas las capas se logra cuando el material llega a  $-84\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $-120\text{ }^{\circ}\text{F}$ ).
- El aumento en el volumen en el exterior martensítico es contrarrestado por la contracción inicial en el enfriamiento.
- El tiempo de recuperación para llegar a la temperatura ambiente se controla más fácilmente a más tiempo de enfriamiento.
- La expansión en el núcleo interno debido a la transformación se equilibra por la expansión de la capa exterior.
- Las partes tratadas en frío son pueden ser más fácilmente manipulados y maquinadas.
- La superficie no se ve afectado por las bajas temperaturas del tratamiento.
- Se pueden trabajar por bajas temperaturas simultáneamente partes con diversos elementos de aleación y, de diferentes tamaños y pesos.

### **1.8. Ventajas del tratamiento en frío**

Los tratamientos termicos tiene por objetivo mejorar las condiciones internas de un metal, para que asi durante su aplicación real podamos confiar en un elemento mecanico que nos brinde un optimo desempeño, cada una de las aplicaciones varia según sus condiciones de aplicación y otros factores que interfieran en la misma

Una mejora significativa que es bien marcada en los tratamientos en frío comparada con la aplicación de tratamientos a altas temperaturas, es que no es necesaria una exactitud en el control de la temperatura exigiendo una gran precisión de control, de esta manera logramos evitar una cuantiosa inversion para el proceso de transformación, en equipos de aplicación, medición, etcetera.

El tratamiento en frío es exitoso sólo con alcanzar la temperatura mínima de enfriamiento, además el material no se ve afectado por temperaturas mucho mas bajas. Siempre y cuando el material se enfría a  $-84\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $-120\text{ }^{\circ}\text{F}$ ), la transformación se producirá y los tiempos adicionales de refrigeración no causan retroceso en la pieza como lo haria un tiempo extra a altas temperaturas.

### **1.9. Tiempo y temperatura**

Después de un enfriamiento completo, la exposición adicional a bajas temperaturas no tiene más efectos adversos en la pieza, cuando utilizamos tratamientos térmicos de altas temperaturas, el control del tiempo de horno y la

temperatura son críticos, en el tratamiento en frío, materiales de diferentes composiciones y de diferentes formas puede ser tratados al mismo tiempo, aunque cada uno puede tener un punto de transformación diferente.

Además el tiempo necesario para regresar a la temperatura ambiente no es crítico, siempre y cuando se mantenga la uniformidad y se eviten variaciones muy grandes en el gradiente de temperatura, aunque la tasa de gradiente de velocidad de enfriamiento de una pieza, tiene una clara influencia en el producto final.

La formación de martensita durante el tratamiento térmico de altas temperaturas después del tratamiento en frío, es una solución inmediata para garantizar que la descomposición austenítica no dará lugar a la formación de bainita y cementita.

En piezas grandes que comprenden tanto secciones gruesas y delgadas, no en todas las áreas se tiene la misma velocidad de enfriamiento, como resultado de ello, las superficies y las secciones delgadas pueden ser muy martensíticas, y la más lenta de enfriamiento básico puede contener tanto como 30 a 50% austenita retenida.

Además de la transformación incompleta, el posterior envejecimiento natural provoca tensiones y como resultado un crecimiento adicional del grano después del mecanizado, aparte de la transformación de austenita a martensita, no ocurre ningún otro cambio metalúrgico como resultado de la refrigeración, y la superficie del material no requiere tratamiento adicional. El uso de calor con frecuencia causa escareo y otras deformaciones de la superficie que deben ser eliminadas, lo que no ocurre con el tratamiento en frío que no crea problemas superficiales ni residuos en su aplicación.

### **1.10. Equipo para la aplicación de tratamientos en frío**

Un simple enfriador o congelador de tipo casero puede ser utilizada para la transformación de austenita a martensita, la temperatura será de aproximadamente  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $0\text{ }^{\circ}\text{F}$ ), podemos aplicar un ensayo de dureza para determinar si este tipo de tratamiento de frío será útil.

El hielo seco colocado en la parte superior de un contenedor aislado, también se utiliza comúnmente para el tratamiento de frío, la temperatura del hielo seco en la superficie es  $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $-109\text{ }^{\circ}\text{F}$ ), pero en el contenedor la temperatura normalmente es de unos  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $-75\text{ }^{\circ}\text{F}$ ).

Se pueden usar algunas unidades de refrigeración mecánico o eléctricas con aire circulante que alcanza una temperatura de  $-87\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $-125\text{ }^{\circ}\text{F}$ ), estos también son utilizados y nos ayudan a alcanzar las temperaturas deseadas. Una unidad típica de enfriamiento tendrá las siguientes dimensiones y características de operación:

- Cámara de volumen hasta  $2,7\text{ m}^3$  ( $95\text{ ft}^3$ )
- Rango de temperatura, de  $5$  a  $-95\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $40$  a  $-140\text{ }^{\circ}\text{F}$ )
- Capacidad de carga, el  $11,3$  a  $163\text{ Kg. / H}$  ( $25$  a  $360\text{ lb. / h}$ )
- Capacidad térmica, hasta  $8870\text{ kJ / h}$  ( $8400\text{ Btu / h}$ ).

El uso del nitrógeno líquido puede ser empleado para menores temperaturas el cual nos brinda una temperatura de  $-195\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $-320\text{ }^{\circ}\text{F}$ ), pero no es muy utilizado en los tratamientos fríos debido a su alto costo, se emplea únicamente en los tratmientos criogénicos.



## 2. TRATAMIENTOS CRIOGÉNICOS

La razón principal para la aplicación de tratamientos al acero es para mejorar su resistencia al desgaste a través del endurecimiento, elementos que están propensos tales como engranajes, rodamientos, y herramientas, son endurecidos dada la necesidad de una excelente resistencia para ampliar su fiabilidad en operación y su rendimiento. Para entender los efectos del tratamiento criogénico es esencial que se conozcan los tratamientos térmicos a altas temperaturas.

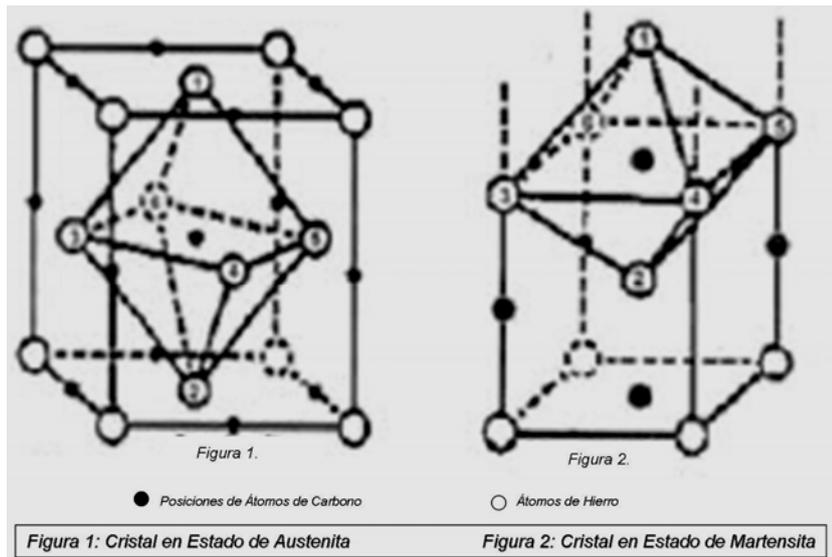
Para un tratamiento térmico de altas temperaturas convencional es usual obtener una temperatura de austenización para el acero 875 °C (1600 °F) aproximadamente o superior, la austenita es una fase suave del acero en la cual es bastante maleable y fácil de usar debido a esto es la necesidad de aplicarle tratamientos térmicos, regularmente las piezas mecánicas, elementos de rodamiento o transmisión de fuerza y herramientas son a menudo mecanizados en el estado austenítico.

Según la temperatura que indique el diagrama de fase que es el indicado para el material a trabajar, se eleva la temperatura y se deja un tiempo de permanencia, después el material (Ver anexos Tabla VIII) es enfriado bruscamente en una solución líquida que puede ser aceite, agua, salmuera o compuestos poliméricos.

El rápido enfriamiento del acero en la solución provoca que los átomos en la microestructura se reorganicen a la estructura atómica llamada martensita,

en la figura 1 observamos una representación de la estructura atómica de fase austenítico y martensíticos.

Figura 1. Representación de la estructura atómica de fase austenítico y martensíticos.



Fuente: *American Standards of Metals Handbook*, Volumen 4 Heat Treating, 1997.

Una estrecha analogía a esto es el carbón y el diamante, ambos son compuestos fundamentalmente de átomos de carbono, en el carbón los átomos de carbono se encuentran ordenados de una forma muy suelta y tienen muy pocos enlaces cruzados entre sí, esto hace que sean fácilmente disponibles para ser retirados por el desgaste o alguna otra reacción como calor, en un diamante los átomos de carbono tienen una vinculación muy diferente, lo que la hace sustancia más dura conocida. La aplicación del tratamiento criogénico consiste fundamentalmente en un lento enfriamiento a una tasa de enfriamiento de 2.5 °C/min. a 4.5°C/min., desde la temperatura ambiente hasta la temperatura del nitrógeno líquido. Cuando el material llega a aproximadamente a los 80 °K (-315 ° F), se le da un tiempo de permanencia que generalmente es de 24 horas o mayor, al final del período de criogenización, el material es retirado del entorno de nitrógeno líquido y se permite que se recupere al aire

hasta temperatura ambiente, mediante el enfriamiento paulatino en el ciclo de nitrógeno gaseoso ( $\text{LN}_2$ ), la temperatura se puede controlar con exactitud y se evita el choque térmico en el material.

Para acentuar las propiedades del material las investigaciones recientes han concluido que el momento adecuado para su aplicación es al finalizar el tratamiento de temple y antes de aplicar el revenido, cuando se encuentra el máximo de austenita retenida en la pieza, también pueden usarse dos o tres ciclos de temple u otros procesos según las condiciones o criterios de diseños para la pieza.

Durante la aplicación del tratamiento criogénico se llevan a cabo cambios en la estructura interna del elemento que son los que otorgan a la pieza esas características, existen varias teorías acerca de las transformaciones que ocurren, pero fundamentalmente ocurren dos que son básicas en el proceso la transformación completa o la mayor cantidad posible de austenita retenida a martensita y la otra transformación generada en el material a causa de la precipitación de ETA-carburos que causan el fortalecimiento de la pieza a niveles microscópicos.

En la aplicación del tratamiento criogénico logramos un gran cambio interno en las piezas ya que ocurre una liberación de tensiones residuales debido a los cambios de fase que sufre el metal en su proceso de transformación, logrando una gran reducción en la tendencia a fallas por fatiga, ya que se eliminan las líneas internas formadas por estas tensiones residuales que promueven y hacen más propensa esta falla reduciendo la vida útil del material, esta es otra de las razones de las mejoras de la aplicación del tratamiento criogénico.

## 2.1. Historia

Los Tratamientos criogénicos se han aplicado desde hace ya muchos años, pero se encuentran en su niñez en comparación con las aplicaciones de los tratamientos térmicos. Durante siglos, los suizos aprovecharon de las temperaturas extremadamente bajas de los Alpes para mejorar el comportamiento de sus aceros, los aceros reposaban por largos periodos de tiempo en estas bajas temperaturas para mejorar sus propiedades, esencialmente, se trataba de un proceso de envejecimiento acelerado debido a las temperaturas muy bajas, este secreto mantenía a Suiza como uno de los productores de acero de la mejor calidad a nivel mundial. A finales del siglo XIX se descubrió la manera de licuar gases y, con ello, se tuvo acceso a temperaturas mucho más bajas de lo que se podía alcanzar anteriormente, esto dio lugar a que, ya en el siglo XX comenzaran a realizarse una serie de experimentos que trataban de mejorar las prestaciones de componentes de acero mediante su inmersión en gas licuado.

El proceso de experimentación y compresión de los tratamientos criogénicos de aceros realmente se puso en marcha durante la Segunda Guerra Mundial en el Arsenal Watertown de Massachusetts, Estados Unidos, fue bajo la dirección de Clarence Zener que más tarde desarrollaría el Diodo Zener. En esa época no existían controles computarizados por lo que las herramientas de acero se sumergían en nitrógeno líquido durante un breve período de tiempo, luego regresaban a temperatura ambiente, y a continuación entraban en servicio, este método fue empírico y sin control alguno.

Muchas de las herramientas rompieron al ser usadas después del tratamiento debido a que el proceso creaba un gran gradiente térmico en la herramienta lo que producía micro-fisuras en el cuerpo. Tras la Segunda Guerra

Mundial, se abandonó esta línea de investigación y no se retomó hasta los años sesenta. En esas fechas, técnicos de la NASA observaron que, a menudo, los materiales que habían estado sometidos a las temperaturas extremas del espacio exterior mejoraban sus características. La industria aeroespacial desarrolló y comenzó a utilizar un proceso que trataba de reproducir el mismo fenómeno en un entorno industrial.

Con la accesibilidad del nitrógeno líquido y el desarrollo de mejores sistemas de control de las temperaturas, los tratamientos criogénicos convencionales se fueron desarrollando y extendiendo poco a poco. Durante años los tratamientos térmicos criogénicos se desarrollaron rodeados de escepticismo, su aplicación había sido fundamentalmente empírica, basada en la experiencia con pocos controles, lo investigado no era tomado seriamente ya que no se habían obtenido resultados concretos sobre los cambios que ocurren en los materiales.

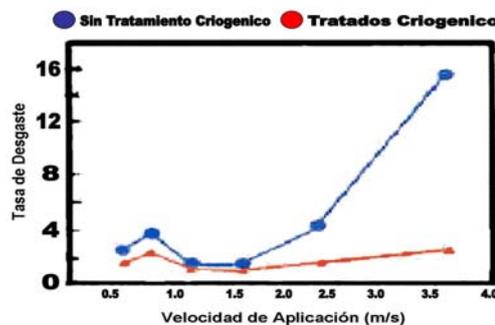
En los últimos 25 años, se ha habido un creciente esfuerzo en investigación en el que empiezan a involucrarse numerosas universidades y centros de investigación de todo el mundo, en las investigaciones más básicas se ha estudiado la naturaleza de las transformaciones que se producen en los materiales y los mecanismos que las producen, ante la aplastante evidencia de los resultados, se han hecho investigaciones en aplicaciones superiores buscando optimizar el uso de este tipo de tratamientos desde el punto de vista de su industrial. En la industria metal-mecánica la aplicación de los tratamientos criogénicos fue en primer momento para conseguir una mayor estabilidad dimensional de las herramientas, y algunos metalúrgicos consideran que al tratar de esta forma la mayoría de los aceros se consigue aumentar la vida de la herramienta en más de un 100%, lo cual han conseguido con éxito, otros

investigadores en cambio afirman que empleándolo no se mejoraba sensiblemente su rendimiento.

Los primeros estudios realizados mostraron que la reducción en las cantidades de austenita es sólo una de las razones del incremento en la resistencia al desgaste así mismo confirmó que la precipitación de las partículas de carburos y la profundidad de la transformación criogénica (-320°F) en comparación con los tratamientos en frío (-120°F), redujeron la cantidad de austenita retenida, pero la profundidad de transformación lograda por el tratamiento criogénico realmente aumento la resistencia al desgaste de los materiales de manera espectacular, especialmente para aceros que trabajan a altas velocidades.

La Figura 2 muestra la comparación de dos aceros trabajados a altas velocidades contra la resistencia al desgaste. Este desgaste y velocidad de aplicación se puede obtener en un elemento de rodamiento, según estos resultados se acentúa que la profundidad que alcanzan los tratamientos criogénicos, debido a la precipitación de carbonos, ayuda a incrementar la resistencia al desgaste aumentando así la dureza y resistencia.

Figura 2. Comparación de dos aceros trabajados a altas velocidades contra la resistencia al desgaste



Fuente: *American Standards of Metals Handbook*, Volumen 4 Heat Treating, 1997.

Hoy en día existe un gran número de estudios acerca de las aplicaciones y resultados de los procesos criogénicos, ya que están aplicando correctamente y constantemente a materiales en serie y es un proceso efectivo para aumentar la resistencia al desgaste y la estabilidad en los materiales. La efectividad de los procesos criogénicos está bien documentada y está es ampliamente aceptada en toda la industria, grandes empresas han empezado a fabricar y vender líneas especiales de productos tratados criogénicamente.

Los diversos estudios realizados con tratamientos criogénicos han demostrado los cambios metalúrgicos que se producen en la microestructura del acero, una mayor cantidad de austenita retenida transformada propiciando el aumento en la cantidad de martensita, la precipitación de eta-carburos y la profundidad de transformación, cambios que son la principal razón para la espectacular mejora en la resistencia al desgaste, obtenemos así un material con una dureza más uniforme, no únicamente un aumento puntual en la dureza del materiales tratado.

Una conclusión reciente comprueba la fiabilidad de los tratamientos criogénicos, y apoya la eficacia de estos basado en que la energía en la superficie de una estructura martensita es superior al de una estructura austenita debido a las diferencias en las mismas, la austenita tiene una estructura cristalina FCC (face cubic center; centrado en la cara del cubo), mientras que la Martensita tiene una estructura cristalina de tipo BCT (body centered tetragonal; centrado en el cuerpo tetragonal), lo que favorece en situaciones de desgaste ya que un material con estructura martensita es menos probable que ceda como lo haría el mismo material con estructura austenita, así la probabilidad de formación de partículas de desgaste en acero en los que la austenita se ha transformado a martensita es inferior a la de los aceros que contienen austenita retenida.

Una nueva etapa o evolución de los tratamientos criogénicos es la aplicación de un tratamiento llamado multietapa el cual constituye un claro avance con respecto a los tratamientos criogénicos convencionales. Con mejoras importantes en su aplicación, la más importante una reducción de un 50% en la cantidad de tiempo en la aplicación, y con un proceso basado en una serie de etapas predefinidas que controla paso a paso el enfriamiento, con ello se consiguen mejores resultados en el producto final.

## **2.2. ¿Cómo se realizan los tratamientos criogénicos?**

Los tratamientos criogénicos consisten esencialmente en someter a los materiales a temperaturas muy bajas ( $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) durante periodos prolongados de tiempo, existen diversas variantes, pero la duración total del proceso, en el caso de un tratamiento criogénico convencional, generalmente supera los dos días.

El proceso criogénico no es un sustituto de otros tratamientos térmicos para el acero, sino una extensión del ciclo térmico ya que en su aplicación involucra a los tratamientos térmicos convencionales, pero a diferencia de estos otros este modifica todo el material y no solo su superficie.

Se basa en predeterminedar un ciclo térmico que involucre un enfriamiento de las piezas en una cámara criogénica, manteniendo el material a esa temperatura durante 20-40 horas, y finalmente recalentar hasta temperatura ambiente. Las velocidades de enfriamiento y calentamiento deben ser tales que no induzcan, tensiones residuales ni un choque térmico a las piezas tratadas.

Muchos beneficios han sido adjudicados al tratamiento criogénico, principalmente en los aceros de herramienta y en los elementos de rodamiento ó transmisión de fuerza, algunos son el incremento de:

- Resistencia al desgaste
- Aumento en la vida útil
- Aumento en la tenacidad
- Aumento significativo en la dureza
- Bajo costo de producción.

### **2.2.1. Tratamiento criogénico multietapas**

El proceso multietapas es el ultimo avance en la aplicación de estos, no producen ningún tipo de residuo y se considera como una evolución de los tratamientos criogénicos convencionales. La diferencia fundamental está en las variaciones controladas de temperatura que se producen durante el proceso y que aportan dos ventajas fundamentales:

- El tiempo total del tratamiento es más corto, habitualmente entre 15 y 20 horas, comparado con las 24 y hasta 72 horas de un tratamiento convencional.
- Es más eficiente y proporciona mejores resultados.

El proceso no altera ni la apariencia ni las dimensiones de los componentes, se realiza en atmósfera inerte y no hay cambios de color ni

oxidación, de hecho, una de las características del tratamiento es que es totalmente indetectable, los cambios que se producen son muy sutiles y afectan al material a escala microestructural.

Es importante remarcar que se trata de un tratamiento térmico y, por lo tanto, afecta de modo permanente a todo el volumen del material tratado, esto implica que un componente o herramienta puede ser repasado, afilado, modificado, etc. sin pérdida de prestaciones a diferencia de lo que ocurriría con un tratamiento superficial o un recubrimiento.

Una vez aplicado el proceso a un material ya no será necesario volverlo a tratar, por otra parte el proceso es compatible con los recubrimientos habituales en la industria y funciona muy bien en conjunción con ellos.

En los aceros tratados mediante tratamientos criogénicos convencionales se sabe que las bajas temperaturas favorecen la transformación de la austenita retenida que queda después del temple en martensita, además las temperaturas criogénicas favorecen la precipitación de carburos finos. Sin embargo, esto no explica los fenómenos observados en los materiales que tienen otro tipo de estructuras.

El tratamiento multietapas nos ha ayudado a encontrar una teoría que hoy en día parece más acertada y apunta, a que los cambios en la estructura microcristalina debido a que a  $0^{\circ}\text{K}$ , los cristales están en su estado ideal, son los que promueven las increíbles mejoras en los aceros, por lo que al acercarse a esas temperaturas los cristales se reordenan, el grano se afina, se eliminan pequeños defectos y dislocaciones y en definitiva, se obtiene un material con una microestructura mucho mejor.

### **2.3. Medios de aplicación de los tratamientos criogénicos**

La aplicación de los tratamientos criogénicos han evolucionado por la demanda de la aplicación de los mismos, y los siguiente tres tipos de sistemas han sido desarrollados para la aplicación de estos tratamientos:

- Sistema 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. En algunas versiones del sistema, el enfriamiento es impulsado por aspersion nitrógeno líquido directamente en la cámara.
- 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 no se puede dar uso como un horno de atmósfera y tampoco las piezas entran en contacto con el nitrógeno líquido reduciendo así la probabilidad de choque térmico.

Este utiliza controladores de temperatura para controlar el flujo de nitrógeno líquido (a través de una válvula solenoide), y para supervisar la temperatura de trabajo se usan gráficos de temperatura del ciclo que proporciona un registro visible de la transformación.

- 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, para finalizar se limpian de ella los excesos superficiales.

## **2.4. Equipo de aplicación de tratamientos criogénicos**

Para la aplicación de los tratamientos criogénicos usaremos diversos equipos y componentes, pero básicamente debemos conocer nuestro flujo de producción para adquirir el sistema o cámara criogénica adecuada que sea adaptable a nuestra producción por lote o en serie. En la actualidad existen diversas compañías que se enfocan en esta materia y brindan la asesoría adecuada.

