

Análisis de la microestructura del acero V320 sometido a tracción y torsión luego de un tratamiento térmico de temple subcero.

Fernando Mauricio Jácome Mancheno
Universidad Particular Internacional SEK

Nota de Autor

Fernando Mauricio Jácome Mancheno, Facultad de Ingeniería Mecánica,
Universidad Internacional SEK; Director Ingeniero Paolo Salazar MSc.

Cualquier correspondencia concerniente a este trabajo puede dirigirse a:
fireblade2100@hotmail.com

Declaración Juramentada

Yo, FERNANDO MAURICIO JÁCOME MANCHENO, con cédula de identidad 171545276-7, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado a calificación profesional; y, que se ha consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

FERNANDO MAURICIO JÁCOME MANCHENO

C.I.: 171545276-7

Dedicatoria

Dedico esta tesis a mis padres, quienes con su apoyo y sacrificio hicieron posible que esto ocurra. Me supieron guiar durante toda mi vida estudiantil, fueron largos años, pero todo tiene su recompensa.

De igual manera esta tesis va dedicada a mi novia, quien con sus consejos, apoyo y perseverancia me acompañó durante todo el camino de este largo viaje, juntos llegaremos muy lejos.

“El éxito de un hombre depende un 10% de él y un 90% de la mujer que está a su lado”

F. Jácome 2015.

Índice de Contenidos

Declaración Juramentada	2
Dedicatoria	3
Índice de Tablas y Figuras	6
Resumen	9
Abstract	10
Introducción	11
Aceros especiales	11
Diagrama Esfuerzo – Deformación	11
Tratamientos térmicos	12
• Ferrita	12
• Cementita	13
• Perlita	13
• Austenita	13
• Martensita	13
Recocido	14
• Recocido de homogenización	14
• Recocido de cristalización	14
• Recocido de esferoidización	15
• Normalizado	15
Distensionado	15
• Distensionado intermedio	15
• Distensionado de trabajo	15
Temple	16
• Temple superficial	16
• Temple completo	16
• Revenido	16
Cementación	17
• Cementación de alta dureza	17
• Cementación de baja dureza	17

Nitruración	18
Temple subcero	18
Acero V320 / 4140	20
Método	24
Fabricación de probetas.....	25
Medición de la dureza	27
Procedimiento de prueba de tracción	29
• Ensayo de tracción:	29
Procedimiento de prueba de torsión	32
• Ensayo de torsión:	32
Resultados	35
Ensayos de tracción.....	35
Acero con temple subcero	35
Acero con nitruración.....	36
Acero sin tratamiento térmico	38
Ensayos de torsión.....	39
Acero con temple subcero	39
Acero con nitruración.....	42
Acero sin tratamiento térmico	45
Evaluación de resultados	48
Ensayo de tracción	48
Probeta con temple subcero.....	48
Probeta con nitruración	49
Probeta sin tratamiento térmico.....	50
Ensayo de torsión	50
Probeta con temple subcero.....	50
Probeta con nitruración	51
Probeta sin tratamiento térmico.....	51
Cálculo del esfuerzo normal en la probeta con nitruración	52
Cálculo del esfuerzo normal en la probeta sin tratamiento térmico	52
Discusión.....	53

Material	53
Recomendaciones.....	54
Bibliografía	56
ANEXOS.....	58
Anexo A. Horno de temple y distensionado.....	58
Anexo B. Horno de nitruración	59
Anexo C. Certificado de calidad del material utilizado.	60
ANEXO D. Microscopio metalográfico Olympus GX-41. Partes y vista física.	61
Anexo E. Micrografía del Acero V320 – 4140 a 200x antes del proceso de temple subcero	62
Anexo F. Micrografía del Acero V320 – 4140 a 200x después del proceso de temple subcero	63

Índice de Tablas y Figuras

Tablas

Tabla 1. Clasificación de aceros según AISI – SAE.....	20
Tabla 2. Clasificación de aleantes en los aceros.....	22
Tabla 3. Composición química del acero V320 – 4140.....	23
Tabla 4. Propiedades mecánicas del acero V320 – 4140.....	23
Tabla 5. Durezas obtenidas antes y después de los tratamientos térmicos.....	29
Tabla 6. Mediciones de las probetas antes y después de los ensayos.....	48

Figuras

Figura 1. Diagrama esfuerzo – deformación.....	12
Figura 2. Medidas en mm. para la fabricación de probetas para tracción.....	25
Figura 3. Medidas en mm. para la fabricación de probetas para torsión.....	25
Figura 4. Probetas maquinadas.....	26

Figura 5. Probetas después de tratamiento térmico.....	26
Figura 6. Máquina para medición de dureza.....	27
Figura 7. Base para la medición de dureza en secciones circulares.....	28
Figura 8. Medición de la dureza de la probeta de tracción.....	28
Figura 9. Base para la medición de dureza en secciones planas.....	28
Figura 10. Medición de la dureza de la probeta de torsión.....	29
Figura 11. Mordazas para ensayo de tracción de probetas circulares.....	31
Figura 12. Alineación entre probeta y máquina de ensayos universales.....	31
Figura 13. Máquina de ensayos universales y controlador de mordazas.....	31
Figura 14. Pulsadores de máquina de torsión.....	33
Figura 15. Probeta lista para ubicarse en la máquina de torsión.....	34
Figura 16. Diagrama esfuerzo – deformación acero con tratamiento térmico de temple subcero.....	35
Figura 17. Probeta de acero con tratamiento térmico de temple subcero posterior a la prueba de tensión.....	36
Figura 18. Diagrama esfuerzo – deformación acero con tratamiento térmico de nitruración.....	37
Figura 19. Probeta de acero con tratamiento térmico de nitruración posterior a la prueba de tensión.....	38
Figura 20. Diagrama esfuerzo – deformación acero sin tratamiento térmico.....	38
Figura 21. Probeta de acero sin tratamiento térmico posterior a la prueba de tensión.....	39
Figura 22. Diagrama torque – tiempo acero con tratamiento térmico de temple subcero...	39
Figura 23. Diagrama ángulo de torsión – tiempo acero con tratamiento térmico de temple	

subcero.....	40
Figura 24. Diagrama torque – ángulo de torsión acero con tratamiento térmico de temple subcero.....	40
Figura 25. Diagrama torque – ángulo de rotación acero con tratamiento térmico de temple subcero.....	41
Figura 26. Probeta de acero con tratamiento térmico de temple subcero posterior a la prueba de torsión.....	42
Figura 27. Diagrama torque – tiempo acero con tratamiento térmico de nitruración.....	42
Figura 28. Diagrama ángulo de torsión – tiempo acero con tratamiento térmico de nitruración.....	43
Figura 29. Diagrama torque – ángulo de torsión acero con tratamiento térmico de nitruración.....	43
Figura 30. Diagrama torque – ángulo de rotación acero con tratamiento térmico de nitruración.....	44
Figura 31. Probeta de acero con tratamiento térmico de nitruración posterior a la prueba de torsión.....	45
Figura 33. Diagrama ángulo de torsión – tiempo acero sin tratamiento térmico.....	45
Figura 34. Diagrama torque – ángulo de torsión acero sin tratamiento térmico.....	46
Figura 35. Diagrama torque – ángulo de rotación acero sin tratamiento térmico.....	46
Figura 36. Probeta de acero sin tratamiento térmico posterior a la prueba de torsión.....	47
Figura 37. Diagrama esfuerzo – deformación para un material frágil típico.....	52
Figura 38. Diagramas esfuerzo – deformación para el hierro y para diversos grados de acero.....	53

Resumen

El resultado de este trabajo de titulación fue la comprobación de que en el acero V320 – 4140 no se necesita realizar un tratamiento térmico de temple subcero o temple a alta dureza debido a que el mismo se vuelve muy frágil y pierde sus propiedades de acero bonificado. El proceso de temple bajo cero es recomendado en aceros de grado herramienta, es decir aceros con los que se fabrican piezas que tengan alto grado de desgaste, debido a que este proceso permite modificar la estructura del acero y elevar su tiempo de vida útil en gran medida.

De igual manera se pudo evidenciar que el tratamiento de tenifer o nitruración únicamente brinda al material una capa superficial que evita la corrosión, más no brinda una mejoría en las propiedades mecánicas del material.

El acero V320 - AISI4140 es utilizado sobretodo en la fabricación de piezas mecánicas para la rama petrolera, debido a su alto contenido de carbono y su estado bonificado al momento de su fabricación.

Abstract

As a result of the present research was the mechanical property about V320 – 4140 steel, which does not need to make a subzero hardening or tempering with high hardness heat treatments because it becomes very brittle and loses its properties of hardened steel.

This subzero hardening process is recommended in steel that will be used in machine elements which are having high worn, because this process changes the steel structure and increases its useful lifetime.

In the same way it was evident that the Tenifer heat treatment provides a coating surface on the material that prevents corrosion and it does not provide further improvement in the mechanical properties of the material.

The V320 - AISI4140 steel is mainly used in the manufacture of oil industry mechanical parts, because of its high carbon content and the quenched – tempered state when it is manufactured.

Introducción

El desarrollo de nuevos procesos para mejorar las cualidades físicas de los materiales se dio a inicios del siglo XX durante la Primera Guerra Mundial debido a que los fabricantes de material de artillería necesitaban de materia prima con mayor calidad, la cual no debía fallar durante su uso y debía brindar características especiales contra el desgaste y aumento de su tenacidad para soportar mayor cantidad de procesos cíclicos. (Obando., 2011, p. 53).

El estudio de los tratamientos térmicos fue desarrollado por D. Chernov en 1868, quien determinó que la estructura de los aceros depende de la temperatura de calentamiento y de la velocidad de enfriamiento. (Torres, 2004, p. 15).

Aceros especiales

Los aceros especiales son aquellos que tienen varios elementos aleantes agregados durante su proceso de fabricación tales como el silicio, manganeso, cromo, molibdeno, vanadio, entre otros, los cuales generan propiedades especiales de comportamiento como mayor nivel de polubilidad, formación de carburos, tenacidad o dureza por citar unos ejemplos. Los aceros especiales de igual manera se caracterizan por tener una distribución molecular y espacios intersticiales con una alta homogeneidad. Para la fabricación de este tipo de aceros se necesita tecnología más avanzada, en la que se controla el tipo de enfriamiento, temperatura de fabricación y el método con el cuál se colocará la colada en los moldes, todo esto para garantizar pureza y uniformidad en el material y con ello un mejor tratamiento térmico para el material.

Diagrama Esfuerzo – Deformación

Es un sistema de coordenadas x e y en el primer cuadrante, en el que se representa la

relación entre el esfuerzo y la deformación en un material dado es una característica importante del material. Este diagrama se obtiene a partir de una prueba de tensión ejercida sobre una probeta del material que se desee analizar, por ejemplo acero, madera, polímeros, entre otros. La gráfica de esta prueba se indica en la Figura 1. (Beer & Johnston, 2010).

