



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**EVALUAR LA INFLUENCIA DE UN TRATAMIENTO A  
TEMPERATURA CRIOGÉNICA EN LAS PROPIEDADES  
MECÁNICAS EN MUESTRAS DE ACERO PARA  
HERRAMIENTAS T.2000.**

Joan Morales

Valencia, Diciembre de 2012



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**EVALUAR LA INFLUENCIA DE UN TRATAMIENTO A  
TEMPERATURA CRIOGÉNICA EN LAS PROPIEDADES  
MECÁNICAS EN MUESTRAS DE ACERO PARA  
HERRAMIENTAS T.2000.**

*Trabajo especial de grado presentado ante la Ilustre Universidad de  
Carabobo para optar al título de Ingeniero Mecánico*

**Tutor académico:**  
Prof. Ing. Luis Sidorovas

**Autor:**  
Joan Morales

Valencia, Diciembre de 2012



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**EVALUAR LA INFLUENCIA DE UN TRATAMIENTO A  
TEMPERATURA CRIOGÉNICA EN LAS PROPIEDADES  
MECÁNICAS EN MUESTRAS DE ACERO PARA  
HERRAMIENTAS T.2000.**

*Trabajo especial de grado presentado ante la Ilustre Universidad de  
Carabobo para optar al título de Ingeniero Mecánico*

Joan Morales

Valencia, Diciembre de 2012

# DEDICATORIA

---

Este trabajo de grado se lo dedico a mis padres quienes con tanto amor y sacrificio han aportado los recursos y consejos cuando más los he necesitado. Son mis héroes y símbolos de admiración.

A mis hermanos Alex, Carlos y José, quienes han sido motivo de superación y a quienes espero servir como fuente de inspiración.

A todas aquellas personas que creen posible generar una tecnología acorde con nuestras necesidades, recursos, con nuestra forma de pensar y que permita solucionar los problemas.

# AGRADECIMIENTOS

---

Primeramente quiero darle gracias a Dios por permitirme y darme la vida para ser parte de todo lo que comprende ésta y conocer el mundo de la ingeniería, quiero expresar, sin ningún orden en específico, mi más sincero agradecimiento a mi padre por haberme apoyado y prestado todo su apoyo incondicional para mi crecimiento personal y profesional, de igual manera agradecerle a mi madre por darme su apoyo y guiarme a lo largo de toda mi vida hacia un mejor futuro, su amor, amistad y cariño forman una parte muy importante e indispensable en mi vida.

También quiero darle gracias a mi tutor académico el profesor Luis Sidorovas, por su guía, sugerencias oportunas durante el desarrollo de este trabajo de investigación y permitirme la oportunidad de realizar este trabajo. De igual forma agradezco de manera muy especial a la profesora Laura Saenz y todos los profesores de la escuela, que a lo largo de mi carrera impartieron de manera grata sus conocimientos.

Al ingeniero Carlos de la Rosa, gerente general de Tratamientos Térmicos Venemet C.A., al licenciado Gleen Rodríguez y Henry Lopez, técnico de microscopía de barrido y técnico de ensayos mecánicos respectivamente, ambos de la Universidad Simón Bolívar, por sus consejos y orientación en el desarrollo de este trabajo de grado.

A mis compañeros y amigos que tuvieron la oportunidad de compartir conmigo en toda mi carrera por entender desde un principio cuales eran mis propósitos.

# RESUMEN

---

El presente trabajo de grado fue elaborado con el objetivo principal de analizar los cambios en las propiedades mecánicas del acero para herramientas T 2000, como consecuencia de la aplicación de un tratamiento a temperaturas criogénicas (-196 °C). Además está enmarcado bajo la modalidad en el diseño de investigación experimental y documental, de experimental ya que los datos fueron obtenidos directamente de los ensayos mecánicos practicados y el estudio de la mecánica de fractura utilizando microscopía electrónica de barrido (MEB) para determinar el mecanismo de fractura presente, y documental debido a la revisión de información bibliográfica que permite establecer de manera apropiada la aplicación de ciclos térmicos. Sirvieron de recolección de datos: asesorías con ingenieros Metalúrgicos y Mecánicos, analistas en metalografía, que permitieron el desarrollo óptimo en las actividades.

Por otra parte, para el desarrollo de este proyecto se fabricaron 24 probetas para la aplicación de ensayos mecánicos: ensayo de Charpy, dureza y resistencia a la tracción. Para el análisis y recolección de los resultados se utilizó análisis estadístico-gráfico con el fin de determinar los cambios obtenidos por el acero para herramientas T 2000 como consecuencia de la aplicación de un tratamiento criogénico.

De los resultados obtenidos en los diferentes ensayos mecánicos se observaron cambios en las propiedades mecánicas del material como consecuencia de la aplicación del tratamiento térmico a temperatura criogénica. En la evaluación de la tenacidad del material se observó una notable disminución de 10,92 % en las muestras tratadas criogenicamente respecto a la condición original. Se presume por los resultados de los ensayos mecánicos y con el estudio de las microestructuras se observa que el material después de haber sido tratado térmicamente fragiliza, siendo éste un efecto generado por la disminución de la austenita retenida, y a su vez, se afecta la tenacidad del material disminuyéndola.

# NOMENCLATURA

---

Símbolo	Descripción
$\sigma_{ys}$	Esfuerzo de fluencia (Mpa).
$\sigma_{ul}$	Esfuerzo de último (MPa).
<b>KIC</b>	Factor de intensidad de esfuerzo $Ksi \cdot pu\lg^{1/2}$
<i>a</i>	Tamaño de grieta (mm)
$\epsilon$	Deformación (mm/mm)
<b>CVN</b>	valor de ensayo de impacto a Charpy en (J)
<b>HRC</b>	Valor de dureza en escala Rockwell C
<b>T</b>	Temperatura (°C)
<b>t</b>	Tiempo
$\gamma$	Fase de Austenita (%)
<b>M</b>	Fase martensita (%)
<b>K</b>	Carburo de tungsteno
<b>d</b>	Diámetro (mm)
<b>L<sub>o</sub></b>	Longitud inicial
<b>L<sub>f</sub></b>	Longitud final
<b>A<sub>0</sub></b>	Área inicial
<b>A<sub>f</sub></b>	Área final
<b>%R</b>	Porcentaje de reducción de área
<b>P</b>	Fuerza (Kgf)

# Índice general

---

---

Índice general	i
Índice de figuras	iv
Índice de tablas	vii
Índice de anexos	viii
Introducción	1
<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>El problema</b>
1.1 Situación problemática	3
1.2 Objetivos	4
1.2.1 <i>Objetivo General</i>	4
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	4
1.3 Justificación	5
1.4 Alcance	5
1.5 Limitaciones	6
1.6 Antecedentes	6
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>Marco Teórico</b>
2.1 Materiales	10
2.2 Propiedades mecánicas del acero	17
2.3 Microestructura del acero	20
2.4 Tratamientos Térmicos	23
2.5 pruebas para ensayos mecánicos	28
2.6 Metalografía	35
2.7 Análisis químico EDX	37

<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>Marco metodológico</b>	
3.1 Nivel de la investigación		38
3.2 Diseño de la investigación		38
3.3 Población y muestra		39
3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos		40
3.4.1 Recopilación de documentos		
3.4.2 La observación directa		
3.4.3 Entrevista no estructurada		
3.5 Técnica de procesamiento y análisis de datos		41
3.6 Diagrama de actividades		41
3.7 Caracterización del material		41
3.8 Condición original del material		42
3.9 Equipos a utilizar		42
3.10 Mecanizado de las probetas		46
3.11 Tratamiento térmico		46
3.12 Procedimiento para la realización de ensayos		46
<b>CAPÍTULO 4</b>	<b>Análisis de resultados</b>	
4.1 Composición química del material		50
4.2 Microestructura en su condición original		50
4.3 Ensayo de tracción		52
4.4 Ductilidad		57
4.5 Ensayo de dureza		58
4.6 Ensayo de impacto		59
4.7 Tamaño crítico de grieta		60
4.8 Fractografía		61

**CAPÍTULO 5            Conclusiones y recomendaciones**

5.1 Conclusiones	73
5.2 Recomendaciones	75
Referencias bibliográficas	76
Anexos	79

# Índice de figuras

---



---

Figura 2.1. Esquema Diagrama de revenido del acero AISI T42	25
Figura 2.2 Ejemplo de un perfil de temperatura para tratamiento criogénico	28
Figura 2.3 Esquema de 3 métodos de ensayo de dureza	29
Figura 2.4 Esquema del ensayo de impacto.	33
Figura 2.5. Probeta estándar para Ensayo al Impacto	33
Figura 2.6. Método Charpy e Izod	34
Figura 3.1. Esquema de la metodología a seguir	41
Figura 3.2. Esquema de microscopio óptico	42
Figura 3.3. Esquema de macroscopio óptico	43
Figura 3.4 Máquina de ensayo de dureza	43
Figura 3.5. Máquina de ensayo de tracción	44
Figura 3.6. Máquina de ensayo de impacto	44
Figura 3.7 Dispositivo para tratamiento criogénico	45
Figura 3.8 Microscopio electrónico de Barrido (MEB)	46
Figura 4.1. Microestructura presente en el acero AISI T42 atacada con nital al 5% por 10 segundos con un aumento de 1000 X	51
Figura 4.2. Plantilla de 100 puntos sobre fotomicrografía del acero T 2000 para calcular el porcentaje de martensita presente. Aumento de 1000 X	51
Figura 4.3 Probetas de tracción de acero para herramientas T.2000	52
Figura 4.4 Gráfica Esfuerzo vs. Deformación de la condición original	53
Figura 4.5 Gráfica Esfuerzo vs. Deformación condición tratamiento criogénico.	53
Figura 4.6 Gráfica Esfuerzo de fluencia vs. Tratamiento aplicado.	55
Figura 4.7 Gráfica Esfuerzo máximo vs. Tratamiento aplicado.	55
Figura 4.8 Gráfica Deformación vs. Tratamiento aplicado.	55
Figura 4.9 Gráfica Esfuerzo vs. Deformación condición tratamiento criogénico.	56
Figura 4.10 programa utilizado para el cálculo de áreas	57

Figura 4.11 Gráfica reducción de área en función del tratamiento aplicado.	58
Figura 4.12 Gráfica Dureza Rockwell C en función del tratamiento aplicado.	59
Figura 4.13 Probetas de impacto de acero para herramientas T.2000	59
Figura 4.14 Gráfica Dureza Rockwell C en función del tratamiento aplicado.	60
Figura 4.15 Gráfica Dureza Rockwell C en función del tratamiento aplicado.	61
Figura 4.16 Probeta de tracción en la condición original a 1 X de aumento.	62
Figura 4.17 Probeta de tracción tratamiento criogénico.	62
Figura 4.18 Probeta de Charpy condición original a 1 X de aumento.	63
Figura 4.19 Probeta de Charpy tratamiento criogénico a 1X de aumento.	63
Figura 4.20 Microcopia de óptica del acero T 2000.	64
Figura 4.21 Microscopía de óptica del acero T 2000.	64
Figura 4.22. M.E.B. de la superficie de fractura de las probetas de Charpy.	65
Figura 4. 23. M.E.B. de la superficie de fractura de las probetas de Charpy.	66
Figura 4.24. M.E.B. de la zona de fractura de las probetas de tracción	66
Figura 4.25 Análisis químico condición original.	67
Figura 4.26 Análisis químico condición tratamiento criogénico.	67
Figura 4.27 Gráfica comparativa de los elementos aleantes en función de las condiciones de estudio.	66
Figura 4.28 Puntos sobre la superficie de la muestra en condición original analizada por EDX.	69
Figura 4.29 Perfil de concentración de hierro sobre la superficie de estudio en muestra en condición original realizada con análisis por EDX.	69
Figura 4.30 Perfil de concentración de Carbono sobre la superficie de estudio en muestra en condición original realizada con análisis por EDX.	69
Figura 4.31 perfil de concentración de Cobalto sobre la superficie de estudio en muestra en condición original realizada con análisis por EDX.	70
Figura 4.32 perfil de concentración de tungsteno sobre la superficie de estudio en muestra en condición original realizada con análisis por EDX.	70
Figura 4.33 puntos sobre la superficie de la muestra tratada criogénicamente analizada por EDX.	71
Figura 4.34 perfil de concentración de hierro sobre la superficie de estudio realizada con análisis por EDX.	71
Figura 4.35 perfil de concentración de cobalto sobre la superficie de estudio realizada con análisis por EDX.	71

- Figura 4.36 perfil de concentración de tungsteno sobre la superficie de estudio realizada con análisis por EDX. 72
- Figura 4.37 perfil de concentración de carbono sobre la superficie de estudio realizada con análisis por EDX. 72

# Índice de tablas

---

---

	Pág.
2.1 Propiedades mecánicas del acero AISI T42	15
2.2 Composición química del acero AISI T42	15
3.1 Cantidad de probetas a utilizar según tipo.	39
3.2 Caracterización del material.	42
4.1 Composición química del acero T 2000	50
4.2 Porcentaje de las fases presentes en acero T 2000	52
4.3 condiciones de trabajo para el acero de herramientas T 2000	52
4.4 Propiedades mecánicas del acero para herramientas T.2000 en condición original.	54
4.5 Propiedades mecánicas del acero para herramientas T.2000 condición tratamiento criogénico.	54
4.6 Propiedades mecánicas promedio del acero para herramientas T.2000 para cada una de las condiciones.	54
4.7 Valores del área final de las probetas de tracción	57
4.8 Valores del área final de las probetas de tracción	57
4.9 Valores de dureza Rockwell C (HRC) para cada condición de estudio	58
4.10 Valores de dureza para cada condición	60
4.11 Valores del tamaño crítico de grieta para cada una de las condiciones de estudio	61
4.12 porcentaje de fases presentes en el acero T 2000 tratada a temperatura criogénica.	64
4.13 Cuadro comparativo del análisis químico de las muestras de tracción.	68



# Índice de anexos

---

---

	Pág.
Anexo A. constancia del ensayo de tracción elaborado	79
Anexo B. Probeta de ensayo de tracción	80
Anexo C. Probeta de ensayo de impacto	81
Anexo D. Designación del acero T 2000 según otras normas	82
Anexo E. constancia de la procedencia del acero T 2000	83

# Introducción

---

---

Para la realización del presente trabajo especial de grado “Evaluar la influencia de un tratamiento a temperatura criogénica en las propiedades mecánicas posterior al temple en muestras de acero para herramientas T 2000”, fue necesario el desarrollo de diversos pasos para cumplir los objetivos planteados, cumpliéndose de esta manera:

Primer paso: Consistió en la selección del material, aquí se consideraron diferentes variables como existencia en el mercado, composición química con una microestructura específica del acero para herramientas, el cual tiene una fracción de austenita retenida.

Segundo paso: Se fabricó las probetas de los diferentes ensayos a realizar, todas creadas bajo las normas que se encargan de estandarizar dichos procesos.

Tercer paso: Se establecieron los parámetros para realizar el enfriamiento a temperatura criogénica, este sistema es aplicado a diferentes muestras de acero para herramientas.

Quinto paso: Se comparó y analizó los resultados arrojados por los diferentes ensayos realizados, se establecieron conclusiones sobre la influencia del tratamiento a temperatura criogénica en la microestructura y propiedades mecánicas del acero T.2000.

Este trabajo especial de grado esta compuesto por cinco capítulos, los cuales están estructurados de la siguiente manera:

Capítulo I: Se plantea la problemática y la justificación del tema de estudio, además de los objetivos tanto generales como específicos que se persiguen con la propuesta.

Capítulo II: Se presentan los antecedentes de la investigación, también se establecen las bases teóricas necesarias para despejar cualquier duda que pudiese presentarse con algún término.

Capítulo III: Se plantea el diseño y la modalidad de la investigación, técnicas de recolección y análisis de datos, así como las fases en que fue dividido el proyecto.

Capítulo IV: El sistema propuesto es el conjunto de operaciones que deben llevarse a cabo para obtener las mejoras planteadas en algunas de las propiedades estudiadas, aquí se presentan todos los resultados obtenidos a lo largo del desarrollo del proyecto.

Capítulo V: Conclusiones y recomendaciones

Además también se presentan anexos y bibliografía.

# CAPÍTULO 1

## **El problema**

---

### **1. EL PROBLEMA**

#### **1.1 Situación problemática**

La constante búsqueda por el mejoramiento en los aceros para optimizar sus condiciones de trabajo ha sido relevante en las últimas décadas, creando sistemas más precisos para la mezcla de componentes en las coladas, controles de temperaturas y hasta el desarrollo de nuevas aleaciones que permiten ir cumpliendo con las distintas necesidades que se presentan en la industria.

Por otro lado, para mejorar los beneficios de los aceros se le aplican tratamientos térmicos. Los diferentes tipos de tratamientos térmicos buscan un objetivo en común, producir cambios en las propiedades mecánicas del material hasta llevarlo a las condiciones ideales de trabajo según sea el uso al que va a ser sometido. Por supuesto que estos cambios están limitados debido a la conexión que existe entre las diferentes propiedades, por ejemplo el aumento en la dureza de los materiales implica un incremento en su fragilidad, por esta razón se hace necesario aplicar tratamientos que liberen los esfuerzos residuales, mejorando así la ductilidad y tenacidad. Pero este incremento en los valores de tenacidad generalmente conlleva a sacrificar valores de dureza, para así obtener un material adecuado según sea la aplicación deseada.

Sin embargo, hay condiciones de trabajos para los cuales los aceros al carbono no son los indicados por las propiedades presentes como la corrosión, altas temperaturas de trabajo, resistencia al desgaste, templabilidad entre otras., y son reemplazados por los HSS o aceros para herramientas. Los aceros para herramientas, además de utilizarse para la fabricación de elementos de máquinas, se emplean para la fabricación de útiles destinados a modificar la forma, tamaño y dimensiones de los materiales por arranque de viruta, corte, conformado, embutición, extrusión, laminación e impacto. Haciendo énfasis a los procesos de arranque de viruta el acero más común que se usa como

herramienta de corte es el acero para herramienta T.2000. Por lo que a estos aceros se les aplica tratamiento de temple y revenido para hacerlo mas duros. Pero el problema con el tratamiento térmico convencional a través de temple de estos aceros es el contenido de austenita retenida que es blanda e inestable a baja temperatura y se transforma en martensita frágil durante el servicio. (Kalpakjian, 2008)

Se evidencia, entonces que debido a la necesidad de obtener componentes y piezas de acero con altos valores de dureza, tenacidad y resistencia, se han desarrollado diferentes sistemas, algunos de estos orientados incluso hacia el uso del tratamiento criogénico como medio de obtener estructuras más coherentes y uniformes, es decir someter a los componentes hasta  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  (77 K) un intervalo de tiempo. Con un tratamiento criogénico se mejoran las propiedades mecánicas y microestructurales como consecuencia de una baja temperatura que transforma el porcentaje de austenita retenida en martensita.

En este trabajo especial de grado se plantea la aplicación de temperatura criogénica en el acero para herramientas en condición de temple y revenido, para evaluar los cambios en las propiedades mecánicas como dureza, resistencia a la tracción y ductilidad.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.3.1 Objetivo General**

Evaluar la influencia de un tratamiento a temperatura criogénica en las propiedades mecánicas de un acero para herramientas T.2000.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

1. Desarrollar proceso de tratamiento térmico a temperatura criogénica del acero para herramientas T.2000.
2. Comparar las propiedades mecánicas de dureza, resistencia a la tracción y ductilidad, obtenidas en el tratamiento a temperatura criogénica.
3. Comparar la microestructura obtenida en el acero de herramientas T.2000 antes y después del tratamiento criogénico a través de ensayos metalográficos.

4. Analizar la microestructura y propiedades mecánicas obtenidas en el acero de herramientas antes y después del tratamiento criogénico a través de ensayos metalográficos y mecánicos.

### **1.3 Justificación**

En los últimos años la tecnología en el área de la metalurgia ha evolucionado constantemente. Lo que produce avances significativos en el desarrollo de una gran variedad de aceros que perduran en el tiempo mejorando las propiedades que ya ofrecían tradicionalmente.

Estos progresos permiten la innovación en el desarrollo de estudios que proporcionen resultados cuantificables sobre las mejoras que podrían tener las propiedades del acero con la aplicación de nuevos procesos como extensión de los tratamientos térmicos clásicos.

Es por ello, que en este proyecto de grado se realiza el tratamiento a temperaturas criogénicas a diferentes muestras de acero T.2000, usando el nitrógeno líquido como medio de enfriamiento para someter dichas muestra.

### **1.4 Alcance**

- Presentar los cambios producidos en la microestructura y propiedades mecánicas del acero de herramienta T.2000 al aplicar un tratamiento a temperatura criogénica.
- Determinar mediante el análisis de los resultados obtenidos en los ensayos mecánicos (dureza, resistencia a la tracción e impacto) realizados una vía a la posible mejora de las propiedades mecánicas (dureza, resistencia a la tracción y ductilidad).
- Se trabajará con el valor mínimo de muestras que la norma ASTM establece para avalar que los resultados sean más confiables, es decir, que la cantidad de probetas para los ensayos son 4 para ensayo de tracción , 6 para ensayo de impacto y 6 indentaciones por condición.

## 1.5 Limitaciones

- Por otro lado se tienen las limitaciones propias, económicas y de recursos, de un proceso de investigación que está sustentado en los ensayos y prácticas que se realizan en laboratorios y talleres que para este trabajo fueron necesarios utilizar.
- La escasa aplicación de las temperaturas bajo cero en el área metalúrgica a nivel industrial, así como la poca información documental acerca del tema en Venezuela.

## 1.6 Antecedentes

A continuación se presenta un extracto de investigaciones que guardan relación con el trabajo a desarrollar, bien por la metodología empleada o por su contenido.

Estos antecedentes sirvieron de apoyo para desarrollar el presente estudio.

Mahdi Kneshlou *et al.* (2011) presentaron un proyecto en el que se estudian el efecto que se genera al aplicar al acero de herramienta AISI H13 un tratamiento criogénico y un tratamiento criogénico profundo posterior al temple. Para el análisis de dichos efectos se aplicaron a la muestras de acero AISI H13 un tratamiento de temple que dio lugar a una cantidad de austenita retenida, lo que genera algunos efectos perjudiciales sobre las propiedades mecánicas como el mecanizado, el desgaste, la dureza y el más importante en este caso la estabilidad dimensional del acero de herramienta. Posterior a ello las muestras fueron sometidas a un tratamiento criogénico de  $-72\text{ }^{\circ}\text{C}$  y un tratamiento criogénico profundo de  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 8 horas y luego progresivamente se llevaron hasta  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Luego se le aplicó el revenido a  $560\text{ }^{\circ}\text{C}$  sobre algunas muestras para estudiar el efecto del tratamiento subcero sobre las propiedades. Los resultados obtenidos al aplicar ambos métodos fue que a medida que la temperatura disminuyó más la austenita retenida se transformó en martensita y también se obtuvieron láminas de martensita más pequeñas y uniforme distribuidos en la microestructura. El tratamiento criogénico profundo también dio lugar a precipitados de carburos muy finos y más uniforme. La modificación microestructural resultó en una mejora significativa en las propiedades mecánicas del acero para herramientas H13.

Das *et al.* (2010) presentaron un proyecto titulado “Tratamientos subceros del acero AISI D2: Microestructura y dureza”. Trabajo que se divide en 2 partes: la parte I estudia la microestructura y la dureza y la partes II que aborda la el comportamiento al desgaste. Para el análisis de microestructura y dureza se sometieron a tratamiento térmico convencional y diferentes tipos de tratamientos subcero en lotes separados. El tratamiento térmico convencional consistió en el temple y revenido, mientras que el tratamiento subcero implica bajar más temperatura en un ciclo intermedio entre el temple y revenido. Los diferentes tratamientos subceros estudiados en la investigación fueron: el tratamiento en frío, tratamiento criogénico superficial y tratamiento criogénico profundo cuyas temperaturas respectivas fueron a 198 K, 148 K y 77 K, pespectivamente. El resultado arrojado fue que los tratamientos subceros aceleran la descomposición de la martensita y modifican el comportamiento de la precipitación de los carburos secundarios. Además el efecto de la variación de temperatura en las diferentes pruebas denota que mientras menor sea la temperatura del tratamiento mas refinados será el tamaño y la densidad de población de los granos.

Das *et al.* (2010) presentaron un proyecto que se dividió en dos partes. En esta parte del proyecto se hace énfasis en comportamiento del desgaste ante la aplicación de un tratamiento criogénico. Para llevar a cabo este estudio se sometieron las muestras anteriormente tratadas (en la Parte I del trabajo) a una observación detallada a través de un microscopio electrónico de barrido (SEM) y fue complementado con un microanalizador por dispersión de energía (EDX) que permitieron determinar la naturaleza y la morfología de las superficies y partículas desgastadas. Además, se determinó la resistencia al desgaste a través de una máquina de para pruebas de desgaste pin on disc computarizada donde se adquirió información continua de la perdida de altura en el disco y las fuerzas normales generadas. Los resultados obtenidos luego de relacionar el comportamiento al desgaste con la microestructura y con el efecto de las cargas concretan que el grado de mejora en la resistencia al desgaste por los diferentes tratamientos subcero con respecto a un tratamiento térmico convencional produce cambios muy perceptibles, alrededor de 120% en los tratados en frío y 90% en los tratados superficialmente.

Das, *et al.* (2009) presentaron un proyecto que consistió en determinar el tiempo óptimo al cual se deben sumergir en nitrógeno líquido las muestras de acero de herramientas AISI D2 luego del temple. El trabajo consistió en determinar las propiedades como desgaste, dureza y características microestructurales tratadas criogenicamente a una temperatura de  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $77\text{ K}$ ) para diferentes duraciones de inmersión en la cual se manejó un intervalo de tiempo de 0-132 horas, con intervalos de 0, 1, 12, 36, 60, 84 y 132 horas. Al evaluar las relaciones de microestructura-propiedades de las muestras tratadas de manera diferente resulta que el tiempo óptimo para el proceso criogénico es de 36 horas.

Das *et al.* (2008) presentaron un trabajo que tenía como objetivo abordar el problema de incertidumbre sobre un método seguro de evaluar el grado de mejora en términos cuantitativos al aplicar el tratamiento criogénico a través de experimentos de desgaste organizados y sistemáticos en las muestras de acero AISI D2 pudiendo de esa manera revelar la influencia de la duración del tratamiento con temperaturas criogénicas en la mejora de la resistencia al desgaste en diferentes condiciones experimentales. Los resultados establecen que de forma no inequívoca la duración del tiempo crítico existe para lograr una mejor resistencia al desgaste del acero en estudio a través del tratamiento criogénico. Se explica por la naturaleza de la formación de las partículas finas de carburo y su posible crecimiento, que regulan la resistencia al desgaste del material.

