

**Influencia de los tratamientos térmicos a temperaturas intercríticas
IHT y tratamientos criogénicos y un posterior revenido
de 15, 30 y 45 minutos a la resistencia a la fatiga de un acero AISI/SAE
“4140”**

**LUIS DANIEL PERALTA MAHECHA
JUNIOR MESIAS MORENO GONZALEZ**

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD TECNOLÓGICA

INGENIERÍA MECÁNICA

BOGOTÁ D.C.

2017

**Influencia de los tratamientos a temperaturas intercríticas IHT y
tratamientos criogénicos y un posterior revenido de 15, 30 y 45 minutos a
la resistencia a la fatiga de un acero AISI/SAE “4140”**

**LUIS DANIEL PERALTA MAHECHA
JUNIOR MESIAS MORENO GONZALEZ**

TESIS DE GRADO PARA OPTAR EL TITULO DE INGENIERO MECANICO

TUTOR: CARLOS ARTURO BOHORQUEZ AVILA

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD TECNOLÓGICA

INGENIERIA MECANICA

BOGOTÁ D.C.

2017

Tabla de Contenido

RESUMEN	7
ABSTRACT.....	8
1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. JUSTIFICACION	10
3. OBJETIVOS	11
3.1. OBJETIVO GENERAL	11
3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	11
4. MARCO NORMATIVO	12
5. REFERENCIA TEORICA.....	13
5.1 Tratamiento térmico	13
5.2 Temple.....	13
5.3 Temperatura y tiempo de sostenimiento.....	14
5.4 Medios de enfriamiento	15
5.5 Revenido	15
5.6 Tratamientos de criogenia	17
5.7 Transformaciones de fase.....	17
5.7.1 La martensita	17
5.7.2 Ferrita	18
5.7.3 La austenita	19
5.7.4 Transformación de austenita retenida	19
5.7.5 Precipitación de carburos secundarios.....	19
5.8 Resistencia a la fatiga	19
5.8.1 Determinación del límite de fatiga	20
5.8.2 Características de las roturas por fatiga.....	21
5.8.3Influencia del tratamiento térmico en la fatiga.....	21
5.8.4 Tipos de Fractura	22
5.9 Acero AISI/SAE 4140	23
5.9.1 Efectos de los elementos de aleación	24
5.9.2Cromo (Cr):	24
5.9.3 Molibdeno (Mo):	24
5.9.4 Aplicaciones:.....	24
5.9.5 Tratamiento: Temperaturas (°C)	24
6. METODOLOGIA	25
6.1 Pasos a seguir para la realización del proyecto	25
6.2 Recapitulación de la metodología usando diagrama de flujo:.....	30
El siguiente diagrama resume los métodos usados en el proyecto desde el inicio hasta la conclusión final del trabajo.	30
7. RESULTADOS	31
7.1Análisis de composición por espectrometría.....	31
7.2Análisis de carga	33
7.3 Calculo de cargas	34
7.4 Resultado pruebas de fatiga.....	36
7.5 Toma de durezas	37
7.6 ANÁLISIS METALOGRAFICO	41
7.7 ANÁLISIS MICROSCOPIA DE BARRIDO SEM	46
7.8 ANALISIS DE FRACCION VOLUMETRICA	51
7.9 ANALISIS DE LA FRACTURA EN CADA TRATAMIENTO	54
TERMICO DE REVENIDO.....	54
8. CONCLUSIONES	60

9. BIBLIOGRAFÍA	61
10. RECOMENDACIONES	63
11. Anexos	64
11.1 Resultados de prueba de composición química.	64

Contenido de imágenes

Imagen 1: <i>Secuencia tratamiento térmico temple</i>	14
Imagen 2: <i>Secuencia tratamiento térmico revenido</i>	16
Imagen 3: <i>Curvas de revenido de los aceros Fuente: Norton, (Cuarta edición), "Diseño de máquinas un enfoque integrado", Ed. Pear</i>	16
Imagen 4: <i>Microestructura de la martensita "manual de tratamientos térmicos</i>	18
Imagen 5: <i>Microscópica (x 1000). Morfología equiaxial corresponde a granos poligonales de ferrita de ejes aproximadamente iguales "manual de tratamientos térmicos.....</i>	18
Imagen 6: <i>Grafica resistencia a la fatiga vs resistencia a la tensión.: Pearson, 2011, P (259)..</i>	21
Imagen 7: a) <i>Simplex en superficie de fractura de disco de sierra de acero para herramientas.</i> b) <i>Inclusiones de sulfuro como puntos de nucleación de cavidades</i>	22
Imagen 8: a) <i>Patrón de plumas en un cristal de acero al cromo fracturado por clivaje. b) Escalones de clivaje en una aleación Al-Cu fracturada que falló por fractura transgranular bajo corrosión-tensión</i>	23
Imagen 9: <i>Dimensiones de la probeta según maquina universidad distrital Francisco José de caldas</i>	26
Imagen 10: <i>Medidas de la probetas de fatiga tolerancia 0.011mm</i>	26
Imagen 11: <i>Aplicación tratamiento criogénico</i>	27
Imagen 12: <i>Aplicación prueba revenido 400°C modo de enfriamiento aire</i>	27
Imagen 13: <i>Cargas que se usaron para el ensayo de fatiga, al lado izquierdo carga de 1020 N, al lado derecho carga de 1100N</i>	28
Imagen 14: <i>Preparación de la muestra del material para realizar análisis metalográfico</i>	28
Imagen 15: <i>Toma de micro durezas probetas maquina shinadzu hmv-2</i>	29
Imagen 16: <i>Toma de resultados estetoscopio y microscopio óptico</i>	29
Imagen 17: <i>Microscopio electrónico de barrido tescan vega 3</i>	29
Imagen 18: <i>toma de durezas en probetas AISI/SAE 4140</i>	37
Imagen 19: <i>Grafica de porcentajes de la fracción volumétrica de las fases en cada TT</i>	52
Imagen 20: <i>Superficie de la probeta con revenido a 45 min sometida a ensayo de fatiga.</i>	54
Imagen 21: <i>Fracturaría del material con revenido a 45 min.</i>	54
Imagen 22: <i>Superficie de la probeta con revenido a 30 min sometida a ensayo de fatiga.</i>	55
Imagen 23: <i>Fractografía del material con revenido a 30 min.</i>	55
Imagen 24: <i>Superficie de la probeta con revenido a 15 min sometida a ensayo de fatiga.</i>	56
Imagen 25: <i>Fracturaría del material con revenido a 15 min.</i>	56
Imagen 26: <i>Fractografía del material estado de suministro</i>	57
Imagen 27: <i>Superficie de la probeta con revenido a 15 min con criogenia a 24H sometida a ensayo de fatiga</i>	57
Imagen 28: <i>Superficie de la probeta con revenido a 15 min con criogenia a 48H sometida a ensayo de fatiga</i>	58
Imagen 29: <i>comportamiento de las probetas con tratamientos criogénicos mayores a 30 minutos de revenido</i>	58

Contenido de Tablas

<i>Tabla 1: Composición química acero 4140 prueba de espectrometría</i>	31
<i>Tabla 2: Resultado de temperaturas ac1 y ac3</i>	32
<i>Tabla 3: Datos obtenidos en la prueba de fatiga</i>	36
<i>Tabla 4: Toma de durezas HRC y su respectiva conversión en vickers</i>	38
<i>Tabla 5: Metalografía del acero 4140 de suministro y TT de temple</i>	41
<i>Tabla 6: Metalografía del revenido a 15 minutos, con tratamientos criogénicos a 24H y a 48H</i>	42
<i>Tabla 7: Metalografía del revenido a 30 minutos, con tratamientos criogénicos a 24H y a 48H</i>	43
<i>Tabla 8: Metalografía del revenido a 45 minutos, con tratamientos criogénicos a 24H y a 48H</i>	44
<i>Tabla 9: Microscopía electrónica de barrido acero 4140 suministro</i>	46
<i>Tabla 10: Microscopía electrónica de barrido acero 4140 templado a 770°C</i>	46
<i>Tabla 11: microscopía electrónica de barrido de la probeta revenida a 15 minutos, con tratamientos criogénicos a 24H y a 48H</i>	47
<i>Tabla 12: microscopía electrónica de barrido de la probeta revenida a 30 minutos, con tratamientos criogénicos a 24H y a 48H</i>	48
<i>Tabla 13: microscopía electrónica de barrido de la probeta revenida a 45 minutos, con tratamientos criogénicos a 24H y a 48H</i>	49
<i>Tabla 14: Fracción volumétrica del material con revenido de 15 min, y tratamiento criogénico de 24H y 48H</i>	51
<i>Tabla 15: Fracción volumétrica del material con revenido de 30 min, y tratamiento criogénico de 24H y 48H</i>	51
<i>Tabla 17: Fracción volumétrica con porcentaje de martensita y ferrita</i>	52
<i>Tabla 16: Fracción volumétrica del material con revenido de 45min, y tratamiento criogénico de 24H y 48H</i>	52

Contenido de ecuaciones

Ecuación 1: Fórmula para el cálculo de temperatura AC1	32
<i>Ecuación 2</i> Fórmula para el cálculo de temperatura AC3.....	32
<i>Ecuación 3: Formula conocida de flexión</i>	34
<i>Ecuación 4 :Formula del momento flector</i>	34
<i>Ecuación 5: Distancia al eje central para una circunferencia</i>	35
<i>Ecuación 6: Momento de inercia para un círculo</i>	35
<i>Ecuación 7: Formula flexión utilizada para calcular carga</i>	35
<i>Ecuación 8: Cálculo de la carga para un porcentaje de esfuerzo último de 63 %</i>	35
<i>Ecuación 9: Cálculo de la carga para un porcentaje de esfuerzo último de 58.5%</i>	35

Contenido de graficas

<i>Grafica 1: Diagrama de transformación isotérmica del acero IRAM 4140</i>	25
<i>Grafica 2: Tipo de probeta contra N° de ciclos</i>	39
<i>Grafica 3 :Comportamiento de la dureza respecto el tratamiento térmico</i>	40
<i>Grafica 4: Comportamiento de la dureza respecto el número de ciclos</i>	40

RESUMEN

El interés por los tratamientos térmicos se ha ido aumentando notablemente en los últimos años gracias al potencial que se tiene de generar mejoras significativas en las propiedades mecánicas en los materiales, en este proyecto se estudió la influencia de los tratamientos a temperaturas intercríticas IHT en un acero AISI/SAE 4140. Este proyecto comenzó con una prueba de espectrometría de chispa, con este dato luego se calcularon las temperaturas críticas según la fórmula de Kasatkin y se obtuvieron las temperaturas A1 y A3, después el material se realizó un temple en aceite a una temperatura de 770°C, prontamente se realizaron unos tratamientos (criogénicos) a temperaturas subcero con tiempos determinados de 24 y 48 horas y posteriormente se realizó un revenido con tiempos de 15, 30 y 45 minutos a una temperatura de 400°C, se sometió el material a pruebas de resistencia a la fatiga basadas en la máquina de ensayos de la universidad distrital Francisco José de Caldas según la norma. Se realizaron las correspondientes pruebas de fatiga con dos porcentajes de cargas diferentes, se hizo análisis de dureza, micro dureza análisis metalográfico, análisis de la fractura y microscopia sem de fractura y microestructura. Se evaluaron los resultados teniendo en cuenta el material en estado de suministro y el material tratado térmicamente. Los resultados que se obtuvieron demuestran el efecto que tiene dejar el material a temperaturas subcero con más tiempo y cómo afecta el revenido en cada tiempo a un material sometido a fatiga.

Para terminar se realizan recomendaciones necesarias para este tipo de ensayos, como se deben realizar los temples, revenidos, tratamientos criogénicos y como realizar el ensayo de fatiga para proteger la vida útil del equipo.

Palabras clave: Acero doble fase, ensayo de fatiga, tratamientos criogénicos, acero AISI/SAE 4140

ABSTRACT

The interest in thermal treatments has increased significantly in recent years thanks to the potential of generating significant improvements in the mechanical properties of materials, in this project the influence of the treatments at IHT intercritical temperatures on an AISI steel / SAE 4140. This project started with a spark spectrometer test then the critical temperatures were calculated according to the Kasatkin formula, temperatures A1 and A3 were obtained, then the material was heated to a temperature of 770 ° C and allowed to cool in oil (Cryogenic) treatments were immediately carried out with determined times of 24 and 48 hours and finally a tempering with a time of 15, 30 and 45 minutes at a temperature of 400 ° C was performed, the material was subjected to tests of Resistance to fatigue based on the testing machine of the Franciscan district university José de Caldas. The corresponding fatigue tests were performed with two percentages of different loads, hardness analysis, hardness analysis, metallographic analysis, fracture analysis and microscopy without fracture and microstructure. The results were evaluated taking into account the material in the state of supply and the heat treated material. The results obtained demonstrate the effect of leaving the material at subzero temperatures with more time and how it affects the tempering at each time to a material subjected to fatigue.

To conclude, necessary recommendations are made for this type of tests, such as temples, temperings, cryogenic treatments and how to perform the fatigue test to protect the useful life of the equipment.

Finally, recommendations are made for this type of test, such as temples, temperings, cryogenic treatments and how to perform the fatigue test to protect the useful life of the equipment.

Keywords: Double phase steel, fatigue test, cryogenic treatments, AISI / SAE 4140 steel

1. INTRODUCCIÓN

Los aceros doble fase (DP) de baja aleación con microestructuras ferrita-martensita Han sido desarrollados en las últimas décadas y Han ofrecido impresionantes propiedades mecánicas tales como comportamiento productivo y combinaciones de fuerza-ductilidad superiores. Estas propiedades favorables están definitivamente relacionadas con la Microestructuras de las cuales la matriz de ferrita blanda proporciona ductilidad, mientras que la fase de martensita dura. [1]. Ya existen aceros de doble fase estandarizados que se utilizan para aplicaciones distintas, sin embargo todavía pueden existir nuevas mejoras que se les pueden hacer a los aceros y de esta manera obtener un nuevo material. Con la combinación de un tratamiento criogénico se observara las nuevas propiedades que puede tomar un material y su capacidad de responder a diferentes entornos en donde las vibraciones el desgaste y la carga con aspectos que se ven diariamente en las maquinarias industriales. Los tratamientos criogénicos es uno de los tratamientos en los que menos se ha trabajado ya que su implementación lleva poco años ,investigaciones recientes se ha encontrado que al someter aceros aleados a un temple, posteriormente a temperaturas criogénicas (nitrógeno líquido -196°C) y luego a un revenido se produce un incremento en la dureza, se transforma austenita en martensita y también se produce la precipitación de nano carburos sobre los límites de grano alargando la vida útil del material. [2] En este trabajo se estudiara el comportamiento a las propiedades mecánicas de la fatiga y la dureza que puede tener el acero AISI/SAE 4140 al ser transformado en un acero de doble fase mediante tratamientos térmicos, al ser tratado criogénicamente y por ultimo realizar un revenido a diferente tiempo con misma temperatura de revenido

2. JUSTIFICACION

En la actualidad el estudio de los materiales es de suma importancia para la economía y el avance tecnológico nacional, en especial los materiales metálicos, por la aparición de nuevos materiales compuestos que desplazan muchas de las aplicaciones de los metales a causa de la mejora continua de características físicas, químicas, mecánicas y estructurales. Aunque con los metales también es posible mejorar las características físicas y mecánicas relativamente de una manera sencilla, una de ellas es el caso del uso de tratamientos térmicos como el temple, revenido, y criogenia ,este tipo de tratamientos permiten mejorar a nivel superficial y cambiar las propiedades de la mayoría de los metales, no todos los metales se comportan exactamente igual, ni los tratamientos se hacen en mismas condiciones, punto base para poder obtener resultados y puntos de investigación para alcanzar mejorías en algunos comportamientos físico-mecánico en los metales y tener puntos de partida para ampliación de dichos estudios.

En el caso del presente trabajo se observa con detenimiento el comportamiento del antes mencionado acero AISI 4140, por sus usos, probabilidad de falla en destinos comunes, características y facilidad para realizar tratamientos térmicos. Hace de este tipo de acero una oportunidad tentativa para poder reforzar los conocimientos y aplicabilidad en diferentes casos.

Esta propuesta puede dar comienzo a una nueva etapa en la academia, pues sería una iniciativa que permita a estudiantes de la Universidad Distrital desarrollar análisis que fomenten el campo metalúrgico en el desarrollo industrial.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar el comportamiento a la resistencia de fatiga para un acero AISI-SAE 4140 sometido a diferentes tratamientos térmicos, comparando como afecta las propiedades mecánicas el temple, el enfriamiento del ciclo criogénico y el revenido.

3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Establecer la secuencia de tiempos y temperaturas intercríticas teniendo en cuenta la composición química del acero 4140 para generar una microestructura doble fase
- Realizar análisis metalográfico de los resultados obtenidos en el material luego de llevar a cabo las pruebas.
- Realizar microscopia de barrido para observar el comportamiento de los materiales ante los tratamientos térmicos y las pruebas realizadas.
- Realizar pruebas de dureza para determinar cómo afectan sus propiedades.
- Determinar la influencia del tratamiento térmico en la resistencia a la fatiga del acero AISI 4140.

4. MARCO NORMATIVO

Los entes normativos que se van a seguir durante el desarrollo del siguiente trabajo van a ser los siguientes.

- NTC 1486 (Norma técnica colombiana), Presentación de trabajos de proyectos de grado, tesis, monografías, y otros manejos de investigación. Esta norma es para tomar en cuenta los parámetros necesarios para presentar el trabajo escrito, teniendo en cuenta márgenes, tipo de fuente, interlineado, referencias, etc. Bajo la cual se toman en cuenta las condiciones para presentar el siguiente trabajo.
- ASTM E3 – 2011 Standard Guide For Preoaration of Metallographic Specimens, en esta norma se especifican las condiciones de cómo se deben preparar las probetas para realizar el análisis metalográfico.
- ASTM E407- 2015 Standard Practice for Microetching Metal and Alloys, dicha norma indica las consideraciones a tener en cuenta para realizar el ataque químico del material a trabajar y también el tiempo y el reactivo a utilizar.
- ASTM E18 – 2016 Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials, es la norma que establece los parámetros para realizar la prueba a escala de dureza Rockwell para diferentes tipos de metales.
- ASTM E92 – 82 -2003 Standard Test Methods of Vickers Hardness of Metallic Materials, es la normativa que da los parámetros necesarios para realizar la prueba de dureza a escala vickers, donde también se incluyen que máquinas de ensayo utilizar para realizar la prueba.
- E466-96 Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials, Es la norma que da los parámetros para realizar la prueba de fatiga por flexión rotativa, da los parámetros para el tipo de probeta a utilizar, que cantidad de carga usar y demás factores para tener en cuenta.

5. REFERENCIA TEORICA

5.1 Tratamiento térmico

El Tratamiento Térmico involucra varios procesos de calentamiento y enfriamiento Para efectuar cambios estructurales en un material, los cuales modifican sus propiedades mecánicas. El objetivo de los tratamientos térmicos es proporcionar a los materiales unas propiedades específicas adecuadas para su conformación o uso final. [3]. No modifican la composición química de los materiales, pero si otros factores tales como los constituyentes estructurales y la granulometría, y como consecuencia las propiedades mecánicas. Se pueden realizar Tratamientos Térmicos sobre una parte ó la totalidad de la pieza en uno o varios pasos de la secuencia de manufactura. En algunos casos, el tratamiento se aplica antes del proceso de formado (recocido para ablandar el metal y ayudar a formarlo más fácilmente mientras se encuentra caliente). En otros casos, se usa para aliviar los efectos del endurecimiento por deformación. Finalmente, se puede realizar al final de la secuencia de manufactura para lograr resistencia y dureza. [4].

5.2 Temple

El temple es un TT (tratamiento térmico) que permite mejorar las propiedades mecánicas, aumentar la dureza y la resistencia de un acero, con un calentamiento y un enfriamiento a condiciones controladas. El revenido TT (tratamiento térmico) es un tratamiento posterior al temple el cual disminuye la dureza y mejora tenacidad del mismo, consiste en calentar el material a una temperatura menor a A1 enfriándola en aire, agua o aceite. Este modifica los efectos del temple, disminuye la dureza y resistencia generada por la martensita producida por el temple, pero mejora la tenacidad y elimina las tensiones internas que adquieren siempre los aceros templados. [5]

Para la fabricación de piezas que necesitan una dureza especial que están en constante fricción y contacto como es el caso de los piñones, es necesario mejorar la resistencia al choque (Resiliencia). Mientras mayor sea la temperatura del revenido aumentara la resiliencia. Es necesario conocer el material y su aplicación para poder efectuar un tratamiento adecuado y así conocer las condiciones del temple y la de revenido

Para poder aplicar cualquier tratamiento térmico en aceros se requieren conocimientos metalúrgicos, criterios propios de la ingeniería relacionada con materiales (mecánica, metalúrgica).