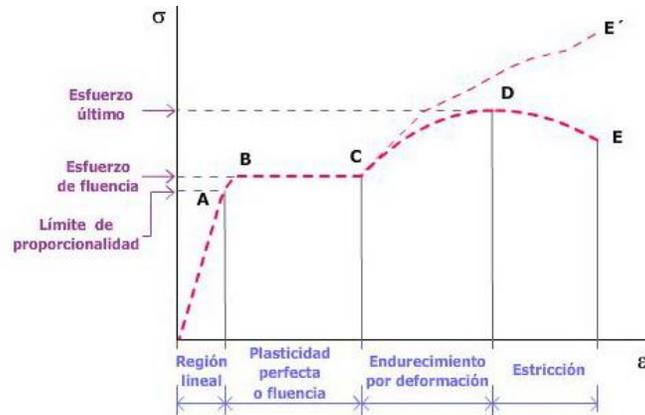


Figura 1. Diagrama esfuerzo – deformación

Tratamientos térmicos

Para dar un tratamiento térmico a un acero se deben tomar en cuenta tres cosas: el calentamiento, tiempo de permanencia y enfriamiento. Dentro de este proceso existe un subproceso llamado tratamiento termoquímico, en el cual se debe generar un ambiente en el cual se dé la difusión de los elementos químicos que van a formar parte de la superficie del material a ser tratado. Los elementos utilizados en este proceso generalmente son el carbono, nitrógeno o un baño de sales fundidas a 800°C para lograr una estructura atómica en la cual el acero genere una mejor capacidad de difusión.

Los constituyentes de los aceros que más intervienen en los tratamientos térmicos de acuerdo al diagrama hierro – carbono son:

- **Ferrita:** Es una solución sólida de carbono en hierro que tiene una cristalización en una estructura de red cúbica centrada en el cuerpo (BCC). Es el constituyente más

blando y dúctil del acero. Tiene una dureza de 90 HB, una resistencia última al esfuerzo Sut de 28kg/mm^2 y un alargamiento de 35 al 40%. Es una solución magnética

- **Cementita:** Es un compuesto químico que contiene carburo de hierro (Fe_3C), tiene una dureza de 700HB (68 HRC), es el constituyente más duro pero a la vez más frágil del acero. Tiene propiedades magnéticas hasta los 210°C , luego de lo cual pierde su magnetismo.
- **Perlita:** Está compuesta por 86% de ferrita y 13,5% de cementita, tiene una dureza 200HB, una resistencia última al esfuerzo Sut de 80kg/mm^2 y un alargamiento de 15%. La perlita se calienta a temperatura inferior a los 723°C durante un período largo de tiempo.
- **Austenita:** Es una solución sólida de carbono en hierro con forma de cristales cúbicos de cara centrada (CCC), siendo de esta manera el componente más denso del acero. Su formación empieza sobre la temperatura crítica (723°C). Tiene una dureza de 40HRC, resistencia última al esfuerzo Sut de 100kg/mm^2 y un alargamiento de 10%. No es magnética.
- **Martensita:** Se la obtiene con un enfriamiento brusco de la austenita obtenida por calentamiento, es una solución sobresaturada en hierro, por lo que es un constituyente inestable y necesita ser revenido. Su dureza se encuentra entre los 50 y 68 HRC, resistencia última al esfuerzo Sut de 175 a 250kg/mm^2 y un alargamiento de 2,5 a 0,5%. Es un constituyente magnético.

(Bohler, 2011) (Askeland, 2004).

Los tratamientos térmicos se diseñaron específicamente para ser aplicados en aceros

especiales, debido a su composición química y a su capacidad de mejorar sus propiedades mecánicas después de la aplicación de estos procesos.

Estos tratamientos se los divide en dos grupos, aquellos que se generan durante la fabricación del material (estado de suministro) que pueden ser: recocido o bonificado. El segundo grupo de tratamientos son aquellos que se generan después del mecanizado del material, estos son: distensionado, temple, revenido, nitruración y temple subcero entre los principales.

Recocido

Este tratamiento tiene como finalidad la disminución de la dureza de los aceros posterior a su fundición, temple o laminación, con lo cual se va a obtener una estructura cristalina más homogénea permitiendo una mejor maquinabilidad de los mismos.

Existen cuatro tipos de recocido, los cuales se caracterizan por:

- **Recocido de homogenización:** Se lo realiza a altas temperaturas (entre 1050 y 1250°C) durante largos períodos de tiempo que comprenden hasta 50 horas dentro del horno, con un enfriamiento paulatino dentro del mismo. Esto permite una redistribución homogénea de los elementos químicos en el material. Se lo utiliza básicamente en láminas forjadas, fundiciones perfiladas y lingotes de acero para disminuir su dureza, facilitando el proceso de maquinado.
- **Recocido de cristalización:** Este tratamiento debe realizarse con temperaturas en las cuales el acero no cambie su composición a austenítica (500 - 650°C), con enfriamiento dentro del horno de tratamiento. El mismo permite alivianar las tensiones dentro de la estructura cristalina del acero obtenida durante la laminación en frío o la fabricación de alambres al frío. Este proceso aumenta la tenacidad y

maquinabilidad de los materiales.

- **Recocido de esferoidización:** Es un proceso cíclico que aumenta y disminuye la temperatura a la cual es sometido el acero para lograr estar por encima y por debajo de su zona austenítica en lapsos de tiempos programados, con un enfriamiento final dentro del horno. Con este proceso se logra variar la estructura perlítica del material cambiando su estructura atómica de láminas a esferas, aumentando ductilidad en el material al obtener mayores espacios intersticiales. Este proceso es utilizado generalmente en procesos de conformado en frío.
- **Normalizado:** Este proceso es similar al anterior, la diferencia es que en éste el enfriamiento es rápido, no se lo realiza en el horno, sino a temperatura ambiente, con lo cual se recristaliza el acero generando tamaños de grano más pequeños que van a aumentar la tenacidad y dureza.

Distensionado

Es un tipo de tratamiento térmico que permite liberar tensiones internas del acero, las cuales son generadas por procesos de soldadura, maquinado prolongado o por la geometría del material. Se lo realiza a temperaturas bajas (500 - 650°C). Existen dos tipos de distensionado:

- **Distensionado intermedio:** En este proceso se generan cambios estructurales, pero sí se mejoran las propiedades mecánicas del material como la maquinabilidad y la ductilidad. Este proceso permite la disminución del riesgo de falla del material por acumulación de energía en concentradores de esfuerzos o en zonas que han sido afectadas por altas temperaturas.
- **Distensionado de trabajo:** Este proceso tiene la misma descripción del

distensionado intermedio, solo que el tiempo de estadía de la pieza en el horno es mayor debido a que éste es aplicado a piezas que han tenido ciclos de trabajo extensos o han sufrido rectificaciones muy altas, con lo cual se disminuyen los esfuerzos acumulados en el material, aumentando la tenacidad del mismo.

Temple

Es un tipo de tratamiento térmico que permite la modificación del arreglo estructural del acero para aumentar dureza, resistencia mecánica y resistencia al desgaste para aumentar la durabilidad en el uso de las piezas sometidas a este tratamiento. Existen tres tipos de temple, entre los cuales tenemos:

- **Temple superficial:** Se lo realiza calentando superficialmente el acero mediante llama directa o con inducción de corriente eléctrica, posterior a este proceso se lo enfría con una velocidad mayor que la crítica del material. Esto se lo realiza para obtener una capa superficial dura con un centro blando. La capa que es sometida al temple puede alcanzar profundidades de hasta 2mm. de profundidad. Ejemplos de elementos mecánicos que son templados son piñones, cuchillas de corte, barras para doblado de acero, entre otros.
- **Temple completo:** En este tratamiento térmico se temple toda la pieza mediante un calentamiento superior a la temperatura de transformación austenítica, se lo mantiene por poco tiempo y posterior a esto se enfría el acero a una velocidad elevada. Esto permite obtener un cambio estructural en el material para mejorar sus propiedades mecánicas de dureza, resistencia mecánica, resistencia al desgaste, tenacidad, entre otras.
- **Revenido:** Este procedimiento se lo realiza a todos los aceros que han sido

templados, con el fin de reducir o eliminar tensiones internas que se generan en el acero durante el proceso de temple, eliminación de la austenita retenida en el material y obtención de mejores propiedades mecánicas en el material. Este proceso se lo realiza con el calentamiento del material hasta una temperatura determinada de acuerdo al tipo de acero, con un enfriamiento posterior en medios como aire u horno.

Cementación

Es un tratamiento térmico en el que se introducen átomos de carbono en la superficie del acero por medio de temperatura para obtener una capa superficial resistente al desgaste, manteniendo un núcleo con alta tenacidad. Existen dos tipos de tratamientos de cementación.

- **Cementación de alta dureza:** Es un proceso en el que se introduce el acero en un medio de difusión de átomos de carbono en una temperatura superior a la de transformación austenítica, posterior a esto se realiza un proceso de temple para obtener una alta dureza en la capa superficial y una tenacidad regular en el núcleo. Este proceso está diseñado para piezas en las cuales se tienen altas exigencias para el desgaste superficial con absorción de energía en el núcleo, como por ejemplo piñones, rodamientos, matrices, etc.
- **Cementación de baja dureza:** En este tipo de cementación se obtiene la misma dureza en la capa superficial alta pero a diferencia del tipo anterior el núcleo tiene una alta tenacidad. Este proceso se utiliza en piezas en las cuales la resistencia mecánica tiene mayor prioridad que la resistencia al desgaste superficial, por ejemplo en vinchas y resortes, boquillas de herramientas, entre otros.

Nitruración

Es un tratamiento térmico en el cual se introducen átomos de nitrógeno en la superficie del acero mediante temperatura con la finalidad de obtener una capa superficial con propiedades elevadas de resistencia al desgaste y a la corrosión, sin cambiar las propiedades del material debajo de la capa tratada.

La nitruración también conocido como tenifer es un proceso de difusión de átomos de hidrógeno, los cuales forman compuestos químicos con los elementos de aleación del acero, obteniendo así nitruros de hierro, de cromo, de tungsteno, entre otros. Logrando así generar una alta resistencia al desgaste y a la corrosión. Este proceso se lo debe realizar en rangos de temperatura desde los 500 a 600 °C, con un enfriamiento en un baño de sales oxidantes.

La capa generada en el proceso de nitruración generalmente es de 50µm y alcanza una dureza de aproximadamente 900 Vickers (66,5 Rockwell C) de acuerdo al acero utilizado. En este proceso no existe un cambio estructural debido a que se lo realiza debajo de la temperatura de transformación austenítica.

Temple subcero

Es un tratamiento térmico que se realiza a temperaturas debajo de los 0°C, provocando que en las piezas de acero exista una homogenización estructural, obteniendo una mejora en sus propiedades de resistencia mecánica, resistencia de fatiga, dureza, tenacidad, etc.

Este proceso se lo realiza a temperaturas que oscilan entre -80 y -140°C, con lo que se obtiene una transformación total de la austenita de los aceros tratados térmicamente, tanto templados como cementados. Posterior a eso se realiza una igualación a temperatura

ambiente y un revenido de acuerdo a los requerimientos del material.

El temple subcero permite una homogenización de la estructura interna del material para incrementar de esa manera la resistencia a la fatiga y al impacto. En la mayoría de aceros templados se aumenta de 1 a 3 puntos de dureza HRC, de igual manera la resistencia al desgaste aumenta en un 25% y la resistencia a la corrosión intergranular aumenta hasta en un 70% debido a la homogenización y compactación de los espacios interatómicos. Este proceso puede ser realizado a cualquier acero, templados, cementados y a piezas que ya han sido sometidos a esfuerzos y trabajos para recuperar e incrementar sus propiedades mecánicas.

