



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**Evaluación de la Tenacidad de Impacto del Acero
Inoxidable Martensítico AISI-420 Sometido a Tratamiento
Térmico de Recocido y Normalizado**

Alexander Tabares

CI: 13.899.435

Jesús Martínez

C.I.: 14.999.761

Tutora

Prof. Laura Sáenz

Valencia, Noviembre de 2008



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**Evaluación de la Tenacidad de Impacto del Acero
Inoxidable Martensítico AISI-420 Sometido a Tratamiento
Térmico de Recocido y Normalizado**

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE
UNIVERSIDAD DE CARABOBO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

Alexander Tabares
CI: 13.899.435

Jesús Martínez
C.I.: 14.999.761

Tutora

Prof. Laura Sáenz

Valencia, Noviembre de 2008



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Los abajo firmantes miembros del Jurado designado para evaluar el Trabajo Especial de Grado titulado **“Evaluación de la Tenacidad de Impacto del Acero Inoxidable Martensítico AISI-420 Sometido a Tratamiento Térmico de Recocido y Normalizado”**, realizado por los bachilleres: Alexander Tabares calabrese, C.I.: 13.899.435 y Jesús Martínez, C.I.: 14.999.761, hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo.

Ing. Laura Sáenz

Tutora

Ing.

Jurado

Ing.

Jurado

Valencia, Noviembre de 2008

RESUMEN

En el presente trabajo se evaluó la Tenacidad de Impacto del Acero Inoxidable martensítico AISI-420 sometido a tratamiento térmico de recocido y normalizado. Se realizaron ensayos de tracción, impacto y dureza, a probetas tratadas térmicamente con recocido y normalizado. Para el ensayo de tracción se utilizaron tres (3) probetas por cada condición, para el ensayo de impacto se utilizaron cinco (5) probetas por cada condición y para el ensayo de dureza se realizaron diez (10) indentaciones por cada condición. Estas probetas fueron fabricadas según las normas ASTM A370, ASTM E8 y ASTM E23, las mismas fueron sometidas a temperaturas de 840 °C, 855 °C y 870 °C para recocido y para el caso del normalizado se sometieron a tiempos de 9 min, 11 min y 13 min a 800 °C. Una vez realizados los ensayos se determinaron las propiedades de ductilidad y de resistencia mecánica del material, se realizó la fotomicrografía y se evaluó por microscopia electrónica de barrido tomándose imágenes de la superficie de fractura de las probetas.

Una vez concluidas todas las fases del trabajo se obtuvo que al haber ensayado el material con tratamiento térmico de normalizado el mismo disminuyó su resistencia mecánica, para el caso de las probetas tratadas con recocido se demostró que el material disminuyó su resistencia e incrementó su capacidad de absorber energía por impacto. De igual manera al observar las superficies de fractura por microscopia óptica predominaron las cavidades y hoyuelos que son típicos de un fractura dúctil.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestra tutora la Profesora Laura Saenz por brindarnos todo el apoyo incondicional hacia nosotros.

Al Laboratorio de Ensayos Mecánicos de Materiales de la Universidad de Carabobo por permitir la realización de los ensayos de tracción, impacto y Dureza en sus instalaciones.

Al Centro de Investigaciones Médicas y Biotecnológicas de la Universidad de Carabobo (CIMBUC) Por habernos permitido realizar la microscopia óptica de las probetas ensayadas.

Igualmente a todas aquellas personas que de alguna u otra forma contribuyeron a que este trabajo fuese posible porque en su momento nos brindaron el apoyo necesario para seguir adelante, nuestros compañeros, amigos, familiares, muchísimas gracias a todos.

Dedico a:

A Dios todo poderoso, ya que sin Él no sería posible.

A mis padres, Luz Marina y Jesús Martínez, por su apoyo Incondicional,
Mejores Consejos, Sabiduría y Gran Esfuerzo en sacarme adelante.

A mis Hermanas, y Amigos, por estar allí siempre, brindándome su cariño
y colaboración constante.

Gracias a todos.

Jesús J. Martínez F.

Dedico:

A Dios por haberme dado toda la fuerza necesaria

A mi mamá Rosaria Calabrese por su apoyo infinito y a mi papá Eligio
Tabares por su apoyo incondicional

A Pedro Miguel Chacón quién siempre creyó en mi como mi propio hermano
para lograr esta meta

A mi novia Linmar Rodríguez por su gran preocupación y ayuda
incondicional

A mis amigos y a todos aquellos que hicieron posible que llegara hasta aquí
a pesar de todos los obstáculos encontrados.

Gracias a todos

Alexander Tabares

SIMBOLOGÍA

CVN	Energía Absorbida Por Impacto
K_{IC}	Factor de intensidad de esfuerzo
lbf*pulg.	Libra fuerza por pulgada
m	Metro
mm	Milímetro
in	Pulgada
MPa	Megapascal
Kpm	Kilopondio por metro
°C	Grado centígrados
σ_{Real}	Esfuerzo Real
σ_{ing}	Esfuerzo Ingenieril
σ	Tensión Nominal Aplicada (Megapascal)
σ_y	Esfuerzo de Fluencia
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Esfuerzo Máximo
σ_{rup}	Esfuerzo de Ruptura
l_{ing}	Deformación Ingenieril
l_{Real}	Deformación Real
γ	Austenita
α	Ferrita
δ	Hierro
A_o	área inicial
A_f	área final
l_o	Longitud inicial
l_f	Longitud final
D_o	Diámetro inicial
D_f	Diámetro final
F	Carga (Newton)

ÍNDICE

Índice de Figuras	IV
Índice de Tabla	VII
Nomenclatura	
Introducción.....	1
Capítulo I	
Planteamiento del Problema.....	4
1.1 Título.....	4
1.2 Planteamiento del Problema.....	4
1.3 Objetivos.....	6
1.3.1 Objetivo General.....	6
1.3.2 Objetivos Específicos.....	6
1.4 Limitaciones.....	7
1.5 Delimitaciones.....	7
1.6 Justificación.....	8
Capítulo II	
Marco Teórico.....	10
2.1 Antecedentes.....	10
2.2 Fundamentos Teóricos y Definición de los Términos Básicos.....	11
2.2.1 Aceros Inoxidables.....	11
2.2.2 Aceros Inoxidables Martensíticos.....	13
2.2.3 Tratamiento Térmico.....	14
2.3 Ensayo de Tracción.....	16
2.4 Ensayo de Impacto.....	20
2.5 Microscopía Electrónica de Barrido.....	24
2.6 Definición de Términos Básicos.....	24

Capítulo III

Marco Metodológico.....	28
3.1 Nivel de la Investigación.....	28
3.2 Diseño de la Investigación.....	28
3.3 Material.....	28
3.4 Mecanizado de las Probetas.....	29
3.5 Tratamientos Térmicos.....	31
3.6 Ensayos de Tracción.....	34
3.7 Ensayo de Dureza.....	35
3.8 Ensayo de Impacto.....	36
3.9 Preparación Metalográfica.....	37
3.10 Microscopía Electrónica de Barrido.....	38

Capítulo IV

Resultados Obtenidos.....	40
4.1 Ensayos de Tracción.....	42
4.1.1 Condición Original.....	42
4.1.2 Normalizado 9 min.....	43
4.1.3 Normalizado 11 min.....	44
4.1.4 Normalizado 13 min.....	45
4.1.5 Recocido 840 °C.....	46
4.1.6 Recocido 855 °C.....	47
4.1.7 Recocido 870 °C.....	48
4.1.8 Metalografía del Material.....	50
4.1.8.1 Análisis de las Fotomicrografías del Material.....	52
4.1.9 Resistencia Mecánica y Ductilidad del Material.....	53
4.1.9.1 Análisis de la Ductilidad y Resistencia Mecánica para las probetas tratadas con Normalizado.....	54
4.1.9.2 Análisis de la Ductilidad y Resistencia para las	

probetas Tratadas con Recocido.....	56
4.1.10 Superficies de fractura de las probetas ensayadas a Tracción.....	57
4.1.11 Superficies Macro-Micro de las Probetas de Tracción.....	60
4.1.11.1 Análisis de las Imágenes Macro y Micro para las Probetas Ensayadas a Tracción.....	63
4.2 Ensayos de Impacto.....	64
4.2.1 Factor de Intensidad de Esfuerzo Crítico (K_{IC}).....	66
4.2.2 Superficies de Fractura por Microscopía Electrónica de Barrido para las probetas ensayadas por Impacto.....	69
4.2.3 Superficies Macro-Micro de las probetas de Impacto.....	72
4.2.3.1 Análisis de las Imágenes Macro y Micro para las Probetas Ensayadas por Impacto.....	74
4.3 Ensayos de Dureza.....	75
4.3.1 Análisis de resultados de Dureza.....	76
4.4 Composición Química del Acero Martensítico AISI 420.....	77
Capítulo V	
Conclusiones	80
Recomendaciones	82
Bibliografía	83
Anexos	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 2 Probeta de Tracción antes y luego del ensayo.....	17
Figura N° 2.1 Diagrama Tensión vs Alargamiento.....	18
Figura N° 2.2 Probeta de un Ensayo de Impacto.....	21
Figura N° 2.3 Esquema de Péndulo del Ensayo Charpy.....	21
Figura N° 2.4 Dimensiones usadas en el Ensayo de Impacto Charpy para determinar la Energía Absorbida por el Material.....	22
Figura N° 3 Dimensiones de las Probetas Cilíndricas de Tracción según norma ASTM-A370.....	30
Figura N° 3.1 Dimensiones de las Probetas de Impacto Charpy según norma ASTM-E23.....	31
Figura N° 3.2 Horno para realizar los Tratamientos Térmicos.....	32
Figura N° 3.3 Diagrama de Fase Hierro – Cromo (Fe-Cr).....	33
Figura N° 3.4 Máquina Galdabini.....	34
Figura N° 3.5 Durómetro Digital Marca MACROMET modelo 5100T.....	35
Figura N° 3.6 Máquina para realizar el ensayo de Impacto Charpy, marca FRANK.....	37
Figura N° 3.7 Microscopio Metalúrgico.....	38
Figura N° 4.1 Probetas de Tracción posterior al Ensayo.....	40
Figura N° 4.2 Probetas de Impacto posterior al Ensayo.....	41
Figura N° 4.3 Curva Esfuerzo vs. Deformación para la Condición Original.....	42
Figura N° 4.4 Curva Esfuerzo vs. Deformación para Normalizado 9 min.....	43
Figura N° 4.5 Curva Esfuerzo vs. Deformación para Normalizado 11 min.....	44
Figura N° 4.6 Curva Esfuerzo vs. Deformación para Normalizado 13 min.....	45
Figura N° 4.7 Curva Esfuerzo vs. Deformación para Recocido 840 °C.....	46
Figura N° 4.8 Curva Esfuerzo vs. Deformación para Recocido 855 °C.....	47

Figura N° 4.9 Curva Esfuerzo vs. Deformación para Recocido 870 °C.....	48
Figura N° 4.10 Fotomicrografía de la Condición Original a 1000X.....	50
Figura N° 4.11 Fotomicrografía del Normalizado 9min a 1000X.....	50
Figura N° 4.12 Fotomicrografía del Normalizado 11min a 1000X.....	50
Figura N° 4.13 Fotomicrografía del Normalizado 13min a 1000X.....	50
Figura N° 4.14 Fotomicrografía de Recocido 840 °C a 1000X	51
Figura N° 4.15 Fotomicrografía de Recocido 855 °C a 1000X	51
Figura N° 4.16 Fotomicrografía de Recocido 870 °C a 1000X	51
Figura N° 4.17 Curva Esfuerzos vs. Tiempo de Normalizado.....	53
Figura N° 4.18 Curvas de % de Reducción de área y % de Alargamiento vs. Tiempo de Normalizado.....	53
Figura N° 4.19 Curva Esfuerzos vs. Temperatura de Recocido.....	55
Figura N° 4.20 Curvas de % de Reducción de área y % de Alargamiento vs. Temperatura de Recocido.....	55
Figura N° 4.21 Condición Original a 2000x.....	57
Figura N° 4.22 Normalizado 9 min a 2000x.....	57
Figura N° 4.23 Normalizado 11 min a 2000x.....	57
Figura N° 4.24 Normalizado 13 min a 2000x.....	57
Figura N° 4.25 Recocido 840 °C a 2000x	58
Figura N° 4.26 Recocido 855 °C a 2000x	58
Figura N° 4.27 Recocido 877 °C a 2000x	58
Figura N° 4.28 Condición original: a) Imagen Macro b) Imagen Micro.....	60
Figura N° 4.29 Normalizado 9 min: a) Imagen Macro b) Imagen Micro.....	60
Figura N° 4.30 Normalizado 11 min: a) Imagen Macro b) Imagen Micro.....	61
Figura N° 4.31 Normalizado 13 min: a) Imagen Macro b) Imagen Micro.....	61
Figura N° 4.32 Recocido a 840 °C a) Imagen Macro b) Imagen Micro.....	61
Figura N° 4.33 Recocido a 855 °C a) Imagen Macro b) Imagen Micro.....	62
Figura N° 4.34 Recocido a 870 °C a) Imagen Macro b) Imagen Micro.....	62

Figura N° 4.35 Energía Absorbida por Impacto en Función del Tratamiento Térmico.....	65
Figura N° 4.36 Factor de Intensidad de Esfuerzo vs. Tratamiento Térmico.....	66
Figura N° 4.37 Gráfica Comparativa entre el Factor de Intensidad de Esfuerzo Crítico (K_{IC}) y la Energía Absorbida por Impacto (CVN).....	68
Figura N° 4.38 Condición Original a 2000x.....	69
Figura N° 4.39 Normalizado 9 min a 1500x.....	69
Figura N° 4.40 Normalizado 11 min a 1500x.....	69
Figura N° 4.41 Normalizado 13 min a 2000x.....	69
Figura N° 4.42 Recocido 840 °C a 2000x	70
Figura N° 4.43 Recocido 855 °C a 1500x	70
Figura N° 4.44 Recocido 877 °C a 2000x	70
Figura N° 4.45 Condición original: a) Imagen Macro b) Imagen Micro.....	72
Figura N° 4.46 Normalizado 9 min: a) Imagen Macro b) Imagen Micro.....	72
Figura N° 4.47 Normalizado 11 min: a) Imagen Macro b) Imagen Micro.....	72
Figura N° 4.48 Normalizado 13 min: a) Imagen Macro b) Imagen Micro.....	73
Figura N° 4.49 Recocido a 840 °C a) Imagen Macro b) Imagen Micro.....	73
Figura N° 4.50 Recocido a 855 °C a) Imagen Macro b) Imagen Micro.....	73
Figura N° 4.51 Recocido a 870 °C a) Imagen Macro b) Imagen Micro.....	74
Figura N° 4.52 Grafica Dureza del material vs. Tratamiento Térmico.....	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 3 Composición química del Acero Inoxidable AISI 420 según Proveedor.....	29
Tabla N° 3.1 Distribución de las Probetas por ensayo	35
Tabla N° 4 Propiedades Mecánicas de la Condición Original	42
Tabla N° 4.1 Propiedades Mecánicas de Normalizado 9min	43
Tabla N° 4.2 Propiedades Mecánicas de Normalizado 11min	44
Tabla N° 4.3 Propiedades Mecánicas de Normalizado 13min	45
Tabla N° 4.4 Propiedades Mecánicas de Recocido 840 °C	46
Tabla N° 4.5 Propiedades Mecánicas de Recocido 855 °C	47
Tabla N° 4.6 Propiedades Mecánicas de Recocido 870 °C	48
Tabla N° 4.7 Promedio de las Propiedades Mecánicas de Tracción.....	49
Tabla N° 4.8 Promedio de los Valores del Ensayo de Impacto.....	64
Tabla N° 4.9 Valores de los Promedios obtenidos de la Energía Absorbida por Impacto y cálculo del K_{IC} por cada una de las condiciones.....	67
Tabla N° 4.10 Ensayos de Dureza.....	75
Tabla N° 4.11 Promedio de los Resultados del Ensayos de Dureza.....	75
Tabla N° 4.12 Porcentaje de los componentes aleantes del Acero Inoxidable Martensítico AISI 420 según las normas ASTM A-959-96.....	77
Tabla N° 4.13 Porcentaje de los componentes aleantes del Acero Inoxidable Martensítico AISI 420 según ficha técnica SUMINDU.....	77
Tabla N° 4.14 Porcentaje de los componentes aleantes del Acero Inoxidable Martensítico AISI 420 según resultados obtenidos por Espectrofotometría Gasometría por radiación y Fotocolorimetría.....	77



INTRODUCCIÓN

En el transcurso de los años el hombre siempre ha buscado la manera de mejorar e inventar nuevas formas de herramientas o utensilios que ayuden a facilitar y a mejorar el trabajo. Para esto ha sido necesario utilizar materiales que sean lo suficientemente duraderos a los embates del tiempo y a su vez fáciles de manejar.

Uno de los más grandes inventos del hombre ha sido sin duda el acero, un material lo suficientemente resistente y fácil de crear. Uno de las problemas que no se logró evitar en los primeros años de uso, fue la corrosión que el ambiente causaba a su superficie. Para esto fue necesario estudiar distintos tipos de aleaciones que ayudaran a minimizar en lo posible este fenómeno natural, llegando así a principios del siglo XX con la creación de los aceros inoxidable; los cuales lograban resistir los efectos corrosivos de la naturaleza.

Los primeros aceros inoxidable fueron los llamados aceros al cromo, quienes por ser simplemente al cromo son poco resistentes a la corrosión, y también debido a esto son uno de los aceros más económicos del mercado. De esta rama de los primeros aceros inoxidable se tienen el AISI 410 y el AISI 420. Este último es muy utilizado para instrumentos quirúrgicos como también en cuchillería así como herramientas, pero a lo largo de todos estos años ha sido uno de los aceros inoxidable con un escaso número de estudios realizados. Debido a esta condición es que esta investigación decidió dedicarse a este material, Evaluando la tenacidad de impacto del acero inoxidable martensítico AISI 420 sometido a tratamiento térmico de recocido y normalizado.



En el presente trabajo de investigación se destacan los resultados de las propiedades mecánicas del Acero Inoxidable Martensítico AISI 420 tratado térmicamente con recocido y con normalizado. Con esto se desea obtener una mayor resistencia del material con el normalizado y una mayor capacidad de absorber de energía con el recocido, para comparar luego con la condición original y ver si las propiedades mecánicas del material mejoran para las aplicaciones requeridas y evaluar aplicaciones distintas de las que ya hoy se conocen.

Se utilizaron 21 probetas de tracción y 35 de impacto. Las primeras se dividieron en grupos de tres, y las segundas en grupos de 5. El recocido se realizó a 840, 855 y a 870 °C, mientras que el normalizado se realizó a 800 °C en tiempos de 9, 11 y 13 minutos.

Luego de aplicar el tratamiento térmico a las probetas, se realizaron los ensayos de dureza, tracción e impacto, buscando observar así el desempeño del material para los distintos ensayos, y en consecuencia el comportamiento de las propiedades mecánicas del mismo, donde se podrá conocer las ventajas o desventajas de los tratamientos térmicos aplicados al material.



BIBLIOGRAFIA

[1] American Society of Testing Materials (ASTM). 1996. *Annual Book of ASTM Standards, Vol. 01.01 Norma A-327 y Annual Book of ASTM Standards, Vol. 01.03. Normas E-8 y E-23.*

[2] Centro Nacional para el desarrollo del acero inoxidable (CENDI). Clasificación y características del acero inoxidable: <http://www.cendi.org.mx>

[3] William, F. Smith. (Tercera edición 1998). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales.* Madrid: Mc. Graw Hill.

[4] Huamanchumo D. Harold y Ricci F. Salvatore A. *ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECANICO DEL ACERO INOXIDABLE DUPLEX SAF 2507, ENSAYADO A TRACCION A DIFERENTES TEMPERATURAS.*

[5] José A. Cabrera L. y Miguel A Flores S. *EVALUACION DE LA TENACIDAD DE IMPACTO DEL ACERO INOXIDABLE AUSTENITICO 304 Y 316 SOMETIDO A UN TRATAMIENTO TERMICO DE ENVEJECIMIENTO.*

[6] Monografías.com. Ensayos por Choque:
<http://www.monografias.com/trabajos14/choque/choque.shtml>

[7] Nelson Brito, Néstor E. y De Leco Dos Santos Juan A. *ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECANICO DEL ACERO INOXIDABLE ASTM 410 AL SER SOMETIDO A UN TRATAMIENTO TERMICO DE ENVEJECIMIENTO.*

[8] Pontificia Universidad católica de Chile, Escuela de Ingeniería. Ensayo de dureza superficial: <http://www2.ing.puc.cl/~icm2312/apuntes/materiales/materials6-2.html>



[9] Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería. Ensayo Charpy
<http://images.google.co.ve/imgres?imgurl=http://www2.ing.puc.cl/~icm2312/apuntes/materiales/figura17.gif&imgrefurl=http://www2.ing.puc.cl/~icm2312/apuntes/materiales/materials6->

[1.html&h=413&w=361&sz=27&hl=es&start=7&tbnid=DCuqM0PchxJj1M:&tbnh=125&tbnw=109&prev=/images%3Fq%3Densayo%2Bcharpy%26gbv%3D2%26hl%3Des%26sa%3DG](http://images.google.co.ve/imgres?imgurl=http://www2.ing.puc.cl/~icm2312/apuntes/materiales/materials6-1.html&h=413&w=361&sz=27&hl=es&start=7&tbnid=DCuqM0PchxJj1M:&tbnh=125&tbnw=109&prev=/images%3Fq%3Densayo%2Bcharpy%26gbv%3D2%26hl%3Des%26sa%3DG)

[10] Sumindu S.A. Especificaciones técnicas del acero inoxidable AISI-420:
<http://www.sumindu.com/Especificaciones%20Tecnicas/26-%20420.pdf>

[11] Vander Voort, George F. Metals Handbook (Volume 9, 2004). *Metallography and Microstruct.* USA: ASM International.