Zhirafar *et al.* (2007) presentaron una investigación sobre los efectos del tratamiento criogénico en las propiedades mecánicas y la microestructura del acero AISI 4340. Las pruebas mecánicas, incluyendo la fatiga de rotación, el impacto y la dureza se llevaron a cabo, después de diferentes condiciones en los tratamientos térmicos para posteriormente comparar los resultados. Las características de la fractura de las muestras también fueron comparadas a través de una fractografía para determinar los indicadores de ductilidad. De los resultados obtenidos fue demostrado que, en general, la dureza y resistencia a la fatiga de las muestras criogénicamente tratadas fueron un poco más altas, mientras que la tenacidad de las muestras criogénicamente tratado fue menor en comparación con la del acero tratado convencionalmente.

Huang *et al.* (2003) presentaron un proyecto en que se estudiarón los cambios microestructura del acero para herramientas M2 antes y después del tratamiento criogénico. El procedimiento consistió en alcanzar una temperatura de austenización de 1100 °C en una atmósfera de nitrógeno a 20 Pa, manteniendo durante 1 hora, seguido de enfriamiento a una temperatura ambiente en gas de nitrógeno. El tratamiento criogénico de las muestras se realizó por inmersión en nitrógeno líquido durante una semana. Para la comparación, tanto en las muestras tratadas y no tratadas criogénicamente se templaron a 200 °C en atmósfera de nitrógeno durante 24 h. Los resultados arrojados hacen notar que los cambios producidos por el tratamiento criogénico no sólo pueden facilitar la formación de carburo y el incremento de la población carburo y la fracción de volumen en la matriz de martensita, sino también puede hacer la distribución más homogénea de carburo.

Molenari *et al.* (2001) llevaron a cabo un estudio sobre los beneficios que tendría aplicar un tratamiento térmico profundo en las propiedades mecánicas y resistencia al desgaste de dos aceros: un acero rápido AISI M2 y un acero de herramientas para trabajo en caliente AISI H13. La investigación se llevó a cabo con la fabricación de dos herramientas con acero AISI M2 las cuales una fue tratada convencionalmente con un temple y la otra con un tratado criogénico, luego estas se colocaron a trabajar bajo las mismas condiciones en una máquina para el formado de superficies de acero C50, donde dió como resultado que las tratadas convencionalmente presentaron más desgaste, después de las 20000 partes, que las tratadas criogénicamente, después de las 48700 partes producidas. Por otro lado cuando se experimentó con el acero AISI H13, se tomaron nuevamente dos muestras, una tratada convencionalmente con un tratamiento de temple y revenido y el otro con tratamiento criogénico. Y al aplicarle los ensayos de dureza e impacto resultó que el incremento de tenacidad no influye en la dureza para dicho acero. Los resultados al comparar ambos aceros fueron que mientras el acero AISI M2 el incremento de la resistencia al desgaste puede ser atribuido al incremento de dureza; en el caso del acero AISI H13 el aumento de resistencia al desgaste puede ser correlacionado al incremento de la tenacidad.

# CAPÍTULO 2

## MARCO TEÓRICO

---

---

Una vez que ha sido seleccionado el problema, y definidos los objetivos y supuestos teóricos del estudio, este capítulo proporcionará al lector una idea más clara acerca de este tema. Se encontrara los conceptos muy básicos, los complementarios y específicos

### 2.1 MATERIALES METÁLICOS

Estos materiales son sustancias inorgánicas que están formadas por uno o más elementos metálicos y pueden contener también algunos elementos no metálicos. Ejemplo de elementos metálicos son: hierro, cobre, aluminio, níquel y titanio. Elementos no metálicos que pueden estar contenidos en los materiales metálicos son: carbono, nitrógeno y oxígeno. Los metales tienen una estructura cristalina en la que los átomos están dispuestos de una forma ordenada. Los metales en general son buenos conductores térmicos y eléctricos. Muchos metales tienen relativamente alta resistencia mecánica y son dúctiles a temperatura ambiente, y algunos tienen elevada resistencia incluso a altas temperaturas.

Los metales y aleaciones se dividen normalmente en dos grandes grupos: metales y aleaciones ferrosas, que contienen un gran porcentaje de hierro tales como los aceros y hierros fundidos, las aleaciones y metales no ferrosas, que no contienen hierro o contienen cantidades relativamente bajas de hierro. Ejemplo de materiales no ferrosos son aluminio, cobre, cinc, titanio y níquel. (Hugon, 1982)

#### 2.1.1 Acero

Se llaman aceros a las aleaciones de hierro que son, en general, conformables en caliente. Con excepción de ciertos aceros de alto contenido de cromo, tienen un contenido de carbono inferior o igual al 2%, proporción límite que los distingue de las fundiciones.

Un acero es, por lo tanto, una aleación, es decir, una solución sólida (cristalina) de compuestos químicos, que son, en orden decreciente de importancia cuantitativa:

- El hierro (Fe);
- Las combinaciones hierro-carbono ( $\text{Fe}_3\text{C}$ );
- El carbono (C)
- Metales o metaloides en pequeñas proporciones, ya beneficiosos (productos de adición), ya perjudiciales (impurezas, como el azufre y el fósforo).

El contenido en carbono diferencia los aceros en cuanto a sus características mecánicas, que dependen también:

- Del estado cristalino del metal y de sus compuestos químicos con el carbono;
- De los productos de adición. (Hugon, 1982)

## **2.1.2 Clasificación de los aceros**

Existen muchas clases de acero que contienen desde las sencillas aleaciones hierro carbono hasta aquellas que usan más de un elemento aleante para conseguir diferentes propiedades mecánicas que cumplan con las solicitudes de trabajo. Entre ellos están: los utilizados para herramientas, los de baja aleación y alta resistencia; los inoxidables

### **2.1.2.1 Aceros al carbono**

Los aceros más sencillos son aleaciones binarias de hierro y carbono y se denominan aceros al carbono. Son los más comunes en toda la gama de aceros, si se considera el volumen de producción frente a otras aleaciones férricas más complejas. Se destinan a cubrir las necesidades generales de la ingeniería en la construcción de edificios, estructuras, puentes, minas, industria naval, automoción, calderas y componentes de ferrocarriles, etc. los aceros al carbono se pueden clasificar en función de su contenido en carbono, teniendo en cuenta que son más duros los que más carbono contienen, y esto determinará su respuesta en servicio. (Saln B, 2005)

Así que se pueden distinguir básicamente tres grupos:

- **Acero al bajo carbono:** también llamado acero dulce, tiene menos 0.30% de C. con frecuencia se utiliza para productos industriales comunes (como pernos, tuercas, hojas, placas y tubos) y para componentes de máquinas que no requieren alta resistencia.
- **Acero al medio carbono:** Tiene de 0.30% a 0.60% de C. Generalmente se utiliza en aplicaciones que requieren una mayor resistencia que la disponible en los aceros al bajo carbono, como en maquinaria, partes de equipos automotores y agrícolas (engranajes, ejes, bielas, cigüeñales), equipo ferroviario y partes de maquinaria para el trabajo de los metales.
- **Acero de alto carbono:** tiene más de 0.60 % de C. en general el acero de alto carbono se utiliza en partes que requieren resistencia, dureza y resistencia al desgaste, como herramientas de corte, cables, alambre musical, resorte, cuchillería. Después de formarse, usualmente se da tratamiento térmico y revenido a las partes. Cuanto más carbono tenga el acero, mayores serán su dureza, resistencia y resistencia al desgaste luego del tratamiento térmico. (Kalpakjian, 2008)

### 2.1.2.2 Aceros aleados

A los aceros aleados con cantidades significativas de elementos aleantes se le llama aceros aleados; por lo común se fabrican con mayor cuidado que los aceros al carbono. Los aceros aleados de grado estructural se utilizan sobre todo en la industria de la construcción y del transporte, debido a su mayor resistencia. Otros aceros aleados se usan en aplicaciones donde se requiere resistencia, dureza, resistencia a la termofluencia y a la fatiga, así como tenacidad. Estos aceros se pueden tratar térmicamente para obtener las propiedades deseadas. Estos aceros de aleación se pueden subclasificar en:

#### a) **Aceros de alta resistencia y de baja aleación.**

Para mejorar la relación resistencia a peso de los aceros se han desarrollado numerosos aceros de alta resistencia y de baja aleación (HSLA, por sus siglas en inglés), que tienen un bajo contenido de carbono (en

general menos de 0.30%) y se caracteriza por una microestructura consistente en una fase de ferrita de grano muy fino y una segunda fase de martensita y austenita.

b) **Aceros inoxidables**

Los aceros inoxidables se caracterizan por su resistencia a la corrosión, alta resistencia y ductilidad, así como el alto contenido de cromo. Se les llama inoxidable porque, en la presencia de oxígeno (aire), desarrollan una delgada película de óxido de cromo, dura y adherente, que protege al metal de la corrosión (pasivación). Esta película protectora se vuelve a acumular en caso de que se raye la superficie; para que la pasivación ocurra, el contenido mínimo de cromo debe ser de 10% a 12% en peso.

c) **Aceros para matrices y herramientas**

Son aceros aleados especialmente diseñados para la alta resistencia, tenacidad al impacto y resistencia al desgaste a temperatura ambiente y a temperaturas elevadas. Se utilizan por lo común en el formado y maquinado de metales.

**Los aceros para matrices**, los aceros para trabajo en caliente (serie H) están diseñados para usarse a temperaturas elevadas. Tienen una alta tenacidad, así como una alta resistencia al desgaste y agrietamiento. En general los elementos aleados son tungsteno, molibdeno, cromo y vanadio. Los aceros para trabajo en frío (serie A, D y O) se usan para operaciones de trabajo en frío; están disponibles en los tipos templados en aire y en aceite. Los aceros resistentes al impacto (serie S) se diseñan para tener tenacidad al impacto y se utilizan en aplicaciones como matrices para cabeceado, punzones y cinceles.

**Los aceros de alta velocidad** (HSS, por sus siglas en inglés) son los aceros para herramientas y matrices con mayores aleaciones. Desarrollados a principios de 1900, mantienen su dureza y resistencia a elevadas temperaturas de operación. Existen dos tipos básicos de aceros de alta velocidad: el tipo molibdeno (serie M) y el tipo tungsteno (serie T). La serie M contiene hasta 10 % de molibdeno, con cromo, vanadio, tungsteno y cobalto como otros elementos de aleación. La serie T contiene de 12% a 18% de tungsteno,

cromo, vanadio y cobalto. Los aceros de la serie M por lo general tienen una mayor resistencia a la abrasión que los de la serie T, sufren menos distorsión durante el tratamiento térmico y su costo es menor. (Kalpakjian ,2008)

### **2.1.2.3 Clasificación de los aceros de alta velocidad.**

Los aceros rápidos son aleaciones de Fe y C de bajo contenido en Carbono, entre 0,7 y 0,9%, al cual se le añade un 13-19% de W, 3,5-4,5% de Cr y un 0,8 y 3,2% de V. Reciben el nombre de aceros rápidos, debido a que las herramientas fabricadas con estos aceros pueden mecanizar los materiales de una forma mucho más rápida, es decir, permiten emplear velocidades de corte mucho más elevadas que las que permiten emplear las herramientas de acero al carbono. Esto es debido a que los aceros rápidos mantienen la dureza y el filo cortante en caliente aunque la herramienta llegue hasta 500-600°C durante el trabajo. El resto de aceros de herramientas se ablandan y desafilan rápidamente cuando se alcanzan temperaturas superiores a 250°C. Las excelentes propiedades de estos aceros se obtienen después de que los aceros hayan sido templados a muy alta temperatura, entre 1200 y 1300°C, muy superior a la que corresponde a los demás aceros. Después de este tratamiento de temple se les da uno o varios revenidos. Los aceros rápidos se pueden clasificar en cuatro grupos principales:

#### **2.1.2.3.1 Aceros al wolframio**

Son aceros en los que el contenido en C varía entre 0,6 y 1%; el de W entre 12 y 20%; el de V entre 1 y 15% y el de Cr entre 3 y 4,5%. Se clasifican, a su vez, en tres subgrupos. El primer subgrupo incluye los aceros al W que se destinan a trabajos de desbaste con máquinas potentes que emplean grandes pasadas. El segundo subgrupo lo forman los aceros de gran dureza, destinados a operaciones de terminación y en operaciones delicadas cuya composición en C varía entre 0,8 y 1,3 %; el de W entre 16 y 20%; el de V entre 2 y 5 %, Mo entre 0 y 1 %, y el de Cr 4 %. Y finalmente, el tercer subgrupo lo forman los llamados aceros semirrápidos, que son aceros de más baja aleación y un menor rendimiento cuya composición química está comprendida entre C varía entre 0,6 y 0,8 % , y el de W entre 14 y 16 %.

### 2.1.2.3.2 Aceros al molibdeno.

Son aceros cuya composición química aproximada es de un 8% de Mo, 4% de Cr y un 1% de V. Las temperaturas de temple y revenido de estos aceros son inferiores a las de los aceros al W. Requieren además mayores cuidados que estos últimos, pues al calentarse a elevadas temperaturas tienden a descarbonarse. Entre los aceros al Mo más empleados están el M2 y el M1.

### 2.1.2.3.3 Aceros al cobalto.

Son aceros cuyo contenido en W oscila entre el 14 y el 20% y el de Cobalto entre el 3 y el 12%, el cual mejora la dureza, la resistencia en caliente y permite el temple a unas temperaturas más elevadas, sin el riesgo de que se quemé el acero. Se recomienda su uso cuando se empleen máquinas potentes y se mecanicen materiales duros a las mayores velocidades y con fuertes pasadas. Estos aceros se clasifican en tres subgrupos: aceros al W con Co (T4, T5, T6, T8 y T15). (Arnal 2010)

- **Acero AISI T42**

El acero AISI T42 es un acero de alta velocidad de alto rendimiento al corte y resistencia a altas temperaturas, además de un buen grado de dureza. Es un acero para aplicación universal que da óptimos tiempos en la vida útil en herramientas de corte y fresado. Usado para desbastes y acabados, herramientas de corte para material muy duros, cuchillas de torneado, herramientas que trabajan con madera y axial como para trabajos en frío. Se caracteriza por tener las siguientes propiedades:

- Buena resistencia al desgaste.
- Excelente dureza en caliente.

Tabla 2.1. Algunas propiedades mecánicas del acero AISI T42. (Metalravne, 2012)

Grado	Dureza (HRC)	Modulo de elasticidad ( $10^3 \times \text{N/mm}^2$ )
AISI T42	67	217

Además, su composición química se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 2.2. Composición química del acero AISI T42. (Metalravne, 2012)

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

#### 2.1.2.4 Carburos

El porcentaje de carburos presentes es función principal de su composición química, mientras que la distribución, uniformidad, morfología y tamaño de los mismos dependen del proceso de obtención. El endurecimiento secundario se produce en los aceros aleados por la precipitación de carburos distribuidos en toda la microestructura en el intervalo de 550 – 600 °C generalmente. La influencia de los carburos en la resistencia al desgaste de los aceros depende de la relación que exista entre la dureza del carburo y la de la matriz. Si la dureza del carburo es similar a la de la matriz, la resistencia al desgaste disminuirá debido a que el carburo actuará como un concentrador de esfuerzo. Los elementos formadores de carburos más importantes son los siguientes:

➤ ***Cromo (Cr):***

Se encuentra en los aceros en un intervalo de (0,2 – 30,0) %Cr. Formador de carburos de alta dureza y buena resistencia al desgaste. Cuando el contenido de cromo es mayor al 12%, hay un alto aumento de la resistencia a la corrosión. Mejora la templabilidad y comportamiento mecánica a altas temperaturas. Favorece al endurecimiento secundario.

➤ ***Manganeso (Mn):***

Se encuentra en los aceros en un intervalo de (0,25 – 19,00) %Mn. Formador de carburos (no es muy fuerte). Mejora la templabilidad. Cuando el contenido de manganeso es mayor al 11%, es una aleación que se endurece por deformación y es usado en la minería.

➤ ***Molibdeno (Mo):***

Se encuentra en los aceros en un intervalo de (0,12 – 10,00) %Mo. Fuerte formador de carburos. Aumenta significativamente la templabilidad y la resistencia al desgaste. Mejora las propiedades mecánicas a altas temperaturas. Favorece al endurecimiento secundario.

➤ ***Tungsteno (W):***

Se encuentra en los aceros en un intervalo de (0,4 – 21,0) %W. Fuerte formador de carburos. Mejora la templabilidad y la resistencia al desgaste.

Mejoralas propiedades mecánicas a altas temperaturas. Favorece al endurecimiento secundario.

➤ **Vanadio (V):**

Se encuentra en los aceros en un intervalo de (0,1 – 0,5) %V. Fuerte formador de carburos. Mejora la templabilidad y la resistencia al desgaste. Prohíbe el crecimiento de grano por temperatura. Favorece al endurecimiento secundario.

➤ **Cobalto (Co)**

Se usa en los aceros rápidos para herramientas, aumenta la dureza de la herramienta en caliente. Se utiliza para aceros refractarios. Aumenta las propiedades magnéticas de los aceros. (Arnal 2010)

## **2.2 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO.**

### **2.2.1 Dureza**

La dureza es una propiedad común; proporciona una indicación general de la resistencia del material rayado y al desgaste. Mas específicamente, la dureza suele definirse como la resistencia a la indentación permanente; por ejemplo el acero es más duro que el aluminio y este es más duro que el plomo. Sin embargo, la dureza no es una propiedad fundamental, porque la resistencia a la indentación depende de la forma del indentador de la carga aplicada. (Kalpakjian,2008)

### **2.2.2 Propiedades elásticas y plásticas.**

Cuando una pieza de metal es sometida a una fuerza de tracción uniaxial, se produce una deformación del metal. Si el metal vuelve a sus dimensiones originales cuando la fuerza cesa, se dice que el metal ha experimentado una deformación elástica. El número de deformaciones elásticas que un metal puede soportar es pequeño, puesto que durante la deformación elástica los átomos de metal son desplazados de su posición original, pero no hasta el extremo de que tomen nuevas posiciones. De esta manera, cuando la fuerza sobre el metal que ha sido deformado elásticamente cesa, los átomos del metal vuelven a sus posiciones originales y el metal adquiere su forma original. Si el metal es deformado hasta el extremo de que no puede recuperar completamente sus dimensiones

originales, se dice que ha experimentado una deformación plástica. Durante la deformación plástica, los átomos del metal son desplazados permanentemente de sus posiciones originales y toman nuevas posiciones. La capacidad de algunos metales de ser deformados plásticamente en gran extensión sin sufrir fractura, es una de las propiedades más útiles de los metales para ingeniería. Por ejemplo, la deformabilidad plástica del acero posibilita que partes del automóvil tales como parachoques, cubiertas y puertas sean troqueladas mecánicamente sin romperse. (Smith, 1998)

La deformación es el cambio en longitud por unidad de longitud y se calcula a partir de:

$$\varepsilon = \frac{L_f - L_0}{L_0} \quad (2.1)$$

Una medida normal de la ductilidad de un material es su *alargamiento porcentual*, definido como:

$$\text{Elongamiento porcentual} = 100 \frac{L_f - L_0}{L_0} \quad (2.2)$$

Otra medida de ductilidad que se usa es el porcentaje de reducción de área, definido por:

$$\text{Porcentaje de reducción de área} = 100 \frac{A_f - A_0}{A_0} \quad (2.3)$$

El esfuerzo ingenieril ( $\sigma$ ) de un material es la relación que existe entre la fuerza aplicada y el área inicial de la muestra, definida como:

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (2.4)$$

### 2.2.3 Tenacidad de fractura

La tenacidad de fractura puede ser definida como la habilidad de un material para transmitir carga o deformación plástica, en presencia de una muesca y

puede ser descrita, en términos del factor de intensidad de esfuerzo crítico bajo condiciones de estado plano de esfuerzos ( $K_c$ ) o de estado plano de deformación ( $K_{IC}$ ) para carga lenta y comportamiento lineal elástico.  $K_{IC}$  es una medida de tenacidad crítica de un material bajo condiciones de máxima restricción plástica (estado de deformación plana) y bajo carga dinámica o de impacto, también para comportamiento lineal-elástico. Para comportamiento elástico-plástico (materiales con mayores niveles de tenacidad con entalla que exhiben un comportamiento lineal-elástico). La tenacidad de un material es medida en términos de parámetros tales como:  $K_{IC}$ , integral J ( $J_{IC}$ ), curva R, desplazamiento de apertura de boca (COD).

La tenacidad a la fractura depende del espesor de la probeta: conforme se incrementa el espesor, la tenacidad a la fractura  $K_c$  disminuye hasta un valor constante. Esta constante se conoce como la tenacidad a la fractura en estado de deformación plana  $K_{IC}$ . Generalmente  $K_{IC}$  se reporta como propiedad de un material. (Arana, 2000)

### 2.2.3.1 Tamaño de grieta ( $a$ )

La fractura frágil se inicia a partir de discontinuidades (porosidad, falta de fusión, entre otras.) de varios tipos. Estas discontinuidades pueden variar de extremadamente pequeñas en el interior de una soldadura de arco sumergido, hasta grietas muchos mayores en otro tipo de soldaduras o grietas por fatiga. (Arana, 2000)

$$K_{ic} = \sigma_y \cdot Y \sqrt{\pi \cdot a} \quad (2.5)$$

Donde:

$K_{IC}$ : factor de intensidad de esfuerzo crítico bajo condiciones de estado plano de deformación en  $Ksi \cdot pulg^{1/2}$

$\sigma_y$ : esfuerzo de fluencia en (Ksi)

Y: es un factor que depende de la geometría.

### 2.2.3.2 Niveles de esfuerzos ( $\sigma$ )

Se necesitan esfuerzos de tracción para que ocurra la grieta frágil, estos esfuerzos se determinan mediante técnicas convencionales de análisis de esfuerzos para estructuras particulares. ( Arana, 2000)

### 2.2.3.3 Método de Barson y Rolfe.

Ya que la determinación experimental del  $K_{IC}$ , JIC y COD es costosa (maquinado, pre-agrietado por fatiga, ensayo) y no es generalmente usada para el control de calidad, en los últimos años se ha tratado de correlacionar los resultados de ensayos mecánicos mas simples con la tenacidad y el KIC del material. Ciertas relaciones empíricas entre los valores de  $K_{IC}$  y CVN han sido propuestas en base a los resultados de diferentes investigaciones.

Barson y Rolfe en el año 1986 observaron que el efecto de la temperatura y la velocidad de carga en los valores de CVN y KIC es la misma, la cual sugiere la posibilidad de establecer ciertas relaciones empíricas entre los resultados de estos dos ensayos. En el rango dúctil, la diferencia entre las muestras de ensayo para KIC y CVN; la velocidad de carga y agudeza en la entalla, no son tan significativos por lo cual se espera una correlación razonable. ( Arana, 2000)

La relación propuesta por Rolfe, Novac y Barson es:

$$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_y}\right)^2 = \left(\frac{5}{\sigma_y}\right)\left(CVN - \left(\frac{20}{\sigma_y}\right)\right) \quad (2.6)$$

Donde:

CVN: valor de ensayo de impacto a charpy en (pie Lb)

## 2.3 MICROESTRUCTURA DEL ACERO.

- **Ferrita.**

La ferrita alfa, o simplemente ferrita, es una solución sólida de hierro cúbico centrado en cuerpo; tiene una máxima solubilidad de 0,022% de C a una temperatura de 727 °C (1341 °F). La ferrita delta es estable a temperaturas muy altas y no tiene importancia práctica en la ingeniería.

La ferrita es relativamente Suave y dúctil, es magnética desde la temperatura ambiente hasta 768 °C (1414 °F). Aunque se puede disolver muy poco el carbono intersticialmente en hierro BCC, la cantidad de carbono puede afectar de modo significativo las propiedades mecánicas de la ferrita. Además, es posible que la solución sólida de hierro contenga cantidades importantes de cromo, manganeso, níquel, molibdeno, tungsteno y silicio, dando lugar así a la modificación de las propiedades mecánicas. (Kalpakjian,2008)

- **Perlita.**

Se conoce como la mezcla eutectoide compuesta por placas alternas de cementita y ferrita, situada a una temperatura de 727 °C y a 0.8 %C.

- **Troostita.**

Es el primero de 2 constituyentes de los aceros, entre la martensita (aceros al temple completo) y la sorbita; también puede ser llamado perlita gruesa.

- **Sorbita.**

Es el microconstituyente de los aceros templados y completamente revenidos, su estructura es finísima. También conocida como perlita fina.

- **Austenita.**

Es el constituyente más denso de los aceros; esta formado por una solución sólida en Hierro gamma ( $Fe_{\gamma}$ ). Es estable a partir de 723 °C, cuya máxima solubilidad de C es de 2.11 % C a una temperatura de 1148 °C. Su estructura cristalina es de FCC, de apariencia blanca y dependiendo de la velocidad de enfriamiento que se practique en ella se puede componer en 4 productos: martensita, sorbita, trostita y perlita. Su dureza es de unos 200 HB, su alargamiento de 15%, y su resistencia a la tracción de 28 Kp/mm<sup>2</sup>. Los materiales austeníticos son estables a temperatura ambiente (estructura austenítica); son aceros aleados al Cr-Ni. No son magnéticos.

- **Martensita.**

Es el constituyente más duro después de la cementita. Es una solución sólida sobresaturada de C en  $Fe_{\alpha}$ . Se obtiene enfriando rápidamente en la zona

austenítica. Característica de los aceros templados puede formarse también por el revenido de la austenita a baja temperatura. Cristaliza en red tetragonal. Se ve en forma de agujeros negros. Su dureza varía entre 50 y 68 HRC; su alargamiento es menor del 2 % y resistencia a la tracción de 200 Kp/mm<sup>2</sup>. Es magnética.

- **Austenita retenida.**

Si las temperaturas a la que se enfría la aleación no es suficientemente baja, sólo una porción de la estructura se transforma en martensita. El resto es austenita retenida, que es visible como áreas blancas en la estructura junto con la martensita oscura, semejante a agujas. La austenita retenida puede causar inestabilidad dimensional y agrietamiento, además de reducir la dureza y la resistencia de la aleación. (Kalpakjian,2008)

- **Martensita retenida.**

La martensita se reviene para mejorar sus propiedades mecánicas. El revenido es un proceso de calentamiento mediante el cual se reduce la dureza y se mejora la tenacidad. La martensita tetragonal centrada en cuerpo se calienta hasta una temperatura intermedia, entre 150 °C y 650 °C, donde se descompone en una microestructura de dos fases que consta de ferrita alfa cúbica centrada en el cuerpo y pequeñas partículas de cementita.