(Bohler, 2011), (Obando., 2011).

Con el paso de los años se desarrollaron nuevos métodos para realizar tratamientos con propiedades más avanzadas como arreglo atómico para la disminución de espacios intersticiales y se lo logró gracias a los procesos subcero.

Para poder lograr un tratamiento criogénico se necesita de gases como el nitrógeno y el oxígeno en estado líquido, los mismos tuvieron su apogeo a inicios de la década de los ochenta. De igual manera con la culminación de la carrera espacial, posterior al alunizaje y comparando los materiales de los transbordadores antes y después de su regreso del espacio, se observó que los elementos que conformaban el casco del cohete tenían mejores propiedades al haber sido sometidos a temperaturas criogénicas en el trayecto del viaje.

Con ello se realizó pruebas descendiendo drásticamente la temperatura de los materiales utilizando métodos criogénicos para estabilizar dimensionalmente la microestructura de los materiales. Todo este proceso se lo realiza con el fin de que un acero con estructura austenítica adquiriera nuevamente una distribución martensítica, la cual es la

fase más dura del acero. Gracias a este cambio en la microestructura del material, se obtuvieron tiempos de vida útil mayores en los aceros tratados.

Acero V320 / 4140

El acero V320 es un tipo de acero especial que se comercializa en estado bonificado, su constitución tiene una aleación al Cromo – Molibdeno, lo que permite tener una alta resistencia a la tracción y a la torsión, así como al desgaste y al impacto. Su designación viene dada por la AISI como 4140, en la que el primer número indica el tipo de acero, el segundo el porcentaje en peso del principal elemento aleante y los dos últimos indican el porcentaje de carbono que contiene ese acero. La clasificación según la AISI-SAE de los aceros se la identifica mediante la tabla 1. (Bohler, 2011) (TEGMETAL, 2015).

Designación	Tipo de aleación
10XX	Aceros ordinarios al carbón
11XX	Aceros al carbono re sulfurados de fácil maquinado
13XX	Aceros con 1.75% de Mn (1.5-2%)
15XX	Aceros al manganeso (1.0-1.65%)
23XX	Aceros al níquel, 3.5% de Ni (3.25-3.75%)
25XX	Aceros al níquel, 5% de Ni (4.75-5.25%)
31XX	Aceros al níquel-Cromo, 1.25% Ni y 0.65% Cr
33XX	Aceros al níquel-Cromo, 3.5% Ni y 1.60% Cr
40XX	Aceros al molibdeno, 0.25% Mo.
41XX	Aceros con Cr (0.4-1.2%), Mo (0.08-0.25%)
43XX	Aceros al Ni-Cr-Mo (1.8%Ni, 0.65%Cr, 0.25%Mo)

44XX	Molibdeno, (0.4-0.53%)
45XX	Molibdeno, (0.55%)
46XX	Níquel- Molibdeno, (1.8%Ni, 0.2%Mo)
47XX	Níquel- Cromo- Molibdeno, (1.05%Ni, 0.45%Cr, 0.2%Mo)
48XX	Níquel- Molibdeno, (3.5%Ni, 0.25%Mo)
50XX	Aceros al Cromo (bajo cromo, 0.28-0.40%)
51XX	Medio Cromo, (0.8-1.05%)
50XXX	Acero resistente al desgaste, 0.5%Cr
51XXX	Acero resistente al desgaste, medio Cr 1%
52XXX	Acero resistente al desgaste, alto Cr 1.45%
61XX	Aceros al Cromo-Vanadio, (0.75% Cr, 0.15% V)
8XXX	Aceros de triple aleación
81XX	0.3%Ni, 0.4%Cr, 0.12%Mo
86XX	0.55%Ni, 0.50%Cr, 0.20%Mo
87XX	0.55%Ni, 0.50%Cr, 0.25%Mo
88XX	0.55%Ni, 0.50%Cr, 0.35%Mo
92XX	Acero al Silicio-Manganeso, (2%Si y 0.8%Mn)
93XX	Aceros de triple aleación, 3.25%Ni, 1.2%Cr, 0.12%Mo
98XX	Aceros de triple aleación, 1%Ni, 0.8%Cr, 0.25%Mo
XXBXX	Aceros con Boro, (mínimo 0.0005% B)
50BXX	0.5%Cr
51BXX	0.8%Cr

81BXX	0.3%Ni, 0.45%Cr, 0.12%Mo
XXBVXX	Acero al Boro-Vanadio
XXLXX	Acero con plomo
XXXH	Acero con banda de templabilidad
EX	Nuevos tipos de acero con designación temporal

Tabla 1. Clasificación de los aceros según la AISI-SAE

De igual manera existe una tabla para identificar los principales elementos aleantes presentes en los aceros, los mismos se observan en la tabla 2. (Bohler, 2011) (TEGMETAL, 2015).

Identificador	Aleante
1	Manganeso
2	Níquel
3	Níquel – Cromo (Aleante principal el cromo)
4	Molibdeno
5	Cromo
6	Cromo – Vanadio (Aleante principal el Molibdeno)
7	Níquel – Cromo – Molibdeno (Aleante principal el Molibdeno)
8	(Aleante principal el Níquel)

Tabla 2. Clasificación de aleantes en los aceros

La composición química del acero V320 – 4140 contiene más elementos de los que señalan las tablas anteriores, esos elementos son considerados como impurezas y son

aceptados en cantidades pequeñas, no superiores al 0.02% en peso. (Bohler, 2011).

	C	S	Si	Mn	P	Cr	Mo	Ni	Cu	Al	V
4140	0.43	0.002	0.26	0.58	0.008	0.981	0.175	0.016	0.028	0.013	0.005

Tabla 3. Composición química del acero V320 – 4140

Las propiedades mecánicas de este acero se muestran en la siguiente tabla (Bohler, 2011):

Diámetro	Límite de fluencia N/mm ² mín.	Resist. a la tracción N/mm ² mín.	Elongación N/mm ² mín.	Reducción de área N/mm ² mín.	Resist. al impacto J mín.
28≤40	750	1100 – 1200	11	45	35
40≤100	650	900 – 1100	12	50	35
100≤160	550	800 – 950	13	60	35
160≤250	500	750 - 900	14	55	35
Dureza	28 – 33 HRC / 250 – 310 HB				
Estado de suministro	Bonificado 850 – 1050 N/mm ²				
Acabado	Laminado en caliente				

Tabla 4. Propiedades mecánicas del acero V320 - 4140

Método

Para realizar el análisis de un acero sometido a un tratamiento térmico, primero se debe seleccionar un acero a ser estudiado. En este caso se observará las propiedades de un acero V320 / AISI 4140. Es un tipo de acero bonificado que tiene una alta resistencia a la tracción y torsión, es utilizado en la fabricación de piezas mecánicas que son sometidas a grandes esfuerzos, como árboles de transmisión, ejes, bielas, tubería de transporte de crudo y gas, entre otros. Debido a su estado bonificado, lo cual significa que al material se le aplica un tratamiento térmico en la fábrica, antes de ser suministrado al consumidor final; este tratamiento térmico consiste en una etapa de temple y revenido para lograr una mayor tenacidad y resistencia a la tracción. El objetivo de este trabajo de fin de carrera es determinar si existen diferencias entre las propiedades mecánicas del material bajo esfuerzos de torsión y tracción antes y después de un proceso de temple subcero, adicionalmente se realizará un tratamiento de nitruración a otras dos probetas debido a que este material es utilizado en su mayoría en la industria petrolera y las piezas son generalmente nitruradas para evitar la corrosión y desgaste por los altos niveles de azufre que tiene el crudo al momento de extraerlo.

El acero será adquirido en Aceros Bohler del Ecuador, el mismo tendrá una medida superior a la dictada por la norma de la Sociedad Americana de Prueba de Materiales, se realizará un proceso de maquinado en torno y fresa a las muestra obteniendo de esta manera la medida exacta necesaria para que ingresen en la máquina de ensayos universales de la facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Internacional Sek.

Los ensayos que se realizarán a las probetas serán de tracción y torsión. Estos ensayos estarán basados en la normativa ASTM E8.

Fabricación de probetas

Las probetas que se emplearán en los ensayos de tracción se deben fabricar bajo la norma ASTM E8, la cual indica que las medidas requeridas para realizar este tipo de operación son las siguientes:

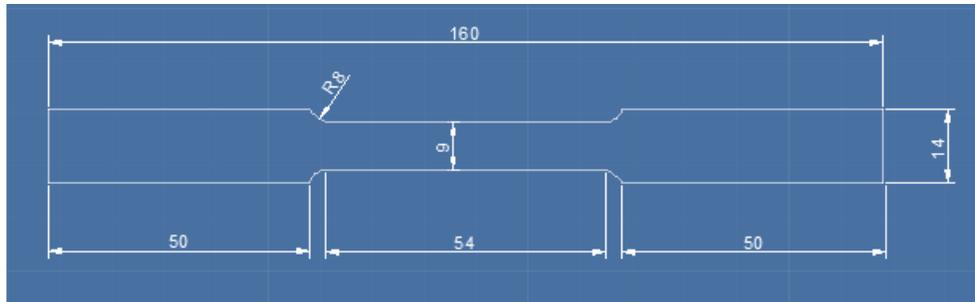


Figura 2. Medidas en mm. para la fabricación de probetas para tracción.

La ASTM no determina ninguna normativa sobre la cual deben fabricarse las probetas que se emplearán en los ensayos de torsión, eso va dictado de acuerdo a la máquina de ensayos universales en la cual se vayan a ejecutar las operaciones. En este caso las medidas vienen dadas de acuerdo a las mordazas de la máquina. Es por eso que las medidas requeridas para realizar esta operación son las siguientes:

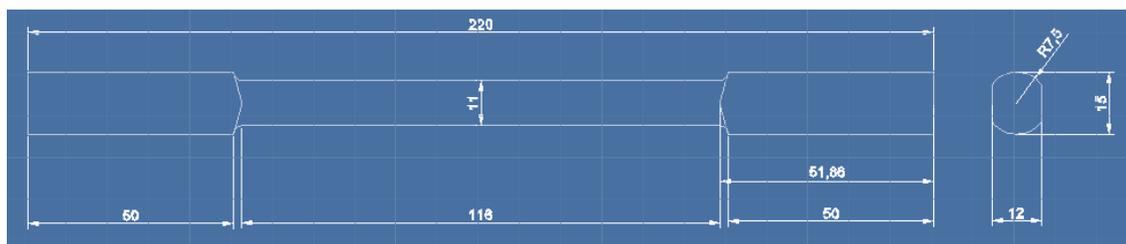


Figura 3. Medidas en mm. para la fabricación de probetas para torsión.

Se dispondrá de 6 piezas en total, 3 para el ensayo de tracción y 3 para el ensayo de torsión. El material original tendrá diámetro de 28mm. debido a que esa es la medida mínima en la que se distribuye el material a ser analizado, además con esto se garantiza la

facilidad de mecanizado de las piezas y la exactitud con la medida final. Las mismas se enviarán a maquinar en un centro de mecanizado que cuente con maquinaria para torneado y fresado.