La formación de martensita está influenciada por las condiciones del tratamiento térmico y las características de la pieza a tratar: temperaturas, velocidades de enfriamiento y calentamiento, influencia del medio de enfriamiento, los tamaños del grano, influencia producida por el tamaño de la pieza.

La siguiente figura muestra un ejemplo de los tiempos de secuencia de un acero que fue templado encima Ac_3 cercano a temperaturas de austenización.

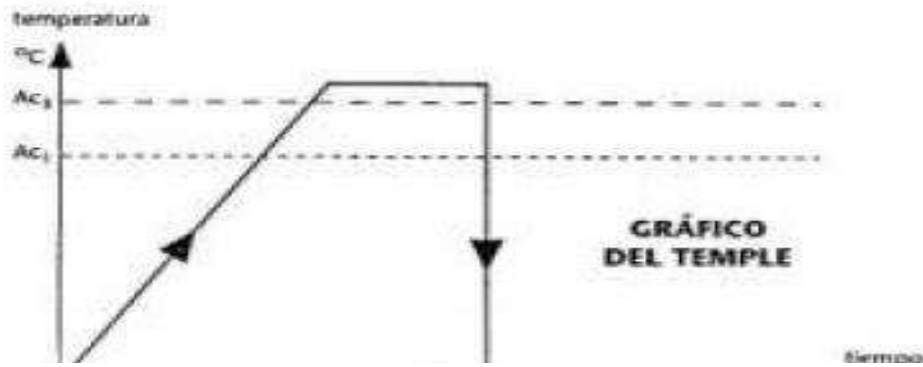


Imagen 1: Secuencia tratamiento térmico temple

5.3 Temperatura y tiempo de sostenimiento

En el temple todos los componentes del material influyen y es importante conocer los porcentajes que forman el acero para establecer una temperatura apropiada para realizar el TT, el estudio para poder determinar estas temperaturas es complejo, en algunos casos se presentan unas fórmulas para obtener los valores en °C o °F más cercanos para A1 y A3 (GORNI, 2015)

EL tiempo de sostenimiento se tiene cuando el estado austenítico para ello también es necesario tener una temperatura uniforme comienza a contar el tiempo real de sostenimientos, el tiempo depende del grado de disolución de los carburos deseados. Como los aceros cuentan con carburos diferentes, el tiempo de sostenimiento es diferente para cada acero.

Los aceros con bajas y medias cantidades de carbono y aleaciones fácilmente solubles requieren un tiempo de permanencia de sostenimiento relativamente bajo, es necesario un tiempo aproximadamente de 20 minutos para aceros con secciones transversales circulares menor a 25 mm de diámetro, sobre este se aumenta el tiempo según las dimensiones de la bar

5.4 Medios de enfriamiento

El medio para realizar el enfriamiento es muy importante porque se requiere de un medio ideal, la elección del medio de enfriamiento muestra la rapidez con la que se enfría la pieza, con agua soluciones acuosas para tener altas velocidades y permite obtener unas durezas muy elevadas. En cambio con los enfriamientos en aceites, aire, en sales etc. Se tienen niveles de velocidad y de dureza intermedios según se requiera, lo usual es propiciar un medio de enfriamiento lo menos energético de esta manera se consigue una estructura martensítica y una dureza máxima compatible con la composición.

Los siguientes son los medios de enfriamientos comunes según la severidad del temple.

1. Solución acuosa del 10% de cloruro de sodio (salmuera)
2. Agua del grifo.
3. Sales fundidas o líquidas.
4. Aceites
5. Aire

5.5 Revenido

El revenido o regulación y el recocido son tratamientos térmicos que se realizan después del temple y se utilizan principalmente para reducir las tensiones internas que posee el acero martensítico después del temple. En el revenido se calienta la pieza a una cierta temperatura menor a la temperatura de temple y de esta manera también se reduce la fragilidad del acero aunque implique perder un poco de dureza. Los cambios estructurales que causan el revenido siendo ya nombrado anteriormente funciones del tiempo y la temperatura siendo la temperatura más importante, debe tenerse en cuenta que el revenido no es un proceso de endurecimiento sino el opuesto, entonces un revenido consiste básicamente en “suavizar” un acero que ha sido endurecido mediante un tratamiento térmico proporcionándole ductilidad por el recalentamiento.

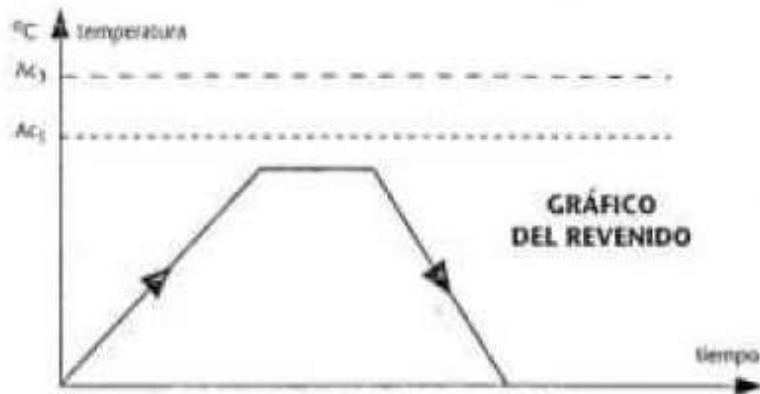


Imagen 2: *Secuencia tratamiento térmico revenido*

La siguiente imagen es el bosquejo de cómo realizar los tratamientos de revenido se utilizan a temperaturas por debajo de ac_1 y el medio de enfriamiento es en aire hasta el punto que llegue a temperatura ambiente.

Generalmente las zonas de revenido se encuentran entre las temperaturas de 204 y 246 C constituye una línea divisoria entre el revenido que se debe dar al acero para darle una gran dureza.

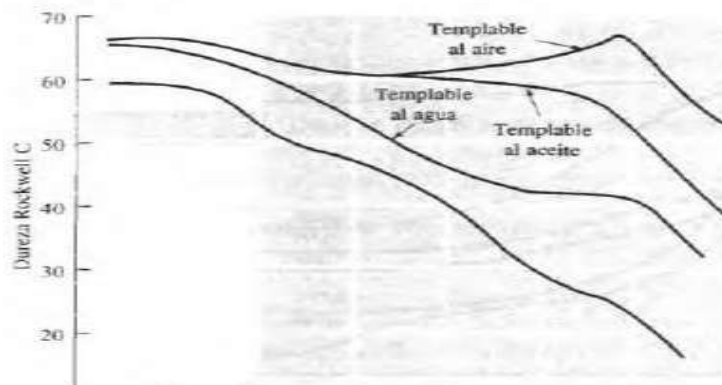


Imagen 3: *Curvas de revenido de los aceros Fuente: Norton, (Cuarta edición), "Diseño de máquinas un enfoque integrado", Ed. Pear*

Esta imagen fue tomada del libro "diseño de máquinas un enfoque integrado" y describe como con cada tipo de templado el comportamiento de la dureza varia en esta tabla los tipos de enfriamientos utilizados son el agua el aceite y el aire cada uno varia el comportamiento del material de tal manera que varíen sus propiedades mecánicas

5.6 Tratamientos de criogenia

El término criogenia se deriva del griego “cryos”, que significa “frío”, también es conocido como procesamientos criogénicos o criotratamientos, los cuales también tienen el objetivo de modificar su microestructura, aliviar tensiones residuales, modular la precipitación de partículas de segunda fase o completar las transformaciones martensíticas, pueden encontrarse diferentes clases de tratamientos de este tipo. Dentro de este tipo de tratamientos, pueden encontrarse distintas clases, dependiendo de la temperatura a la que se vaya a utilizar, también se puede conseguir un aumento de dureza, un refinamiento en la distribución de carburos y lograr un alivio en las tensiones residuales. En los tratamientos térmicos con criogenia se emplean etapas de enfriamiento a temperaturas muy por debajo de la temperatura ambiente y usualmente se utilizan como complemento de los tratamientos térmicos que se utilizan tradicionalmente para mejorar las propiedades mecánicas del material. Los primeros ensayos con tratamientos criogénicos se empiezan a dar desde la segunda guerra mundial donde se empezaron a emplear para incrementar la vida útil de corte, luego en la década de 1970 se empezó a utilizar en la industria norteamericana y se empezó a dar lugar a una serie de líneas de investigación, entre las principales aplicaciones de estos tratamientos es mejorar la resistencia al desgaste y la estabilidad dimensional de los elementos mecánicos, recientemente se han ido aplicando a válvulas, engranajes y herramientas de corte como instrumentos quirúrgicos. [6]. Actualmente se están desarrollando nuevos campos de aplicación, como estudios sobre la resistencia a la fatiga, modificación sobre sus propiedades eléctricas, inclusive sobre propiedades de los polímeros y materiales compuestos. [7].

5.7 Transformaciones de fase

5.7.1 La martensita

La martensita en los aceros al carbono es una fase meta estable formada por una solución intersticial sobresaturada de cementita de hierro, de estructura tetragonal centrado en el cuerpo. La martensita formada por el proceso de temple se denomina martensita alfa en la siguiente imagen se aprecia una metalográfica de ella

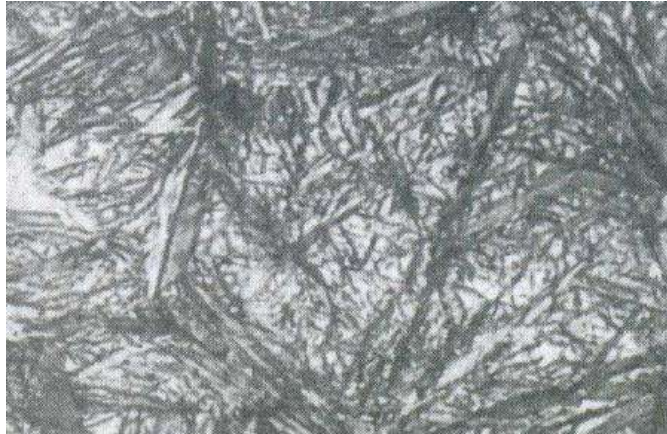


Imagen 4: Microestructura de la martensita “manual de tratamientos térmicos

5.7.2 Ferrita

Es una solución sólida que se encuentra entre las temperaturas intercríticas y una estructura cristalina cubica centrada en el cuerpo, es el constituyente más blando del acero, puede aparecer de diferentes maneras como elemento que acompaña a la perlita como elemento proeutectoide en aceros con $< 0,40\% \text{ C}$ o también en aceros con $0,40\% < \text{C} > 0,80\%$.Admite hasta un $0,021\% \text{ C}$ en solución a la temperatura eutectoide. Es el constituyente más blando del acero. Su resistencia es de 28 Kg/mm^2 ($2,7 \text{ MPa}$). Es ferromagnético siendo su temperatura de Curie 768°C . A partir de esta temperatura hasta los 910°C su comportamiento es paramagnético, por lo que antigua y equivocadamente se le creyó otra fase denominándosele hierro beta. [8] la siguiente imagen muestra una morfología equiaxial corresponde a granos poligonales de ferrita que se observa de color blanco.

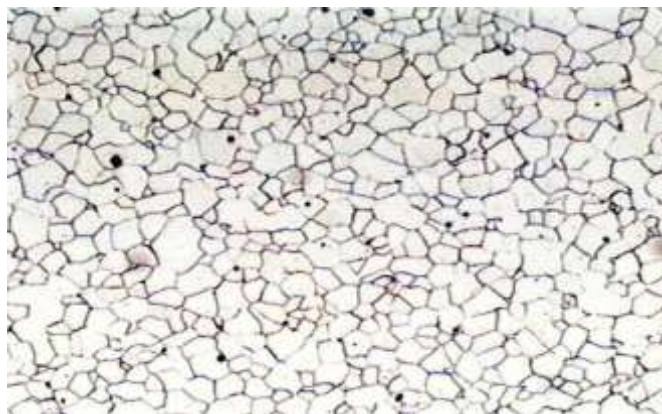


Imagen 5: Microscópica (x 1000). Morfología equiaxial corresponde a granos poligonales de ferrita de ejes aproximadamente iguales “manual de tratamientos térmicos

5.7.3 La austenita

Es una forma de ordenamiento distinta de los átomos de hierro y carbono. Ésta es la forma estable del hierro puro a temperaturas que oscilan entre los 900 a 1400 °C. Está formado por una disolución sólida del carbono de hierro, lo que supone un porcentaje máximo de C del 2,11%. Es dúctil, blanda y tenaz.

5.7.4 Transformación de austenita retenida

La transformación de austenita a martensita comienza a una temperatura definida, frecuentemente identificada como *Ms*. En la mayoría de los aceros la transformación es isotérmica y progresa hasta que la temperatura cae por debajo de la temperatura de finalización de transformación martensítica (*Mf*). Estas temperaturas dependen de la composición química del acero. Un acero 4130 sobre la temperatura de inicio de las transformaciones. La línea horizontal a aproximadamente 400°C representa la temperatura de inicio de la transformación martensítica (*Ms*), la cual se desplaza hacia abajo cuando el acero tiene una composición más rica en elementos aleantes. Las temperaturas de finalización de la transformación martensítica acompañan estos desplazamientos, por lo que los aceros con una concentración mayor de aleantes tienen temperaturas más bajas, pudiendo estar en muchos casos por debajo de la temperatura ambiente. [4].

5.7.5 Precipitación de carburos secundarios

El efecto que produce la criogenia sobre la precipitación de carburos aún no está definido claramente, esta modificación fue asociado a un mecanismo de eliminación de fallas en la martensita y se ha reportado en varias investigaciones en los aceros para herramientas. [5].

5.8 Resistencia a la fatiga

La vida a fatiga se puede definir como el "fallo debido a cargas repetitivas... que incluye la iniciación y propagación de una grieta o conjunto de grietas hasta el fallo final por fractura" (Fuchs, 1980). El análisis de fatiga estructural es una herramienta para evaluar la validez de un diseño, o su durabilidad, bajo condiciones de carga simples o complejas conocidas como cargas de servicio.

La fractura tiene lugar por una iniciación y un crecimiento de la o las grietas hasta que se tiene el crecimiento inestable de estas lo cual hace producir la fractura en lo que queda de la sección. Esta duración que también se llama como la duración de vida es debido al uso de la maquina en condiciones normales la cual puede ser expresada en horas [9]

Se considera generalmente la amplitud máxima de la carga o del esfuerzo que corresponde a la rotura a cierto número de ciclos, este sería el limite o resistencia limitada.

La fractura tiene lugar por una iniciación y un crecimiento de la o las grietas hasta que se tiene el crecimiento inestable de estas lo cual hace producir la fractura en lo que queda de la sección. Esta duración que también se llama como la duración de vida es debido al uso de la maquina en condiciones normales la cual puede ser expresada en horas o en otros casos es llamado en kilómetros por recorrer[9]

5.8.1 Determinación del límite de fatiga

En los ensayos de fatiga se limita muchas veces el número de ciclos cuando se dispone de máquinas de ensayo con frecuencias relativamente bajas cuando no se dispone del tiempo necesario. Al hacer estos ensayos se debe determinar la amplitud del esfuerzo alternado ya que el límite de fatiga se daría en número de ciclos si se llevan sobre un diagrama de Wohler que es el de esfuerzo vs número de ciclos hay una parte donde la probeta no se rompe la cual es una parte recta la cual se dice que es el límite de fatiga del material, en los aceros se encuentra entre un rango de 350MPa a 450 MPA y es superior al millón de ciclos (*Isabel., 2011*).Hay varios factores que afectan la resistencia a la fatiga como por ejemplo: concentradores de esfuerzos, sensibilidad, esfuerzos fluctuantes flexión y torsión. En el caso de los metales ferrosos la curva S-N se hace horizontal en algún punto y puede estar entre los 10^6 y 10^7 ciclos, los materiales no ferrosos no presentan un límite de fatiga o dicho de otra manera una vida infinita. El límite de fatiga suele variar según el esfuerzo que se le esté dando al material por ejemplo en el caso de la flexión rotativa, plana o alternada existe cierta diferencia por ejemplo para esfuerzos axiales el límite de fatiga es más bajo que para esfuerzos de tensión alternada y esta diferencia puede ser en un 30% esto también depende de la dimensión del material y de sus propiedades. [10].La siguiente imagen representa la relación que hay entre la resistencia a la fatiga y la resistencia última a la tensión donde aparecen distintos factores dependiendo del porcentaje de carga.

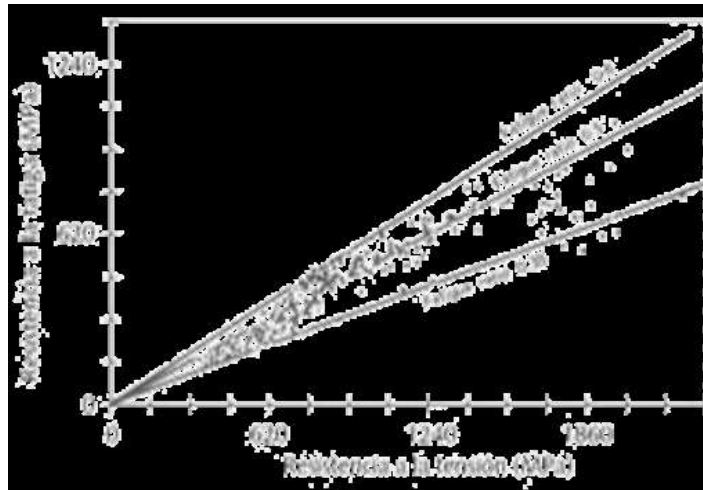


Imagen 6: Grafica resistencia a la fatiga vs resistencia a la tensión.: Pearson, 2011, P (259).

5.8.2 Características de las roturas por fatiga.

Siempre que haya esfuerzos alternantes se efectuara el crecimiento de la grieta y en algún punto la grieta va a crecer lo suficientemente para aumentar la concentración de esfuerzos hasta llegar a la fase de ruptura súbita. En las tres fases de la falla por fatiga se puede observar una serie de etapas: la primera es cuando se inicia las microgrietas producidas por la deformación plástica del material que se extienden de dos a cinco granos alrededor del origen y esta microgrieta no se puede ver, en la segunda etapa las microgrietas se convierten en macro grietas y se forman superficies paralelas en forma de mesetas separadas por crestas longitudinales “Por lo general, las mesetas son suaves y normales a la dirección del esfuerzo máximo en tensión, estas superficies pueden tener marcas oscuras y claras conocidas como marcas de playa, o marcas de concha [11] Durante la aplicación de las cargas las superficies con grietas se abren y se cierran creando fricción entre sí y las marcas de playa suelen aparecer cuando se cambia el nivel de frecuencia de carga, en la etapa final ocurre cuando el material no puede soportar las cargas y se produce la ruptura súbita, la ruptura puede ser dúctil y/o frágil y ahí se pueden observar unas líneas llamadas líneas de chevron que suelen apuntar hacia los orígenes de las grietas iniciales.

5.8.3 Influencia del tratamiento térmico en la fatiga

Cuando se crean esfuerzos residuales a causa del endurecimiento, configurados de la manera correcta pueden resultar beneficiosos para la resistencia a la fatiga aunque puede ser en casos como aplicar un tratamiento térmico como un endurecimiento completo puede afectar la resistencia porque se crearían varios esfuerzos residuales de tensión (Héctor & Edgar., 2002).

Al realizar un tratamiento térmico de temple y revenido en los aceros, entre mayor sea la temperatura del revenido menor va a ser su resistencia a la fatiga debido a que la dureza del material puede influir ya que a mayor temperatura de Revenido su dureza va a ser menor lo que puede afectar a la resistencia y en el caso del temple la dureza y resistencia a la fatiga suele ser mayor.

5.8.4 Tipos de Fractura

La fractura consiste en la propagación de la fisura a través de una pieza hasta su separación en una o varias partes, las cuales pueden clasificarse como dúctiles, por clivaje o intergranulares. La fractura que es dúctil ocurre cuando hay nucleación, crecimiento y coalescencia de micro cavidades que se encuentran en partículas de segunda fase. Estas cavidades se pueden ocasionar por la fractura de una partícula o la descohesión de la misma o por la fractura de un borde de grano. [13].