[12] Hibbeler R. C. (2006). *Mecánica de materiales*. Mexico: Pearson Prentice Hall.

[13] Peter E. para [arquitectura y construcción](#) en ARQHYS. TRATAMIENTOS TÉRMICOS DEL HIERRO DUCTIL: <http://www.arqhys.com/contenidos/hierro-tratamiento.html>

[14] Martensita. Industria y materiales. *Aceros Inoxidables Martensíticos*:
<http://html.rincondelvago.com/martensita.html>

[15] American Society of Testing Materials (ASTM). 1996. *Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01 Norma E-3*



Evaluación de la Tenacidad de Impacto del Acero Inoxidable Martensítico AISI-420
Sometido a Tratamiento Térmico de Recocido y Normalizado



CAPÍTULO I



PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1-Título

Evaluación de la Tenacidad de Impacto del Acero Inoxidable Martensítico AISI-420 Sometido a Tratamiento Térmico de Recocido y Normalizado.

1.2-Planteamiento del problema.

El acero inoxidable es un tipo de acero resistente a la corrosión, dado que el cromo que contiene posee gran afinidad con el oxígeno, y reacciona con él formando una capa pasivadora, evitando así la corrosión del hierro. Algunos tipos de aceros inoxidables contienen además otros elementos aleantes, como son el níquel y el molibdeno.

Los aceros inoxidables que contienen solamente cromo se llaman ferríticos, ya que tienen una estructura metalográfica formada básicamente por ferrita. Son magnéticos y con elevados porcentajes de carbono, estos aceros son templables y pueden, por tanto, endurecerse por tratamiento térmico. A estos aceros endurecidos se llaman aceros inoxidables "martensíticos", por tener martensita en su estructura metalográfica.



Los aceros inoxidable martensíticos AISI-420 son la primera rama de los aceros inoxidable, llamados simplemente al Cromo. Por ser simplemente al cromo este acero es el menos resistente a la corrosión con respecto al resto de la familia de los aceros inoxidable, lo que lo hace ser uno de los más económicos, y por ende uno de los más utilizados en el mercado después del austenítico. Fueron los primeros desarrollados industrialmente para ser usados en aplicaciones como la de la cuchillería, instrumental quirúrgico, en herramientas, discos de freno, en automóviles, etc.

Este tipo de acero presenta una propiedad llamada memoria de forma, es decir, que luego de realizar un tratamiento térmico, al llevar el material de nuevo a su temperatura de recocido, la microestructura retoma nuevamente su estado original.

Debido a lo anteriormente expuesto el acero inoxidable martensítico AISI-420 es actualmente uno de los materiales al que se le han hecho pocos estudios en cuanto a sus propiedades térmicas y mecánicas, como para poder así encontrar nuevas funciones al que pueda ser aplicado. Se decidió entonces usarlo para esta investigación, y así realizar tratamientos térmicos de recocido y normalizado en diferentes tiempos, a probetas de acero martensítico AISI-420, que luego serán sometidas a ensayos de tracción, de impacto y de dureza, para ser evaluadas y poder así obtener las conclusiones pertinentes de su estudio.

De esta manera se buscan establecer resultados del comportamiento del material una vez realizados los ensayos, para ver si efectivamente este puede ser utilizado en diferentes áreas o aplicaciones de las que comúnmente se le conoce en la actualidad.



1.3-Objetivos

1.3.1-Objetivo general.

Evaluar la tenacidad de impacto del acero inoxidable AISI-420 sometido a tratamiento térmico de recocido y normalizado.

1.3.2.-Objetivos específicos

- Caracterizar las propiedades mecánicas y la microestructura del acero inoxidable martensítico AISI-420 en su condición original
- Aplicar un tratamiento térmico de recocido a 840, 855 y 870 °C
- Aplicar un tratamiento térmico de normalizado a la temperatura de 800 °C por tiempos de 9, 11 y 13 minutos [1].
- Efectuar la metalografía al final de cada tratamiento térmico.
- Evaluar las propiedades mecánicas, esfuerzo último, ductilidad, tenacidad normal y de impacto, después de realizado el tratamiento térmico.
- Determinar la energía absorbida por impacto del acero inoxidable martensítico AISI-420.
- Evaluar la dureza del material original y del material tratado térmicamente.
- Evaluar la superficie de fractura del material ensayado.



1.4-Limitaciones

- Disponibilidad de la maquinaria para el mecanizado de las probetas que deben ser utilizadas para la realización de los ensayos.
- Disponibilidad económica para la realización del maquinado fuera de las instalaciones de la universidad.

1.5-Delimitaciones

- Se trabajó con acero inoxidable martensítico AISI-420
- Se realizó un tratamiento térmico de recocido a 840, 855 y 870 °C
- Se realizó un normalizado a una temperatura de 800 °C con tiempos de permanencia en el horno de 9, 11 y 13 minutos.
- Se realizaron 3 ensayos de tracción, 5 ensayos de impacto y 10 indentaciones de dureza por condición de ensayo.
- Las probetas se realizaron según las normas ASTM A-370, ASTM E-8 y ASTM E-23



1.6-Justificación.

El acero inoxidable martensítico es uno de los aceros más económicos en el mercado, con respecto al resto de los aceros inoxidables, y es de los más utilizados después del austenítico, debido a las propiedades mecánicas que presenta, motivo por el cual será objeto de estudio en este trabajo. Al realizar un tratamiento térmico de recocido y normalizado al acero martensítico AISI-420, y posteriormente los ensayos de tracción, impacto y dureza, se podrá evaluar la capacidad de este material para ser utilizado en aplicaciones distintas a las que es utilizado actualmente, como son la cuchillería, instrumental quirúrgico, en herramientas, discos de freno, en automóviles, etc.



Evaluación de la Tenacidad de Impacto del Acero Inoxidable Martensítico AISI-420 Sometido a Tratamiento Térmico de Recocido y Normalizado



CAPÍTULO II



MARCO TEÓRICO

2.1-Antecedentes

- Brito N, Nestor E. y De Leco Dos Santos Juan A. (2006) **ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECANICO DEL ACERO INOXIDABLE ASTM 410 AL SER SOMETIDO A UN TRATAMIENTO TÉRMICO DE ENVEJECIMIENTO.** En este trabajo se evaluó el comportamiento mecánico del acero inoxidable AISI – 420, bajo ensayos de tracción, dureza e impacto, al ser sometidos a un tratamiento térmico de envejecimiento a una temperatura de 500 °C con tiempos de 30, 60 y 90 minutos. La finalidad del mismo fue obtener valores que demostraran la capacidad de dicho acero para ser utilizado en las distintas aplicaciones industriales a las que pueda tener lugar, así como también características microestructurales, como tamaño de grano y estudio de la superficie de fractura. Se tomó este trabajo como antecedente debido a que el material utilizado es el mismo que emplearemos, así como también los ensayos de tracción, dureza e impacto y las propiedades mecánicas que en él se determinaron.
- Huamanchumo D, Harold y Salvatore A, Ricci F.. (2006) **ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL ACERO INOXIDABLE DUPLEX SAF 2507, ENSAYADO A TRACCIÓN A DIFERENTES TEMPERATURAS.** En esta investigación se diseñó y construyó un dispositivo para la instalación del horno en la máquina de tracción en el laboratorio de manera tal que facilitara el fácil acople y desacople del mismo, así como también se evaluaron los efectos del tiempo de permanencia a una



determinada temperatura del acero antes mencionado bajo el ensayo de tracción a diferentes temperaturas y al mismo tiempo relacionaron elasticidad y plasticidad para suministrar información. La relación que guarda este trabajo es que de igual manera el material que se usa pertenece a la familia de los aceros de los inoxidable, además es ensayado a tracción tal y como es de la investigación en curso.

- Cabrera L, José A. y Flores S, Miguel A. (2005) **EVALUACIÓN DE LA TENACIDAD DE IMPACTO DEL ACERO INOXIDABLE AUSTENITICO 304 Y 316 SOMETIDO A UN TRATAMIENTO TÉRMICO DE ENVEJECIMIENTO**. En este trabajo se caracterizaron los aceros antes descritos mediante un análisis químico, metalografía, ensayos de tracción uniaxial, los ensayos de dureza e impacto, además se evaluaron la tenacidad de impacto por medios del ensayo Charpy antes y después del envejecimiento, bajo las normas ASTM E-23, y determinaron valores de tenacidad mediante la relación de Rolfe, Norvak y Barson. Se tomó este trabajo como antecedente debido a que el material utilizado es perteneciente a la familia de los aceros inoxidable, así como también los ensayos de tracción, dureza e impacto y las propiedades mecánicas que en él se determinaron.

2.2-Fundamentos Teóricos y Definición de los Términos Básicos

2.2.1. Aceros Inoxidables

Los primeros trabajos realizados para la fabricación de los hierros y aceros inoxidable datan del siglo XIX. Ya en aquellos días se sabía que el hierro aleado con ciertos metales, como el cobre y el níquel resistía mejor a la oxidación que el hierro ordinario. En 1865 ya se hacían, aunque en cantidades muy limitadas, aceros con 25 y



35% de níquel que resistían muy bien la acción de la humedad del aire y, en general, del ambiente; pero se trataba de fabricaciones en muy pequeña escala que nunca se continuaron. En esa época no se llegó a estudiar ni a conocer bien esta clase de aceros. En 1872 Woods y Clark fabricaron aceros con 5% de cromo que tenían también mayor resistencia a la corrosión que los hierros ordinarios de esa época.

Como todos los tipos de aceros, el acero inoxidable no es un metal simple sino una aleación. Y se obtiene al agregarle distintos elementos a la misma, permitiendo así formar un amplio conjunto de materiales. Lo que tienen en común todos los aceros es que el principal ingrediente (elemento de aleación) es hierro, al que se añade una pequeña cantidad de carbono. El acero inoxidable fue inventado a principios del siglo XX cuando se descubrió que una pequeña cantidad de cromo (habitualmente un mínimo de 11%) añadido al acero común, le daba un aspecto brillante y lo hacía altamente resistente a la suciedad y a la oxidación; además de el níquel por su memoria a las propiedades mecánicas. Esta resistencia a la oxidación, denominada «resistencia a la corrosión», es lo que hace al acero inoxidable diferente de otros tipos de acero. Es importante destacar, que el acero inoxidable es un material sólido y no un revestimiento especial aplicado al acero común para darle características “inoxidables”.

Aceros comunes, e incluso otros metales, son a menudo cubiertos o “bañados” con metales blancos como el cromo, níquel o zinc para proteger sus superficies o darles otras características superficiales. Mientras que estos baños tienen sus propias ventajas y son muy utilizados, el peligro radica en que la capa puede ser dañada o deteriorarse de algún modo, lo que anularía su efecto protector. La apariencia del acero inoxidable puede, sin embargo, variar y dependerá en la manera que esté fabricado y en su acabado superficial.



2.2.2. Aceros Inoxidables Martensítico

En los aceros inoxidable martensíticos, el carbono está en una concentración tal, que permite la formación de austenita a altas temperaturas, que a su vez se transforma en martensita durante el enfriamiento. Es importante observar que estos aceros son normalmente producidos por la industria siderúrgica en estado recocido, con ductilidad razonablemente buena. Solamente después de templados serán muy duros y poco dúctiles. Pero es precisamente en esta condición (templados), que serán resistentes a la corrosión.

El más utilizado de los aceros inoxidable martensíticos es el Tipo 420. En estado recocido (estructura ferrítica), no presenta buen comportamiento frente a la corrosión atmosférica. Esto porque durante la operación de recocido, a una temperatura aproximada de 760 °C, el carbono y el cromo se combinan para formar carburos de cromo, Cr₂₃C₆. Cada molécula de carburo de cromo contiene, en peso, aproximadamente 95% de cromo. Considerando el alto tenor de carbono y el bajo tenor de cromo del acero inoxidable 420 (aproximadamente 0,35%C y 12,50% Cr), como todo el carbono precipita como carburo de cromo durante el recocido, esta precipitación retirará de la solución sólida aproximadamente la mitad del cromo disponible. En esta condición el material no resiste a la corrosión y no puede ser considerado propiamente como un acero inoxidable (ya que no tiene un mínimo de 11% de cromo en solución sólida).

Por eso, el acero inoxidable 420, es colocado en servicio por el usuario, solamente después de un tratamiento de temple. Cuando templado, el carbono forma parte de la fase martensítica, no siendo encontrado en la aleación precipitado como carburo de cromo [14].



2.2.3. Tratamiento Térmico

Se conoce como tratamiento térmico el proceso al que se someten los metales con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas, especialmente la dureza, la resistencia y la tenacidad. Los materiales a los que se aplica el tratamiento térmico son, básicamente, el acero y la fundición, formados por hierro y carbono.

Las características mecánicas de un material dependen tanto de su composición química como de la estructura cristalina que tenga. Los tratamientos térmicos modifican esa estructura cristalina sin alterar la composición química, dando a los materiales unas características mecánicas concretas, mediante un proceso de calentamientos y enfriamientos sucesivos hasta conseguir la estructura cristalina deseada.

Las propiedades mecánicas de las aleaciones de un mismo metal, y en particular de los aceros, residen en la composición química de la aleación que la forma y el tipo de tratamiento térmico a los que se les somete. Los tratamientos térmicos lo que hacen es modificar la estructura de los granos que forman los aceros sin variar la composición química de los mismos. Esta propiedad de tener diferentes estructuras de grano con la misma composición química se llama polimorfismo y es la que justifica los tratamientos térmicos. Técnicamente el polimorfismo es la capacidad de algunos materiales de presentar distintas estructuras cristalinas, con una única composición química, el diamante y el grafito son polimorfismos del carbono. La α -ferrita, la γ -austenita y la δ -hierro son polimorfismos del hierro. Esta propiedad en un elemento químico puro se denomina alotropía.

El tratamiento térmico en el material es uno de los pasos fundamentales para que pueda alcanzar las propiedades mecánicas para las cuales está creado. Este tipo de procesos consisten en el calentamiento y enfriamiento de un metal en su estado sólido



para cambiar sus propiedades físicas. Con el tratamiento térmico adecuado se pueden reducir los esfuerzos internos, el tamaño del grano, incrementar la tenacidad o producir una superficie dura con un interior dúctil. La clave de los tratamientos térmicos consiste en las reacciones que se producen en el material, tanto en los aceros como en las aleaciones no férricas, que ocurren durante el proceso de calentamiento y enfriamiento de las piezas, con unas pautas o tiempos establecido.

Para conocer a que temperatura debe elevarse el metal para que se reciba un tratamiento térmico es recomendable contar con los diagramas de cambio de fases como el de hierro-cromo. En este tipo de diagramas se especifican las temperaturas en las que suceden los cambios de fase (cambios de estructura cristalina), dependiendo de los materiales diluidos (aleantes).

La alta dureza y la consecuente resistencia al desgaste, determinan las aplicaciones de este material, utilizado en cuchillería, discos de freno, equipos quirúrgicos, odontológicos y turbinas.

Los tratamientos térmicos han adquirido gran importancia en la industria en general, ya que con las constantes innovaciones se van requiriendo metales con mayores resistencias tanto al desgaste como a la tensión. Los principales tratamientos térmicos son:

- **Temple:** Su finalidad es aumentar la dureza y la resistencia del acero. Para ello, se calienta el acero a una temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior A_c (entre 900-950°C) y se enfría luego más o menos rápidamente (según características de la pieza) en un medio como agua, aceite, etcétera.
- **Revenido:** Sólo se aplica a aceros previamente templados, para disminuir ligeramente los efectos del temple, conservando parte de la dureza y aumentar



la tenacidad. El revenido consigue disminuir la dureza y resistencia de los aceros templados, se eliminan las tensiones creadas en el temple y se mejora la tenacidad, dejando al acero con la dureza o resistencia deseada. Se distingue básicamente del temple en cuanto a temperatura máxima y velocidad de enfriamiento.

- **Recocido:** Consiste básicamente en un calentamiento hasta temperatura de austenitización (800-925°C) seguido de un enfriamiento lento. Con este tratamiento se logra aumentar la elasticidad, mientras que disminuye la dureza. También facilita el mecanizado de las piezas al homogeneizar la estructura, afinar el grano y ablandar el material, eliminando la acritud que produce el trabajo en frío y las tensiones internas.
- **Normalizado:** Tiene por objeto dejar un material en estado normal, es decir, ausencia de tensiones internas y con una distribución uniforme del carbono. Se suele emplear como tratamiento previo al temple y al revenido.

2.3.-Ensayo de Tracción

Este ensayo consiste en aplicar un esfuerzo axial de tracción a la probeta, colocándola en la máquina de ensayo consistente de dos mordazas, una fija y otra móvil, para luego proceder a medir la carga mientras se aplica el desplazamiento de la mordaza móvil, esto con el fin de obtener las variables de carga, esfuerzo y alargamiento a la rotura del material.

Para la determinación de la deformación y del esfuerzo real que ocurre en el ensayo de tracción es necesario la utilización de las ecuaciones presentadas a continuación, como también utilizando métodos de lectura de los valores de algunos esfuerzos en el diagrama de tensión vs deformación (Figura. N° 2.1).

Para el cálculo de la deformación y del esfuerzo real se debe antes de realizar el ensayo de tracción tomar los datos de la longitud inicial de la entalla (L_o) y del diámetro inicial de la entalla (D_o) (Figura. N° 2).

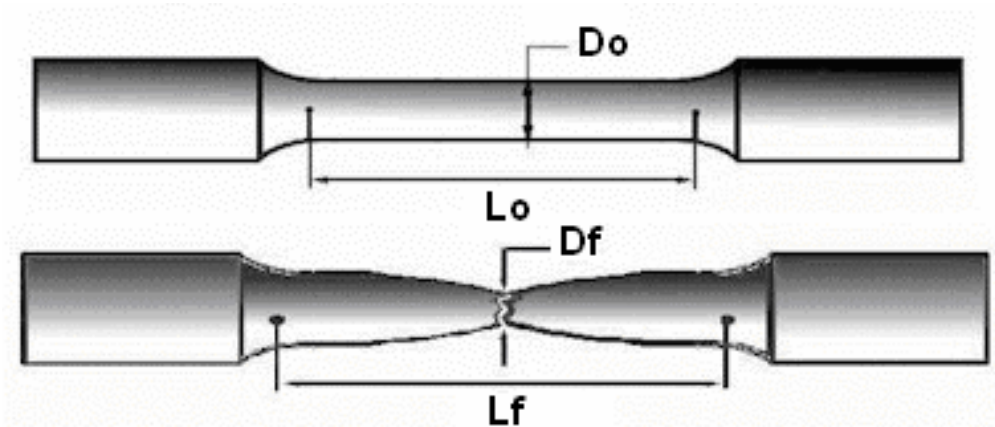


Figura. N° 2 Probetas de Tracción antes y luego del ensayo

Con el diámetro inicial (D_o) se determina el área inicial (A_o)

$$A_o = \frac{\pi * D_o^2}{4} \quad (2.1)$$

Con esta área inicial se determina el esfuerzo ingenieril

$$\sigma_{ing} = \frac{F}{A_o} \quad (2.2)$$

Con la longitud inicial y la diferencia entre la longitud inicial y la longitud final ($L_f - L_o$) se obtiene la deformación ingenieril

$$\ell_{ing} = \frac{\Delta L_i}{L_o} \quad (2.3)$$

Con el σ_{ing} y la deformación ingenieril se logra determinar el σ_{real}

$$\sigma_{Real} = \sigma_{ing} * (1 + \ell_{ing}) \quad (2.4)$$

Con la deformación ingenieril se logra determinar la deformación real

$$\ell_{Real} = \ln(\ell_{ing} + 1) \quad (2.5)$$

Al determinar el porcentaje de deformación de la probeta, es posible establecer la ductilidad del material. Los valores recogidos en el ensayo se representaran en curvas tensión-deformación (Figura. N° 2.1), que darán información acerca de los principales parámetros mecánicos del material.

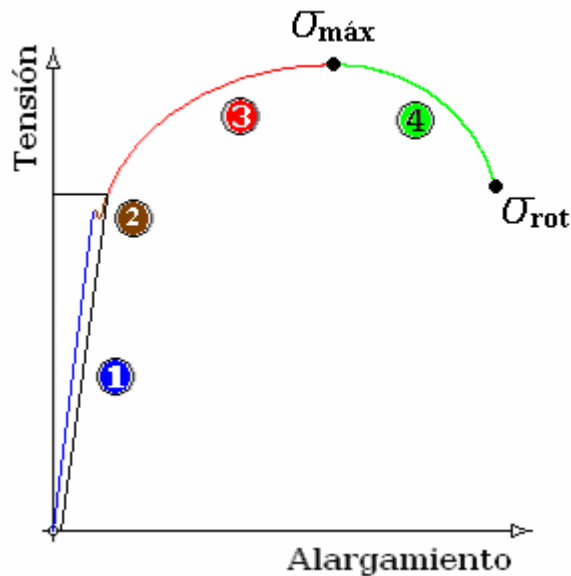


Figura. N° 2.1 Diagrama Tensión vs. Alargamiento (Deformación)

Las propiedades mecánicas de metales y aleaciones que son de importancia en ingeniería para el diseño de estructuras y que pueden obtenerse del ensayo de tracción son:



1. Módulo de elasticidad.
2. Límite elástico a un 0,2% de desplazamiento.
3. Resistencia máxima a la tensión.
4. Porcentaje de elongación a la fractura.
5. Porcentaje de reducción en el área de fractura.

Para la determinación del módulo de elasticidad (E) se tiene

$$E = \frac{\sigma_{Real}}{\ell_{Real}} \text{ (psi ó Pa)} \quad (2.6)$$

En los diagramas de tensión deformación se tienen, por lo general, tres regiones así como se muestra en la figura N° 2.1

- La región elástica, ubicada en la zona (1) de la figura, la tensión es directamente proporcional a la deformación, cumpliéndose la ley de Hooke.
- La región plástica, ubicada en la zona (3) de la figura, el material se deforma plásticamente.
- La región de rotura ubicada en la zona (4) de la figura, se encuentra el punto de resistencia a la tracción, o punto de no-retorno, a partir del cual la probeta rompe aunque no aumente la tensión, sino que por lo general disminuye.