Figura 4. Probetas maquinadas

Cuando las piezas hayan sido maquinadas, se procederá con la verificación de las medidas con un calibrador y se escogerá 1 pieza para torsión y 1 para tracción y se enviarán a la sucursal de Aceros Bohler Guayaquil para el tratamiento térmico de temple subcero, otras 2 se las nitrurará en la sucursal de Aceros Bohler en Quito Norte y las 2 restantes sin tratamiento térmico serán para las pruebas iniciales.



Figura 5. Probetas después de tratamiento térmico

Medición de la dureza

Se medirá la dureza de cada una de las probetas para comprobar que existió un endurecimiento después del tratamiento térmico. Debido a la dureza que tiene este material, la escala en la que se realizarán las mediciones será en Rockwell C. La máquina que se utilizará en este procedimiento es de marca Mitutoyo, modelo Durotw N, de fabricación brasilera, la misma se encuentra ubicada en la zona de tratamientos térmicos de la sucursal Norte de Aceros Bohler del Ecuador.



Figura 6. Máquina para medición de dureza

Para la medición de la dureza en cada probeta se debe utilizar un diferente soporte, en el cual debe calzar la pieza a ser medida.

Las piezas que se utilizarán en el ensayo de tracción se medirán con la base que tiene ángulos a 60 y 150° como se puede apreciar en la Figura 7. La medición de dureza se identifica en la Figura 8. Para las piezas que se utilizarán en el ensayo de torsión se cambiará la base y se colocará una que tenga forma plana debido a la geometría de la probeta. La base y la medición de dureza se identifican en la Figura 9 y 10 respectivamente.



Figura 7. Base para la medición de dureza en secciones circulares



Figura 8. Medición de la dureza de la probeta de tracción.



Figura 9. Base para la medición de dureza en secciones planas



Figura 10. Medición de la dureza de la probeta de torsión

Los datos que se obtuvieron de la medición de dureza son los siguientes:

PROBETA	Sin Tratamiento Térmico HRC	Temple Subcero HRC	Nitruración HRC
TRACCIÓN	33	54	36
TORSIÓN	33	53	36

Tabla 5. Durezas obtenidas antes y después de los Tratamientos Térmicos

Procedimiento de prueba de tracción

- **Ensayo de tracción:** El ensayo de tracción es un método que tiene como objetivo identificar el límite elástico, plástico y esfuerzo último que tiene un determinado material cuando va a ser sometido a cargas o fuerzas axiales. (CATEDU, 2012) (Valencia, 2012)

Se inicia con la medición de los diámetros de cada una de las probetas para determinar su área con la fórmula

$$A = \pi r^2$$

Posterior a esto, se debe identificar y medir en cada una de las probetas la longitud

inicial que tiene cada una, con esto se analizará al final de las pruebas la elongación que ha sufrido cada probeta después del ensayo. Los extremos de la misma deben ser asentados en las juntas de la rótula de la máquina de ensayos para evitar que se genere flexión cuando la carga axial sea aplicada (Hibbeler, 2006).

Este tipo de ensayos se realizan a una velocidad lenta y constante, la cual está determinada por tablas de acuerdo al material que se va a estudiar. En el caso del acero 4140 la velocidad recomendada se encuentra en el intervalo de 2,1 a 2,6 mm/min. (Ceballos, Gómez, & Coronado, 2009).

En este caso se utilizará un valor de 2 mm/min ya que esa velocidad es la más cercana que permite seleccionar la máquina de ensayos universales. La prueba se inicia con la colocación de mordazas circulares (figura 11), las mismas que sujetan a la probeta en cada uno de sus extremos. Se debe alinear de manera correcta el límite de la sección circular de mayor tamaño con el borde de la mordaza como se indica en la figura 12. Esto se lo calibra con el controlador que se encuentra en la zona lateral derecha de la máquina de ensayos universales (figura 13).



Figura 11. Mordazas para ensayo de tracción de probetas circulares.

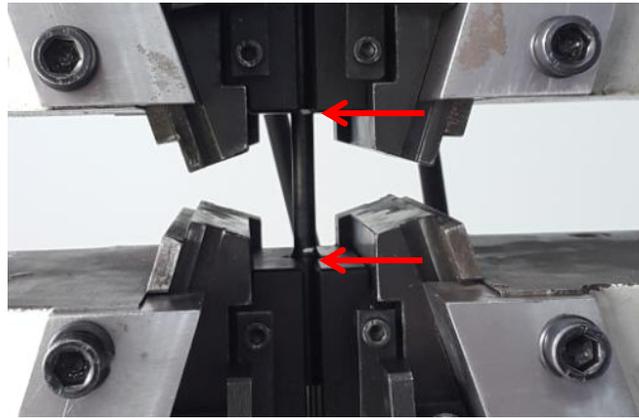


Figura 12. Alineación entre probeta y máquina de ensayos universales.



Figura 13. Máquina de ensayos universales y controlador de mordazas.

La máquina de ensayos universales se enlaza con el ordenador a través del software Testing machine with computer control v2.00, en el cuadro de diálogo hay que seleccionar la velocidad de la prueba, encerrar los parámetros y empezar el test. En la zona de prueba empezará a graficarse la curva de esfuerzo – deformación con una línea roja, registrándose la carga aplicada (P) y el alargamiento que sufre la probeta (δ). La prueba finaliza cuando la pieza se fractura, en ese momento se debe parar la prueba y se toman los datos. Se repite este proceso para las otras dos probetas. El orden en el que se realizarán las pruebas será: temple subcero, nitruración y sin tratamiento térmico.

Procedimiento de prueba de torsión

- **Ensayo de torsión:** Este ensayo permite determinar el comportamiento de los materiales cuando son sometidos a cargas de giro, es decir un desplazamiento circular de una sección transversal al aplicarse un momento torsor. Los datos que se obtienen de este ensayo permiten determinar constantes elásticas y propiedades de los materiales que se analizan. Este tipo de pruebas es utilizado para medir la resistencia de un cordón de soldadura, unión de piezas con engrudos especiales o adhesivos, entre otros. (Hibbeler, 2006) (Beer & Johnston, 2010).

La manera en la cual actúa la máquina es por medio de un mecanismo que gira sobre un eje determinado en un extremo mientras sujeta firmemente la probeta en el otro extremo, aplicando un momento torsor sobre la pieza paulatinamente. Al igual que en el ensayo de tracción este proceso se ejecuta con velocidades determinadas por tablas, las cuales para este tipo de acero van desde 47 a 52 °/min (Ceballos, Gómez, & Coronado, 2009), por efectos del software que utiliza la máquina se seleccionó la velocidad de 50°/min.

Este ensayo se inicia con la medición de los diámetros de cada una de las probetas para determinar su área con la fórmula

$$A = \pi r^2$$

Ecuación 1. Fórmula para calcular el área de una sección circular

Posterior a esto, se debe identificar y medir en cada una de las probetas la longitud inicial que tiene cada una. Uno de los extremos de la misma debe ser insertado en cualquiera de los orificios de la máquina y hacerlo girar por medio de los pulsadores (figura

14) hasta que calce el extremo faltante (figura 15).



Figura 14. Pulsadores de máquina de torsión



Figura 15. Probeta lista para ubicarse en la máquina de torsión

La máquina de torsión se enlaza con el ordenador a través del software Computer-control Electronic Torsion Testing machine, en el cuadro de diálogo hay que seleccionar la velocidad de la prueba, encerrar los parámetros y empezar el test. En la zona de prueba empezará a graficarse la curva de torque – tiempo, ángulo de torsión – tiempo, torque – ángulo de torsión y torque – ángulo de rotación; la prueba finaliza cuando la pieza se fractura, en ese momento se debe parar la prueba y se toman los datos. Se repite este

proceso para las otras dos probetas. El orden en el que se realizarán las pruebas será: temple subcero, nitruración y sin tratamiento térmico.

Análisis Metalográfico

Para el análisis metalográfico se utilizó un microscopio metalográfico marca Olympus, modelo GX-41, el cual tiene incorporado un software llamado CLEMEX, el cual permite el análisis de la micrografía en la pantalla de un ordenador.

El microscopio está ubicado en el laboratorio de Tecnología de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

Para realizar el análisis metalográfico se debe lijar la pieza a ser estudiada con una lámina abrasiva de grano 1200 para una mejor apreciación de la superficie, debido a que ésta siempre tiene imperfecciones de maquinado, este proceso se lo realiza para mejorar la visualización de la estructura del material más no es requisito indispensable para el análisis debido a que existen piezas que tienen capas protectoras muy delgadas, las cuales si se someten a un proceso de lijado perderían esta capa y el análisis tendría fallas. Las piezas que son estudiadas en este trabajo se lijaron y se realizó un ataque químico con nital al 2%, el cual permite delinear los bordes de grano de la microestructura del acero 4140.

Una vez que la superficie a ser estudiada está lista, se coloca la misma en el lente del microscopio previamente encendido y se procede con el enfoque del visor gracias a unas perillas que tiene en su parte derecha. La ampliación con la que se empieza este ensayo es de 50x, y se puede llegar hasta un aumento de 2000x dependiendo de la profundidad que se desee alcanzar para el análisis microestructural. En este caso se utilizó un aumento de 200x ya que con esta imagen ya se pudo observar la dispersión interatómica

que tiene el material luego de ser tratado con el temple subcero. Las imágenes de este proceso se encuentran en los anexos de este trabajo.

Resultados

Los resultados se evaluarán de acuerdo a las pruebas realizadas, para ello se adjuntarán las figuras proporcionadas por el software después de cada ensayo.

Ensayos de tracción

Acero con temple subcero

$$\text{Área} = 63.62\text{mm}^2$$

$$L_0 = 50\text{mm}$$

$$\text{Carga máxima} = 106.09\text{kN}$$

$$R_m = 1670\text{MPa}$$

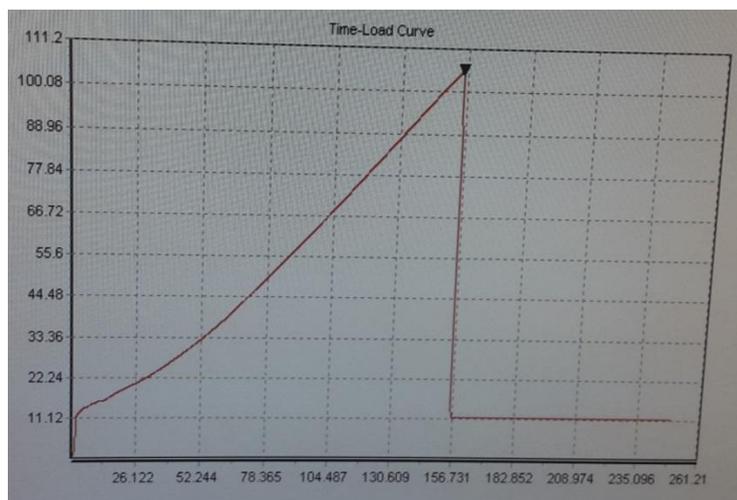


Figura 16. Diagrama esfuerzo – deformación acero con tratamiento térmico de temple subcero.



Figura 17. Probeta de acero con tratamiento térmico de temple subcero posterior a la prueba de tensión.