- **Esferoidita**

Cuando se calienta la perlita debajo de la temperatura eutectoide y después se mantiene a esa temperatura por cierto periodo de tiempo (recocido subcrítico), como por ejemplo un día a 700 °C, la cementita laminar se transforma en formas casi esféricas. A diferencia de las formas laminares de la cementita (que actúan como concentradores de esfuerzos), las esferoiditos (partículas esféricas) son menos propensas a la concentración de esfuerzos debido a sus formas redondeadas. En consecuencia, esta estructura tiene mayor tenacidad y menor dureza que la estructura perlítica.

- **Bainita.**

Estructura descubierta por E. C. Bain. La bainita, al igual que la martensita, son fases que se forman en los aceros como consecuencia de un enfriamiento

brusco, fuera de condiciones de equilibrio. Puede definirse como el producto de la descomposición de la austenita, compuesto por un agregado de ferrita y carburo de hierro; A temperaturas mayores del intervalo de transformación, parece perlita y se conoce como bainita superior; a bajas temperaturas parece como una estructura negra tipo aguja que parece martensita y se conoce como bainita inferior o acicular.

La dureza de la bainita varía desde 40 Rockwell C aproximadamente para la bainita superior, hasta Rockwell C 60 aproximadamente para la bainita inferior. Este incremento de dureza, como con la perlita es reflejo del decremento en tamaño y espaciamiento de los granos de carburo conforme a la temperatura de transformación disminuye.

## **2.4 TRATAMIENTOS TÉRMICOS.**

El tratamiento térmico en el material es uno de los pasos fundamentales para que pueda alcanzar las propiedades mecánicas para las cuales está creado. La clave de los tratamientos térmicos consiste en las reacciones que se producen en el material, tanto en los aceros como en las aleaciones no férricas, y ocurren durante el proceso de calentamiento y enfriamiento de las piezas, con unas pautas o tiempos establecidos.

### **2.4.1 Temple**

El temple tiene por objeto endurecer y aumentar la resistencia de los aceros. Para ello, se calienta el acero a una temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior  $A_c$  (entre 900-950 °C) y se enfría rápidamente (según características de la pieza) en un medio como agua, aceite, salmuera, etc.

Los tratamientos térmicos convencionales para producir aceros martensíticos suelen consistir en enfriamientos rápidos y continuos, de una muestra austenizada, en un medio de temple. Las propiedades óptimas de un acero templado y revenido se consiguen sólo si durante el tratamiento térmico del temple la muestra adquiere un alto contenido de martensita; si se forma perlita y/o bainita resulta otra combinación de características mecánicas. Durante el tratamiento térmico del temple es posible enfriar la muestra a velocidad uniforme, aunque la superficie siempre se enfría más deprisa que el interior. Por lo tanto, la austenita se

transforma en un tramo de temperaturas, obteniendo una posible variación de microestructuras y propiedades, según la posición dentro de la muestra.

El tratamiento térmico adecuado del acero para producir una microestructura martensítica a lo largo y ancho e la sección de la muestra depende fundamentalmente de 3 factores: (1) composición química de la aleación, (2) tipo y carácter del medio de temple y (3) tamaño y forma en la muestra.

Cabe considerar por otra parte, que la capacidad de un acero aleado para transformarse en martensita durante un determinado tiempo tiene una relación específica entre las propiedades mecánicas y la velocidad de enfriamiento, “Templabilidad” es un término usado para describir la aptitud de una aleación para endurecer por formación de martensita como consecuencia de un tratamiento térmico. Templabilidad no es dureza, que significa resistencia a la penetración, aunque se utilizan medidas de dureza para determinar la extensión de la transformación martensítica en el interior de una probeta. En un acero aleado de alta templabilidad es aquel que endurece, o forma martensita, no solo en la superficie sino también en su interior; es decir, la templabilidad es una medida de la profundidad a la cual una aleación específica puede endurecerse. (Ortiz,2008)

#### 2.4.2 Revenido

Es un tratamiento complementario y posterior al temple. Antiguamente se denominaba bonificación al conjunto de los dos tratamientos. El revenido consigue disminuir la dureza y resistencia de los aceros templados, se eliminan los esfuerzos creados en el temple y se mejora la tenacidad, dejando al acero con la dureza o resistencia deseada. Se distingue básicamente del temple en cuanto a temperatura máxima y velocidad de enfriamiento.

➤ **Modificación de la constitución de los aceros templados por revenido.**

**Primera Etapa:** de 100 °C, a 200 °C; disminuye el %C de la Martensita.

**Segunda Etapa:** de 250 °C, a 400 °C; Austenita retenida se convierte en Bainita.

**Tercera Etapa:** de 250 °C, a 600 °C; disminuye el %C de la Martensita.

**Cuarta Etapa:**  $> 600\text{ }^{\circ}\text{C}$  en aceros de alta aleación; precipitan carburos complejos.

En los aceros aleados aumenta la dureza debido a la formación de carburos. El revenido se realiza a temperaturas inferiores a  $A_1$ , desde  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  y el enfriamiento debe ser lento (al aire, en el horno). (Arnal, 2010)

Específicamente, en el acero AISI T42, como se observa en la figura N° 2.1. La temperatura para tener mayores valores de dureza se encuentra entre  $520$  y  $540\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

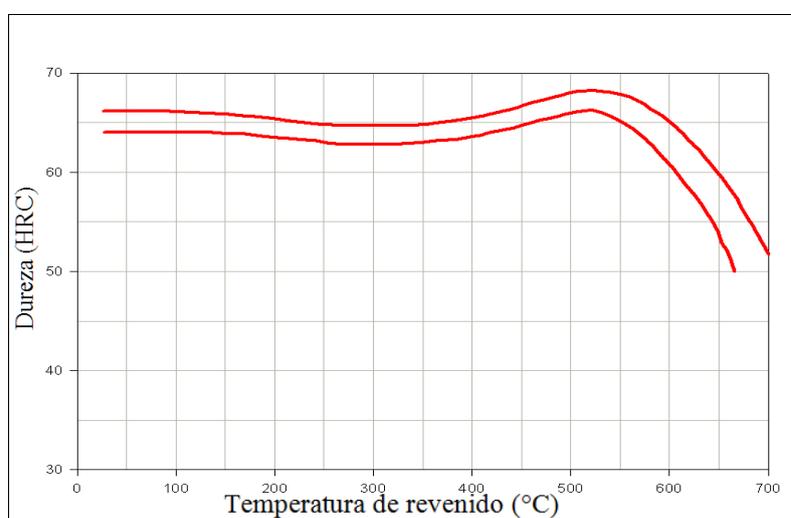


Figura N° 2.1 Diagrama de revenido del acero AISI T42.(Metalravne)

### 2.4.3 Tratamiento térmico criogénico

Las herramientas de corte de acero de alta velocidad se someten a tratamientos criogénicos para incrementar su vida útil de servicio. Este proceso es adecuado cuando el templado se lleva a cabo en tres operaciones. Esta técnica se emplea en sustitución de dos operaciones de templado, pues ahorra tiempo y reduce el costo del tratamiento térmico. (Bawa,2007)

**Los tratamientos criogénicos** se realizan a temperaturas bajo cero, estos tratamientos continúan el proceso de templado. Su objetivo es transformar la mayor parte de austenita retenida en martensita. No son sustitutos de otros tratamientos térmicos, sino una extensión del ciclo térmico que involucra todo el material y no sólo su superficie. Se debe tener en cuenta que algunos aceros, al ser sometidos a tan bajas temperaturas, sufrirán cierto riesgo de agrietamiento. Con estos tratamientos se pueden conseguir la mayor resistencia al desgaste, si se trata

de una herramienta, así como su estabilidad dimensional. Los beneficios de este tipo de tratamientos son el incremento de la resistencia al desgaste, la vida útil de la herramienta y en algunos grados la dureza. Un efecto significativo a tener en cuenta es el cambio dimensional que sufren las piezas, así como el aumento de dureza debido a la transformación de la austenita retenida en martensita. Existen varios sistemas y criterios para realizar estos tipos de tratamientos. Se distinguen dos categorías dependiendo de la temperatura bajo cero alcanzada en el proceso.

➤ **Subcero:**

El tratamiento subcero o SCT (Tratamiento Criogénico Superficial) consiste en llevar las piezas hasta una temperatura de  $-80^{\circ}\text{C}$ , con utilización de hielo seco más alcohol.

➤ **Criogénico:**

El tratamiento criogénico o DCT (Tratamiento Criogénico Profundo) consiste en llevar las piezas hasta una temperatura de  $-196^{\circ}\text{C}$ , con utilización de nitrógeno líquido. Los tratamientos criogénicos se aplican en una gran cantidad de ámbitos como los mencionados a continuación:

➤ **Aplicaciones industriales:**

Aplicados a los aceros de herramienta para aumentar la resistencia al desgaste. Ejemplos: matrices, punzones, sierras, cuchillas o moldes.

➤ **Instrumentos musicales:**

En instrumentos de bronce o latón para mayor tonalidad y calidad de sonido. Ejemplos: trompetas, saxos, cuerdas de guitarra y piano.

➤ **Aplicaciones en armas:**

Eliminación de la austenita retenida para así evitarlos cambios dimensionales que se dan cuando se transforma durante la vida útil del arma. Ejemplos: cañones, rifles o revólveres.

➤ **Deportes:**

En el golf y el patinaje. Ejemplos: palos, cabezas y pelotas y también en cuchillas de los patines de hielo.

➤ **Industria metalmecánica:**

Aplicados a los aceros que después del temple conservan todavía cierta cantidad de austenita retenida sin transformar. Ejemplos: herramientas de corte. La transformación de austenita retenida y la formación de carburos causan el aumento en la resistencia al desgaste. (Gissela, 2009)

#### 2.4.3.1 Parámetros del tratamiento criogénico.

La figura N° 2.2 muestra un ejemplo de un perfil de temperatura común DCT. Los parámetros del proceso típico son: la temperatura mínima ( $T_{\min}$ ), tiempo de mantenimiento, la velocidad de enfriamiento y calentamiento. En la literatura, diferentes valores de estos parámetros utilizados por los autores durante la SCT y DCT en diferentes materiales pueden ser encontrados, pero de todos modos, es posible inferir algunas indicaciones generales:

- En algunos casos, la  $T_{\min}$  real podría ser mayor que el un nominal debido a límites de aislamiento térmico, especialmente después de una explotación significativa del sistema y el consiguiente envejecimiento de los sellos de cámara.
- Cada nuevo material necesita ser tratado y probado a diferentes niveles de temperatura, a fin de identificar óptima condiciones. En la mayoría de los casos, dos o tres niveles de temperaturas (es decir, 88 K, 143 K y K 193) son suficientes para obtener una indicación rápida en la selección de una determinada temperatura por medio de la investigación cambios microestructurales (es decir, la calorimetría o emisión acústica);

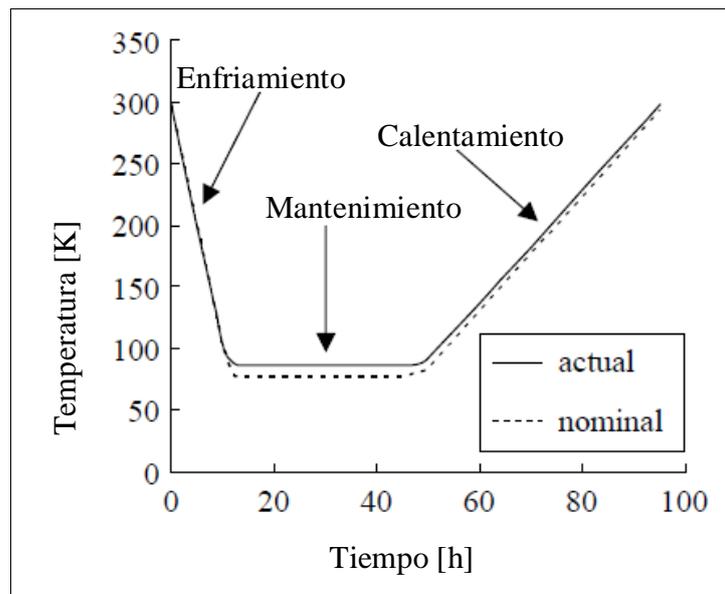


Figura N°2.2. Ejemplo de un perfil de temperatura para tratamiento criogénico (Baldissera, 2008)

- Un tiempo de mantenimiento de más de 36 horas no aporta importantes mejoras y en la mayoría de los casos 24 horas son suficientes para obtener resultados;
- El intervalo de valores de la velocidad de enfriamiento está restringido a fin de evitar agrietamiento por choque térmico. Comúnmente, el aplicado valores varían desde 0,3 K / min a 1,2 K / min.
- En muchos sistemas criogénicos la velocidad de calentamiento es poco importante y no muy controlable, pero este parámetro es dado en la literatura a pesar de que algunos sugirieron hipótesis acerca de la formación de carburos durante la fase de calentamiento.

## 2.5 PRUEBAS PARA ENSAYOS MECÁNICOS.

Los ensayos mecánicos básicamente se ejecutan a los materiales por las siguientes cuatro razones: para determinar si se cumple o no con especificaciones escritas; para mejorar el diseño de una aleación; para controlar la calidad de manufactura de una aleación, tomando en cuenta que algunos ensayos mecánicos son sensibles a ciertos tipos de imperfecciones; y para proveer un lenguaje mediante el cual los ingenieros se puedan comunicar.

### 2.5.1 Ensayo de dureza

La dureza de los materiales no es una propiedad fundamental de la materia, más bien el índice de dureza obtenido por ensayos para aplicaciones industriales son ensayos arbitrarios que se efectúan bajo condiciones normalizadas. Existe una amplia gamma de ensayos de dureza que van desde ensayos de ralladuras a elaborados y reproducibles métodos de laboratorio; sin embargo, sólo seis métodos son los usados de manera general. El índice de dureza obtenido en materiales metálicos y cerámicos es una manifestación de varias propiedades relacionadas entre sí con propiedades elásticas y plásticas como lo son combinaciones entre el punto de fluencia, la resistencia a la tracción, la ductilidad, características del endurecimiento por trabajado, y resistencia a la abrasión, entre otros.

Los ensayos de dureza para materiales metálicos y cerámicos se entiende que miden la resistencia que opone dicho material a la acción penetrante de un indentador. Ese indentador usualmente tiene una forma esférica, piramidal, o cónica construido con un material mucho más duro que el material que está siendo ensayado, como acero endurecido, carburo de tungsteno sinterizado, o diamante. Para la mayoría de los ensayos de dureza, se aplica una carga  $P$  de manera lenta para que comprima la superficie lisa en ángulos rectos; una vez que se quita la fuerza, se mide la profundidad de la penetración o el diámetro de la huella y calcula el área para dar una indicación de la resistencia a la carga. Los números de dureza resultantes son empíricos y pueden ser calculados a partir de fórmulas apropiadas si se conoce la carga aplicada y el área de la sección transversal o la profundidad  $h$  de la impresión, figura 2.3

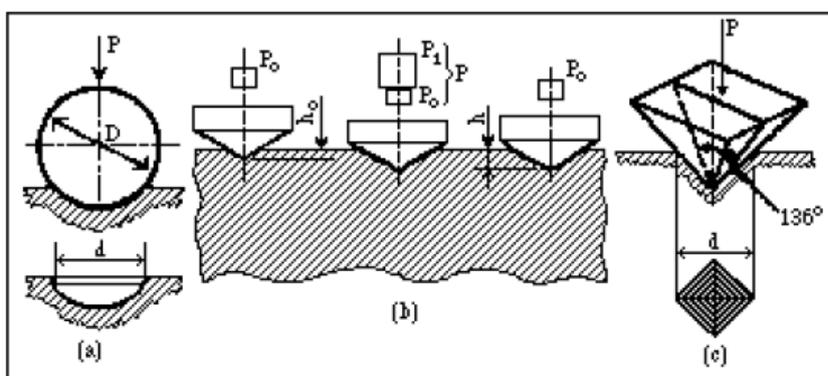


Figura 2.3. Esquema de 3 métodos de ensayo de dureza

Fuente: Donald R. Askeland, (1999). Ciencia e ingeniería de los materiales

En la figura 2.3, se esquematiza tres de los métodos de ensayo de dureza por indentación comúnmente usados para el ensayo de materiales metálicos y cerámicos, que son: (a) Ensayos de Dureza Brinell; (b) Ensayos de Dureza Rockwell donde el penetrador es de geometría esférica, y (c) Dureza Vickers que usa un penetrador de diamante. Generalmente, los números o índices de dureza obtenidos cuando se usan los métodos microscópicos y macroscópicos no producen resultados comparables.

### 2.5.1.1 Dureza Rockwell

Este método consiste en medir el incremento en la profundidad de un penetrador cónico de diamante que ha sido forzado a penetrar plásticamente el material bajo la acción de una carga primaria y de una carga secundaria o mayor, como lo esquematiza la figura 2.3(b). El método de “profundidad diferencial” es significativo debido a errores ocasionados por defectos mecánicos del sistema e imperfecciones superficiales que afectan el contacto entre el indentador y la superficie bajo ensayo. El equipo usado es de precisión que, en el instrumento de lectura directa, automáticamente mide la profundidad diferencial  $h_0$  producida por la carga inicial  $P_0$  de 10 kgs y la carga mayor  $P_1$  puede ser de 50, 90, o 140 kgs que dependen del tipo de penetrador a ser utilizado, se mantiene durante un mínimo de tiempo de 10 segundos y al retirar la carga principal se produce una recuperación de la profundidad de la huella para que finalmente la deformación plástica tenga una profundidad diferencial  $h$ , cuya indicación se aprecia en el instrumento de lectura del aparato.

Existen dos escalas de medida muy comúnmente utilizadas en la industria, Rockwell B y Rockwell C. La escala Rockwell B, indicada como HRB, utiliza un penetrador esférico de  $(1/16)$  de pulgada de diámetro y 100 kgs de carga total,  $P$ , donde la manija de operación debe ser aplicada y regresada suavemente, porque al golpear la manija al quitar la carga conduce a error de varios puntos en el disco indicador. Su intervalo se encuentra entre los valores 0 y 100; para ensayar materiales con mayores durezas a 100 tienden a distorsionar el indentador durante ese ensayo y por lo tanto causa apreciable error en la medida de la dureza. Cuando se expresa la dureza como 82 HRB, indica que la dureza en escala B ha sido medida con penetrador esférico de  $(1/16)$  de pulgada de diámetro y 100 kgs de carga). La escala Rockwell C, indicada como RC, requiere del uso de un indentador

Brale que es esfero cónico de diamante fabricado con tolerancias dimensionales muy precisas; por lo tanto se requiere que el ensayo sea ejecutado con sumo cuidado para evitar dañar su punta esférica de radio 0,200 mm y disminuir errores en las medidas de dureza que no siempre se detectan. En los ensayos de dureza aplicados al material durante la elaboración del proyecto, se prepararon las probetas según las especificaciones de las normas venezolanas COVENIN. Las muestras para medir dureza fueron preparadas según los estándares de la norma para ensayos de dureza Rockwell (escalas A, B, C) y Rockwell superficial (escalas N, T) para materiales metálicos. (QUINTERO,2002)

### **2.5.2 Ensayo de tracción**

Es uno de los ensayos más empleados. Consiste en someter una probeta normalizada a esfuerzos progresivos y crecientes de tracción en la dirección de su eje hasta que llegue a la deformación y a la rotura correspondiente.

Los materiales frágiles a menudo son débiles en tracción, debido a que los esfuerzos tienden a propagarse están orientados perpendicularmente al eje de tensión; en consecuencia, los esfuerzos de tracción de los materiales frágiles son bajos y normalmente varían de muestra a muestra. Esto conduce a la necesidad de que se ejecuten ensayos de compresión a los materiales frágiles; dichos ensayos, en principio son similares a los de tracción. Dado que en los ensayos de compresión hay un abarrilamiento o incremento en la sección transversal de la probeta, nunca ocurre la formación del cuello. Ese abarrilamiento se debe a las fuerzas de fricción creadas en las intercaras entre los soportes de la pieza de ensayo y sus superficies de contacto; por estas razones, los materiales dúctiles nunca se ensayan en compresión.

En materiales cerámicos cristalinos, sus fallas en plasticidad se deben a los enlaces químicos iónicos y covalentes. Los cristales cerámicos covalentemente enlazados se caracterizan porque los enlaces interatómicos son específicos y direccionales, lo cual envuelve el intercambio de cargas electrónicas entre pares de electrones; por lo tanto, cuando un cristal covalente está sometido a esfuerzos suficientemente grandes, presentan fractura frágil debido a separación de los pares de enlaces entre electrones sin que exista una posterior formación; por ello, los

materiales cerámicos covalentemente enlazados son frágiles tanto en monocristales como en policristales. Los materiales cerámicos iónicamente enlazados, en su deformación primeramente es diferente a lo descrito, debido a su fragilidad y a la formación de grietas en los bordes de grano cuando son sometidos a ensayos de compresión. Durante la deformación, el deslizamiento de los planos de deslizamiento iónico involucra diferentes cargas en contacto, lo que permite el desarrollo de fuerzas atractivas y de fuerzas repulsivas; por lo tanto, diferentes planos mostrarán diferentes comportamientos y en consecuencia para muchos de ellos, los comportamientos de los monocristales son diferentes a los de los policristales de un mismo material, debido a que en los cerámicos policristalinos los granos adyacentes pueden cambiar de forma durante la deformación a consecuencia del limitado número de sistemas de deslizamiento. Esto, conduce a que se creen grietas en los bordes de grano que produzca una posterior fractura frágil. (QUINTERO, 2002)

### **2.5.3 Resistencia al choque.**

Las fuerzas de impacto o de choque difieren de las estáticas y de las cíclicas en dos aspectos:

- a) La carga se aplica rápidamente, es decir, a una apreciable velocidad,
- b) Raras veces las cargas se repiten, debido a la fractura se crea una vez que se produce la primera aplicación.

Un ensayo de impacto normalmente determina la energía absorbida en fracturar una pieza bajo la aplicación de cargas a altas velocidades; la propiedad medida se llama Resistencia al Impacto y está dada en unidades de kg-m o de lb-ft. La medida del trabajo para fractura, está relacionada al área de la sección transversal de la muestra, que es del orden de  $0,8 \text{ cm}^2$  en todas las probetas patrón. En este tipo de ensayo, la probeta normalizada se coloca entre dos soportes y se rompe bajo la acción del golpe producido por la caída de un péndulo con martillo de masa constante desde una altura también constante, figura 2.4.

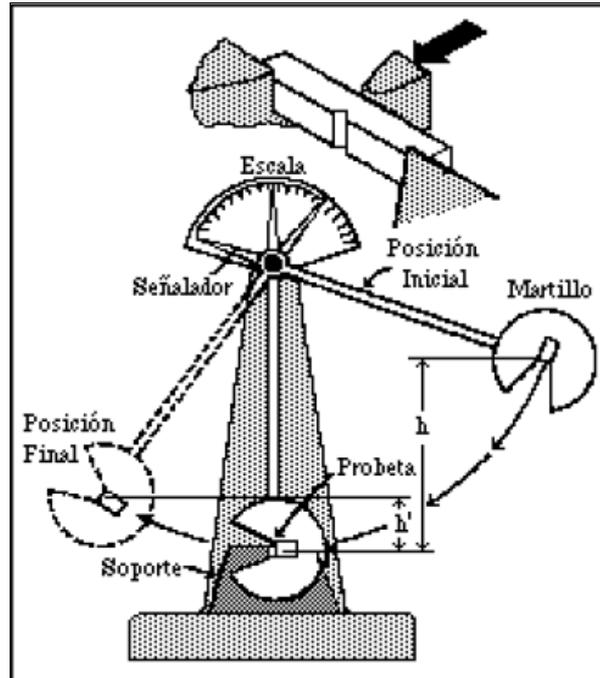


Figura 2.4. Esquema de ensayo al impacto. (Callister, 1998)

La energía absorbida, se calcula a partir del peso del péndulo y de la diferencia entre la altura del péndulo libre,  $h$ , y la que alcanza después de golpear la muestra,  $h'$ . Las probetas normalizadas se muestran en la figura 2.5, que tienen exactamente la misma sección transversal (10 mm x 10 mm) y una ranura o entalladura de 2 mm de profundidad mecanizada muy cuidadosamente con una fresa especial, para conducir a un área cuya sección transversal es de 8 mm x 10 mm; pero de diferente radio de la ranura, en el caso (a) es de 1 mm, y en el caso (b) es de 0,25 mm.

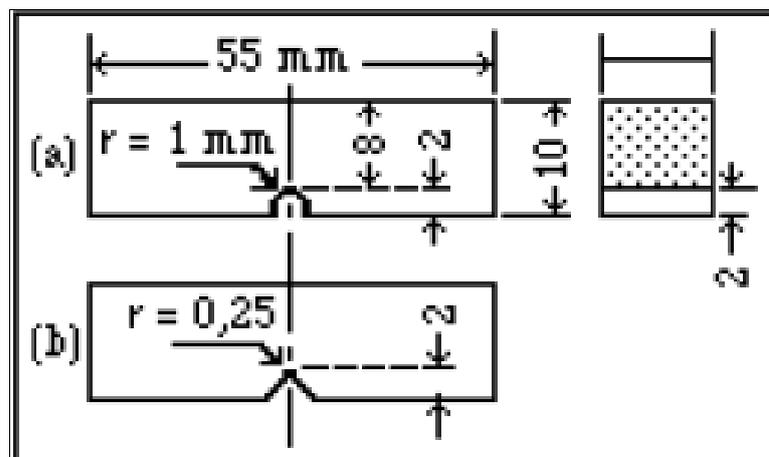


Figura 2.5. Probeta estándar para ensayo al impacto (Askeland, 1999)

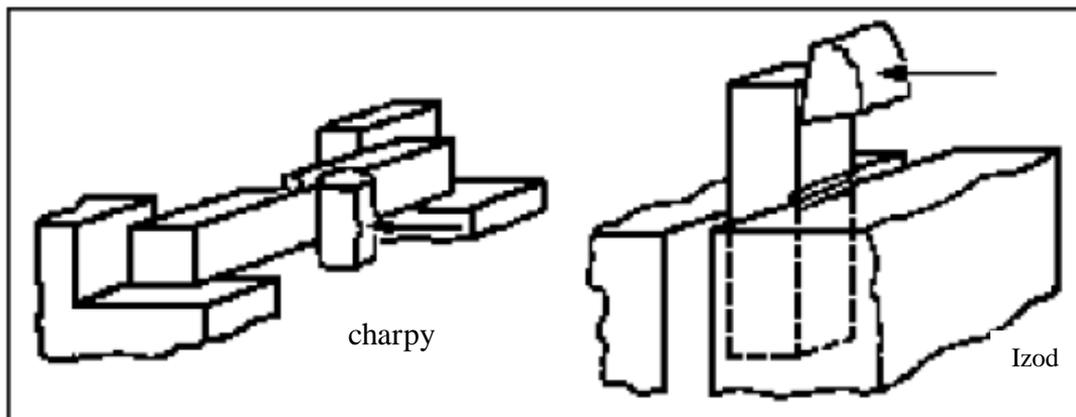


Figura 2.6. Método Charpy e Izod. (Askeland, 1999)

Normalmente los ensayos de impacto, ya sea Charpy o Izod se usan para la determinación de temperatura de transición dúctil-frágil, es decir, para determinar el cambio de mecanismo de fractura dúctil a fractura frágil en función del descenso de la temperatura. Como se puede apreciar en la figura 2.6, la principal diferencia entre los ensayos Charpy e Izod radica en la forma en que la muestra se sujeta entre los soportes para aceptar el impacto del martillo. Dado que a la muestra Izod se le aplica la fuerza como una viga voladiza, su longitud es algo mayor que la Charpy y la entalladura es excéntrica para facilitar la sujeción en el tornillo del banco de la máquina de ensayo.