### **2.4.1. Cámaras criogénicas**

Las cámaras criogénicas o crió cámaras, son dispositivos de enfriamientos para alcanzar las temperaturas de nitrógeno líquido, estas son construidas en variedad de tamaños y configuraciones dependiendo de la aplicación. Estas tienen un diseño que permita manejar cargas continuas y al igual que otros procesos de producción su diseño depende del volumen de producción y el diseño del área de montaje.

- Cámara tipo carga superior: un congelador de tipo carga superior, figura 3, es excelente para soluciones de poco espacio, este es recomendado para pequeños volúmenes de producción. Al usar el sistema de intercambiadores de calor, esta cámara es ideal para piezas pequeñas o lotes pequeños, como medio de enfriamiento utiliza el nitrógeno líquido (LN<sub>2</sub>).

Una ventaja de este tipo de cámara es que se pueden tratar distintos piezas en la misma carga de operación, lo cual es muy útil para agilizar los procesos de producción. Esta se puede cargar de forma manual, utilizando un polipasto, o una grúa de carga, esta fabricada de acero inoxidable, lo cual la hace resistente e inocua, tanto su interior como las tuberías que están expuestas al nitrógeno líquido.

Figura 3. Cámara Criogénica de Carga Superior, CRYOFLEXTM–CBF, solución para producciones de pequeños lotes de carga.



Fuente: [www.linde-gas.com](http://www.linde-gas.com)

- Cámara tipo carga frontal: enfriador de tipo carga frontal, figura 4, en este se pueden acomodar distintos tipo de partes, pequeñas u otras que no excedan el límite de carga, su diseño vertical aumenta la eficiencia en el enfriamiento, la carga de esta se realiza en bandejas o cestas, posee una puerta abatible y cuenta con un sistema automático

de carga que puede ser parte de una línea de producción, este proceso de tratamiento en frío cuenta con una canasta de tipo estándar para su carga.

Figura 4. Cámara criogénica de carga frontal, CRYOFLEXTM-CCF



Fuente: [www.linde-gas.com](http://www.linde-gas.com)

- Cámara de carga tipo túnel: cámaras de carga tipo túnel, figura 5, esta utiliza cinchos de mesh como medio para transportar las piezas y acomodarlas, esta tiene capacidad para acomodar grandes volúmenes de producción con piezas con el mismo tamaño y forma. Este puede ser integrado a una línea de producción.

Figura 5. Cámara criogénica tipo túnel, CRYOFLEXTM -CTF, adecuada para producciones en línea de productos de poco volumen y forma similar, Ej. Cuchillos.



Fuente: [www.linde-gas.com](http://www.linde-gas.com)

#### 2.4.2. Contenedores de líquidos criogénicos.

El sistema de suministro de líquidos criogénicos es una parte integral de cualquier sistema de refrigeración y se debe considerar desde su almacenamiento, tuberías y la cámara de refrigeración. La cantidad de líquido criogénico a utilizar determina el tamaño de los vasos de almacenamiento podemos utilizar tanques Deward (Figura 12), los cuales poseen una capacidad pequeña de carga, desde 50 litros, hasta 265 litros, y pueden ser almacenados dentro del recinto junto a las cámaras criogénicas o podemos usar tanques de tarima (Figura 13) los cuales nos pueden proveer hasta cantidades considerables de 600 galones hasta 900 galones de líquido criogénico, estos deben contar con un lugar con acondicionamiento propio fuera del recinto o dentro de el si este es apropiado.

Figura 6. Unidad de almacenamiento tipo Deward con capacidad de 50 litros.



Fuente: [www.linde-gas.com](http://www.linde-gas.com)

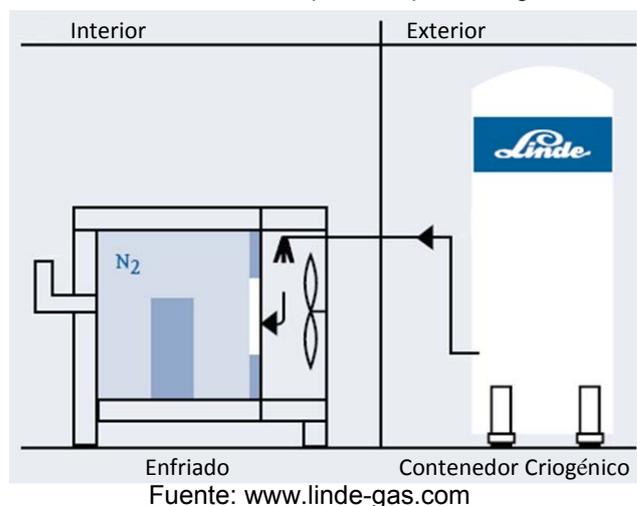
Figura 7. Unidad de almacenamiento de tarima, con capacidad mínima de 600 litros.



Fuente: [www.linde-gas.com](http://www.linde-gas.com)

Existen regulaciones internacionales con normas de apropiadas de instalación y mantenimiento de los recintos de almacenamiento y enfriamiento, con especial demanda de suficiente ventilación o en caso de grandes tanques de almacenamiento que sean instalados al aire libre dado su tamaño y peso, en la figura 14 podemos ver un diagrama de instalación de un tanque de nitrógeno líquido de gran dimensión.

Figura 8. Diagrama de instalación de un tanque de líquido criogénico de gran dimensión.



Fuente: [www.linde-gas.com](http://www.linde-gas.com)

Los tanques de almacenamiento operan bajo los mismos principios, independientemente del tamaño o la cantidad de líquido criogénico que almacena debe haber una material aislante entre los muros así evitar el perdidas de temperatura.

En el interior del tanque de nitrógeno el líquido se vaporiza para formar nitrógeno gaseoso, esta presión impulsa el líquido criogénico a través de las tuberías del sistema en la cámara criogénica, cuanto mayor sea la presión en el tanque, hay más temperatura, por lo que los tanques deben de trabajarse a las menores presiones posibles.

Otros procesos, como el tratamiento térmico al vacío puede determinar la presión en una planta, el nitrógeno gaseosos se eleva a la parte superior del tanque, mientras que el nitrógeno líquido es extraídas de la parte inferior, en caso de extrema presión las válvulas de liberación de exceso de presión se activan y evitan la acumulación de la misma, o algún caso de incendio incluso la explosión, es de vital importancia la ventilación adecuada y controlada del recinto.

Los contenedores Dewards, nos ayudan cuando es poca cantidad de líquido criogénico y lo debemos confinar y transportar, estos nos brindan una buena aislación ya que estos contenedores están específicamente diseñados para soportar los cambios bruscos de temperatura y las diferencias extremas de temperatura, así proteger su contenido, describiremos algunos a continuación:

- Frascos Deward para líquido: los frascos Deward para líquido son recipientes no presurizados, con cierre al vacío, parecido a una botella termo, deben tener una tapa o tapón de cierre suave que evite que entre aire y humedad, pero que permita salir el exceso de presión. Los

frascos que contienen helio, hidrógeno y otros líquidos de baja temperatura de ebullición tienen un recipiente de nitrógeno líquido para aislamiento.

- Frascos Deward para líquido de Laboratorio: los Frascos Deward para líquido de laboratorio tienen aberturas amplias y no tienen tapas ni cobertores. Estos recipientes pequeños se utilizan primordialmente en los laboratorios para el almacenaje temporal.
- Cilindros para líquido: los cilindros para líquido son recipientes presurizados específicamente diseñados para los líquidos criogénicos. Este tipo de recipiente tiene válvulas para llenado y dispensación del líquido criogénico, y una válvula de control de presión con un disco frangible (de arranque) como protección de respaldo. Hay tres tipos principales de cilindros para líquido, que han sido diseñados para dispensar:

1. Líquido o gas.
2. Sólo gas.
3. Sólo líquido.

#### **2.4.3. Tubería para líquidos criogénicos**

Para el diseño de los tanques de almacenamiento de líquidos criogénicos y la cámaras de transformación es necesario contar con áreas de almacenamiento y tuberías para el uso eficiente de los líquidos, los fabricantes de equipos de construcción de tubería para tanques y cámaras criogénicas,

realizan un diseño en el cual el flujo de líquido o vapor, siga la vía más directa y que tenga la menor cantidad posible de curvas, codos, accesorios, y válvulas, así evitar pérdidas de temperatura innecesaria y pérdidas de presiones. Todas las válvulas y componentes deben estar diseñadas para el servicio criogénico, resistentes a extremadas bajas temperaturas, así en toda la longitud de la tubería debe tener esta misma capacidad para evitar rupturas por efectos adversos.

Es necesario lograr un equilibrio en el costo de la instalación del recinto de la cámara criogénica y el sistema de tuberías, frente al costo de la eficiencia operación, deben considerarse los sistemas de aislamiento de tuberías los cuales son una excelente manera de cuidar nuestros costos cuidando la eficiencia del sistema, evitando las pérdidas por radiación de calor disminuyendo el intercambio de calor entre el fluido criogénico conducido dentro de la tubería y el medio ambiente, normalmente los aislamientos que se colocan son de diferentes materiales tales como, poliuretano expandido, fibra de vidrio, perlita expandida, también es útil el cloruro de polivinilo (PVC) para la protección de las tuberías, o un aislamiento al alto vacío, es importante resaltar que estos deben cubrir el largo total del tubo.

Para las uniones de las tuberías en caso fuera necesario la aplicación de soldadura esta en esta se debe utilizar electrodo de plata, de las misma manera en los accesorios de uso especial como en los codos y válvulas. Para las tuberías de conducción de los líquidos criogénicos es recomendable utilizar tuberías de acero inoxidable 316, 304 y cobre, ya que éstos se encuentran a temperaturas bajo cero que oscilan entre  $-183\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ , pero deben de estar aisladas al alto vacío, que consisten de dos tuberías con un espacio anular vacío entre ellas. Para instalaciones pequeñas instalaciones que

funcionan por medio de tanques móviles el uso de tubo flexible de cobre es muy útil.

En conclusión, los factores más importantes a cuidar en nuestras líneas de conducción son las pérdidas por la pérdida de eficiencia térmica del fluido criogénico que influye grandemente en los resultados de los tratamientos así como en los costos de operación.

Además los líquidos a muy bajas temperaturas, son peligrosos y caros, líquidos como el helio, el nitrógeno o el flúor deben ser protegidos dentro de su contenedor de líquido o vapor criogénico y en las tuberías donde deben ser aislados del entorno por uno de los métodos descritos debajo:

- Aislador reflectivo multicapas: estos están contruidos con materiales como, plástico aluminizado ó papel aluminizado, alternados con papel delgado u hojas de fibra plástica, así la conductividad se reduce, al igual que la densidad, y se logra un mayor almacenaje de calor, mejorando así la estabilidad térmica, estos escudos reflectivos requieren una estructura de soporte mínima.
- Polvos para aminorar la absorción de luz: estos son polvos que contienen escamas metálicas que reducen la radiación de temperatura y tiene la ventaja de adaptarse a formas irregulares.
- Polvos dieléctricos al vacío: esto son capas con polvos muy finos que absorben la baja conductividad, los cuales moderan los requerimientos al vacío y minimizan el peligro de incendio debido al oxígeno.

- Aisladores para contenedores para líquidos criogénicos: son aisladores de muy poco espacio, los cuales poseen paredes reflectivas que ayudan a generar un alto vacío con una capacidad calorífica mínima, estos poseen una apariencia rugosa y cuentan con paredes de pequeño grosor.
- Aislador de polvos de gas: Capas de Aislador lleno de polvos con aire o gas inerte, estos tienen un precio relativamente bajo son de uso fácil y no es necesario generar vacío.
- Forro de espuma: es un plástico muy ligero y espumado, uno de los aisladores de menor precio, con un peso mínimo aunque poseen gran volumen, de esta manera no necesitan soporte alguno.
- Mantas de fibra porosas: estas son mantas con pequeñas fibras de cristal que aíslan y mantienen la conductividad térmica, son de bajo costo y son de fácil instalación pero no proveen un aislamiento adecuado para la mayoría de los usos criogénicos.

## **2.5. Líquidos Criogénicos**

Los líquidos criogénicos son gases que se mantienen en su estado líquido a temperaturas muy bajas. Los líquidos criogénicos tienen puntos de ebullición por debajo de los  $-150^{\circ}\text{C}$  ( $-238^{\circ}\text{F}$ ). El dióxido de carbono y el óxido nítrico, que tienen puntos de ebullición levemente más altos a veces se incluyen en esta categoría.

Todos los líquidos criogénicos son gases a temperaturas y presiones normales, estos gases se deben enfriar por debajo de la temperatura ambiente antes de hacerlos líquidos mediante un aumento en la presión. Los diferentes líquidos criogénicos se hacen líquidos bajo diferentes condiciones de temperatura y presión, pero todos tienen dos propiedades en común:

- Extremadamente fríos
- Pequeñas cantidades de líquido se pueden expandir a grandes volúmenes de gas.

Los vapores y los gases liberados de los líquidos criogénicos también permanecen muy fríos, a menudo condensan la humedad del aire creando un tipo de neblina, este fenómeno es altamente visible en recipientes que están pobremente aislados, algunos líquidos criogénicos condensan el aire a su alrededor, formando una mezcla de aire líquido. Los líquidos criogénicos se clasifican como "gases comprimidos" de acuerdo a los criterios del WHMIS (Workplace Hazardous Materials Information System), los detalles sobre estos criterios de clasificación se pueden encontrar en las regulaciones para productos controlados.

Todos aquellos que trabajan con líquidos criogénicos (también conocidos como criogénicos) deben estar conscientes de los peligros y es preciso que estén correctamente capacitados ya que deben saber cómo trabajar con ellos de manera segura, así evitar riesgos inclusive de muerte.

Para alcanzar estas bajas temperaturas se utiliza una gama de elementos en estado líquido con los que obtenemos temperaturas bajo cero significativas, los principales son el Nitrógeno (N<sub>2</sub>) y el Helio (He), aunque el elemento que presenta mejoras para alcanzar capacidades especiales es el

helio, útil para satisfacer los más avanzados y exigentes procesos y tratamientos criogénicos ya que nos permite alcanzar temperaturas cercanas al cero absoluto (0 Kelvin), el nitrógeno líquido nos permite alcanzar temperaturas aproximadamente de 77,2 K (-320°F) (-195°C), mientras que el helio en estado líquido nos permite alcanzar hasta 5.2K (-450 °F) (- 268°C).

Al usar el helio como líquido cryogen, somos capaces de alcanzar temperaturas mucho más bajas en el proceso de transformación, el helio líquido tiene muchas características especiales que requieren consideraciones especiales. Ya que este es un raro y muy costoso material que se distribuye sólo por asignaciones controlada, además el helio líquido tiene una de las más bajas masas atómicas de cualquier material, es tan ligero y vuelve al estado gaseoso a presiones muy bajas, por lo tanto es muy inestable y también es muy difícil la transferencia de helio líquido en su aplicación.

Es común usarlo en aplicaciones típicas de ciclos térmicos para componentes aeroespaciales, así como nuevos materiales experimentales, el propósito de aplicar el helio líquido como medio de transformación ha sido espectacular para satisfacer las temperaturas de los ciclos térmicos, ya que mejora sensiblemente el alivio de material residual y su aplicación en el pre-acondicionamiento de material para investigación y desarrollo.

Figura 9. Contenedor de líquidos criogénicos tipo Deward



Fuente: [www.messer.es](http://www.messer.es)

Cada uno de los líquidos criogénicos tienen sus propias propiedades específicas, pero la mayoría de los líquidos criogénicos se pueden colocar en uno de los siguientes tres grupos principales:

- Gases inertes: Los gases inertes no tienen una reacción química significativa, no se queman ni permiten la combustión. Ejemplos de este grupo incluyen el nitrógeno, helio, neón, argón y criptón
- Gases inflamables: algunos líquidos criogénicos producen un gas que puede quemarse en el aire. Ejemplos más comunes son el hidrógeno, metano y gas natural licuado.
- Oxígeno: muchos materiales considerados no combustibles se pueden quemar en presencia de oxígeno líquido. Los materiales orgánicos pueden reaccionar de manera explosiva con el oxígeno líquido. Por lo tanto, los peligros y las precauciones de manejo del oxígeno líquido se deben considerar de forma separada a otros líquidos criogénicos.

### **2.5.1. Nitrógeno líquido**

El nitrógeno líquido tiene como características generales, ser inerte, incoloro, inodoro, no corrosivo, no inflamable y extremadamente frío. El nitrógeno constituye la mayor parte de la atmósfera (78,03% en volumen, 75,5% en peso). El nitrógeno es inerte y no es combustible, excepto cuando se calienta a temperaturas muy altas cuando se combina con otros metales, tales como el litio y el magnesio, para formar nitruros, también se combinan con el

oxígeno para formar óxidos de nitrógeno y, cuando se combina con hidrógeno en presencia de catalizadores, se forma el amoníaco.

Aunque el nitrógeno es inerte y no tóxico en ciertos momentos puede representar un peligro para el ser humano ya que este puede actuar como asfixiante al desplazar el oxígeno en el aire a niveles por debajo de la que se requiere para sustentar la vida y su inhalación de nitrógeno en cantidades excesivas puede causar mareos, náuseas, vómitos, pérdida de conciencia, y la muerte, como resultado de errores de juicio, confusión o pérdida de conciencia que impide el libre rescate, en bajas concentraciones de oxígeno, la inconsciencia y la muerte puede ocurrir en segundos y sin previo aviso.

Se debe capacitar al personal que manipule los líquidos criogénicos, incluidos los trabajadores de rescate, ya que no deben entrar en zonas donde la concentración de oxígeno es inferior a 19,5%, a menos que usen un sistema de respiración autónoma o línea de respirador. El manejo y almacenamiento del nitrógeno líquido debe hacer con precaución y con la capacitación adecuada, ya que al almacenar este producto debe haber una correcta ventilación, no debe de almacenarse en un espacio confinado. Aunque los contenedores criogénicos están equipados con dispositivos de alivio de presión para controlar la presión interna en condiciones normales, no es recomendable manipularlos constantemente o bruscamente.

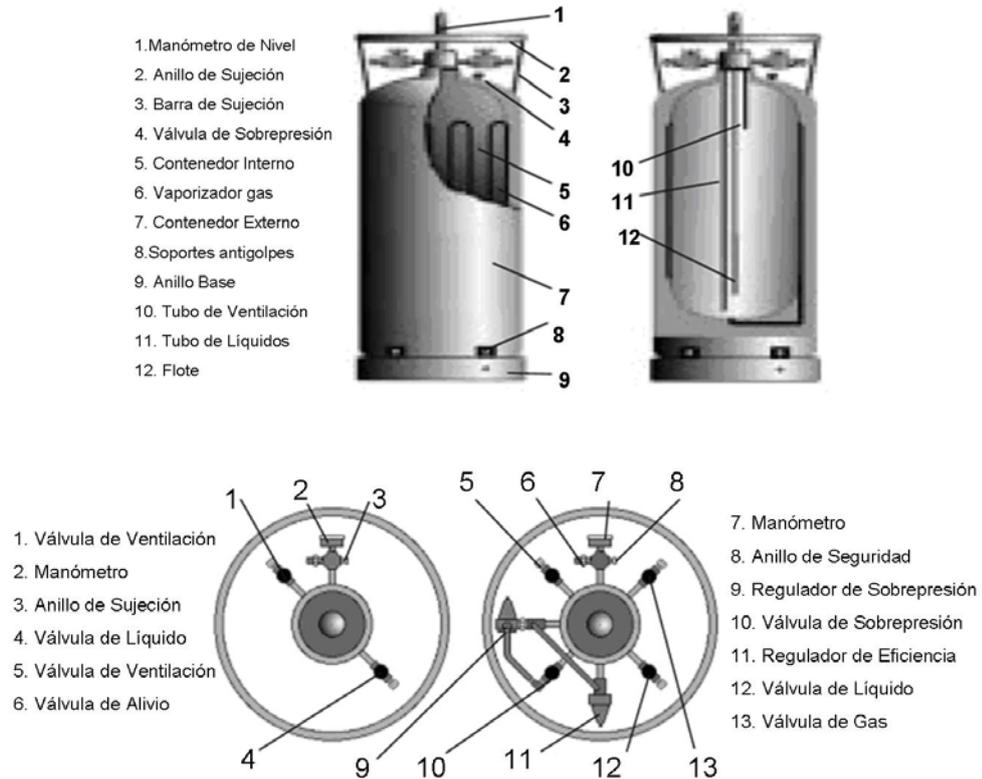
Debe de haber una correcta capacitación al personal ya que es peligroso e incorrecto que una persona sin protección entre en contacto con las tuberías sin aislamiento o equipo que contiene líquidos criogénicos, el metal extremadamente frío puede hacer que la piel se pegue rápido y es doloroso el proceso de despegarse.

Según el modelo de los tanques unos traen incorporado un sistema de movimiento por rodos si se adquiere un modelo que no traiga su propio sistema, la forma correcta para moverlos de lugar es mediante el uso de un troquet para cilindros estos siempre deben de ser manipulados y almacenados en posición vertical, no deben dejarse caer o perforar, o rolarlos acostados. La manipulación de las conexiones es muy importante ya que no se deben de cambiar ni mover sin tomar las precauciones del caso, debe de usarse una conexión adecuada, y como una recomendación muy especial no debe de usarse adaptadores entre las mangueras.

Las tuberías de guía y equipos son diseñadas para resistir a las presiones que se pueden generar. Para evitar problemas en las líneas de conducción como la cavitación se debe de utilizar una válvula de escape u otro aparato de protección en cualquier parte de la línea o de los contenedores para evitar este fenómeno.

La figura 10 muestra un típico cilindro contenedor de líquidos criogénicos, los contenedores de líquidos criogénicos deben estar aislados. Además que vienen equipados con válvulas de seguridad y discos de ruptura para proteger las botellas de sobrepresión. Estos contenedores de funcionar a presiones de hasta 350 psig y tienen capacidades de entre 80 y 450 litros de líquido, el producto puede ser retirado como un gas que pasa por el líquido a través de un vaporizador o interior como un líquido bajo su propia presión de vapor.