La separación entre la región elástica y plástica viene dada por el límite elástico, esta se ubica en el punto (2) de la figura, y se calcula trazando una paralela a la curva de tracción para una deformación del 0,2%, correspondiendo al punto de corte con dicha curva, y donde también es posible tomar lectura del esfuerzo de fluencia. La separación entre la región plástica y la de rotura viene dada por el punto de resistencia a la tracción. En el punto entre la región plástica (zona 3) y la región de rotura (zona 4) se encuentra la resistencia máxima a la tensión (esfuerzo máximo de tracción), y al



final de la curva, en la región de rotura (zona 4) se encuentra el esfuerzo de rotura, donde el material cede y se rompe.

El porcentaje de elongación se determina de la siguiente manera:

$$\% \text{ elongación} = \frac{l_f - l_o}{l_o} * 100\% \quad (2.7)$$

Y el porcentaje de reducción de área se determina por la siguiente ecuación:

$$\% \text{ reducción de área} = \frac{A_o - A_f}{A_o} * 100\% \quad (2.8)$$

2.4.-Ensayo de Impacto

Este ensayo consiste en impactar un péndulo que lleva una masa calibrada en su extremo de 15 Kpm (Figura. N° 2.3), con la probeta que posee un entalle cuya finalidad es la de facilitar la ruptura del material (Figura. N° 2.2), buscando obtener así la energía que es capaz de absorber éste en su estado original, y con los respectivos tratamientos térmicos a aplicar.



Figura. N° 2.2 Probetas de un ensayo de impacto [8]

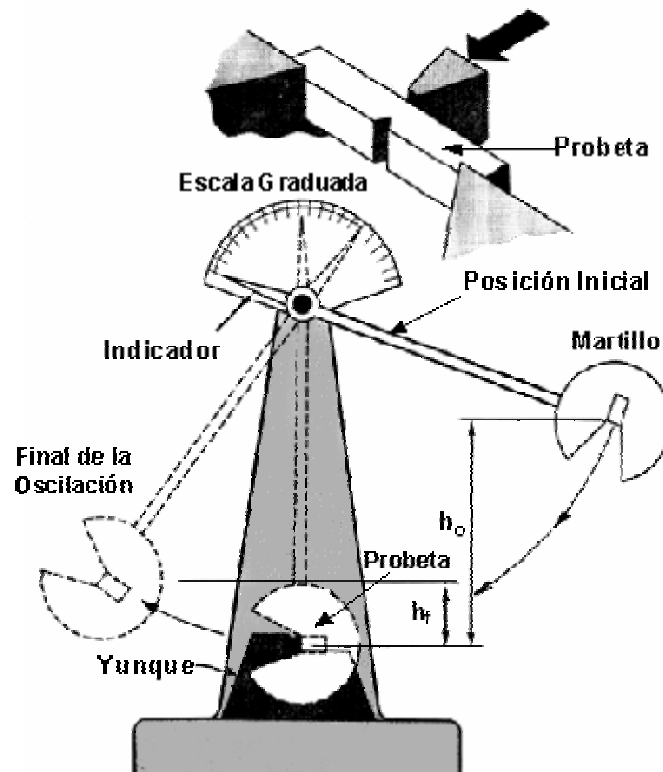


Figura. N° 2.3 Esquema de péndulo del ensayo Charpy [8]

La fractura de un metal (material) comienza en el lugar donde la concentración de tensión es lo más grande posible, como puede ser en la punta de una grieta.

La intensidad de esfuerzo en la punta de la grieta es dependiente tanto de la tensión aplicada como de la longitud de la grieta. Para expresar la combinación de los efectos de la tensión en la punta de la grieta y la longitud de la grieta se utiliza el factor de intensidad de esfuerzo (K_{IC})

$$K_{IC} = Y\sigma * \sqrt{\pi a} \quad (2.9)$$

Donde:

K_{IC} = factor de intensidad de esfuerzo

σ = tensión nominal aplicada (MPa)

a = longitud del borde de la grieta o mitad de la longitud de una grieta interna (mm)

Y = constante geométrica adimensional del orden de 1

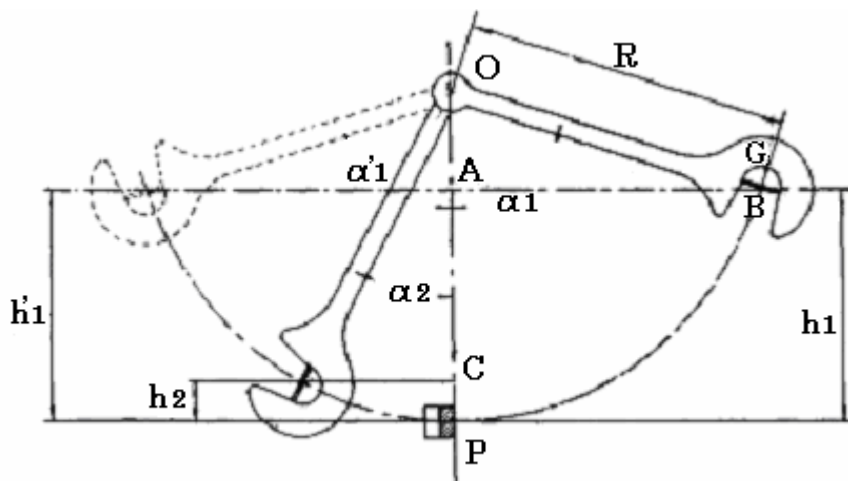


Fig. N° 2.4 Dimensiones usadas en el ensayo de Impacto Charpy para determinar la energía absorbida por el material [8]



Siguiendo el esquema de la Figura. N° 2.4, se observa que al deja caer el péndulo sobre el punto P, donde se encuentra ubicada una barra de un material determinado, la masa al chocar con ella producirá su rotura, si la energía que posee el péndulo es mayor que la necesaria para alcanzarla, continuará su trayectoria elevándose hasta una altura h_2 indicada también por el ángulo α_2

El trabajo empleado entonces en romper la barra será la diferencia entre la energía inicial del péndulo y la que posee al final de su carrera.

$$(2.10)$$

$$A_0 = A_1 - A_2$$

$$A_1 = G \cdot h_1 \text{ y } A_2 = G \cdot h_2 \quad (2.11) \text{ y } (2.12)$$

$$A_0 = G \cdot (h_1 - h_2) \quad (2.13)$$

Y en función de los ángulos, tenemos: $h_1 = OP - OA$, (2.14), en donde OP es el brazo del péndulo igual a R. Del triángulo OAB

$$OA = R \cdot (\cos(\alpha_1)) \quad \text{reemplazando en la Ecuación 2.14} \quad (2.15)$$

$$h_1 = R - R \cdot (\cos(\alpha_1)) = R \cdot (1 - \cos(\alpha_1)) \quad (2.16)$$

Procediendo en igual forma para la altura después del choque

$$h_2 = R - R \cdot (\cos(\alpha_2)) = R \cdot (1 - \cos(\alpha_2)) \quad (2.17)$$

Reemplazando estos valores en la diferencia de trabajos, nos queda

$$A_0 = G \cdot R \cdot (1 - \cos(\alpha_1)) - G \cdot R \cdot (1 - \cos(\alpha_2)) \quad (2.18)$$

$$A_0 = G \cdot R \cdot (\cos(\alpha_2) - \cos(\alpha_1))$$

El valor numérico en kilográmetros o en Joule del trabajo gastado para producir la rotura queda indicado sobre una escala convenientemente graduada que posee la máquina, o bien resulta de la fórmula anterior en donde los valores de los ángulos se



miden sobre un cuadrante que se encuentra en la parte superior de aquélla. El trabajo o energía registrada será considerada aceptable cuando las pérdidas por fricción entre las partes metálicas de la máquina, para la marcha en vacío, sea inferior al 0,4 % de la energía máxima.

2.5.-Microscopia Electrónica de Barrido

Este consiste en un haz de electrones de alta energía que utilizando los electrones secundarios producidos por la muestra estos son recibidos por los detectores adecuados (centelleo), los cuales cambian las señales a corriente eléctrica, estas señales eléctricas se amplían o se modifican a través del circuito electrónico para detectores y se inyecta al tubo de rayos catódicos, controlando también el contraste de la imagen que corresponde a la cantidad de señales producidas por la superficie de la muestra.

2.6-Definición de términos básicos

- **Resiliencia:** Es la cantidad de energía por unidad de volumen que puede absorber un material, antes de que comience la deformación irreversible, esto es, la deformación plástica. Se corresponde con el área bajo la curva de un ensayo de tracción entre la deformación nula y la deformación correspondiente al esfuerzo de fluencia. En el Sistema Internacional de Unidades se expresa en julios por metro cúbico.
- **Tenacidad:** Es la habilidad para absorber energía durante la deformación plástica, capacidad para soportar esfuerzos ocasionales superiores al esfuerzo de fluencia, sin que se produzca la fractura.
- **Ductilidad:** Es la propiedad que presentan algunos metales y aleaciones cuando, bajo la acción de una fuerza, pueden deformarse sin romperse.



- **Dureza:** Es la capacidad que tiene un material de soportar esfuerzos que lo deforman de forma permanente. No debe confundirse con la tenacidad. Hay diversas formas de medir la dureza, si bien la mayoría consiste en utilizar un pequeño indentador, un dispositivo que trata de penetrar en el material y que puede ser una pequeña bola o una aguja.

La dureza que será utilizada para este estudio es la dureza rockwell la cual se define como:

Dureza Rockwell: Se utiliza como punta un cono de diamante (en algunos casos bola de acero). Es la más extendida, ya que la dureza se obtiene por medición directa y es apto para todo tipo de materiales. Se suele considerar un ensayo no destructivo por el pequeño tamaño de la huella.

- **Fragilidad:** Se define como la capacidad de un material de fracturarse con escasa deformación, a diferencia de los materiales dúctiles que se rompen tras sufrir acusadas deformaciones plásticas. La rotura frágil tiene la peculiaridad de absorber relativamente poca energía.
- **Plasticidad:** Es la propiedad mecánica de un material de deformarse permanentemente e irreversiblemente cuando se encuentra sometido a tensiones por encima de su rango elástico.
- **Elasticidad:** Es la propiedad mecánica de ciertos materiales de sufrir deformaciones reversibles cuando se encuentra sujetos a la acción de fuerzas exteriores y de recuperar la forma original si estas fuerzas exteriores se eliminan.
- **Maleabilidad:** Es la propiedad de la materia, que junto a la ductilidad presentan los cuerpos a ser labrados por deformación. Se diferencia de aquélla en que mientras la ductilidad se refiere a la obtención de hilos, la maleabilidad



permite la obtención de delgadas láminas de material sin que éste se rompa, teniendo en común que no existe ningún método para cuantificarlas.

- **Esfuerzo de fluencia:** Es el valor de la tensión que soporta la probeta en el momento de producirse el fenómeno de la cedencia o fluencia. Este fenómeno tiene lugar en la zona de transición entre las deformaciones elásticas y plásticas y se caracteriza por un rápido incremento de la deformación sin aumento apreciable de la carga aplicada.
- **Límite elástico:** Es el valor de la tensión a la que se produce un alargamiento prefijado de antemano (0,2%, 0,1%, etc.) en función del extensión empleada.



CAPÍTULO III



MARCO METODOLÓGICO

3.1.-Nivel de la Investigación

En la presente investigación el grado de profundidad con que se quiere abordar el tema es de tipo descriptivo experimental, ya que nuestra investigación consiste en la caracterización del acero inoxidable martensítico AISI 420, tratado térmicamente con el fin de establecer sus propiedades mecánicas.

3.2.-Diseño de la Investigación

En el siguiente capítulo se describe el procedimiento metodológico que se llevó a cabo para el estudio del acero inoxidable martensítico AISI 420, sometido a tratamientos térmicos de normalizado y recocido, evaluados con ensayos de tracción, de impacto y de dureza realizados a las probetas que se fabricaron según las normas ASTM A370, E23 y E8

3.3.-Material

Para llevar a cabo la investigación se usó Acero inoxidable martensítico AISI 420, en una presentación de una barra de diámetro 0,5 pulgadas y con una longitud de 2,5 metros. A continuación se presenta la composición química del material utilizado tabla N° 3.



Tabla N° 3. Composición química del Acero Inoxidable AISI 420 según Proveedor

Fe (%)	Mn	Mo	Ni	Cu	Cr	P	C	Si	Ti	S
-	0.51	-	-	-	13.25	0.023	0.202	0.35	-	0.026

Fuente: SUMINDU (Ver Anexo C)

3.4.-Mecanizado de las Probetas

Para la fabricación de las probetas se utilizaron las normas ASTM A370 y la E8 para el ensayo de tracción y la E23 para el ensayo de impacto (Charpy) [1].

Para la realizar ambos tipos de probetas se mecanizó el material que se encontraba en barra de ½ in para llevarlo a las dimensiones requeridas según la norma.

Para los ensayos de tracción se fabricaron una cantidad de veintiún (21) probetas, figura N° 3, distribuidas de la siguiente manera: tres (3) probetas para la condición original del material, tres (3) para tratamiento térmico de recocido a 840 °C, tres (3) para tratamiento de recocido a 855 °C, tres (3) para tratamiento térmico de recocido a 870 °C. Para el caso del tratamiento térmico normalizado a 800 °C fueron: tres (3) para un tiempo de 9 minutos, tres (3) para un tiempo de 11 minutos y tres (3) para un tiempo de 13 minutos.

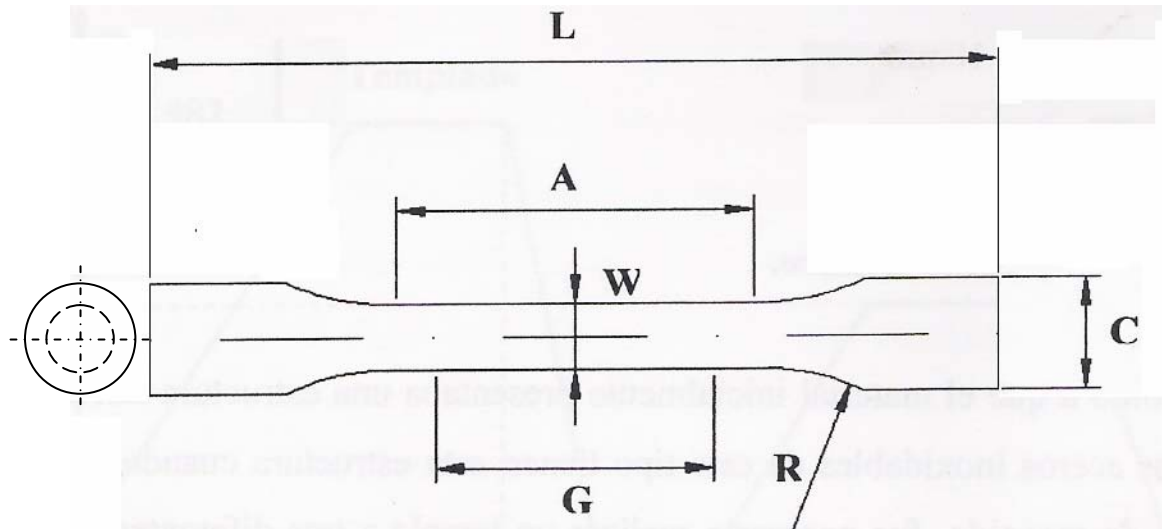


Figura. N° 3. Dimensiones de las Probetas Cilíndricas de Tracción según Norma ASTM-A370 [1] (Ver Anexo A)

Donde:

$$A = 1 \frac{3}{4} \text{ pulgadas}$$

$$G = 1.400 \text{ pulgadas}$$

$$R = \frac{1}{4} \text{ pulgadas}$$

$$L = 3.5 \text{ pulgadas}$$

$$D = 0.350 \text{ pulgadas}$$

Para el ensayo de impacto se fabricaron una cantidad de treinta y cinco (35) probetas, figura N° 3.1, para los cuales se necesitaron cinco (5) probetas para la condición original del material, cinco (5) para tratamiento térmico de recocido a 840 °C, cinco (5) para tratamiento térmico de recocido a 855 °C, cinco (5) para tratamiento térmico de recocido a 870 °C. De igual manera para el tratamiento térmico de Normalizado a 800 °C fueron: cinco (5) para un tiempo de 9 minutos, cinco (5) para un tiempo de 11 minutos y cinco (5) para un tiempo de 13 minutos.

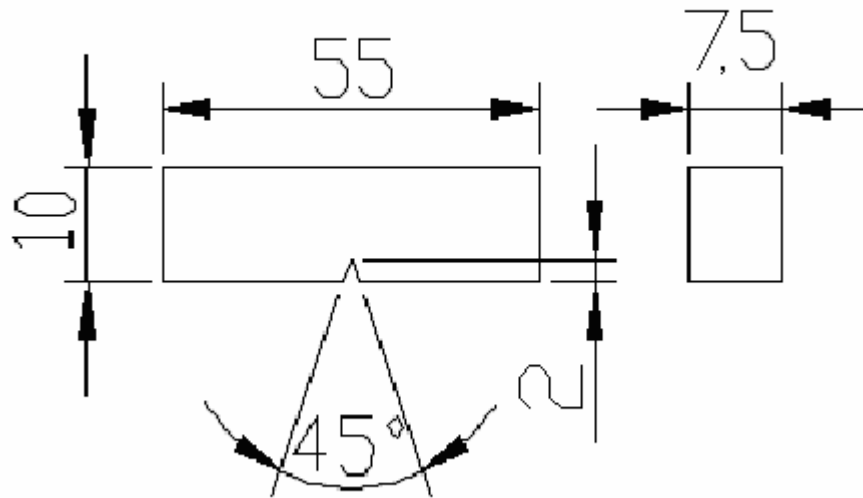


Figura. N° 3.1. Dimensiones de las Probetas de Impacto Charpy según Norma ASTM-E23 [1] (Ver Anexo B)

3.5.-Tratamientos Térmicos

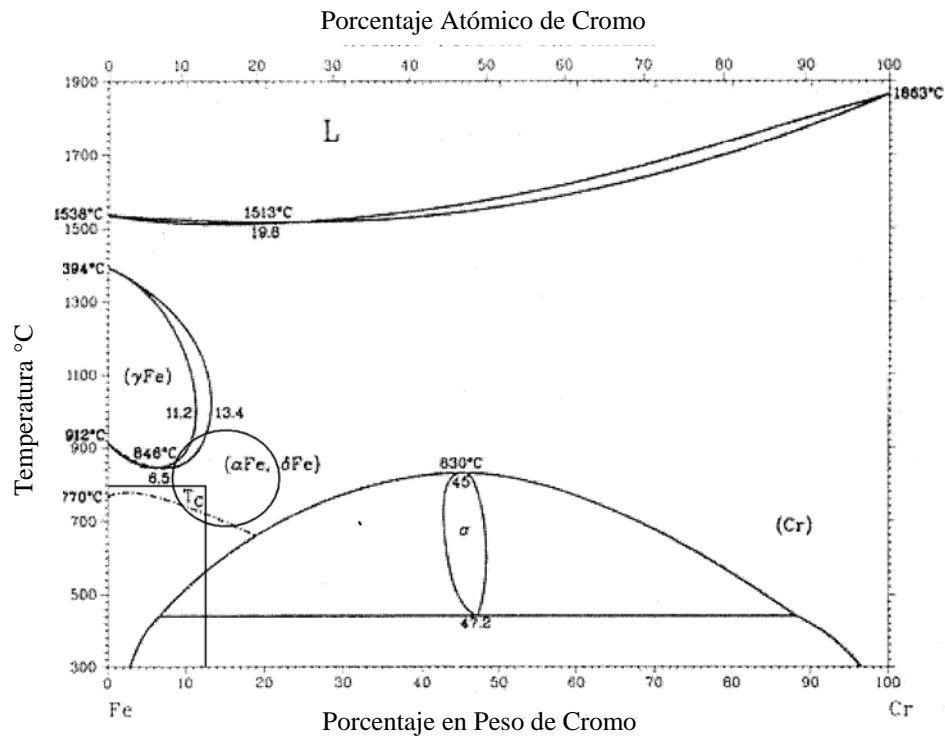
En esta parte de la investigación se trató térmicamente el material para estudiar su comportamiento a distintas temperaturas, con el fin de conocer a cuál de estas el material ofrece mejores cualidades para sus propiedades mecánicas. Se realizaron dos (2) tratamientos térmicos, de recocido y de normalizado, en el horno marca FURNACE modelo F48000 (Figura N° 3.2.), con una potencia de 1800 w y con un valor máximo de temperatura de 1093 °C, que se encuentra en el laboratorio de materiales de la facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo.



Figura N° 3.2. Horno para realizar los Tratamientos Térmicos

Para el tratamiento térmico de recocido, las probetas fueron sometidas a temperaturas de 840, 855 y 870 °C respectivamente. Para el tratamiento térmico de normalizado, las probetas fueron sometidas a una temperatura de 800 °C con tiempos de permanencia en el horno de 9, 11 y 13 minutos [15].

La selección de las temperaturas para el recocido y para el normalizado se realizaron utilizando el diagrama de fase de hierro-cromo (Fe-Cr) (Figura N° 3.3.), entrando en el diagrama con el valor del porcentaje de cromo presente en el acero, que en este caso fue de 12.5% de Cr-



Cr-Fe phase diagram

Figura N° 3.3. Diagrama de Fase Hierro-Cromo (Fe-Cr)

Para seleccionar la temperatura de normalizado se procedió a partir del porcentaje de cromo en el material, la cual según el fabricante fue de 12.5%, a subir hasta encontrar una zona sólida, la cual según el diagrama es la zona de ferrita y hierro. Al realizar este procedimiento se obtuvo que la temperatura de normalizado para escoger fue de 800 °C.