Ambas muestras se colocan de manera que produzcan esfuerzos de tracción en la raíz de la ranura. La probeta Izod se sujeta al banco de soporte mediante un tornillo; mientras que la Charpy simplemente se coloca sobre sus soportes. Para que un ensayo de impacto sea válido, la ranura debe ser cuidadosamente preparada (mecanizada); ya que desviaciones del procedimiento especificado, pueden producir una amplia dispersión de datos nada confiables, en especial cuando se ensayan muestras de materiales supuestamente idénticos, lo cual no es común. Por estas razones, para determinar un punto experimental, es necesario ensayar, al menos, tres muestras. Otros factores críticos son: colocación correcta de la probeta y la temperatura. Los resultados de las pruebas de impacto con una entalladura se ven afectados por (a) el tamaño y la forma de la probeta, (b) la forma y lo pronunciado de la entalladura, y (c) la temperatura de ensayo. Mientras menos profunda y menos aguda sea la entalladura, mayor será la diferencia en resultados obtenidos con materiales tenaces y los de poca tenacidad; no obstante, si la entalladura tiene poca

profundidad, la probeta no se romperá y por eso siempre se prefiere la profundidad de 2 mm de la ranura con 0,25 mm de radio debido a las dificultades para su mecanización.

Además de proporcionar datos sobre la tenacidad, sobre la sensibilidad a la entalladura, y sobre los efectos de la temperatura, estos ensayos de impacto son también útiles para determinar si la secuencia dada de un determinado proceso puede desarrollar un máximo de tenacidad en un material específico. Esto es particularmente útil para aleaciones ferrosas en las que se puede usar una variedad de ciclos de tratamientos térmicos para alcanzar un determinado valor de dureza o resistencia elástica. Las muestras provenientes de los ensayos de impacto siempre deben ser examinadas en su superficie de fractura con sumo cuidado. Si esa superficie es suave y lisa, indicará, para los aceros, un tamaño de grano fino y ductilidad; mientras que un aspecto de grano grueso será indicación de fragilidad, falta de tenacidad. (QUINTERO,2002)

## **2.6 METALOGRAFÍA**

La metalografía consiste en el estudio de la constitución y la estructura de los metales y las aleaciones. La forma más sencilla de hacerlo es examinando las superficies metálicas a simple vista, pudiendo determinar de esta forma las características. Este examen se denomina macrográfico y de ellos se extraen datos sobre los tratamientos mecánicos sufridos por el material, es decir poder determinar si el material fue trefilado, laminado, forjado, etc., comprobar la distribución de defectos como grietas superficiales, de forja, rechupes, partes soldadas, etc.

El examen micrográfico, es una técnica más avanzada y se basa en la amplificación de la superficie mediante instrumentos ópticos (microscopio) para observar las características estructurales microscópicas (microestructura). Este tipo de examen permite realizar el estudio o controlar el proceso térmico al que ha sido sometido un metal, debido a que los mismos ponen en evidencia la estructura o los cambios estructurales que sufren en dicho proceso.

El examen de la microestructura es muy útil para determinar si un metal o aleación satisface las especificaciones en relación a trabajos mecánicos anteriores, tratamientos térmicos y composición general.

La microscopía es una técnica para analizar las fallas metálicas y para controlar procesos industriales. Para un estudio de la estructura microscópica se necesita una preparación aún más cuidadosa de la superficie.

### 2.6.1 Microscopía

La microscopía es la técnica de producir imágenes visibles de estructuras o detalles demasiado pequeños para ser percibidos a simple vista.

Exceptuando técnicas como el microscopio de fuerza atómica, el microscopio de iones en campo y el microscopio de efecto túnel, la microscopía generalmente implica la difracción, reflexión o refracción de radiación incidente en el sujeto de estudio. (Smith 1998).

### 2.6.2 Fases presentes en el acero.

Cuantificar las fases y microconstituyentes presentes en los materiales metálicos se pueden obtener a través del método para determinar la fracción de volumen por conteo manual sistemático de punto descrito en la norma ASTM E 562.

Este método de prueba describe un procedimiento sistemático de conteo manual de punto para estimar estadísticamente la fracción de volumen de un constituyente o fase identificada de las secciones a través de la microestructura por medio de una rejilla de puntos. El porcentaje de la fase se obtiene con la siguiente expresión:

$$P_p(i) = \frac{P_i}{P_t} \times 100 \quad (2.7)$$

Donde:

$P_p(i)$  = porcentaje de puntos en la rejilla de la fase observada.

$P_t$  = Número total de puntos que posee la rejilla

$P_i$  = punto que esta sobre la fase  $i$ . (ASTM E-562, 2003)

### 2.6.3 Microscopía electrónica de barrido (MEB)

Según Smith (1998), el microscopio electrónico de barrido (MEB) es un instrumento que genera un haz de electrones que es focalizado sobre un punto exacto en la superficie de una muestra patrón. Básicamente, un cañón de electrones produce un

haz de electrones en una columna de vacío que es focalizado y dirigido sobre la muestra. Los electrones con pequeño ángulo de dispersión interactúan con los resaltes de la superficie y generan una dispersión de electrones secundarios que producen una señal electrónica que a su vez da una imagen con una profundidad de campo superior en unas 300 veces a las de un microscopio tradicional (orden de 5 a 300000 X de aumento).

El MEB es particularmente útil en el análisis de materiales para examinar superficies fracturadas de metales. Las fractografías se utilizan para determinar cuando una superficie fracturada es intergranular, transgranular o mezcla de ambas.

## **2.7 ENSAYO EDX (Energía Dispersiva de Rayos X)**

El espectrómetro de fluorescencia de rayos X es un instrumento que determina cuantitativamente los elementos presentes en una determinada muestra. Esto es posible a través de la emisión secundaria o fluorescente de radiación X que se genera al excitar una muestra con una fuente emisora de rayos X. La técnica de fluorescencia de rayos X no es destructiva para todos los tipos de muestra, incluyendo sólidos, líquidos, polvos, discos y otros. De esta forma, la técnica de fluorescencia de rayos X es utilizada en la investigación y control de calidad en una amplia área de actuación, la cual incluye universidades, instituciones de investigación, industrias petroquímicas, industrial farmacéuticas, metalúrgicas y otras.

# CAPÍTULO 3

## MARCO METODOLÓGICO

---

---

El marco metodológico, de la presente investigación que tiene por objeto “Evaluar la influencia de un tratamiento a temperatura criogénica en las propiedades mecánicas en muestras de acero para herramientas T.2000”; es la instancia que alude al momento tecno-operacional presente en todo proceso de investigación; donde es necesario situar al detalle, el conjunto de métodos, técnicas y protocolos instrumentales que se emplearan en el proceso de recolección de los datos requeridos en la investigación propuesta.

### 3.1 NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN

Según la finalidad de este trabajo, se considera de tipo explicativa y experimental. Debido a que se posee poca información acerca del tema, los resultados a obtener brindarán una visión mas amplia del comportamiento del material estudiado y a su vez se puede considerar de tipo descriptivo, debido a que el material a estudiar será sometido a diferentes tipos de tratamientos térmicos, donde se evaluarán los cambios que haya sufrido este, para ello se aplicará el ensayo de dureza, impacto, tracción y estudio microestructural.

### 3.2 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.

Con el fin de cumplir los objetivos planteados, se utilizó una estrategia de investigación documental, basada en la información: de la Web, consultas bibliográficas, revisión de trabajos de investigación anteriores en los cuales se realizaron tratamientos térmicos y estudios metalográficos como los referidos en los antecedentes del presente trabajo investigativo. Otra herramienta aplicada fue la de tipo experimental debido a que se requirió la realización de ensayos en el laboratorio, de donde se obtuvieron los datos del ensayo de dureza, impacto tracción y observación de la micro estructura; con las probetas adecuadas para la realización del estudio.

### 3.3 POBLACIÓN Y MUESTRA

Para Tamayo (2003), la población “es la totalidad del fenómeno a estudiar en donde las unidades de población poseen una característica común, la cual se estudia y da origen a los datos de la investigación”(p.114); asimismo, Selltiz, citado por Tamayo(2003), menciona que “una población es un conjunto de todas las cosas que concuerdan con una serie determinada de especificaciones”(p.114).

Bisquerra (2000), afirma que muestra “es un subconjunto de la población, seleccionado por algún método de muestreo, sobre el cual se realizarán las observaciones y se tomaran los datos”(p.81).

Los criterios que se utilizaron para la selección de muestras, pretenden garantizar que el conjunto seleccionado presente con la máxima fidelidad a la totalidad de la que se ha extraído, así mismo cómo hacer posible la medición de su grado de probabilidad.

Por lo anteriormente dicho, la población de esta investigación esta representada por el acero T.2000. las muestras estuvieron conformadas por 24 probetas en total, para lo cual se planteó como criterio de selección el muestreo intencional, el cual definido por Arias,(1999), se fundamenta en la “selección de los elementos con base en criterios o juicios del investigador”(p.51), a partir de la experiencia en el área de estudio considerado que el investigador tiene conocimiento previo de la población para determinar cuales son las categorías que se pueden analizar como tipo representativo del fenómeno.

En la tabla N° 3.1 se muestra la cantidad de probetas a utilizar según el ensayo y la variación de las condiciones a evaluar en correspondencia con la Norma ASTM A-370, ASTM E-23.

Tabla 3.1 Cantidad de probetas utilizadas según tipo.

Ensayos	Condición del material de estudio	
	Sin tratamiento criogénico	Tratamiento criogénico
Tracción	4	4
Impacto	6	6
Dureza (Rockwell)	1	1
Metalografía	1	1
<b>TOTAL</b>	<b>12</b>	<b>12</b>

### **3.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS**

Durante la indagación progresiva del tema fue necesaria la implementación de diferentes técnicas de recolección de datos que contribuyeran al avance de la investigación. Entre las técnicas usadas durante el desarrollo del proyecto, es necesario destacar la recolección de documentos, la observación directa y las entrevistas no estructuradas.

#### **3.4.1 Recopilación de documentos.**

Documentación bibliográfica sobre tratamientos térmicos, con especial atención al material de tratamientos criogénicos, recolectar datos técnicos acerca del acero utilizado en el estudio, las microestructuras encontradas en las muestras y la interpretación de los resultados arrojados por los diferentes ensayos realizados.

#### **3.4.2. La observación directa.**

Luego del estudio de los documentos recolectados, el segundo pasó en la elaboración del proyecto de grado consiste en la observación de campo, realizada a los diferentes instrumentos que serían utilizados en el transcurso de la investigación, estos proporcionaron una serie de datos que fueron utilizados para la elaboración de las primeras conclusiones. Algunos de los instrumentos utilizados en la observación directa fueron basados en la cosecha de las primeras referencias. Los mismos fueron utilizados de la siguiente forma:

- El microscopio metalográfico fue usado para definir las microestructuras presentes en el acero escogido para el estudio.
- El espectrómetro utilizado para verificar la composición química de las muestras sometidas a los ensayos.

#### **3.4.3. Entrevistas no estructuradas.**

Radicó en una serie de conversaciones y entrevistas informales con especialistas acerca del tema estudiado, capaces de establecer opiniones y ayudar en la solución de inconvenientes presentados en algún momento durante la investigación. Así como al análisis e interpretación de los resultados obtenidos.

### 3.5 TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS.

El objetivo principal de este proyecto de grado solo puede conseguirse con una correcta clasificación de los resultados arrojados por los ensayos realizados, para lograr este ordenamiento es necesario utilizar diferentes herramientas que permitan la fácil interpretación y comparación de los diferentes datos, por esta razón serán analizados, de tal forma que puedan ser dilucidados con facilidad.

Por consiguiente, las técnicas de procesamientos serán orientadas hacia la posibilidad de representar los datos de manera clara en tablas y gráficos, así como el analizador de imágenes para descifrar lo que revelan al momento de compararlos entre sí.

### 3.6 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA A SEGUIR.

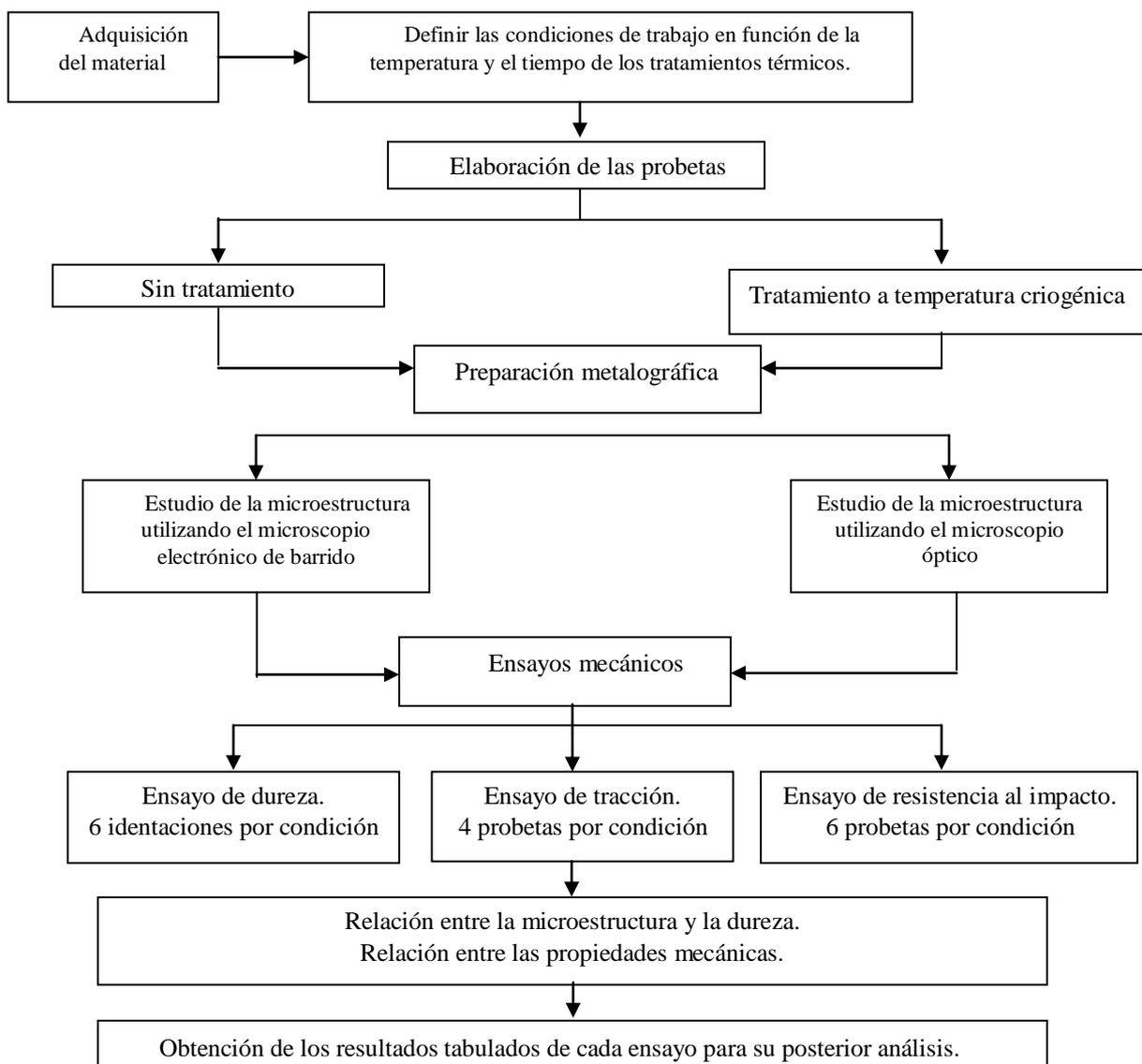


Figura 3.1 Esquema de la metodología a seguir.

### 3.8 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL.

El material en estudio es un acero para herramientas AISI T42, llamado comercialmente T.2000, el cual fue suministrado por la empresa “Di Lorenzo, C.A.”, ubicada en la zona industrial norte de valencia, Edo. Carabobo. Cuya composición química se representa en la tabla 3.2

Tabla 3.2. Tabla de composición química.

C (%)	Si (%)	Mn (%)	Cr (%)	Mo (%)	Ni (%)	V (%)	W (%)	Co (%)
1.28	0.45	0.40	4.15	3.55	-	3.25	9.50	10.0

### 3.9 CONDICIÓN ORIGINAL DEL MATERIAL

Las condiciones originales del acero para herramientas T 2000 son de templadas y revenidas. Las dimensiones son barras de 10x10x200 mm y 10x2x200 mm.

### 3.10 EQUIPOS A UTILIZAR

En el Departamento de Materiales de la universidad de Carabobo se dispone de los siguientes equipos:

- **Microscopio óptico marca Unión MC86267 con cámara Panasonic modelo Wv-CP230**

El microscopio compuesto u óptico utiliza lentes para ampliar las imágenes de los objetos observados, el aumento obtenido con estos microscopios es reducido estableciendo un rango desde 50x hasta 1000x generalmente, debido a la longitud de onda de la luz visible que impone limitaciones.



Figura 3.2 Microscopio óptico

- **Macro Lupa**

Para visualizar de manera macroscópica las fracturas generadas en las probetas de acero para herramientas T.2000 por los ensayos mecánicos, el Laboratorio de Materiales de la Universidad Simón Bolívar dispone de una macro lupa marca OLIMPO modelo Z 25 con una capacidad de 1X hasta 4X de aumento.



Figura 3.3 Macroscopio óptico

- **Durometro Buehler Macromet 5100T**

Los ensayos de dureza en la escala Rockwell C , se realizan con una carga de 150 Kg respectivamente, y un penetrador de punta de diamante según la norma ASTM E 18, realizándose en un durometro Buehler del Laboratorio de Materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo, como se muestra en la figura 3.4.



Figura 3.4 Máquina de ensayo de dureza

- **Máquina de ensayo de tracción.**

Todos los ensayos fueron realizados en Laboratorio de Materiales de la Universidad Simón Bolívar, bajo la norma ASTM E 8M. La máquina de ensayo de tracción es de marca SERVOSIS, modelo ME 405/30 posee una capacidad de 30 toneladas como se muestra en la figura 3.5.



Figura 3.5 Máquina de ensayo de tracción

- **Máquina de ensayo de impacto.**

El ensayo se lleva a cabo en una maquina marca FRANK con un rango de 0 a 15 Kpm, bajo la norma ASTM E-23. Ubicada en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo en el Laboratorio de Ingeniería Civil, como se observa en la figura N° 3.6



Figura 3.6 Máquina de ensayo de dureza

- **Pulidoras**

Consta de dos paños y diferentes granulometría de alúmina: paño verde (con alúmina de 1 micrón) y paño rojo (con alúmina de 0,05 micrones), con el fin de dar el acabado final a las muestras desbastadas.

- **Dispositivo para tratamiento criogénico**

El tratamiento a temperaturas bajo cero cuenta con un tanque de almacenamiento que permite sumergir y mantener las muestras en el intervalo criogénico. Para ello el Laboratorio de Materiales de la Universidad Simón Bolívar colocó a la disposición el tanque de almacenamiento que permite un enfriamiento a nivel de criogenización, como se muestra en la figura 3.7

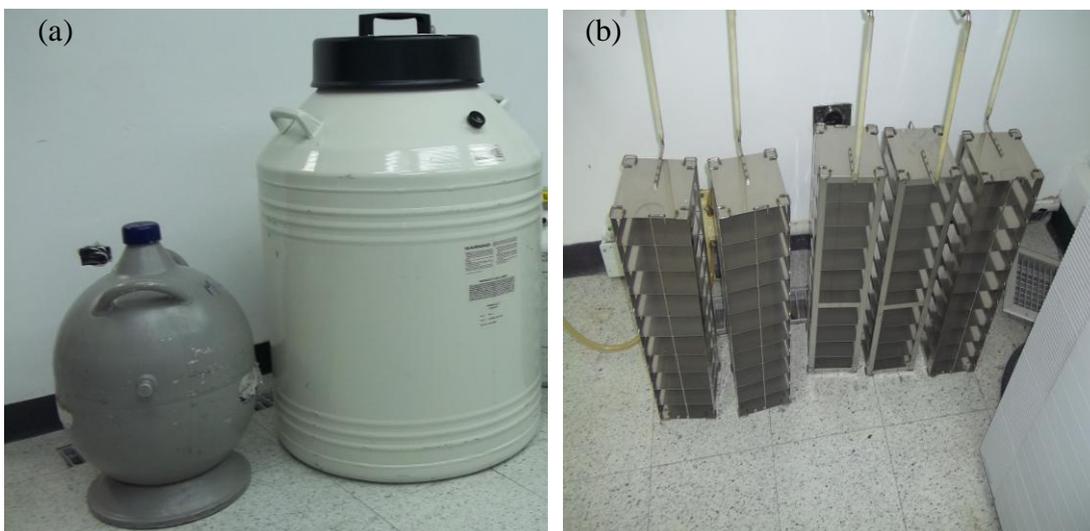


Figura 3.7 Dispositivo para tratamiento criogénico. (a) Tanque de nitrógeno líquido. (b) Soporte de pieza.

- **Microscopio electrónico de barrido.**

Para la el análisis de la Fractografía el laboratorio de materiales de la Universidad Simón Bolívar pondrá a la disposición el Microscopio electrónico de barrido marca JEOL Scanning Electron Microscope JSM-6390, como se muestra en la figura 3.7. La resolución de este instrumento esta en torno a los 3.0 nm (30kV) en un intervalo de aumentos de 15 a 100000X.



Figura 3.8 Microscopio electrónico de barrido

### **3.10 MECANIZADO DE LA PROBETAS.**

El mecanizado de las probetas fue realizado en la empresa: MetCor C.A. ubicada en Valencia, Edo. Carabobo, mediante el corte por chorro de agua según las normas ASTM A 370 para el ensayo de tracción y ASTM E 23 para el ensayo de impacto Charpy, para garantizar en todas las probetas la forma correcta así como la exactitud del entalle. Las probetas fueron fabricadas en un tamaño sub-size según la norma..

### **3.11 TRATAMIENTO TÉRMICO**

#### **3.11.1 Tratamiento a temperatura criogénica**

El tratamiento criogénico consiste en enfriar con nitrógeno los materiales a una temperatura de  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mantener esta temperatura por un intervalo de 24 horas dentro de la cámara criogénica tipo tanque y por último dejar regresar el material a temperatura ambiente por convección natural, procedimiento que se estima en función de investigaciones previas. (Dutta, 2009)

### **3.12 PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS.**

Para la realización de los ensayos se siguieron los siguientes procedimientos.

#### **3.12.1 Ensayo de tracción**

En este ensayo se somete la probeta a tracción, este consiste en producir cargas normales sobre la sección transversal de la misma, a fin de producir un alargamiento y

fractura final en un intervalo de tiempo relativamente corto a una velocidad constante. Una vez alcanzada la ruptura se obtiene la curva de carga en función del alargamiento suministrado por la máquina de ensayo, estos datos son necesarios para construir la grafica esfuerzo vs. deformación de donde obtienen las propiedades mecánicas para cada condición de tratamiento térmico como: esfuerzo de fluencia, esfuerzo máximo, esfuerzo de ruptura, porcentaje de reducción de área y el tipo de ruptura para cada condición de ensayo. Para este estudio se utilizan 6 probetas dimensionadas según la norma ASTM E-28

### **3.12.2 Ensayo de resistencia al impacto.**

Para este ensayo se utilizan probetas tipo Charpy con entalle en “V” según la norma ASTM E-23, teniendo presentes una serie de pasos estandarizados para el correcto manejo del mismo, dentro de los cuales se tiene la calibración de la zona de impacto, de manera que la probeta reciba el golpe justo en la parte opuesta del entalle.

### **3.12.3 Ensayo de dureza.**

Este ensayo se realizó en el durómetro de marca Macromet, serie 5100 T con capacidad HRC. Se le aplica una precarga durante 15 segundos una de 150 Kg, utilizando un indentador punta de diamante.

### **3.12.4 Metalografía**

La metalografía microscópica es un procedimiento que se realiza para observar las características estructurales como el tamaño de grano, el tamaño, forma y distribución de las fases que comprenden la aleación de las inclusiones no metálicas, así como la presencia de segregaciones y otras irregularidades que profundamente pueden modificar las propiedades mecánicas y el comportamiento general de un metal. Este procedimiento se hizo bajo los parámetros de la norma ASTM E 3 y ASTM E 407.

- **Toma de la muestra:** para cada una de las condiciones de trabajo se selecciona una probeta de tracción fracturada, a la cual se le debe cortar dos muestras en la sección calibrada de aproximadamente 1 cm; una contendrá la superficie de fractura para analizar en el microscopio electrónico de barrido (MEB) y la otra se prepara de tal manera que pueda ser observada en el

microscopio óptico. Para realizar estos cortes se utiliza una cortadora metalográfica de probetas.