Figura 10. Diagrama interno de contenedor tipo Dewar



Todas las personas encargadas de manipular los gases deben de tener la correcta capacitación para el manejo de los mismos y estar completamente familiarizado con las propiedades y las consideraciones de seguridad antes de manipularlo, el equipo completo incluye, una completa protección facial, gafas de seguridad, cobertor del cuerpo con aislamiento térmico o guantes de cuero, camisas de manga larga, pantalones y zapatos de seguridad. Los guantes deben ser holgados para que puedan ser quitados rápidamente si se derrama líquido criogénico en ellos. Los guantes con aislamiento térmico no permitirá a las manos entren en contacto con líquidos criogénico, ya que sólo proporcionan protección a corto plazo de contacto accidental con el líquido.

Propiedades físicas del nitrógeno líquido:

- Peso molecular: 28,01
- Punto de ebullición a 1 atm: -320.5 °F (-195,8 °C, 77 °K)
- Punto de congelación @ 1 atm: -346.0 ° F (-210,0 °C, 63 °K)
- Temperatura crítica: -232,5 °F (-146,9 °C)
- Presión crítica: 492.3 psia (33,5 atm)
- Densidad, líquido @ BP, 1 atm: 50.45 lb. / scf
- Densidad de gas @ 68 °F (20 °C), 1 atm: 0.0725 lb. / scf
- Gravedad específica, el gas (aire = 1) @ 68 °F (20 °C), 1 atm: 0.967
- Gravedad específica, líquidos (agua = 1) @ 68 °F (20 °C), 1 atm: 0.808
- Tomo específica @ 68 °F (20 °C), 1 atm: 13.80 scf / lb.
- Calor latente de vaporización: 2399 btu / lb. \* mol
- Relación de expansión, líquidos de gas, BP a 68 °F (20 °C): 1-694

### 2.5.2. Helio líquido

El helio en su estado líquido presenta características propias este es inerte, incoloro, inodoro, no corrosivo, muy frío, y no inflamable. Este no es capaz de reaccionar con otros elementos o compuestos en condiciones normales, debido a que no es corrosivo, no es necesario emplear materiales especiales de construcción en sus contenedores. Sin embargo, los materiales deben ser adecuados para un uso a temperaturas extremadamente bajas de helio líquido.

Los envases contenedores y las tuberías deben estar diseñados según las especificaciones dictadas por la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME) o las especificaciones del Departamento de Transporte (DOT) de los códigos previstos para la presión y temperaturas. El equipo para la correcta manipulación y la conservación del Helio líquido, incluye contenedores rodeados con aislantes de vacío en todas sus líneas de transferencia, además de todos los equipos y accesorios para manejar de manera segura durante el proceso de uso del líquido, algunas condiciones de uso apropiado son las siguientes:

1. Los envases o contenedores que no están conectados al sistema deben de almacenarse, en un área de almacenamiento correctamente ventilada.
2. Cuando sea necesario trasladar de un lugar a otro los contenedores se debe verificar que estos no sean perforados, o trasladados rodando sobre si mismos, estos se deben mantener en posición vertical en todo momento. Es importante evitar condiciones que generen choque térmico o mecánico. La forma correcta de trasladar los contenedores es moviéndolos empujándolos poco a poco no deslizándolos.
3. Válvulas de helio líquido nunca debe quedar abierta a la atmósfera durante períodos prolongados, así evitar fugas innecesarias y la contaminación del material, es necesario comprobar regularmente que el sistema no tenga acumulación de partes congeladas. Si existiese un bloqueo o restricción en las válvulas de abertura de ventilación, puede conducir a una excesiva presión en el contenedor y generar posteriormente ruptura.

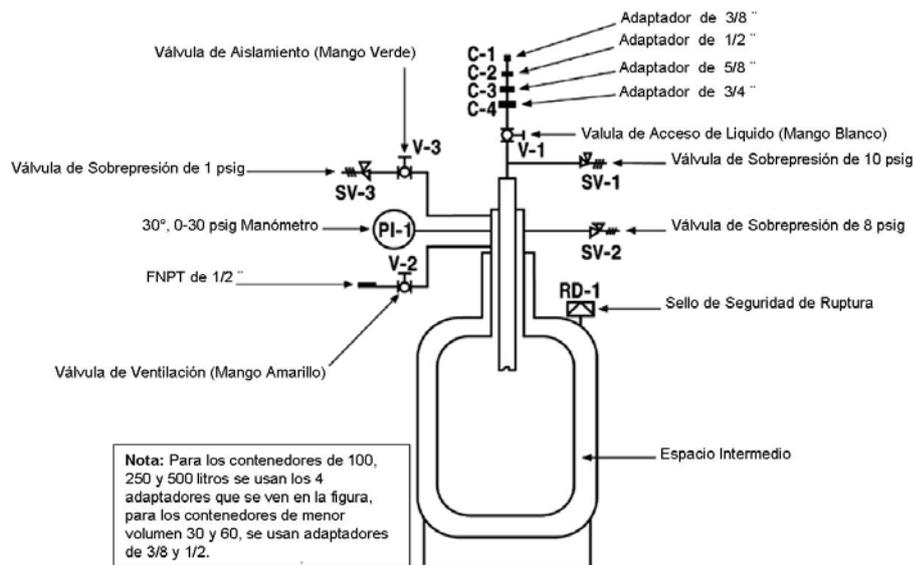
4. Debe de considerarse la protección del sistema por medio de la colocación de una valvula de seguridad en puntos claves de las líneas de transmisión, en las válvulas o en los contenedores.
5. Los contenedores deben de estar completamente protegidos contra agentes externos e internos así como entre ellos mismos, se debe aplicar mayor cuidado cuando se almacenan en el exterior.
6. Es importante considerar que algunos elastómeros y metales, como el acero al carbono, puede llegar a ser frágil a bajas temperaturas y fracturarse de una manera fácil. Estos materiales se deben evitar en el servicio criogénico, no son recomendables en el uso de las rejillas de ventilación.

Las presentaciones más frecuente de Helio líquido son en envases o contenedores, como observamos en la figura 8, donde muestra un típico diseño de contenedores de líquido. El contenedor consta de dos recipientes cilíndricos, uno dentro del otro, el espacio anular esta realizado al vacío y contiene varios tipos de aislamiento, regularmente la extracción del helio es como un líquido, pero puede ser extraído como un gas a baja presión y caudal.

Estos están protegidos por múltiples dispositivos de alivio de presión para evitar problemas con la sobrepresión, podemos apreciar en la figura la válvula SV-3 con capacidad de 1 psig que protege el tanque de sobrepresión durante el envío y almacenamiento, cuando iniciamos operaciones y el contenedor es colocado en servicio la válvula de aislamiento V-3 se cierra para aislar a la válvula de alivio de presión SV-3.

La válvula SV-2 con capacidad de 8 psig, es la que limita la capacidad de presión del tanque, permite que el tanque se considere a presión ideal a poco menos de 8 psig para mejorar la salida de helio líquido, en la tubería de transferencia esta colocada una válvula SV-1 con capacidad de 10 psig, para proteger los contenedores de problemas de presión de la operación de llenado, además un sello de ruptura RD-1, protege el exterior del tanque.

Figura 11. Modelo técnico de contenedor tipo Deward



El operario que controlara el contenedor de helio líquido debe de tener una correcta capacitación sobre el producto y el funcionamiento mecánico del tanque. En la figura número 9 podemos observar la correcta posición de las válvulas del tanque según su color, verde, amarillo y blanco. Durante el transporte y el almacenamiento, la válvula de transferencia V-1 (blanco) y la válvula de ventilación V-2 (amarillo) están cerradas, mientras que la válvula V-3 (verde) está abierta hacia los auxiliares de los dispositivos.

Figura 12. Diagrama de seguridad de posición adecuada de válvulas



Para transferir helio líquido entre tanques, se deben colocar las válvulas de la siguiente manera para que fluya a través, la válvula V-1 (blanco), V-3 (verde) están cerradas y la válvula V-2 (amarillo) se debe abrir para que ejerza presión sobre el recipiente con líquido limpio y seco de gas helio. Cuando el recipiente esta presurizado al nivel deseado se puede iniciar la transferencia de helio líquido.

El exceso de presión en el recipiente puede ser liberado antes, durante y después de que el helio líquido se transfiere, para la evacuación de gases, la válvula V-2 (amarillo) se puede abrir. Previo a almacenar o traslado de los contenedores de helio las válvulas deben de colocarse de la siguiente manera, V1 (blanco) y V-2 (amarillo) debe ser colocadas en posición de cerrado, y V-3 (verde) debe ser colocado en la posición abierta. Si las válvulas no son colocadas de esta manera especialmente la válvula V-1 (blanco) y V-2

(amarillo) puede provocar un tapón de hielo en el cuello del recipiente de líquido, la creación de un peligro potencial.

Para la manipulación del helio líquido es necesario el uso correcto del equipo de protección personal en especial en las partes más sensibles de cuerpo como lo son los ojos el equipo de protección personal recomendado para la manipulación debe incluir una completa protección facial, gafas de seguridad, guantes con aislamiento térmico de talla holgada, camisas de manga larga, pantalones, a manera de cubrir todas las partes del cuerpo que puedan tener contacto con el helio líquido y zapatos de seguridad para las personas implicadas en la manipulación de los contenedores.

En bajas concentraciones de oxígeno, la inconsciencia y la muerte puede ocurrir en segundos y sin previo aviso, si hubiera una situación de emergencia ninguna persona debe entrar en zonas donde la concentración de oxígeno es inferior a 19,5%, a menos que utilicen un aparato de respiración autónoma o línea aérea de respirador, ya que el helio a pesar de ser inodoro, incoloro, insípido, y no irritable, presentan cierta advertencia, a las personas que lo manipulen ya que puede actuar como agente asfixiante al desplazar el oxígeno en el aire a niveles por debajo de la que se requiere para sustentar la vida, la inhalación de helio en cantidades excesivas puede causar mareos, náuseas, vómitos, pérdida de conciencia y la muerte.

Propiedades físicas del helio líquido:

- Símbolo molecular: He
- Peso molecular: 4,003
- Punto de ebullición a 1 atm: -452.1 °F (-268,9 °C, 4°K)
- Punto de congelación @ 367 psia: -459,7 °F (-272,2 °C, 0°K)

- Temperatura crítica: -450,3 °F (-268,0 °C)
- 33,0 psia presión crítica: (2,26 atm)
- Densidad, Liquid@B.P., 1 atm: 7.798 lb. / cu.ft.
- Densidad de gas @ 32 °F (0 °C), 1 atm: 0.0103 lb. / cu.ft.
- Gravedad específica, el gas (aire = 1) @ 32 °F (0 °C), 1 atm: 0.138
- C Gravedad específica, Liquid@B.P., 1 atm: 0,125
- Volumen específico c @ 32 °F (0 °C), 1 atm: 89.77 cu.ft. / lb.
- Volumen específico c @ 68 °F (20 °C), 1 atm: 96.67 cu.ft. / lb.
- Calor latente de vaporización: 34.9 btu / lb. mol
- Relación de expansión, líquidos de gas, B.P. a 32 °F (0 °C): 1-754

### 2.5.3. Dióxido de carbono líquido (CO<sub>2</sub>)

El anhídrido carbónico o dióxido de carbono es un gas resultante de la combinación de dos cuerpos simples: el carbono y el oxígeno, este se produce por la combustión del carbón o los hidrocarburos, la fermentación de los líquidos y la respiración de los humanos y de los animales.

Este esta presente en proporción débil en la atmósfera el cual es asimilado por las plantas, que por su parte devuelven oxígeno. En resumen, el CO<sub>2</sub> es un gas de olor ligeramente picante, incoloro y más pesado que el aire, no es esencial para la vida y se solidifica a temperatura de -78,5°C, formando nieve carbónica, en solución acuosa el gas crea el ácido carbónico, muy inestable para ser aislado de forma sencilla.

Trabaja con la siguiente nomenclatura según su estado, número de CAS: 124-38-9 UN1013 (gas); UN2187 (líquido refrigerante); UN1845 (sólido). Estos

productos se almacenan en fase líquida, ver figura 10 y 11, a diferentes temperaturas y presiones en función de la de gas: cerca de  $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$  y la presión atmosférica del aire de gases, de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  y 20 bares de dióxido de carbono.

Figura 13. Diagrama de vaporizador de  $\text{CO}_2$

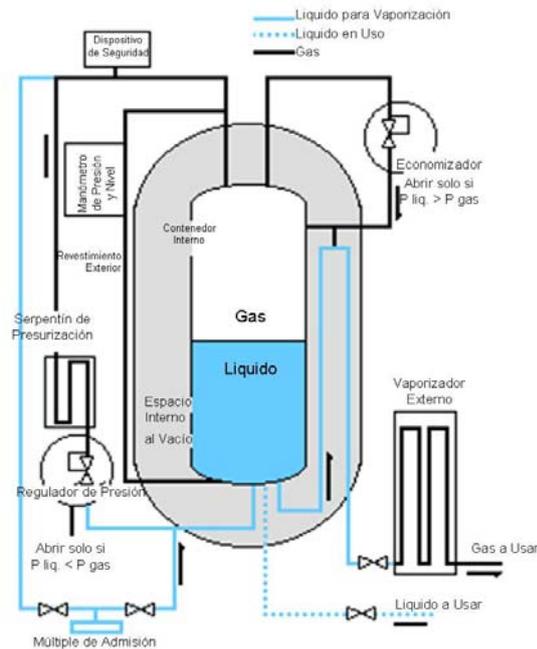
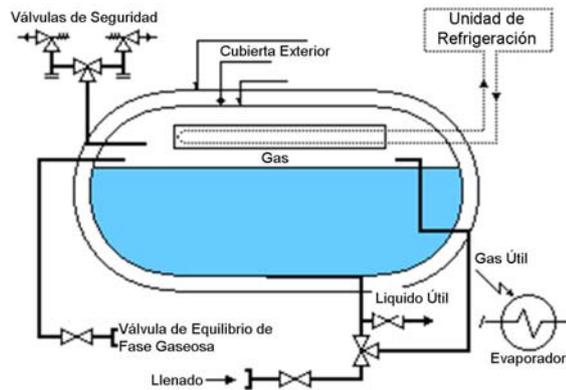


Figura 14. Sección de contenedor de  $\text{CO}_2$



El dióxido de carbono se utiliza normalmente para la protección del medioambiente, también se emplea para eliminar los humos rojos durante las cargas de chatarra y carbón, para la reducción de la nitruración durante la colada en los hornos eléctricos de arco. En la metalurgia de no férreos, el dióxido de carbono sirve para suprimir los humos durante la transferencia de mata (producción de Cu/Ni) o lingotes de metales preciosos (producción de Zn/Pb).

Pueden utilizarse pequeñas cantidades de CO<sub>2</sub> en los procesos de mezclado de las aguas provenientes de drenado de minas y nuestra aplicación de interés para el enfriamiento de sustancias debido a su capacidad de mantener su estado a bajas temperaturas.

El personal que tenga a su responsabilidad el manejo de estos gases debe tener una correcta capacitación ya que estos presenta una serie de riesgos de salubridad que ponen en riesgo la salud de los operarios debido a su alta presión y riesgos de inhalación, en condiciones normales de presión y temperatura no tiene riesgo de flamabilidad.

Propiedades físicas de dióxido de carbono:

Peso molecular: 44.01 g/mol

Fase sólida

- Calor latente de fusión (1,013 bar, en el punto triple) : 196.104 kJ/kg
- Densidad del sólido : 1562 kg/m<sup>3</sup>

Fase líquida

- Densidad del líquido (a -20 °C (o -4 °F) y 19.7 bar) : 1032 kg/m<sup>3</sup>

- Equivalente líquido/gas (1.013 bar y 15 °C (por kg de sólido)): 845 vol. /vol.
- Punto de ebullición (Sublimación) : -78.5 °C
- Calor latente de vaporización (1.013 bar en el punto de ebullición): 571.08 kJ/kg.
- Presión de vapor (a 20 °C o 68 °F) : 58.5 bar

#### Punto crítico

- Temperatura crítica : 31 °C
- Presión crítica : 73.825 bar
- Densidad crítica : 464 kg./m<sup>3</sup>
- Temperatura del punto triple : -56.6 °C
- Presión del punto triple : 5.185 bar

#### Fase gaseosa

- Densidad del gas (1.013 bar en el punto de sublimación) : 2.814 kg/m<sup>3</sup>
- Densidad del gas (1.013 bar y 15 °C (59 °F)) : 1.87 kg/m<sup>3</sup>
- Factor de compresibilidad (Z) (1.013 bar y 15 °C (59 °F)) : 0.9942
- Gravedad específica (aire = 1) (1.013 bar y 21 °C (70 °F)) : 1.521
- Volumen específico (1.013 bar y 21 °C (70 °F)) : 0.547 m<sup>3</sup>/kg
- Capacidad calorífica a presión constante (Cp) (1.013 bar y 25 °C (77°F)): 0.037 kJ/ (mol \* K)
- Capacidad calorífica a volumen constante (Cv) (1.013 bar y 25 °C (77 °F)) : 0.028 kJ/(mol \* K)
- Razón de calores específicos (Gama:Cp/Cv) (1.013 bar y 25 °C (77°F)): 1.293759
- Viscosidad (1.013 bar y 0 °C (32 °F)): 0.0001372 Poise

- Conductividad térmica (1.013 bar y 0 °C (32 °F)) : 14.65 Mw./(m \* K)

#### Misceláneos

- Solubilidad en agua (1.013 bar y 0 °C (32 °F)): 1.7163 vol. /vol.
- Concentración en el aire : 0.03 vol. %

#### **2.5.4. Neón líquido**

El neón recibe el apelativo de gas "raro" porque solo constituye menos de una milésima parte del aire que nos rodea, como características propias se presenta como un gas incoloro e insípido, que no es esencial para la vida de carácter neutro de forma que no reacciona y muy difícilmente se combina con otros compuestos químicos, debido a su enorme neutralidad presenta propiedades muy apreciadas.

Gracias a estas propiedades es útil para mantenerse a bajas temperaturas sin que esto afecte de gran manera sus propiedades, aun así las personas que tengan a su cargo la manipulación de estos deben estar debidamente capacitados y utilizar su equipo de protección, ya que el neón puede ser nocivo para la salud en alta presión puede provocar asfixia, causando serias lesiones incluyendo la muerte, aunque en si no es un elemento inflamable (en condiciones de temperatura y presión estándar).

#### Propiedades físicas del Neón líquido

Peso molecular: 20.179 g/mol

Fase sólida:

- Punto de fusión : -249 °C
- Calor latente de fusión (1,013 bar, en el punto triple): 16.61 kJ/kg.

Fase líquida:

- Densidad del líquido (1.013 bar en el punto de ebullición) :  
1207 kg/m<sup>3</sup>
- Equivalente líquido/gás (1.013 bar y 15 °C (59 °F)): 1434 vol./vol.
- Punto de ebullición (1.013 bar) : -246.1 °C
  
- Calor latente de vaporización (1.013 bar en el punto de ebullición) :  
88.7 kJ/kg

Punto crítico:

- Temperatura crítica : -228.8 °C
- Presión crítica: 27.56 bar

Fase gaseosa:

- Densidad del gas (1.013 bar en el punto de ebullición) : 9.39 kg/m<sup>3</sup>
- Densidad del gas (1.013 bar y 15 °C (59 °F)) : 0.853 kg/m<sup>3</sup>
- Factor de compresibilidad (Z) (1.013 bar y 15 °C (59 °F)): 1.0005
- Gravedad específica (aire = 1) (1.013 bar y 21 °C (70 °F)) : 0.696
- Volumen específico (1.013 bar y 21 °C (70 °F)) : 1.199 m<sup>3</sup>/kg
- Capacidad calorífica a presión constante (cp) (1.013 bar y 21 °C (70 °F)) : 0.021 kJ/(mol \* K)
- Capacidad calorífica a volumen constante (cv) (1.013 bar y 21 °C (70 °F)) : 0.012 kJ/ (mol \* K)
- Razón de calores específicos (gamma: cp/cv) (1.013 bar y 21 °C (70 °F)) : 1.650943

- Viscosidad (1.013 bar y 0 °C (32 °F)) : 0.0002974 poise
- Conductividad térmica (1.013 bar y 0 °C (32 °F)) : 45.803 mW/(m\*K)

#### Misceláneos

- Solubilidad en agua (1.013 bar y 0 °C (32 °F)) : 0.014 vol/vol
- Concentración en el aire : 0.0018 vol %

### **2.5.5. Peligros de salubridad**

Existen peligros relacionados con los líquidos criogénicos los cuales se clasifican en tres grupos principales:

- Quemaduras por frío extremo: los líquidos criogénicos y sus vapores fríos y gases relacionados pueden producir efectos en la piel similares a los de una quemadura. Las exposiciones breves que no afectan la piel del rostro o de las manos pueden dañar tejidos delicados como los ojos.

La exposición prolongada de la piel o el contacto con superficies frías pueden provocar quemaduras por el hielo. La piel se ve amarillenta. No hay dolor inicialmente, pero el dolor es intenso cuando el tejido congelado se descongela.

La piel sin protección se puede adherir al metal que es enfriado con los líquidos criogénicos. La piel se puede rasgar y desprender al separarla del metal. Incluso los materiales no metálicos son peligrosos

al tacto en temperaturas bajas. Respirar de manera prolongada el aire extremadamente frío puede dañar los pulmones.

- Asfixia: cuando los líquidos criogénicos forman un gas, el gas es muy frío, y por lo general, es más pesado que el aire. Este gas frío y pesado no se dispersa muy bien, y se puede acumular cerca del piso.

Aunque el gas no fuera tóxico, desplaza al aire. Cuando no hay suficiente aire u oxígeno, puede ocurrir asfixia y muerte. La deficiencia de oxígeno es un peligro serio en espacios encerrados o confinados.

Hay pequeñas cantidades de líquido que pueden evaporarse en grandes volúmenes de gas. Por ejemplo, un litro de nitrógeno líquido se vaporiza a 695 litros de gas nitrógeno cuando se calienta a temperatura ambiente (21°C).

- Toxicidad: cada gas puede provocar efectos específicos en la salud, los cuales pueden provocar la muerte o daños severos, cada uno de los gases posee características tóxicas distintas debido a esto antes de trabajar con un gas es necesario conocer su grado de toxicidad y sus correctos procesos de manipulación.

Ejemplo, el monóxido de carbono líquido puede liberar grandes cantidades de gas monóxido de carbono, que pueden provocar la muerte casi de inmediato.

### **2.5.6. Inflamabilidad de los líquidos criogénicos**

Existen distintas situaciones en las que puede resultar un peligro de inflamabilidad, aunque la mayoría de líquidos criogénicos no poseen como característica su inflamabilidad si existen condiciones que puedan promover tal efecto causas como, fuego directo, si el aire del recinto está cargado de oxígeno, el contacto con el oxígeno líquido, y también puede ocurrir una explosión debido a la rápida expansión a estado de gas.