3.6.-Ensayo de Tracción

Se usaron 21 probetas, las cuales fueron ensayadas en la maquina Galdabini (Figura. N° 3.4) la cual tiene un límite de lectura de 130000 N, un área de agarre máximo de 176.71 mm², una velocidad máxima en la fase elástica de 9 mm/min y una velocidad máxima en la fase plástica de 30 mm/min, ésta se está ubicada en el laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo



Figura. N° 3.4 Máquina Galdabini

Las tres primeras probetas a utilizar serán ensayadas en su estado original. Posteriormente se ensayarán 9 probetas en condiciones de recocido en cantidades y temperaturas de 3 a 840 °C, 3 a 855 °C y 3 a 870 °C. Las restantes 9 probetas serán ensayadas en condiciones de normalizado a 800 °C en cantidades y tiempos de 3 a 9 min, 3 a 11 min y 3 a 13 min. Tal como se muestra en la tabla N° 3.1. de distribución de probetas por ensayo.



Tabla N° 3.1. Distribución de las Probetas por ensayo

Ensayo	Condicion Original	Recocido			Normalizado a 800 °C			N° de Probetas
		840 °C	855 °C	870 °C	9 min	11 min	13 min	
Tracción	3	3	3	3	3	3	3	21
Impacto	5	5	5	5	5	5	5	35
Dureza	1	1	1	1	1	1	1	7

3.7.-Ensayo de Dureza

El fin de este ensayo es determinar y cuantificar la dureza del material en sus diferentes condiciones de estudio mediante indentación según el método Rockwell, por medio del durómetro digital marca MACROMET modelo 5100T (Figura N° 3.5.) con una carga de prueba preliminar de 98.07 N (100Kg) para el ensayo de dureza, que se encuentra en el laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo.



Figura N° 3.5. Durómetro digital marca MACROMET modelo 5100T



Para la realizar el ensayo de dureza no se fabricaron probetas, más bien fueron tomadas probetas de impacto (Charpy), de manera aleatoria por cada condición en estudio, antes de realizar el ensayo de impacto, esto es: una (1) probeta para la condición original, una (1) para el tratamiento térmico de recocido a 840 °C, una (1) para tratamiento térmico de recocido a 855 °C y una (1) para tratamiento térmico de recocido a 870 °C. De igual forma para el tratamiento térmico de Normalizado a 800 °C fueron: una (1) para 9 minutos, una (1) para 11min y una (1) 13 minutos. De manera tal de que se realizó a cada una de estas probetas seleccionadas según la condición diez (10) indentaciones. Tal como se muestra en la tabla N° 3.1. de distribución de probetas por ensayo.

3.8.-Ensayo de Impacto (Charpy)

Se usaron 35 probetas, distribuidas en cinco (5) probetas por cada condición de tratamiento térmico, esto es: cinco (5) probetas en condición original, cinco (5) probetas en condiciones de recocido en cantidades y temperaturas de cinco (5) a 840 °C, cinco (5) a 855 °C y cinco (5) a 870 °C. Las quince (15) restantes probetas serán ensayadas en condiciones de normalizado a 800 °C en cantidades y tiempos de cinco (5) a 9 min, cinco (5) a 11 min y cinco (5) a 13 min. Tal como se muestra en la tabla N° 3.1. de distribución de probetas por ensayo. Este ensayo se realizó con la máquina de ensayos de impacto marca FRANK (Figura N° 3.6.), ubicada en el laboratorio de ensayos de Materiales de la Escuela de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo.



Figura N° 3.6. Máquina para realizar el ensayo de Impacto Charpy, marca FRANK

3.9.-Preparación Metalográfica

En la realización de la metalografía se tomaron muestras del material y se prepararon metalográficamente sometiéndolas a un desbaste grueso, medio y fino con lijas de 120, 240, 320, 600, 800 y 1200 respectivamente. Luego del desbaste de la muestra se pulieron con un paño grueso bañado en alumina gruesa y luego se pasaron por un paño fino bañado en alumina fina. Al tener la superficie adecuada sobre la muestra se procedió al ataque químico, utilizando el reactivo Kalling's N°1 (1,5 g CuCl_2 , 33 ml HCl , 33 ml etanol, 33 ml H_2O)^[11], tomado del, las muestras fueron atacados por inmersión a la superficie trabajada por unos 5 segundos, para luego lavar con abundante agua y así eliminar el reactivo sobre la superficie, para luego bañarla con etanol y secarla con un secador.



Para observar la metalografía del material se utilizó el Microscopio marca Versmet-2 Unión 7761 (Figura N° 3.7.) con cámara fotográfica de 35mm para ensayos microscópicos, ubicado en el laboratorio de materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo.

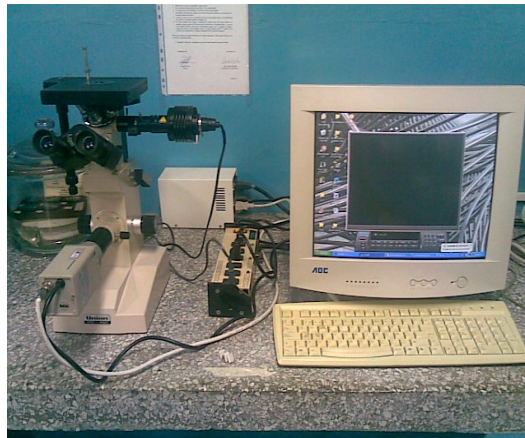


Figura N° 3.7. Microscopio Metalúrgico

3.10.-Microscopía Electrónica de Barrido

Con la Microscopia electrónica de barrido se observó la estructura tridimensional de la muestra, utilizando los electrones secundarios producidos por la muestra, debido a la irradiación de un haz de electrones de alta energía.



Evaluación de la Tenacidad de Impacto del Acero Inoxidable Martensítico AISI-420 Sometido a Tratamiento Térmico de Recocido y Normalizado



CAPÍTULO IV



RESULTADOS OBTENIDOS

Se prepararon las probetas según las normas ASTM E8 E23 y A307, tres (3) para el ensayo de tracción, cinco (5) para el ensayo de impacto. Se le realizaron a las probetas seis (6) tipos de tratamientos:

1. Condición original
2. Tratamiento de recocido a 840 °C
3. Tratamiento de recocido a 855 °C
4. Tratamiento de recocido a 870 °C
5. Tratamiento de normalizado a 800 °C por 9 minutos
6. Tratamiento de normalizado a 800 °C por 11 minutos
7. Tratamiento de normalizado a 800 °C por 13 minutos

Para cada uno de estos tratamientos se utilizaron tres (3) probetas para tracción y cinco (5) para impacto, lo que en total se utilizaron veintiun (21) probetas para tracción y treinta y cinco (35) para impacto. El ensayo de dureza se realizó en una de las superficies de las probetas de impacto, cada una según el tratamiento térmico correspondiente.



Figura N° 4.1. Probetas de Tracción Posterior al Ensayo



Figura N° 4.2. Probetas de Impacto Posterior al Ensayo

4.1. Ensayo de Traccion

El ensayo de tracción fue realizado para cada condición, los valores obtenidos gráficamente fueron Carga (N) vs. Alargamiento (mm); por otra parte de las probetas que partieron dentro de la zona calibrada se construyeron las gráficas del Esfuerzo Ingenieríl (MPa) vs. Deformación Ingenieríl (mm/mm), al mismo tiempo que se determinaron las propiedades mecánicas del material ensayado.

Se ensayaron las probetas N°1, N°2 y N°3 las cuales culminaron el ensayo con fractura dentro de los límites de la zona calibrada. A continuación se muestran los resultados obtenidos gráficamente.



4.1.1. Condición Original

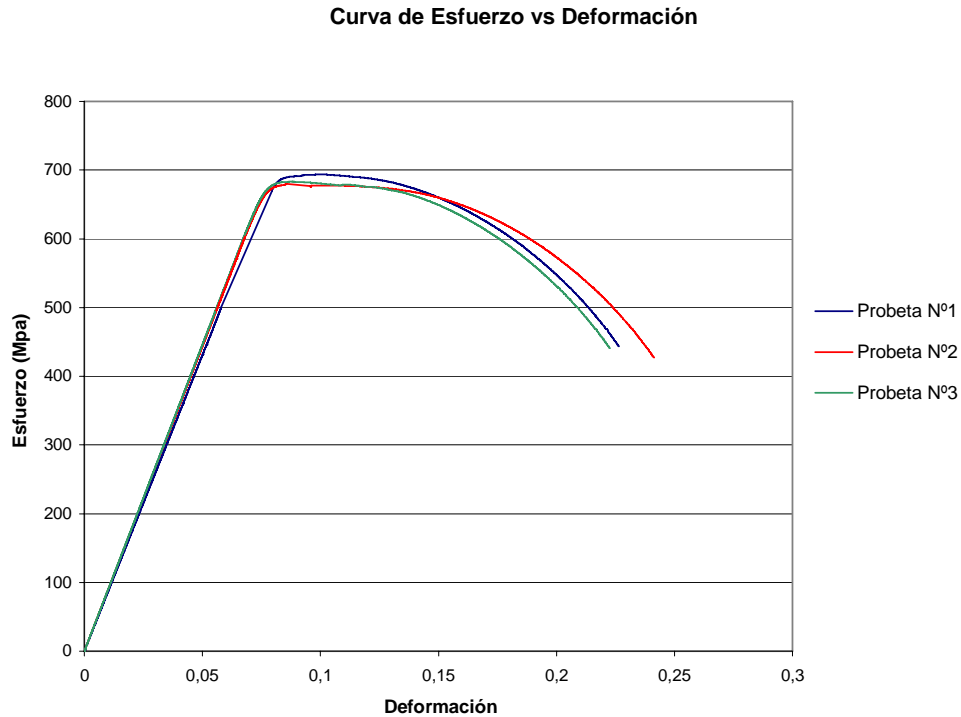


Figura N° 4.3. Curva Esfuerzo vs. Deformación para la condición original

En la siguiente tabla se muestra el resumen de las propiedades mecánicas de la Figura 4.

Tabla N° 4. Propiedades mecánicas de la condición original

Muestra	Esfuerzo de Fluencia $\sigma_{y0.2\%}$ (MPa)	Esfuerzo Máximo σ_{max} (MPa)	Esfuerzo de Rotura σ_{rup} (MPa)	% Alargamiento a la Ruptura	% Reducción de Área
Probeta N°1	690,25	693,67	443	15,93	63,73
Probeta N°2	678,07	681,46	406,72	15,78	64,16
Probeta N°3	681,95	683,05	440	16,54	63,73
Promedio	682,09	685,71	430,07	16,08	63,87
Desviación (S)	6,22	6,64	20,14	0,40	0,25



4.1.2. Normalizado 9min

Curva de Esfuerzo vs Deformación

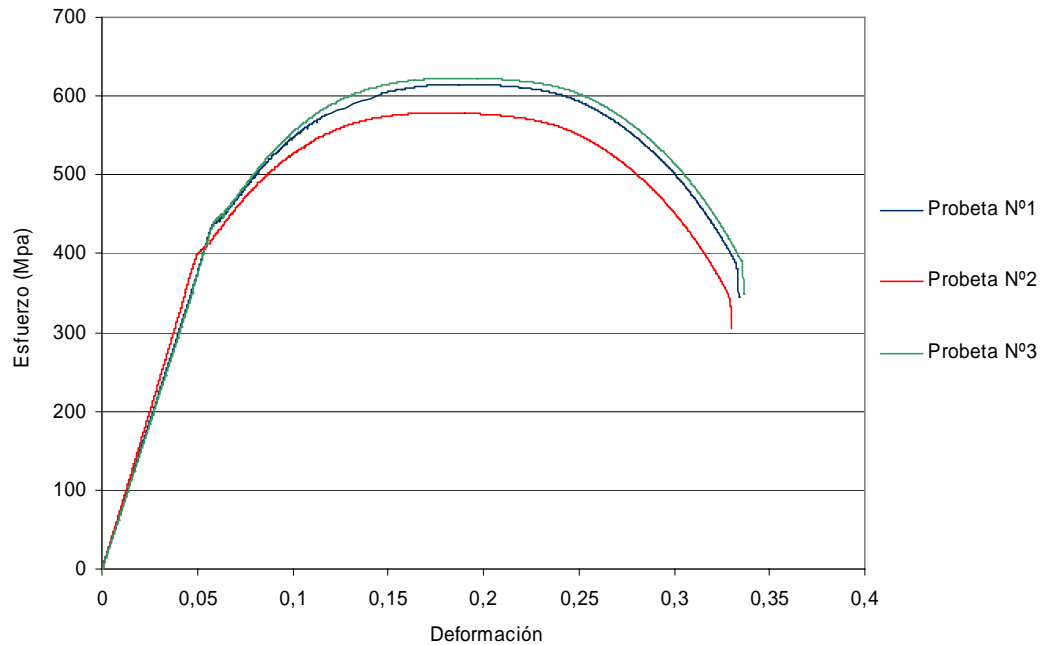


Figura N° 4.4. Curva Esfuerzo vs. Deformación para Normalizado 9min

En la siguiente tabla se muestra el resumen de las propiedades mecánicas de la Figura 4.1

Tabla N° 4.1. Propiedades mecánicas de Normalizado 9min

Muestra	Esfuerzo de Fluencia $\sigma_{y0.2\%}$ (MPa)	Esfuerzo Máximo σ_{max} (MPa)	Esfuerzo de Rotura σ_{rup} (MPa)	% Alargamiento a la Ruptura	% Reducción de Área
Probeta N°1	447,54	615,06	345,22	27,2	67,86
Probeta N°2	429,59	578,99	305,79	25,95	68,01
Probeta N°3	449,96	623,07	349,12	25,95	70,74
Promedio	442,36	605,71	333,37	26,38	68,87
Desviación (S)	11,13	23,48	23,97	0,72	1,62



4.1.3. Normalizado 11min

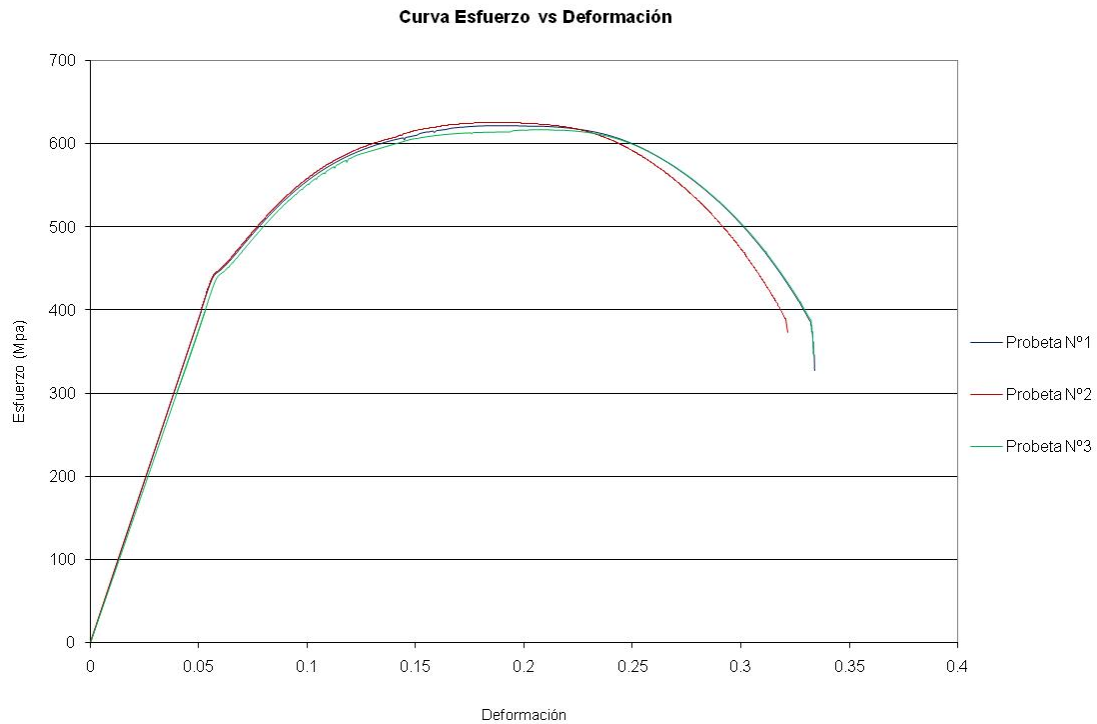


Figura N° 4.5. Curva Esfuerzo vs. Deformación para Normalizado 11min

En la siguiente tabla se muestra el resumen de las propiedades mecánicas de la Figura 4.2.

Tabla N° 4.2. Propiedades mecánicas de normalizado 11min

Muestra	Esfuerzo de Fluencia $\sigma_{y0.2\%}$ (MPa)	Esfuerzo Máximo σ_{max} (MPa)	Esfuerzo de Rotura σ_{rup} (MPa)	% Alargamiento a la Ruptura	% Reducción de Área
Probeta N°1	452,59	621,97	327,71	27,88	68,99
Probeta N°2	446,05	625,65	372,5	24,32	68,74
Probeta N°3	448,01	617,04	147,45	25,99	71,47
Promedio	449,32	621,55	282,55	26,07	69,73
Desviación (S)	3,36	4,32	119,13	1,78	1,51



4.1.4. Normalizado 13min

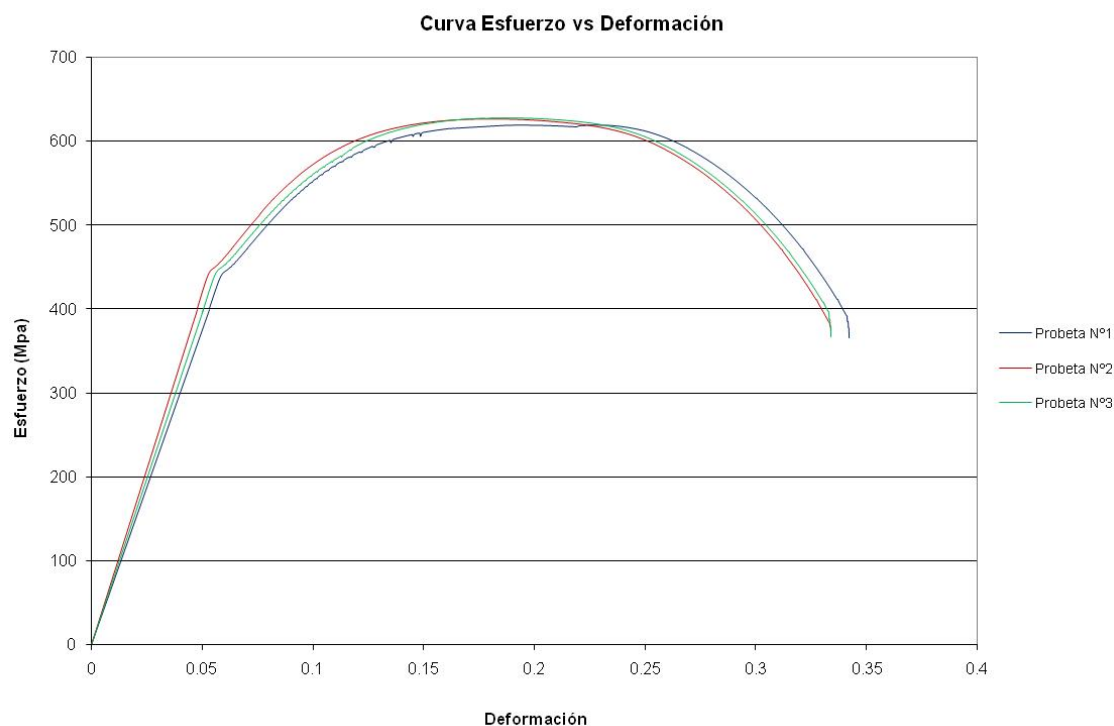


Figura N° 4.6. Curva Esfuerzo vs. Deformación para Normalizado 13min

En la siguiente tabla se muestra el resumen de las propiedades mecánicas de la Figura 4.3.

Tabla N° 4.3. Propiedades mecánicas de normalizado 13min

Muestra	Esfuerzo de Fluencia $\sigma_{y0.2\%}$ (MPa)	Esfuerzo Máximo σ_{max} (MPa)	Esfuerzo de Rotura σ_{rup} (MPa)	% Alargamiento a la Ruptura	% Reducción de Área
Probeta N°1	452,98	619,38	365,33	26,51	67,72
Probeta N°2	466,36	627,6	371,36	26,56	70,25
Probeta N°3	448,97	627,95	366,94	27,27	67,46
Promedio	442,36	605,71	333,37	26,38	68,87
Desviación (S)	9,11	4,85	3,12	0,43	1,54



4.1.5. Recocido 840°C

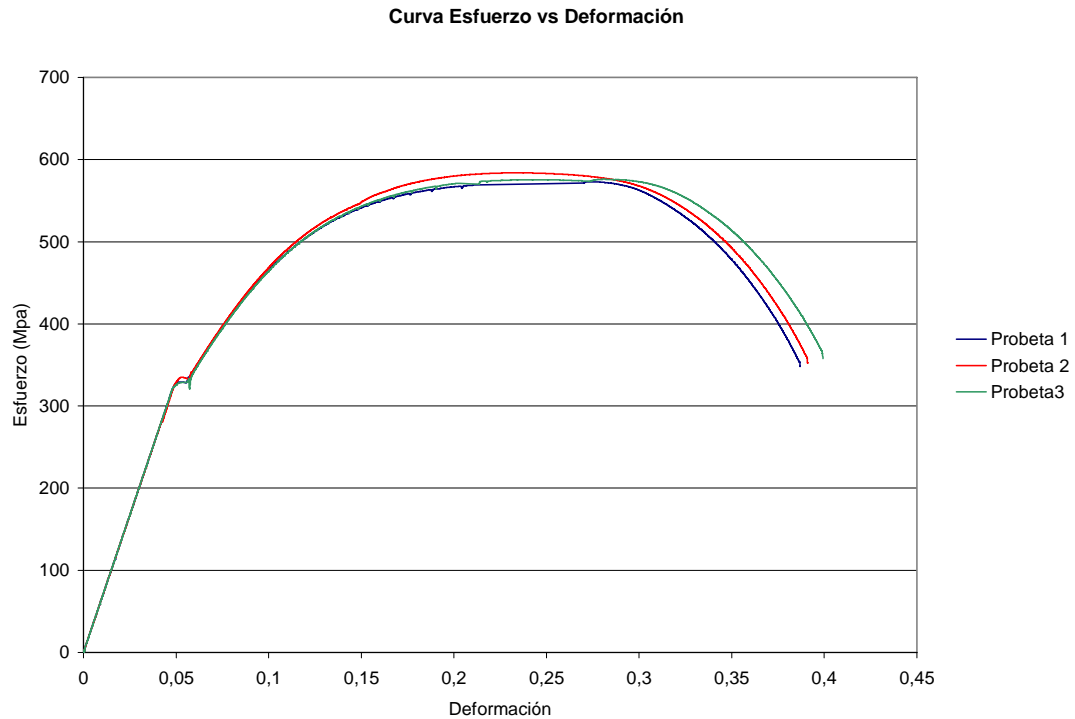


Figura N° 4.7. Curva Esfuerzo vs. Deformación para Recocido 840°C

En la siguiente tabla se muestra el resumen de las propiedades mecánicas de la Figura 4.4.