Acero con nitruración

$$\text{Área} = 63.62\text{mm}^2$$

$$L_0 = 50\text{mm}$$

$$\text{Carga máxima} = 68.09\text{kN}$$

$$R_m = 1070\text{MPa}$$

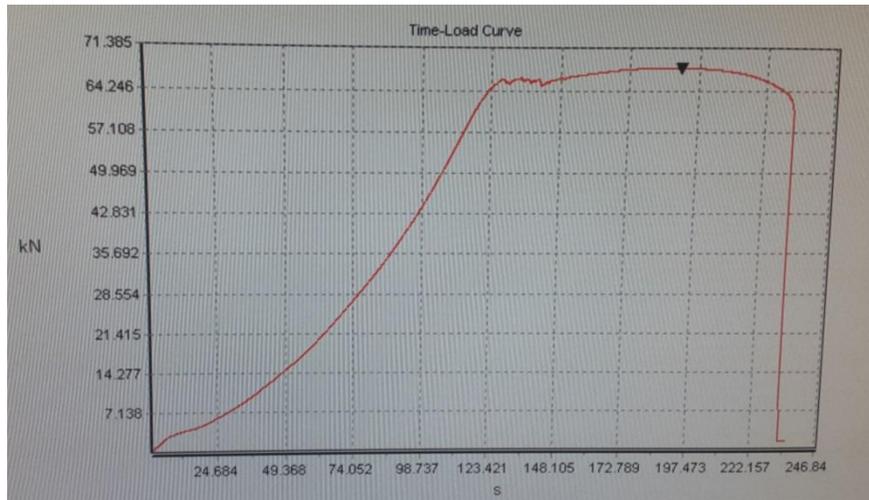


Figura 18. Diagrama esfuerzo – deformación acero con tratamiento térmico de nitruración.



Figura 19. Probeta de acero con tratamiento térmico de nitruración posterior a la prueba de tensión.

Acero sin tratamiento térmico

$$\text{Área} = 63.62\text{mm}^2$$

$$L_0 = 50\text{mm}$$

$$\text{Carga máxima} = 72.68\text{kN}$$

$$R_m = 1140\text{MPa}$$

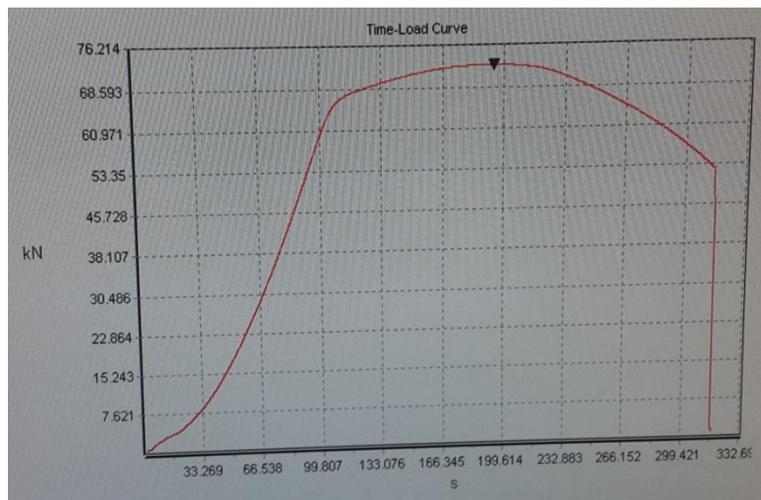


Figura 20. Diagrama esfuerzo – deformación acero sin tratamiento térmico.





Figura 21. Probeta de acero sin tratamiento térmico posterior a la prueba de tensión.

Ensayos de torsión

Acero con temple subcero

$$\text{Área} = 95.04\text{mm}^2$$

$$L_0 = 50\text{mm}$$

$$\text{Carga máxima} = 106.09\text{kN}$$

$$R_m = 1670\text{MPa}$$

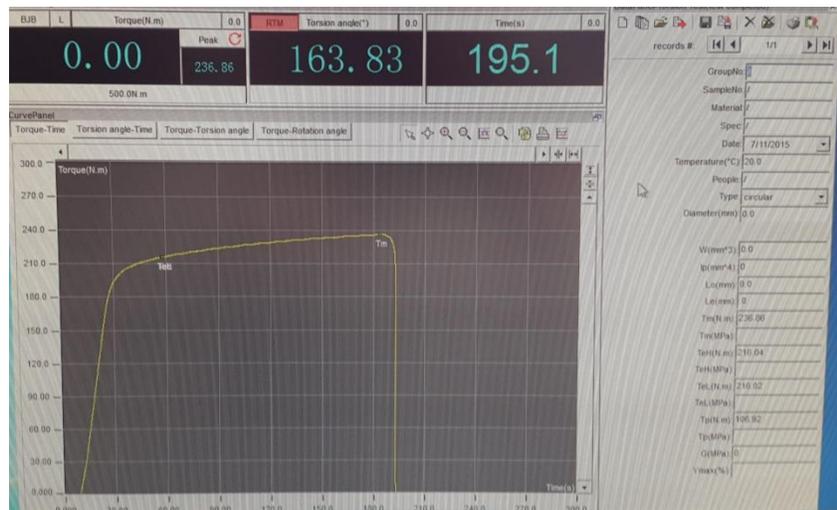


Figura 22. Diagrama torque – tiempo acero con tratamiento térmico de temple subcero.

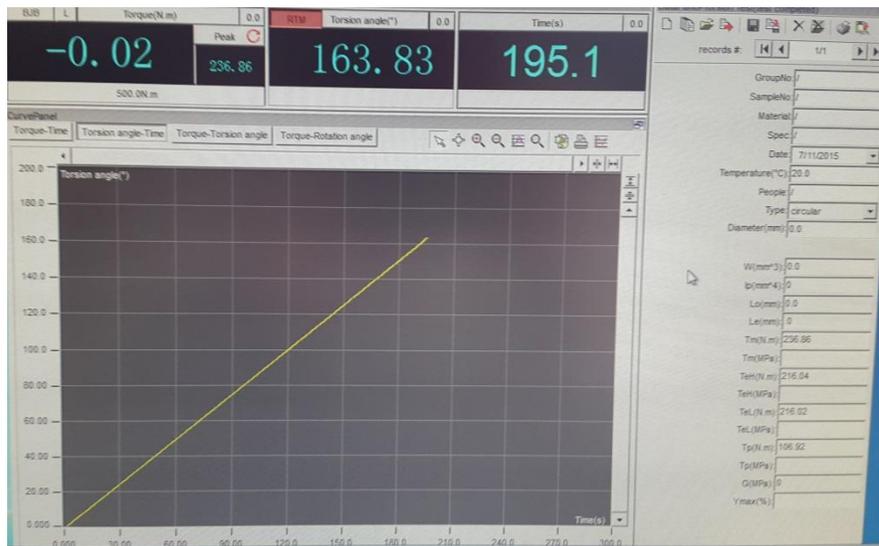


Figura 23. Diagrama ángulo de torsión – tiempo acero con tratamiento térmico de temple subcero.

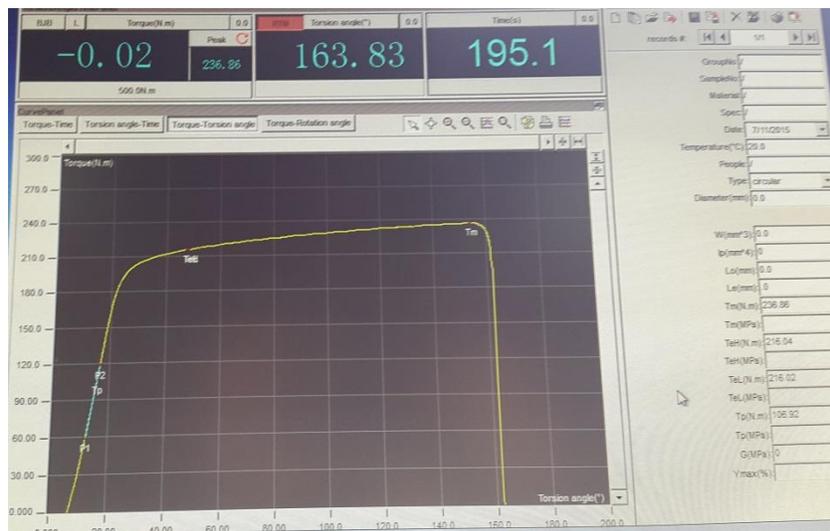
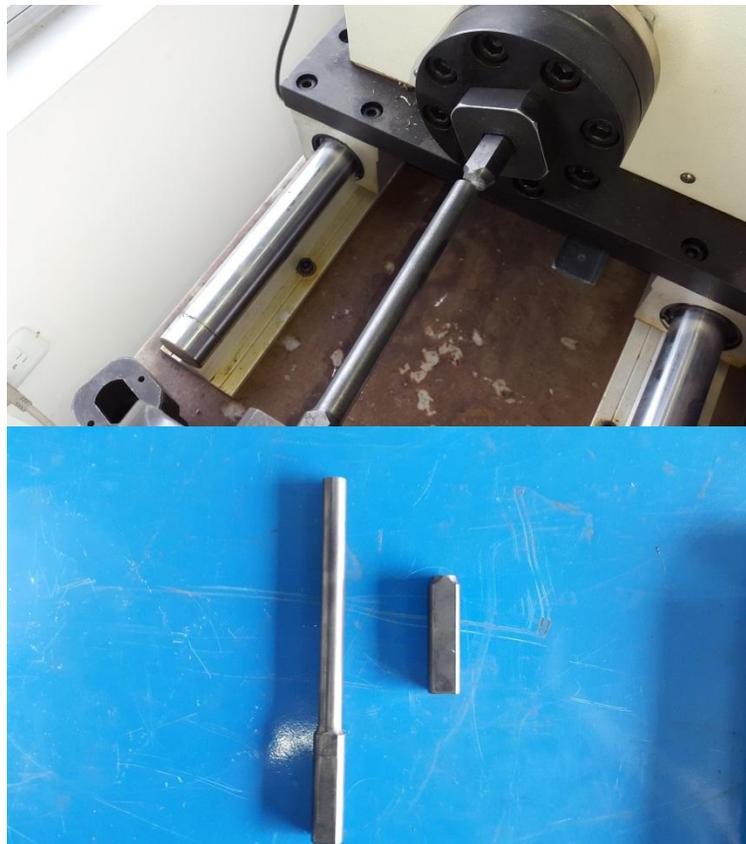


Figura 24. Diagrama torque – ángulo de torsión acero con tratamiento térmico de temple subcero.



Figura 25. Diagrama torque – ángulo de rotación acero con tratamiento térmico de temple subcero.