- Peligro de fuego: existen muchos gases que presentan la condición de ser inflamables, gases como el hidrógeno, el metano, el gas natural licuado, y el monóxido de carbono, los cuales pueden quemarse o explotar fácilmente al entrar en contacto con el fuego directo. El hidrógeno es particularmente peligroso, ya que forma unas mezclas inflamables con aire en concentraciones muy variadas (4 por ciento a 75 por ciento por volumen), además es de fácil ignición.
- Aire cargado de oxígeno: el hidrógeno líquido y el helio líquido son tan fríos que pueden hacer líquido el aire con el que entran en contacto, por ejemplo: el aire líquido se puede condensar en una superficie enfriada por hidrógeno o helio líquidos, en cambio el nitrógeno se evapora más rápidamente que el oxígeno en el aire líquido, esta acción deja a su paso una mezcla de aire líquido que, cuando se evapora, da una alta concentración de oxígeno y este aire cargado de oxígeno presenta ahora todos los peligros que presenta el oxígeno por sí sólo.
- Peligro relacionado con oxígeno líquido: el oxígeno líquido contiene 4000 veces más oxígeno por volumen que el aire normal. Los

materiales que normalmente se considerarían no combustibles (como el carbono y los aceros inoxidable, el hierro, el aluminio, el zinc y el teflón (PTFE)) se pueden quemar en presencia de oxígeno líquido. Muchos materiales orgánicos pueden reaccionar de manera explosiva, especialmente si se produce una mezcla inflamable. Las ropas rociadas o mojadas con oxígeno líquido pueden ser altamente inflamables y permanecer así por horas.

- Explosión debida a la rápida expansión: si no se tienen los dispositivos adecuados para ventilación o liberación de presión en los recipientes, se puede acumular una cantidad enorme de presión. La presión puede provocar una explosión llamada "explosión por líquido en ebullición que provoca vapor en expansión".

Las condiciones inusuales o accidentales, como el fuego externo, o agrietamiento en la zona de vacío que brinda el aislamiento térmico, pueden provocar aumentos muy rápidos en la presión y la válvula de liberación de presión tal vez no pueda manejar estos aumentos tan rápidos por lo tanto, los recipientes deben tener otro dispositivo de respaldo como el disco frangible.

## **2.6. Materiales a los que se aplican los tratamientos criogénicos**

Los tratamientos criogénicos dada su naturaleza de aplicación poseen un alto grado de compatibilidad aunque estos no son aplicables a cualquier material, la experimentación con tratamientos criogénicos en la actualidad se realiza con una gran variedad de materiales con los que se esperan nuevos

resultados para futuras aplicaciones. Las aplicaciones experimentales actuales, a lo largo de su desarrollo se han inclinado a la aplicación en aleaciones de acero, debido a que estas son los elementos de trabajo más comunes o necesarios en la producción ya que gozan de una alta demanda como materia prima en piezas que requieran un alto grado de resistencia al desgaste.

A lo largo de su desarrollo estos han encontrado su nicho de aplicación en los aceros de herramientas ya que estos al ser tratados criogénicamente incrementan las propiedades físicas de estos haciendo posible aplicarlos en condiciones de trabajo más exigentes.

Hay materiales que congenian de muy buena manera con los tratamientos criogénicos aunque esto depende de factores como la forma de aplicación de tratamiento, tiempo de permanecía, temperatura de congelación, entre otros, los cuales en conjunto con la aplicación del tratamiento térmico de altas temperaturas, el cual acentúa el buen desempeño del tratamiento criogénico en la pieza y más aún en su vida útil.

La tabla I muestra las propiedades de algunos aceros que sufrieron amplias variaciones en condiciones de trabajo en frío y tratamiento criogénico. Los aceros al carbón poseen un gradiente de cantidad de carbono desde la superficie hacia el interior, lo cual incrementa sus cantidades de austenita retenida por ende una composición de martensita, para estos aceros los altos niveles de austenita resultan perjudiciales y es necesario controlarlos por medio de tratamientos criogénicos.

Con la aplicación de los tratamientos criogénicos en los aceros logramos incrementar la estabilidad microestructural y obtenemos un aumento significativo en la dureza del material el cual es logrado por la transformación de

austenita retenida a martensita esto lo podemos constatar en un material tratado medido mediante una tabla comparativa de escala Rockwell C. En los componentes de precisión es debido aplicar múltiples ciclos de Tratamiento Criogénico por los altos grados de especificaciones que estas piezas deben de alcanzar, para estabilizar su microestructura interna y aliviar las tensiones internas de esta manera lograr una estabilidad dimensional muy precisa.

Los engranajes y los rodamientos requieren un porcentaje específico de composición de austenita retenida para alcanzar valores aptos para su funcionamiento en condiciones de resistencia a la fatiga y al desgaste. Los tratamientos criogénicos son aplicados con éxito en materiales que componen las siguientes partes mecánicas mejorando y contribuyendo a resolver estos problemas:

- Alta resistencia a la abrasión y alta resistencia a la corrosión.
- Alta protección a la erosión de líquidos y a las distorsiones causadas durante el maquinado.
- Liberación de tensiones residuales.

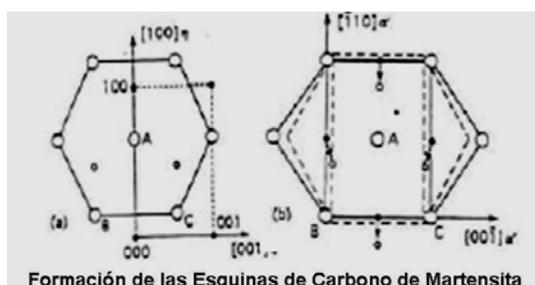
Tabla I. Porcentaje del incremento en resistencia a la corrosión en materiales tratados criogénicamente.

<b>Porcentaje del incremento en resistencia a la corrosión en materiales tratados criogénicamente</b>				
<b><i>Materiales que mostraron cambios</i></b>				
Codificación del material		Descripción	Tratamiento en frío -79 °C (-110 °F)	Tratamiento criogénico -190 °C (-310 °F)
AISI (USA)	DIN (BRD)			
D2	1.2379	Acero al cromo	316%	817%
S7		Acero para herramienta aleación de silicón	241%	503%
52100	1.3505	Acero para rodamientos	195%	420%
O1	1.251	Acero para trabajo en frío	221%	418%
A10		Acero para herramienta aleación de grafito	230%	264%
M1	1.3346	Acero al molibdeno	145%	225%
H13	1.2344	Acero para trabajo en caliente	164%	209%
M2	1.3341	Acero tungsteno molibdeno	117%	203%
T1	1.3355	Acero al tungsteno	141%	176%
CPM 10V		Acero aleado	94%	131%
P20	1.233	Acero de molde	123%	130%
440		Acero inoxidable martensítico	128%	121%
<b><i>Materiales que mostraron cambios</i></b>				
Codificación del material		Descripción	Tratamiento en frío -79 °C (-110 °F)	Tratamiento criogénico -190 °C (-310 °F)
AISI (USA)	DIN (BRD)			
430		Acero inoxidable ferrítico	116%	119%
303	1.4305	Acero inoxidable austenítico	105%	110%
8620	1.6523	Acero para endurecimiento	112%	104%
C1020	1.0402	Acero al carbono	97%	98%
AQS		Acero para casteado	96%	97%
T2		Acero al tungsteno	72%	92%

### 2.6.1. Capacidad de aceros tratados criogénicamente

Se ha demostrado que el acabado superficial de los materiales tratados criogénicamente versus los no tratados reducirá en aproximadamente la mitad, un acabado superficial se caracteriza por la reducción en el número de picos y valles microscópicos (Ver., figura 15). Un menor número de picos y valles significa una reducción en el número de contactos aspereza, por tanto, contribuyendo a una reducción en el desgaste.

Figura 15. Formación de Carbonos



Fuente: *American Standards of Metals Handbook*, Volumen 4 Heat Treating, 1997.

La parte Tratada Criogénicamente alcanzó un mucho mejor acabado rms =  $.431 \mu m$ , mientras que los no tratados rms =  $.773 \mu m$ . esto es efecto de la precipitación de partículas de carburo, las investigaciones han demostrado que estas finas partículas de carburo se precipitan durante el tiempo de inmersión criogénica, estos se suman a las más grandes partículas de carburo presentes antes del tratamiento criogénico.

Estas partículas finas, junto con las partículas más grandes, forman una matriz de material más densa, más cohesiva y más dura, haciendo que el coeficiente de desgaste disminuya, en consecuencia la tasa de desgaste. En situaciones de desgaste, la formación de martensita y las partículas de carburo trabajan juntos para reducirlo, las partículas adicionales de carburo sirven como apoyo a la matriz de martensita, lo que hace más difícil la abrasión del material.

### **2.6.2. Resistencia al corte y a la abrasión.**

Uno de los campos de aplicación en los que el proceso criogénico muestra mejores resultados es en las herramientas (troqueles, estampas, cuchillas) de corte y estampación.

Los materiales habitualmente utilizados para este tipo de herramientas son los aceros de trabajo en frío para matrices de corte, punzones y cuchillas, y los aceros de trabajo en caliente para estampas de forja en caliente o semicaliente y moldes de inyección, también se utilizan aceros rápidos de origen pulvimetalúrgico, tanto para trabajos en frío como en caliente.

Todos estos materiales responden típicamente bien al tratamiento criogénico aunque, lógicamente, los resultados dependerán de cada caso, es importante recordar que se trata de un tratamiento térmico, integral y permanente, lo cuál quiere decir que el material puede repasarse o reafilarse sin perder prestaciones.

Por ejemplo, un punzón tratado podrá ser afilado sucesivas veces, manteniendo sus prestaciones, sin necesidad de someterlo otra vez al tratamiento, además es importante resaltar que el proceso es perfectamente compatible con los recubrimientos.

Entre los casos en los que se aprecian mejores resultados están los útiles de punzonadora, generalmente de acero rápido, en los que es habitual que los punzones y matrices hagan más del doble de piezas entre afilados.

Otro caso en el que los resultados suelen ser satisfactorios es el de las matrices de corte utilizadas para el rebabado de piezas inyectadas o forjadas.

Esto mismo es aplicable a matrices y punzones para corte de chapa de diversos materiales, sean de acero rápido o de acero de trabajo en frío es habitual aumentar de manera importante su rendimiento.

Pero no sólo en el corte de metal se pueden encontrar buenos resultados. Las cuchillas para corte de plástico, papel, tabaco, etc. también multiplican su rendimiento.

#### **Modificación de la microestructura de los materiales:**

Un estudio realizado por el IIT research institute publicado en noviembre de 1995 patrocinado por la unidad Mantech del Ejército de los EE.UU., se llevó a cabo para estudiar " Los efectos de la carburización y los tratamientos criogénicos en la modificación de la microestructura de los materiales ".

Los resultados de las pruebas se presentaron en la exposición INFAC Industry, el 13 de junio de 2000 fueron los siguientes: el tratamiento criogénico mostró un incremento del 50% en la mejora de la resistencia contra el desgaste, un 5% más de capacidad de carga, y un 40°F a 60°F mayor en la temperatura de temple.

A pesar de que estos experimentos se realizaron para un acero AISI 9310 (material estándar para engranajes de transmisión de helicópteros) las conclusiones muestran resultados prometedores que pueden ser aplicables a la cuestión general de mecánica y resistencia al desgaste.

### Análisis en herramientas:

Un estudio en el cual se probaron diez herramientas construidas con aceros de herramientas y un acero inoxidable, los cuales fueron probados contra el desgaste, utilizando como sistema de desgaste un disco metálico de Ni-Cr-Mo y agua como lubricante para mantener la temperatura, comparando su comportamiento entre unas tratadas únicamente con tratamientos térmicos de altas temperaturas y las otras después de haber sido sometidas a un proceso que incluyo, tratamiento térmico a altas temperaturas y tratamiento criogénico - 190°C (-310°F).

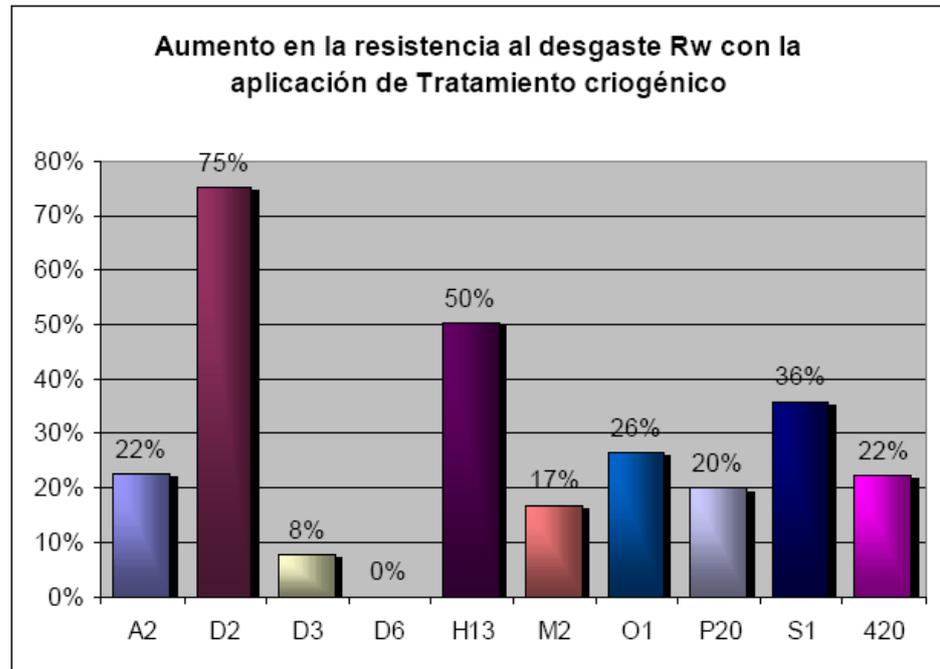
En la figura 16 y en la tabla II, se pueden observar los resultados de las herramientas tratadas así como su comportamiento ante el desgaste.

Tabla II. Comparativa de Resistencia al Desgaste en aceros.

Material	Dureza Vickers Mpa	Desgaste en 600 seg. Mm <sup>3</sup>	Relación de desgaste (Wo) mm <sup>3</sup> /s	Resistencia al desgaste Rw
A2	7305	0.3332	0.0005553	79310
A2 crio	8482	0.2343	0.0003906	97119
D2	6021	0.2458	0.0004097	130420
D2 crio	6021	0.1404	0.0002340	228365
D3	5472	0.1444	0.0002407	244295
D3 crio	5825	0.1259	0.0002098	263258
D6	5433	0.1060	0.0001766	335372
D6 crio	5491	0.1048	0.0001746	335507
H13	4658	0.3217	0.0005361	128850
H13 crio	4795	0.2080	0.0003466	193567
M2	7845	0.1709	0.0002849	143954
M2 crio	8384	0.1368	0.0002281	168255
O1	6658	0.2090	0.0003484	138714
O1 crio	7051	0.1562	0.0002603	175322
P20	5433	0.4977	0.0008296	71394
P20 crio	5884	0.3829	0.0006382	85691
S1	6452	0.3516	0.0005860	85097
S1 crio	6511	0.2565	0.0004275	115592
420	5521	0.8359	0.0013932	41832
420 crio	5795	0.6522	0.0010869	51078

Fuente: *American Standards of Metals Handbook*, Volumen 4 Heat Treating 1997.

Figura 16. Aumento de la resistencia al desgaste, en algunos aceros, por medio de tratamientos criogénicos



Fuente: *American Standards of Metals Handbook*, Volumen 4 Heat Treating 1997.

El grupo de herramientas que experimento el tratamiento en criogénico (-190 °C), mejoro su resistencia al desgaste hasta un 104% hasta el 560% en comparación al grupo que fue tratado únicamente por medios térmicos de alta temperatura. Estos resultados experimentales nos dan una muestra de cómo el tratamiento criogénico mejora notablemente las propiedades de los materiales.

#### **Aplicación en rodamientos:**

Un artículo publicado en *Lubrication Engineering* en octubre de 2002, investiga los efectos de las tensiones y la transformación de la Austenita retenida, que se activan por contacto de rodadura en los aceros 52100 para rodamientos. La conclusión según el documento es que el origen de las

tensiones residuales radica en el contacto del rodamiento y estas son asociadas con la fase de transformación.

En el pasado se tenía la idea que el endurecimiento de la superficie era la principal razón por la cual se obtenían tensiones residuales, además que la cantidad de Austenita retenida influye con la vida del rodamiento, este es uno de los factores tomados en consideración.

El denominador común de los múltiples estudios de los centros de investigación criogénica es la máxima transformación de austenita retenida en martensita, por lo tanto, el tratamiento criogénico elimina el principal mecanismo de generación de tensiones residuales en los rodamientos de bolas debido a la rodadura.

Por supuesto, la mayoría de rodamientos no alcanza su máximo de vida, a causa de factores como la contaminación, la lubricación inadecuada o incorrecta y la mala instalación.

Sin embargo, una vez solucionados algunos de estos hechos que generan un deterioro en los rodamientos el tratamiento criogénico presentará la próxima oportunidad para extender la vida aún más lejos, más allá de las expectativas.

### **2.6.3. Resistencia a la fatiga y desgaste**

El tratamiento criogénico tiene un beneficio directo en la mejora de las condiciones de desgaste sobre los materiales incrementando su resistencia a la

fatiga, con el incremento de estas características la aplicación de este proceso permite reducir los gastos de mantenimiento debido a la reducción del desgaste y al aumento de la fiabilidad en diversos componentes brindándole a la pieza una vida útil muy superior.

Por ejemplo, es notable el aumento de rendimiento que se produce en los resortes, estos con el uso van agotando su elasticidad quedando inservibles o llegando incluso a romper, al ser sometidos a un tratamiento criogénico los resortes de un sistema anti vibraciones se consiguió que duren más del doble y ha eliminado el riesgo de roturas.

Para un motor convencional, la práctica de un tratamiento criogénico beneficia notablemente a todos los componentes y se pueden extender los beneficios del mismo tratando los elementos de fuerza de la transmisión, algunas piezas beneficiadas serian:

- Cilindros y pistones (conservan mejor su geometría, no se deforman).
- Cigüeñales y bielas (aumentan su resistencia a la fatiga).
- Bloques y culatas (se deforman menos y disipan mejor el calor).
- Resortes de válvula (conservan su elasticidad por más tiempo).
- Embragues (se desgastan menos) y transmisiones (fatiga).
- Cajas de cambios (los engranajes se desgastan mucho menos).
- Discos de freno (aumentan su efectividad, duran más y no se deforman).
- Motores completos (ligeros aumentos de potencia y par).

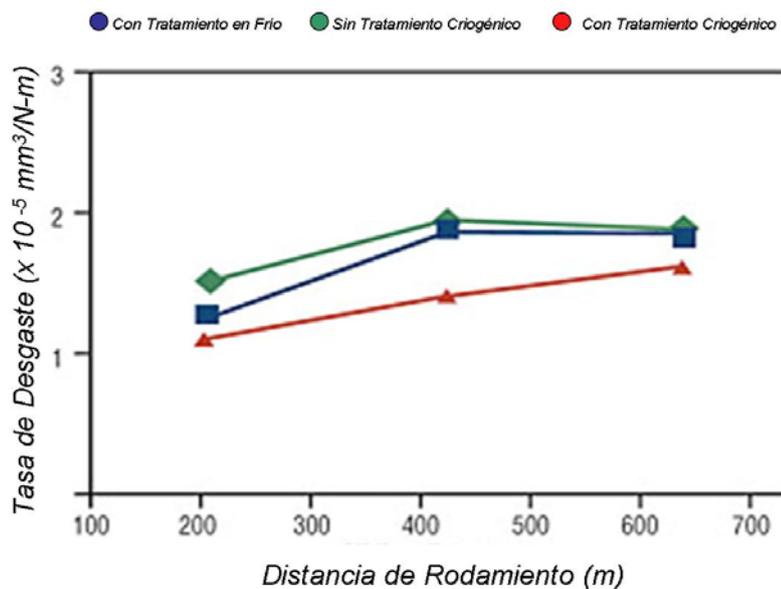
Se has sometido las piezas del sistema de frenos a tratamientos criogénicos como parte de las mejoras obtenidas los discos de freno mostraron

un rendimiento superior, estos elementos, que son sometidos a grandes esfuerzos, trabajan a desgaste pero también pueden fallar por deformaciones y por fatiga (grietas) se obtuvieron las siguientes mejoras:

- Duran más y tienen un desgaste más homogéneo.
- La menor degradación de la superficie del disco tiene como consecuencia un menor desgaste de las pastillas.
- Los discos son más resistentes al calentamiento y al desgaste.
- Se retarda la aparición de grietas y se evitan las deformaciones y alabeos en los discos.

En la figura 17 encontramos una comparación cuantitativa entre las piezas tratadas con distintos tratamientos que nos muestran el aumento de la resistencia al desgaste:

Figura 17. Comportamiento al desgaste de aceros tratados criogénicos, en frío y sin tratamiento.



Fuente: *American Standards of Metals Handbook*; Volumen 4; Heat Treating; 1997

En la investigación acerca de la resistencia al desgaste y los cambios microestructurales que sufre una pieza al ser tratada criogénicamente, una misma pieza tratada por diferentes métodos no presenta resultados superiores en comparación a una pieza tratada criogénicamente.

#### **2.6.4 Resistencia a la corrosión**

##### **Comparación de aceros bajo los efectos de la corrosión:**

El análisis de la corrosión fue aplicado en elementos en estado de suministro, acero inoxidable y en aceros de herramienta, tratados criogénicamente, los cuales se analizaron por medio de agua saturada de gas de sulfuro de hidrógeno.

La disminución del valor de la corrosión varió de un modesto 1.35 a un valor significativo de 1.86. El mecanismo propuesto para evitar la corrosión consiste en un ajuste en los límites de grano, lo que limita la difusión de sulfuro de hidrógeno en el metal.

Un acero inoxidable austenítico Tipo 316, es susceptible a la corrosión intergranular y, al parecer, el refinamiento de los límites del grano no tenía mucho efecto sobre los valores de corrosión en él, pero ya tratado criogénicamente podemos acentuar un gran aumento en la resistencia a la corrosión.

Los aceros al ser tratados criogénicamente nos brindan una mejora significativa en la corrosión, y aumentan así la vida útil de nuestras piezas, aunque se trabajen en condiciones que favorezcan la corrosión.