Tabla N° 4.4. Propiedades Mecánicas para Recocido 840°C

Muestra	Esfuerzo de Fluencia $\sigma_{y0.2\%}$ (MPa)	Esfuerzo Máximo σ_{max} (MPa)	Esfuerzo de Rotura σ_{rup} (MPa)	% Alargamiento a la Ruptura	% Reducción de Área
Probeta N°1	328,88	572,99	348,12	30,18	71,36
Probeta N°2	333,96	583,85	352,52	30,02	69
Probeta N°3	326,38	576,04	357,81	30,63	69
Promedio	442,36	605,71	333,37	26,38	68,87
Desviación (S)	3,86	5,60	4,85	0,32	1,36



4.1.6. Recocido 855°C

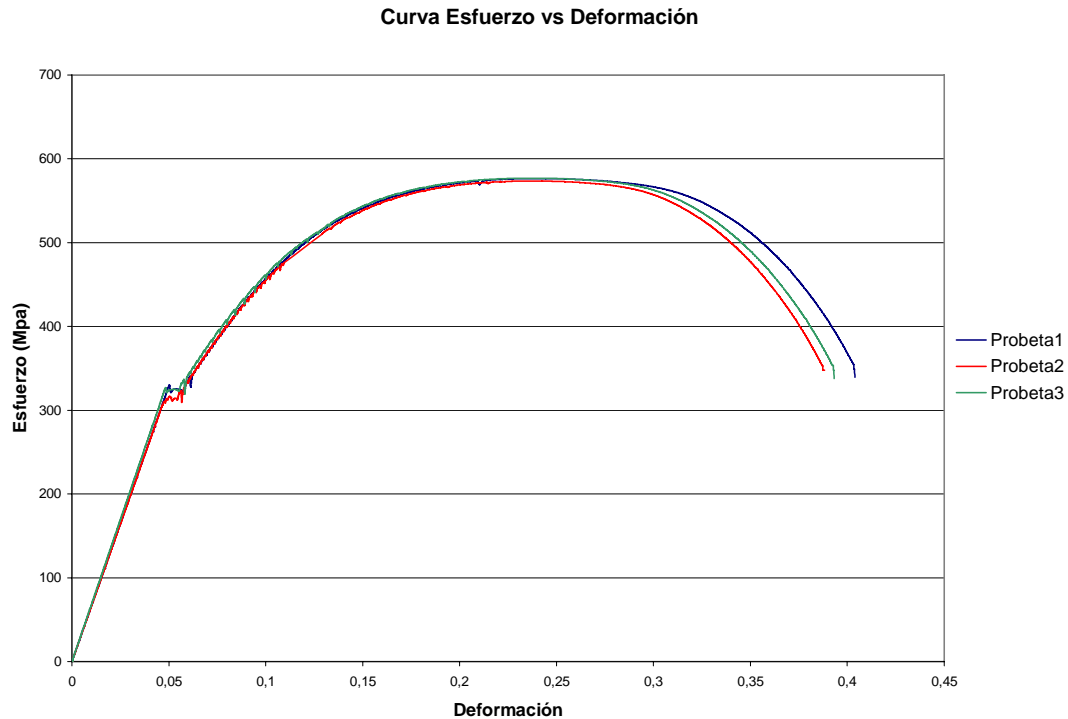


Figura N° 4.8. Curva Esfuerzo vs. Deformación para Recocido 855°C

En la siguiente tabla se muestra el resumen de las propiedades mecánicas de la Figura 4.5.

Tabla N° 4.5. Propiedades Mecánicas para Recocido 855°C

Muestra	Esfuerzo de Fluencia $\sigma_{y0.2\%}$ (MPa)	Esfuerzo Máximo σ_{max} (MPa)	Esfuerzo de Rotura σ_{rup} (MPa)	% Alargamiento a la Ruptura	% Reducción de Área
Probeta N°1	327,73	576,53	339,02	29,86	69,14
Probeta N°2	310,02	573,58	347,47	29,24	70,5
Probeta N°3	328,09	576,99	337,94	30,45	71,36
Promedio	442,36	605,71	333,37	26,38	68,87
Desviación (S)	10,33	1,85	5,22	0,61	1,12



4.1.7. Recocido 870°C

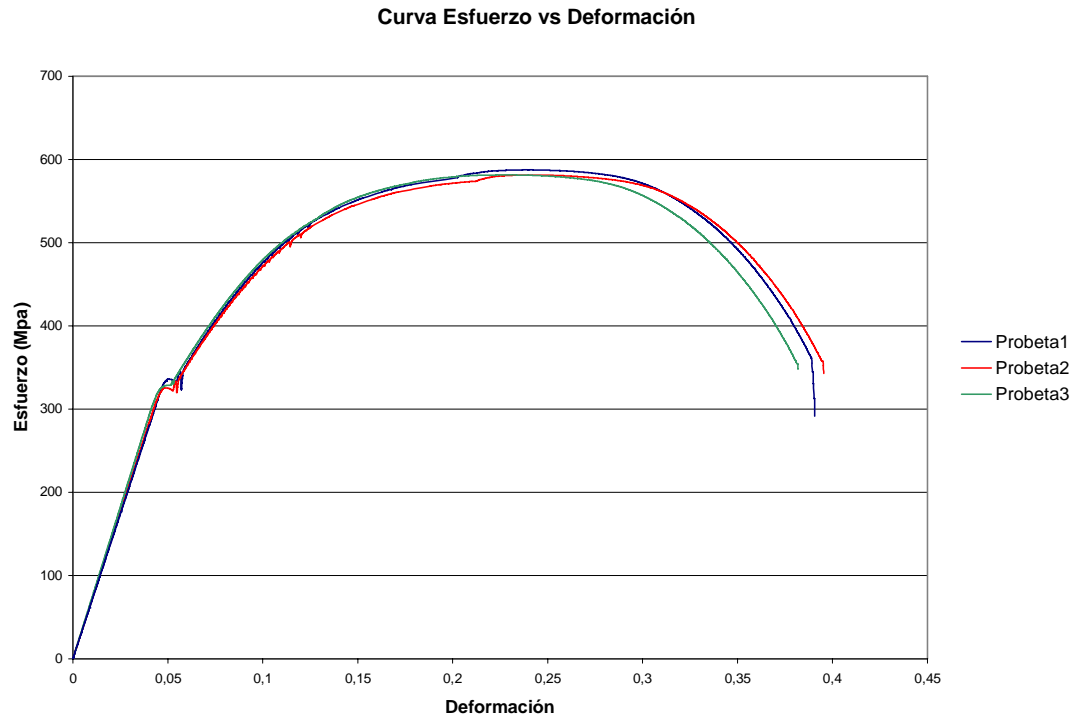


Figura N° 4.9. Curva Esfuerzo vs. Deformación para Recocido 870°C

En la siguiente tabla se muestra el resumen de las propiedades mecánicas de la Figura 4.6.

Tabla 4.6. Propiedades Mecánicas para Recocido 870°C

Muestra	Esfuerzo de Fluencia $\sigma_{y0.2\%}$ (MPa)	Esfuerzo Máximo σ_{max} (MPa)	Esfuerzo de Rotura σ_{rup} (MPa)	% Alargamiento a la Ruptura	% Reducción de Área
Probeta N°1	335,12	587,5	340,51	32,96	69
Probeta N°2	319,96	581,34	342,77	32,51	70,82
Probeta N°3	330,92	581,57	348,72	33,86	70,25
Promedio	442,36	605,71	333,37	26,38	68,87
Desviación (S)	7,83	3,49	4,24	0,69	0,93



Cuadro resumen de las propiedades mecánicas de las probetas ensayadas, a continuación en la Tabla N° 4.7.

Tabla N° 4.7. Promedio de las Propiedades Mecánicas de Tracción

Condición	Esf. de Fluencia (MPa)	Desv.Est. (S)	Esf.Máx. (MPa)	Desv.Est. (S)	Esf. de Rup. (MPa)	Desv.Est. (S)	% de Alarg.	Desv.Est. (S)	% de Red. de Área	Desv.Est. (S)
Cond. Original	683,42	6,22	686,06	6,64	429,4	20,14	16,08	0,4	63,87	0,25
Normalizado a 9 min	442,36	11,13	605,71	23,48	333,37	23,97	26,38	0,72	68,87	1,62
Normalizado a 11 min	449,32	3,36	621,55	4,32	282,55	119,13	26,07	1,78	69,73	1,51
Normalizado a 13 min	456,1	9,11	624,98	4,85	367,88	3,12	26,78	0,43	68,47	1,54
Recocido a 840 °C	329,74	3,86	577,62	5,6	352,81	4,85	30,27	0,32	69,78	1,36
Recocido a 855 °C	321,94	10,33	575,7	1,85	341,47	5,22	29,85	0,61	70,33	1,12
Recocido a 870 °C	328,66	7,83	583,47	3,49	344	4,24	33,11	0,69	70,02	0,93



4.1.8. Metalografía del material

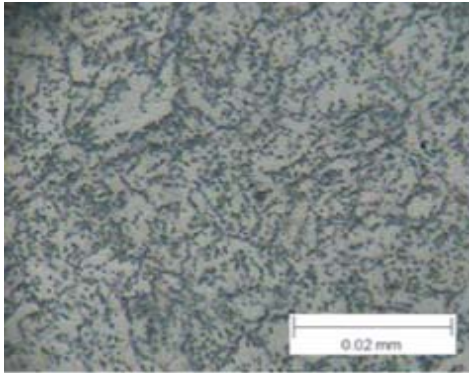


Figura N° 4.10. Fotomicrografía de la Condición Original a 1000X

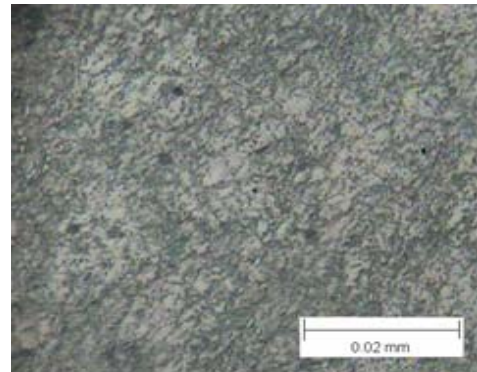


Figura N° 4.11. Fotomicrografía del Normalizado 9min a 1000X

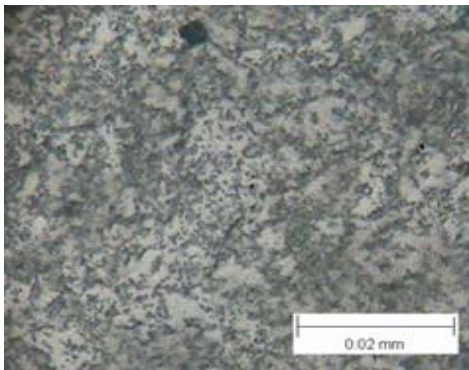


Figura N° 4.12. Fotomicrografía del Normalizado 11min a 1000X

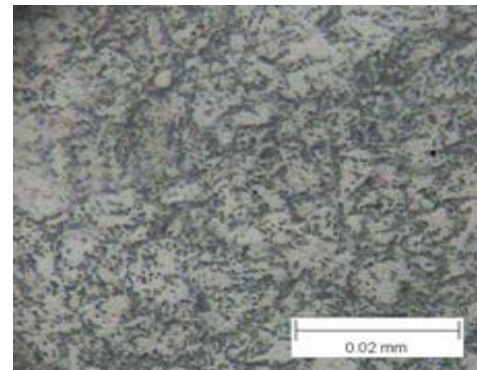


Figura N° 4.13. Fotomicrografía del Normalizado 13min a 1000X

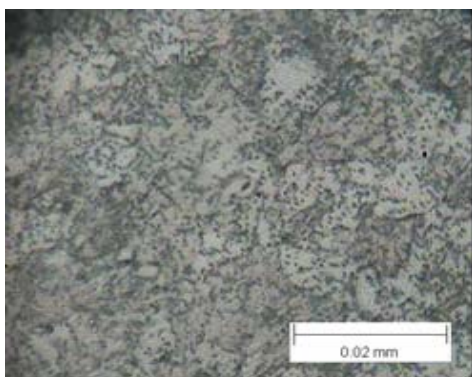


Figura N° 4.14. Fotomicrografía de Recocido 840 °C a 1000X

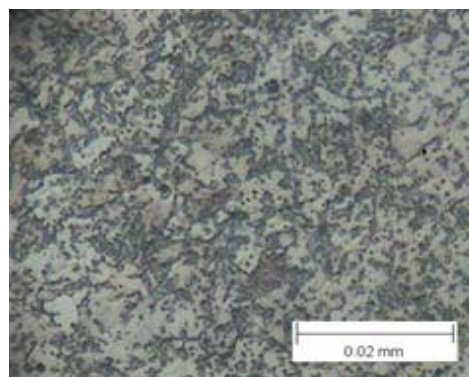


Figura N° 4.15. Fotomicrografía de Recocido 855 °C a 1000X

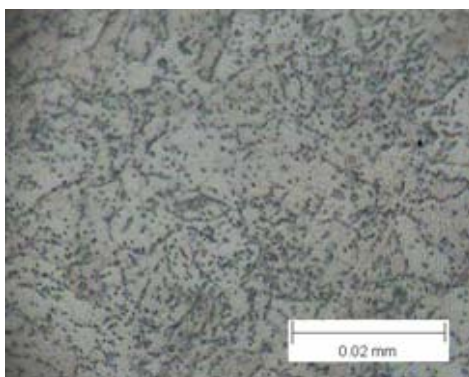


Figura N° 4.16. Fotomicrografía de Recocido 870 °C a 1000X



4.1.8.1. Análisis de las fotomicrografías del material

En la metalografía del material se observa cómo en su condición original existe una microestructura compuesta por ferrita y perlita, con una presencia significativa de perlita. Para esta condición se observa que el material no es templado, ya que su microestructura no está formada por martensita, además el comportamiento que se observa en la gráfica de tracción (Figura N° 4.3) indica que el mismo tiene una zona plástica, la cual es contraria al comportamiento de un material templado. Cuando se aplica el tratamiento térmico de normalizado el material presenta un incremento en la presencia de ferrita y una distribución menos uniforme de la perlita, presentándose la microestructura de una manera más expandida a diferencia de cómo se presenta en la condición original. Esto se observa en las figuras N° 4.11, 4.12 y 4.13 donde la distribución de ferrita es mayor a diferencia de la figura N° 4.10 referente a la condición original donde se observan agrupaciones más pequeñas. Sin embargo como se observa en las figuras antes mencionadas la microestructura del normalizado no tuvo un cambio de fase. Ya que el material originalmente no era templado, se esperaba del tratamiento térmico de normalizado un incremento de la resistencia del material, contrario al comportamiento obtenido en esta investigación. Este es debido al hecho que tanto la temperatura seleccionada como los tiempos de permanencia dentro del horno no fueron los suficientes para que el material al enfriarse lograra una refinación de los granos.

Para las probetas tratadas térmicamente por recocido, la microestructura del material no presentó un cambio de fase al igual que en el normalizado, y según lo mostrado en las figuras N° 4.14, 4.15 y 4.16 estas presentan agrupaciones de mayor tamaño con respecto al estado original, observándose mayor presencia de ferrita e indicando que el material disminuyó su resistencia incrementando por ende su ductilidad con respecto a la condición original.



4.1.9. Resistencia Mecánica y Dúctilidad del Material

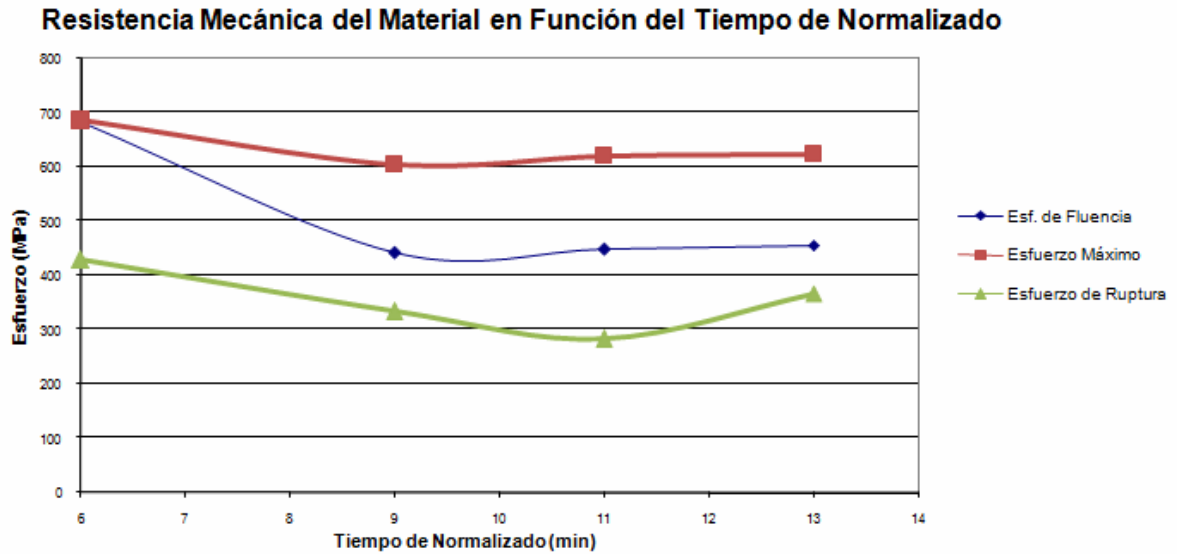


Figura 4.17. Curva Esfuerzos vs. Tiempo de Normalizado

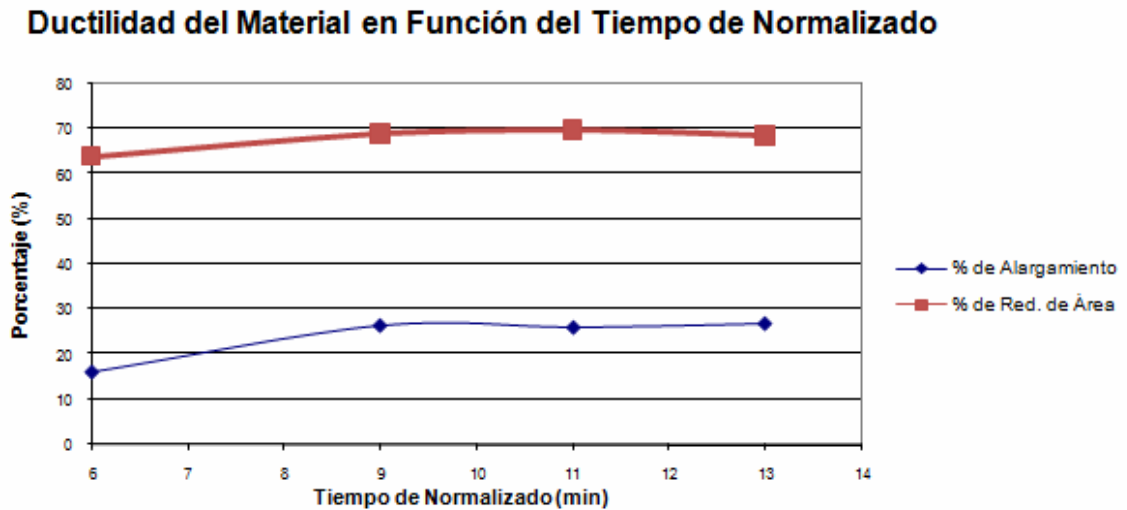


Figura 4.18. Curvas de % de reducción de área y % de alargamiento vs. Tiempo de Normalizado



4.1.9.1. Análisis de la Ductilidad y Resistencia Mecánica para las Probetas Tratadas con Normalizado

En la Figura N° 4.17 se observa que la resistencia mecánica disminuyó, con respecto a la condición original. El esfuerzo que más variación presentó fue el de fluencia, presentando una disminución considerable de 683,42 MPa a un valor promedio entre los tiempos de 9min, 11min y 13 min de 449,26 MPa; en comparación al esfuerzo máximo y al de ruptura. Por otra parte al analizar los resultados de la ductilidad medida a través del % de reducción de área y el % de alargamiento estos valores fueron superiores al de la condición original, indicando esto un aumento en la ductilidad del material. Para este caso se observa que el comportamiento de las propiedades para las condiciones ensayadas son muy similares, para el normalizado la diferencia de los tiempos no fue tan significativo en el resultado obtenido, lo que indica que es necesario experimentar con que tengan mayores diferencias entre ellos para poder observar diferencias en el comportamiento de las propiedades mecánicas del material. Por ende estos resultados se obtuvieron ya que la temperatura y el tiempo de normalizado no fueron suficientes para lograr la refinación de los granos, ocasionando por el contrario un alivio de tensiones.