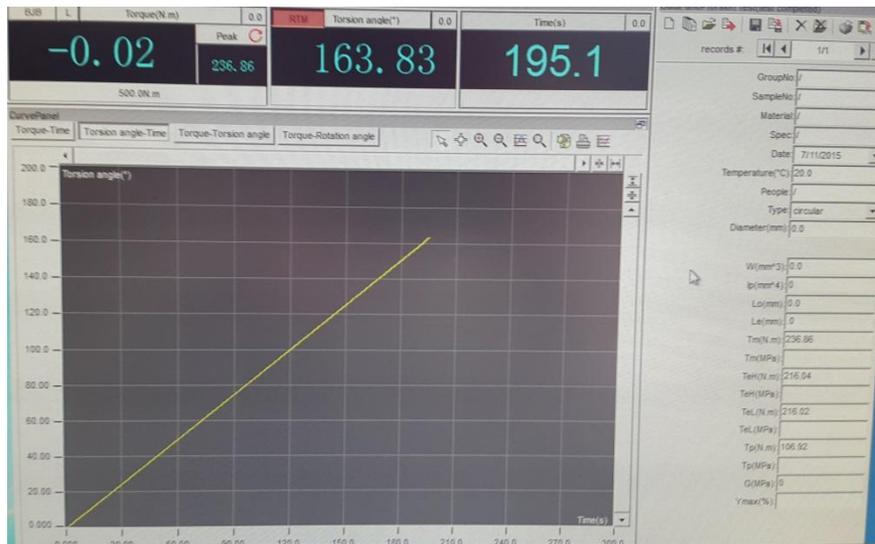


Figura 28. Diagrama ángulo de torsión – tiempo acero con tratamiento térmico de nitruración.

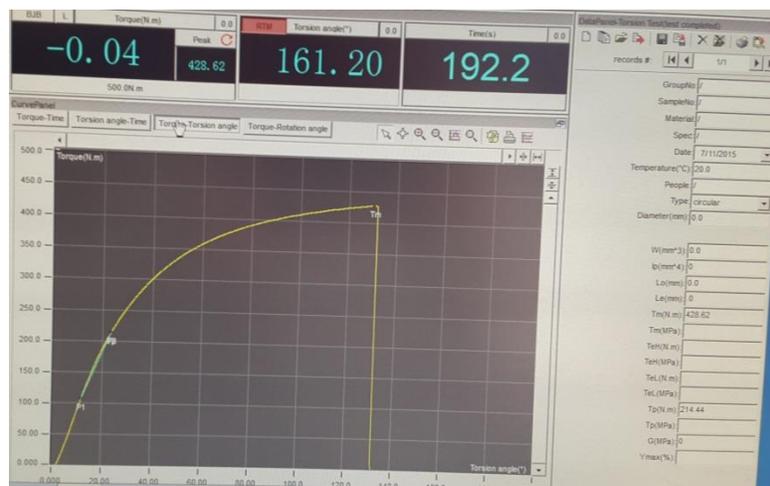


Figura 29. Diagrama torque – ángulo de torsión acero con tratamiento térmico de nitruración.

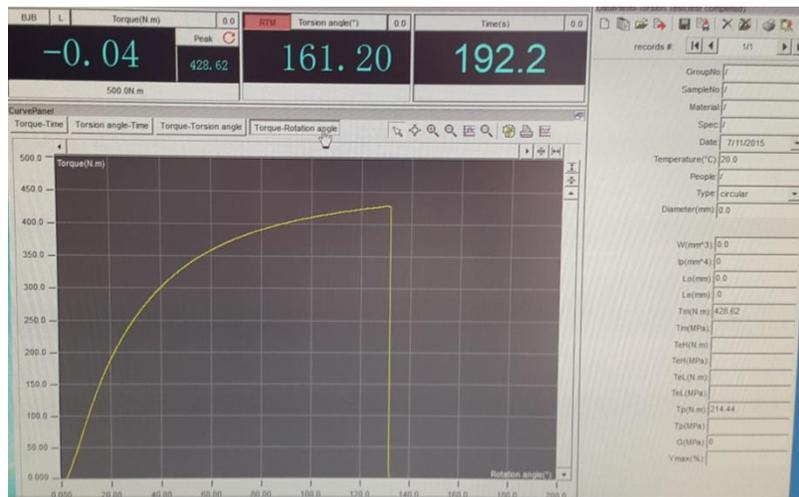


Figura 30. Diagrama torque – ángulo de rotación acero con tratamiento térmico de nitruración.

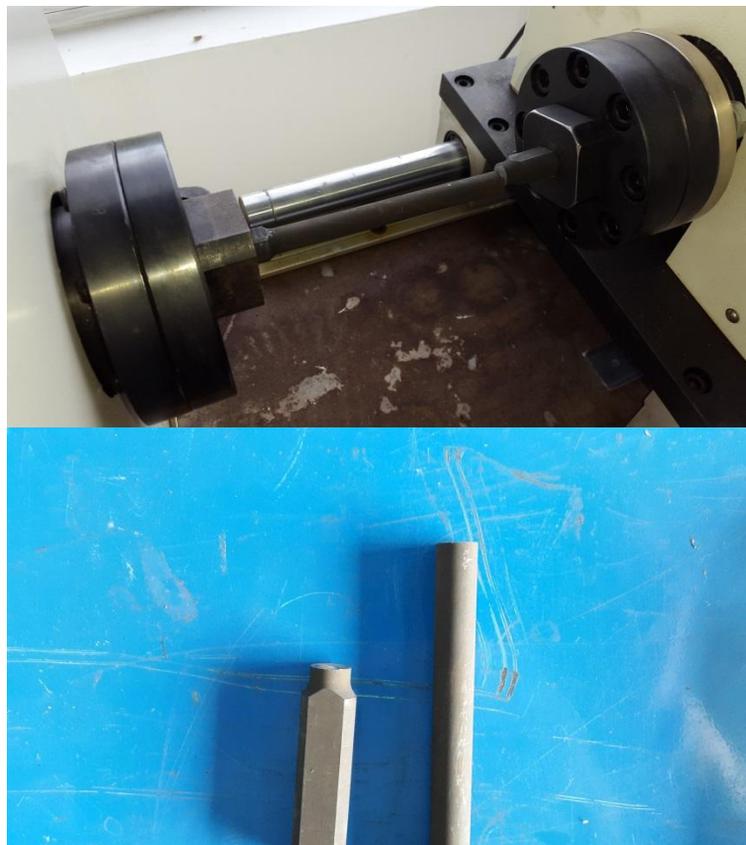




Figura 31. Probeta de acero con tratamiento térmico de nitruración posterior a la prueba de torsión.

Acero sin tratamiento térmico

$$\text{Área} = 95.04\text{mm}^2$$

$$L_0 = 50\text{mm}$$

$$\text{Carga máxima} = 106.09\text{kN}$$

$$R_m = 1670\text{MPa}$$

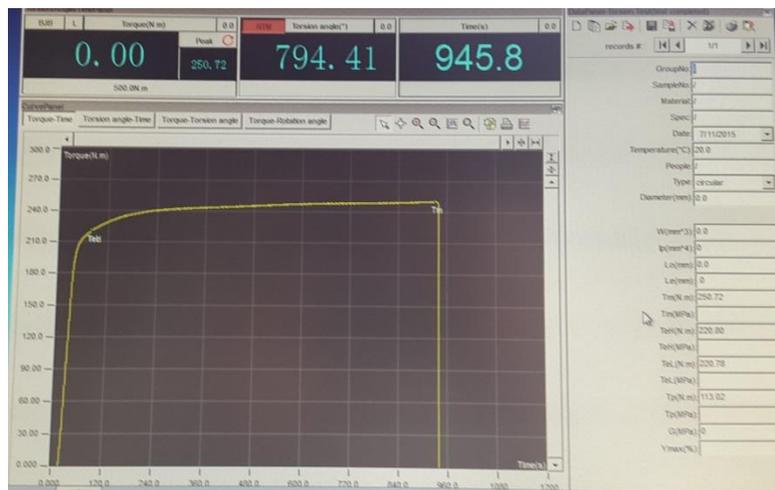


Figura32. Diagrama torque – tiempo acero sin tratamiento térmico.

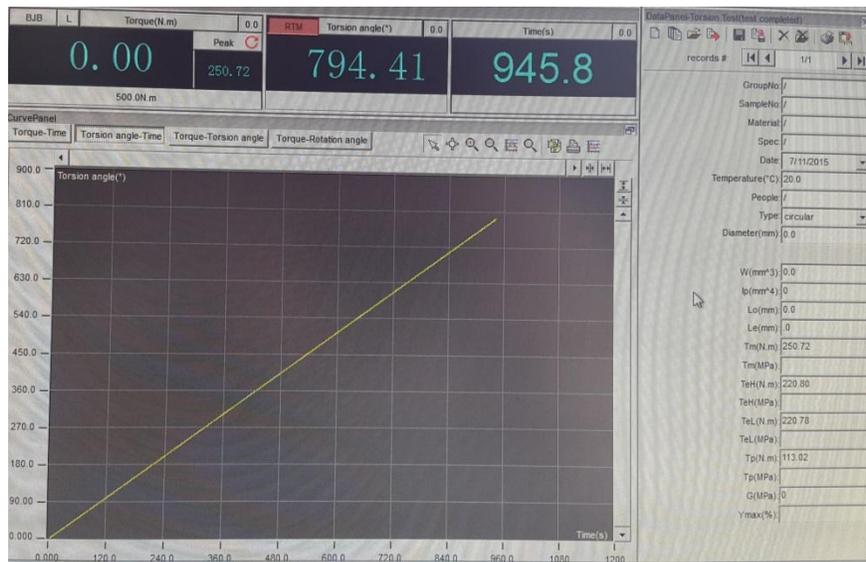


Figura 33. Diagrama ángulo de torsión – tiempo acero sin tratamiento térmico.

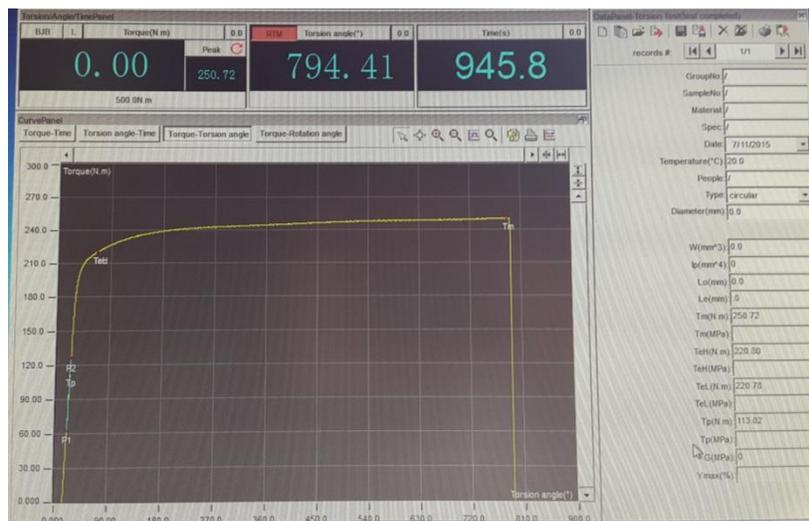


Figura 34. Diagrama torque – ángulo de torsión acero sin tratamiento térmico.