### **Efecto en propelas de turbina de agua:**

Las mejoras más comunes y mejor documentadas del aumento a la resistencia al desgaste mediante el uso de tratamiento criogénico, se ha visto en cuchillas y herramientas, pero también se ha demostrado que se puede extender la vida útil de componentes que no están diseñadas para esos usos, tal es el caso de una propela de una turbina de agua.

En una fábrica de papel se estaba presentando una extremada baja vida útil del impulsor de una bomba de agua, debido a las condiciones de cabeza del sistema, el impulsor era sometido a grandes fuerzas de cavitación lo que causo que se declarara inservible después de sólo 3 meses en servicio. La fábrica se vio obligada al cambio de rotores a cabo cada 3 meses. (Figura. 18)

Figura 18. Turbina Golpeada Severamente por la Cavitación



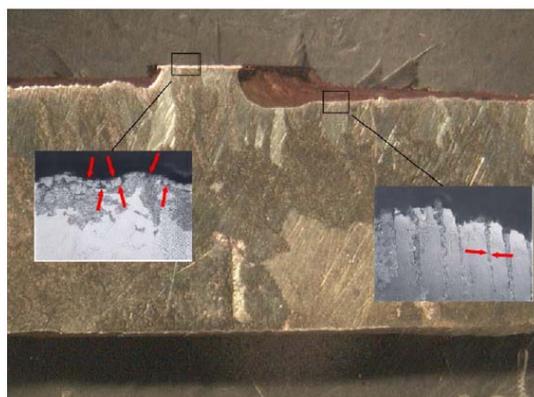
Rediseñando este sistema para las condiciones de uso, haciendo el análisis de costos, la única opción parecía ser la compra de costosos impulsores de acero inoxidable. Como alternativa, los impulsores de aleación de bronce y acero fueron reparados con una combinación de tratamiento

superficial y tratamiento criogénico, el resultado fue un aumento de la dureza y de la resistencia al desgaste en la aleación, así como el aumento en la vida del impulsor en las mismas condiciones de trabajo.

La Figura 19 muestra con detalle dos ámbitos distintos del impulsor de aleación de acero y bronce. La parte izquierda a 400X muestra el perfil de la parte del impulsor Tratada Criogénicamente. Se puede notar en esta área tratada la porción que muestra poca erosión debido a la cavitación, además se puede apreciar las zona afectadas de una manera poco significativa aproximadamente 100 micras, además muestra una región rica en carbono bien definida en la superficie.

En la parte derecha, observamos el área sin tratar la cual nos muestra una estructura muy diferente a la vista, con pequeñas alteraciones perpendiculares a la superficie las cuales aparecen como porosidades en el material.

Figura 19. Comparación de las secciones transversales de una turbina tratada y una no tratada



La resistencia a la abrasión en la parte tratada criogénicamente supero en un factor de 6 o mayor al área sin tratamiento criogénico. Este enfoque nos

muestra una promisorio aplicación de estos tratamientos para aumentar la capacidad de carga, aunque en otros casos como rodamientos lubricados no presenten los mismos resultados la aplicación de los tratamientos criogénicos proporciona una oportunidad para aumentar la vida útil.

## **2.7. Usos y aplicaciones**

Las aplicaciones de los tratamientos criogénicos son muy variados y se utilizan con éxito donde hay problemas de durabilidad y desgaste, esas aplicaciones en donde se busca mayor resistencia a la fatiga mecánica o térmica. Por otra parte, puede usarse cuando se requiere eliminar tensiones, una mayor calidad de acabado o gran estabilidad dimensional.

Existen muchos sectores y campos de aplicación desde herramientas de corte hasta partes automotrices y palos de golf. En general se aplican en una gran cantidad de ámbitos:

- En aplicaciones industriales: han sido aplicados a los aceros de herramienta para, principalmente, aumentar la resistencia al desgaste, usándose por ejemplo en matrices, punzones, sierras, cuchillas o moldes.
- En instrumentos musicales: es utilizado para trompetas, saxos, cuerdas de guitarra y piano. En instrumentos realizados en bronce o latón también se utiliza para proporcionar mejor tonalidad y mayor calidad en el sonido.

- En armamento: se aplica a cañones, rifles o revólveres, ya que elimina por completo la austenita retenida y evita así los cambios dimensionales que se dan cuando está transformada en la vida útil del arma.
- En deportes: como el golf es utilizado en palos, cabezas y pelotas. En el patinaje se utiliza para la cuchilla de los patines de hielo
- En la industria metal-mecánica: son aplicados a aquellos aceros que después del temple conservan todavía en su estructura una cierta cantidad de austenita residual sin transformar, cuyo porcentaje varía con la composición, temperatura de austenización, medio de enfriamiento, tamaño de la pieza, etc. y en él se produce la transformación de esta austenita retenida ( al igual que en el tratamiento subcero) y la precipitación de carburos, causa del aumento en la resistencia al desgaste respecto a los tratamientos subcero.

Es una tecnología en evolución y las posibilidades de utilización del proceso están en pleno desarrollo. Por ello, continuamente se están encontrando nuevas aplicaciones en las que el proceso permite aumentar el rendimiento y la calidad de los productos tratados, muchas situaciones en las que existan problemas de desgaste o fatiga puede constituir una oportunidad para aplicar con éxito esta tecnología.

### **2.7.1. Herramientas de mecanizado**

Es uno de los usos más extendidos de los tratamientos criogénicos, en general la aplicación es en herramientas para arranque de viruta. Con resultados muy satisfactorios. El proceso tiene excelentes efectos sobre los aceros rápidos (incluidos los pulvimetalúrgicos) y sobre algunos tipos de metal duro. No afecta de forma apreciable a la dureza y no provoca deformaciones ni cambios dimensionales en las herramientas.

En el rendimiento de una herramienta influyen muchos factores como el material, los tratamientos que se le apliquen, diseño, geometría, los acabados, los recubrimientos, trabajo de aplicación, el material a mecanizar, el lubricante e incluso la propia máquina.

El tratamiento criogénico permite aumentar notablemente el rendimiento de las herramientas, pero no hay que olvidar que es una variable más, el proceso se aplica una única vez ya que se trata de un tratamiento integral y permanente.

La herramienta tratada podrá ser reafilada cuantas veces se desee sin la pérdida de sus propiedades obtenidas durante el tratamiento, por otra parte el tratamiento es totalmente compatible con los recubrimientos habituales en este tipo de herramientas, ya que un acero rápido puede ser recubierta cuantas veces se desee sin que ello afecte al efecto conseguido con el proceso criogénico.

Hay otros tipos de herramientas de acero rápido que también mejoran mucho su rendimiento herramientas como: fresas, brocas, sierras, cuchillas, puede que lleguen a duplicar o incluso triplicar su vida. Pero los resultados

dependen mucho de cada caso y también podemos encontrar aplicaciones en las que no se observan mejorías significativas.

### **2.7.2. Electrodo**

Los electrodos de cobre para soldadura por resistencia tienen que cumplir requisitos muy exigentes. Por una parte tienen que ser suficientemente resistentes para aguantar el esfuerzo mecánico requerido por el proceso y deben tener buena conductividad térmica para que el calor generado se disipe rápidamente. Estas dos características son difíciles de conseguir al mismo tiempo, ya que las aleaciones de cobre más resistentes tienen una peor conductividad y viceversa.

El cobre es un material que responde muy bien a los tratamientos criogénicos, en el caso de los electrodos de soldadura se puede mejorar, simultáneamente, la resistencia mecánica y la conductividad. De este modo, obtendremos electrodos más resistentes a la fatiga térmica. El grado de mejora depende, entre otros factores, de la geometría de los electrodos. En algunos casos se pueden conseguir excelentes resultados.

Por ejemplo, en la industria automotriz un fabricante utiliza electrodos que duran hasta 6 veces más después de ser sometidos al proceso. Bajo estas condiciones es evidente la reducción de costos de producción debido al aumento de vida de los electrodos lo que mejora la calidad conseguida en la soldadura además no hay que olvidar la capacidad del tratamiento para eliminar tensiones en los materiales, lo cual también es aplicable a las uniones soldadas.

### **2.7.3. Audio**

Uno de los principales campos de aplicación de esta tecnología es el sector de la alta fidelidad. La conductividad mejora, aumentando las prestaciones de los componentes de los equipos y proporcionando un sonido más limpio.

Válvulas, componentes electrónicos, cables de altavoz, cables de conexión y cables de alimentación son elementos que, con la aplicación del tratamiento, permite reducir o eliminar las tensiones residuales y otras imperfecciones microestructurales provocadas durante los procesos de fabricación, que producen ruido.

### **2.7.4. Armas de fuego**

El mundo de las armas de fuego es otra de las aplicaciones con más éxito. El tratamiento se aplica básicamente a los cañones de las armas. Las ventajas que se consiguen en el material es que éste se comporte de una forma más uniforme y más estable frente a las deformaciones producidas por el calentamiento y la presión, consiguiendo un arma más precisa. Además, el material se desgasta menos, acumula menos suciedad y es más sencillo de limpiar.

### **2.7.5. Instrumentos musicales**

Es una de las más curiosas aplicaciones del tratamiento. El uso del mismo se centra en los instrumentos de viento realizados en metal, como trompetas, saxos, trombones y en las cuerdas de los instrumentos de cuerda. Gracias a la eliminación de tensiones residuales tras la aplicación del tratamiento, se consigue que el instrumento vibre de una forma más natural, proporcionando un sonido más puro y con menos esfuerzo.

### **2.7.6. Cuchillos**

El acero inoxidable destinado a la fabricación de cuchillos es uno de los materiales que incrementa sus prestaciones gracias a la aplicación del tratamiento. El material tratado, sin incrementar su dureza, permite que el filo se mantenga durante más tiempo y ofrece una mejor sensación al cortar.

## **2.8. Ensayos no destructivos por medios criogénicos**

### **2.8.1. Stair case**

Consiste en la aplicación de un enfriamiento escalonado, paso por paso, con el fin de revisar propiedades mecánicas, tales como, posibles fracturas, cambios en la resistencia, fatiga, tenacidad, torque de algún ensamble, etc.

Los pasos de enfriamiento, consisten en bajar de temperatura ambiente a temperaturas seleccionadas, controladas (Típicamente de  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $-90^{\circ}\text{C}$ ), haciendo paso a paso la revisión de fractura a simple vista entre cada ciclo, si algún la revisión en un ciclo no falla, el block es sometido a la próxima temperatura.

Resultados Obtenidos: obtenemos una apreciación a simple vista si existe fractura o no regularmente se acondiciona el material a una temperatura y luego, se al iniciar el tratamiento podemos tener un margen de error en lecturas de  $-10^{\circ}\text{C}$ . Esta prueba fue sustituida por la prueba de desfase.

### **2.8.2. Desfase térmico**

Consiste en el enfriamiento continuo, con un registro de temperatura interna, este tratamiento tiene una aplicación muy variada casi aplicable a cualquier producto, desde cualquier temperatura hasta temperaturas criogénicas, con el fin de revisar propiedades mecánicas, tales como posibles fracturas, cambios en la resistencia, fatiga, tenacidad, torque de algún ensamble, etc.

El proceso en si consiste en un enfriamiento continuo, con la característica principal de contar con un desfase aproximado a  $-10^{\circ}\text{C}$ . La temperatura real de la pieza es revisada constantemente, desde temperaturas ambientes hasta  $-90^{\circ}\text{C}$ , la revisión de fractura a simple vista cada  $10^{\circ}\text{C}$  nos hace obtener resultados visible como fracturas siempre con un margen de error entre temperaturas de  $-10^{\circ}\text{C}$ .

### **2.8.3. Choque térmico**

Mediante un enfriamiento súbito de la pieza se da la aplicación de este ensayo no destructivo, desde temperatura ambiente o incluso después de algún calentamiento, se llegan las piezas a temperaturas criogénicas mediante líquidos criogénicos, estas temperaturas generan un choque térmico en la pieza las temperaturas de choque térmico pueden ser de -20 a -94°C hasta -196°C.

Durante el tratamiento se da una revisión cada 6 minutos de inmersión, para verificar que no existan fracturas o algún otro problema en la pieza, así obtener resultados que exactos, ya que los márgenes de error de temperatura en este análisis son menores.

## **2.9. Ventajas y desventajas**

Los efectos de los tratamientos criogénicos en los materiales con su aplicación experimental e industrial nos ha dado muestras con el tiempo de las muchas capacidades de mejora que se obtienen, esto depende de las condiciones de diseño de la pieza y las características que esperemos de nuestro material. Entre las ventajas y desventajas del material podríamos encontrar.

### **La conversión de austenita a martensita**

Por medio de los tratamientos térmicos podemos transformar la austenita retenida a martensita muy fácilmente, pero esta transformación se logra con una deficiente estabilidad estructural en la pieza y la conversión se logra en

niveles bajos en consideración con los resultados de los Tratamientos criogénicos.

Los tratamientos criogénicos transforman una mayor cantidad de Austenita retenida, dicha transformación es casi completa lo cual incrementa sobremanera las propiedades del material, incrementando las propiedades al desgaste y corrosión, la transformación de la austenita a martensita es fundamental en el tratamiento y nos permite alcanzar los objetivos del mismo.

### **Formación de partículas de carbono**

El endurecimiento normal por medio de tratamientos térmicos crea depósitos de carbono en la pieza que perjudica la estructura cristalina de la misma. Durante la fase térmica del proceso criogénico se precipitan micropartículas de carbono fuera de la red cristalina se distribuyen a lo largo de todo el material, de esta manera reducimos las tensiones residuales en la pieza y crea una mejorada y mas fuerte estructura cristalina que proporciona una mejora en la resistencia al desgaste de la pieza.

### **La estructura del grano es refinada**

Todas las partículas individuales que forman el acero son colocadas en un lugar definido logrando un estado más estable. Estas partículas se alinean y se entrelazan con las demás de esta forma se refuerza los lazos moleculares.

### **Mejora en las tensiones internas**

La alineación de las partículas y el refinamiento del grano molecular ayudan a la liberación de las tensiones interna del material. Esto contribuye a la vida útil de la pieza evitando que falle y optimiza su durabilidad.

### **Bajas temperaturas**

Las temperaturas extremadamente frías del tratamiento criogénico y la baja velocidad del movimiento atómico, incrementa la energía de las conexiones internas que aumenta el balance estructural a lo largo del material, esto nos da como resultado un material muy uniforme con una microestructura refinada y mas densa con muchas mejoras en sus propiedades. Mediante la aplicación práctica de los tratamientos criogénicos se han encontrado muchos factores que se obtiene pero dependen en gran medida del tipo de material y de la aplicación considerada.

- Reduce sustancialmente el tiempo de maquinado.
- Permite realizar análisis metalúrgicos de tensiones o esfuerzos antes que fallen.
- Ahorros significativos en el mantenimiento y compra de equipo.
- Resistencia a los diversos mecanismos de desgaste y adhesión.
- Aumento de la tenacidad.
- Estabilidad dimensional y eliminación de tensiones internas.
- Aumento de la vida a fatiga, tanto mecánica como térmica.
- Mejor conductividad térmica y eléctrica.
- Mejora de la maquinabilidad y el acabado superficial.
- Reducción de vibraciones.

- Reducción en la falla por microfisuras como resultado de una mejor propagación de las líneas de tensión superficial.

### **2.9.1. Aplicaciones exitosas de tratamientos criogénicos**

#### **Aceros para trabajo en frío**

Los aceros para trabajo en frío han demostrado buenos resultados al ser Tratados Criogénicamente, estos aceros son utilizados para herramientas que operaran a una temperatura menor a los 200 °C (400 °F). Los grados de acero de la serie W y D presentaron una clara mejora en su dureza al ser tratadas a – 100 °C (–150 °F).

#### **Aceros inoxidables austeníticos**

El tratamiento Criogénico puede incrementa la tenacidad en los aceros inoxidables austeníticos, para lograr una excelente mejora en la resistencia a la corrosión y al desgaste ya que excesos de Martensita puede generar micro fisuras en la pieza, gracias a su composición química estos aceros son muy prácticos para la aplicación de los tratamientos criogénicos al tener una buena cantidad de carbono en su composición, lo que les da también una mejor resistencia y buenas propiedades en distintas aplicaciones .

#### **Aceros para trabajo en caliente**

La aplicación en los aceros para trabajo en caliente ayuda significativamente en estos aceros que serán maquinados a temperaturas arriba de 200 °C (400 °F) por ejemplo en aplicaciones de forjado y extrusión los aceros una mejora en la vida útil de aproximadamente 50%.

### **Aceros de alta velocidad**

Los aceros de alta velocidad utilizados típicamente para herramientas de corte presentan un incremento muy notorio en su protección al desgaste debido a la precipitación de carburos, esto es una ayuda fundamental en la aplicación de los Tratamientos criogénicos ya que aumenta la vida útil de las herramientas de corte y de aceros para rodamientos.

### **2.9.2. Aplicaciones fallidas de tratamientos criogénicos**

#### **Aceros de bajo contenido de carbono**

En aceros simples de bajo contenido de carbono no se observan mejoras significativas ya que no hay una alta precipitación de carburos en la microestructura de la pieza, estos elementos primordialmente transforman sus estructuras a Bainita lo cual no permite cambios drásticos en sus propiedades, a estos aceros es conveniente aplicarles un tratamiento termoquímico previo que incremente sus concentraciones de carbono para, darle una aplicación posterior de tratamientos criogénicos.

#### **Aceros inoxidables ferríticos y fundiciones.**

La aplicación de los tratamientos termoquímicos en este tipo de aceros no presentan una mejoría notable debido a su bajo contenido de carbono, estas características propias del material lo hacen no recomendable en la aplicación de estos y en el uso de estos en aplicaciones que necesiten una mayor resistencia al desgaste o a la corrosión.



## **3. ENSAYO DE TRATAMIENTOS CRIOGÉNICOS**

### **3.1. Materiales y equipo**

#### **3.1.1. Probeta de acero SAE 1045 (W. Nr. 1.1730) (DIN. Ck45)**

##### **Especificaciones**

Para la aplicación del ensayo de laboratorio se usaran dos probetas de acero SAE 1045, el cual es un acero de medio carbono y de uso general para la construcción de todo tipo de piezas mecánicas ya que por sus características de temple se tiene una amplia gama de aplicaciones automotrices y de maquinaria en general en la elaboración de piezas como ejes de semiejes, cigüeñales, motores eléctricos, cuñas, martillos, chavetas, engranajes, árboles, pernos, espárragos y piezas de máquinas y demás elementos de resistencia media, su código de color es blanco.

Es el acero más popular para el maquinado ya que por sus características tiene diversas aplicaciones en donde requiera soporte de esfuerzos por encima de los 60 Pma (61 Kgf/mm) o en caso de diámetros mayores en donde se necesite una dureza media de 35-45 HRC y un centro tenaz. Aunque presenta una buena maquinabilidad no es muy buena su calidad de soldabilidad, además su acabado se vuelve ideal para todo material de alta resistencia y de alta precisión para el características como el tamaño, rectitud y concentricidad de las piezas, lo cual le permite ser útil para minimizar el desgaste en aplicaciones de alta velocidad como barras torneadas, rectificadas y pulidas que pueden ser mecanizadas de forma asimétrica con una mínima distorsión.

## Composición química

- Carbono (C): 0.48%, elemento fundamental que acompaña al hierro en los aceros, hace que aumente la dureza y la resistencia pero disminuye la ductilidad y la resiliencia. Al aumentar el carbono aumenta la capacidad de temple y disminuye la soldabilidad.
- Cromo (Cr): 15%, aumenta la dureza, la resistencia y la elasticidad, favorece la cementación.
- Níquel (Ni): 0.06%, mejora la resistencia, tenacidad y ductilidad favoreciendo el temple.
- Manganeso (Mn): 0.69%, favorece la forjabilidad y le resta efectos perjudiciales al azufre
- Molibdeno (Mo): 0.02%, facilita el temple y los hace resistentes a altas temperaturas.
- Fosforo (P): 0.029%, favorece la colada en piezas fundidas pero perjudica las propiedades mecánicas.
- Azufre (S): 0.037%, favorece el mecanizado, pero perjudica la resistencia y tenacidad.
- Silicio (Si): 0.28%,
- Cobre (Cu): 0.21%
- Aluminio (Al): 0.041%, favorece la nitruración.

### Propiedades mecánicas

- Dureza en estado de suministro: 14.5 – 16.5 HRC
- Dureza después del revenido: 40 – 50 HRC
- Dureza después del temple: 62-65 HRC
- Resistencia a la tracción,  $R_m = 640$  Mpa
- Límite elástico  $R_{p0,2} = 340$  Mpa
- Reducción de área,  $Z = 40\%$
- Elongación,  $A_5 = 20\%$

Tabla III. Propiedades físicas del acero SAE 1045

Temperatura	20°C	200°C	400°C
Densidad kg/m <sup>2</sup>	7870	7820	7750
Expansión térmica (10 <sup>-6</sup> /°C)	-	12	13.5
Modulo de elasticidad Gpa	195	193	177
Conductividad térmica W/m x °C	-	40	41

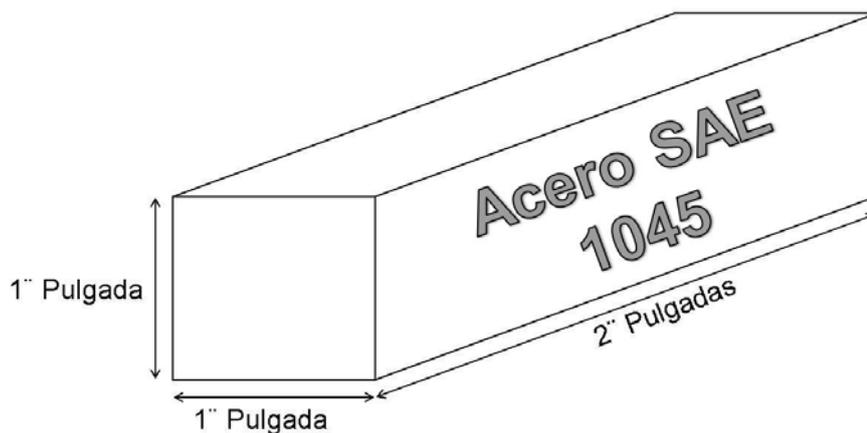
Fuente: ThyssenKrupp Aceros y Servicios,S.A.

### Tratamiento térmico:

- Normalizado: Calentar la pieza hasta una temperatura de 900°C, luego enfriar al aire.