Resistencia Mecánica del Material en Función de la Temperatura de Recocido

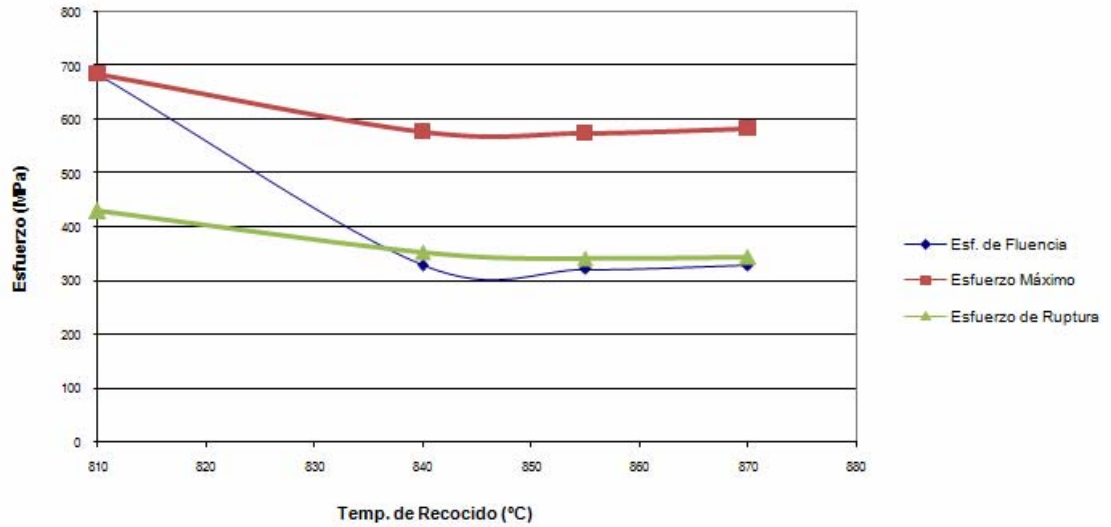


Figura 4.19. Curva Esfuerzos vs. Temperatura de Recocido

Ductilidad del Material en Función de la Temperatura de Recocido

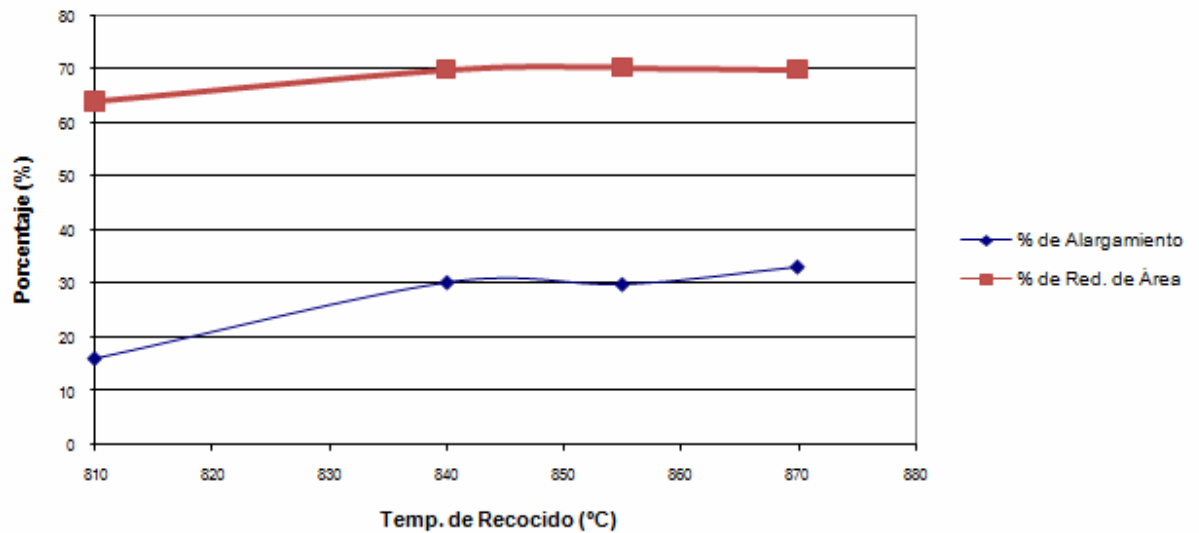


Figura 4.20. Curvas de % de red. De área y % de alargamiento vs. Temperaturas de Recocido



4.1.9.2. Análisis de la Ductilidad y Resistencia Mecánica para las Probetas Tratadas con Recocido

En las gráficas de resistencia del material (Figura N° 4.19) se observa cómo el comportamiento de todas las curvas tiende a disminuir con respecto a la condición original y las gráficas de ductilidad (Figura N° 4.20) para el tratamiento térmico de recocido, el comportamiento es inverso, aumentando con respecto a la condición original. Esto indica que para ambos tratamientos térmicos el material disminuyó su resistencia e incrementó su ductilidad, obteniendo así el resultado esperado por el tratamiento aplicado. Para ambas propiedades mecánicas se observa como la diferencia de temperatura elegida no es relevante con respecto al resultado obtenido, ya que para todos los ensayos los valores de cada propiedad fueron muy similares.



4.1.10. Superficies de Fractura de las Probetas ensayadas a Tracción

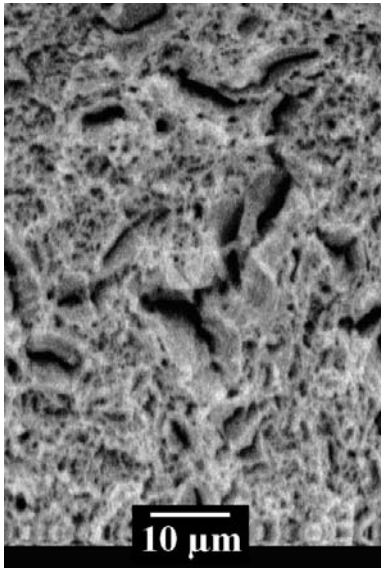


Figura. N° 4.21. Condición Original a 2000x

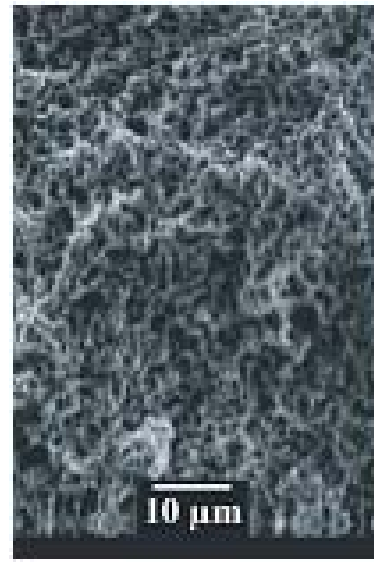


Figura. N° 4.22. Normalizado 9 min a 2000x

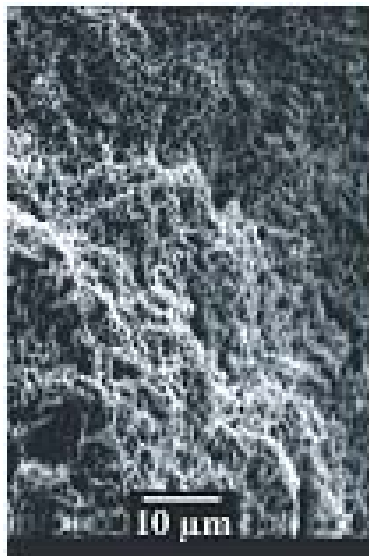


Figura. N° 4.23. Normalizado 11 min a 2000x



Figura. N° 4.24. Normalizado 13 min a 3500x



Figura. N° 4.25. Recocido 840 °C a 2000x

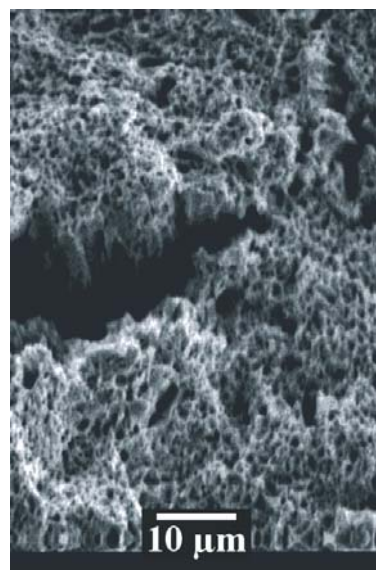


Figura. N° 4.26. Recocido 855 °C a 1500x

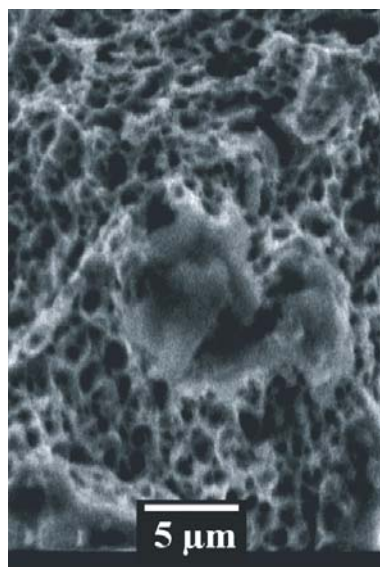


Figura. N° 4.27. Recocido a 870 °C a 3500x



De las Superficies de fractura de las probetas ensayadas a tracción se puede apreciar que:

- En la Figura N° 4.21, Se observan en la superficie del material gran cantidad de cavidades y hoyuelos, típicas de un mecanismo de fractura dúctil.
- En la Figura N° 4.22, En la Superficie se observan cavidades y micro hoyuelos, característicos de un mecanismo de fractura dúctil.
- En la Figura N° 4.23, Se observan micro hoyuelos y cavidades semejante a una superficie porosa, comunes en un material dúctil.
- En la Figura N° 4.24, Se observan pequeños hoyuelos y grietas del material, característicos de un mecanismo de fractura dúctil.
- En la Figura N° 4.25, En la imagen se observa una gran cavidad con incrustaciones, se observa hoyuelos en la superficie, característicos de un mecanismo de fractura dúctil.
- En la Figura N° 4.26, Se observa una superficie con bastantes hoyuelos y cavidades, característicos de un mecanismo de fractura dúctil.
- En la Figura N° 4.27, Se observan grandes cavidades, y gran cantidad de hoyuelos, típicos de un mecanismo de fractura dúctil.



De las imágenes obtenidas de la superficie de fractura para las probetas ensayadas a tracción, se observa que todas presentaron un mecanismo de fractura dúctil, ya que en todas se observan hoyuelos y cavidades que son típicas para este tipo de comportamiento.

4.1.11. Superficies Macro-Micro de las probetas de Tracción

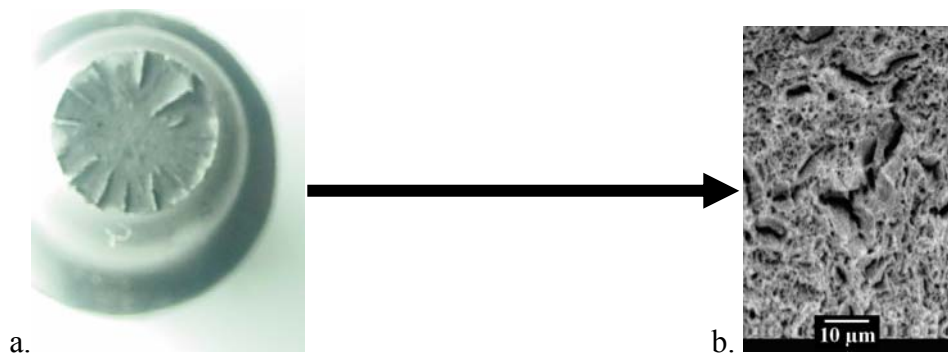


Figura. N° 4.28. Condición original: a) Imagen Macro b) Imagen Micro

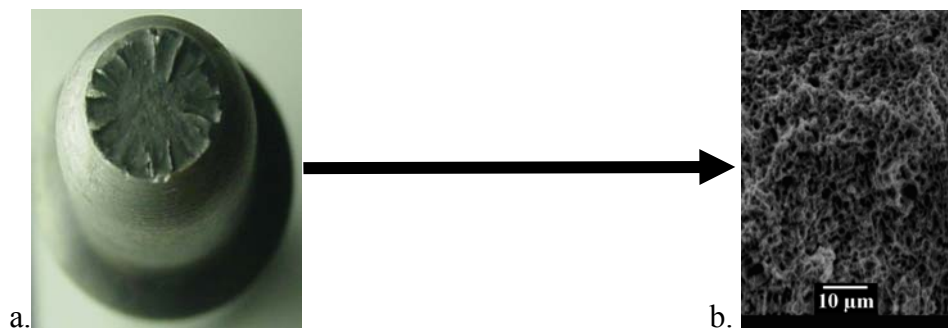


Figura. N° 4.29. Normalizado 9 min: a) Imagen Macro b) Imagen Micro

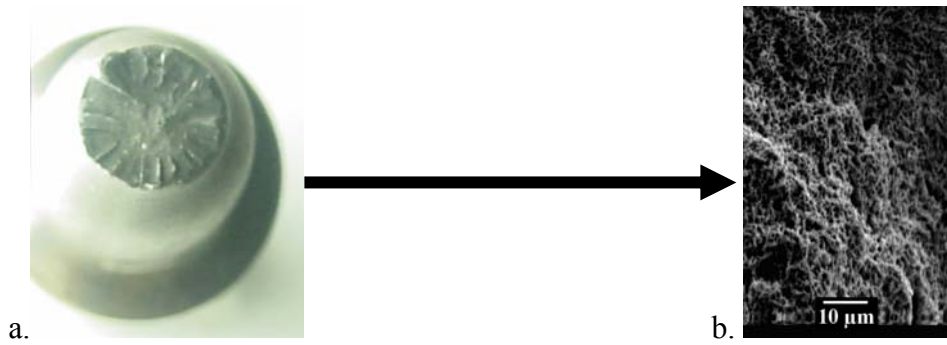


Figura. N° 4.3. Normalizado 11 min a) Imagen Macro b) Imagen Micro

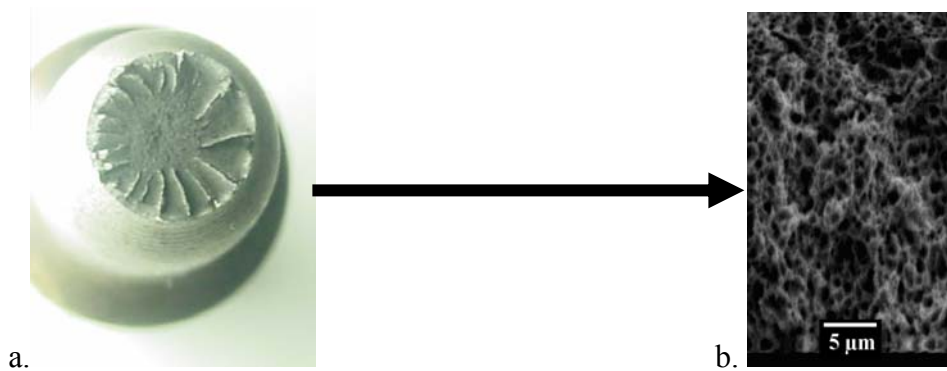


Figura. N° 4.31. Normalizado 13 min a) Imagen Macro b) Imagen Micro

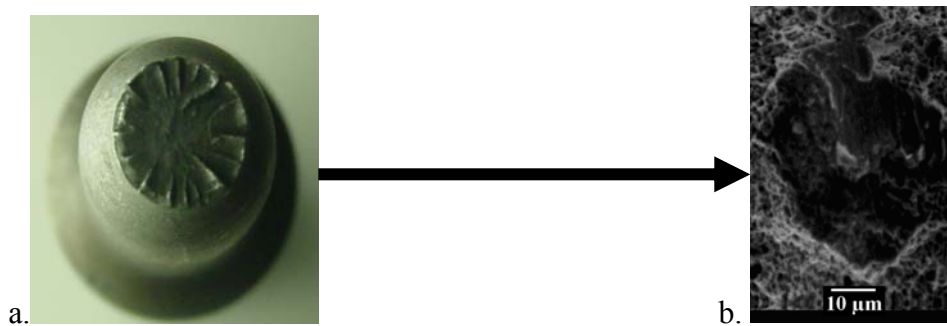


Figura. N° 4.32. Recocido a 840 °C a) Imagen Macro b) Imagen Micro

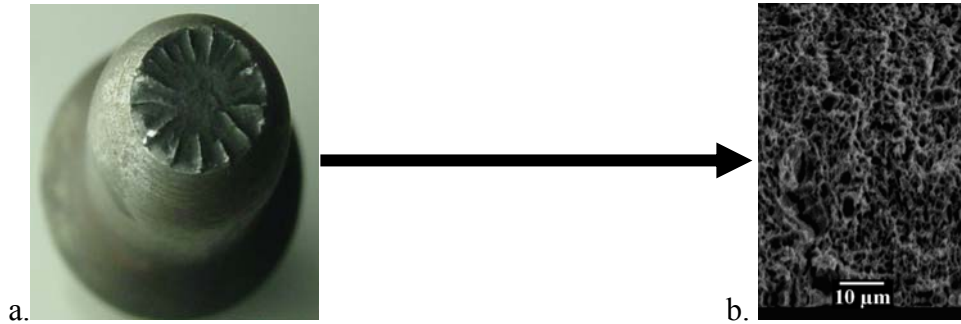


Figura. N° 4.33. Recocido a 855 °C a) Imagen Macro b) Imagen Micro

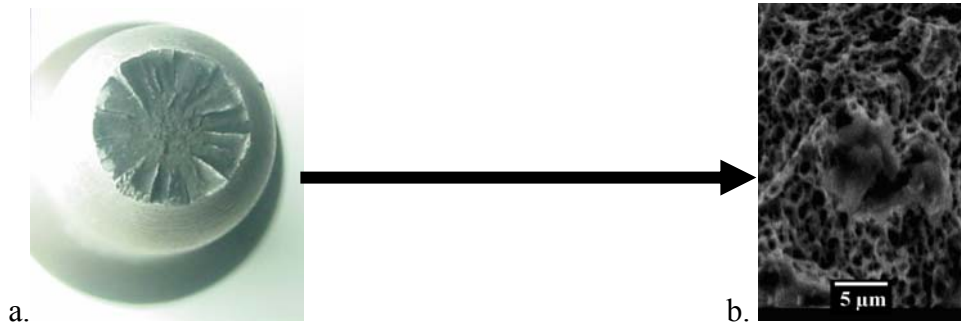


Figura. N° 4.34. Recocido a 870 °C a) Imagen Macro b) Imagen Micro

4.1.11.1. Análisis de las Imágenes Macro y Micro para las Probetas Ensayadas a Tracción

En las probetas ensayadas por tracción se observa que el material en su condición original presenta un mecanismo de fractura dúctil, ya que se observa en la imagen macro la formación de un cuello de fractura, de igual manera en la imagen micro de la superficie de fractura se observa la presencia de cavidades y de hoyuelos, la cual sólo se encuentran en materiales dúctiles.



Al observar el resto de las imágenes macro y micro pertenecientes a los tratamientos de normalizado y de recocido, se aprecia que todas presentan un mecanismo de fractura dúctil y en las imágenes de la microscopia electrónica de barrido (MEB) la superficie de fractura se encuentran hoyuelos, cavidades y dimples. Al observar las imágenes de recocido, se aprecia que las cavidades y hoyuelos presentan un tamaño mayor con respecto a la condición original, indicando esto que el recocido ocasionó un ablandamiento del material incrementando la ductilidad y tenacidad del mismo.



4.2. Ensayo de Impacto

A través del ensayo de impacto (Charpy con entalla en V), se obtuvo la energía absorbida por impacto (CVN). Los valores obtenidos originalmente vienen dados en kilopondio-metros (Kpm) por ser la escala correspondiente del equipo.

A continuación se muestran los valores obtenidos durante los ensayos por cada condición, de las probetas ensayadas se obtiene el valor promedio, tal como se muestra en la Tabla N° 4.8.

Tabla N° 4.8. Promedio de los Valores del Ensayo de Impacto

Probetas	Condición Original	Normalizado 9 min.	Normalizado 11 min.	Normalizado 13 min.	Recocido 840 °C	Recocido 855 °C	Recocido 870 °C
	kpm	kpm	Kpm	Kpm	kpm	kpm	kpm
1	1,5	11,4	3,2	12,8	8,1	14	14,75
2	0,7	11,9	12,1	12,6	11,3	13,3	12,4
3	1,5	14,8	11,2	13	14,2	11,6	14,8
4	0,7	2,9	14,8	10,6	14,8	14,9	14,9
5	1,4	14,85	13,8	11,2	13,1	10,5	9,9
Promedio	1,46	13,85	12,36	12,2	14,03	14,06	14,81
Desv. Est (S)	0,40	4,51	4,14	0,96	2,52	1,67	2,05

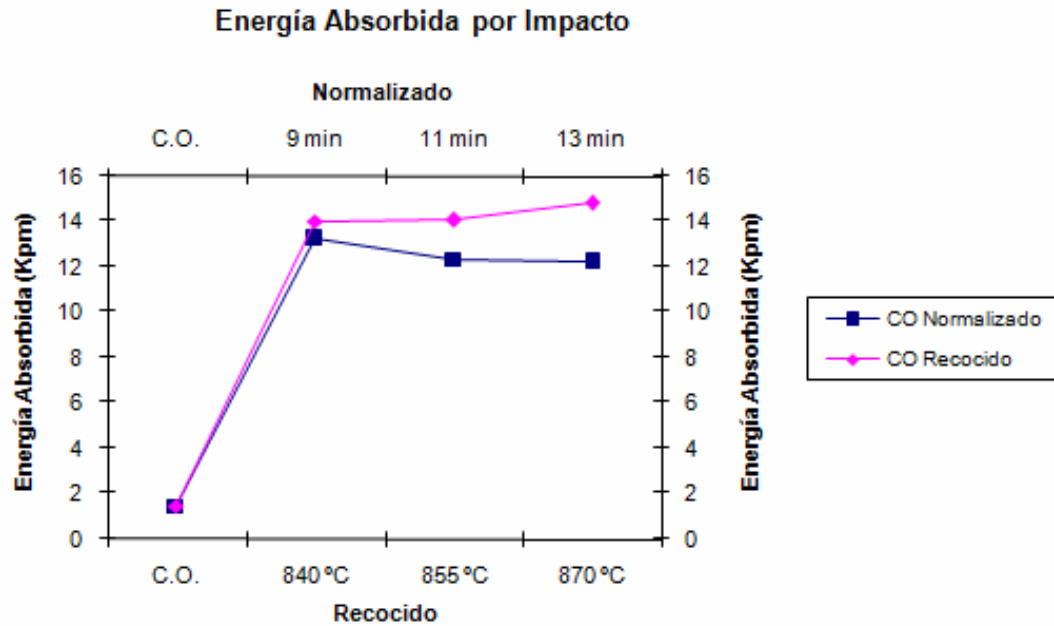


Figura. N° 4.35 Energía Absorbida por Impacto en Función del Tratamiento Térmico

De los resultados obtenidos en el ensayo de impacto, se observa que el material al ser tratado térmicamente tanto con normalizado como con recocido (Figura N° 4.35), permite que la capacidad de absorción de energía aumente en al menos un 89,5% con respecto a la condición original. Este resultado no era el esperado para el caso del normalizado, ya que con este se buscaba incrementar su resistencia y por ende disminuir su tenacidad. Sin embargo se puede apreciar que a medida que el tiempo del normalizado aumenta la curva tiende a decaer, lo que podría significar que si se hubiesen dejado por más tiempo las probetas en el horno estas habrían logrado el comportamiento teórico. Para el caso del recocido a parte de aumentar su tenacidad con respecto a la condición original, esta tiende a aumentar a medida que la temperatura de recocido aumenta. En resumen la capacidad de absorción de energía del material cuando es sometido a tratamiento térmico de



recocido a parte de ser mayor en comparación con la condición original y el normalizado, mejora con el aumento de la temperatura.