- **Desbaste:** El proceso de desbaste fue pasar papel de lija de las más gruesa a las fina (180, 240, 340, 400, 600, 1200), de esta manera obtener una superficie completamente plana y lisa. La operación de desbaste debe ser perpendicular ( $90^\circ$ ) a la dirección de las rayas dejadas en el desbaste previo.
- **Pulido:** Esta operación se realizó mediante un disco giratorio cubierto con un paño especial, húmedo, cargado con partículas abrasivas, como alumina al 0,1% y al 0,05% de concentración respectivamente, para eliminar las líneas dejadas por la ultima operación de desbaste con el papel lija, obteniéndose así un acabado de tipo espejo.
- **Ataque:** El ataque a realizar será de tipo químico con una solución de 5 mL de ácido nítrico con 100 mL de etanol, después de atacar químicamente con el químico se debe rociar etanol en la zona e inmediatamente llevar al secador. El objetivo del ataque que se realiza a la superficie pulida es desarrollar la estructura micrográfica y hacerla visible al microscopio metalográfico.

### 3.12.5 Fracción de volumen

La técnica usada para calcular el porcentaje de martensita presente en el acero es el conteo de puntos (descrito en ASTM E562) usado para estimar las fracciones y volúmenes de los constituyentes microestructurales. Para efectuar esta prueba se emplea una rejilla transparente de plástico con un número de puntos sistemáticamente (usualmente se emplean cruzados, donde el “punto” es la intersección de los brazos) espaciados, típicamente de 9, 16, 25, 49, 64 y 100, que se coloca sobre una micrografía y en una pantalla de proyección o insertada como una retícula en el ocular. Se cuenta el número de puntos que yacen a lo largo de la fase o constituyente de interés y se divide por el número total de puntos de la rejilla. El número de puntos que yacen sobre una frontera, límite o contorno se cuenta como medio punto. Este procedimiento se repite sin predisposición en un número de campos seleccionados, es decir, sin mirar la pantalla.

### **3.12.6 Microscopia óptica y electrónica de barrido.**

Inicialmente las probetas preparadas metalográficamente serán observadas bajo un microscopio óptico con la finalidad de ver todas las fases presentes en la microestructura del material.

También se realizó una microscopia electrónica de barrido (MEB). El objetivo primordial del MEB es el observar la estructura tridimensional de la muestra. Utilizando electrones secundarios producidos por la misma, debido a la irradiación de un haz de electrones de alta energía. Estos electrones secundarios son recibidos por detectores adecuados (centelleo), los cuales cambian a señales eléctricas, estas señales eléctricas se amplían o se modifican a través de un circuito electrónico para detectores y se introducen al tubo de rayos catódicos, controlando también el contraste de la imagen.

# CAPÍTULO 4

## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se presentan los resultados y análisis obtenidos una vez que las muestras de acero AISI T.2000 fueran sometidas al tratamiento criogénico y luego ensayadas bajo las condiciones establecidas.

### 4.1 Composición química del material.

La empresa Di Lorenzo suministró información sobre el porcentaje de cobalto que contiene el acero para herramientas T.2000, y de esta manera clasificar el acero según las normas. A continuación se muestra una tabla comparativa de la composición química del material de los diferentes análisis de realizados y valores recomendados en la norma ASTM A-600 y por la empresa METALRAVNE.

Tabla 4.1 Comparación de la composición química del acero T.2000

Elementos (%) origen del estudio	C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Si (%)	Cr (%)	V (%)	W (%)	Mo (%)	Co (%)
NORMA ASTM A 600-92a	1,25- 1,40	0-0,40	0,35	0,35	0- 0,40	3,75- 4,50	2,75- 3,25	8,50- 9,50	2,75- 4,50	9-10
METALRAVNE	1,28	Max. 0,40	—	—	Max. 0,45	4,15	—	9,50	3,55	10,0

En la tabla 4.1 se observa que los principales elementos aleantes (W, Co) que componen el acero T.2000 que se obtuvieron por medio de la bibliografía revelaron que el acero es un AISI T42, el único acero que posee 10 % de cobalto como elemento aleante.

### 4.2 Microestructura del material en su condición original

Se seleccionaron muestras de las barras de acero T.2000 (figura 4.1) en su condición original las cuales fueron preparadas metalográficamente, lo cual permitió revelar a nivel microscópico la microestructura de los granos de austenita y la dispersión de partículas esferoidales de carburos de tungsteno en una matriz martensítica.

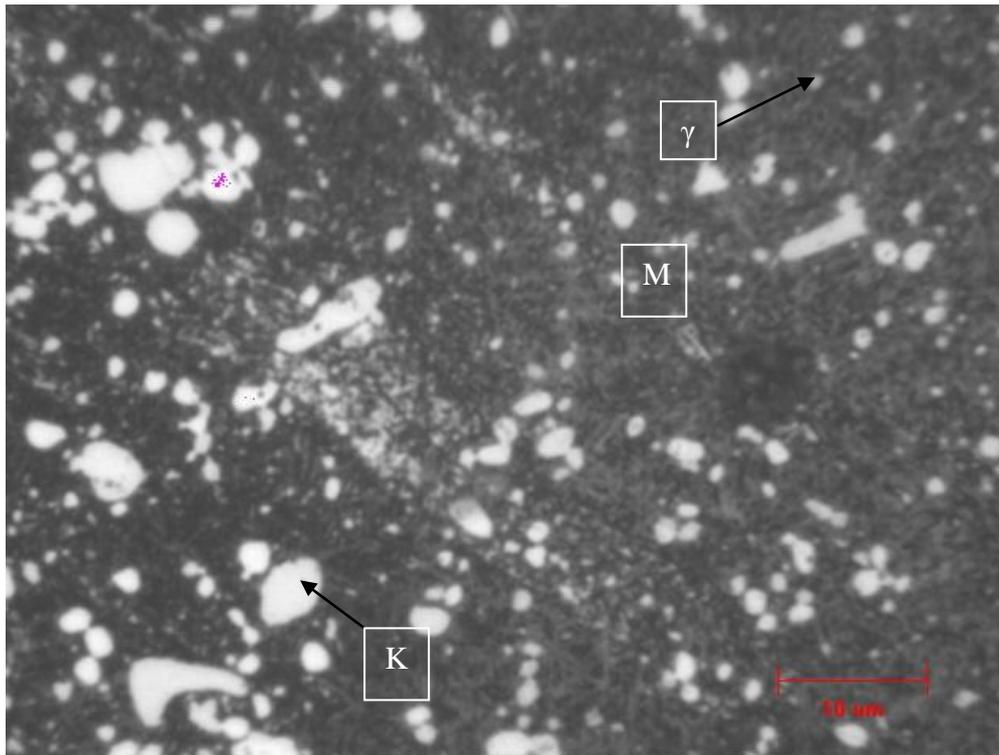


Figura N° 4.1 Microestructura presente en el acero con un aumento de 1000 X

Se obtuvo el porcentaje promedio de cada fase presente en el acero para herramientas al realizar un mapeo por las muestras preparadas metalográficamente como lo indica la norma ASTM E-562. Como se muestra en la figura 4.2. Se colocó sobre la microfotografía una rejilla de 100 puntos (o intersecciones) para luego calcular aproximadamente cuanta martensita (M), austenita ( $\gamma$ ) y carburo de tungsteno (K) estas presentaban. La cuantificación de las fases se llevo a cabo con la ecuación 2.7.

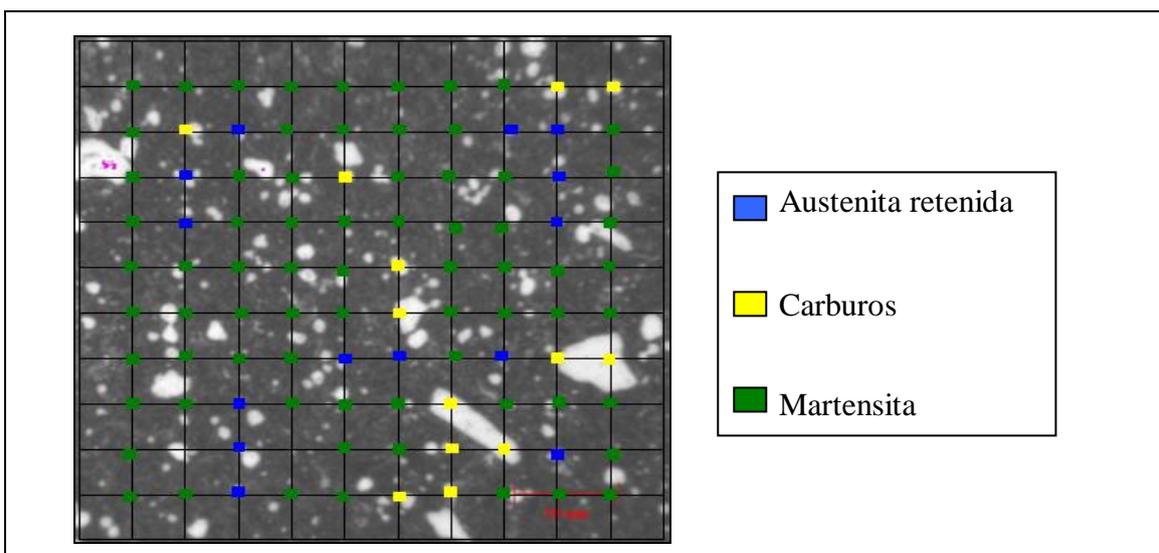


Figura 4.2 Plantilla de 100 puntos sobre fotomicrografía del acero T 2000 para calcular el porcentaje de martensita presente. Aumento de 1000 X

Los porcentajes promedio de las fases para el acero para herramientas T 2000 en su condición original se presentan en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 porcentaje de fases presentes en el acero T 2000.

Constituyente Fracción	Martensita	Carburo de Tungsteno	Austenita Retenida
Fracción de volumen (%)	73	13	14

Una vez determinado cada una de las fases y constituyentes que el acero de herramientas contiene, se observa que hay austenita retenida en un significativo porcentaje de 14 %.

### 4.3 Ensayo de tracción

Para determinar las propiedades mecánicas de al acero para herramientas T.2000 se realizaron tres ensayos por cada condición, con probetas tipo subsized según la norma ASTM E 8M, como se muestra en la figura 4.3. En la tabla 4.3 se especifican las condiciones de trabajo a las cuales fue sometido el material previamente. Las propiedades mecánicas que se determinaron mediante el ensayo de tracción son: el esfuerzo de fluencia, esfuerzo máximo y la deformación ingenieril.



Figura 4.3 Probetas de tracción de acero para herramientas T.2000

Tabla 4.3 condiciones de trabajo para el acero para herramientas T.2000

N°	Condición
1	Original
2	Tratamiento criogénico

A continuación se muestran las graficas de esfuerzo-deformación para las diferentes condiciones de ensayo desde la figura 4.4 a la 4.5.

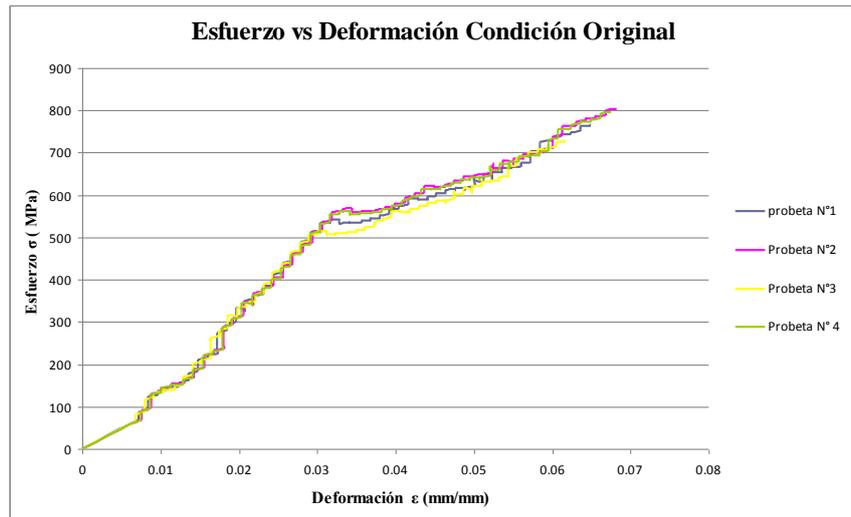


Figura 4.4 Gráfica Esfuerzo vs. Deformación de la condición original

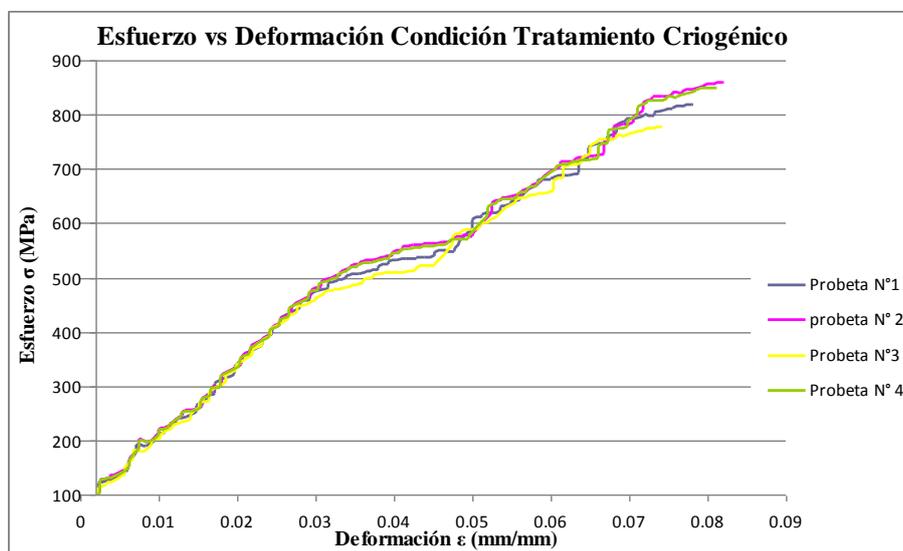


Figura 4.5 Gráfica Esfuerzo vs. Deformación condición tratamiento criogénico.

En las figuras 4.4 y 4.5 se puede observar como varía la deformación con el incremento de la fuerza aplicada en la probeta, con un aumento notable en los esfuerzos y, poca variación en la deformación plástica. Además, presentan forma escalonada debido al desplazamiento de las mordazas, que ocurre cuando estas penetran el material.

A continuación se reportan los valores de esfuerzo de fluencia al 0,2% compensado, este valor se determinó por el método de la deformación permanente especificada “offset” dibujando, por el punto del eje horizontal de abscisas  $\epsilon = 0,002$ , una línea paralela a la parte lineal del diagrama esfuerzo-deformación. El esfuerzo ingenieril se calculó con la ecuación 2.4 y la deformación con la ecuación 2.1,

obteniendo así las propiedades del ensayo de tracción, como se presentan en las tablas 4.4 y 4.5. También se muestra la longitud final de la probeta luego del ensayo, la longitud inicial ( $L_0$ ) de la probeta es de 25 mm para todas las condiciones.

Tabla 4.4 Propiedades mecánicas del acero para herramientas T.2000 en condición original.

N° Probetas	Esfuerzo de Fluencia $\sigma_y$ (Mpa)	Esfuerzo Maximo $\sigma_{m\acute{a}x}$ (Mpa)	Elongación Porcentual a la ruptura %e	Long. Final probetas Lf(mm)
1	514,53	763,87	1,20	25,30
2	515,40	764,90	1,00	25,25
3	513,37	762,57	0,80	25,20
4	514,90	764,45	1,10	25,25
<b>Promedio</b>	514,55	763,95	1,03	25,25

Tabla 4.5 Propiedades mecánicas del acero para herramientas T.2000 condición tratamiento criogénico.

N° Probetas	Esfuerzo de Fluencia $\sigma_y$ (Mpa)	Esfuerzo Máximo $\sigma_{m\acute{a}x}$ (Mpa)	Elongación porcentual a la ruptura %e	Long. Final probetas Lf(mm)
1	487.23	817,17	0,8	25,20
2	511.59	819,02	0,6	25,15
3	462.86	822,59	0,52	25,12
4	506,71	821,59	0,58	25,15
<b>Promedio</b>	492.04	820,097	0,62	25,17

A continuación se resumen en la tabla 4.6 los valores promedios de las propiedades mecánicas anteriormente expuestas para cada una de las condiciones.

Tabla 4.6 Propiedades mecánicas promedio del acero para herramientas T.2000 para cada una de las condiciones.

Condición	Esfuerzo de Fluencia $\sigma_{ys}$ (Mpa)	Esfuerzo Máximo $\sigma_{m\acute{a}x}$ (Mpa)	Elongación porcentual % e
<b>Original</b>	514,55	763,95	1,03%
<b>Tratamiento criogénico</b>	492,04	820,097	0,62%

En las siguientes figuras 4.6, 4.7 y ,4.8 se presentan las graficas comparativas de cada propiedad mecánica en función del tratamiento aplicado para las condiciones de estudio.

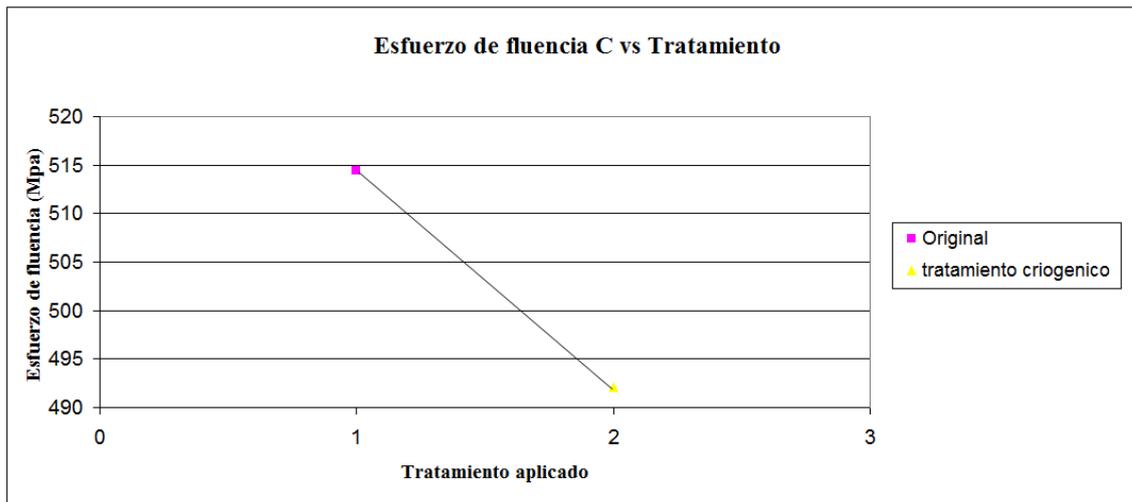


Figura 4.6 Gráfica Esfuerzo de fluencia vs. Tratamiento aplicado.

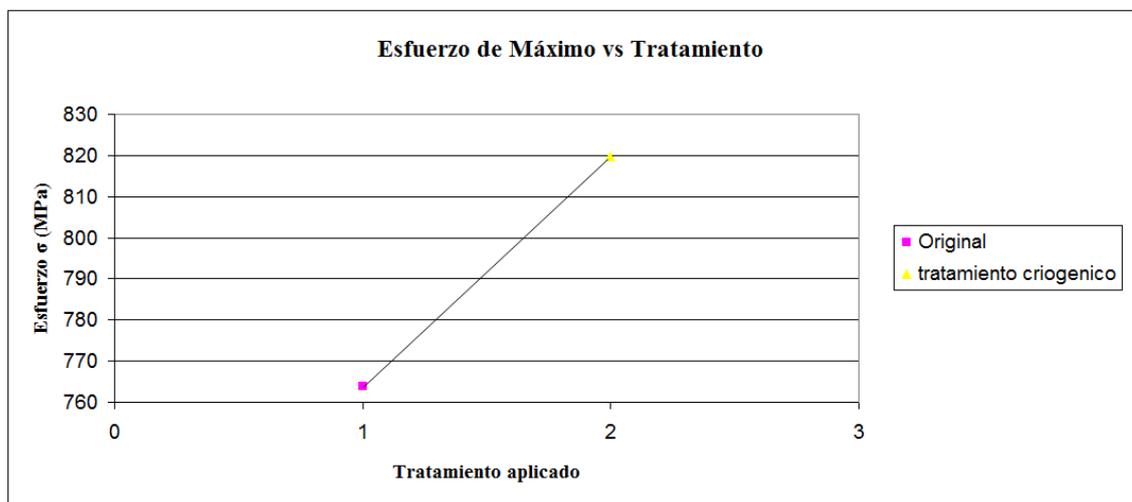


Figura 4.7 Gráfica Esfuerzo máximo vs. Tratamiento aplicado.

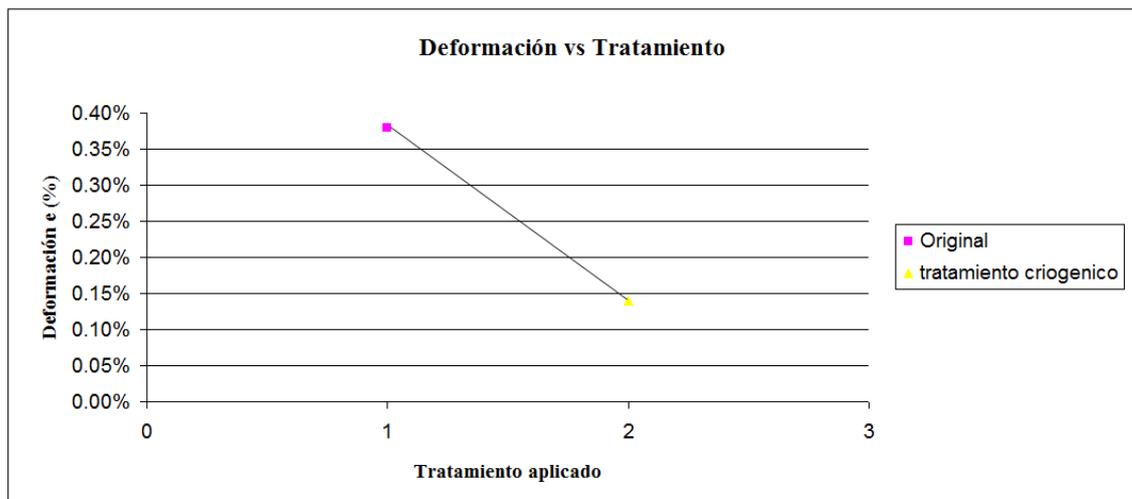


Figura 4.8 Gráfica elongación porcentual vs. Tratamiento aplicado.

Al relacionar el esfuerzo de fluencia con el tratamiento criogénico aplicado en la figura 4.6 se percibe que el esfuerzo de fluencia es de 492,04 MPa, este disminuye en 4,37% respecto a la condición original. Esto puede ser debido al deslizamiento que ocurre en las mordazas al intentar penetrar el material.

Un comportamiento similar ocurre cuando se analiza la relación esfuerzo máximo en función del tratamiento aplicado en la figura 4.7, donde al igual se presenta una variación del esfuerzo máximo entre las condiciones de estudio pero con un incremento del 7,30% respecto a la condición original.

En el caso de la elongación porcentual en función del tratamiento aplicado se observa en la figura 4.8 como disminuye de un valor de 1,03% en la condición original a 0,62% con el tratamiento a temperatura criogénica, lo que se traduce en un endurecimiento del material que disminuye la capacidad de deformación plástica por efecto del tratamiento, disminuyendo así las posibilidades de deformación plástica.

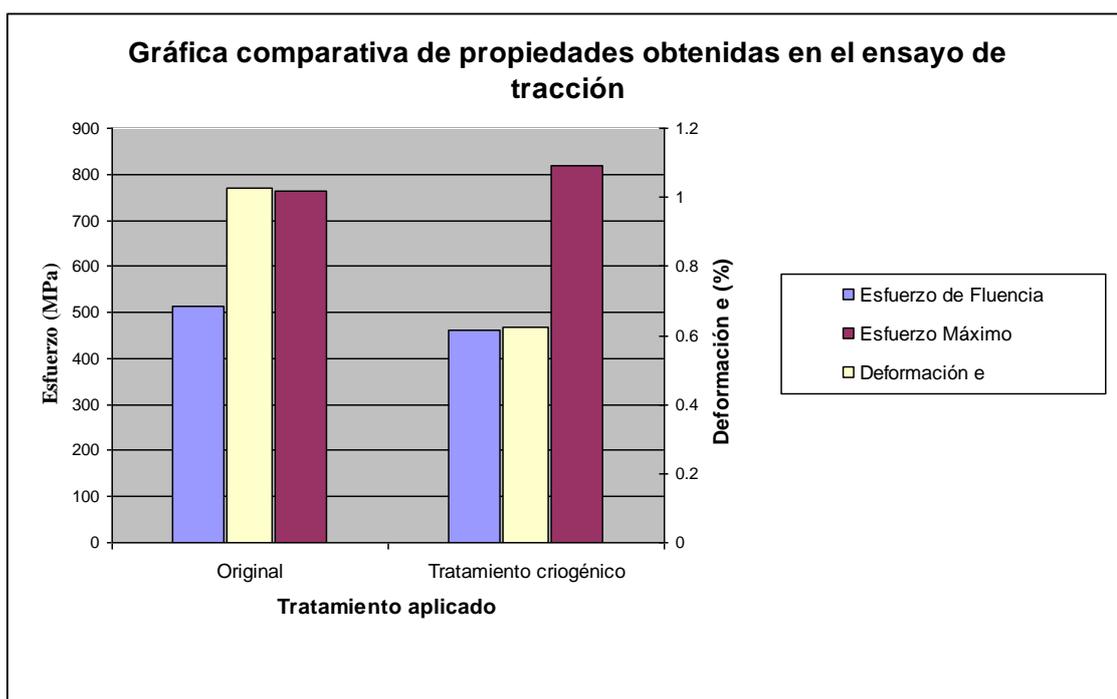


Figura 4.9 Gráfica Esfuerzo vs. Deformación condición tratamiento criogénico.

Al realizar un análisis a los resultados de las propiedades mecánicas determinadas por el ensayo de tracción como se observa en la figura 4.9, se logra percibir que existe una disminución en los valores de esfuerzo de fluencia y deformación, así como un aumento en los valores de esfuerzo máximo debido a la aplicación del tratamiento criogénico.