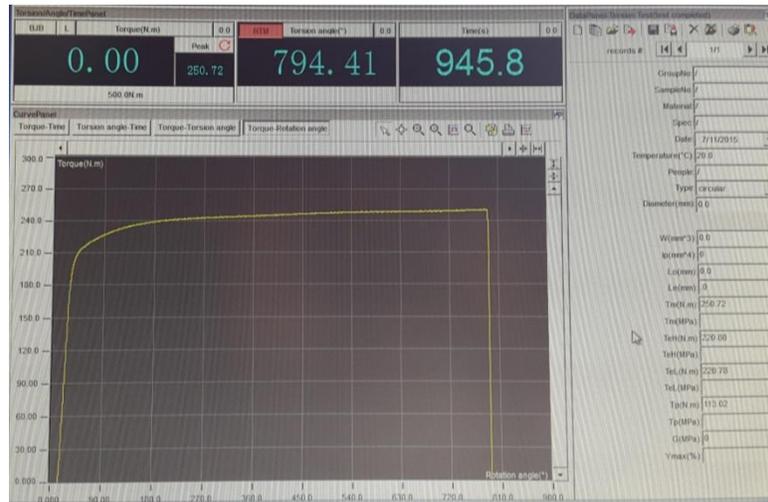


Figura 35. Diagrama torque – ángulo de rotación acero sin tratamiento térmico.





Figura 36. Probeta de acero sin tratamiento térmico posterior a la prueba de torsión.

Evaluación de resultados

Ensayo de tracción

TRACCIÓN	Long. Inicial mm. Lo	Diám. Inicial mm. Do	Área inicial mm ² Ao	Long. Final mm. Lf	Diám. Final mm. Df
Temple subcero	53.90	9.00	63.62	55.10	8.90
Nitruración	54.20	9.00	63.62	57.40	8.70
Sin tratamiento térmico	54.10	9.00	63.62	59.10	6.00

Tabla 6. Mediciones de las probetas antes y después de los ensayos.

Probeta con temple subcero

$$A_o = \pi r o^2 = \pi 4.5^2 = 63.62 \text{mm}^2$$

$$L_o = 50 \text{mm}$$

$$A_f = \pi r f^2 = \pi 4.45^2 = 62.21 \text{mm}^2$$

$$L_f = 55.1 \text{mm}$$

$$\% \text{ Alargamiento} = \frac{L_f - L_o}{L_o} * 100 = \frac{55.1 - 53.9}{53.9} * 100 = 2.23\%$$

$$\% \text{ Reducción de área} = \frac{A_f - A_o}{A_o} * 100 = \frac{62.21 - 63.62}{63.62} * 100 = 2.22\%$$

$$\text{Carga máxima} = 106.09 \text{ kN}$$

$$R_m = 1670 \text{ MPa}$$

$$E = 2.1 * 10^{11} \text{ Pa. (Aceros, 2007)}$$

$$\delta = \frac{P * L}{A * E} = \frac{106.09 \text{ kN} * 55.10 \text{ mm}}{62.21 \text{ mm} * 2.1 * 10^{11} \text{ Pa}} = 0.45 \text{ mm.}$$

$$v = \frac{\frac{d_o - d_f}{d_o}}{\frac{L_f - L_o}{L_o}} = \frac{\frac{9 - 8.9}{9}}{\frac{55.10 - 53.9}{53.9}} = 0.499$$

Probeta con nitruración

$$A_o = \pi r o^2 = \pi 4.5^2 = 63.62 \text{ mm}^2$$

$$L_o = 50 \text{ mm}$$

$$A_f = \pi r f^2 = \pi 4.35^2 = 59.45 \text{ mm}^2$$

$$L_f = 57.4 \text{ mm}$$

$$\% \text{ Alargamiento} = \frac{L_f - L_o}{L_o} * 100 = \frac{57.4 - 54.2}{54.2} * 100 = 5.90\%$$

$$\% \text{ Reducción de área} = \frac{A_f - A_o}{A_o} * 100 = \frac{59.45 - 63.62}{63.62} * 100 = 5.93\%$$

$$\text{Carga máxima} = 68.09 \text{ kN}$$

$$R_m = 1070 \text{ MPa}$$

$$E = 2.1 * 10^{11} \text{ Pa. (Aceros, 2007)}$$

$$\delta = \frac{P * L}{A * E} = \frac{68.09 \text{ kN} * 57 \text{ mm}}{59.45 \text{ mm} * 2.1 * 10^{11} \text{ Pa}} = 0.31 \text{ mm.}$$

$$v = \frac{\frac{d_o - d_f}{d_o}}{\frac{L_f - L_o}{L_o}} = \frac{\frac{9 - 8.7}{9}}{\frac{57.40 - 54.2}{54.2}} = 0.565$$

Probeta sin tratamiento térmico

$$A_o = \pi r o^2 = \pi 4.5^2 = 63.62 \text{mm}^2$$

$$L_o = 50 \text{mm}$$

$$A_f = \pi * r f^2 = \pi * 3.00^2 = 28.27 \text{mm}^2$$

$$L_f = 59.1 \text{mm}$$

$$\% \text{ Alargamiento} = \frac{L_f - L_o}{L_o} * 100 = \frac{59.1 - 54.1}{54.10} * 100 = 9.24\%$$

$$\% \text{ Reducción de área} = \frac{A_f - A_o}{A_o} * 100 = \frac{28.27 - 63.62}{63.62} * 100 = 55.56\%$$

$$\text{Carga máxima} = 72.68 \text{kN}$$

$$R_m = 1140 \text{MPa}$$

$$E = 2.1 * 10^{11} \text{ Pa. (Aceros, 2007)}$$

$$\delta = \frac{P * L}{A * E} = \frac{72.68 \text{kN} * 59.10 \text{mm}}{28.27 \text{mm} * 2.1 * 10^{11} \text{ Pa}} = 0.72 \text{mm.}$$

$$v = \frac{\frac{d_o - d_f}{d_o}}{\frac{L_f - L_o}{L_o}} = \frac{\frac{9 - 6}{9}}{\frac{59.10 - 54.1}{54.1}} = 3.607$$

Ensayo de torsión

Probeta con temple subcero

$$J = \frac{\pi * D^4}{32} = \frac{\pi * 11^4}{32} = 1437.38 \text{mm}^4$$

$$D = 11 \text{mm.}$$

$$\tau_{prom} = 214.44 \text{ kN} \cdot \text{mm}$$

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{\tau_{prom} \cdot D}{2J} = \frac{214.44 \cdot 11}{2 \cdot 1437.38} = 820.54 \text{ MPa}$$

$$G = \frac{\tau_{m\acute{a}x}}{\gamma_{prom}} = \frac{820.54 \text{ MPa}}{0.04} = 20.51 \text{ GPa}$$

Probeta con nitruraci3n

$$J = \frac{\pi \cdot D^4}{32} = \frac{\pi \cdot 11^4}{32} = 1437.38 \text{ mm}^4$$

$$D = 11 \text{ mm.}$$

$$\tau_{prom} = 106.92 \text{ kN} \cdot \text{mm}$$

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{\tau_{prom} \cdot D}{2J} = \frac{106.92 \cdot 11}{2 \cdot 1437.38} = 409.12 \text{ MPa}$$

$$G = \frac{\tau_{m\acute{a}x}}{\gamma_{prom}} = \frac{409.12 \text{ MPa}}{0.02} = 20.45 \text{ GPa}$$

Probeta sin tratamiento t3rmico

$$J = \frac{\pi \cdot D^4}{32} = \frac{\pi \cdot 11^4}{32} = 1437.38 \text{ mm}^4$$

$$D = 11 \text{ mm.}$$

$$\tau_{prom} = 113.02 \text{ kN} \cdot \text{mm}$$

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{\tau_{prom} \cdot D}{2J} = \frac{113.02 \cdot 11}{2 \cdot 1437.38} = 432.46 \text{ MPa}$$

$$G = \frac{\tau_{m\acute{a}x}}{\gamma_{prom}} = \frac{432.46 \text{ MPa}}{0.02} = 21.62 \text{ GPa}$$

C3lculo del esfuerzo normal en la probeta con temple subcero

$$\Sigma F_y = 0$$

$$\Sigma F_y = 106.09 - F_y = 0$$

$$F_y = 106.09 \text{ kN}$$

$$\sigma = \frac{F_y}{A_o} = \frac{106.09 \text{ kN}}{9 \text{ mm}} = 11.78 \text{ MPa}$$

Cálculo del esfuerzo normal en la probeta con nitruración

$$\sigma = \frac{F_y}{A_o} = \frac{68.09 \text{ kN}}{9 \text{ mm}} = 7.56 \text{ MPa}$$

Cálculo del esfuerzo normal en la probeta sin tratamiento térmico

$$\sigma = \frac{F_y}{A_o} = \frac{72.68 \text{ kN}}{9 \text{ mm}} = 8.08 \text{ MPa}$$

Discusión

Material

El acero 4140 que fue sometido al tratamiento térmico de temple subcero tuvo un comportamiento de material frágil, esto se pudo evidenciar en los resultados de los ensayos de tracción y torsión, así como en los cálculos con la Ley de Hooke y el Coeficiente de Poisson. Esto se debe a que después de este tratamiento térmico la microestructura del material se compacta por el enfriamiento brusco al que fue sometida la probeta, causando una estructura que va a ser muy resistente al desgaste, pero con la desventaja de la disminución de su tenacidad. Las gráficas que se dieron durante la prueba en la máquina de ensayos universales son muy similares a la figura 37, la cual indica el diagrama esfuerzo – deformación para un material frágil típico.

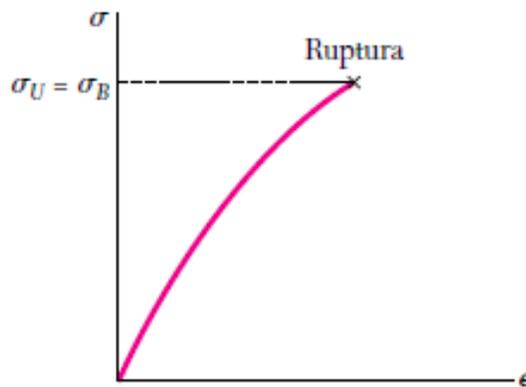


Figura 37. Diagrama esfuerzo – deformación para un material frágil típico

El material que se sometió al proceso de nitruración tuvo un ligero cambio en sus propiedades mecánicas si lo comparamos con la pieza sin tratamiento térmico, esto se dio debido a la temperatura a la que se realiza el proceso de tenifer (580°C), lo cual disminuye el límite de esfuerzo máximo permisible en un promedio de 5.4% de acuerdo a la práctica realizada.

Teniendo en cuenta los factores de seguridad que se utilizan en el diseño de elementos de máquinas, los mismos van desde 2 hasta 2.5 (Shigley, 1984) dependiendo del elemento y de su uso, una disminución del 5,4% no afectaría el rendimiento del mismo y no disminuiría sus propiedades mecánicas.

Tanto el acero con nitruración como el acero sin tratamiento térmico tuvieron una curva de esfuerzo – deformación muy similar entre ellos, se puede apreciar en la figura 38.

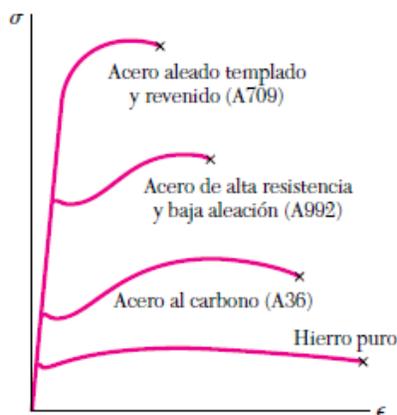


Figura 38. Diagramas esfuerzo – deformación para el hierro y para diversos grados de acero

Las probetas sometidas a torsión fallaron al finalizar la práctica en uno de sus extremos y no en el centro debido al mecanizado. El ángulo de incidencia entre la zona que ingresa en la máquina y el eje central era muy pronunciado y se convirtió en un concentrador de esfuerzos, lo que sumado al par torsor aplicado terminó en la fractura del elemento en esa zona.