Lo que se puede observar en una fractura dúctil son las superficies libres en una inclusión o partícula de segunda fase, cuando se da el crecimiento de una cavidad debido a la deformación plástica y el estado hidrodinámico de tensiones y finalmente la coalescencia. La nucleación de cavidades es la etapa crítica de proceso de fractura de materiales en las inclusiones que se encuentran adheridas a la matriz. [14]. En ocasiones la fractura se produce al poco tiempo de la formación de las cavidades cuando es el material en que las cavidades pueden crecer más fácilmente, la falla del componente suele ser un producto de la inestabilidad plástica. El aspecto típico de una fractura dúctil se presenta en la figura

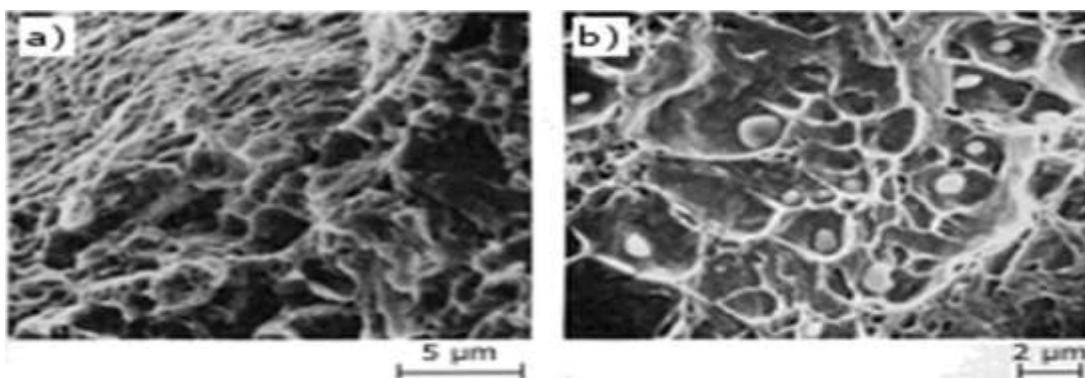
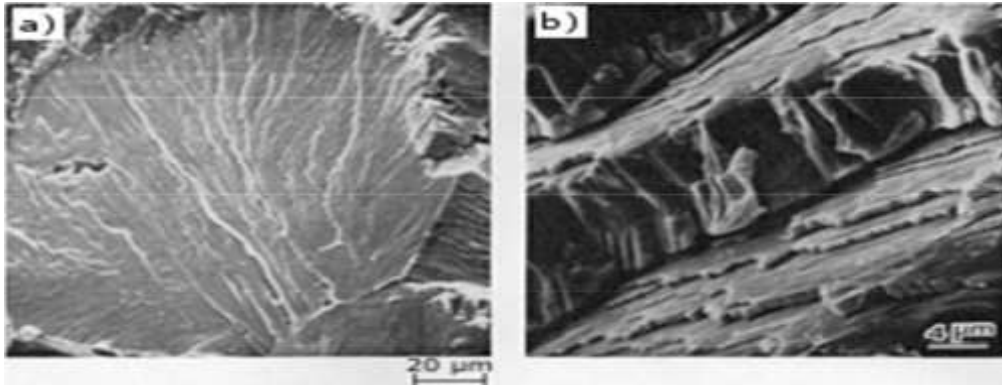


Imagen 7: a) Simplex en superficie de fractura de disco de sierra de acero para herramientas. b) Inclusiones de sulfuro como puntos de nucleación de cavidades

Cuando se dan las fracturas por clivaje implican la separación del sólido a lo largo de planos cristalográficos específicos y la fisura se propaga de forma transgranular, este tipo de fractura se asocia a la fractura frágil, pero también se dan casos en los que la fractura es por crecimiento dúctil de la fisura, en la siguiente figura se pueden observar las características principales de la fractura por clivaje.

Imagen 8: a) Patrón de plumas en un cristal de acero al cromo fracturado por clivaje. b) Escalones



de clivaje en una aleación Al-Cu fracturada que falló por fractura transgranular bajo corrosión-tensión

Fractura dúctil generados cuando el material está sometido a la combinación de esfuerzos mecánicos y alta temperatura. Otra modalidad de fractura muy frecuente es la figuración bajo corrosión-tensión, que se caracteriza por el crecimiento tanto de forma transgranular como intergranular de la fisura hasta que alcanza una longitud crítica y se produce la descohesión de la pieza [15]

5.9 Acero AISI/SAE 4140

El acero AISI-SAE 4140 contiene una cantidad de carbono nominal del 0.38 al 0.43% de Carbono (acero de medio carbono) al cromo molibdeno. Que por su relación costo beneficio en usos tales como:

Engranajes, ejes, cigüeñales, ejes reductores, tornillos de alta resistencia, destornilladores, llaves de mano, brocas, cuerpos de escariadores, etc. Es muy comercializado posee buena resistencia a la fatiga, alta templabilidad, también una gran capacidad al impacto y resistencia a la abrasión. Este acero es utilizado en elementos sometidos a condiciones de fatiga por sus buenas propiedades mecánicas, se le hacen pruebas para tener la confiabilidad de que es un material óptimo para un uso deseado por un ingeniero en la industria [16].

5.9.1 Efectos de los elementos de aleación

5.9.2 Cromo (Cr):

El cromo es un elemento de aleación menos costoso que el níquel y forma carburos simples (Cr_7C_3 y Cr_4C) o carburos complejos $[(\text{FeCr})_3\text{C}]$. Estos carburos tienen alta dureza y buena resistencia al deterioro. El cromo es soluble hasta 13% en hierro gamma y tiene solubilidad ilimitada en ferrita alfa. En los aceros de bajo carbono, el Cr tiende a entrar en solución incrementando de esta manera, la resistencia y la tenacidad de la ferrita.

5.9.3 Molibdeno (Mo):

El molibdeno es un elemento de aleación relativamente costoso, tiene una solubilidad limitada en hierros gamma y alfa, y es un fuerte formador de carburos. Además ejerce un fuerte efecto de templabilidad y, de manera semejante al cromo, aumenta la dureza y resistencia a alta temperatura de los aceros. Los aceros con molibdeno son menos susceptibles al fragilizado debido al revenido, que los demás aceros aleados.

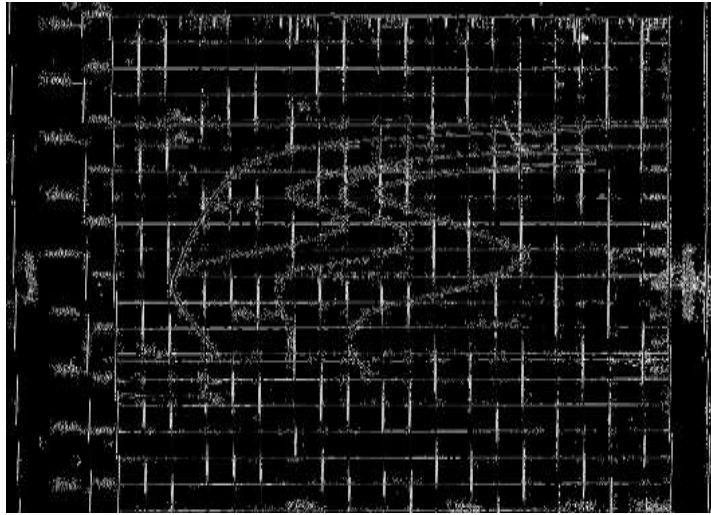
Los aceros al Cromo-Molibdeno (serie 41xx) son relativamente baratos y poseen buenas características de endurecido profundo, de ductilidad y de capacidad para soldarse.

5.9.4 Aplicaciones:

Se ha empleado ampliamente para recipientes sujetos a presión, partes estructurales de los aviones, ejes de automóviles, piezas forjadas y/o mecanizadas que se usan en estado templado y revenido, como por ejemplo, bulones de alta resistencia.

5.9.5 Tratamiento: Temperaturas (°C)

Las curvas TTT representan a la temperatura en función del tiempo para una determinada concentración de hierro y carbono para velocidades de enfriamiento o calentamiento elevadas



Grafica 1: Diagrama de transformación isotérmica del acero IRAM 4140

Estas curvas, al igual que el diagrama hierro-carbono, pueden ser modificados por agregado de aleantes en el acero. En el caso de las curvas TTT, los aleantes desplazan la curva hacia la derecha y hacia abajo. Dependiendo del tipo se puede desplazar más una zona que otra y así, mediante un enfriamiento sencillo se puede lograr la estructura deseada. . [17]

6. METODOLOGIA

6.1 Pasos a seguir para la realización del proyecto

1. Se adquiere el material con proveedores autorizados
2. Se contrata la prueba que permita conocer la composición del material y asegurar que esta cumpla con la norma AISI/SAE4140 este procedimiento se basa en una prueba de espectrometría la cual se realiza en la Universidad

Espectrometría: mediante la evaporización de una muestra y el análisis de chispa que forma los átomos que se desprenden en el proceso son excitados y emiten haz de luz este haz de luz es recibido por un detector óptico fotosensible trasforma la luz en señales electrónicas y reconoce las cargas y por ende la composición.

3. se fabrican las probetas según la norma ASTM E466-96 dejando la tolerancia adecuada como lo especifica la maquina



Imagen 9: Dimensiones de la probeta según maquina universidad distrital Francisco José de caldas



Imagen 10: Medidas de las probetas de fatiga con tolerancia de 0.011 mm

4. Seguido se realiza el cálculo para el tratamiento térmico, se halla A1 el resultado es $742.422916^{\circ}\text{C}$ y A3 con un resultado igual a $796.818526^{\circ}\text{C}$ para poder llegar a una temperatura intercrítica, se realiza el tratamiento térmico de temple en la mufla ABTECH LEF 205p-0 con un valor de temperatura promedio entre A1 y A3 es 770°C , se enfría la probeta en aceite para evitar las deformaciones que producen hacer el enfriamiento en agua, este procedimiento se repite con todas las probetas.

5. Se sumergen las probetas a nitrógeno líquido a temperatura de -196°C usando dos tiempos de 48 y 24 horas se sacan y se deja que llegue a su temperatura ambiente.



Imagen 11: Aplicación tratamiento criogénico

6. Por medio un equipo, durómetro El durómetro GNEHM Swiss Rock de la Universidad Distrital se mide la dureza de la probeta en escala Rockwell, esta prueba es importante porque refleja si el cambio se presentó correctamente. Después de tener los resultados indicados se procede a realizar el revenido de las probetas criogenizadas, el revenido a tres tiempos diferentes 15min, 30min, 45 min, se hace a 440°C en la mufla Labtech/LEF-Pde la Universidad Distrital.



Imagen 12: Aplicación prueba revenido 400°C modo de enfriamiento aire

7. Se realiza el ensayo de fatiga para ello se usan una máquina de fatiga shimadzu se averigua el límite elástico del acero AISI /SAE 4140 y se colocan dos cargas diferentes por cada tratamiento térmico para que logren hacer un esfuerzo mayor al 50 % del límite elástico y se registran los datos de los números de ciclos que se registran en la máquina de ensayos.



Imagen 13: Cargas que se usaron para el ensayo de fatiga, al lado izquierdo carga de 1020 N, al lado derecho carga de 1100N

8. se lijan y se brillan la probetas en el equipo de sistema de esmerilado y pulido metkon forcipol 2v, luego se realiza el ataque químico con la composición según la norma ASTM E407- 2015, seguido se revisa en el microscopio inversor Olympus PME3 de la Universidad Distrital la microestructura del mismo que se evidencie la existencia de martensita, la cual es producida por el temple y obtenga las dos fases (martensita y ferrita)



Imagen 14: Preparación de la muestra del material para realizar análisis metalográfico

9. Se toman microdureza en las probetas con microdurómetro shimadzu hmv



Imagen 15: Toma de micro durezas probetas maquina shinadzu hmv-2

10. Se observa las probetas por medio de un estetoscopio para analizar las fallas de las probetas, también se mira el comportamiento microestructural a través del microscopio óptico



Imagen 16: Toma de resultados estetoscopio y microscopio óptico

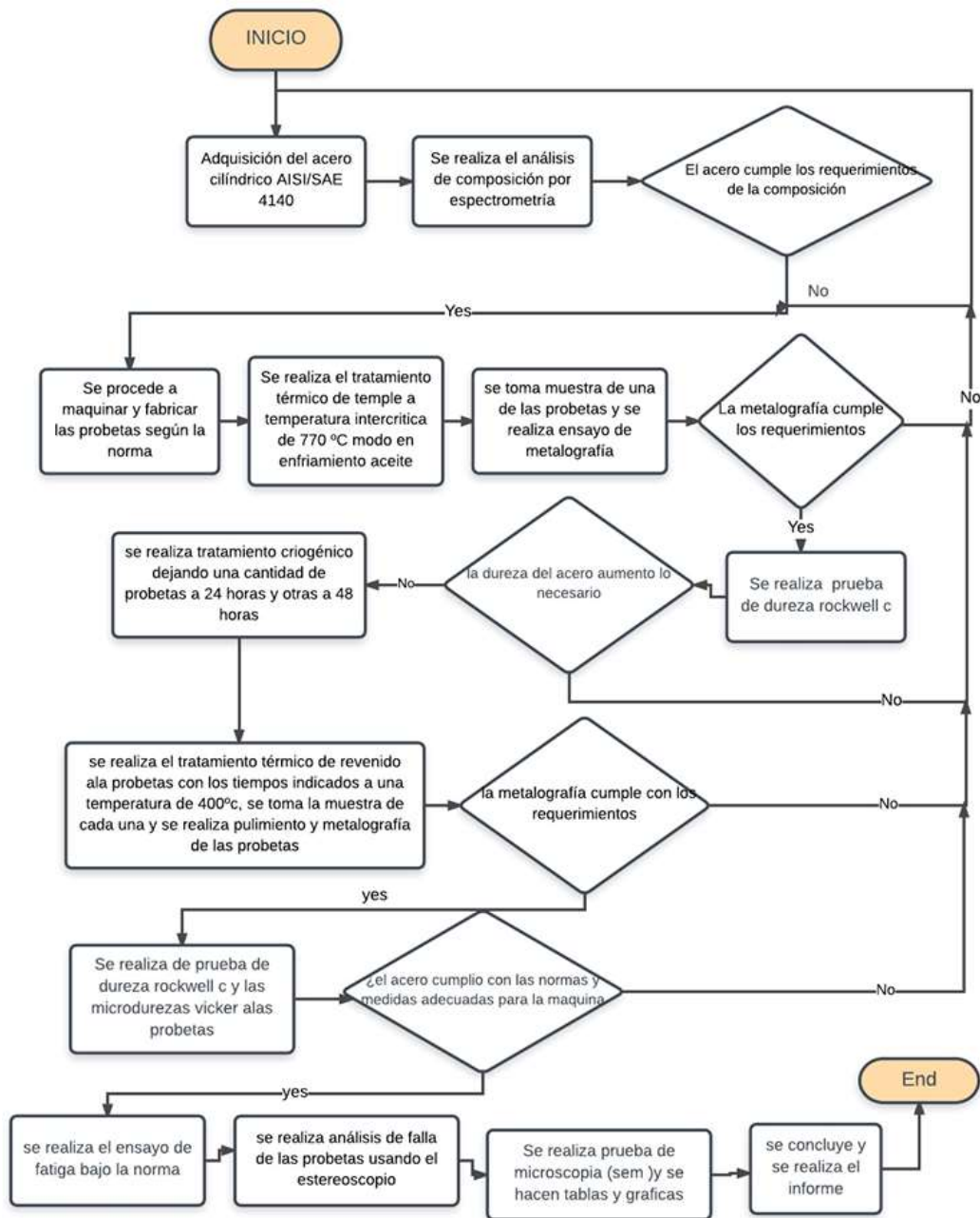
12. Se hace la prueba microscópica de barrido sem en el equipo Tescan Vega 3 de la Universidad Nacional para observar mejor el comportamiento del material y de las fallas.



Imagen 17: Microscopio electrónico de barrido tescan vega 3

13. se procede a realizar cálculos análisis se concluye y se comienza a redactar el documento

6.2 Recapitulación de la metodología usando diagrama de flujo:



El siguiente diagrama resume los métodos usados en el proyecto desde el inicio hasta la conclusión final del trabajo.

7. RESULTADOS

7.1 Análisis de composición por espectrometría.

Se realizó un análisis de espectrometría de chispa para obtener los datos de la composición del acero para poder realizar los cálculos y tener los valores de las temperaturas AC1 y AC3. Esta consistió en emitir un arco eléctrico que pasa por la muestra calentándola a una temperatura tal que se excitan los átomos en un ambiente controlado por una atmósfera de argón, los cuales emiten una luz con una longitud de onda diferente según cada material las cuales son detectadas y se da un análisis cuantitativo el cual da un valor para cada material en la ecuación y obtener los resultados [18] esta prueba se realizó en la universidad libre de Bogotá

ESPECTOMETRIA					
Elemento	Quema 1	Quema 2	Quema 3	Quema 4	Promedio
Fe	97,418	97,441	97,387	97,322	97,392
Si	0,178	0,179	0,186	0,189	0,183
Mo	0,174	0,172	0,175	0,18	0,175
Al	0,029	0,03	0,03	0,028	0,029
C	0,376	0,362	0,372	0,377	0,372
Cu	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
W	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
Nb	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Mn	0,781	0,775	0,793	0,797	0,786
Ni	0,016	0,016	0,017	0,017	0,016
Co	0,005	0,005	0,006	0,006	0,006
B	0,0002	0,0014	0,0003	0,0004	0,0006
Pb	0,006	0,007	0,008	0,007	0,007
Cr	0,989	0,984	0,995	1,013	0,995
Ti	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
S	0,005	0,005	0,006	0,007	0,006
V	0,002	0,002	0,003	0,003	0,0025
Sn	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Mg	0	0	0	0	0

Tabla 1: Composición química acero 4140 prueba de espectrometría

Utilizando las ecuaciones de Kasatkin procedemos a calcular las temperaturas ac1 y ac3 reemplazamos los datos de la espectrometría en la siguiente fórmula y el resultado de esta será el rango de temperaturas de aceros doble fase

$$AC1 = 723 - 7,08Mn + 37,7Si + 18,1Cr + 44,2Mo + 8,95Ni + 50,1V + 21,7Al + 3,18W + 297s - 830N - 11,5 C Si - 14Mn Si - 3,1Si Cr - 57,9 C Mo - 15,5 Mn Mo - 5,28 C Ni - 6 Mn - Ni + 6,77 Si Ni - 0,8 Cr Ni - 27,4 C V + 30,8 Mo V - 0,84 Cr^2 - 3,46 Mo^2 - 0,46Ni^2 - 28V^2$$

Ecuación 1: Fórmula para el cálculo de temperatura AC1

$$AC3 = 912 - 370C - 27,4Mn + 27,3Si - 6,35Cr - 32,7Ni + 95,2V + 190Ti + 72Al + 64,5Nb + 5,57W + 332S + 276P + 485N - 900B + 16,2C Mn + 32,3C Si + 15,4 C Cr + 48 C Ni + 4,32Si Cr - 17,3 Si Mo - 18,6 Si Ni + 4,8 Mn Ni + 40,5 Mo V + 174 C^2 + 2,46 Mn^2 - 6,86Si^2 + 0,322 Cr^2 + 9,9 Mo^2 + 1,24 Ni^2 - 60,2 V^2$$

Ecuación 2 Fórmula para el cálculo de temperatura AC3

Reemplazando con los valores encontrados en la espectrometría realizada en el acero, se hallan las temperaturas AC1 y AC3.

AC1	742.422916°C
AC3	796.818526°C

Tabla 2: Resultado de temperaturas ac1 y ac3

Los valores encontrados en la bibliografía y la ficha técnica de diferentes comercializadores de aceros, muestran valores de temperaturas intercríticas, para el acero AISI SAE 4140. Ac1 alrededor de los 750°C y el valor de Ac3 por los 790°C, con esto, se corroboran las temperaturas en el acero escogido para la investigación, estableciendo las temperaturas para los tratamientos térmicos a realizar.

Calculando estas temperaturas se escogió una temperatura de 770 °C estabilizando media hora y templando en aceite, se procedió hacer un tratamiento criogénico a temperaturas de -196 °C dejando unas probetas sumergidas a 24 horas y otras 48 horas. Se procedió hacer un revenido a una temperatura de 400°C con tiempos de sostenimiento de 15, 30 y 45 minutos dejándolos enfriar al aire.