4.2.1 Factor de Intensidad de Esfuerzo Crítico (K_{IC})

Luego de haber realizado el cálculo de CVN promedio para cada condición de ensayo, se utilizó la ecuación empírica de Barson-Rolfe^[6] (1990), para determinar el factor de intensidad de esfuerzo crítico (K_{IC}). El esfuerzo de fluencia del material (σ_y) es obtenido a través del ensayo de tracción.

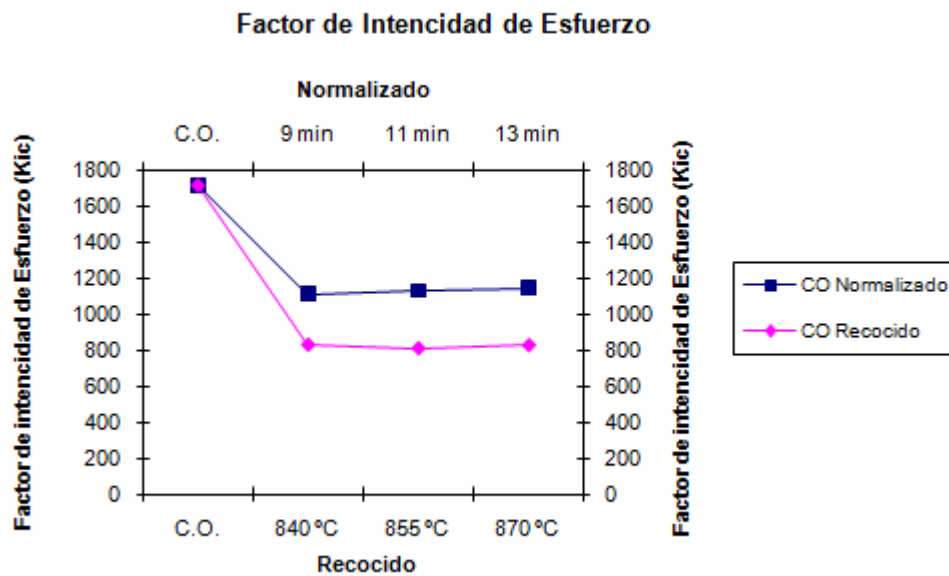


Figura N° 4.36 Factor de Intensidad de Esfuerzo vs. Tratamiento Térmico

De los valores obtenidos en la determinación del K_{IC} del material, se observa como al aplicar tratamientos térmicos de recocido y de normalizado, el comportamiento del material para cada condición es similar tal como se muestra en la



Figura. N° 4.36, donde la curva generada con los valores de ambas condiciones se encuentra por debajo al valor dado por la condición original. El comportamiento de estos valores debe coincidir con los obtenidos para el esfuerzo de fluencia, ya que el K_{IC} depende directamente de este último, permitiendo así que la tendencia de las curvas sean similares. Para el tratamiento térmico de normalizado, este resultado es contrario al teórico, ya que si el material hubiese endurecido tal como se esperaba, los valores de fluencia y del K_{IC} hubiesen dado contrarios a lo obtenidos en los ensayos realizados. Sin embargo con las tres condiciones estudiadas se genera una tendencia creciente en la curva, lo que nos puede indicar que los tiempos seleccionados para la realización del tratamiento son pequeños, y posiblemente no permitieron que el material refinara los granos, lo que podría significar que si se hubiese dejado por más tiempo las probetas en el horno, hubiésemos logrado el resultado esperado.

Los valores promedios obtenidos en cada condición de ensayo se muestran a continuación.

Tabla N° 4.9. Valores de los Promedios obtenidos de la Energía Absorbida por Impacto y cálculo del K_{IC} por cada una de las condiciones

Condición	kpm	N*m	Lbf*Ft	σ_y (MPa)	K_{IC} (MPa* \sqrt{m})
Cond. Original	1,46	14,39	10,61	683,40	55,30
Recocido a 840 °C	14,03	137,70	101,50	329,70	26,22
Recocido a 855 °C	14,07	138,00	101,80	321,90	25,50
Recocido a 870 °C	14,82	145,40	107,20	328,70	26,13
Normalizado a 9 min	13,24	129,90	95,78	442,40	35,10
Normalizado a 11 min	12,37	121,30	89,48	449,30	35,62
Normalizado a 13 min	12,20	119,70	88,27	456,10	36,15



Comparación del Factor de Intensidad de Esfuerzo vs Energía Absorbida por Impacto

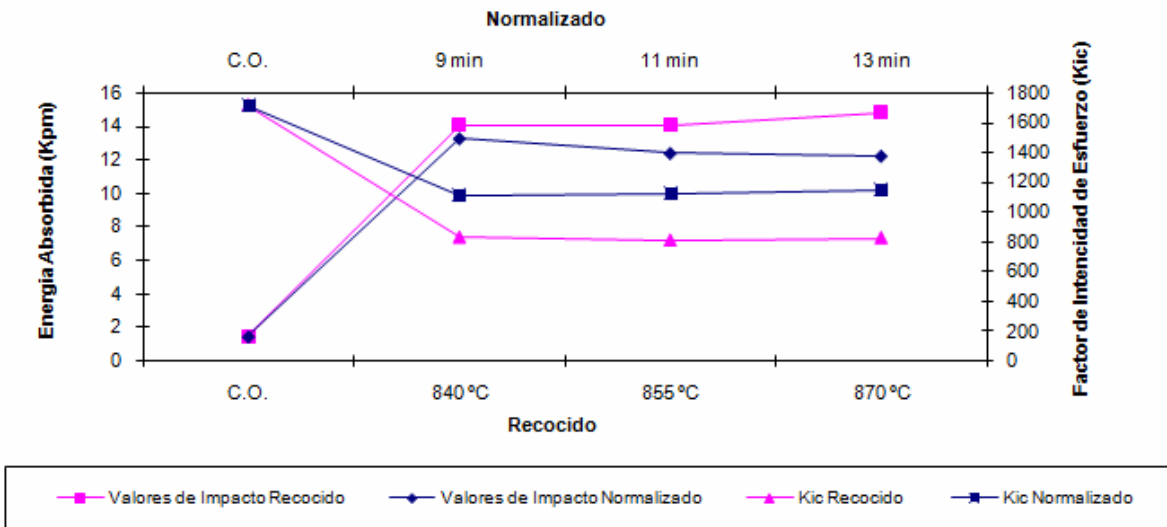


Figura N° 4.37 Gráfica Comparativa entre el Factor de Intensidad de Esfuerzo Crítico (K_{IC}) y la Energía Absorbida por Impacto (CVN)

A continuación se muestran las superficies de fractura para las probetas de impacto según el tipo de tratamiento térmico aplicado. En estas se observa como el material en su estado original presenta facetas de clivaje indicando que el mecanismo de fractura del material es frágil. En las imágenes de la superficie de fractura de las probetas de normalizado se observan hoyuelos y cavidades que indican que el material es dúctil. En cambio para la superficie de las probetas de recocido la presencia de hoyuelos y cavidades demuestran que el tratamiento dio los resultados esperados, aliviando las tensiones del material y haciendo que el mismo sea más tenaz.



4.2.2. Superficies de Fractura por Microscopía Electrónica de Barrido para las probetas ensayadas por Impacto

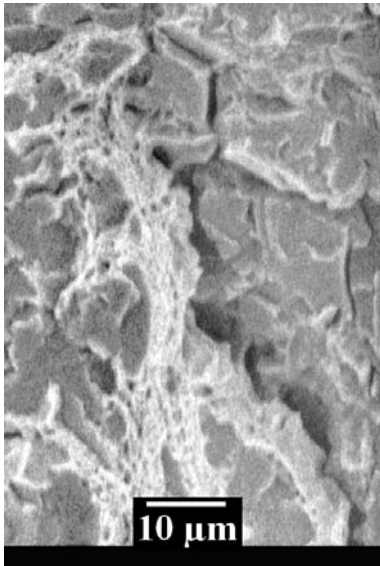


Figura. N° 4.38. Condición Original a 2000x

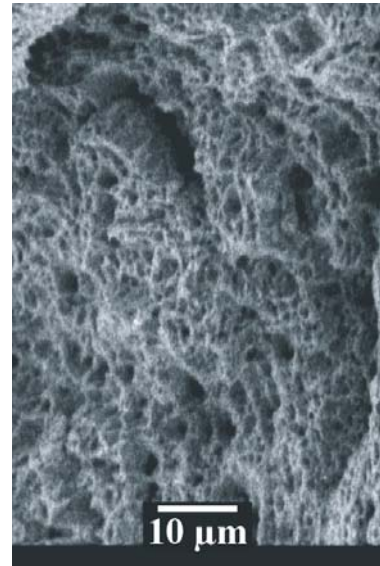


Figura. N° 4.39. Normalizado 9 min a 1500x

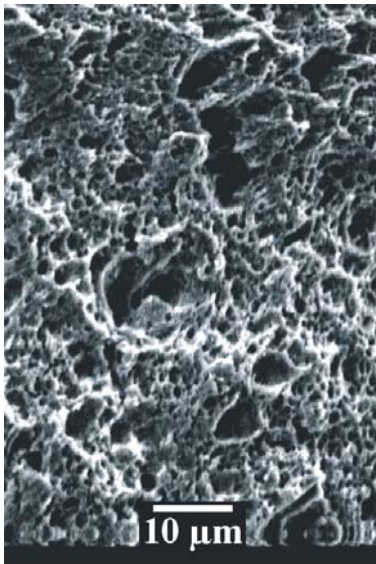


Figura. N° 4.4. Normalizado 11 min a 1500x

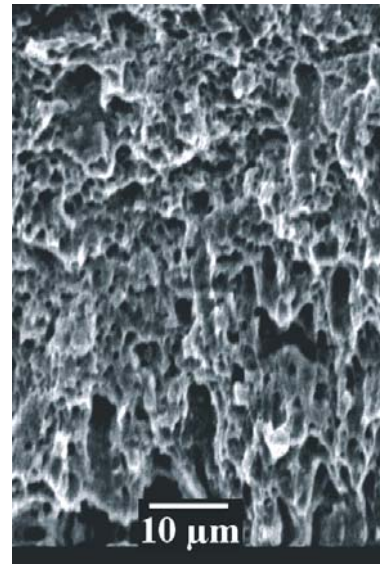


Figura. N° 4.41. Normalizado 13 min a 2000x

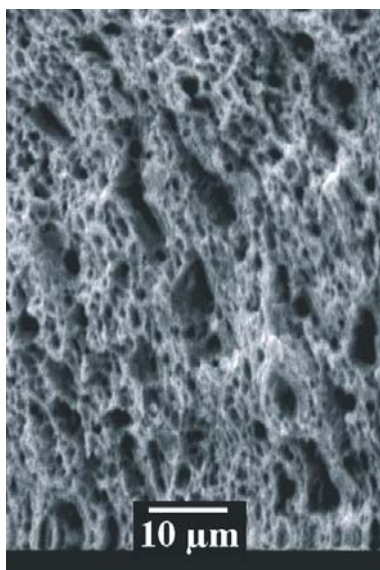


Figura. N° 4.42. Recocido 840 °C a 2000x

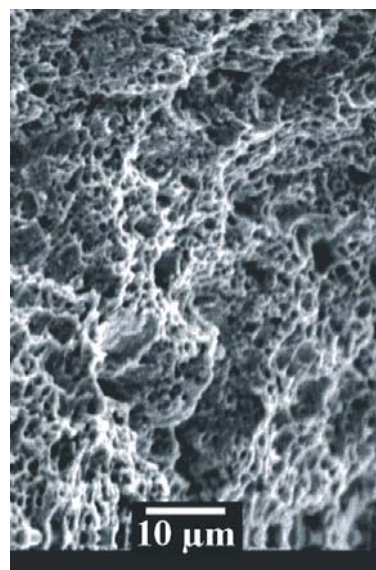


Figura. N° 4.43. Recocido 855 °C a 1500x

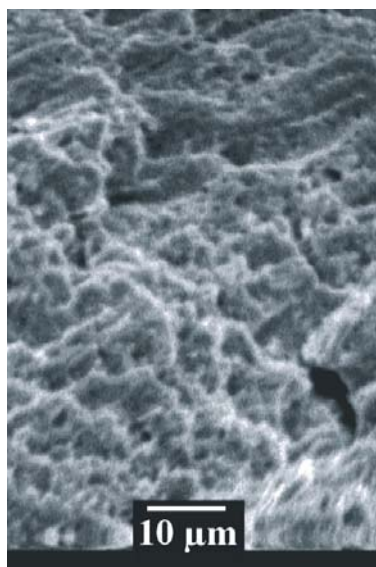


Figura. N° 4.44. Recocido 870 °C a 2000x



De las superficies de Fractura por Microscopía Electrónica de Barrido para las probetas ensayadas por Impacto se puede apreciar que:

- En la Figura N° 4.38, Se observan ramificaciones y la superficie presenta facetas de clivaje, hay presencia de grietas, típicas de un mecanismo de fractura frágil.
- En la Figura N° 4.39, Se observan ramificaciones y ciertas cavidades, características de fractura dúctil.
- En la Figura N° 4.4, Se observan cavidades y hoyuelos, características de fractura dúctil.
- En la Figura N° 4.41, Se observan cavidades, características de fractura dúctil.
- En la Figura N° 4.42, Se observan cavidades y hoyuelos, características de fractura dúctil.
- En la Figura N° 4.43, Se observar ciertas ramificaciones y cavidades, con hoyuelos, características de fractura dúctil.
- En la Figura N° 4.44, Se observan cavidades, características de fractura dúctil.

En las imágenes de las superficies de fractura para las probetas ensayadas por impacto, se observa como el material para su condición original presentó un comportamiento frágil, ya que en la misma se observan facetas de clivaje que indican este tipo de comportamiento. Para el resto de las probetas ensayadas el comportamiento fue dúctil, ya que predominan las cavidades y hoyuelos en la superficie de fractura.



4.2.3. Superficies Macro-Micro de las Probetas de Impacto

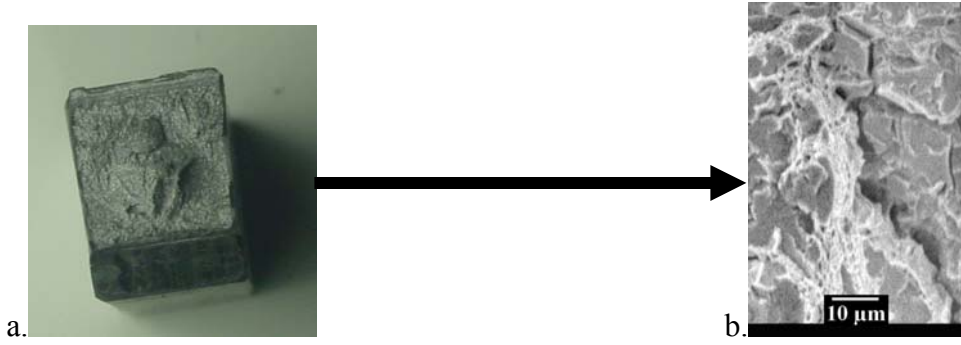


Figura. N° 4.45. Condición original: a) Imagen Macro b) Imagen Micro

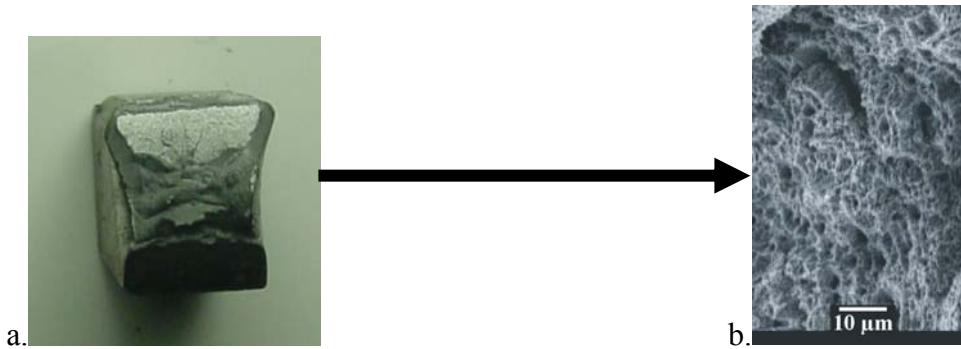


Figura. N° 4.46. Normalizado 9 min: a) Imagen Macro b) Imagen Micro

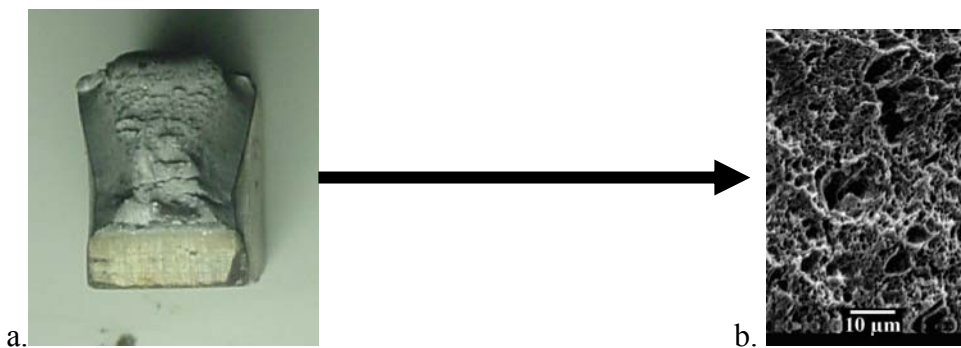


Figura. N° 4.47. Normalizado 11 min a) Imagen Macro b) Imagen Micro

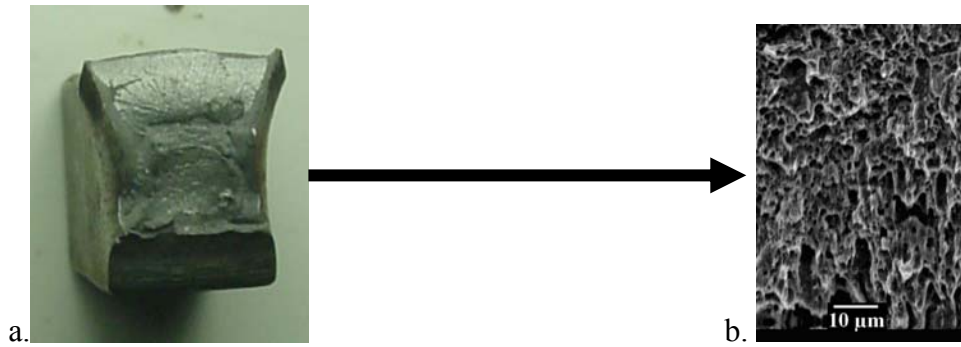


Figura. N°4.48. Normalizado 13 min a) Imagen Macro b) Imagen Micro

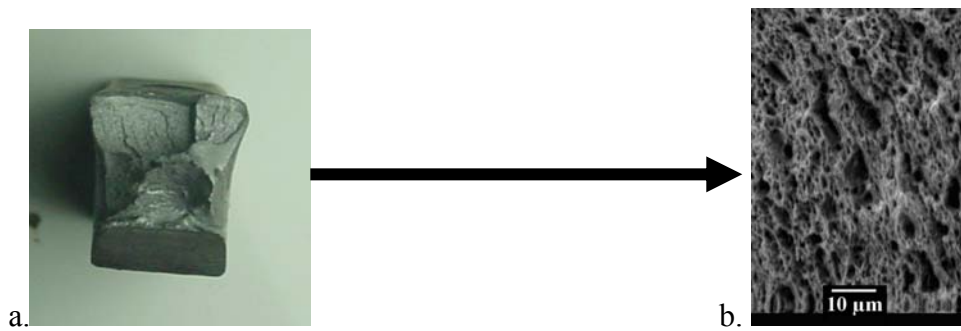


Figura. N° 4.49. Recocido a 840 °C a) Imagen Macro b) Imagen Micro

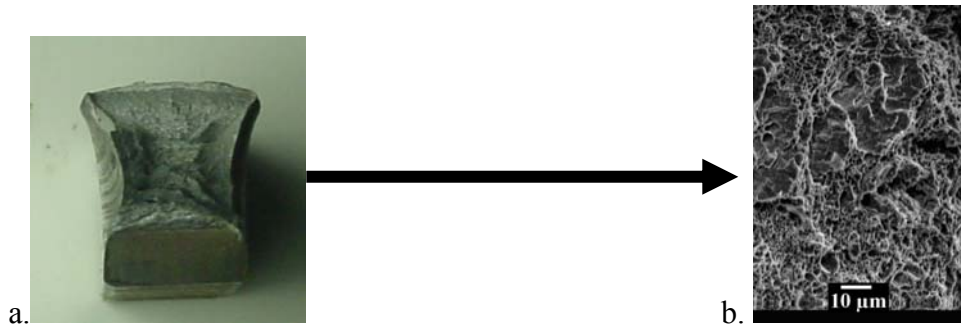


Figura. N° 4.50. Recocido a 855 °C a) Imagen Macro b) Imagen Micro

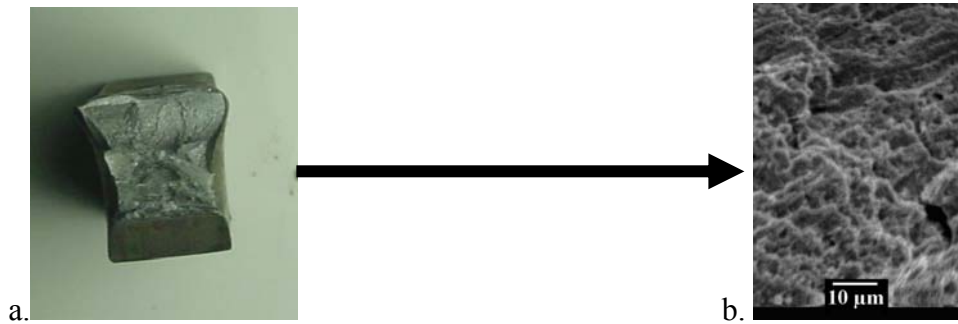


Figura. N° 4.51. Recocido a 870 °C a) Imagen Macro b) Imagen Micro

4.2.3.1. Análisis de las Imágenes Macro y Micro para las Probetas Ensayadas por Impacto

En las imágenes de las probetas de impacto se observa como en la condición original el mecanismo de fractura del material fue frágil. Esto se aprecia en la imagen macro donde la superficie de fractura es lisa, sin rebabas dejadas por la ruptura, y así mismo en la imagen micro se observa como la superficie de fractura presenta clivajes y ramificaciones típicas del comportamiento de un material frágil.