- Recocido: para un estructura predominantemente perlítica, calentar a 850°C y luego enfriar en el horno a 650°C a una razón que no exceda 28°C/hora.
- Templado: austenizar a 840°C, y enfriar en agua o salmuera, para secciones bajo 1/4" de espesor enfriar en aceite.
- Revenido: calentar después del temple para obtener la dureza requerida entre 100°C a 300°C.

Figura 20. Medidas de probetas a usar.



### 3.1.2. Cámara criogénica

La cámara criogénica de mejor aplicación a nuestra practica es la cámara de carga superior, con sistema de aspersion de nitrógeno, la cual es accionada por el nitrógeno líquido y es excelente para soluciones de poco espacio, este es recomendado para pequeños volúmenes de producción. Al usar el nitrógeno líquido como medio de enfriamiento esta cámara es ideal para la reducción de

área de la pieza es el proceso de tratamiento criogénico. Se pueden tratar distintos piezas en la misma carga de operación lo cual es muy útil para agilizar los procesos de producción.

Esta se puede cargar de forma manual, utilizando un polipasto o una grúa. Está fabricada de acero inoxidable, tanto su interior como las tuberías que están expuestas al nitrógeno líquido.

Figura 21. Cámara Criogénica de Carga Superior, Serie CRYOFLEXTM–CBF, es una solución para producciones de baja escala, y de poco volumen.



Fuente: [www.linde-gas.com](http://www.linde-gas.com)

### 3.1.3. Horno de templado

Para el proceso total es necesario emplear un horno de temple que nos permita alcanzar temperaturas de aútenitización, y aplicar finalmente el revenido que nos ayude a acentuar las propiedades que mejora el tratamiento criogénico, la aplicación primaria del temple se debe realizar de forma regular elevando el acero 1045 a su temperatura promedio de aútenitización 800°C a 1050°C.

### 3.1.4. Cubeta conteniendo agua

Usaremos como medio de enfriamiento brusco el agua, la usaremos a temperatura ambiente ya que para análisis de laboratorio necesitamos evitar en nuestra pieza una condición de fragilidad más bien en un estado normal, tratando de que sea lo mas ideal posible, recordemos que este paso es el que promoverá la transformación microestructural de austenita a martensita.

### 3.1.5 Durómetro

Es indispensable el uso de un durómetro, este es un aparato que mide la dureza de los materiales, existiendo varios procedimientos para efectuar esta medición, los más utilizados son los de Rockwell, Brinell, Vickers y Microvickers, para nuestra práctica usaremos la medida Rockwell. Su funcionamiento radica en aplicar una fuerza normalizada sobre un elemento penetrador, también normalizado, que produce una huella sobre el material. En función del grado de profundidad o tamaño de la huella, obtendremos la dureza.

Figura 22. Durómetro



Fuente: [www.bricoservice.it/shop/preview.aspx?idcatsselected=261](http://www.bricoservice.it/shop/preview.aspx?idcatsselected=261)

### 3.1.6. Rueda de esmeril de óxido de aluminio blanco (AA)

Se usa en ruedas que esmerilan aceros aleados con tratamientos térmicos. Es altamente friable, por lo que evita calentamientos superficiales sobre el material que se desbasta. Se recomienda para durezas no mayores a 62 HRC.

Figura 23. Partículas de Oxido de Aluminio Blanco (AA)



Fuente: [http://www.hotfrog.es/Empresas/Abrasivos-y-Maquinaria\\_2545105/CORINDON-BLANCO-OXIDO-DE-ALUMINIO-12991](http://www.hotfrog.es/Empresas/Abrasivos-y-Maquinaria_2545105/CORINDON-BLANCO-OXIDO-DE-ALUMINIO-12991)

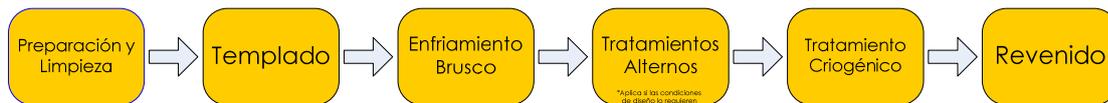
## 3.2. Materiales auxiliares

- Lápiz o lapicero y block de notas para apuntes
- Limpiador o desengrasante
- 1 Balanza analítica
- Ganchos para manejar los aceros dentro de el horno
- 1 Esmeril de banco
- Equipo de protección personal:
  - Guantes de cuero
  - Gafas para protección ocular
  - Gabacha y mangas de cuero
  - Zapatos con punta de acero
  - Protección completa de la cara
  - Cronometro

### 3.3. Procedimiento

La investigación demuestra que para obtener el porcentaje máximo de transformación de la austenita en martensita, el tratamiento criogénico debe ocurrir después del temple y antes del revenido, varias investigaciones han informado de que el temple estabiliza la austenita retenida, por lo que es más difícil de transformar, así pues, para alcanzar los porcentajes más altos de la transformación y el endurecimiento el proceso debe proceder como se indica en la figura 22, incluyendo algunos tratamientos alternos si son requeridos por las condiciones de diseño.

Figura 24. Diagrama de proceso de tratamiento criogénico



Algunas aleaciones no toleran un tratamiento después de haber templado ya que la martensita recién formada está sobresaturada con el carbono, lo que la hace inestable, frágil y tiende a agrietarse de modo que muchos de los aceros de aleación son tratados después del temple a una temperatura no mayor a 100 °C (200 °F) para prevenir el agrietamiento, y luego poder ser tratado criogénicamente y el respectivo revenido.

Cuando son requeridas tolerancias muy precisas es necesario aplicar múltiples ciclos de tratamiento criogénico y revenido, lo cual permita alcanzar el más alto nivel de estabilidad microestructural posible, el paso final de todo el procesamiento debe ser siempre un revenido para que transforme cualquier grano de austenita retenida a martensita

- Paso 1. Limpieza y preparación de la pieza.

Para iniciar el tratamiento es necesario limpiar profundamente ambas probetas eliminando cualquier impureza superficial que existan en estas para esta labor se puede utilizar un líquido desengrasante y un trozo de lija para que no tengamos ningún elemento externo que pueda afectar el desarrollo de la práctica.

- Paso 2. Templado (Austenización)

Una vez las probetas se encuentren limpias de impurezas procedemos a introducirla al horno de temple hasta que alcance su temperatura de austenización (800°C - 1050 °C), con esto logramos que los granos internos del material que aun se encuentran en un estado de perlita se transformen a un estado de austenita.

- Paso 3 Enfriamiento brusco

Una vez las probetas alcancen su temperatura de austenización, se deben extraer del horno y enfriar bruscamente en la cubeta con agua, este paso es necesario para promover el cambio de granos como austenita a martensita el cual da como resultado una pieza con mayor dureza y así mismo se obtendrá como residuo de la transformación, austenita retenida.

- Paso 4. Otros tratamientos térmicos

Este paso no se aplicara en esta práctica, pero algunas piezas que requieran un tratamiento adicional al temple debido a especificaciones de diseño, un grano o una característica del material en específico, el momento para aplicarlo es inmediatamente se haya finalizado el proceso de templado, algunos tratamientos pueden ser:

Revenido: procedimiento que consiste en enfriar muy lentamente a un acero austenizado con el propósito de generar las fases de equilibrio en el material. Los aceros recocidos tienen la menor resistencia y dureza, y la mayor ductilidad posibles.

Normalizado: el acero austenizado se somete a un calentamiento entre 30°C y 50°C, por encima de la temperatura crítica superior se debe mantener esa temperatura el tiempo suficiente para conseguir la transformación completa en austenita, a continuación se deja enfriar en aire tranquilo. Con esto se consigue una estructura perlítica con el grano más fino y más uniforme que la estructura previa al tratamiento, consiguiendo un acero más tenaz.

- Paso 5 Tratamiento criogénico

Para iniciar el proceso criogénico vamos a colocar solamente una de las probetas en el interior de la cámara criogénica, debemos colocarlas de una forma inteligente a manera que todas las probetas logren recibir lo mas directo posible el flujo frío en la mayor parte de su superficie.

Una vez colocada la probeta dentro de la cámara criogénica, se procede a programar el enfriamiento controlado, se deben cumplir los estándares respectivos de enfriamiento de 2.5 °C/min. a 4.5°C/min., hasta que alcancé el nivel ideal de temperatura -196 °C, y le daremos un tiempo de permanencia de 24 horas, una vez concluido el tiempo de permanencia y finalizado el ciclo extraeremos la pieza para que retorne a temperatura ambiente, este paso se debe de realizar con mucho cuidado ya que forzar a la o las piezas a una recuperación acelerada puede generar un choque térmico que fracture

externamente o lo menos deseado una fractura interna que comprometa el funcionamiento de la pieza obteniendo un resultado contraproducente.

- Paso 6. Revenido

Como resultado de la aplicación de los tratamientos nuestra pieza tendrá una transformación casi total de martensita en su estructura, lo cual también puede afectar el funcionamiento de nuestra pieza ya que la martensita es una fase demasiado frágil y su presencia en un acero lo convierte en un material quebradizo. Es necesaria la aplicación del revenido el cual consiste en recalentar a un acero templado a su temperatura de revenido (150°C – 500°C) con el propósito de incrementar su ductilidad sin reducir significativamente su resistencia, eliminando las tensiones internas de la pieza. Aplicaremos el revenido a ambas probetas.

### **3.4. Resultados**

Para finalizar la práctica de laboratorio se harán dos ensayos que tendrán por objetivo demostrar la veracidad de 2 premisas básicas acerca de los tratamientos criogénicos, se aplicará un ensayo de dureza y un ensayo de desgaste, para determinar si el material logra una mejora significativa en:

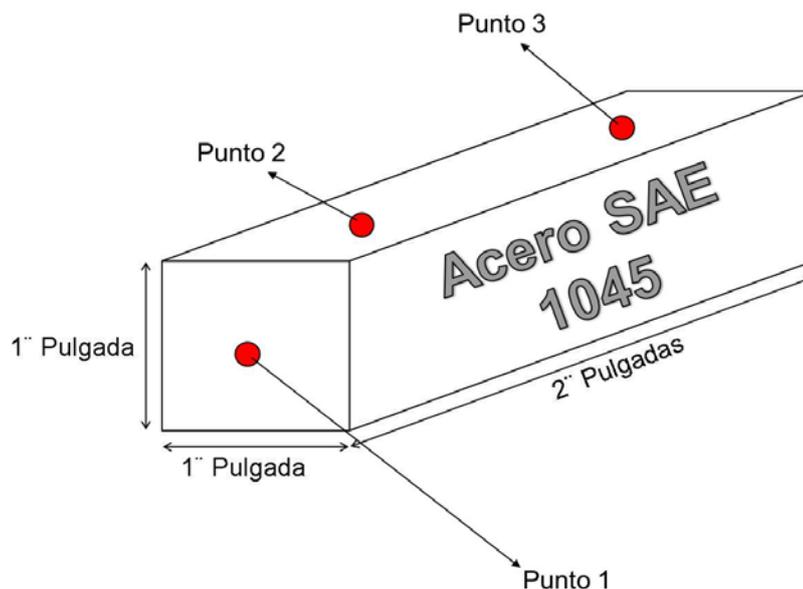
- El endurecimiento superficial.
- Mayor resistencia al desgaste en la pieza tratada.

## Ensayo de dureza

Para realizar este análisis usaremos ambas probetas para realizar una comprobación de dureza superficial entre la pieza tratada criogénicamente y la otra que únicamente fue tratada por tratamientos térmicos de alta temperatura, el objetivo es comprobar la premisa de que los tratamientos criogénicos aumentan directamente a la dureza superficial.

Procedimiento: en ambas probetas de acero marque tres puntos según lo indica el diagrama y proceda a realizar los ensayos de dureza en cada uno de los puntos, la dureza estándar de un acero 1030 en estado de suministro esta entre 10 Hrc o 13 Hrc, y después del temple tiene una dureza estándar de 58 Hrc a 63 Hrc, una vez finalizada la prueba en ambas probetas, complete la Tabla IV colocando las durezas de cada uno de los puntos y establezca una dureza estándar de ambas probetas, al finalizar de sus conclusiones.

Figura 25. Probeta para análisis de dureza.

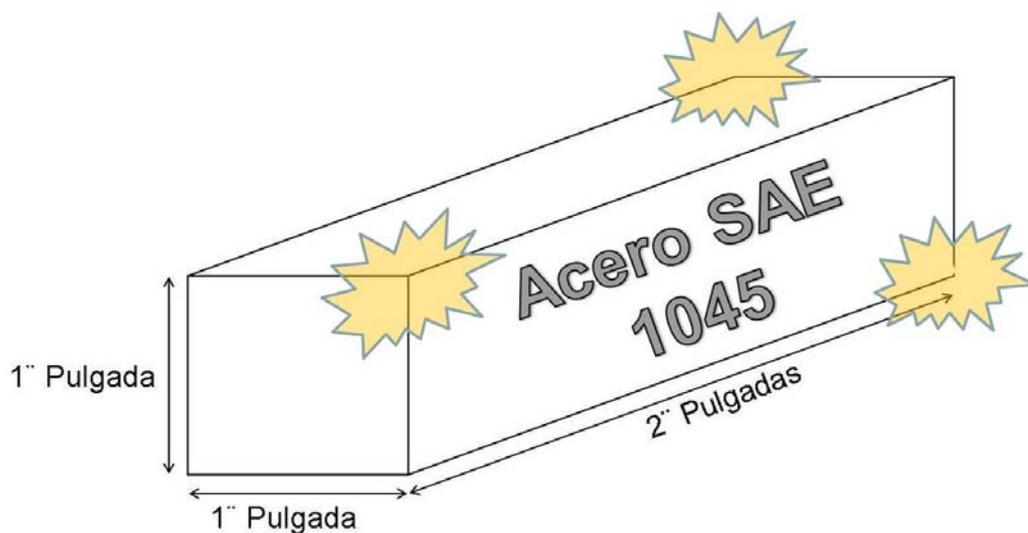


## Ensayo de desgaste

Para realizar el análisis de desgaste trabajaremos con las dos probetas, la tratada criogénicamente y la tratada térmicamente a altas temperaturas, el objetivo de este ensayo es comprobar si la premisa de que los tratamientos criogénicos aumentan la resistencia al desgaste de las piezas es verdadero. Para este ensayo nos apoyaremos en un esmeril de banco que hará la labor de desgaste utilizando una piedra de óxido de aluminio la cual es indicada para aceros templados.

Procedimiento: Identifique tres puntos según el diagrama pero que sean iguales en ambas probetas, someta las probetas en estos puntos a desgaste en el esmeril de banco usando la piedra de óxido de aluminio por un minuto continuo sin despegar la pieza, utilizando una hoja de papel colocándola debajo de la piedra de esmeril recoja el material desgastado, identifique el sobrante de cada uno de los puntos de cada probeta, proceda entonces a pesar el material sobrante, complete la Tabla IV y establezca la cantidad de desgaste estándar por cada una y de sus conclusiones.

Figura 26. Probeta para análisis de desgaste



Complete la siguiente tabla con los resultados obtenidos en la práctica y colóquela en su reporte de laboratorio:

Tabla IV. Resultados de la Práctica

Ensayo	Probeta 1045 "Tratada Térmicamente"		Probeta 1045 "Tratada Criogénicamente"	
	Dureza (HRc)	Desgaste (Peso)	Dureza (HRc)	Desgaste (Peso)
1				
2				
3				
Promedio				

### 3.5. Reporte de laboratorio

Para el reporte de este laboratorio escoja uno de los dos temas propuestas abajo e investigúelo, al final de la investigación coloque los resultados obtenidos en la practica (Tabla IV), con una grafica comparativa, de sus conclusiones y nuevas ideas de aplicaciones, ensayos o practicas reales a las que crea convenientes aplicar tratamientos criogénicos.

- Aplicaciones espaciales de los tratamientos criogénicos
- Aplicación industrial de los tratamientos criogénicos

### 3.6. Aplicaciones

Las aplicaciones de los tratamientos criogénicos son varias y diversas ya que abarcan desde equipos de la vida cotidiana como cuchillos de mesa, instrumentos musicales hasta equipos sofisticados como los son piezas aeroespaciales o elementos mecánicos. La aplicación de los tratamientos criogénicos en todo tipo de materiales ha servido para mejorar y sobre pasar las limitaciones de estos y darnos una mejor calidad de vida.

- Aplicaciones Industriales: se aplican a los aceros de herramienta para aumentar la resistencia al desgaste.
- Instrumentos Musicales: se aplican en trompetas, saxos, cuerdas de guitarra y piano, para proporcionar mejor tonalidad y mayor calidad en el sonido.
- Armamento: se aplica a armas en general, ya que al eliminar por completo la austenita retenida, evita cambios dimensionales que se dan cuando está es operada y repercute en la vida útil del arma.
- Deportes: en deportes como el golf y el patinaje.

Esta es una tecnología en evolución que ha ido creciendo de a poco en la mayoría de países industrializados, este crecimiento sostenido es gracias a los sorprendentes resultados en todas sus aplicaciones, además de su versatilidad de aplicación en diversos materiales.

Por ello, continuamente se encuentran nuevas aplicaciones en las que se logra que el proceso aumente el rendimiento y la calidad de los productos tratados, además del aumento en rendimiento económico que da a las empresas, muchas situaciones en las que existan problemas de desgaste o fatiga constituyen una oportunidad para aplicar con éxito esta tecnología.

### **3.7. Análisis de montaje de recinto criogénico**

#### **3.7.1. Disposiciones generales del recinto**

Para el montaje de un recinto de tratamientos criogénicos el espacio a usar no necesariamente debe ser muy especializado, debe contar con un espacio adecuado para la colocación del equipo y materiales con los que deseamos trabajar y lo mas importante que nos permita cumplir los requerimientos de seguridad y salubridad.

El cuidado en la manipulación de los equipos es importante y se deben contar con espacios acordes a cada uno de los equipos y cada uno debidamente señalado, describiremos a continuación las características generales con las que debe cumplir un recinto para la aplicación de los tratamientos criogénicos:

1. Ventilación: dadas las propiedades del nitrógeno líquido, que pueden crear serios riesgos para la vida humana si es manejado de manera inadecuada, como lo pudimos ver en el capítulo 2, debemos contar con un recinto que tenga una ventilación adecuada que permita la evacuación de posibles fuga de LN<sub>2</sub>, además la ventilación es muy útil para que las piezas tratadas regresen a su temperatura ambiente sin mayores choques térmicos y el proceso se realice sin problemas.
2. Espacio: es necesario darle el espacio requerido a cada uno de los equipos a instalar, e instalar estos de manera que faciliten y favorezcan el flujo de la aplicación, así evitar complicaciones y

pérdidas de tiempo que nos generen inestabilidades térmicas que afecten el proceso. Nuestro principal enemigo es la pérdida de eficiencia térmica por lo que debemos cuidar cualquier posibilidad de fuga.

3. Cuidado del equipo criogénico: cada uno de los equipos deben contar con los cuidados necesarios y con un programa de mantenimiento correcto, para asegurarnos que el funcionamiento sea lo mas fiable posible para evitar problemas al momento de la aplicación de los tratamientos. Para la cámara criogénica es muy importante cuidar las conexiones con su o sus contenedores de LN<sub>2</sub>, según sea el caso de la instalación, debido a las bajas temperaturas estas pueden sufrir de congelamiento cuando se opere y no es recomendable operar de esa manera.

Si se realiza una instalación externa se deben tener mayores cuidados, porque el control sobre las líneas debe ser riguroso y constante, hay que cerciorarse que estas estén correctamente recubiertas por sus aislamientos térmicos y sujetas correctamente así evitar rupturas y colapso de las líneas que provoque fugas o perdidas de temperatura que afectaran directamente el rendimiento de la cámara y el rendimiento económico, es importante considerar en el diseño válvulas de escape si en caso fuera necesario para evitar riesgos de cavitación.

Para los demás equipos que completan el proceso criogénico, tales como horno de temple y revenido, y sus accesorios se deben hacer sus respectivos programas de mantenimientos y ciclos de limpieza para que su funcionamiento sea óptimo.

### 3.7.2 Especificaciones técnicas del sistema

Cada uno de los equipos que usamos para la aplicación de los tratamientos criogénicos tiene diversas características, pero se deben considerar un factor que determina de manera fundamental el tipo de cámara a usar y es el volumen de producción, ya que de él depende el tamaño de la cámara, por ende el consumo de LN<sub>2</sub> y demás costos de operación. Para ilustrar una cámara criogénica en general en este trabajo de graduación nos basaremos en una cámara estándar, de tipo de carga superior y un método de enfriamiento de LN<sub>2</sub> por aspersion de nitrógeno.

Todas las cámaras criogénicas tienen características muy similares, ya que su funcionamiento es común, salvo por los medios de alimentación del LN<sub>2</sub>, y cierta instrumentación, a continuación enlistamos algunas de sus principales características:

- Capacidad de peso: todas las cámaras criogénicas de carga superior varían en capacidad según su tamaño el peso interno por cada soporta una carga entre 300 lbs., hasta 800 lbs., distribuidas en el interior de la cámara.
- Sistema operativo: las nuevas tecnologías en las cámaras criogénicas cuentan con un SO que controla todas sus operaciones desde el inicio del enfriamiento hasta que recalienta, haciendo los ciclos criogénicos más eficientes y más profundos, mejorando la liberación de estrés residual en las piezas y aumentan dramáticamente la vida útil de los componentes, haciendo herramientas menos percederas y piezas mas resistentes al desgaste.

- Componentes adicionales: los equipos modernos permiten alcanzar nuevas metas, mediante un sistema más moderno que permite trabajar más eficientemente, con controles más rigurosos y elementos de seguridad que nos apoyan para evitar situaciones de riesgo, enlistamos a continuación los componentes:
  - Microprocesador industrial que controla las fases del proceso.
  - Lector de pantalla que facilita la lectura de instrucciones e información sobre el estado actual del tratamiento.
  - Señales de operación LED que muestran el estado del equipo.
  - Teclado visible con tapa de seguridad.
  - Sensores de platino para vigilar continuamente las temperaturas del interior de la cámara.
  - Una válvula de solenoide con características criogénicas que permiten mayor precisión la aplicación del LN<sub>2</sub> en la cámara manteniendo los intervalos trabajando eficientemente.
  - Alarma de notificación para el operador, que indica cuando exista algún problema con el proceso o el equipo en si.
  - Sistema de calefacción interior controlada que permite un mejor control en la etapa de reacondicionar las piezas tratadas a temperatura ambiente.
  - Acabados superficiales internos y externos de alta calidad que previenen la oxidación o contaminación de las partes de la base.
  - Tiempos de ciclos criogénicos de: 10 a 72 horas.
  - Presión de utilización: 22 psi o 1,5 bar.
  - Mejora en los costos de operación, mejor consumo de LN<sub>2</sub>.