#### 4.4 Ductilidad

Para determinar la ductilidad del material se evaluó la reducción de área. Se realizaron mediciones del área antes y después de la fractura final de cada probeta de tracción. Para ellos se utilizó el programa IA 32 para el cálculo del área, como se muestra en la figura 4.10

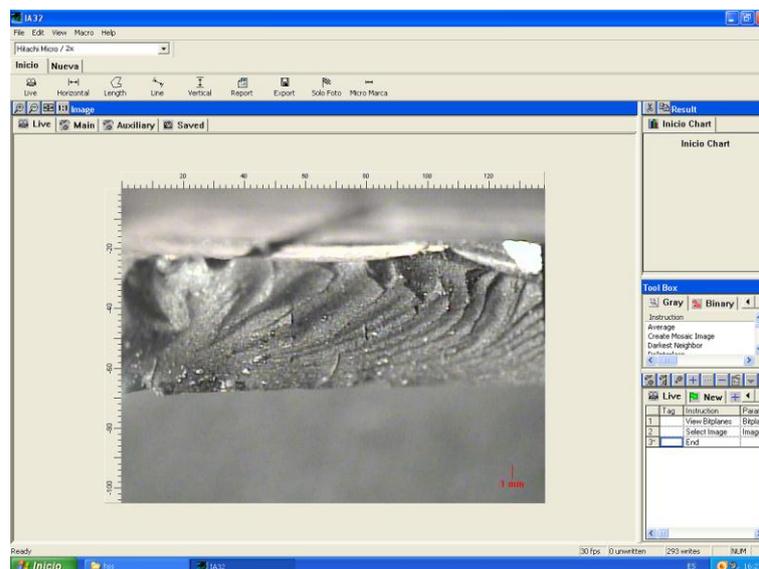


Figura 4.10. Programa utilizado para el cálculo de áreas.

A continuación se presentan los valores obtenidos de área final de cada probeta de acero para herramientas tabla 4.7. El área inicial de la probeta es  $12 \text{ mm}^2$  para todas las condiciones de estudio

Tabla 4.7 Valores del área final de las probetas de tracción

Condición	Nº probetas	Área Final $A_f(\text{mm}^2)$
Original	1	11,90
	2	11,95
	3	11,93
	4	11,90
	Promedio	11,92
Tratamiento criogénico	1	11,98
	2	11,95
	3	11,97
	4	11,95
	promedio	11,96

Tabla 4.8 Valores promedios del área final de las probetas de tracción

Condición	Área inicial $A_0(\text{mm}^2)$	Área Final $A_f(\text{mm}^2)$	% de reducción de área
Original	12	11,92	0,66
Tratamiento criogénico	12	11,96	0,33

En la siguiente figura 4.10 se observa el porcentaje de reducción de área en función de los tratamientos aplicados.

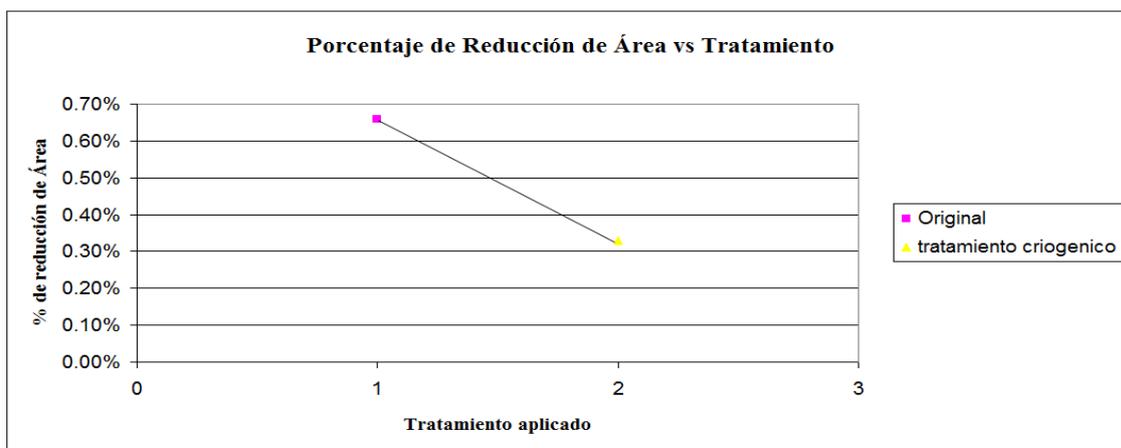


Figura 4.11 Gráfica reducción de área en función del tratamiento aplicado.

Al evaluar la ductilidad del acero para herramientas T 2000 por el porcentaje de reducción del área en la figura 4.11 se observa que con la aplicación del tratamiento criogénico disminuye el porcentaje de reducción de área en un 50%, lo que implica que el comportamiento de este material en las condiciones establecidas se hace más frágil.

#### 4.5 Ensayo de dureza

Para este ensayo se hicieron 5 indentaciones para cada condición usando una escala Rockwell C (HRC), a continuación se presentan los valores obtenidos de los ensayos y en la figura 4.12 la grafica dureza Rockwell C en función de los tratamientos aplicados.

Tabla 4.9 Valores de dureza Rockwell C (HRC) para cada condición de estudio.  
Carga= 150Kg. Identaciones=5. Identador= punta de diamante.

Identación	Condición original (HRC)	Tratamiento criogénico (HRC)
1	67,60	68,60
2	68,10	69,00
3	68,10	69,90
4	67,70	70,00
5	68,00	69,10
6	67,90	60,30
promedio	67,9	69,32

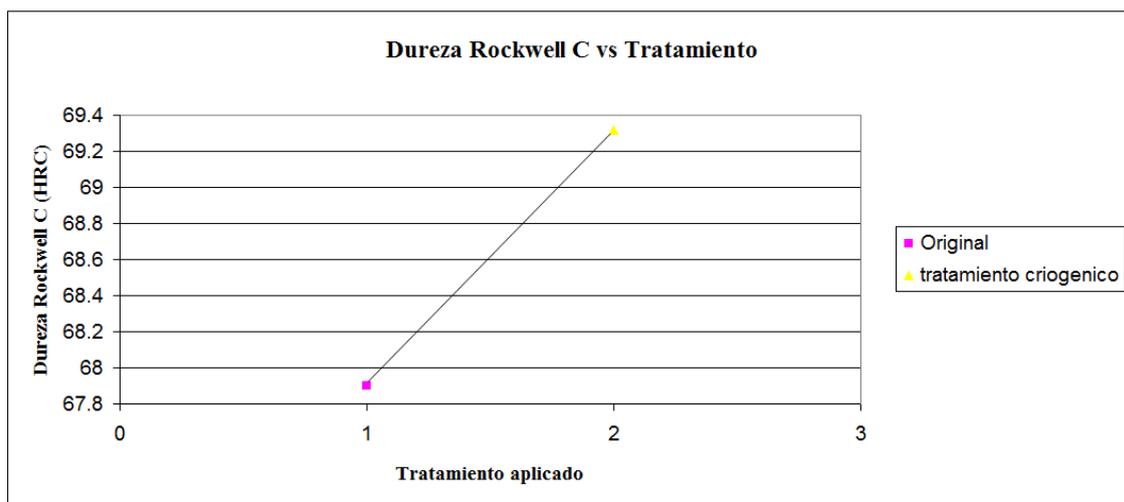


Figura 4.12 Gráfica Dureza Rockwell C en función del tratamiento aplicado.

Al analizar la figura 4.12 se puede observar que el comportamiento del material sigue siendo de forma frágil, es decir, la condición de tratamiento criogénico presenta un incremento de 2,04% respecto a la condición original. El 1,42 HRC de dureza aumentados se atribuyen a una mayor cantidad de austenita retenida transformada en martensita.

#### 4.6 Ensayo de impacto

Para el ensayo se realizaron probetas tipo subsize bajo la norma ASTM E-23, como se observa en la figura 4.13 y se realizaron 5 ensayos para cada condición. El equipo utilizado registro valores expresados en Kpm por medio de una conversión se transformó a la unidad del sistema internacional J (N m), la cual representa la energía absorbida por impacto. Mediante la relación propuesta por Rolfe, Novak y Barson (ecuación 2.4) se procedió a determinar el factor de intensidad de esfuerzo  $K_{IC}$ . A continuación se presentan en la tabla 4.10 los valores obtenidos del ensayo.



Figura 4.13 Probetas de impacto de acero para herramientas T.2000

Tabla 4.10 Valores de dureza para cada condición

N° de probeta	Condición original	Tratamiento criogénico
1	0,4	0,2
2	0,5	0,3
3	0,5	0,3
4	0,2	0,2
5	0,4	0,2
Promedio (Kpm)	0,4	0,24
Promedio (J)	3,92	2,35
$K_{IC}$ ( $Ksi \cdot pulg^{1/2}$ )	31,27	21.86

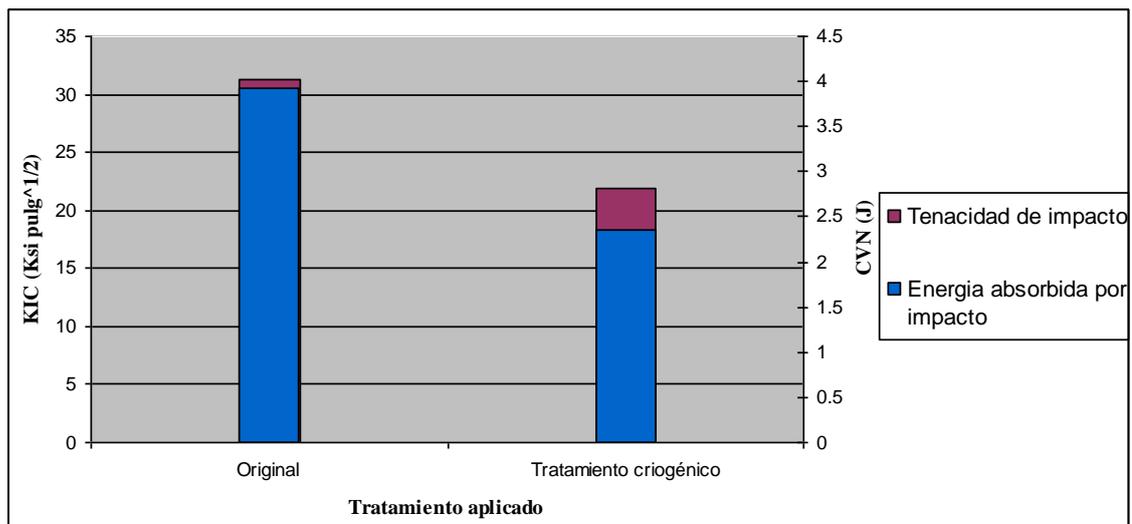


Figura 4.14 Gráfica Dureza Rockwell C en función del tratamiento aplicado.

En la figura 4.14 se observa que tanto los valores de la energía absorbida (CVN) y los valores del factor de intensidad de esfuerzo ( $K_{IC}$ ) muestran una notable disminución de 10,92 % respecto a la condición original, registrándose el valor máximo del factor de intensidad de esfuerzo para la condición original siendo este de  $31,27 Ksi \cdot pulg^{1/2}$  y de manera para la energía absorbida por impacto de 3,92 J. Esto debido a que es un material cuya ductilidad es baja, lo que hace que sea poco tenaz y conduzca a una menor energía absorbida.

#### 4.7 Tamaño crítico de grieta

Para la determinación del tamaño crítico de grieta se utiliza la ecuación 2.3 donde se relaciona el factor de intensidad de esfuerzo ( $K_{IC}$ ) con el tamaño crítico de grieta.

A continuación se reflejan en la tabla 4.10 los resultados del tamaño crítico de grieta.

Tabla 4.11 Valores del tamaño crítico de grieta para cada una de las condiciones de estudio.

Condición	Tamaño crítico de grieta $a_{crítico} (mm)$
Original	1,27
Tratamiento criogénico	0,76

En la tabla 4.10 se observa que hay una disminución de 40,15 % en el tamaño crítico de grieta respecto a la condición original, variación que se presenta por la disminución del factor de intensidad de esfuerzo ( $K_{IC}$ ) y la disminución del esfuerzo de fluencia al aplicar el tratamiento a temperatura criogénica.

#### 4.8 Fractografía

La fractografía se realizó a diferentes superficies de fractura provenientes de los ensayos de impacto y tracción a cada una de las condiciones de estudio, con la finalidad de establecer los diferentes mecanismos que intervinieron en la fractura, este estudio se efectuó en tres fases las cuales comprenden una macroscópica, una microscópica y un análisis químico; las dos últimas etapas mediante un microscopio electrónico de barrido M.E.B. A continuación se muestran las probetas de tracción planas (figura 4.15), la fractura (figura 4.16 y 4.17) y las probetas de Charpy (figura 4.18 y 4.19).

##### 4.8.1 Macroscopía

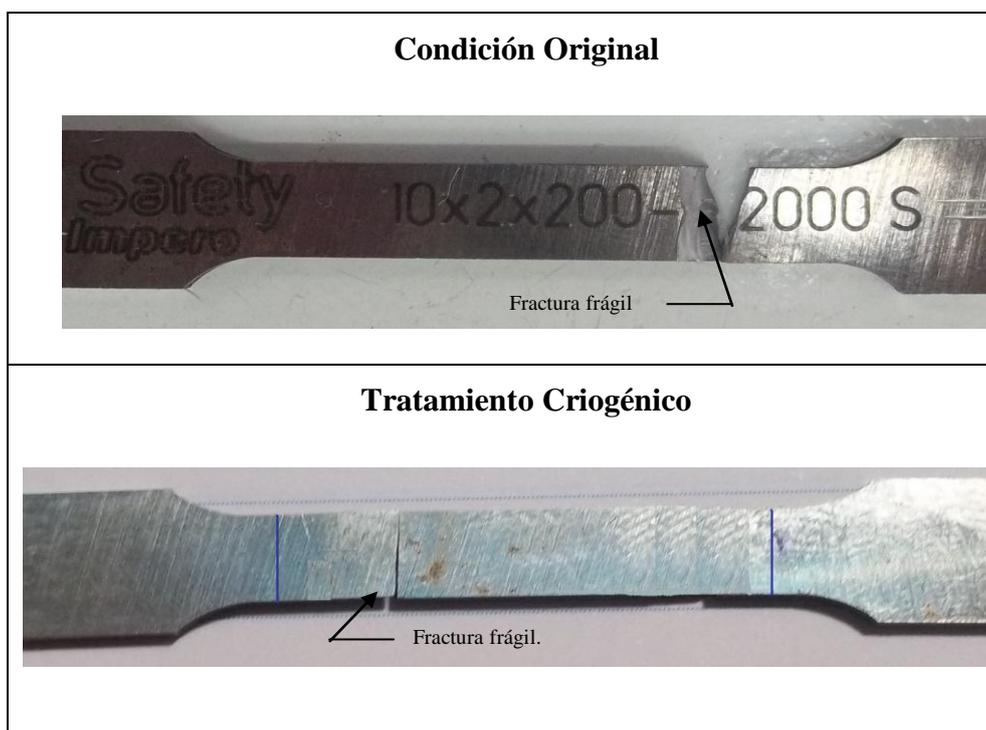


Figura 4.15 Gráfica Dureza Rockwell C en función del tratamiento aplicado.

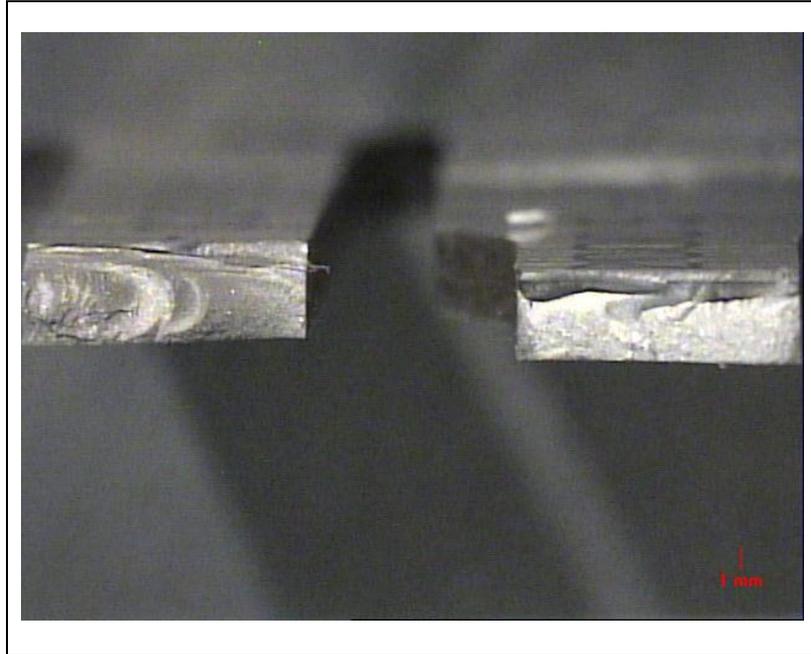


Figura 4.16 Probeta de tracción en la condición original a 1 X de aumento.

Desde la figura 4.15 a la 4.17 se muestran las probetas de tracción planas, donde se observó a nivel macroscópico la ausencia de encuellamiento para todas las condiciones de estudio, es decir, un plano liso y perpendicular al esfuerzo aplicado por el ensayo de tracción. Se detalló que la fractura ocurre dentro de la zona calibrada, por lo tanto se corrobora que el ensayo de tracción es válido, también se logró observar una superficie de tonalidad brillante características de una fractura frágil.

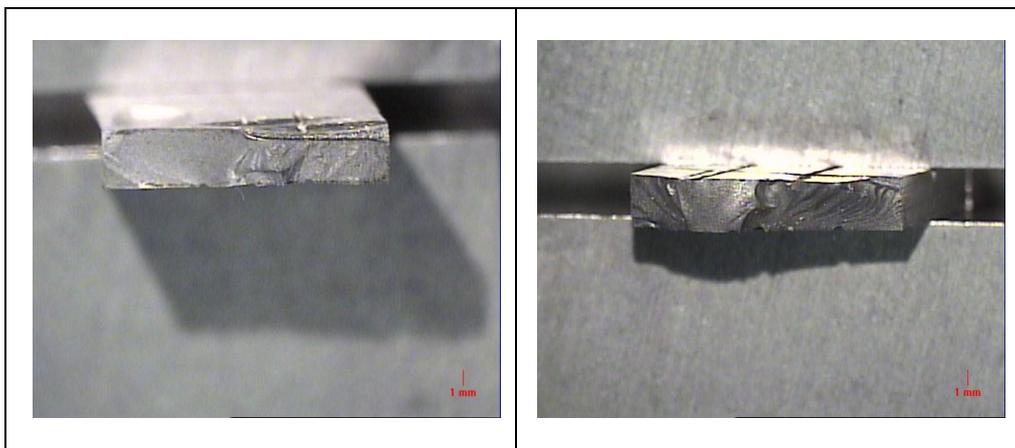


Figura 4.17 Probeta de tracción tratamiento criogénico

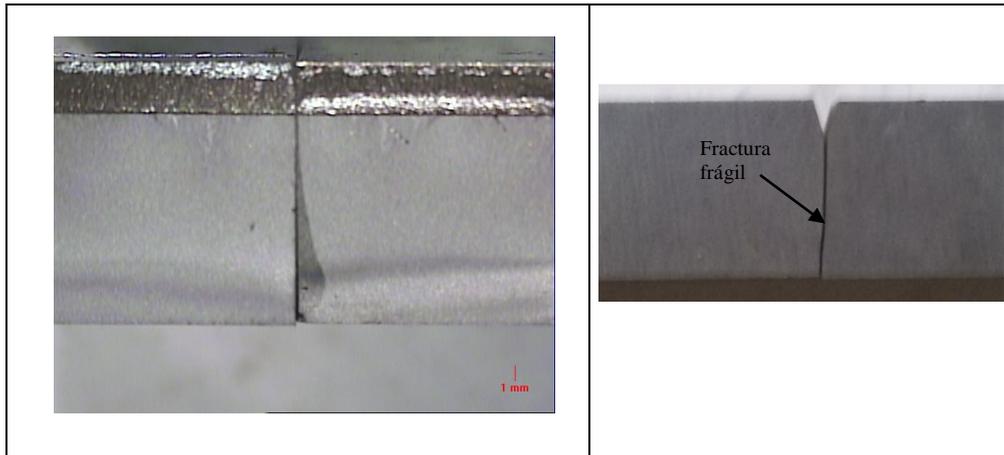


Figura 4.18 Probeta de Charpy condición original a 1 X de aumento.

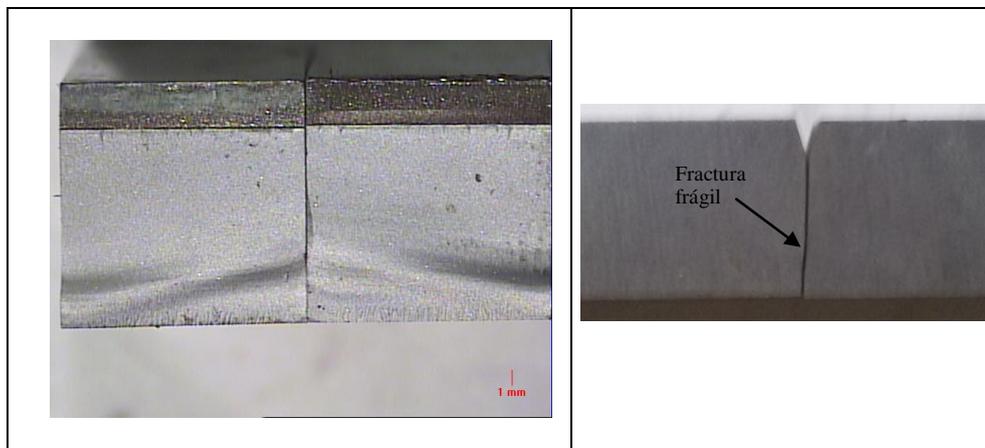


Figura 4.19 Probeta de Charpy tratamiento criogénico a 1X de aumento

En las figuras 4.18 y 4.19 se muestran las probetas Charpy para cada una de las condiciones, se alcanzó la fractura por lo que se puede observar todo el plano de corte, percibiendo así que no existe deformación lateral pero si, pequeñas ondulaciones en el plano de corte.

#### 4.8.2 Microscopia óptica

Se realizó la microscopia óptica con la intención de visualizar la microestructura del material y observar los cambios ocurridos con el tratamiento criogénico. Además se contó con la ayuda del programa IA32 para obtener la microestructura digitalizada.

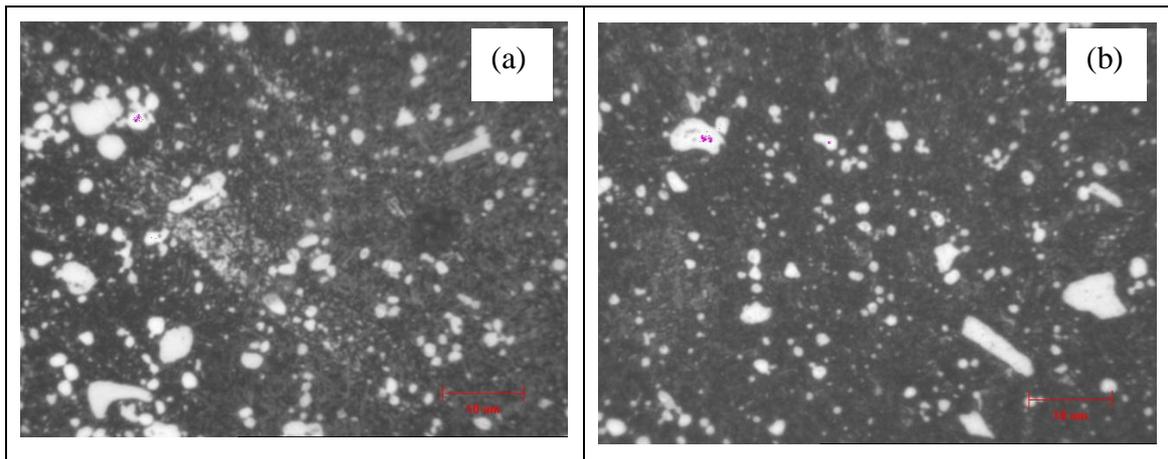


Figura 4.20 Microcopia de óptica del acero T 2000. (a) Condición original, (b) tratada criogenicamente. Aumento 1000X.

A continuación se determina el porcentaje de martensita.

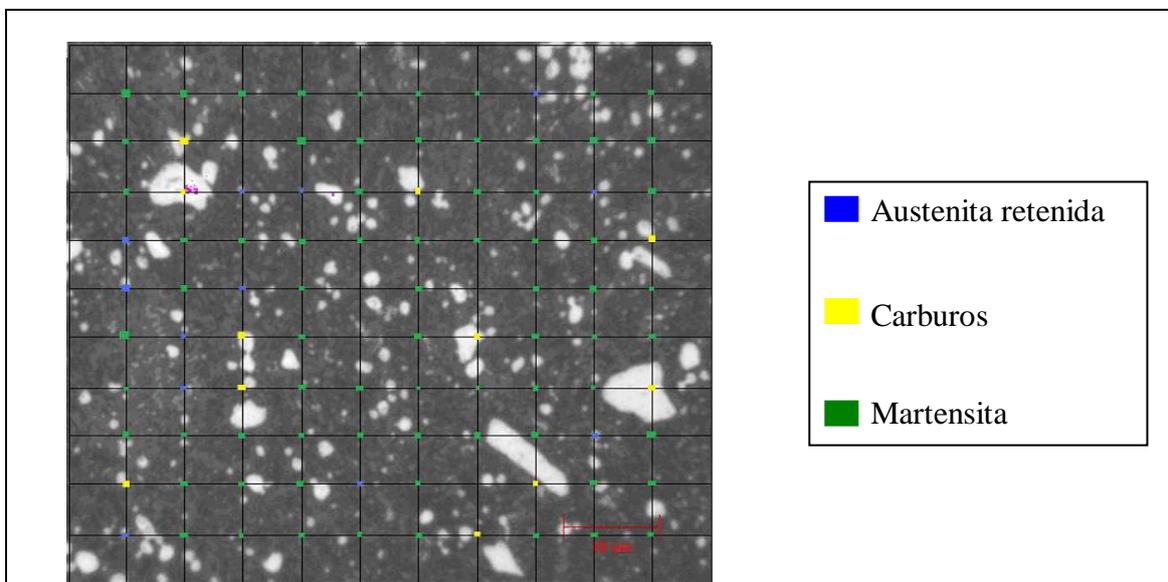


Figura 4.21 Determinación de la fases con microscopía de óptica del acero T 2000. Aumento 1000X.

Los porcentajes promedio de las fases para el acero para herramientas T 2000 en su condición original se presentan en la tabla 4.2.

Tabla 4.12 porcentaje de fases presentes en el acero T 2000 tratada a temperatura criogénica.

Fracción \ Constituyente	Martensita	Carburo de Tungsteno	Austenita
Fracción de volumen (%)	90	6	4

En la figura 4.20 se observar la microestructura del acero para herramientas T 2000 para las condiciones de estudios. Las muestras que fueron sometidas al tratamiento criogénico presentan a diferencia del material en su estado original:

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

Para cuantificar lo observado anteriormente, en la tabla 4.12 están los resultados que se obtuvieron al determinar la fracción de volumen presente en la muestra como se observa en la figura 4.21. Logrando obtener hasta un 90 % de martensita en el acero estudiado.