Para conocer el comportamiento de las probetas y su relación con el tiempo de revenido, el tiempo sometidas al tratamiento de criogenia, el número de ciclos y la dureza del tratamiento térmico, en el ensayo de fatiga. Se realizaron los ensayos a 58 probetas sin contar las probetas

que no presentaron registro por problemas con las dimensiones y formas de las mismas. se hicieron dos pruebas con cada tratamiento térmico para corroborar que el comportamiento no varía con la carga, se buscaron dos cargas que realizando los cálculos se diera un esfuerzo mayor al 50% del esfuerzo de fluencia de acero 4140 y que estuviera con disponibilidad en la máquina que se fue a utilizar, las fuerzas que se utilizaron fueron 1020 N y 1100 N y se dispuso a realizar las pruebas de la siguiente manera como esta expresado en el subíndice 7.2.

7.2 Análisis de carga

Las probetas utilizadas fueron:

- 3 probetas sometidas a 1020 Newton con revenido a 15 minutos
- 3 probetas sometidas a 1100 Newton con revenido a 15 minutos
- 3 probetas sometidas a 1020 Newton con criogenia a 24 horas con revenido a 15 minutos
- 3 probetas sometidas a 1100 Newton con criogenia a 24 horas con revenido a 15 minutos
- 3 probetas sometidas a 1020 Newton con criogenia a 48 horas con revenido a 15 minutos
- 3 probetas sometidas a 1100 Newton con criogenia a 48 horas con revenido a 15 minutos
- 3 probetas sometidas a 1020 Newton con revenido a 30 minutos 3 probetas sometidas a 1100 Newton con revenido a 30 minutos
- 3 probetas sometidas a 1020 Newton con criogenia a 24 horas con revenido a 30 minutos
- 3 probetas sometidas a 1100 Newton con criogenia a 24 horas con revenido a 30 minutos
- 3 probetas sometidas a 1020 Newton con criogenia a 48 horas con revenido a 30 minutos
- 3 probetas sometidas a 1100 Newton con criogenia a 48 horas con revenido a 30 minutos

- 3 probetas sometidas a 1020 Newton con revenido a 45 minutos 3 probetas sometidas a 1100 Newton con revenido a 45 minutos
- 3 probetas sometidas a 1020 Newton con criogenia a 24 horas con revenido a 45 minutos
- 3 probetas sometidas a 1100 Newton con criogenia a 24 horas con revenido a 45 minutos
- 3 probetas sometidas a 1020 Newton con criogenia a 48 horas con revenido a 45 minutos
- 3 probetas sometidas a 1100 Newton con criogenia a 48 horas con revenido a 45 minutos
- 1 probeta sometida a 1020 Newton
Templado
- 1 probeta sometida 1100 Newton
templado
- 1 probeta sometida a 1020 Newton de suministro
- 1 probeta sometida a 1100 Newton de suministro

7.3 Calculo de cargas

Las cargas utilizadas para la prueba se obtuvieron a partir de la siguiente formula.

$$\sigma_{ut} = \frac{Mc}{I}$$

Ecuación 3: Formula conocida de flexión

Donde M es el momento flector determinado por la carga aplicada W multiplicado por la longitud

$$M = w * l$$

Ecuación 4 :Formula del momento flector

Siendo w la carga expresada en Newton y L longitud probeta dada en este caso en milímetros

C es la distancia al eje neutro

$$c = \frac{d}{2}$$

Ecuación 5: Distancia al eje central para una circunferencia

I es el momento de inercia en este caso se utilizara la de un círculo que está dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{\pi * d^4}{64}$$

Ecuación 6: Momento de inercia para un círculo

Se realizó una prueba de tensión en el material para identificar el esfuerzo ultimo a la tensión el resultado obtenido fue de 1030 MPA los porcentajes de esfuerzo para este proyecto del 63 % del esfuerzo ultimo y del 58.5%. Al tener la fórmula de flexión y los porcentajes de proceder a despejar la carga con las que se hará el ensayo de fatiga para cada una de las probetas hechas.

$$\sigma_{out} (\%) = \frac{w(N) * 100mm * 6mm}{\frac{\pi * (12^4mm)}{64}}$$

Ecuación 7: Formula flexión utilizada para calcular carga

Al despejar la carga w obtenemos

$$w = \frac{1030 \frac{N}{mm^2} (0.63\%) * 1017.87mm^4}{100mm * 6mm}$$

Ecuación 8: Cálculo de la carga para un porcentaje de esfuerzo último de 63 %

Utilizando un porcentaje del 63 % se obtiene una carga 1100N

$$w = \frac{1030 \frac{N}{mm^2} (0.585\%) * 1017.87mm^4}{100mm * 6mm}$$

Ecuación 9: Cálculo de la carga para un porcentaje de esfuerzo ultimo de 58.5%

Utilizando un porcentaje del 58.5 % se obtiene una carga 1020N

Como resultado a la prueba de fatiga con estas cargas se obtienen los siguientes resultados donde se realiza la comparación del número de ciclos que dura cada probeta con su tratamiento térmico y se toman valores de dureza en escala vickers para realizar la comparación si la dureza afecta el número de ciclos:

7.4 Resultado pruebas de fatiga

Probetas	Tiempo de revenido min	Numero de ciclos carga 1020 N	Numero de ciclos carga 1100N	DUREZA VICKERS
Probeta sin TT		26900	11700	301
Probeta revenido	15	29800	27900	432
Probeta revenido	30	27800	24300	430
Probeta revenido	45	27100	21900	428
Criogenia a 24 H				
Probeta revenido	15	31000	28900	441
Probeta revenido	30	29400	25100	433
Probeta revenido	45	27900	22000	431
Criogenia a 48 H				
Probeta revenido	15	125000	43500	441
Probeta revenido	30	90100	39800	434
Probeta revenido	45	44000	22400	432

Tabla 3: Datos obtenidos en la prueba de fatiga

Al tener estos datos se observó un mejor comportamiento en las probetas con revenidos de 15 minutos seguido de las de 30 minutos y por ultimo las de 45 minutos; las probetas con tratamientos criogénicos mejoraron la resistencia a la fatiga obteniendo una mayor vida útil y soportaron un número de ciclos mayor que solo las que tuvieron revenido. Las probetas con 48 horas de criogenia fueron las que más soportaron a estas condiciones de prueba, los valores de dureza aumentaron con respecto a las solo revenidas y las de 24 horas lo que

parece que al hacer un tratamiento criogénico con más tiempo las características microestructurales mejoran y ayudan al acero a tener una mejor resistencia. Las mejores probetas fueron las revenidas de 15 min con un tratamiento criogénico a -195°C por 48 horas el número ciclos fue de 125000 con una carga de 1020 N y con la otra carga de 1100 N 43500 es un valor bastante elevado en comparación de otras probetas con otros tratamientos. Se ve un aspecto bastante notorio pues al observar; El comportamiento de las probetas utilizadas a 48 horas aumenta de una manera más significativa con relación a las que solo se le hizo el revenido. Cabe resaltar que el uso de tratamientos térmicos de revenido también ayuda a la mejora de resistencia a la fatiga pues aumento el número de ciclos con referencia al material de suministro.

7.5 Toma de durezas

Se quiso identificar el comportamiento de la dureza en cada una de las probetas, para esto se usó un durómetro marca gnehm swiss rock de la universidad Distrital se midió cada una de las probetas, se hicieron 5 tomas de datos para cada una y al final se saca el promedio de estos valores. Para realizar un mejor análisis comparativo se dejan los valores de dureza en una escala absoluta en vickers. Se realizaron las pruebas de dureza en la maquina bajo la norma ASTM E18 – 2016 para realizar la comparación de en qué influye el valor de dureza del material con la resistencia a la fatiga, para eso se realizaron las siguientes probetas.



Imagen 18: toma de durezas en probetas AISI/SAE 4140

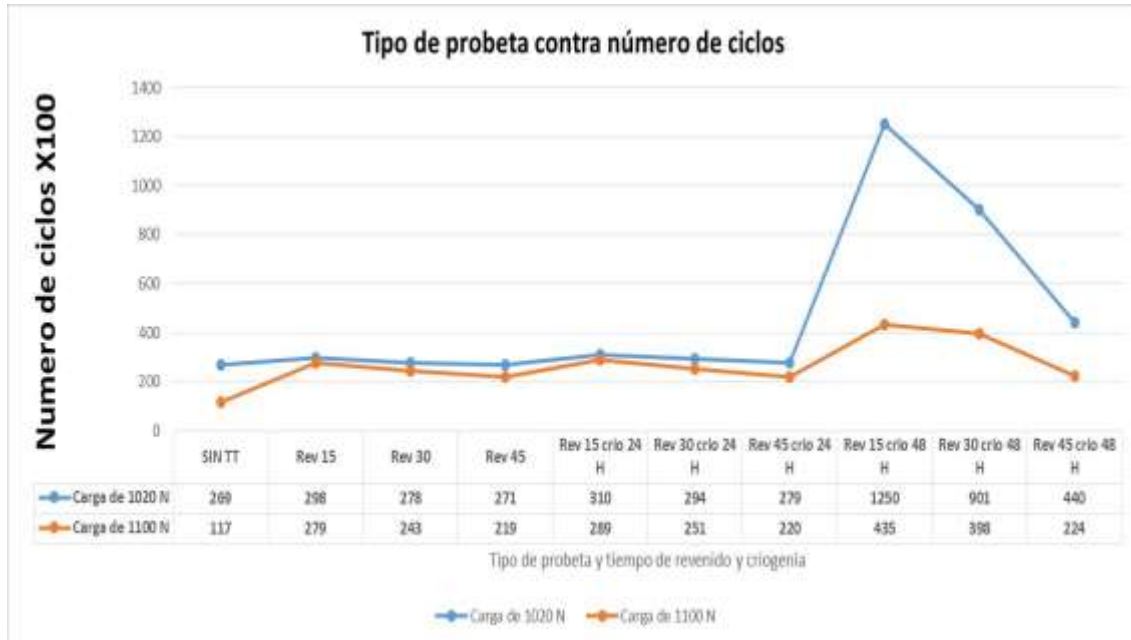
Probetas	Dureza HRC 1	Dureza HRC2	Dureza HRC 3	Dureza HRC 4	Dureza HRC 5	Promedio Total HRC	Dureza HV
Probeta sin TT	104,8 HRB	106,2 HRB	104,7 HRB	105,3 HRB	105,4 HRB	105,28 HRB	301HV
Acero Templado	53,1	53,7	54,4	53,7	54,1	53,8	572 HV
Probeta revenido 15	43,9	43,9	43,7	43,5	43,1	43,62	432 HV
Probeta revenido 30	43,5	43,7	43,2	43,5	43,6	43,5	430 HV
Probeta revenido 45	43,6	43,5	43,1	43,1	43,3	43,32	428 HV
Criogenia a 24 H							
Probeta revenido 15	44,4	44,7	43,8	44,6	44,1	44.32	441 HV
Probeta revenido 30	43,3	43,5	43,9	44,3	43,9	43,78	433 HV
Probeta revenido 45	43,8	43,4	43,1	43,3	43,2	43,36	431 HV
Criogenia a 48 H							
Probeta revenido 15	44,1	44,8	44,5	44,1	44,3	44,4	441 HV
Probeta revenido 30	44,1	44,3	44,2	43,7	43,1	43,91	434 HV
Probeta revenido 45	43,7	43,1	43,1	44,1	44,3	43,72	432 HV

Tabla 4: Toma de durezas HRC y su respectiva conversión en vickers

Para determinar la dureza del material de suministro de utilizo un identador de bola de 100 kgf mientras que para el resto de probetas se utilizó un punta identadora de 150 kgf los resultados obtenidos fueron los siguientes. En esta tabla están los valores de dureza de cada una de las probetas. La de suministro obtuvo un equivalente de 105.25 HRB que es igual a 301 HV mientras que la probeta templada tubo una dureza de 53.8 HRC igual a 572 HV en este caso se ve un aumento de dureza elevado respecto a la de suministro. Las demás probetas estuvieron sujetas a revenidos que es un aspecto importante que debe tener todo temple pues ayuda a liberar tensiones internas por ello la dureza tiende a disminuir pues material termina ablandándose. A las probetas que se le realizaron tratamiento criogénico la dureza aumento un poco respecto a las solo revenidas, este aumento no es muy relevante pero ayuda identificar nuevas

propiedades internas que pudo someterse el material al tener una temperatura subcero

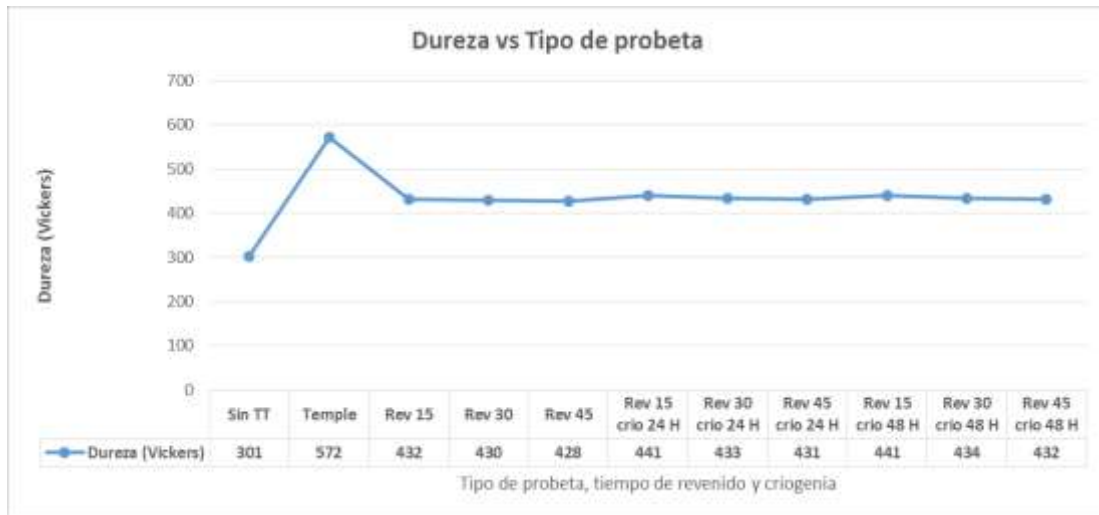
El comportamiento de la capacidad de carga y el tipo de tratamiento se aprecia en la siguiente gráfica.



Grafica 2: Tipo de probeta contra N° de ciclos

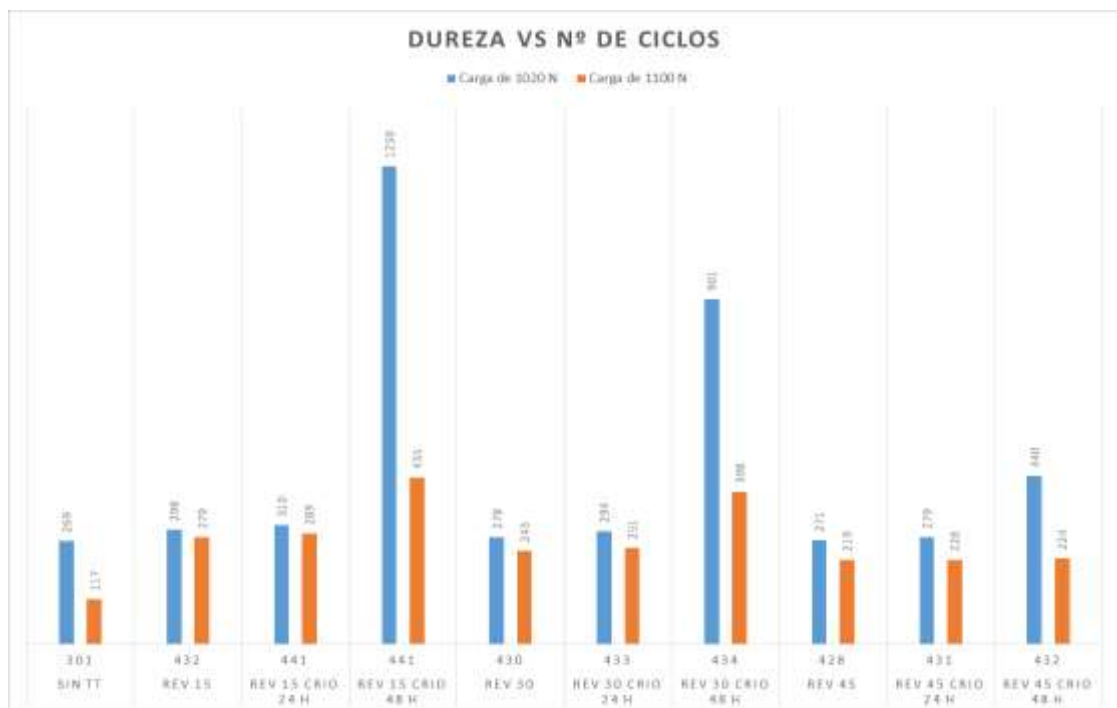
Se realizaron las pruebas de dureza en las siguientes probetas para la maquina Como resultado se evaluó que el revenido que soportó más número de ciclos fue a 15 minutos, se aprecia un efecto notorio en el tratamiento criogénico de 48 horas el cual hizo que aumentara el número de ciclos. En cambio cuando se usó el tratamiento a 24 H el número de ciclos no es tan significativo si se compara con el tratamiento a 48 H; un aspecto que se encontró fue que entre más aumentaba el tiempo de revenido era menor el número de ciclos que duraba. Se consiguió que al tomar un tiempo alto de criogenia y un tiempo bajo de revenido se daban los mejores resultados.

Al realizar el TT criogénico se observa un pequeño aumento de dureza los valores crecen respecto a las probetas solo revenidas, esto puede deberse a que con el TT de criogenia la austenita que esta retenida se transforma en martensita [20] [7]. En la siguiente grafica se da a conocer el comportamiento dado por las probetas respecto a la dureza y a su tratamiento térmico.



Grafica 3 :Comportamiento de la dureza respecto el tratamiento térmico

También se analizó el comportamiento entre la dureza y cada tipo de tratamiento térmico de las probetas, como resultado se consiguió que entre menor sea el tiempo de revenido la dureza es mayor. Al realizar el temple a una temperatura de 770°C sin revenido tiende a tener mayor dureza pero podría tener consecuencias por ser muy tenaz por lo que al hacer una prueba de fatiga no puede ser lo más óptimo posible ya que a la medida que aumenta su dureza se vuelve más frágil.



Grafica 4: Comportamiento de la dureza respecto el número de ciclos

Se analizó que cuando el material posee un mayor valor de dureza, posee una mayor resistencia, esto se debe a que al tener una mayor dureza la posibilidad que se inicien micro grietas es mínima, pues esta presencia hace que la inicio de fractura no se expandan con mayor rapidez y de esta manera resista más el material; Cabe resaltar que por el tratamiento criogénico que se aplicó hubo una resistencia diferente a la fatiga así tengan el mismo valor de dureza. Pues pudo haber cambiado otras propiedades internas del material donde logró ayudar a tener una mejor resistencia a la fatiga así el valor de dureza fuese el mismo.

7.6 ANÁLISIS METALOGRAFICO

Para la realización y el estudio metalográfico se ubican una a una las probetas en el microscopio de la Universidad Distrital, en donde se observa y hace la toma de imágenes y estos fueron los resultados obtenidos.