Recomendaciones

- Para la fabricación de las probetas se debe buscar un centro de mecanizado que cuente con tornos que empleen herramientas de corte de tipo inserto y no con plaquitas soldables como por ejemplo widia, esto debido a que el material que se maquinará tiene una

dureza entre 25 y 33 HRC lo que generará altas vibraciones en el torno y fallas en las dimensiones finales.

- Debido a que la operación de temple subcero se realiza en la sucursal de Aceros Boehler Guayaquil, las piezas deben ser enviadas por lo menos con 1 semana de antelación. Además, este proceso no es muy común dentro de nuestro país por su costo, y se debe tener una cantidad mínima de peso para que las piezas ingresen a la cámara de temple subcero.

- Al momento de realizar los cálculos se debe tener en cuenta las unidades porque pueden generarse grandes errores si no se analizan correctamente las mismas.
- Evitar dejar ángulos cercanos a 90° en las probetas de torsión debido a que esto se convierte en un concentrador de esfuerzos y puede causar errores en los datos de la práctica.
- Al momento de movilizar las piezas que están tratadas térmicamente, sobre todo las de nitruración, deben estar separadas y no rozarse unas con otras debido a que el tenifer brinda una capa superficial máximo a 50 micras y si existe rozamiento se van a rayar las piezas y se puede perder la capa de nitrurado.
- Al momento de realizar las pruebas en las máquinas de ensayos de torsión y tracción, el ordenador debe tener lista una impresora para obtener físicamente los reportes y tener una mejor presentación de los mismos.

Bibliografía

- Aceros, C. G. (Marzo de 2007). *Cia. General de Aceros S.A.* Obtenido de http://www.cga.com.co/index2.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=15&Itemid=323
- Askeland, D. R. (2004). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. México D.F., México: International Thomson Editores, S.A.
- Beer & Johnston, J. F. (2010). *Mecánica de Materiales 5ta Edición*. México D.F., México: Mc Graw Hill.
- Bohler, A. (Enero de 2011). *Manual de Aceros Especiales*. 89. Quito, Pichincha, Ecuador: Aceros Bohler del Ecuador.
- CATEDU, C. A. (2012). Obtenido de http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4913/html/11_ensayo_de_traccin.html
- Ceballos, W., Gómez, A., & Coronado, J. (22 de 01 de 2009). *Universidad Nacional de Colombia*. Recuperado el 01 de 07 de 2015, de <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/15842/36175>
- Hibbeler, R. (2006). *Mecánica de Materiales*. México D.F.: Pearson Educación.
- INSTRON. (2015). *Instron, la diferencia se puede medir*. Obtenido de <http://www.instron.com.ar/wa/glossary/Torsion-Test.aspx>
- Obando., M. J. (2011). *Subcero y Criogénico: El Frío, secreto de los fórmula uno. Subcero y Criogénico: El Frío, secreto de los fórmula uno*, 53. Bogotá, Santafé de Bogotá, Colombia: Árbol de Tinta.
- Olympus España S.A. (Enero de 2010). *Olympus*. Obtenido de <http://www.olympus-ims.com/es/microscope/gx41/>
- Rodríguez, I. O. (2014). *Rosario: Escuela de Educación Técnica Profesional N°466*. Obtenido de <http://matensayos.webcindario.com/tecnicametalografica/tecnicametal.pdf>
- Shigley, J. E. (1984). *Diseño en Ingeniería Mecánica. 5ª Edición*. Mexico: Mc Graw-Hill.
- TEGMETAL. (07 de 07 de 2015). *Clasificación AISI SAE de los Aceros*. Obtenido de : <http://www.tegmetal.com/CLASIFICACION%20AISII.pdf>
- Torres, D. I. (Noviembre de 2004). *Apuntes acerca del Tratamiento Térmico y la clasificación general de los aceros*. Matanzas, Cuba: Universidad de Matanzas.

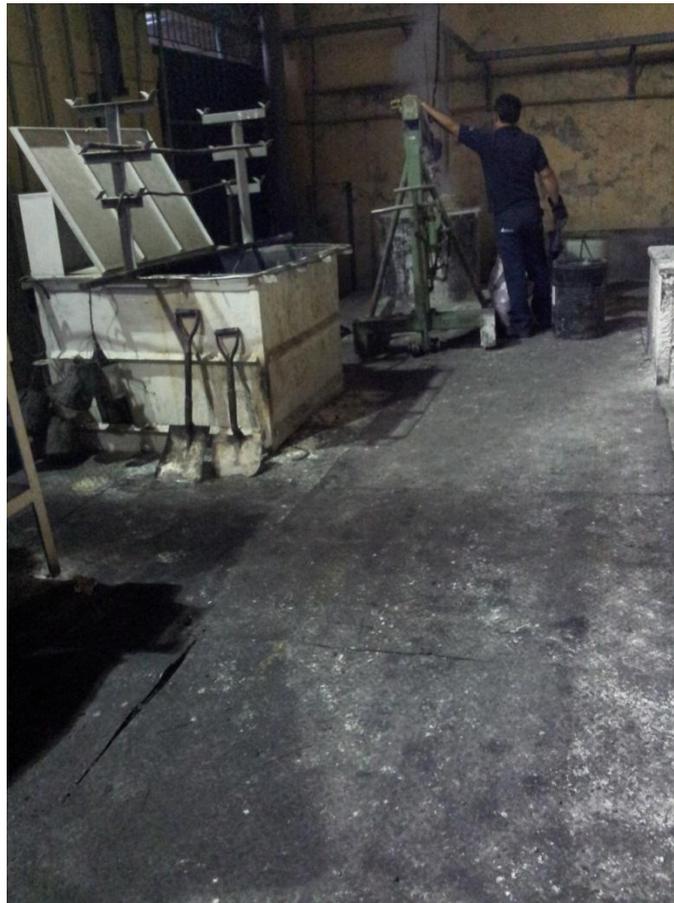
Valencia, U. P. (03 de 2012). *Curso de Fundamentos de Ciencia de Materiales*. Obtenido de
http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm02/fcm2_2.html

ANEXOS

Anexo A. Horno de temple y distensionado



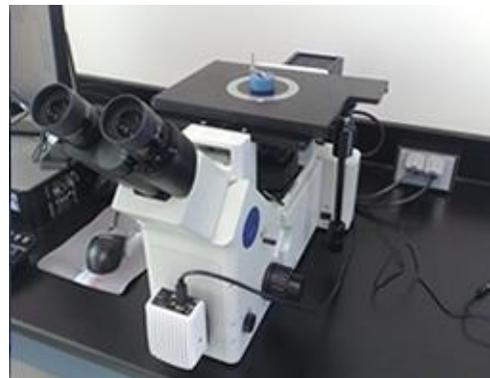
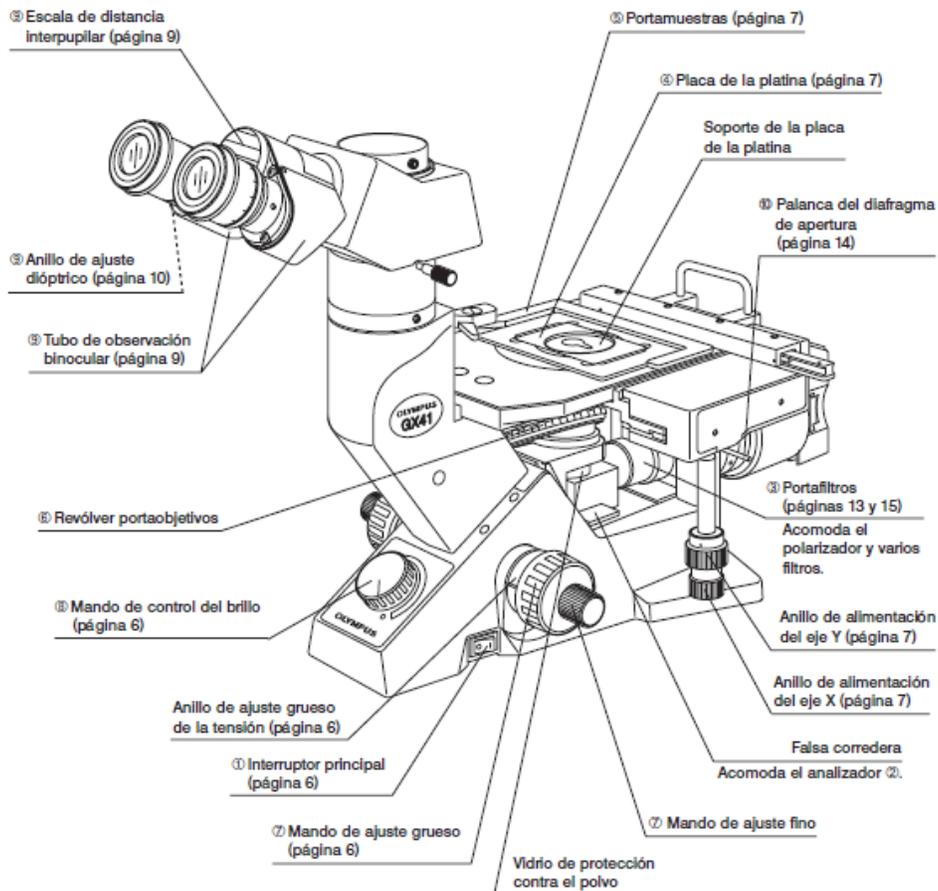
Anexo B. Horno de nitruración



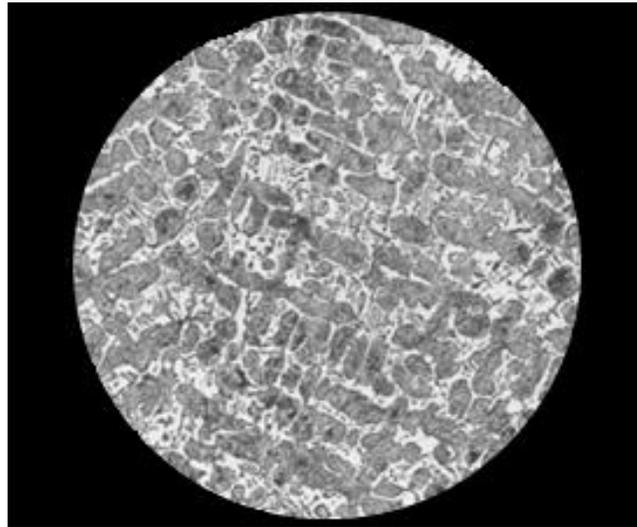
Anexo C. Certificado de calidad del material utilizado.

ANEXO D. Microscopio metalográfico Olympus GX-41. Partes y vista física.

Imagen tomada de (Olympus España S.A., 2010)



**Anexo E. Micrografía del Acero V320 – 4140 a 200x antes del proceso de temple
subcero**



**Anexo F. Micrografía del Acero V320 – 4140 a 200x después del proceso de temple
subcero**