### 4.8.3 Microscopia electrónica de barrido (MEB)

La microscopia electrónica de barrido se llevo acabo en el Centro de Ingeniería de Superficies (CIS) del Laboratorio de Microscopia Electrónica de la Universidad Simón Bolívar.

A continuación se muestran las microfotografías de las fracturas Charpy (figura 4.22 y 4.23) y tracción (figura 4.24).

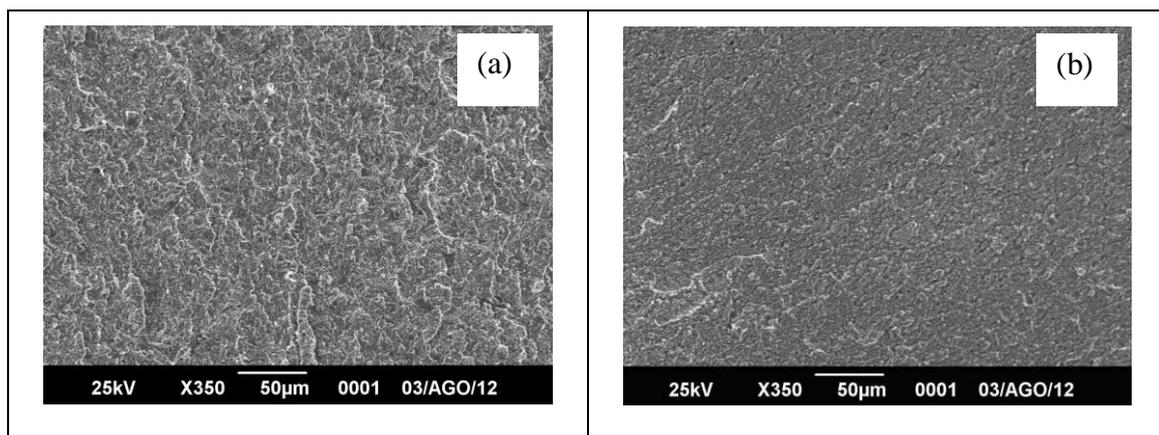


Figura 4.22. M.E.B. de la superficie de fractura de las probetas de Charpy. (a) Condición original (b) con tratamiento criogénico

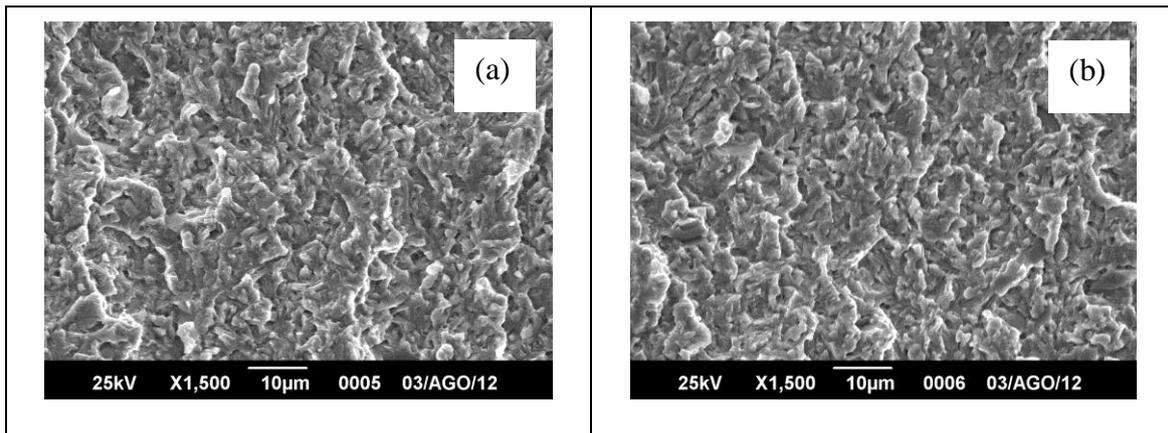


Figura 4.23. M.E.B. de la superficie de fractura de las probetas de Charpy. (a) Condición original (b) con tratamiento criogénico

En las figuras 4.22 y 4.23 se observó la superficie de fractura por MEB con aumentos de 350X y 1500X para las muestras de impacto; y de 200X para las muestras de tracción ilustradas en la figura 4.24. Se observó la separación de planos cristalográficos bien definidos en la superficie, lo que implica que el mecanismo de fractura presente es por clivaje y transgranular, confirmando así la presencia de una fractura frágil. La alta reflectividad óptica de estas facetas es la que caracteriza macroscópicamente una fractura frágil.

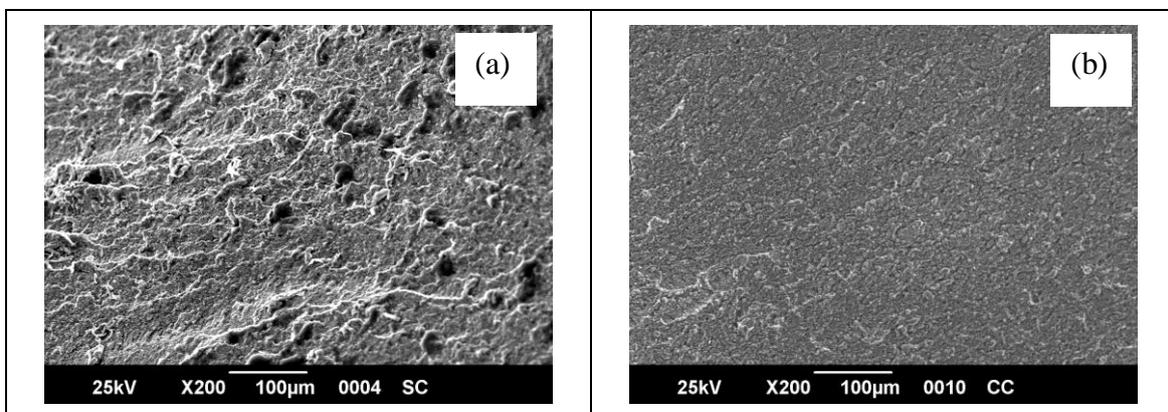


Figura 4.24. M.E.B. de la zona de fractura de las probetas de Tracción. (a) Condición original (b) con tratamiento criogénico

#### 4.8.4 Análisis químico a la microestructura del material (EDX).

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

A continuación se muestran en las figuras 4.25 a la 4.26 con su porcentaje en peso de cada elemento.

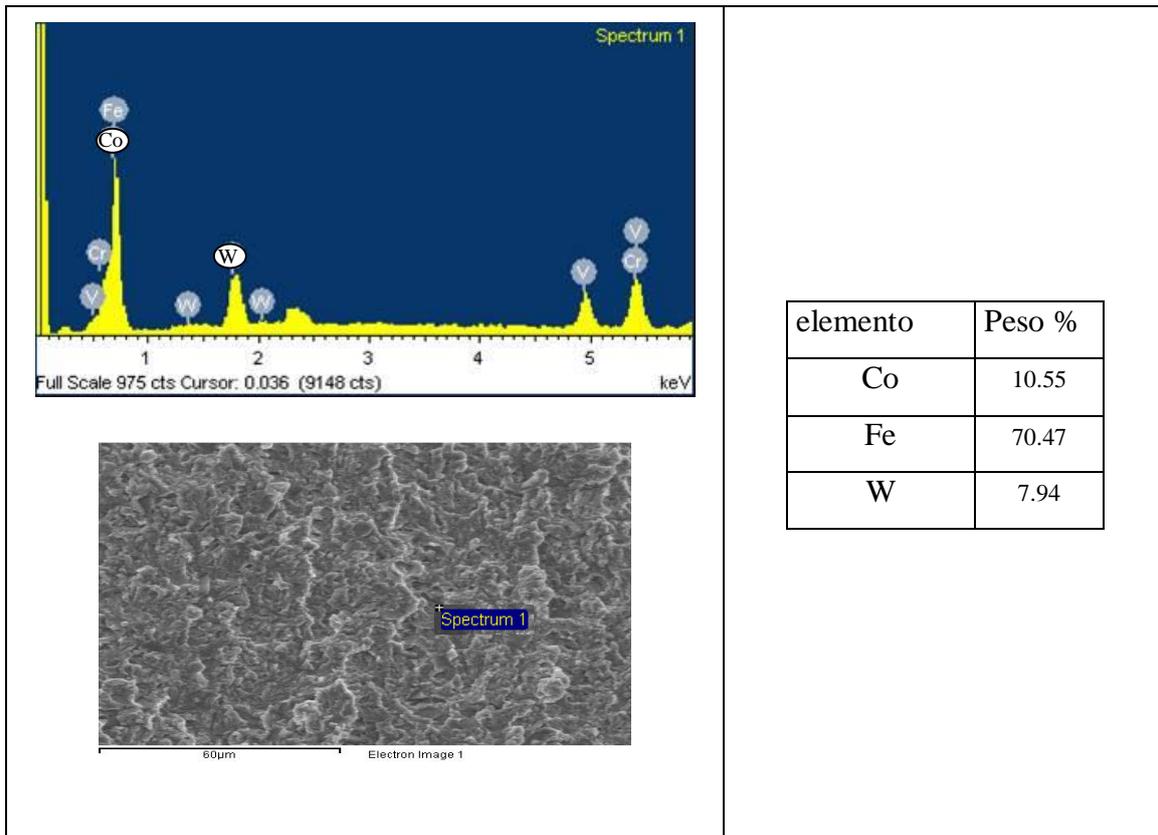


Figura 4.25 Análisis químico condición original.

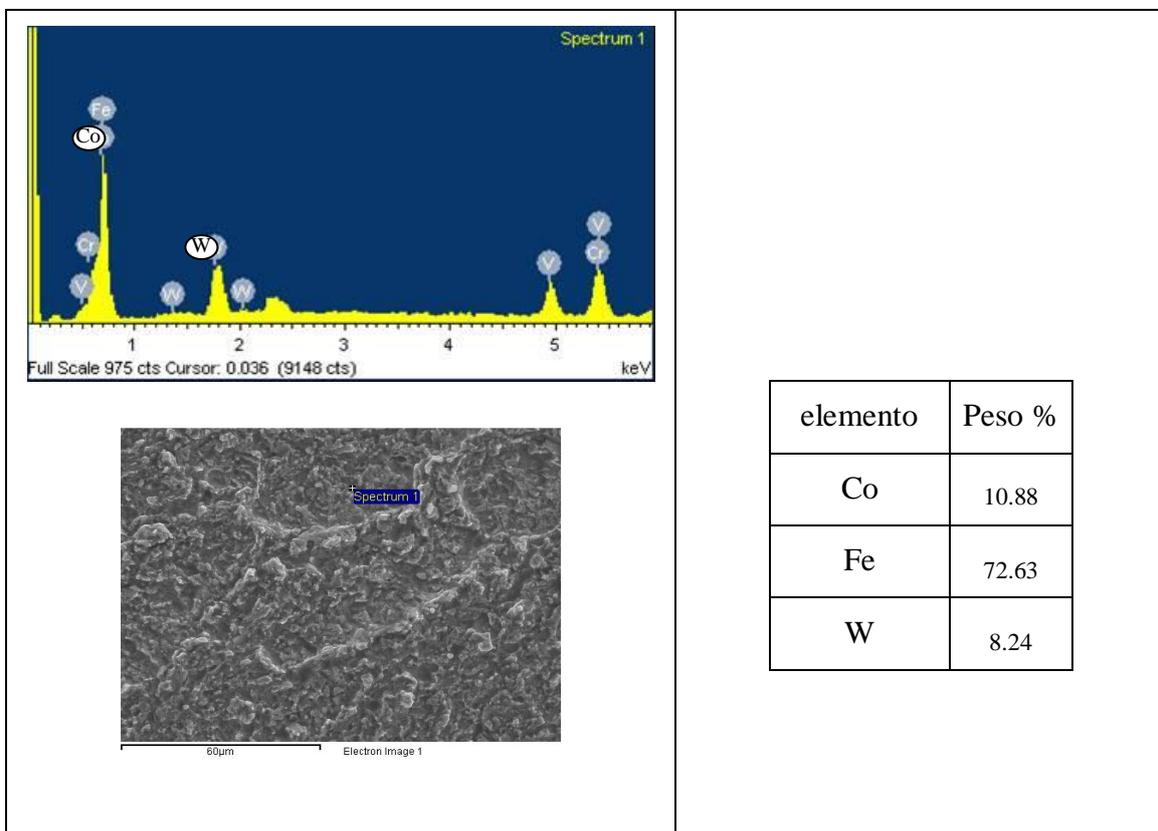


Figura 4.26 Análisis químico condición tratamiento criogénico.

A continuación se presentan un cuadro comparativo del análisis químico por EDX realizado a las muestras de tracción para cada una de las condiciones y las gráficas que muestran la variación del porcentaje de principales aleantes como son cobalto (% Co) y Tungsteno (% W)

Tabla 4.13 Cuadro comparativo del análisis químico de las muestras de tracción.

Elemento Condición	%Co	%W
Condición original	10.55	7.94
Tratamiento criogénico	10.88	8.24

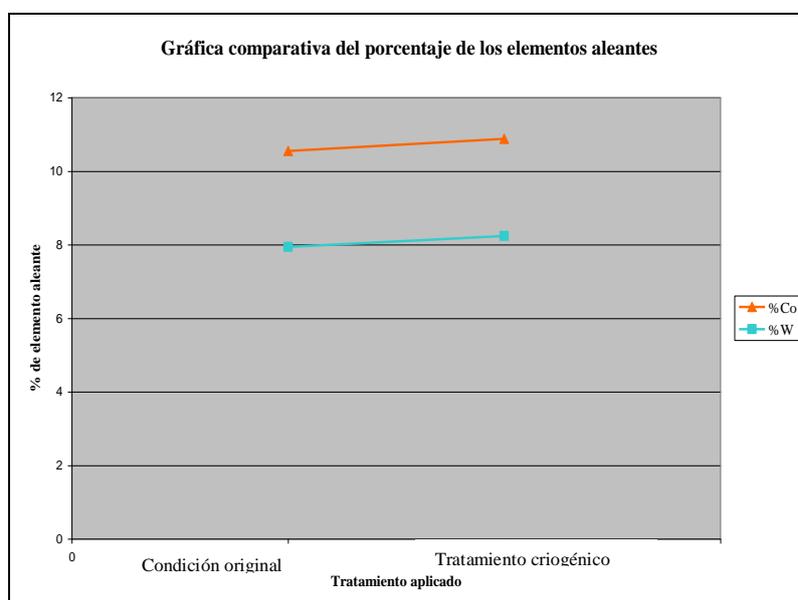


Figura 4.27 Gráfica comparativa de los elementos aleantes en función de las condiciones de estudio.

En la figura 4.27 se observa que en las superficies estudiadas no se evidenciaron pérdidas significativas en los porcentajes de peso tanto para el cobalto (Co) como para el tungsteno (W), presentándose una variación de 3.12% para el Cobalto y de 3.64% para el Tungsteno, pero esta variación en porcentajes de los elementos aleantes depende de la composición química que cada punto posee,

Se realizó un mapeo sobre la superficie de la muestra en condición original se puede cuantificar la variación de cobalto y tungsteno en la matriz martensítica, como se muestra en la figura 4.28.

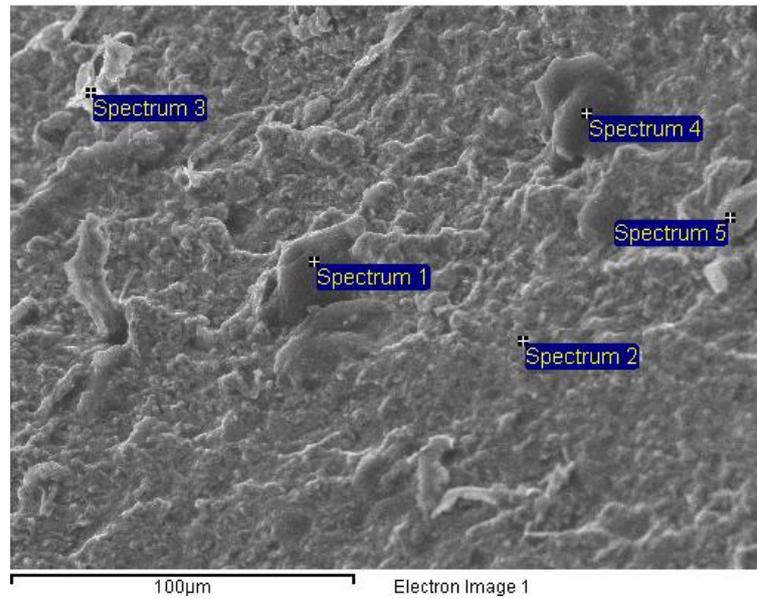


Figura 4.28 Puntos sobre la superficie de la muestra en condición original analizada por EDX.

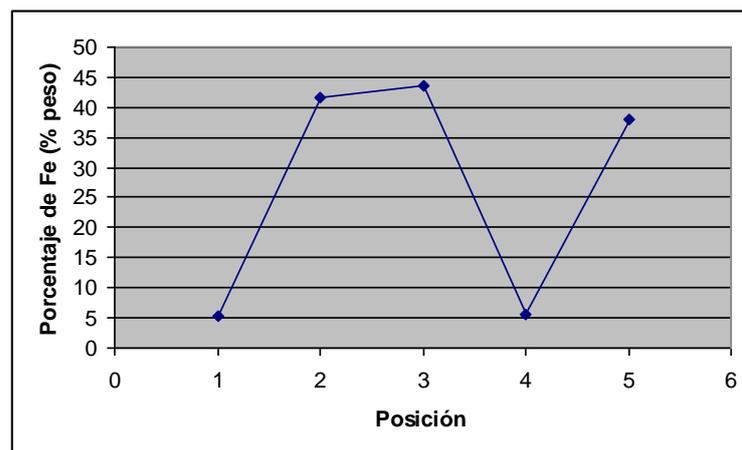


Figura 4.29 Perfil de concentración de hierro sobre la superficie de estudio en muestra en condición original realizada con análisis por EDX.

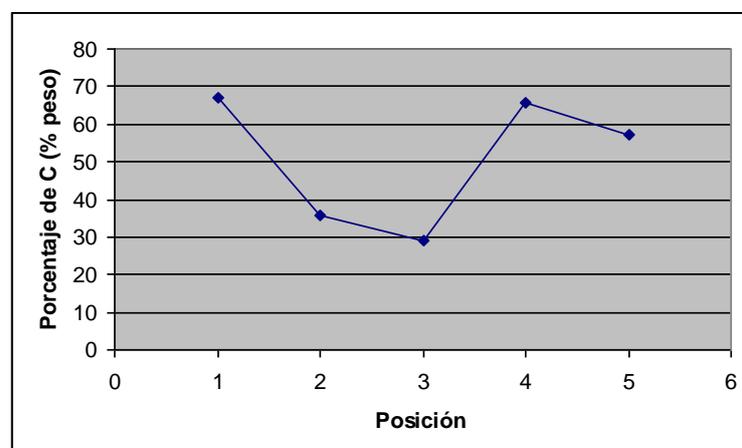


Figura 4.30 Perfil de concentración de Carbono sobre la superficie de estudio en muestra en condición original realizada con análisis por EDX.

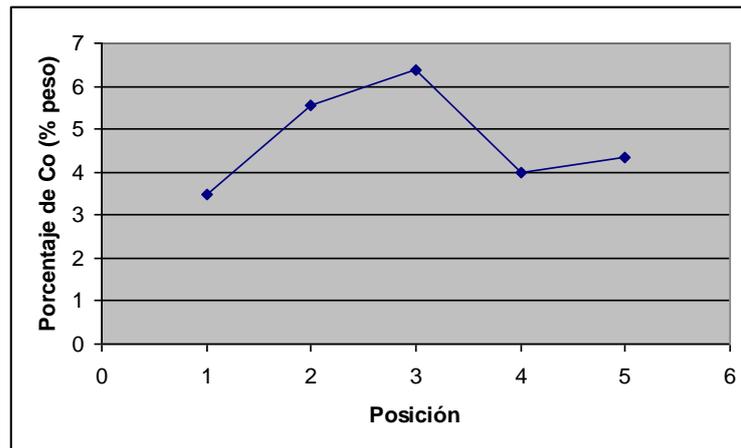


Figura 4.31 perfil de concentración de Cobalto sobre la superficie de estudio en muestra en condición original realizada con análisis por EDX.

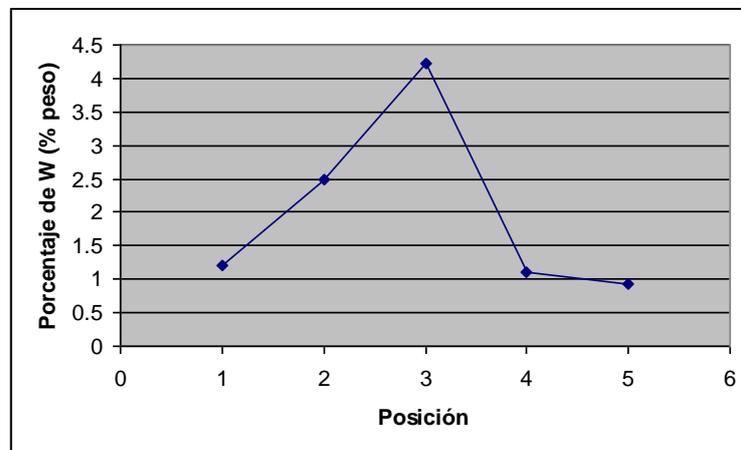


Figura 4.32 perfil de concentración de tungsteno sobre la superficie de estudio en muestra en condición original realizada con análisis por EDX.

Desde la figura 4.29 hasta la 4.32 puede observarse como varía los elementos aleantes en la superficie de fractura del acero para herramientas T 2000. Caracterizándose así dos fases: una fase oscura de cobalto en una matriz martensítica como se muestra en los puntos 1, 2, 4, 5 y una fase clara de carburo de tungsteno determinada por el punto 3.

De igual manera se procedió para determinar las fases presentes en la muestra tratada criogénicamente, realizándose un mapeo sobre la superficie de fractura, como se muestra en la figura 4.33

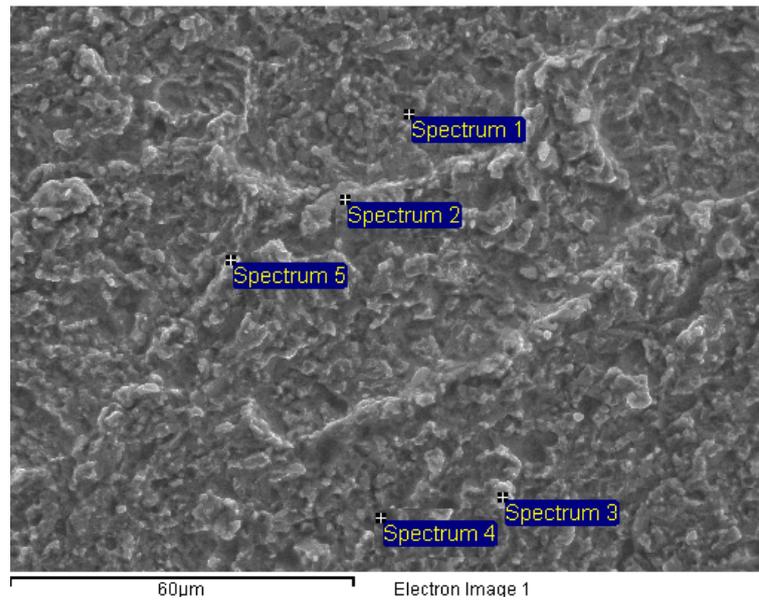


Figura 4.33 puntos sobre la superficie de la muestra tratada criogénicamente analizada por EDX.

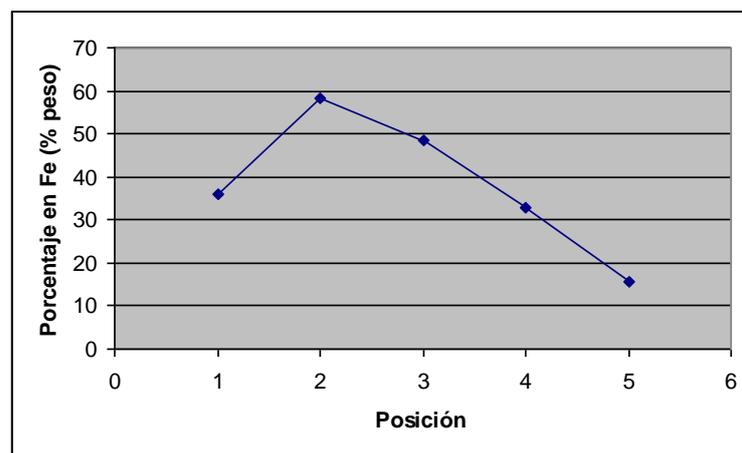


Figura 4.34 perfil de concentración de hierro sobre la superficie de estudio realizada con análisis por EDX.

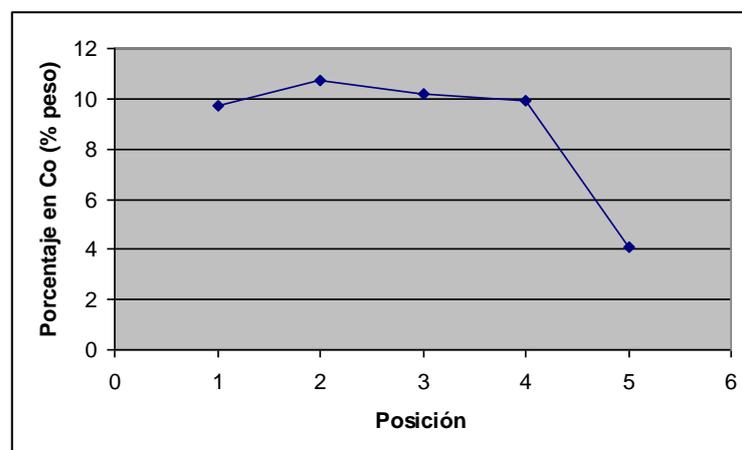


Figura 4.35 perfil de concentración de cobalto sobre la superficie de estudio realizada con análisis por EDX.