- Respaldo de energía: la energía eléctrica de operación en las cámaras criogénicas pueden adaptarse a los requerimientos del usuario final, ya que puede ser conectada en 120 voltios., ó 240 voltios., un factor importante que tomar en cuenta es la protección del equipo mediante el uso de un supresor de picos de voltaje y equipo de regulación de voltaje que mantenga el funcionamiento continuo y correcto del equipo.
- Equipo de seguridad: todos los sistemas cuentan con cerraduras para asegurar la tapa superior y de esa forma mantenerla sellada, para evitar perdidas de temperatura, como accesorio adicional se puede colocar un pad para código de bloqueo para asegurar la tapa durante el proceso.
- Control de riesgos ambientales: las cámaras criogénicas no presentan ningún riesgo medioambiental ya que los sistemas solo utilizan LN<sub>2</sub> para enfriar los materiales dentro de la cámara. El nitrógeno constituye el 78,03% del aire en la atmósfera de la tierra este es incoloro, inodoro, insípido y no tóxico. El nitrógeno comercial es producto de la separación de aire si licuefacción y destilación para su extracción.

### **3.7.3. Análisis de inversión inicial de una cámara criogénica**

La implementación de este sistema en el laboratorio de metalurgia y metalografía de la escuela de ingeniería mecánica, supone el emprendimiento de una nueva empresa, que conlleva la introducción de una nueva tecnología en el ámbito del mantenimiento y de la ciencia, en Guatemala y Centro América, este tipo de tratamientos se aplican en países desarrollados a nivel industrial y el crecimiento de Guatemala en ese ámbito abre una oportunidad para la innovación de parte de la *mater et magistra*, universidad de San Carlos.

El inicio de operaciones estaría fundamentado por la ciencia y su aplicación como ensayo de laboratorio nos abre una oportunidad en el desarrollo en el campo de la metalurgia, y como consecuencia de los buenos resultados del proceso la implementación de campo dentro de las industrias (metalmecánica, química/petrolera, automoción, aeronáutica, forestal, agricultura, minería, etc.), promueve el desarrollo y crecimiento de nuestro país.

Inicialmente nuestro volumen de producción sería bajo y la elección de una cámara criogénica pequeña, de carga superior que use intercambiadores de calor con alimentación de LN<sub>2</sub> por tanques dewards, es sugerida como elección. Muchos fabricantes de cámaras criogénicas ofrecen una personalizada que satisfaga en su totalidad nuestra operación, pero a nivel general se fabrican tres tipos de cámaras criogénicas estándar, cada una con características propias.

Una ventaja en la operación es que el personal que use la cámara criogénica no necesita una rigurosa capacitación, aunque todos los fabricantes ofrecen todo el apoyo y capacitaciones debidas, basta con leer detenidamente el manual de operación que se incluye en cada uno de los equipos el cual

explica el funcionamiento completo del sistema así como los riesgos de salubridad que se puedan dar al manipular de manera inapropiada el LN<sub>2</sub>.

Otra de sus nuevas características que hace que estas sean mas amigables al usuario final, es el sistema de operación computarizado manejado por controles tipo PLC que nos permiten un mejor y mas seguro control del proceso, en el recuadro siguiente observamos la inversión inicial para cada una de las cámaras y algunas de sus características.

Tabla V. Comparativo de especificación y costos de los equipos criogénicos

<i>Código del Modelo</i>	<i>Dimensiones Internas</i>	<i>Dimensiones Externas</i>	<i>Costo Unitario</i>
CI-420	40" x 14" x 12"	54" x 32" x 25"	\$17,895.00
CI-531	30" x 18" x 17"	44" x 36" x 32"	\$23,900.00
CI-1600	48" x 24" x 22"	62" x 42" x 41"	\$29,995.00
CI-3125	60" x 30" x 30"	74" x 48" x 48"	\$37,300.00

Fuente: [www.cryogenicsinternational.com](http://www.cryogenicsinternational.com)

Figura 27. Cámara criogénica con sistema computarizado



Fuente: [www.cryogenicsinternational.com](http://www.cryogenicsinternational.com)

### 3.7.4. Cámara recomendada para el laboratorio de metalurgia y metalografía “CI-420”

La cámara criogénica CI-420 es una cámara adecuada al uso de laboratorio presenta un buen rendimiento de operación que permite alcanzar una buena calidad en el producto final, por sus dimensiones tiene un costo inicial y de operación más económico. En el recuadro siguiente presentamos las especificaciones técnicas y de operación de la cámara que recomiendo utilizar par el inicio de operaciones, este modelo es de carga pequeña pero nos potencia a dar el primer paso.

Tabla VI. Especificaciones CI-420

#### ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA

<i>Código del Modelo</i>	CI-420	
<i>Dimensiones Internas</i>	40" x 14" x 12"	
<i>Dimensiones Externas</i>	54" x 32" x 25"	
<i>Capa de Insulado</i>	6"	
<i>Tiempo del Ciclo</i>	40 hrs.	
<i>Consumo de LN<sub>2</sub></i>	200 a 240 litros	
<i>Capacidad de Carga</i>	350 – 450 libras	
<i>Suministro Eléctrico</i>	120 vlts	8.5 amp
	240 vlts	4.2 amp
<i>Costo Unitario</i>	\$17,895.00	

#### *Riesgos Potenciales:*

El único riesgo potencial es el uso del LN<sub>2</sub>, este es incoloro e inodoro y agota el porcentaje de oxígeno en el recinto, es indispensable áreas ventiladas.

Fuente: [www.cryogenicsinternational.com](http://www.cryogenicsinternational.com)

Figura 28. Cámara Criogénica Cerrada



Fuente: [www.cryogenicsinternational.com](http://www.cryogenicsinternational.com)

Figura 29. Cámara Criogénica en Operación



Fuente: [www.cryogenicsinternational.com](http://www.cryogenicsinternational.com)

Figura 30. Cámara Criogénica y sus respectivos Dewards



Fuente: [www.cryogenicsinternational.com](http://www.cryogenicsinternational.com)

Figura 31. Interior Cámara Criogénica



Fuente: [www.cryogenicsinternational.com](http://www.cryogenicsinternational.com)

### **3.7.5. Manual de instalación y uso de la cámara criogénica**

Para realizar la instalación inicial del equipo es primordial considerar ciertas condiciones que a futuro favorezcan la operación, dichas condiciones son las siguientes:

1. Coloque el sistema sobre una superficie nivelada para que esta se encuentre en total equilibrio para evitar daños en su estructura al momento de estar cargada y que en operación no genere vibraciones.
2. Verifique que la conexión eléctrica sea la adecuada a la cámara así evitar sobrecargas que dañen los paneles eléctricos.
3. Verifique que las conexiones de LN<sub>2</sub> estén correctamente aseguradas para evitar el riesgo de fugas.

Una vez correctamente instalada la cámara podemos empezar el funcionamiento de la misma, a continuación encontramos los pasos que debemos de verificar para poder iniciar con la operación de la misma:

1. Cargar la cámara con las piezas a tratar, los artículos grandes o pesados en la parte inferior y los objetos ligeros o menos pesados cerca de la parte superior.
2. Es importante que al cerrar se asegure la tapa.
3. Abra la válvula de LN<sub>2</sub> del Dewar.
4. Encender el sistema e ingrese el peso del material dentro de la cámara y siga las instrucciones que se presentan en la pantalla.
5. Una vez la pantalla muestra "proceso criogénico completado", proceda a descargar la cámara.
6. Limpie la superficie interna de la cámara y verifique que no haya rastros de humedad.



## CONCLUSIONES

1. Se realizó un estudio teórico profundo por medio del cual se conocieron los tratamientos criogénicos, sus aplicaciones y sus múltiples aplicaciones, también se conoció cómo la humanidad se ha abierto los nuevos horizontes de la innovación, por medio de estos tratamientos.
2. Al conocer los tratamientos criogénicos se conocieron las ventajas y desventajas que se obtienen mediante su aplicación en comparación de los tratamientos convencionales, mediante la transformación interna de la estructura del grano de los materiales.
3. Se incrementó el conocimiento en materia de resistencia de materiales y en nuestra área de diseño al conocer una nueva forma de incrementar las propiedades de dureza y resistencia al desgaste de los materiales, que mejora el rendimiento de los materiales inclusive en condiciones de operación no favorables.
4. Mediante la experimentación práctica la Universidad de San Carlos innovará en el ámbito tecno industrial al ser la primera universidad a nivel centroamericano, donde se aplicación los tratamientos criogénicos, dentro del Laboratorio de Metalurgia y Metalografía.
5. Con la aplicación de los tratamientos criogénicos, se abre una nueva oportunidad de crecimiento en el campo industrial del país, mejorando el rendimiento de los equipos favoreciendo el mantenimiento y el desempeño mecánico aumentando la vida útil de la pieza.



## RECOMENDACIONES

1. Se debe profundizar en la modernización de los conocimientos para incrementar la capacidad de desarrollo del egresado de la Facultad de Ingeniería, además dotarle de herramientas que permitan encontrar más y mejores soluciones en el desempeño profesional.
2. Es deber de la Facultad de Ingeniería apoyar las nuevas tecnologías en procesos productivos que maximizan el potencial de desarrollo, al aplicar los tratamientos criogénicos se obtienen nuevos y mejores resultados, los que deben fomentarse en la industria del país para apoyar el desarrollo.
3. El fomento de la labor de investigación en la Universidad de San Carlos debe ser apoyado fuertemente, solo así el egresado de la Facultad de Ingeniería incrementará su experiencia práctica y desarrollará su capacidad de análisis y síntesis.
4. Es fundamental complementar los pensum de estudios de la Facultad de Ingeniería con prácticas de laboratorio, basadas en nuevas tecnologías.
5. Es preciso que la Facultad de Ingeniería, brinde mayor apoyo a la Escuela de Ingeniería Mecánica, para acrecentar la labor investigativa y de desarrollo, que esta puede alcanzar al modernizar sus laboratorios y prácticas de laboratorio.



## BIBLIOGRAFÍA

1. ASM handbook (2001). Heat Treating, Volume 4, United States of America.
2. ASM International (2001). Material Science and Engineering Handbook, Third Edition, CRC Press LLC, United States of America.
3. ASM International (1996). Metals Handbook, Desk Edition, Second Edition, United States of America.
4. Charles T. Lynch, Ph.D. (1989). Practical Handbook of Material Science, CRC Press LLC, United States of America.
5. David Marco Rusiñol (2004). Efecto del Tratamiento Criogénico en las Propiedades Mecánicas de los Aceros de Herramienta de Trabajo en Frío, Escola Técnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona.
6. [http://www.ccsso.ca/oshanswers/chemicals/cryogenic/cryogen1.html#\\_1\\_2](http://www.ccsso.ca/oshanswers/chemicals/cryogenic/cryogen1.html#_1_2)
7. <http://www.cryobest.com/castellano/tecnologia/tecnologia.html>
8. [http://www.nitrofreeze.com/cryogenic\\_helium\\_processing.html](http://www.nitrofreeze.com/cryogenic_helium_processing.html)
9. [http://www.nitrofreeze.com/cryogenic\\_tech.html](http://www.nitrofreeze.com/cryogenic_tech.html)
10. [http://www.nitrofreeze.com/stress\\_relief.html](http://www.nitrofreeze.com/stress_relief.html)

11. <http://www.rodgar.com.mx/criogenicos.html>
12. [http://www.utp.edu.co/~publio17/ac\\_aleados.htm](http://www.utp.edu.co/~publio17/ac_aleados.htm)
13. <http://www2.ing.puc.cl/icmcursos/metallurgia/apuntes/cap4/46/>
14. [http://www.safety.deas.harvard.edu/services/cryo\\_general.html#venting](http://www.safety.deas.harvard.edu/services/cryo_general.html#venting)
15. <http://www.safety.deas.harvard.edu/services/helium.html>
16. <http://www.safety.deas.harvard.edu/services/nitrogen.html>
17. Instituto Técnico de Capacitación Profesional (INTECAP) (2001). Manual de Laboratorio de Tratamientos Térmicos Código: MT.3.6.7-128/01.
18. J.R. Davis, ASM International (1996). ASM Specialty Handbook, Carbon and Alloy Steels, United States of America.
19. Larbáburu Arrizabalaga, Nicolás (2004). Máquinas. Prontuario. Técnicas máquinas herramientas. Madrid: Thomson Editores. ISBN 84-283-1968-5.
20. M.Sc. Stojko, A. (2001). "Sub-zero Treatment of Tool Steels" Thesis, Technical University of Denmark, DTU Department of Manufacturing Engineering and Management.
21. Meng, F. (1994). Role of ETA-Carbide Precipitation in the Wear Resistance Improvement of Fe-12Cr-Mo-V-1.4C Tool Steel by Cryogenic Treatment, ISIJ International, Vol. 34, No. 2, p 205-210.

22. Metals ASM Handbook (1981). Heat Treating, Volume 4, Ninth Edition, United States of America.
23. Millán Gómez, Simón (2006). Procedimientos de Mecanizado, Madrid: Editorial Paraninfo. ISBN 84-9732-428-5.
24. R. F. Barron, (1982). Cryogenic treatment of metals to improve wear resistance, Butterworth & Co. Ltd.
25. Rivero, I.V., Ruud, C.,(2002). Residual Stresses and Patterns in 52100 Bearing Steel: Preliminary Analysis of Strain Hardening vs. Microstructural
26. Timmerhaus, Klaus D (2007). Cryogenic engineering: fifty years of progress; New York.
27. <http://www.thyssenkrupp.cl/Documentos/fichasT/Aceros%20maquinaria%20barras/SAE%201045.pdf>



## ANEXOS

Tabla VII. Comparativa del incremento a la resistencia a la corrosión de aceros tratados criogénicamente.

Materiales que Mostraron Cambios				
----------------------------------	--	--	--	--

Codificación del Material		Descripción	Tratamiento en Frío -79 °C (-110 °F)	Tratamiento Criogénico -190 °C (-310 °F)
AISI (USA)	DIN (BRD)			
D2	1.2379	Acero al Cromo	316%	817%
S7		Acero para Herramienta Aleación de Silicon	241%	503%
52100	1.3505	Acero para Rodamientos	195%	420%
O1	1.251	Acero para Trabajo en Frío	221%	418%
A10		Acero para Herramienta Aleación de Grafito	230%	264%
M1	1.3346	Acero Al molibdeno	145%	225%
H13	1.2344	Acero para Trabajo en Caliente	164%	209%
M2	1.3341	Acero Tungsteno Molibdeno	117%	203%
T1	1.3355	Acero al Tungsteno	141%	176%
CPM 10V		Acero Aleado	94%	131%
P20	1.233	Acero de Molde	123%	130%
440		Acero Inoxidable Martensítico	128%	121%

Materiales que Mostraron Cambios				
----------------------------------	--	--	--	--

Codificación del Material		Descripción	Tratamiento en Frío -79 °C (-110 °F)	Tratamiento Criogénico -190 °C (-310 °F)
AISI (USA)	DIN (BRD)			
430		Acero Inoxidable Ferrítico	116%	119%
303	1.4305	Acero Inoxidable Austenítico	105%	110%
8620	1.6523	Acero para Endurecimiento	112%	104%
C1020	1.0402	Acero al Carbono	97%	98%
AQS		Acero para Casteado	96%	97%
T2		Acero al Tungsteno	72%	92%

Fuente: American Standards of Metals Handbook, Volumen 9 Metallography and Microstructure; 1997

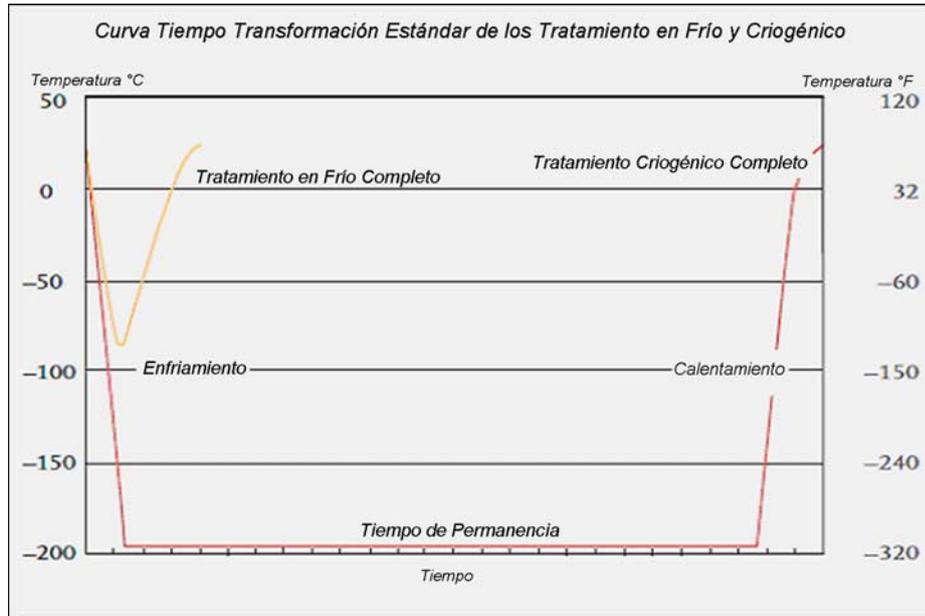
Tabla VIII. Resumen de aceros tratados criogénicamente.

	Aplicación	Fuente	Herramienta	Resultado
FATIGA	Muelles de acero	Fabricante de polímeros extruídos	Muelles en desplazables de moldes de inyección.	La sustitución de los muelles (por agotamiento) pasa de los 800.000 a los 2.000.000 de ciclos. Los muelles no se rompen.
	Montaje de ruedas.	Fabricante de automóviles.	Boquillas hexagonales de acero para apriete de tuercas.	La vida de las boquillas aumenta notablemente (menos desgaste y se evitan las grietas y roturas prematuras).
	Torneado de rótulas	Empresa de automoción	Pinza para torno multihusillo	Se fabrican el doble de piezas antes de la rotura por fatiga de la pinza.
SOLDADURA y OTROS	Soldadura por resistencia	Empresa de automoción	Electrodos de Cu aleado con Co y Be (Mallory 100).	Los electrodos duran hasta 6 veces más y la calidad de la soldadura es mayor.
	Desgaste "pin-on-disc"	Centro Tecnológico	"Pins" y discos de fundición GG25, material habitual en la fabricación de discos de freno.	El desgaste del disco se reduce a la mitad.
	Corte de hierba	Mantenimiento de campo de golf	Cuchillas de acero para corte del "rough"	Las cuchillas duran de 2 a 3 veces más entre afilados.
	Palos de golf	Diversos usuarios	Cabezas de hierros fundidos.	Se eliminan las vibraciones en el impacto. El desgaste de la cara disminuye.
CORTE/ESTAMPACION	Corte longitudinal de chapa	Industria siderúrgica	Cuchillas circulares de acero.	Los metros de chapa cortados aumentan hasta 2,5 veces.
	Corte de tubo de acero.	Fabricante de tubos.	Disco de sierra de HSS recubierto de TiAIN.	El número de cortes entre afilados es más del doble.
	Corte de PVC	Fabricante de envases de plástico.	Cuchilla de HSS.	El número de cortes se duplica.
	Corte de tabaco	Industria tabaquera	Cuchillas de acero para corte de tabaco.	Las cuchillas multiplican su vida entre afilados en más de 2,5 veces.
	Troquelado de chapa	Fabricante de motores eléctricos.	Matrices de acero de trabajo	El número de piezas troqueladas entre afilados se

	magnética.		en frío (1.2379) y punzones de HSS pulvimetalúrgico (Vanadis10).	duplica.
	Punzonado de chapa	Empresa de calderería	Punzones y matrices de M2	Aumento notable del número de agujeros. Menor adherencia de la chapa y retraso en la aparición de rebabas.
	Embutición de chapa	Fabricación de pilas	Matriz de metal duro.	La vida de la matriz se multiplica por 2,5.
	Forja en caliente de latón	Fabricante de bienes de consumo	Estampas de acero de trabajo en caliente H10 con TiN.	Las estampas permiten fabricar casi el doble de piezas.
	Rebabado de Cu-Al-Ni fundido.	Fabricante componentes para cajas de cambio.	Matriz de rebabado de 1.2379.	Aumento de un 30 % en el rendimiento
	Rebabado de acero al Cr V forjado en martillo.	Fabricante de herramientas	Cortantes de 1.2379	Más de un 50 % de incremento de vida
	Aplastado de aristas	Fabricante de bienes de consumo	Roldanas de HSS pulvimetalúrgico (Vanadis10).	Las roldanas duran 4 veces más entre repasos.
MECANIZADO	Taladrado de acero	Ensayo en centro tecnológico	Brocas de HSS recubiertas con TiN.	El número de agujeros llega a triplicarse.
	Taladrado de fundición	Fabricante de automóviles.	Brocas de HSS.	Hace un 35% más de agujeros
	Fresado de tubos de aluminio	Fabricante de bienes de consumo	Fresas especiales de HSS.	El tiempo entreafilados se multiplica por 8 (de 3 semanas a varios meses). Trabajo más suave, con menos vibraciones.
	Fresado de alta velocidad	Fabricante de matrices	Plaquetas de copiado de metal duro, recubiertas con TiAlN.	Las plaquetas duran de 2 a 3 veces más.
	Fresado de acero	Fabricante de herramientas	Plaquetas de metal duro con diversos tipos de recubrimiento.	Las plaquetas llegan a triplicar su vida.
	Torneado en torno multihusillo	Fabricación de componentes para automoción	Cuchilla especial de HSS recubierta de TiCN.	Aumenta la vida entreafilados y en éstos se quita menos material.
	Torneado de acero.	Empresa de automoción	Plaquetas de metal duro	Las plaquetas duran más del doble.