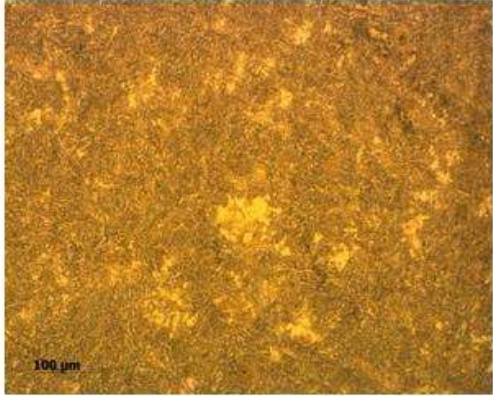
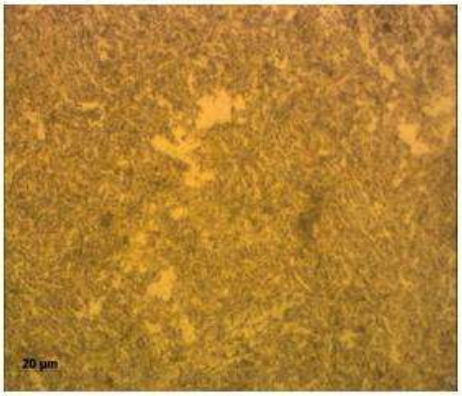

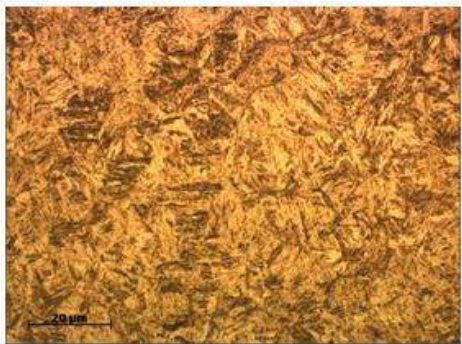
	Acero AISI/SAE 4140 X 500 Aumentos	Acero AISI/SAE 4140 X 1000 Aumentos
Suministro		
Temple a 770°C		

Tabla 5: Metalografía del acero 4140 de suministro y TT de temple

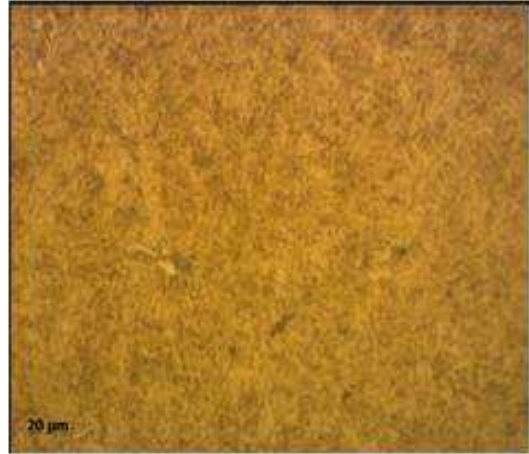
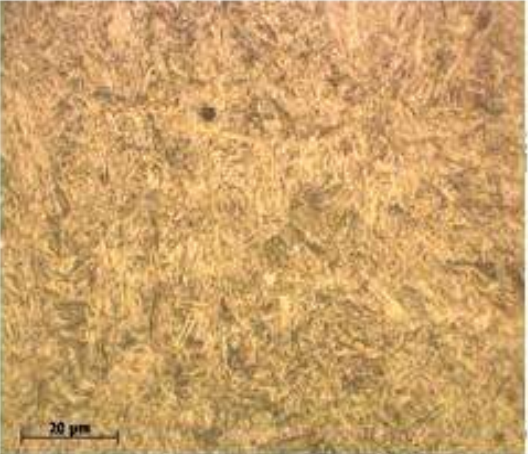
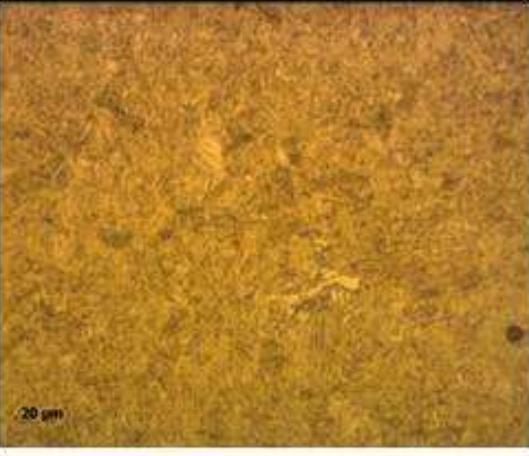
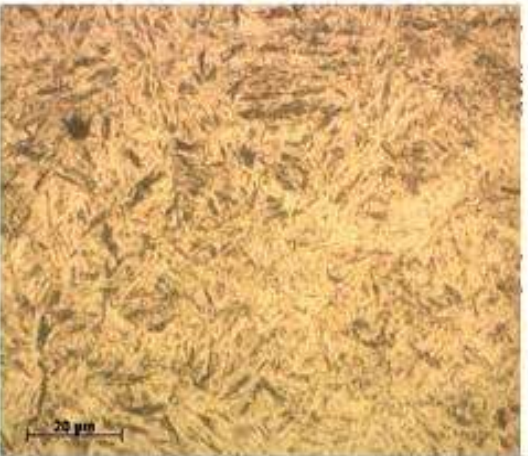
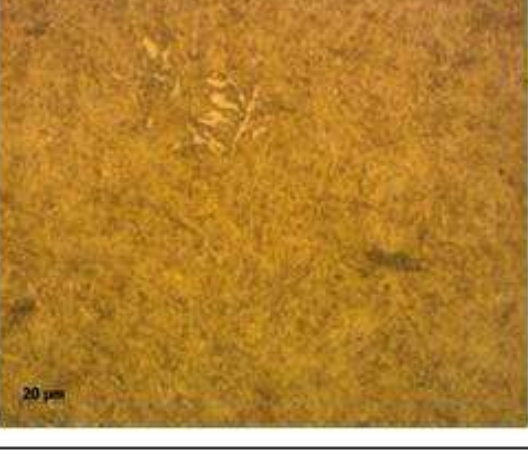

Rev. 15 min	Acero AISI/SAE 4140 X 500 Aumentos	Acero AISI/SAE 4140 X 1000 Aumentos
Sin tratamiento criogénico		
Tratamiento criogénico 24 H		
Tratamiento criogénico 48 H		

Tabla 6: Metalografía del revenido a 15 minutos, con tratamientos criogénicos a 24H y a 48H

Esta tabla muestra la comparación de la microestructura de un revenido a 15 minutos con tratamientos subcero a 24 y 48 horas.

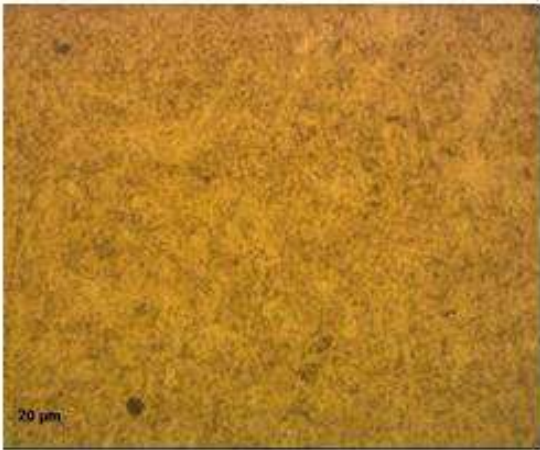

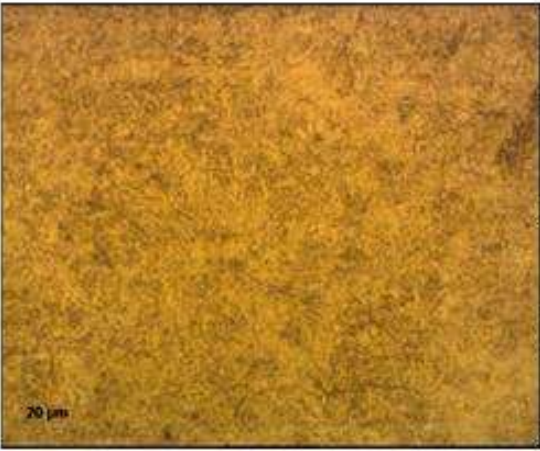
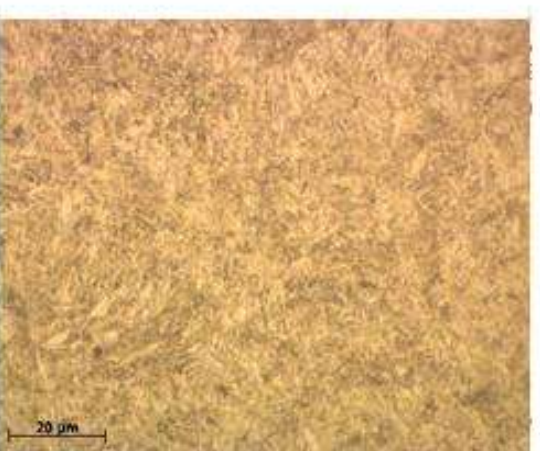
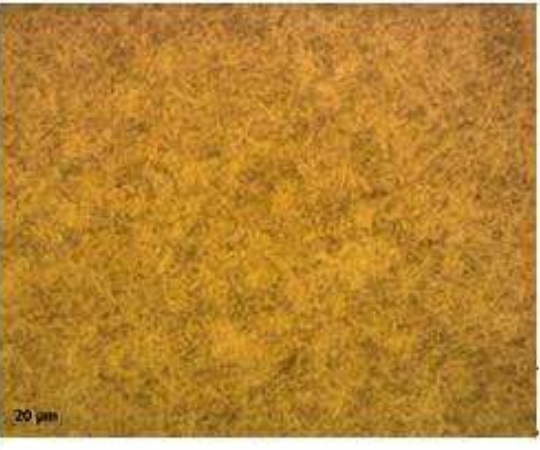

Rev. 30 min	Acero AISI/SAE 4140 X 500 Aumentos	Acero AISI/SAE 4140 X 1000 Aumentos
Sin tratamiento criogénico		
Tratamiento criogénico 24 H		
Tratamiento criogénico 48 H		

Tabla 7: Metalografía del revenido a 30 minutos, con tratamientos criogénicos a 24H y a 48H

En esta tabla se observa la microestructura del acero con un revenido a 30 minutos con tratamientos subcero a 24 y 48 horas se observan fases de martensita y ferrita.

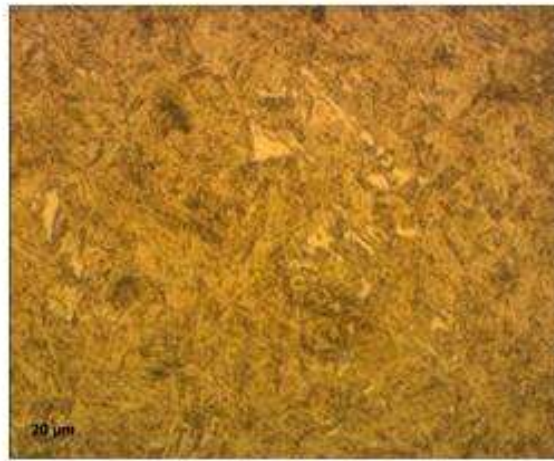
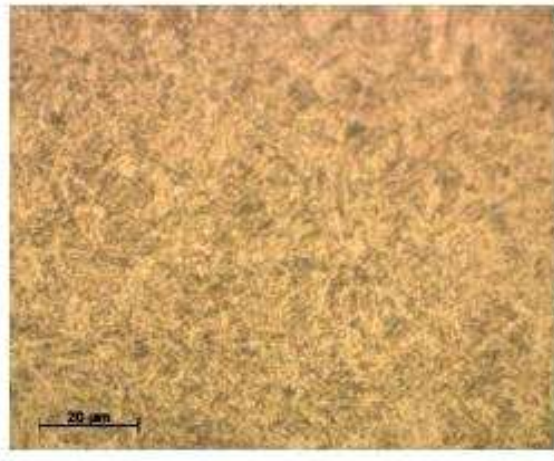

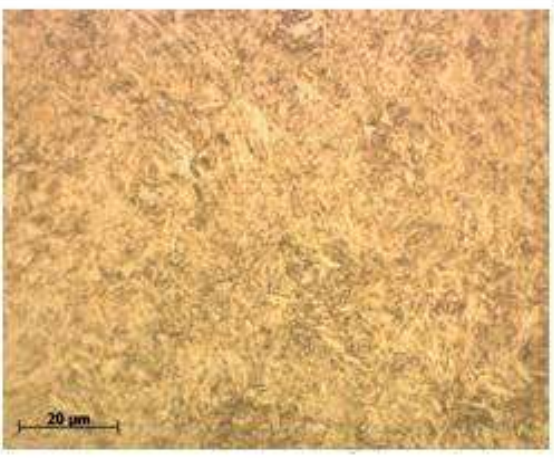
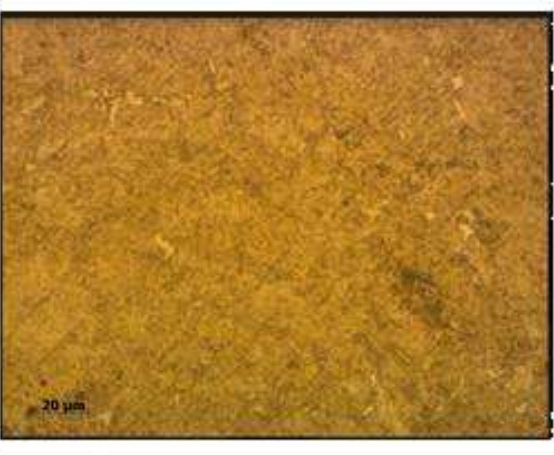

Rev. 45 min	Acero AISI/SAE 4140 X 500 Aumentos	Acero AISI/SAE 4140 X 1000 Aumentos
Sin tratamiento criogénico		
Tratamiento criogénico 24 H		
Tratamiento criogénico 48 H		

Tabla 8: Metalografía del revenido a 45 minutos, con tratamientos criogénicos a 24H y a 48H

Esta tabla muestra la comparación de la microestructura de un revenido a 45 minutos con tratamientos subcero a 24 y 48 horas se observan fases de martensita y ferrita se aprecia la aparición de carburos en estas muestras.

Al realizar la metalografía se presentan aspectos muy importantes para analizar en los cuales se pueden obtener algunos criterios de la formación que especifican el estado del tratamiento térmico, adicional el cambio y conformación de nuevas estructuras generadas en el acero ayudan a entender y concluir el fenómeno de la fractura por fatiga.

El ataque químico fue realizado con nital al 5% alcohol y ácido nítrico durante 10 segundos, se tomaron las muestras a las probetas y se observa en el microscopio con aumentos de x500 x1000 con el microscopio inversor, posteriormente las mismas muestras fueron tomadas en un microscopio electrónico de barrido (sem) donde fueron tomadas las fotos de las probetas 5000x y 10000x.

En el acero templado se puede observar que presentan una composición ferrita en su gran mayoría y martensita, que se ve como una distribución alargada, se observa la estructura de ferrita y martensita que se presenta en el material que fue templado, esta es una formación de dos fases, una de ellas es la martensita permite aumentar la dureza del acero.

En el revenido se presentan cambios en su estructura que definen el estado y el cambio de las composiciones; aunque la mayoría de cambios ocurren en un rango muy pequeño algunos apenas apreciables dentro de una escala óptica del microscopio común; el material que tiene revenido de 45 min se observa que la matriz martensítica está compuesta por unas agujas de tamaño pequeño y aparece también una gran cantidad de carburos.

Pero al realizar el TT con criogenia se observa que la distribución de la martensita es también uniforme pero demuestra ser en el TT de 24 horas una estructura de agujas más grande y que además se observa una menor precipitación de carburos, finalmente en la muestra que fue sometida a 48 horas presento una distribución más uniforme, además de una matriz martensítica con unas agujas más delgadas pero de un tamaño alargado y esta vez si no se observa generación de precipitación de carburos.

7.7 ANÁLISIS MICROSCOPIA DE BARRIDO SEM

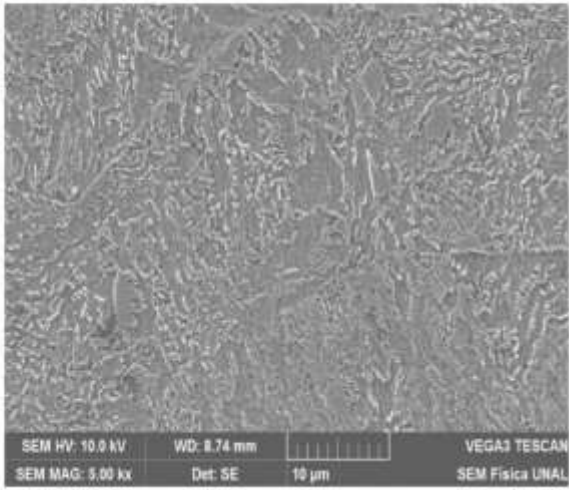
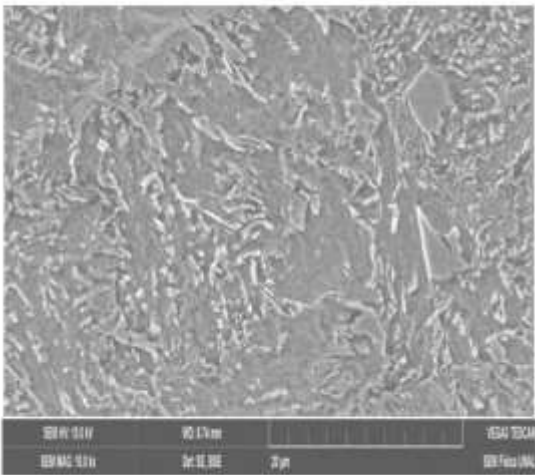
	Acero AISI/SAE 4140 X 5000 Aumentos	Acero AISI/SAE 4140 X 10000 Aumentos
Suministro	 <p>SEM HV: 10.0 kV WD: 8.74 mm VEGA3 TESCAN SEM MAG: 5.00 kx Det: SE 10 µm SEM Fisica UNAL</p>	 <p>SEM HV: 10.0 kV WD: 8.74 mm VEGA3 TESCAN SEM MAG: 10.00 kx Det: SE 5 µm SEM Fisica UNAL</p>

Tabla 9: Microscopia electrónica de barrido acero 4140 suministro

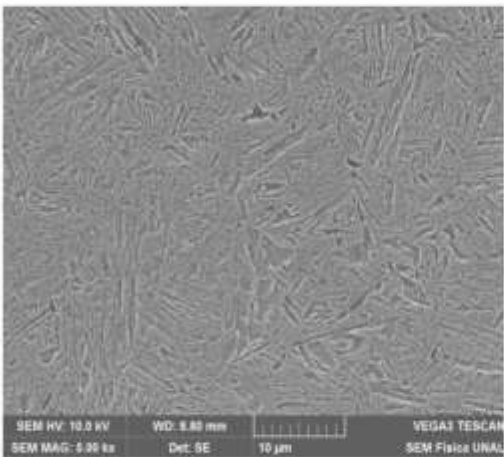
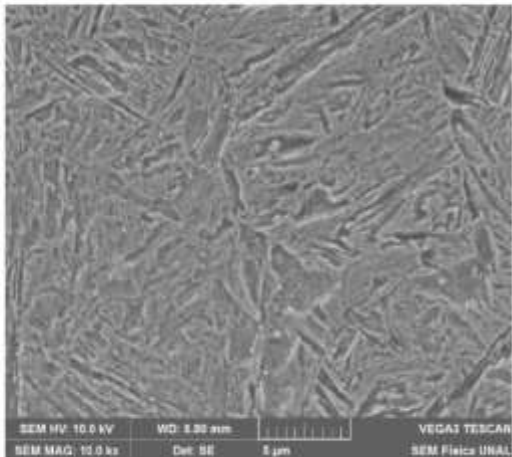
	Acero AISI/SAE 4140 X 5000 Aumentos	Acero AISI/SAE 4140 X 10000 Aumentos
Acero temperatura intercritica 770°C	 <p>SEM HV: 10.0 kV WD: 8.89 mm VEGA3 TESCAN SEM MAG: 5.00 kx Det: SE 10 µm SEM Fisica UNAL</p>	 <p>SEM HV: 10.0 kV WD: 8.98 mm VEGA3 TESCAN SEM MAG: 10.00 kx Det: SE 5 µm SEM Fisica UNAL</p>

Tabla 10: Microscopia electrónica de barrido acero 4140 templado a 770°C

Probeta en suministro y probeta templada con aumentos de x5000 y x10000 maquina tescan vega 3 universidad nacional departamento de física microestructura suministro de ferrita y perlita templada ferrita poligonal martensita.