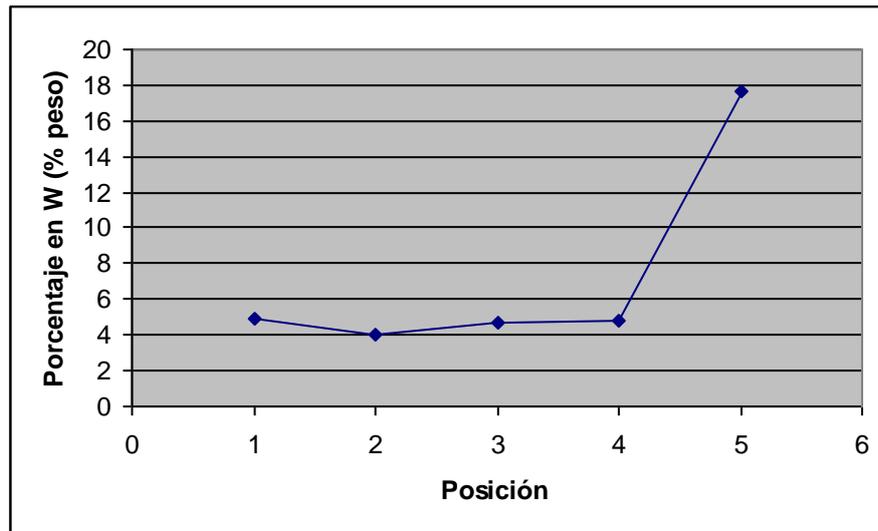


Figura 4.36 perfil de concentración de tungsteno sobre la superficie de estudio realizada con análisis por EDX.

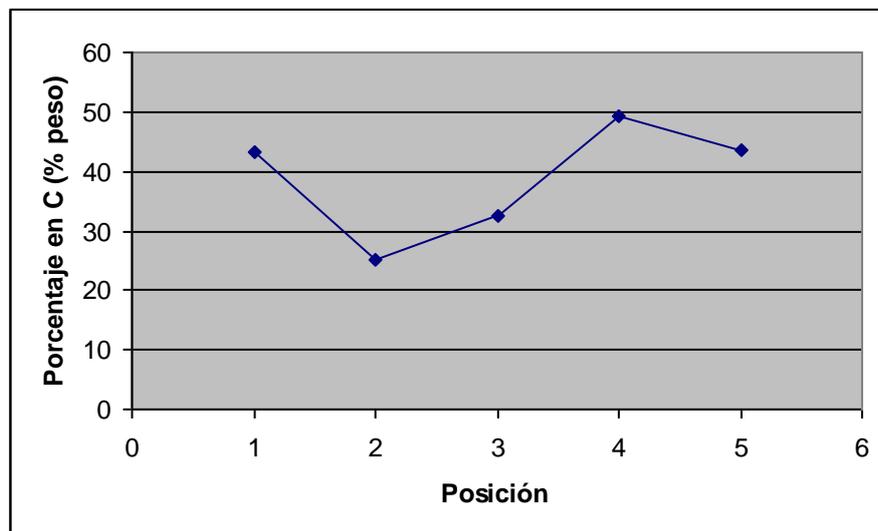


Figura 4.37 perfil de concentración de carbono sobre la superficie de estudio realizada con análisis por EDX.

Desde la figura 4.34 hasta la 4.37 puede observarse como varía los elementos aleantes mas relevantes del acero para herramientas T 2000 sobre la superficie de fractura. El porcentaje de cobalto y tungsteno en la mayoría de los puntos examinados se mantiene constante excepto en el punto 5 donde se observa un incremento considerable de 12,86 % en el tungsteno (W) y una disminución en los porcentaje de hierro (Fe) y Cobalto (Co), siendo estos de 17, 3 % Fe y 5,81 % Co. En cuanto al porcentaje de carbono (C) presenta un comportamiento irregular que depende de la composición que tenga cada punto analizado.

# CAPÍTULO 5

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

---

### 5.1 CONCLUSIONES

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

El tratamiento criogénico a una temperatura  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  influye directamente en el acero y en los valores de sus propiedades de dureza, tenacidad y resistencia a la tracción. Esto se determinó por medio de los ensayos mecánicos en un universo de 24 probetas de ensayo Charpy, tracción y dureza. Donde los valores finales obtenidos al sumergir la pieza 24 horas en una cámara cerrada con nitrógeno líquido son los siguientes:

- Dureza 69.32 HRC
- Resistencia máxima de 820 MPa
- Resistencia al impacto 13,53 J

Queda establecido de esta manera el aumento en 2,04% en los valores de dureza y 7,30 % en la resistencia máxima a la tracción al aplicar temperaturas de  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ , sin embargo este incremento en las propiedades señaladas se lograron a costa de la disminución de los valores de tenacidad.

Esta disminución en la tenacidad, llegando a un valor de 10,92%, se presenta como un problema menor que surge como consecuencia al producir mejoras en otros aspectos del acero, por lo que se hace imprescindible establecer las propiedades principales que se necesitan antes de aplicar el enfriamiento en nitrógeno líquido, entendiendo la limitación que presenta el proceso para piezas sometidas a altos impactos.

En la microestructura del acero estudiado se presentaron 2 fases, una fase clara de carburo de tungsteno y otra fase oscura de cobalto (Co), hierro (Fe) y carbono (C), pudiéndose definir a través del análisis EDX, donde se logró observar la variación de la composición química en diferentes puntos.

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

## 5.2 RECOMENDACIONES

- Prestar especial cuidado en la parte experimental, sobre todo durante la manipulación de las muestras ya que en este punto se podrían generar resultados erróneos.
- Realizar investigaciones a futuro en las cuales se aumentan los tiempos de revenido para estudiar el comportamiento de las propiedades mecánicas bajo estas condiciones.
- Realizar investigaciones en las cuales se varíen las temperaturas criogénicas para estudiar el comportamiento de las propiedades mecánicas bajo estas condiciones.
- Utilizar mordazas especiales para realizar el ensayo de tracción en materiales extremadamente duros, para obtener la menor desviación de los resultados.

# Referencias bibliográficas

---

- A. Hugon, M. s. (1979). *Calculos y ensayos, estudio de proyectos II*. Barcelona , España: Editores técnicos asociados, S.A.
- Arias. (2006). *Mitos y errores en la elaboracion de tesis y proyectos de insvestigación*. Caracas, Venezuela: Editorial Episteme C.A.
- Arnal Frisas, J. J. (2010). *Clasificación, tratamiento y propiedaes de los aceros de herramientas*. España: escuela de ingenieria técnica industrial de Zaragoza.
- Askeland, R. R. (1999). *Ciencia e ingenieria de los materiales*. Universidad de Missouri: international Thomson editores.
- Avner, S. H. (1990). *Introducción a la matelurgia física*. Mc Graw Hill.
- Baldissera, P., & Delprete. (2008). Deep cryotreatment: A blibliograpic review. *The Open Mechanical Engineering Journal* , 2, 1-11.
- Barson, & Rolfe. (1986). *Fracture and fatigue control in strutures*. EUA: Prenice Hall.
- Bawa, H. (2007). *Proceso de manufactura*. México: Mc Graw Hill.
- Bisquerra, R. (2000). *Educación emocional y bienestar*. Barcelona, España: Praxis.
- Buenaventura B, M. (1982). *calculos y ensayos: estudios de los proyectos*. Barcelona, España: Editores técnicos Asociados.
- Callister, W. D. (1998). *Introducción a la ciencia e ingenieria de los materiales*. Universidad de Utah: Editorial Reverte.
- Das, D., Dutta, A. K., & Ray, K. K. (2010). Sub-zero treatments of AISI D2 steel: Part I. Microstructure and hardness. *Materials Science and Engineering* , 2182-2193.
- Das, D., Dutta, A. K., & Ray, K. K. (2010). Sub-zero treatments of AISI D2: Part II. Wear behavior. *Materials Science and Engineering* , 2194-2206.
- Das, D., Dutta, A. K., & Ray, K. (2009). Influence of varied cryotreatment on the wear behavior of AISI D2 steel. *Wear* , 266, 297-309.
- Das, D., Dutta, A., & Ray, K. (2009). Optimization of the duration of cryogenic processing to maximize wear resistance of AISI D2. *Cryogenics* , 49, 176-184.
- Das, D., Dutta, A., & Ray, K. (2008). On the enhancement of wear resistance of tool steel by cryogenic treatment. *Philosophical Magazine Letters* , 88, 801-811.

Groover, M. P. (1997). Fundamentos de manufactura moderna. México: Pearson education.

Huang, J., Zhu, Y., Liao, X., Beyerlein, I., Bourke, M., & Mitchell, T. (2003). Microstructure of criogenico treated M2 tool steel. *Materials Science & Engineering* , A339, 241-244.

Koneshlou, M., Meshinchi Asl, K., & Khomamizadeh, F. (2011). Effect og cryogenic treatment on microstructure, mechanical and wear behaviors of AISI H13 hot work tool steel. *Cryogenics* , 51, 55-61.

Lira C, G. (2009). Aplicación de la criogenica en el tratamiento térmico de acero para trabajo en frio K100 (AISI D3). Perú: Pontificia Universidad del Perú.

Madrid, U. A. (s.f.). *Ensayo EDX*. Obtenido de <http://www.uam.es/investigacion/servicios/sidi/especifica/barrido.html>

Materials, A. S. *Patente n° E23-02a*. U.S.A.

Materials, A. S. (1998). U.S.A.

Metalravne. (s.f.). *AISI T42*. Obtenido de <http://www.metalravne.com/selector/steels/BRU.html>

Moliniari, A., Pellizari, M., Gialanella, S., Straffelini, G., & Stiasny, K. (2001). Effect of deep cryogenic treatment on the mechanical propieties of tool steels. *Journal of Materials Processing Technology* , 118, 350-355.

Quitero Sayago, O. (2002). Laboratorio de materiales II. Caracas, Venezuela: Departamento de ciencia de los materiales, Universidad Simon Bolivar.

Rusiñol, D. M. (2004). Efecto del tratamiento criogenico en las propiedades mecánicas de los aceros de herramientas de trabajo en frío. Barcelona, España.

S. Kalpakjian, S. S. (2008). Manufactura,ingenieria y tecnologia. Mexico: Pearson Education.

Saln B, M. N. (2005). Tecnologia de proceso y transformacion de metales. Barcelona, España: Universidad politécnica de Cataluña.

Smith, W. F. (1998). Fundamentos de la ciencia e ingenieria de los materiales. Madrid, España: Mc Graw Hill.

Tamayo y Tamayo, M. (2003). Proceso de la investigación científica: fundamentos de la investigacion con manual de evaluacion de proyotos. México: Limusa Noriega Editores.

Zhirafar, S., Rezaeian, A., & Pugh, M. (2007). Effect of cryogenic treatment on the mechanical propieties of 4340 steel. *Journal of materials processing technology* , 186, 298-303.

ASTM E 3-01 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens.

ASTM E 23-02 Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials<sup>1</sup>

ASTM E 18-03 Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials

ASTM E 8M-04 Tension Testing of Metallic Materials

ASTM E 562- 02 Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count

ASTM E 407-99 Microetching Metals and Alloys

ASTM A 600- Standard Specification for Tool Steel High Speed

ASTM A 370 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products

# Anexos

## Informe de Ensayo de Tracción - Compresión [B] Univ. Simón Bolívar

### Fondos de escala de los canales analógicos:

Fuerza: 6.000,0 kgf Posición: 999,99 mm Auxiliar 1: 15,000 mm Auxiliar 2: 40,000 mm

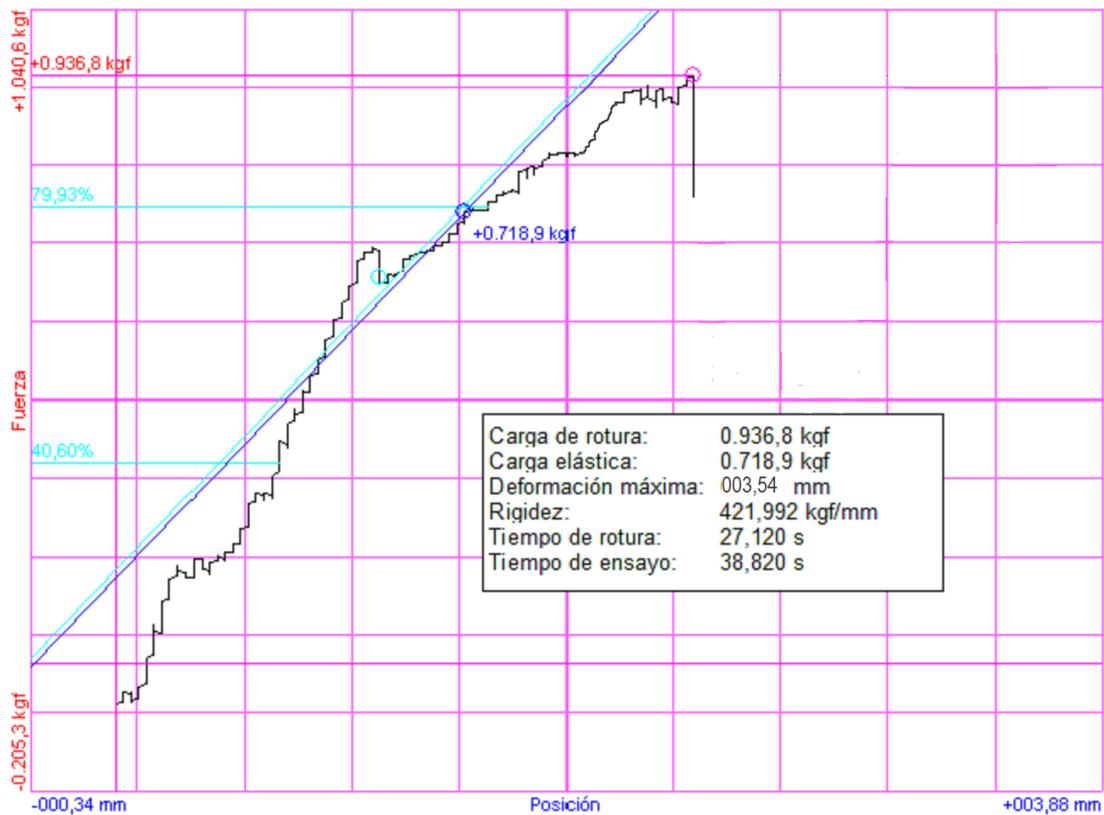
### Referencias:

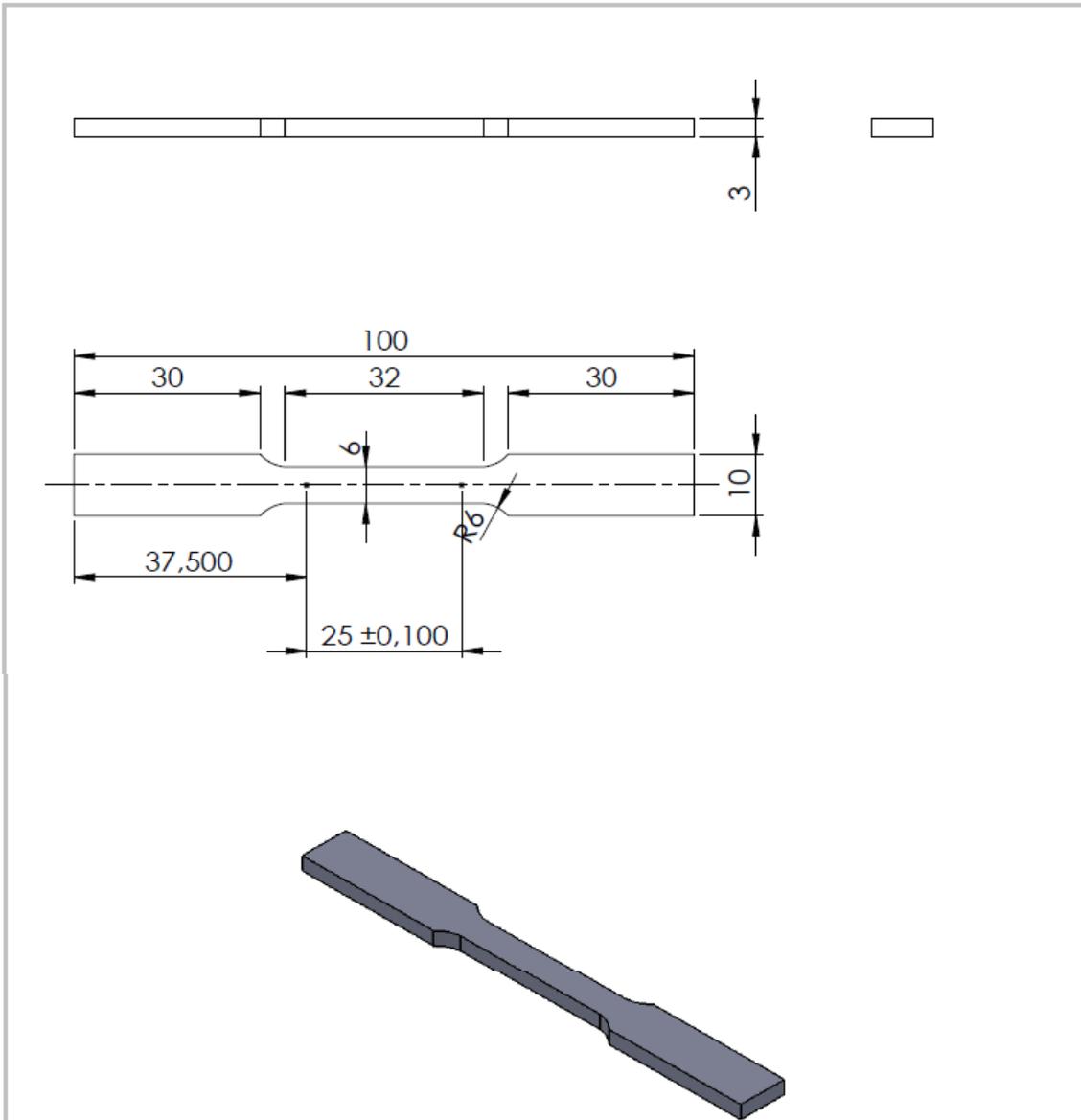
Fecha: 17/10/2012  
Probeta: Muestra 1 UC

### Parámetros:

Sentido: Tracción  
Límite superior: 80,00 %  
Límite inferior: 40,00 %  
Parámetro control: Posición  
Velocidad: 000,09 mm/s  
Parámetro destino: Posición  
Destino relativo: 999,01 mm

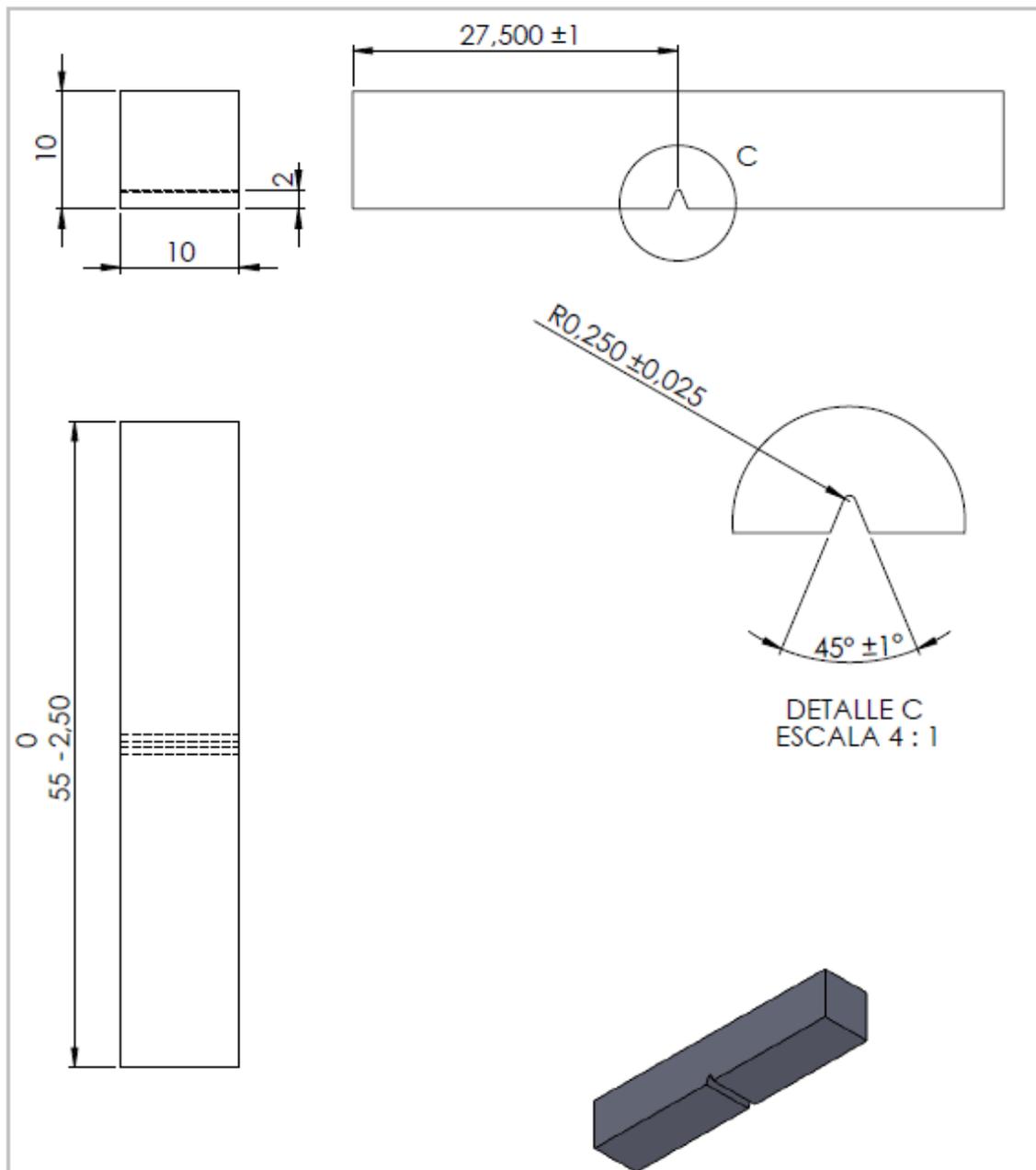
Nombre de archivo: Data Muestra 1-1



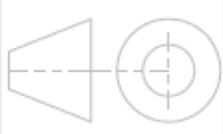


Material: HSS+10% Co

	ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GEOMETRICA	AJUSTES Y TOLERANCIAS	OTRAS NORMAS
	<b>UNIVERSIDAD DE CARABOBO</b> ESCUELA DE INGENIRÍA MECÁNICA		Fecha dibuja Revisa	Nombre Joan Morales Firma
Escala 1:1	PROBETA PARA ENSAYO DE TRACCIÓN		<b>Proyecto de grado</b> lamina: 1	



Material: HSS+10% Co

		ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GEOMETRICA	AJUSTES Y TOLERANCIAS	OTRAS NORMAS
<b>UNIVERSIDAD DE CARABOBO</b> ESCUELA DE INGENIRÍA MECÁNICA		Fecha		Nombre	Firma
		dibuja		Joan Morales	
Escala 2:1		PROBETA PARA ENSAYO DE IMPACTO TIPO A		<b>Proyecto de grado</b> lamina: 2	

### Designation by Standards

Brand Name	Ravne No.	Mat. No.	DIN	EN	AISI
BRU	881	1.3207	S10-4-3-10	HS10-4-3-10	T42

### Chemical Composition (in weight %)

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	W	Others
1.28	max. 0.45	max. 0.40	4.15	3.55	-	3.25	9.50	Co: 10.0

### Description

High performance high speed steel with optimum cutting performance and hot hardness plus a good degree of toughness.

### Applications

Steel for universal application giving optimum tooling life times for cutting and milling tools. All kinds of profile blades for wood machining are manufactured from sheets. For severely stressed tools for fine and roughing work, cutting tools for very hard materials, turning blades, wood working tools and tools for cold work.

Physical properties (average values) at ambient temperature:

Modulus of elasticity [ $10^3 \times \text{N/mm}^2$ ]: 217

Density [ $\text{g/cm}^3$ ]: 8.23

Thermal conductivity [ $\text{W/m.K}$ ]: 19.0

Electric resistivity [ $\text{Ohm mm}^2/\text{m}$ ]: 0.80

Specific heat capacity [ $\text{J/g.K}$ ]: 0.46

Coefficient of Linear Thermal Expansion  $10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

20-100°C	20-200°C	20-300°C	20-400°C	20-500°C	20-600°C	20-700°C
9.6	10.0	10.1	10.3	10.5	10.7	10.7

**DI LORENZO C.A.**RIF: J-07550475-5  
Capital Pagado: Bs. 300.000,00 - Patente 23.851Av. Michelena - Av. Norte - Sur 4 - C. C. Unicentro - Galpón N° 2  
Urb. Industrial Carabobo - Valencia - Edo. Carabobo - Venezuela - Zona Postal 2003  
MASTER TELEFÓNICO: (0241) 838.29.44 - FAX: (0241) 832.14.97  
www.dilorenzo.com.ve / e-mail: info@dilorenzo.com.ve

N° DE CONTROL - FORMA

00-000238

**FACTURA No. 0103181**CLIENTE DIMELC  
RLF J-07550475-5  
DIRECCIÓN URB. CASTILLO C.C. LUFECA,  
GALPÓN 3FECHA DE EMISIÓN 11/05/2012  
FECHA DE VENCIMIENTO 10/05/2012  
CREDITO 30 DIASTELÉFONOS VALENCIA CARABOBO VENEZUELA  
FAX (000) 000-0000 (000) 000-0000O/COMPRA  
VENDEDOR

COD. ART.	DESCRIPCIÓN	MARCA	REFERENCIA	CANT.	PRECIO	TOTAL
0014014100209	BARRAS 10X10X200 T.2000 S.HSS+CO	IMPERO		4.00	Bs 329.60	Bs 1.318.4

Despachado Almacen  
11 / 05 / 2012

OBSERVACIONES

SUB-TOTAL		Bs 1.318.4
DESCUENTO		Bs 0.0
FLETE		Bs 0.0
IVA 12% SOBRE	Bs 1.318.40	Bs 158.2
TOTAL		Bs 1.476.6

Impreso por: Tipografía y Litografía "San José", C.A. - RIF: J-30157895-3 - Av. Bolívar Norte, Calle 135, C.C. Galería Los Sauces, Nivel P.B., Local "G", Sector Los S  
Valencia - Edo. Carabobo - Tel/Fax: (0241) 8227779 - e-mail: tiposan@cantv.net - Autorizado por N° Providencia: SENIAT/10/00266 - de Fecha 19-02-2008 - REGIÓN CEI  
Cantidad de FORMAS LIBRE emitidas 2000 - Control desde el N° 00-00023001 - hasta el N° 00-00025000 - IMPRESO EL 01-02-  
ESTA FORMA LIBRE VA SIN TACHADURAS NI ENMENDADURAS

ORIGINAL CLIENTE