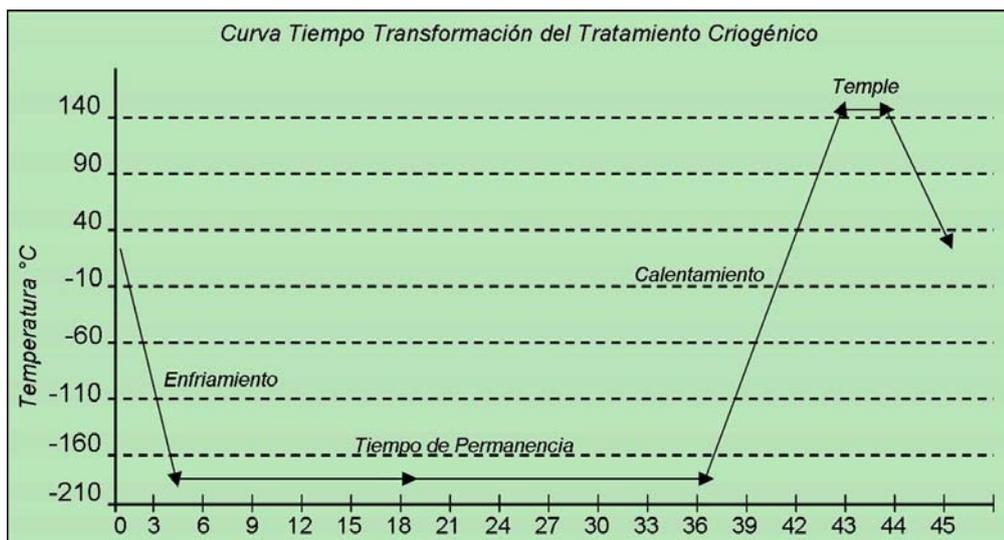
		recubierto con TiCN y MoS2.	
Mecanizado de acero	Empresa de automoción	Plaquetas de metal duro.	Las plaquetas duran de 2 a 3 veces más.
Mecanizado de rótulas	Fabricante de automóviles	Plaquetas de metal duro recubiertas de TiN.	Las plaquetas conservan su filo durante más tiempo y la precisión en el mecanizado es mucho mayor.
Ranurado de aros de inoxidable para válvulas	Empresa de mecanizados.	Fresas tipo "cocodrilo" de HSS recubiertas con TiAlN.	Las fresas duplican su vida.
Tallado de engranajes de acero.	Fabricante de engranajes	Fresas madre de HSS (M35) recubiertas con TiN en los flancos.	El número de piezas talladas entre afilados se duplica.
Tallado de engranajes	Fabricante de engranajes de grandes dimensiones.	Fresa de HSS (M35).	El número de dientes tallados entre afilados aumenta un 50%.
Tallado de engranajes	Fabricante de transmisiones	Cortadores de ASP2030 recubiertos con TiN.	Más del doble de piezas entre afilados.
Tallado de engranajes	Fabricante de engranajes y reductores	Fresa madre brochadora de HSS (PM-30) recubierta con TiCN.	Se duplica el número de piezas talladas entre afilados.
Tallado de engranajes.	Fabricante de engranajes.	Plaquetas de metal duro recubiertas de TiN.	Duplican el número de engranajes tallados.
Tallado de coronas de arranque	Fabricante componentes de automoción.	Fresa madre de cuchillas de HSS (M35) recubiertas con TiN.	Prácticamente el doble de piezas entre afilados.
Tallado de dentados	Fabricante de direcciones	Peines cortadores de HSS recubiertos con TiN	Se duplica el número de piezas entre afilados (retirando menos material al afilar)
Rebabado de cordón de soldadura	Fabricante de tubos.	Plaquetas de metal duro recubiertas de TiN.	Importante aumento de metros de cordón eliminado.

Figura 32. Diagrama comparativo tiempo vrs. transformación de los tratamientos en frío y criogénicos.



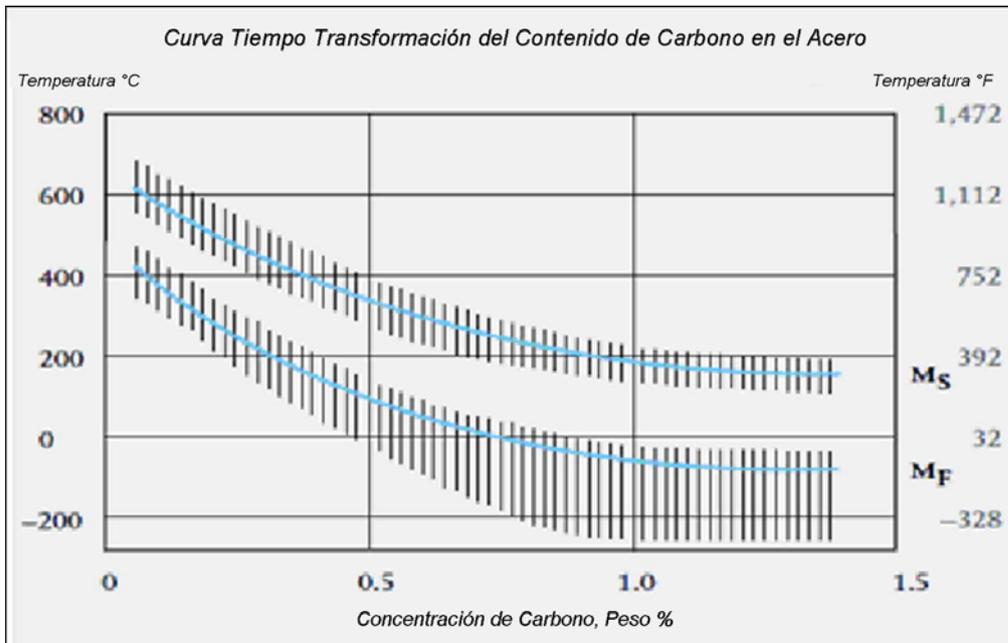
Fuente: www.linde-gas.com

Figura 33. Diagrama tiempo vrs. transformación del tratamientos criogénico.



Fuente: www.linde-gas.com

Figura 34. Diagrama de transformación de martensita en el tratamiento criogénico.



Fuente: www.linde-gas.com

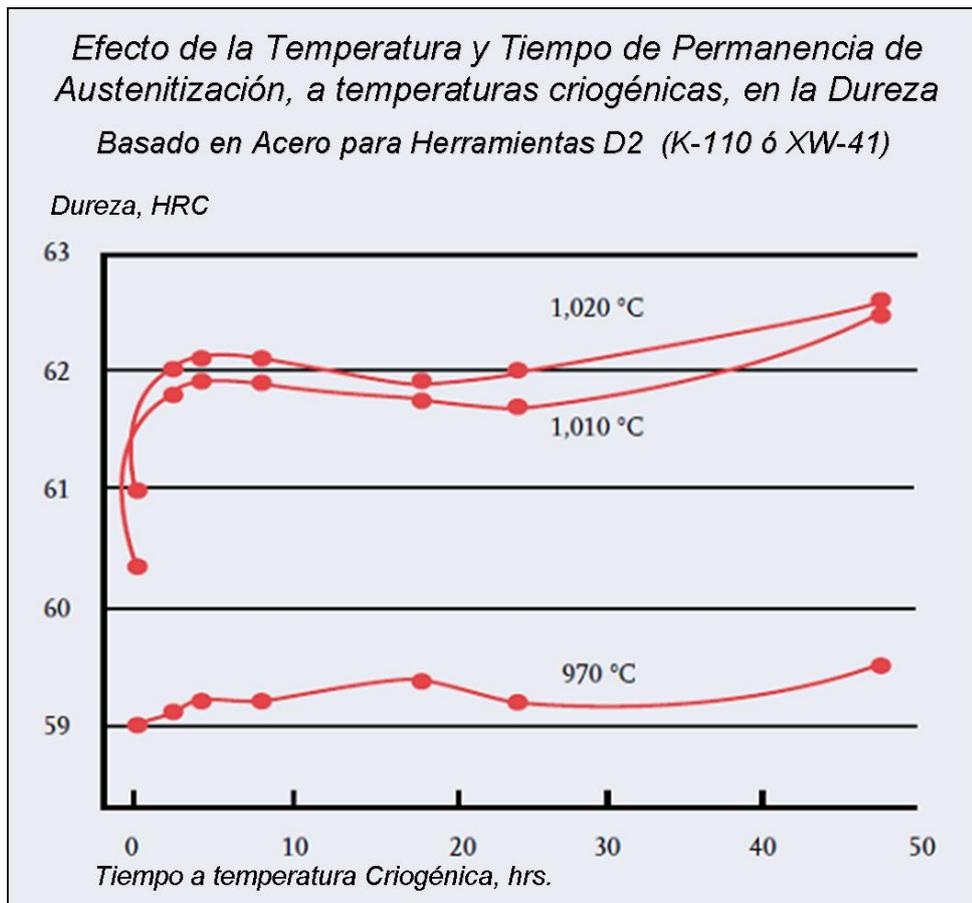
Tabla IX. Dureza de acero, en varios porcentajes de martensita.

Dureza de aceros con bajo contenido de carbono para Distintos porcentajes de martensita.

Dureza Rockwell C según contenido de Martensita						
#	% de Carbono	50%	80%	90%	95%	100%
1	0.18	31	35	37.5	39	43
2	0.23	34	37.5	40.5	42	46
3	0.28	36.5	40.5	43	44.5	49
4	0.33	39	43.5	46.5	48.5	52
5	0.38	42	46	49	51	54
6	0.43	44	48	51	53.5	57
7	0.48	46.2	52	54	57	60

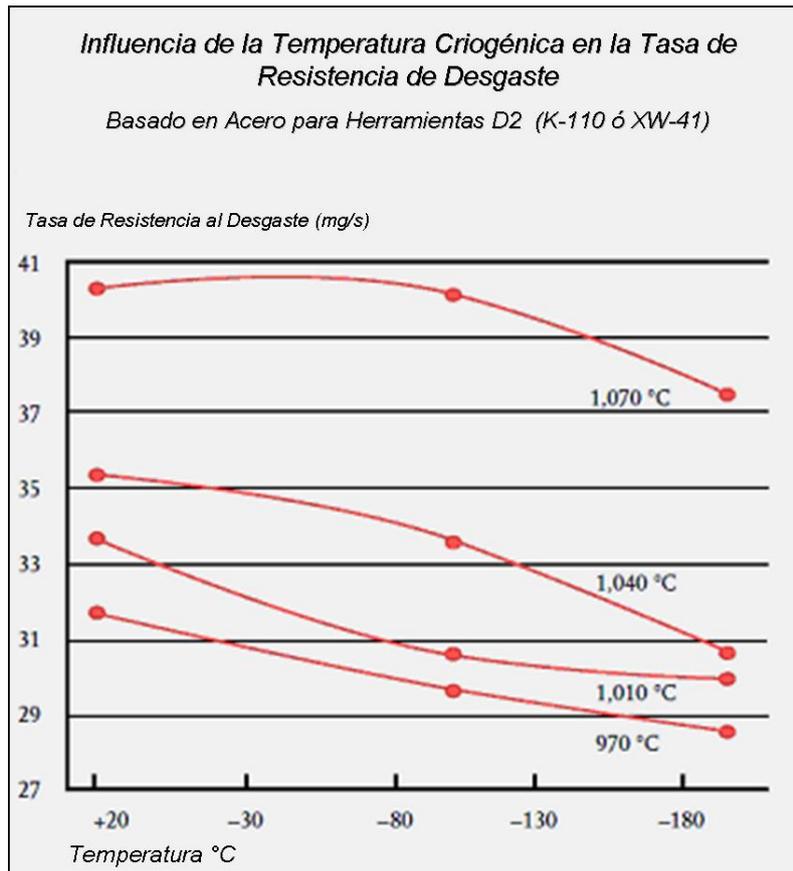
Fuente: American Standards of Metals Handbook, Volumen 9 Metallography and Microstructure; 1997

Figura 35. Efecto de la austenitización y del tiempo de permanencia en tratamientos criogénicos. Basados en el análisis del acero de herramienta D2.



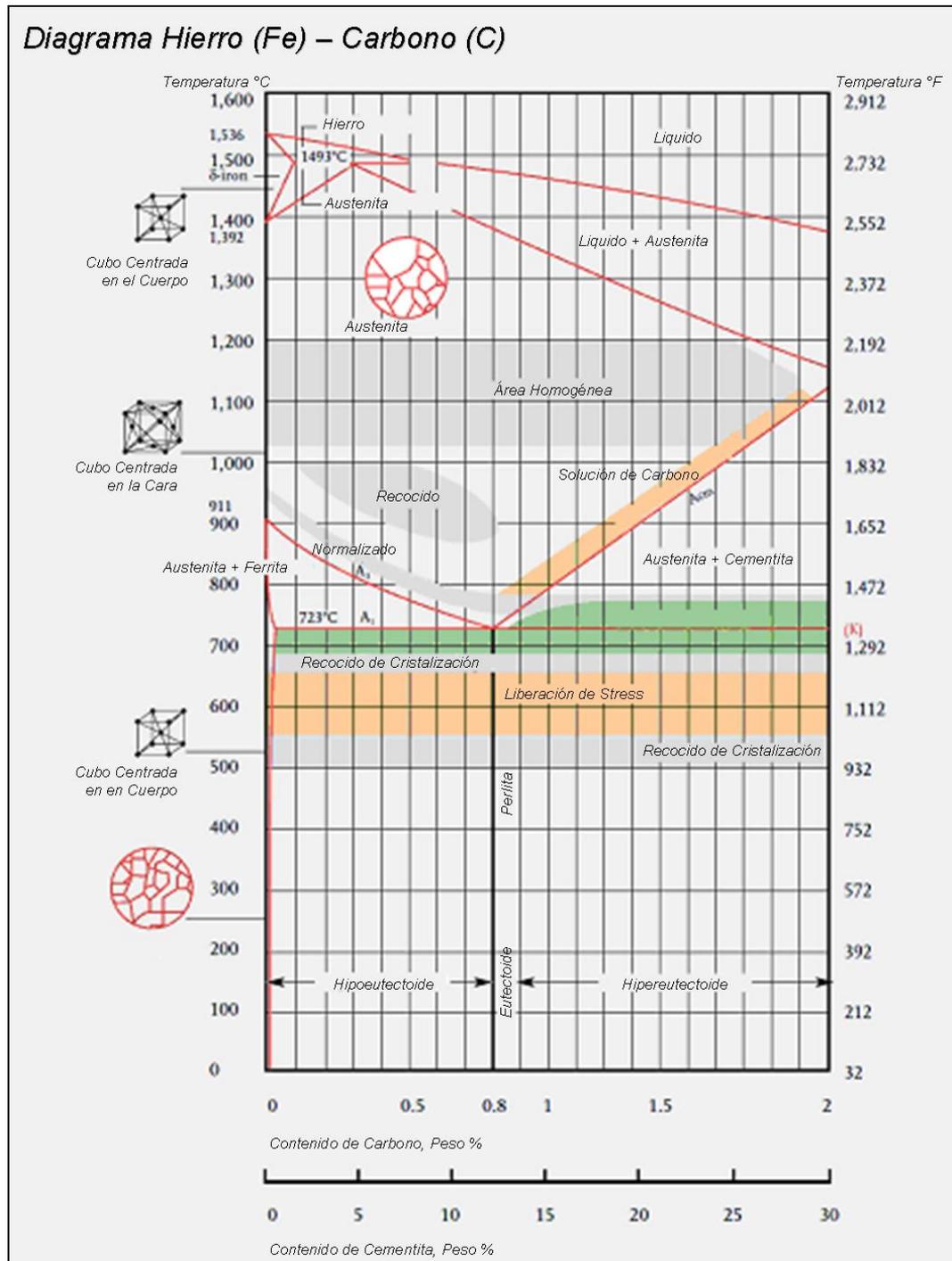
Fuente: [www.linde-gas.com](http://www.linde-gas.com)

Figura 36. Influencia de la temperatura criogénica en la resistencia al desgaste.



Fuente: [www.linde-gas.com](http://www.linde-gas.com)

Figura 37. Diagrama hierro carbono.



Fuente: [www.linde-gas.com](http://www.linde-gas.com)

Tabla X. Microestructuras del acero.

<i>Microestructuras del Acero</i>		
<i>Microestructura</i>	<i>Propiedades</i>	<i>Formación</i>
Austenita	Buena resistencia a la fatiga en general y al impacto	Se forma a altas temperaturas y puede conservarse (retener) a bajas temperaturas en los aceros aleados es de mucha utilidad en aceros de herramientas y aceros de rodamientos. Estructura cúbica centrada en la cara.
Ferrita		Estructura cúbica centrada en el cuerpo
Cementita	Es Dura pero a la vez frágil.	Se forma mayormente en los acero de alto contenido de carbono y aparece como fase laminar en perlita.
Perlita	Fácilmente mecanizable. Etapa idónea para maquinar	Formado a partir de capas alternas de ferrita y cementita como resultado de una tasa más lenta de enfriamiento que permite que la difusión de carbono se produzca.
Martensita	Etapa de máxima dureza y de resistencia última.	Se obtiene como resultado de un enfriamiento rápido de la fase de Austenita en medio y alto carbono, y aleaciones de acero. La velocidad de enfriamiento no permite que la difusión de carbono se producen dejándolo sobresaturado en la matriz. Estructura tetragonal centrado cuerpo.

Fuente: American Standards of Metals Handbook, Volumen 9 Metallography and Microstructure; 1997

Tabla XI. Tabla de aceros comunes en Guatemala.

ACEROS MAS USADOS EN GUATEMALA		
Tipo de Acero	Características Principales	Aplicaciones
<b>ACEROS AL CARBON</b>		
ACERO 1018	Entre los aceros de baja carbono, el 1018 es el mas versátil por sus características: Análisis controlado, mejores mecánicas que otros aceros del mismo tipo, por su alto contenido de manganeso, buena soldabilidad, buena maquinabilidad. Cuando se refiere una superficie muy dura pero un centro tenaz, este acero cementado cumple perfectamente. Estrado en frío mejora sus valores de resistencia mecánica y su maquinabilidad haciéndose muy popular para un sin numero de aplicaciones.	Se utiliza en la fabricación de partes para maquinas automotriz línea blanca, equipo de proceso, etc. Que no estén sujetas a grandes esfuerzos por su ductilidad es ideal para procesos de transformación en frío para doblar, estampar, recalcar, etc. Sus usos típicos son flechas, tornillos, pernos, sujetadores, etc. Ya cementado en granes, piñones, etc.
ACERO 1040	Como acero de alto carbono, alcanza al templarse durezas elevadas. Tiene soldabilidad pobre por el que no se recomienda, sin embargo en caso necesario se puede hacer con soldadura de arco usando electrodos E-7018.	Se utiliza especialmente en partes que requieren de una alta dureza y resistencia (templadas en agua y aceite respectivamente) También se emplean en la fabricaron de herramientas que requieren una gran tenacidad, como picos, martillos, discos de embrague y ejes de transmisión, entre otros. Su uso se extiende a los implementos agrícolas y a la industria minera.
ACERO 1045	El más popular de los aceros al carbón templarse es sin duda al 1045. En todo tipo de aplicaciones en donde requiera soporte esfuerzos por encima de los 60 Pma. (61 Kg/mm) o en caso de diámetros mayores en donde se necesite una superficie con dureza media, 30 a 40 Rc. Y un centro tenaz. Aunque su maquinabilidad no es muy buena se mejora con el estrado en frío, además con este acabado se vuelve ideal para flechas, tornillos, etc. de alta resistencia	Por sus características de temple, se tiene una amplia gama de aplicaciones automotrices y de maquinaria en general, en la elaboración de piezas como ejes de semiejes, cigüeñales, etc. De resistencia media.
ACERO 1030	Acero de bajo carbón alto magnesio y vanadio con grano fino para mejorar sus características mecánicas y con tratamiento de calcio además de un estricto control del contenido de azufre para mejorar su maquinabilidad. Su soldabilidad es aceptable y se realiza por procedimientos comunes.	Construcción tubular de maquinas, grúas, puentes, plataformas, etc. Para la industria automotriz, metalmecánica, petrolera, etc.
<b>ACEROS GRADO MAQUINARIA</b>		
ACERO 705	Acero para maquinaria de alta resistencia. Apropiado para el temple por flama.	Partes y repuestos de grandes dimensiones, cigüeñas, tuberías. Barras de torsión, pernos, sometidas a muy grandes esfuerzos dinámicos como: ejes de leva, arbolés de transmisión.
ACERO 4340	Se caracteriza por su alta templabilidad y resistencia a la fatiga. Es capaz de ofrecer buenas propiedades en piezas de grandes secciones. No presenta fragilidad de revenido. No se aconseja soldarlo; únicamente con soldaduras especiales.	Se utiliza en la fabricación de tortillería de alta resistencia, levas de mando, discos para frenos y ejes para camionetas entre otros.
ACERO 9840T	Por tener un nivel de aleación, as bajo que el 4340, tiene mayor tenacidad aunque alcanza al templarse durezas elevadas con una alta penetración, así como una magnifica resistencia a la fatiga.	Ampliamente utilizado en la industria, en piezas sujetas a grandes esfuerzos, como flechas de transmisión y engranes, así como en pernos de alta resistencia y dispositivos de perforación en la industria petrolera, es tratado con una resistencia de 105 kg/mm para piezas que deban soportar fatiga.
<b>ACEROS GRADO HERRAMIENTA</b>		
ACERO DF-2	Acero para herramientas de uso general Buena dureza superficial. Resistencia al desgaste fácil templado.	Punzones y cizallas de lamina delgada, herramienta para labrar madera, matrices de corte con existencias normales, guías y pines para matriceria, cuchillas para cortar papel o materiales similares delgados, herramientas de medición.
ACERO 01	Este acero tiene Buena resistencia al desgaste y Buena tenacidad. Presenta dureza profunda en diámetro menores a 40 Mm. En sección de 100 mm, la profundidad de dureza es de aprox. 10mm. Excelente maquinabilidad y buen afilado.	Se emplea en matrices para estampar, cortes y punzones así como en herramientas de corte a baja temperatura. También se utiliza en herramientas para filetear instrumentos de precisión calibres y matrices para plásticos, entre otros.
ACERO XW-41	Acero para herramientas de alto rendimiento, lata resistencia al desgaste y tenaz.	Cuchillas desmenuadoras para plásticos de desecho, cizallas oculares, cuchillas para corte de madera, escaneadores, barrenasfresas, punzones y matrices cortantes. Herramientas trituradoras de medición y recortadores de chapas.
ACERO D2	Este acero presenta alta resistencia al desgaste, así como tenacidad moderada. Maquinabilidad y afilado también moderados.	Se emplea para fabricar matrices cortantes, punzones cuchillas matrices para estampado y acuñados, rodillos laminadotes y roscadores entre otros.
ACERO PLATA W-1	C:0.22; Si: 0.35; Mn: 1.60; P:0.04; S: 0.020 - 0.040; V:0.08-0.15	
<b>ACEROS INOXIDABLES</b>		
ACERO INOX TP-304	C:0.22; Si: 0.35; Mn: 1.60; P:0.04; S: 0.020 - 0.040; V:0.08-0.15	

Fuente: [www.austenit.com](http://www.austenit.com)