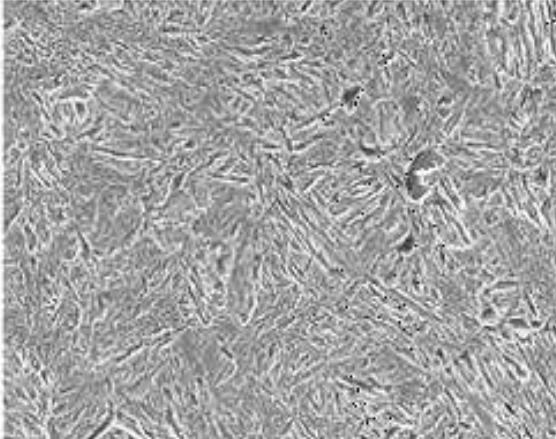
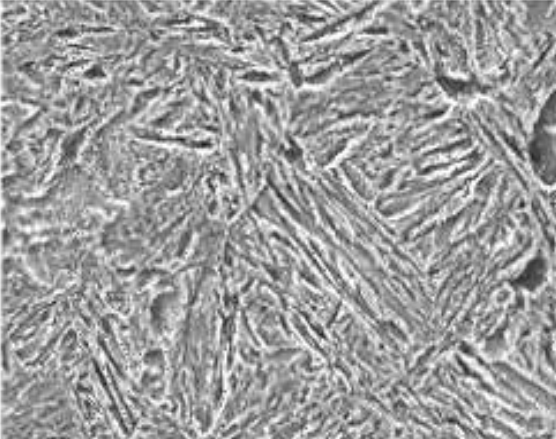
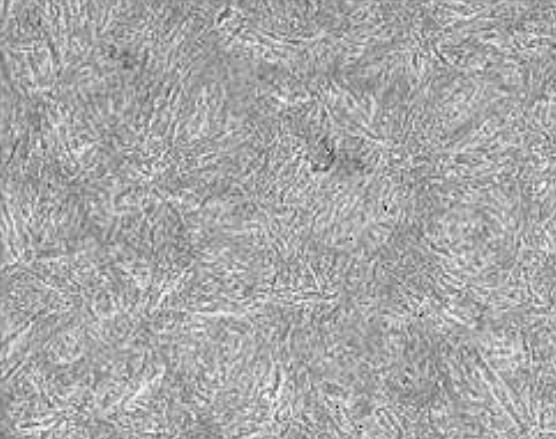
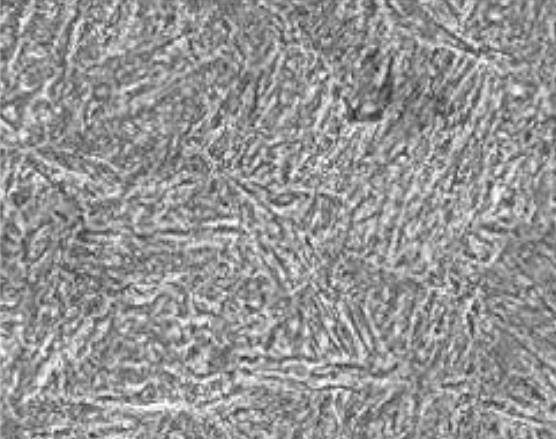
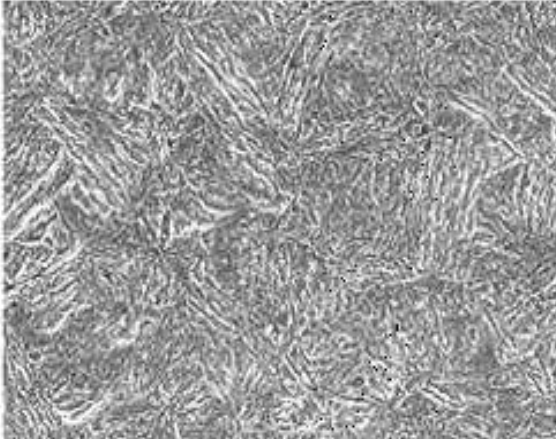
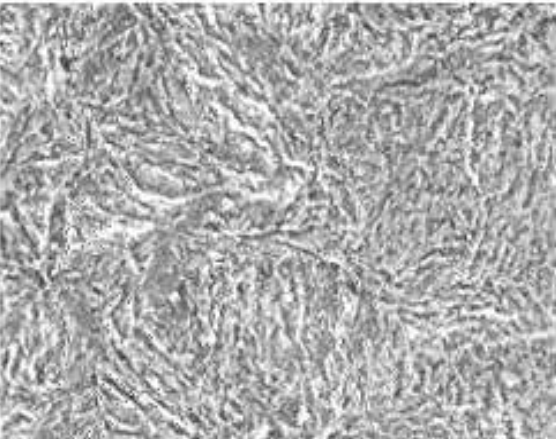
Rev. 15 min	Acero AISI/SAE 4140 x 5000 aumentos	Acero AISI/SAE 4140 x 10000 aumentos
Sin tratamiento criogenico		
Tratamiento criogenico 24 horas		
Tratamiento criogenico 48 horas		

Tabla 11: microscopia electrónica de barrido de la probeta revenida a 15 minutos, con tratamientos criogénicos a 24H y a 48H

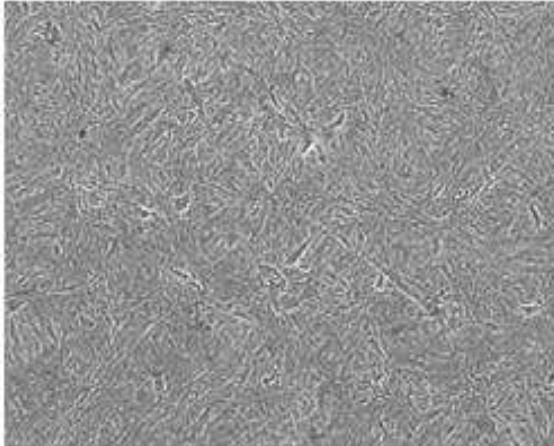
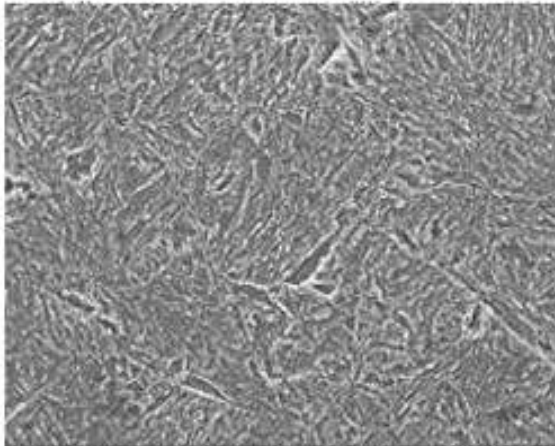
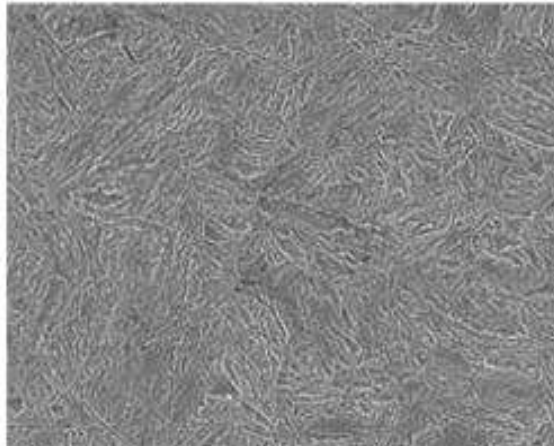
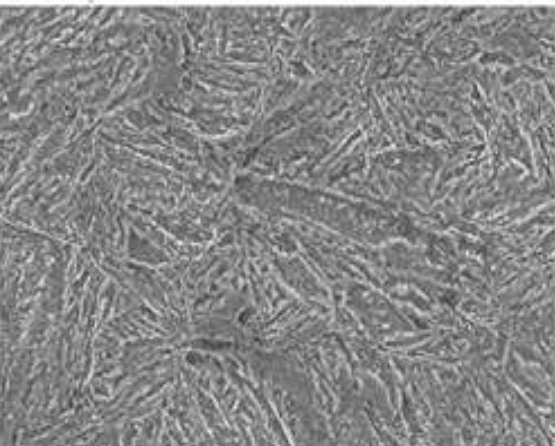
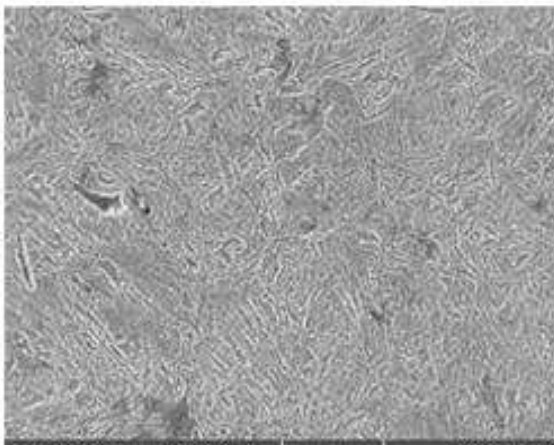
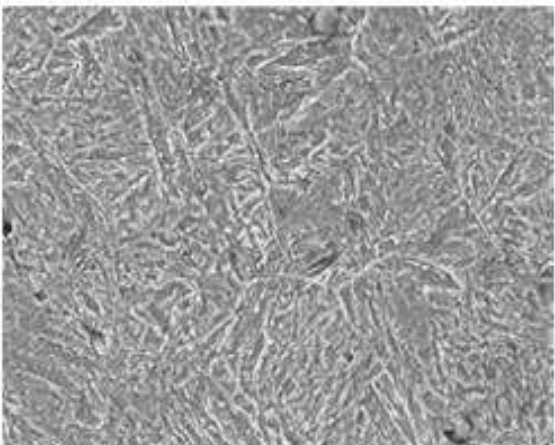
Rev. 30min	Acero AISI/SAE 4140 x 5000 aumentos	Acero AISI/SAE 4140 x 10000 aumentos
Sin tratamiento criogenico	 <p>SEM HV: 10.0 kV WD: 9.56 mm VEGA3 TESCAN SEM MAG: 5.00 kx Det: SE 10 µm SEM Fisica UNAL</p>	 <p>SEM HV: 10.0 kV WD: 9.54 mm VEGA3 TESCAN SEM MAG: 10.0 kx Det: SE 5 µm SEM Fisica UNAL</p>
Tratamiento criogénico 24 horas	 <p>SEM HV: 10.0 kV WD: 9.69 mm VEGA3 TESCAN SEM MAG: 5.00 kx Det: SE 10 µm SEM Fisica UNAL</p>	 <p>SEM HV: 10.0 kV WD: 9.68 mm VEGA3 TESCAN SEM MAG: 10.0 kx Det: SE 5 µm SEM Fisica UNAL</p>
Tratamiento criogénico 48 horas	 <p>SEM HV: 10.0 kV WD: 9.83 mm VEGA3 TESCAN SEM MAG: 5.00 kx Det: SE 10 µm SEM Fisica UNAL</p>	 <p>SEM HV: 10.0 kV WD: 9.80 mm VEGA3 TESCAN SEM MAG: 10.0 kx Det: SE 5 µm SEM Fisica UNAL</p>

Tabla 12: microscopia electrónica de barrido de la probeta revenida a 30 minutos, con tratamientos criogénicos a 24H y a 48H

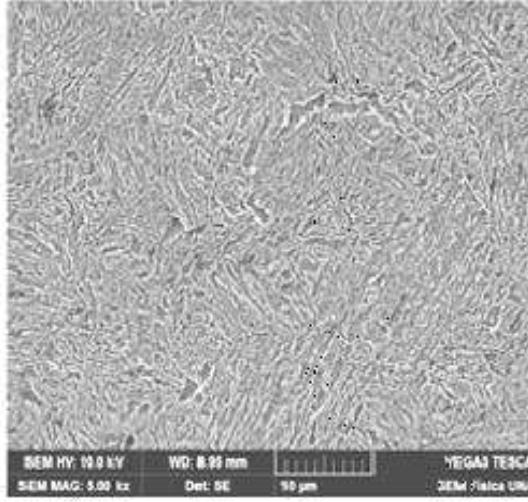
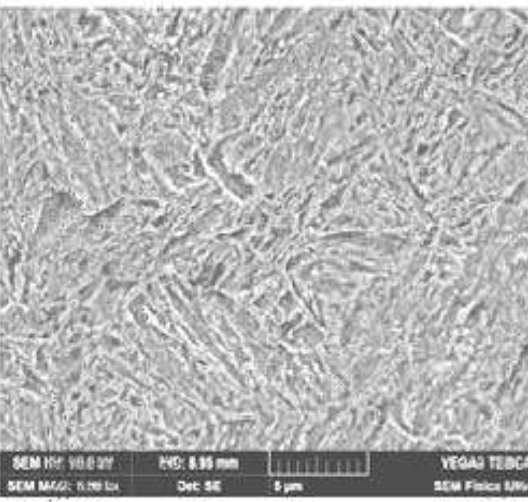
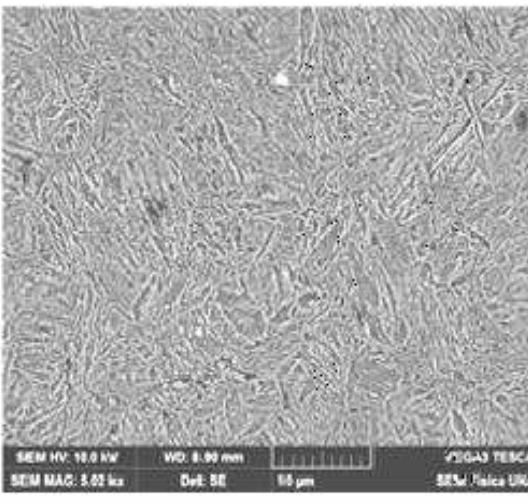
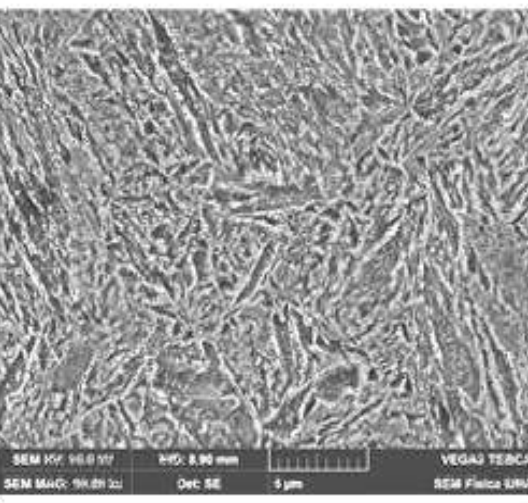
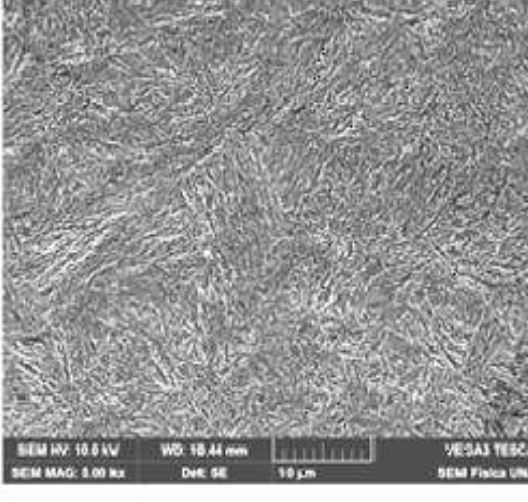
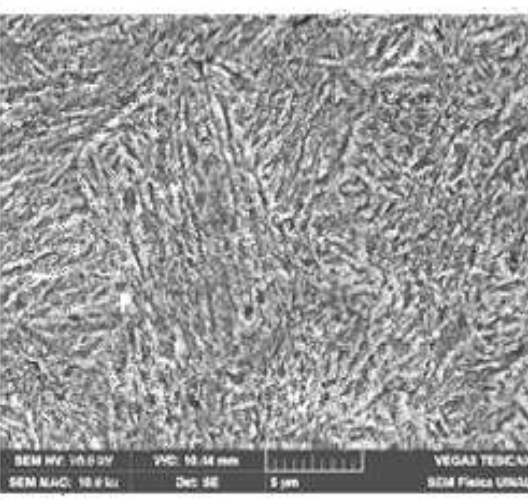
Rev. 45min	Acero AISI/SAE 4140 x 5000 aumentos	Acero AISI/SAE 4140 x 10000 aumentos
Sin tratamiento criogenico		
Tratamiento criogénico 24 horas		
Tratamiento criogénico 48 horas		

Tabla 13: microscopia electrónica de barrido de la probeta revenida a 45 minutos, con tratamientos criogénicos a 24H y a 48H

Se utilizó la microscopia electrónica de barrido para observar y entender mejor el comportamiento micro estructural de las muestras utilizadas en el proyecto, para esto se utilizó el equipo tescan vega 3, el cual consiste en lanzar un barrido de haz de electrones mientras que se puede visualizar la información que se está buscando, es este caso observar la composición del material y para la graduación de este se usó una tensión de 10kv; en la primeras muestras se ve la probeta en suministro a 5000x y 10000x, en la muestra de suministro se observa la microestructura ferrita perlita Mientras que para la probeta con temple a temperatura intercritica su microestructura cambia se ve ferrita poligonal y martensita ;para las probetas que se les hizo revenido a 15 minutos se presenta una formación de martensita; pero en cada TT presenta su distribución de manera diferente, en la probeta que se le hizo revenido a 30 min suele ocurrir una situación similar a la que de 15 min solo que esta vez las agujas que son la martensita están de un tamaño menor y no se notan de gran manera y entre mayor sea el TT criogénico la matriz de martensita va a estar más uniforme .La formación de varias distribuciones de carburos y aleaciones a medida que se sobresaatura la martensita formada en el temple disminuye obteniendo mezcla de fases en equilibrio durante el revenido, en la micrografía en los revenidos podría alcanzarse a distinguir unas formaciones en la martensita aunque no es tan notoria, en el TT de criogenia. En las probetas que fueron sometidas a criogenia y se muestran mejor distribuidas hace una martensita mucho más fina ya que el tratamiento criogénico refina el grano y se forman micro carburos brindándole al material mayor resistencia. Por otro lado el material que fue sometido a la criogenia muestra una distribución en la martensita más uniforme, esto se debe a la transformación de la austenita retenida que se encuentra al realizar el tratamiento térmico del temple y al realizar el revenido y la criogenia esa austenita retenida se transforma en martensita la cual es la que se puede visualizar y es por esto que se observa una mejor consistencia en la fotografía que se da en la microscopia electrónica de barrido y esto se logra al aumentar más el tiempo de criogenia. [8]

7.8 ANALISIS DE FRACCION VOLUMETRICA

Se realizó un análisis de fracción volumétrica para ver de una manera más a detalle cómo se distribuye la microcomposición del material de acuerdo a cada tratamiento térmico realizado, de que componente aumenta más en la superficie, este análisis se realizó en la Universidad Distrital en el equipo de microscopio inversor Olympus PME3 en el cual se tomaron las metalografías y luego con la ayuda del software Axio Visión se obtuvieron las siguientes imágenes y el porcentaje de cada microcomponente presente en el material.

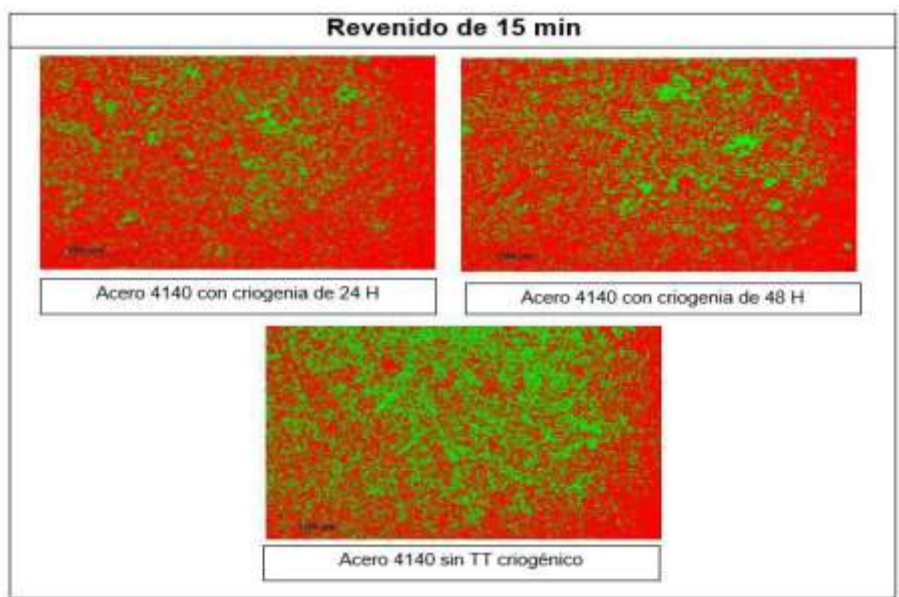


Tabla 14: Fracción volumétrica del material con revenido de 15 min, y tratamiento criogénico de 24H y 48H

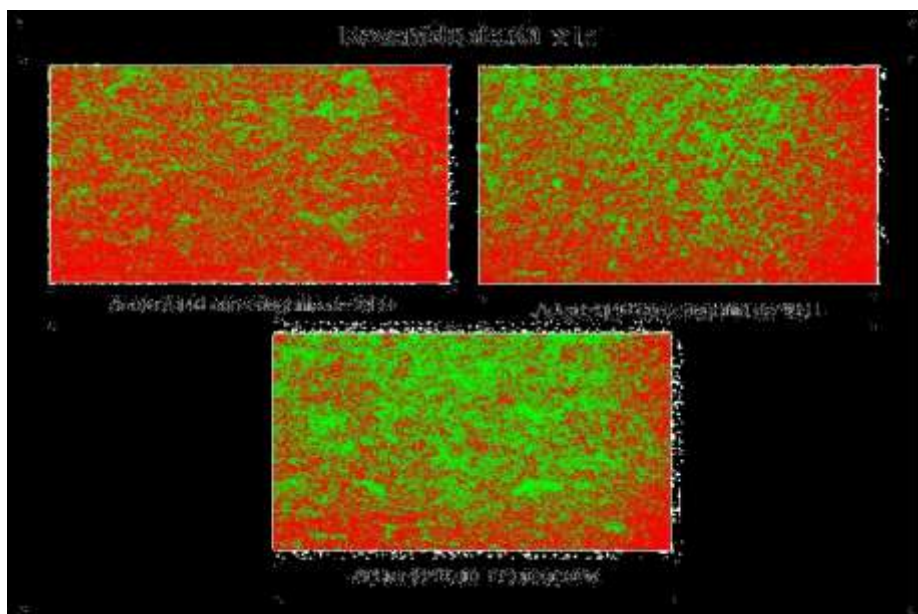


Tabla 15: Fracción volumétrica del material con revenido de 30 min, y tratamiento criogénico de 24H y 48H

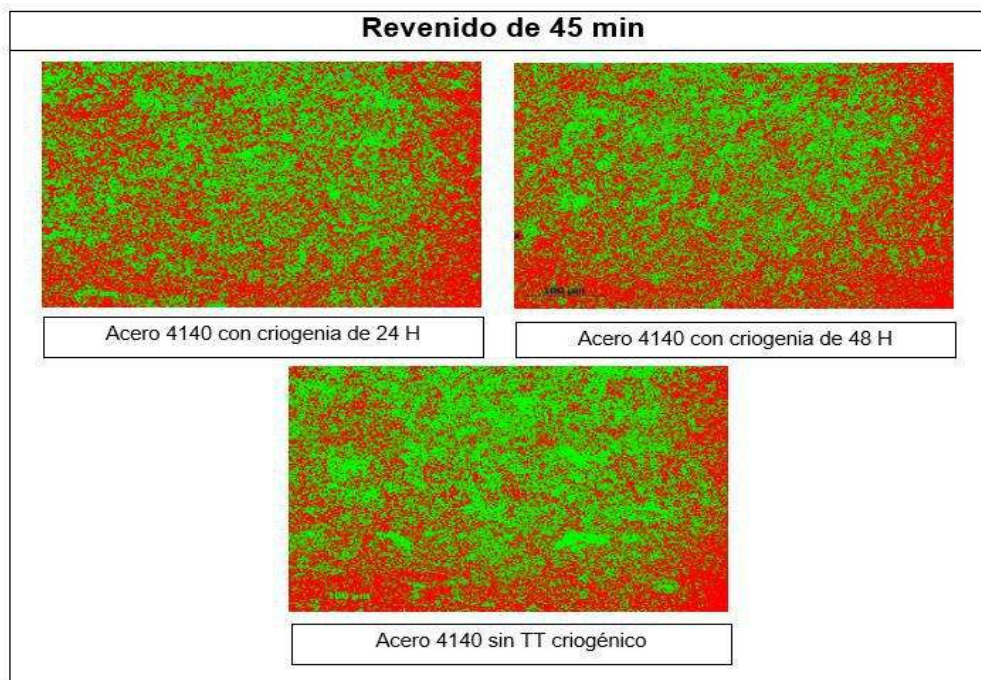


Tabla 17: Fracción volumétrica del material con revenido de 45min, y tratamiento criogénico de 24H y 48H

TIPO DE MATERIAL	PORCENTAJE DE MARTENSITA	PORCENTAJE DE FERITA
Probeta 4140 revenida 15 min sin criogenia x 200	54,55 %	43,8 %
Probeta 4140 revenida 15min 24h x200	60,36 %	35,32 %
Probeta 4140 revenida 15min 48h x200	74,21 %	22,54 %
Probeta 4140 revenida 30 min sin criogenia x 200	50,6 %	46,5 %
Probeta 4140 revenida 30 min 24 h x200	65,66 %	30,2 %
Probeta 4140 revenida 30 min 48 h x200	70,9 %	28,1 %
Probeta 4140 revenida 45 min sin criogenia x 200	55,2 %	42,1 %
Probeta 4140 revenida 45 min 24 h x 200	60,89 %	36,85 %
Probeta 4140 revenida 45 min 48h x 200	65,33 %	31,58 %
Probeta 4140 revenida SOLO TEMPLE 770 °C x200	65,9 %	30,1 %

Tabla 16: Fracción volumétrica con porcentaje de martensita y ferrita



Imagen 19: Grafica de porcentajes de la fracción volumétrica de las fases en cada TT

Se realizó un análisis de fracción volumétrica para determinar cómo se distribuyen las fases en el material en cada probeta para esto gracias al programa Axio visión se seleccionaron imágenes metalográficas a x200 aumentos con el fin de identificar el porcentaje de las 2 fases en este caso ferrita y martensita.

En todos los casos se observa que el contenido de martensita presenta un porcentaje mayor en la estructura, los tres casos de los revenidos tienen una situación similar que es a medida que se realiza y aumenta el tiempo del TT de criogenia tiende a ser mayor el contenido de martensita ya que la austenita que se encuentra retenida se convierte en martensita, se observa que el material que fue el que presentó mayor contenido de martensita sin criogenia fue el que fue revenido a 45 min pero a medida que fue realizado el TT de criogenia la mayor cantidad de austenita retenida que fue convertida en martensita fue para la muestra que fue revenida a 15 min ya que esta muestra el mayor porcentaje de martensita incluso mayor porcentaje que el obtenido en el temple sin revenido.

Cuando se realiza el tratamiento del temple se generan grandes capas de martensita las cuales rodean y aíslan pequeños depósitos de austenita la cual con el revenido se transforma en martensita dura pero la martensita que ya estaba se ablanda y se da una condición en la que el acero tenga martensita dura y frágil por lo cual es necesario realizar el tratamiento de la criogenia para transformar la austenita retenida en martensita para luego al realizar el revenido se logren aliviar todas las tensiones en el acero y tener una mayor consistencia en la micro estructura, tener la mayor cantidad de martensita obtenida durante los dos tratamientos térmicos para que se logre volver ablandar y volver dúctil para así mejorar las propiedades mecánicas en el material[20].

Estos análisis que se realizaron son importantes para tener en cuenta ya que al analizar la composición del material se pueden dar conclusiones sobre cómo lo afecta cada tratamiento térmico, también se puede ver que componentes están afectando propiedades como la dureza y en este caso la resistencia a la fatiga, por esta razón se realizó estos análisis como la toma de durezas, análisis metalográfico, análisis de fracción volumétrica para estudiar y analizar cómo cada tratamiento afecta estas propiedades, también que relación puede tomar cada propiedad respecto a la otra como se puede observar qué relación tiene la dureza con la resistencia a la fatiga.

7.9 ANALISIS DE LA FRACTURA EN CADA TRATAMIENTO TERMICO DE REVENIDO

Se realizó un análisis de fractura de las probetas analizadas para ver qué tipo de fractura presentan según cada tratamiento térmico realizado para analizar cómo afecta en las fases de la fatiga, donde comienza la iniciación de la grieta, distribución de la grieta y ruptura súbita, en las fotografías tomadas por el estereoscopio Discovery V8 de la Universidad Distrital se identificaron dos zonas para diferenciar cada tipo de fractura las cuales fueron separadas por una línea roja y nombradas zona 1 y zona 2 donde se observa en las imágenes con círculos verdes, las demás fotografías fueron tomadas mediante microscopia de barrido en el equipo Tescan Vega 3 de la Universidad Nacional para observar más a detalle el tipo de fractura que hubo.

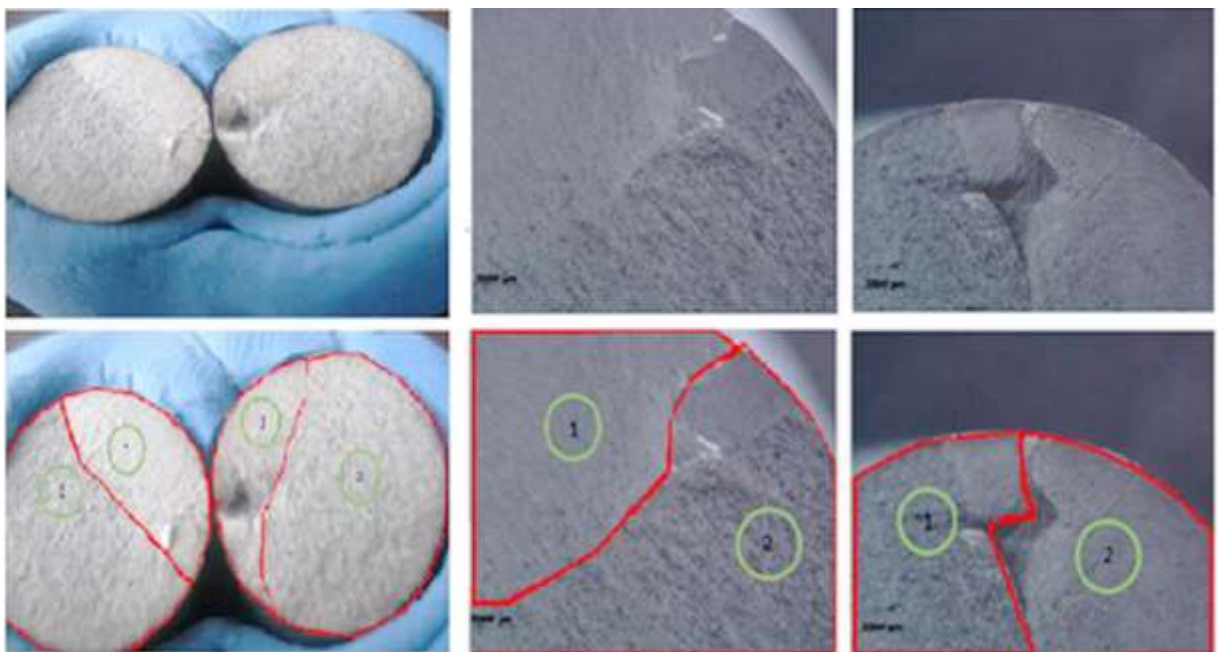


Imagen 20: Superficie de la probeta con revenido a 45 min sometida a ensayo de fatiga.

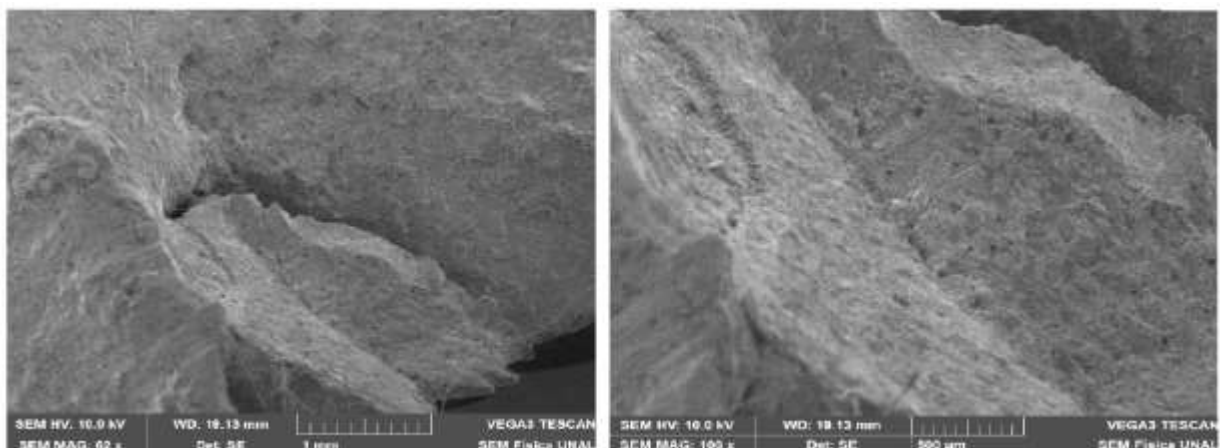


Imagen 21: Fracturaría del material con revenido a 45 min.

Las imágenes 20 y 21 fue una probeta que se le hizo un tratamiento a 45 min esta presento una fractura de tipo frágil donde se evidencia una superficie con aspecto granular y marcas radiales y se observa una superficie plana y una región donde posiblemente se inició la grieta con lo que se podría dar comenzó en uno de los extremos de la sección por la ruptura.

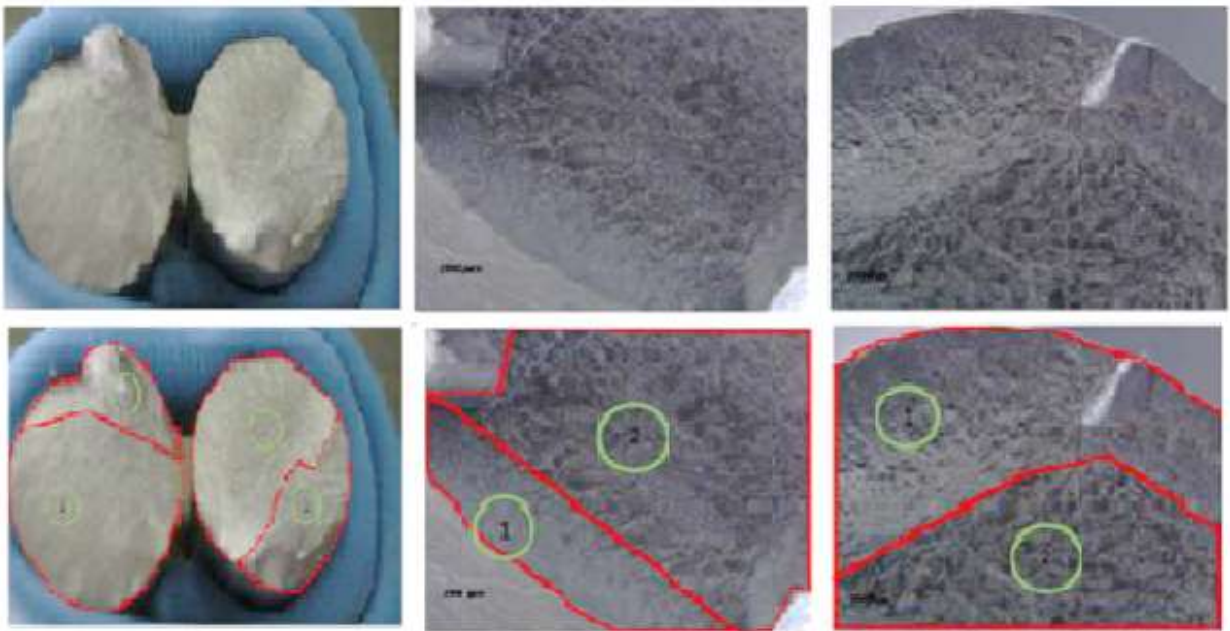


Imagen 22: Superficie de la probeta con revenido a 30 min sometida a ensayo de fatiga.

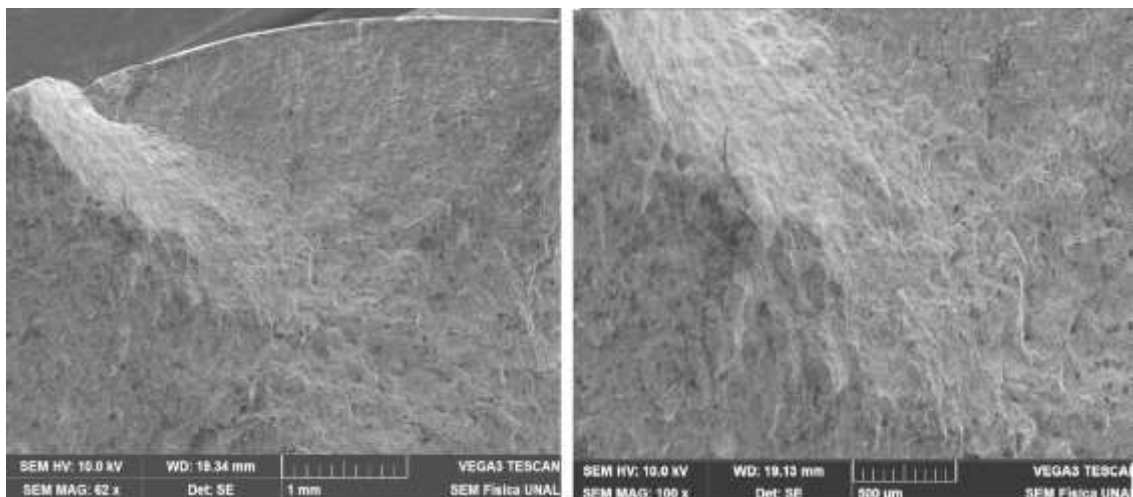


Imagen 23: Fractografía del material con revenido a 30 min.

Las imágenes 22 y 23 fue una probeta que se le hizo un tratamiento a 30 min En esta sección transversal de la probeta se observan dos regiones, en la región número 1 se observa una fractura frágil que se ve una zona granular y

plana se presenta una superficie donde la grieta ya no pudo expandirse más .En la segunda zona se presenta una ruptura dúctil donde se observa una zona fibrosa y elevada en la cual se puede observar que fue donde ocurrió la segunda fase de la fatiga que es la distribución de la grieta la grieta ya no puede expandirse más y se genera la ruptura súbita lo cual podría considerarse una ruptura mixta.

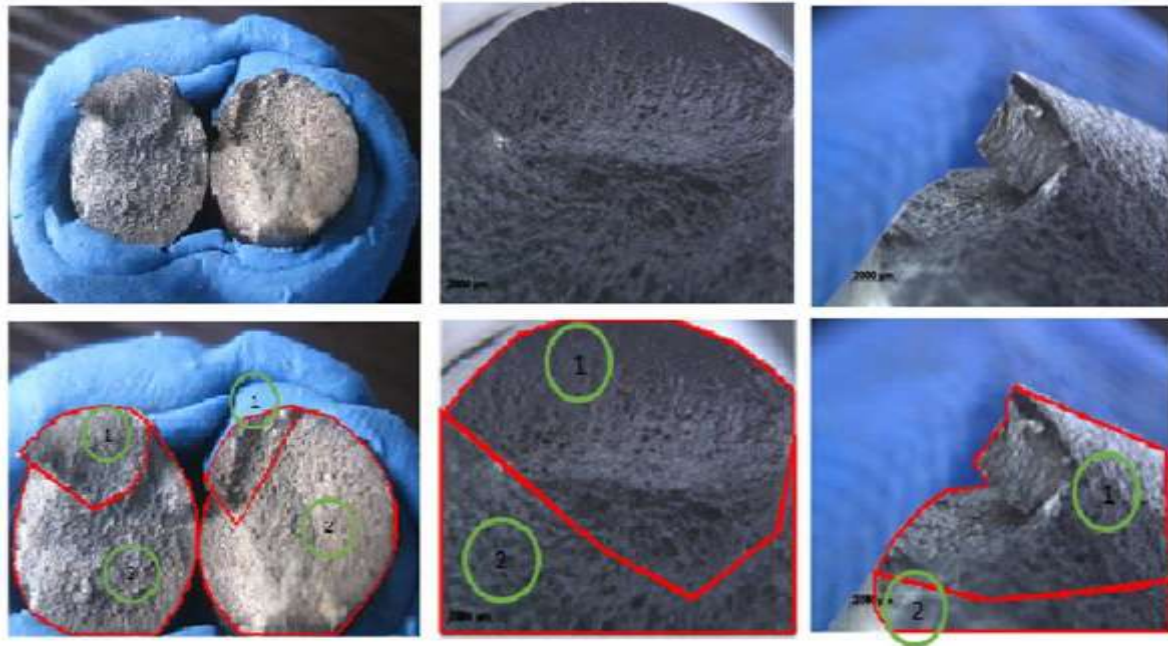


Imagen 24: Superficie de la probeta con revenido a 15 min sometida a ensayo de fatiga.

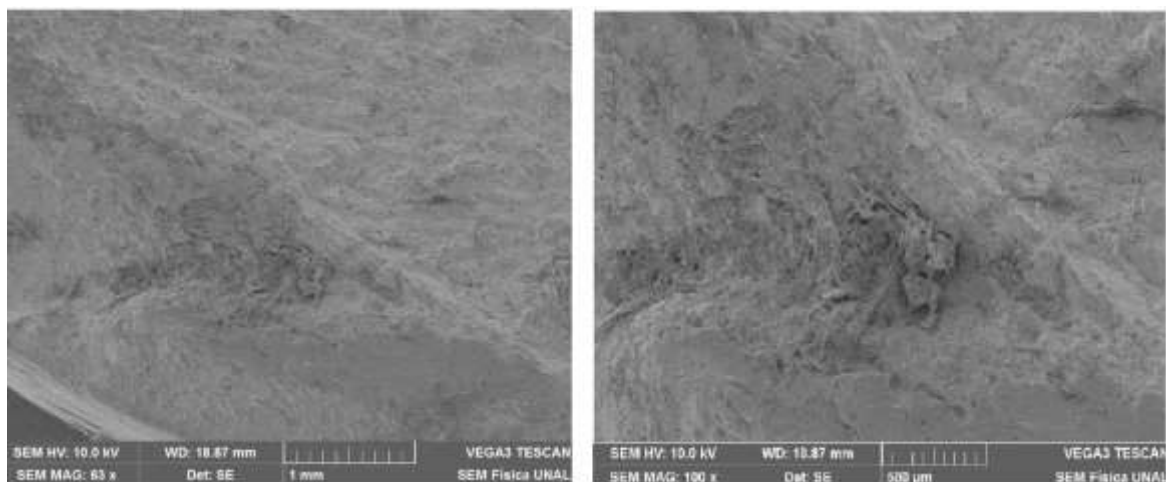


Imagen 25: Fracturaría del material con revenido a 15 min

En esta imágenes se presentan dos zonas donde presentan una ruptura mixta se observan marcas radiales lo cual indica una ruptura frágil y plana, también se ve la distribución de la grieta y la presencia de inclusiones afectan la ruptura.

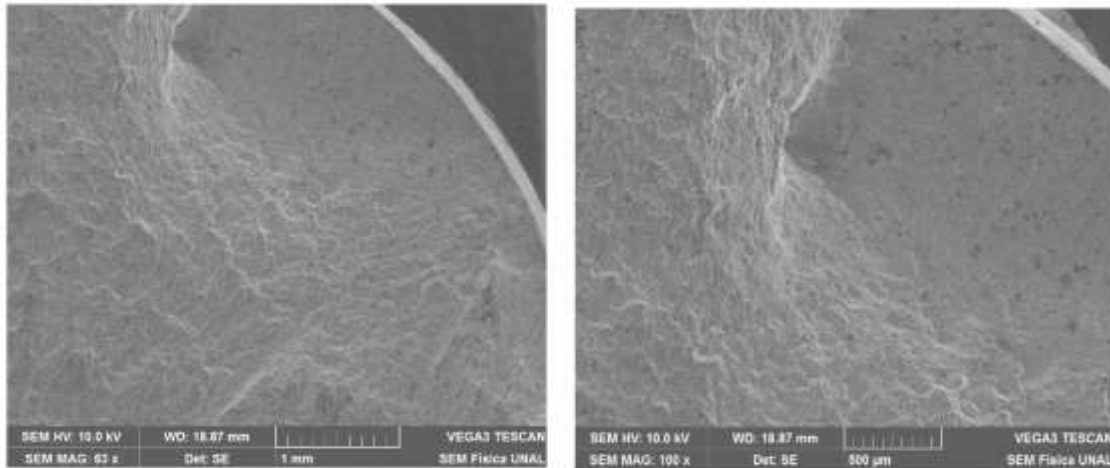


Imagen 26: Fractografía del material estado de suministro

En esta sección transversal de la probeta se observan dos regiones, en una de ellas se observa una fractura frágil donde se ve una superficie plana con marcas radiales, se presenta una superficie donde la grieta ya no pudo expandirse más, una superficie plana; en la otra zona se presenta una ruptura dúctil donde se ve una pequeña elevación de la superficie y se observa una superficie con presencia de agujeros en la cual se puede observar que fue donde ocurrió la segunda fase de la fatiga que es la distribución de la grieta la grieta ya no puede expandirse más y se genera la ruptura súbita, hubo dos tipos de fractura en la probeta.

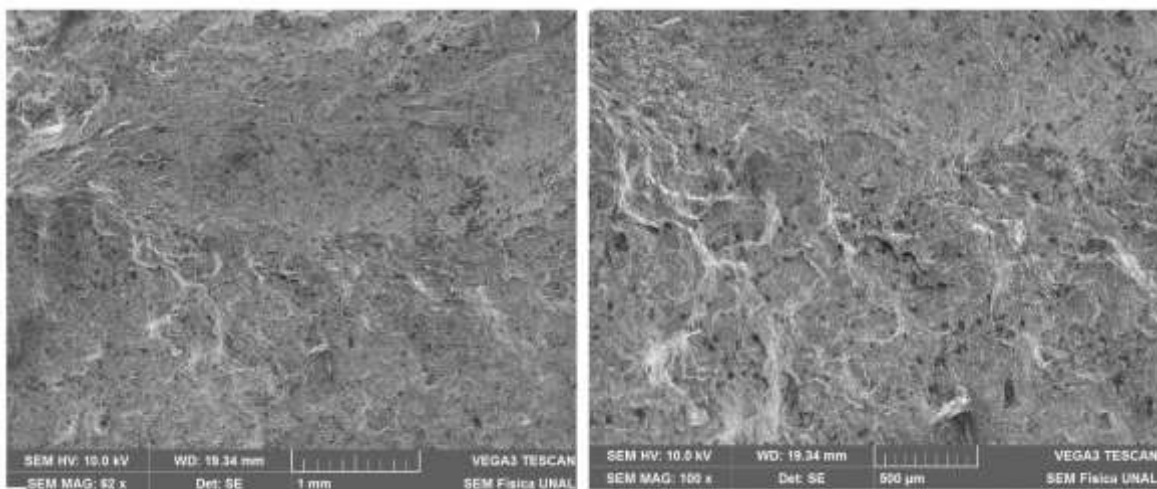


Imagen 27: Superficie de la probeta con revenido a 15 min con criogenia a 24H sometida a ensayo de fatiga

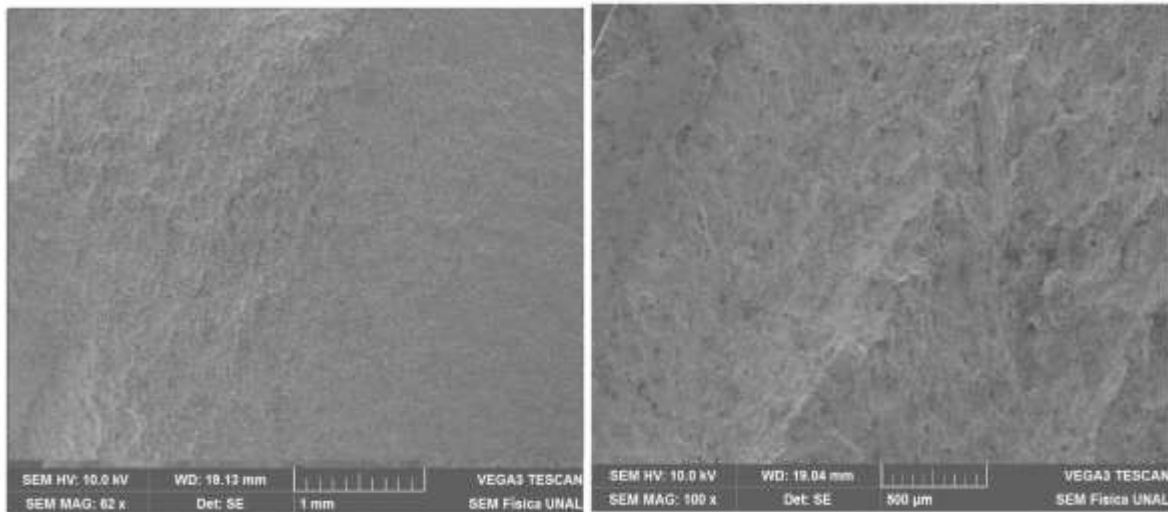


Imagen 28: Superficie de la probeta con revenido a 15 min con criogenia a 48H sometida a ensayo de fatiga

Las imágenes 27 y 28 son el resultado de las probetas que tuvieron mayor número de ciclos las cuales fueron con revenido a 15 minutos utilizando tiempos de criogenia a 24 y 48 horas como resultado se mostró que la probeta que fue revenida a 24 H y 48 H terminaron con una ruptura mixta en ambos casos parece verse inclusiones dentro de las morfologías, se dio una ruptura frágil en los dos casos debido a lo que se puede observar las marcas granulares y radiales en las superficies.

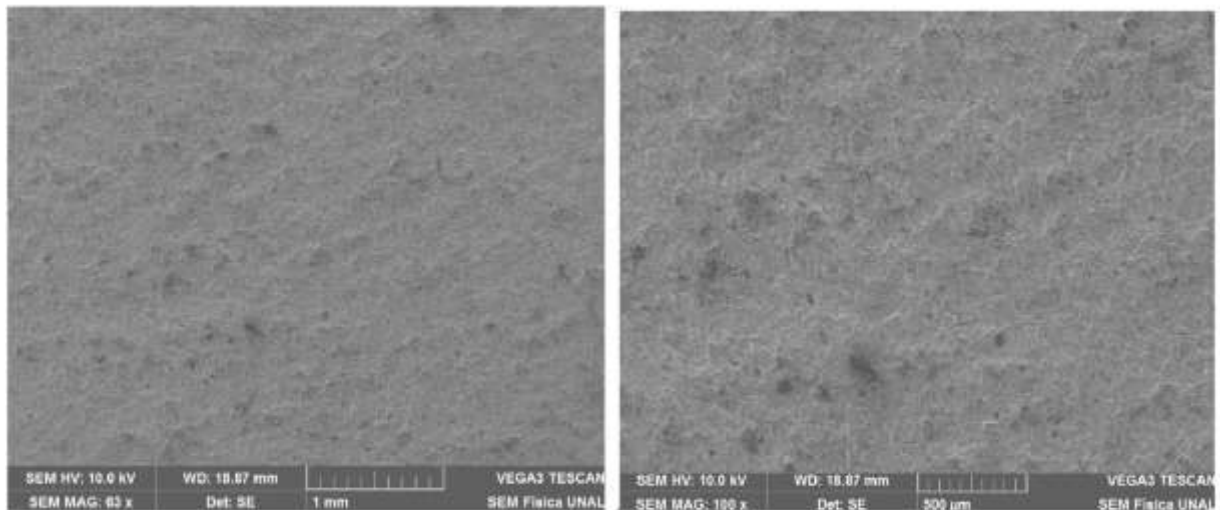


Imagen 29: comportamiento de las probetas con tratamientos criogénicos mayores a 30 minutos de revenido

Se puede apreciar en la imagen 29 un tipo de falla frágil debido a que presenta un aspecto granular y una superficie totalmente plana, esto pudo haber sucedido por lo que puede ser consecuencia del tiempo de revenido puesto que a mayor tiempo la probeta tiene a perder dureza y tenacidad este comportamiento se vio muy similar para el resto de probetas donde se usó tiempos mayores e iguales a 30 minutos con tratamientos criogénicos a 24 y a 48 horas.

8. CONCLUSIONES

- Al realizar los ensayos de fatiga se determinó que las propiedades mecánicas en las probetas que se les hizo tratamientos térmicos de revenido y criogenia resulto ser un factor importante para tener en cuenta. Se determinó que usar tratamientos de criogenia a un tiempo prolongado ayuda al temple en la mejora y comportamiento de resistencia y dureza y que si además se utiliza un tiempo de revenido no tan elevado el desempeño podría ser muy óptimo para esta y otras aplicaciones mecánicas, el material que presento un comportamiento más óptimo fue el de revenido a 15 minutos con criogenia a 48 H.
- Al realizar las pruebas de fracción volumétrica se observa un mayor aumento de martensita en las probetas que fueron tratadas con criogenia esto pudo deberse a que la austenita que estaba retenida dentro de la matriz posiblemente se convirtió en martensita lo que pudo ayudar para que el comportamiento en las pruebas fuese mucho mejor.
- Al realizar la microscopia electrónica de barrido se observaron clara mente 2 fases en el material las cuales fueron ferrita y martensita, un aspecto notorio es la aparición de posiblemente carburos en los tratamientos criogénicos y además la apariencia de martensita fina al aumentar el tiempo de criogenia.
- Se determinó que la influencia en los tratamientos térmicos en la dureza disminuía a media que se aumentaba el tiempo de revenido también se observó que las probetas tratadas criogénicamente tuvieron un pequeño incremento de dureza y mientras haya mayor valor de dureza aunque también hay otras propiedades, se presentara una mayor resistencia a la fatiga en el material.
- El tipo de falla para la mayoría de las probetas tratadas criogénicamente se presentó una fractura frágil, esto se determinó debido al tipo de superficie que se pudo observar ya que es una superficie plana con marcas radiales y granulares, esto puede ser debido a que se distribuyó la grieta por un mayor tiempo y de una manera más uniforme, a su vez prolongando la resistencia a la fatiga.

9. BIBLIOGRAFÍA

[1] MOVAHED, P, et al., «The effect of intercritical heat treatment temperature on the tensile properties and work hardening behavior of ferrite–martensite dual phase steel sheets,» *Materials Science and Engineering A*, pp. 1-6, 2009

(2) BENSELY, A., et al., «Effect of cryogenic treatment on tensile behavior of case carburized Steel-815M17,» *Materials Characterization*, pp. 485-491, 2007.

[3] María catalina Ramírez Tovar, Fatiga: cuando los materiales llegan al límite Revista metal actual la revista especializada de la industria metalmeccánica en la industria, ed 6 año 2007

[4] BOURNE, G, R, SAWYER, W, G, KAUFMAN, M, J effects of cryogenic treatment of AISI d2 tool steel .STLE, ANNUAL MEETING 2003

[5]. http://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/1537_tratamientostermicosr2.pdf

[6] S.S. Gill, J. Singh, R. Singh, H. Singh, Metallurgical principles of cryogenically treated tool steels—a review on the current state of science, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 54 (2010) 59–82. DOI:10.1007/s00170-010-2935-5.

[7] P. Baldissera, C. Delprete, Deep Cryogenic Treatment : A Bibliographic Review, *Open Mech. Eng. J.* 2 (2008) 1–11.

[8] BENSELY, A., et al., «Effect of cryogenic treatment on tensile behavior of case carburized Steel-815M17,» *Materials Characterization*, pp. 485-491, 2007.

[9] RESISTENCIA ALA FATIGA KEITH NISBETT. J & G. BUDYNAS. , 2008

[10] Isabel., P. A. (2011). *Análisis del comportamiento a fatiga en flexión rotativa de un acero AISI/SAE 1018 en ambientes corrosivos*. Guayaquil-Ecuador: Escuela superior politécnica del litoral

[11] KEITH NISBETT. J, & G. BUDYNAS. , R. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. México: Mc Graw Hill.

[12] (VILLEGAS PROAÑO, VILLEGAS PROAÑO Daniel Alejandro. Estudio del tiempo y número de revenidos del acero AISI/SAE 1045 templado en aceite de oliva 2014).

[13] K. Wallin, *Fracture Toughness of Engineering Materials: Estimation and Application*. EMAS Publishing, 2011.

- [14] T.L. Anderson, Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications, CRC Press, 1995.
- [15] Hernán Lorusso, Alejandro Burgueño, Hernán G. Svoboda, Ppropiedades mecánicas y caracterización microestructura de diferentes aceros *dual-phase 2008*
- [16] Características del acero IRAM 4140 Ing. Hernán Svoboda. Universidad de Buenos Aires
Facultad de Ingeniería
- [17] Héctor, H. A., & Edgar., E. M. (2002). *Mecánica de fractura y análisis de falla*. Tesis, Bogotá D.C.
- [18] Félix R. Moreno F, William J. Salazar C, Laura Sáenz P.(2005), Evaluación del comportamiento mecánico a la fatiga en acero AISI 4340 y AISI 4140 tratados térmicamente con recocidos y normalizados.
- [19].pag web http://www.espectrometria.com/tipos_de_espectrometra
- [20] Donald R. Askeland. Ciencia e ingeniería de los materiales tercera edición pág. 330-359

10. RECOMENDACIONES

- Para realizar ensayos de fatiga por flexión rotativa se recomienda no realizar algún tratamiento térmico en agua, no colocar la probeta de forma horizontal; en el último cuando se tiene la obligación de colocar la probeta horizontal por espacio, es necesario tener cuidado con el medio de enfriamiento, la velocidad sea relativamente lenta (apropiada, realizar pruebas e intentos en temples a diferentes velocidades de enfriamientos) antes de fatigar, para el caso fue aceite y evitar sujetar desde un solo punto cuando se retire de la mufla, si es posible idear un dispositivo para la sujeción y para sostener de manera uniforme, sin interrumpir el calentamiento de la misma o cambiar la temperatura de algún punto, si es posible intentar fabricarlas 1 o 2 centímetros más larga para encontrar la sujeción correcta, cortarlas antes de hacer el ensayo se fatiga.
- Para hacer el análisis de la falla por fatiga es recomendable no unir las dos partes de la probeta, también hacer el análisis lo más rápido posible ya que de lo contrario cambiaría su aspecto por causas naturales como la corrosión y no se podría hacer un análisis de falla apropiadamente.
- Para realizar las probetas para ensayos de fatiga es necesario dejarlas con una tolerancia de 0.05 mm porque para este tipo de máquinas manejan es sensible a con las dimensiones de la misma y la forma podría trabajar incorrectamente y llegar a dañar, si queda muy corta esta no sujeta la probeta y si es muy grande no entra en las mordazas.
- Para realizar el tratamiento térmico criogénico es recomendable tener las precauciones necesarias para esto, como por ejemplo el uso de guantes para no tener contacto con el nitrógeno líquido, también dejar muy bien cerrado el recipiente para que no haya ningún escape.

11. Anexos

11.1 Resultados de prueba de composición química.

STONE DATA		2329			
ORIGEN DE TRABAJO	:	INTERNA			
COMPANIA	:	ESTUDIANTE			
ENTRENANTE	:	MURICIO SIERRA			
FIRMA ANALISTA	:				
ANALISTA	:	JHON JAIRO CASTANEDA SOCORRO			
FIRMA JEFE LAB	:				
JEFE LABORATORIO	:	ING. EDGAR ESPEJO MORA			
REFERENCIA	:	MUESTRA 2			
Alloy	:	LAB2010	Modo	IPA	Time 10:39
Burn 1					
Fe	97.418	C	0.376	Mn	0.781
Si	0.179	Cu	0.011	Ni	0.016
Mg	0.174	W	< 0.005	Co	0.005
Al	0.029	Nb	< 0.002	B	0.0002
				P	0.006
				Cr	0.989
				Ti	0.003
				Pb	0.005
				S	0.005
				V	0.002
				Sn	< 0.001
				Hg	0.000
Burn 2					
Fe	97.441	C	0.362	Mn	0.775
Si	0.179	Cu	0.011	Ni	0.016
Mg	0.172	W	< 0.005	Co	0.005
Al	0.030	Nb	< 0.002	B	0.0014
				P	0.007
				Cr	0.984
				Ti	0.003
				Pb	0.006
				S	0.005
				V	0.002
				Sn	< 0.001
				Hg	0.000
Burn 3					
Fe	97.507	C	0.372	Mn	0.793
Si	0.186	Cu	0.011	Ni	0.017
Mg	0.175	W	< 0.005	Co	0.006
Al	0.030	Nb	< 0.002	B	0.0003
				P	0.008
				Cr	0.995
				Ti	0.003
				Pb	0.007
				S	0.006
				V	0.002
				Sn	< 0.001
				Hg	0.000
Burn 4					
Fe	97.322	C	0.397	Mn	0.807
Si	0.189	Cu	0.011	Ni	0.017
Mg	0.180	W	< 0.005	Co	0.006
Al	0.028	Nb	< 0.002	B	0.0004
				P	0.010
				Cr	1.013
				Ti	0.003
				Pb	0.007
				S	0.007
				V	0.003
				Sn	< 0.001
				Hg	0.000
Average					
Fe	97.392	C	0.377	Mn	0.789
Si	0.182	Cu	0.011	Ni	0.017
Mg	0.175	W	< 0.005	Co	0.005
Al	0.029	Nb	< 0.002	B	0.0004
				P	0.008
				Cr	0.995
				Ti	0.003
				Pb	0.006
				S	0.006
				V	0.002
				Sn	< 0.001
				Hg	0.000