Para el resto de las imágenes se observa que el mecanismo de fractura del material fue dúctil, esto se aprecia en las fotos macros donde se observa que el material fluyó al fracturarse dejando labios de corte en la superficie. De igual manera las fotos micro de la superficie de fractura muestran como estas en su mayoría presentan hoyuelos y cavidades motivado precisamente a su comportamiento dúctil. Para el caso de las probetas de normalizado todas presentaron este tipo de comportamiento indicando que la resistencia mecánica del material luego de este tratamiento disminuyó incrementando su ductilidad. Este comportamiento del material es similar al del obtenido por el tratamiento térmico de recocido, donde para cada una de las temperaturas disminuyó la resistencia e incrementó la ductilidad.



4.3. Ensayos de Dureza

Se utilizaron las probetas para impacto, tomando una por cada tratamiento térmico. Utilizando el durometro digital marca MACROMET modelo 5100T se realizaron 10 indentaciones por probeta, con una carga de 100Kg obteniendo los siguientes resultados:

Tabla N° 4.10. Ensayos de Dureza

Bola de Acero, Dureza Rockwell B, (P=100Kg)							
	Condición Original	Recocido			Normalizado a 800 °C		
		840 °C	855 °C	870 °C	9 min.	11 min.	13 min.
1	97,7	84,40	84,30	83,60	90,70	90,90	91,20
2	98,00	84,00	84,90	84,50	91,50	91,70	91,60
3	97,90	84,20	85,10	83,90	91,50	90,50	92,20
4	98,60	84,00	85,80	84,00	91,80	91,80	91,50
5	98,30	84,70	85,30	84,50	92,10	91,30	91,40
6	98,50	84,80	85,50	84,80	91,20	91,30	91,90
7	97,90	85,60	85,30	84,60	91,10	91,60	92,00
8	98,20	84,60	85,10	84,80	91,50	91,40	92,30
9	98,20	85,00	85,10	85,70	92,10	91,80	91,60
10	98,20	84,20	84,70	83,70	91,80	91,30	92,10

A continuación se muestra la Tabla N° 4.11. con los promedios de los resultados obtenidos para cada condición de estudio.

Tabla N° 4.11. Promedio de los Resultados del Ensayos de Dureza

	Condición Original	Recocido			Normalizado a 800 °C		
Promedio	98,15	84,55	85,11	84,41	91,53	91,36	91,78
Desv. Est (S)	0,28	0,50	0,42	0,63	0,44	0,41	0,37



Curvas de Dureza Para recocido y normalizado

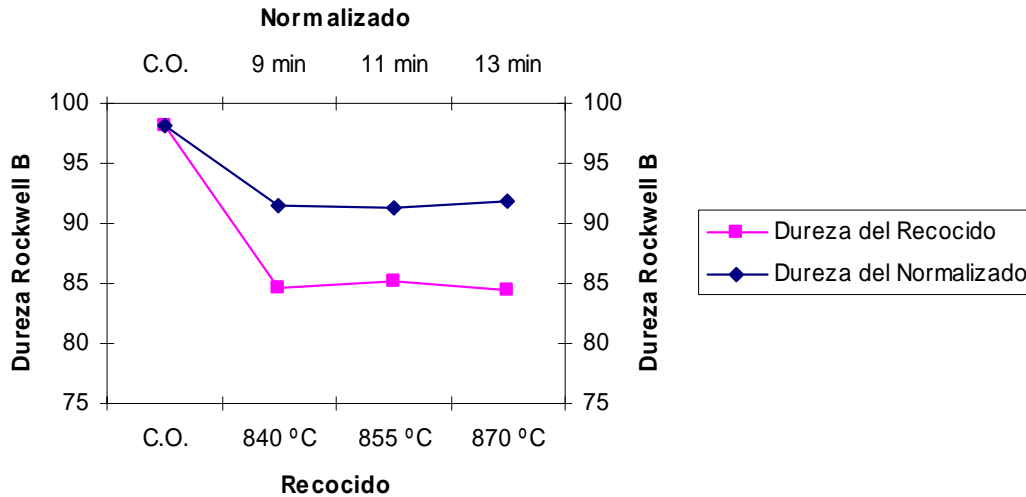


Figura N° 4.52. Grafica Dureza del Material vs. Tratamiento Térmico

4.3.1. Análisis de resultados de Dureza

Para realizar el ensayo de dureza, se utilizó la escala Rockwell B, con bola de acero de 1/16 in y una carga de 100 Kg. De los valores obtenidos (Figura. N° 4.52) se observa que el material ablandó para ambas condiciones de tratamientos térmicos, Este resultado para el caso del normalizado es contrario a lo teórico debido a que se esperaba que la misma aumentara. En la gráfica se puede observar como al aumentar el tiempo de normalizado la dureza tiende a incrementarse ligeramente, sin embargo la disminución de la dureza no fue tan significativa con respecto a la condición original. Para el caso del recocido el comportamiento del material fue el esperado.



4.4. Composición Química del Acero Martensítico AISI 420

Tabla N° 4.12. Porcentaje de los componentes aleantes del Acero Inoxidable Martensítico AISI 420 según las normas ASTM A-959-96

Designación UNS ^B	Nombre	C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Ni (%)
S42010	420	0,15- 0,3	1	0,04	0,03	13,5-15	0,35- 0,85
S42000	420	0,15 min	1	0,04	0,03	12-14	0

FUENTE NORMA ASTM A-959-96 (Ver Anexo E)

Tabla N° 4.13. Porcentaje de los componentes aleantes del Acero Inoxidable Martensítico AISI 420 según ficha técnica SUMINDU

C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Mo %	Ni %	Ti %	Cu %	N %
0,202	0,35	0,51	0,023	0,028	13,25	0	0	0	0	0,0300

FUENTE SUMINDU (Ver Anexo C)

Tabla N° 4.14. Porcentaje de los componentes aleantes del Acero Inoxidable Martensítico AISI 420 según resultados obtenidos por Espectrofotometría, Gasometría por radiación y Fotocolorimetría

Muestra	%C	%S	%Mn	%Si	%Cr	%Ni	%Mo	%P
M1	0,26±0,01	0,029±0,001	0,51±0,00	0,04±0,02	12,75±0,17	0,37±0,01	0,09±0,01	0,023±0,001

FUENTE LAB. DE ANÁLISIS QUÍMICO UCV (Ver Anexo D)

En las tablas anteriores se muestran los valores de la composición química de los aleantes del acero inoxidable martensítico AISI 420. En la primera, Tabla N° 4.12 se muestran los valores teóricos según las normas ASTM A-959-96, donde se indica la composición química. En la siguiente Tabla N° 4.13, se muestran los valores de la composición química del material en estudio según tabla anexa dada por el proveedor



y la tercera Tabla N° 4.14, refleja la composición química del material luego de realizar el análisis químico, en esta última se observa que hay presencia de Níquel entre los aleantes.

En la composición química del material se observa que diversos aleantes tienen distintas composición con respecto a lo indicado en la norma, como por ejemplo el cromo (Cr), el molibdeno (Mo) y el manganeso (Mn), los cuales al tener un porcentaje diferente podrían alterar el comportamiento del material luego de aplicarle los tratamientos térmicos. Tanto el cromo, el manganeso y el molibdeno le dan al material cierta resistencia mecánica, ocasionando así la disminución de la ductilidad del material, por lo tanto al comparar los valores de la composición de estos aleantes se observa que el cromo y el manganeso están en menor proporción con respecto a la norma ASTM, y el molibdeno la cual debería de estar presente en un 1% se encuentra igualmente por debajo de este tope. Esta baja presencia de estos aleantes en el acero implica que el material en su estado original es más blando con respecto al que teóricamente debería ser, alterando en cierto modo el comportamiento del material luego de realizarle algún tratamiento térmico. Otro de los aleantes presentes es el Níquel, la cual al ser un aleante gammático ocasiona que en el diagrama de fase hierro-cromo la austenita se desplace hacia la derecha permitiendo de este modo poder seleccionar una temperatura de normalizado dentro de una zona de austenización. Esto último pudo haber sido el motivo por el cual no se logró un normalizado deseado, ya que la temperatura de 800 °C seleccionada para este trabajo no fue suficiente para lograr un óptimo refinamiento de grano.



CAPÍTULO V



Conclusiones

PARA EL CASO DEL TRATAMIENTO TÉRMICO DE NORMALIZADO.

- Con relación a los tiempos de normalizado de 9, 11 y 13 minutos no se aprecia un cambio significativo de las propiedades mecánicas entre ellos. Sin embargo se tiene que en promedio los esfuerzos para los tiempos de 9, 11 y 13 minutos presentaron una disminución de 34,26%, el de fluencia, 10% el máximo, 23,63% el de ruptura con respecto a la condición original.
- En cuanto a las propiedades de ductilidad estas presentaron un aumento de 64,24% el alargamiento, y del 8,07% la reducción de área en relación a la condición original. Pero entre los tiempos de 9, 11 y 13 minutos se obtuvo poca variación de estas propiedades.
- La tenacidad de fractura presenta un aumento 863 % con respecto a la condición original, esto significa que el material aumentó su capacidad de absorción de energía por impacto. Sin embargo entre los tiempos de 9, 11, y 13 minutos se presenta poca variación de la tenacidad de fractura.
- Al observar la superficie de fractura de los ensayos de tracción e impacto por microscopia óptica de barrido, se obtuvo que el mecanismo de fractura es dúctil.
- Para el ensayo de dureza el porcentaje promedio disminuyó un 6,72%, con respecto a la condición original.



PARA EL CASO DEL TRATAMIENTO TÉRMICO DE RECOCIDO.

- En relación a las temperaturas de 840°C, 855°C y 870°C de recocido, se tiene que en promedio los esfuerzos presentaron una disminución de 52,18%, el de fluencia, 15,62% el máximo, 19,40% el de ruptura con respecto a la condición original. Sin embargo estas propiedades no presentaron variación significativas entre las tres condiciones de recocido.
- En cuanto a las propiedades de ductilidad estas presentaron un aumento de 93,26% el alargamiento, y del 9,67% la reducción de área en relación a la condición original. Pero entre las temperaturas de 840°C, 855°C y 870°C se obtuvo poca variación de estas propiedades.
- La tenacidad de fractura presenta un aumento de 972 % con respecto a la condición original, esto significa que el material aumentó su capacidad de absorción de energía por impacto. Sin embargo entre las temperaturas de 840°C, 855°C y 870°C se presenta poca variación de la tenacidad de fractura.
- Al observar la superficie de fractura de los ensayos de tracción e impacto por microscopia óptica de barrido, se obtuvo que el mecanismo de fractura es dúctil.
- Para el ensayo de dureza el porcentaje promedio disminuyó un 13,71%, con respecto a la condición Original.
- Se observó que el acero AISI 420 tiene una microestructura de ferrita y de perlita, la cual se mantuvo en las condiciones de tratamiento térmico, aumentando la cantidad de ferrita a medida que se aumentó la temperatura de recocido.



Recomendaciones

- Se recomienda para el caso del normalizado aumentar la temperatura y los tiempos con el fin de incrementar la resistencia mecánica del material luego del tratamiento térmico.
- Se recomienda realizar otros tipos de tratamientos térmicos al material para establecer su comportamiento mecánico.



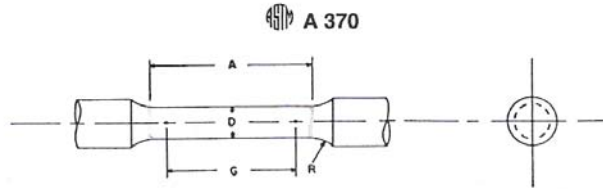
Evaluación de la Tenacidad de Impacto del Acero Inoxidable Martensítico AISI-420 Sometido a Tratamiento Térmico de Recocido y Normalizado



ANEXOS



ANEXO A



DIMENSIONS

Nominal Diameter	Standard Specimen		Small-Size Specimens Proportional to Standard							
	in.	mm	in.	mm	in.	mm	in.	mm	in.	mm
G—Gage length	2.00 ± 0.005	50.0 ± 0.10	1.400 ± 0.005	35.0 ± 0.10	1.000 ± 0.005	25.0 ± 0.10	0.640 ± 0.005	16.0 ± 0.10	0.450 ± 0.005	10.0 ± 0.10
D—Diameter (Note 1)	0.500 ± 0.010	12.5 ± 0.25	0.350 ± 0.007	8.75 ± 0.18	0.250 ± 0.005	6.25 ± 0.12	0.160 ± 0.003	4.00 ± 0.08	0.113 ± 0.002	2.50 ± 0.05
R—Radius of fillet, min	3/8	10	1/4	6	3/16	5	5/32	4	3/32	2
A—Length of reduced section, min (Note 2)	2 1/4	60	1 3/4	45	1 1/4	32	3/4	20	5/8	16

NOTE 1—The reduced section may have a gradual taper from the ends toward the center, with the ends not more than 1 percent larger in diameter than the center (controlling dimension).

NOTE 2—If desired, the length of the reduced section may be increased to accommodate an extensometer of any convenient gage length. Reference marks for the measurement of elongation should, nevertheless, be spaced at the indicated gage length.

NOTE 3—The gage length and fillets shall be as shown, but the ends may be of any form to fit the holders of the testing machine in such a way that the load shall be axial (see Fig. 9). If the ends are to be held in wedge grips it is desirable, if possible, to make the length of the grip section great enough to allow the specimen to extend into the grips a distance equal to two thirds or more of the length of the grips.

NOTE 4—On the round specimens in Fig. 5 and Fig. 6, the gage lengths are equal to four times the nominal diameter. In some product specifications other specimens may be provided for, but unless the 4-to-1 ratio is maintained within dimensional tolerances, the elongation values may not be comparable with those obtained from the standard test specimen.

NOTE 5—The use of specimens smaller than 0.250-in. (6.25-mm) diameter shall be restricted to cases when the material to be tested is of insufficient size to obtain larger specimens or when all parties agree to their use for acceptance testing. Smaller specimens require suitable equipment and greater skill in both machining and testing.

NOTE 6—Five sizes of specimens often used have diameters of approximately 0.505, 0.357, 0.252, 0.160, and 0.113 in., the reason being to permit easy calculations of stress from loads, since the corresponding cross sectional areas are equal or close to 0.200, 0.100, 0.0500, 0.0200, and 0.0100 in.², respectively. Thus, when the actual diameters agree with these values, the stresses (or strengths) may be computed using the simple multiplying factors 5, 10, 20, 50, and 100, respectively. (The metric equivalents of these fixed diameters do not result in correspondingly convenient cross sectional area and multiplying factors.)

FIG. 4 Standard 0.500-in. (12.5-mm) Round Tension Test Specimen with 2-in. (50-mm) Gage Length and Examples of Small-Size Specimens Proportional to the Standard Specimens



ANEXO B

E 23

5.4.2 The dimensions of the striking edge and its position relative to the specimen clamps shall be as shown in Fig. 3.

5.5 *Energy Range*—Energy values above 80 % of the scale range are inaccurate and shall be reported as approximate. Ideally an impact test would be conducted at a constant impact velocity. In a pendulum-type test, the velocity decreases as the fracture progresses. For specimens that have impact energies approaching the capacity of the pendulum, the velocity of the pendulum decreases during fracture to the point that accurate impact energies are no longer obtained.

6. Inspection

6.1 *Critical Parts:*

6.1.1 *Specimen Anvils and Supports or Vise*—These shall conform to the dimensions shown in Fig. 2 or 3. To ensure a minimum of energy loss through absorption, bolts shall be tightened as specified by the machine manufacturer.

NOTE 2—The impact machine will be inaccurate to the extent that some energy is used in deformation or movement of its component parts or of the machine as a whole; this energy will be registered as used in fracturing the specimen.

6.1.2 *Pendulum Striking Edge*—The striking edge (tip) of the pendulum shall conform to the dimensions shown in Figs. 2 or 3. To ensure a minimum of energy loss through absorption, the striking edge bolts shall be tightened as

specified by the machine manufacturer. The pendulum striking edge (tip) shall comply with 5.3.3 (for Charpy) or 5.4.1 (for Izod tests) by bringing it into contact with standard Charpy or Izod specimen.

6.2 *Pendulum Operation:*

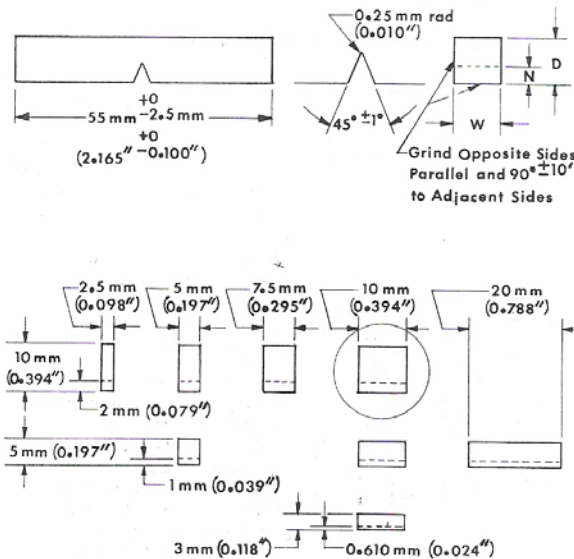
6.2.1 *Pendulum Release Mechanism*—The mechanism for releasing the pendulum from its initial position shall comply with 5.1.8.

6.2.2 *Pendulum Alignment*—The pendulum shall comply with 5.1.5 and 5.1.6. If the side play in the pendulum or the radial plays in the bearings exceeds the specified limits, adjust or replace the bearings.

6.2.3 *Potential Energy*—Determine the initial potential energy using the following procedure when the center of strike of the pendulum is coincident with a radial line from the center line of the pendulum bearings (herein called the axis of rotation) to the center of gravity. (See Appendix X2.) If the center of strike is more than 1.0 mm (0.04 in.) from this line, suitable corrections in elevation of the center of strike must be made in 6.2.3.2, 6.2.3.3, 6.2.6.1, and 6.2.7, so that elevations set or measured correspond to what they would be if the center of strike were on this line.

6.2.3.1 For Charpy machines place a half-width specimen (see Fig. 4) 10 by 5 mm (0.394 by 0.197 in.) in test position. With the striking edge in contact with the specimen, a line

On subsize specimens the length, notch angle, and notch radius are constant (see Fig. 6); depth (D), notch depth (N), and width (W) vary as indicated below.



NOTE 1—Circled specimen is the standard specimen (see Fig. 6).

NOTE 2—Permissible variations shall be as follows:

Cross-section dimensions	±1 % or ±0.075 mm (0.003 in.), whichever is smaller
Radius of notch	±0.025 mm (0.001 in.)
Depth of notch	±0.025 mm (0.001 in.)
Finish requirements	2 μm (63 μin.) on notched surface and opposite face; 4 μm (125 μin.) on other two surfaces

FIG. 4 Charpy (Simple-Beam) Subsize (Type A) Impact Test Specimens



Evaluación de la Tenacidad de Impacto del Acero Inoxidable Martensítico AISI-420 Sometido a Tratamiento Térmico de Recocido y Normalizado



ANEXO C

Larondo LOIU (Vizcaya) España
Correo al apartado 1.323/48090 BILBAO
T. 34-(4) 47113 00 Fax. 34-(4) 45316 36

Quality Management System Approved

ACEROS INOXIDABLES
OLARRA

WZ Nach: **5 14 11 5**

Certificado Tipo: EN 10.204 :1991
Certificate Type :
Certificat Type :
Datum - Fecha - Date 11 DE JUNIO 1998

SUMINISTRO DE ACEROS ESPECIALES,
AVDA. TRIESTE EDIF. CALIFORNIA
APDO. 70.038 - CARACAS 1071 - VE

Prüf-nr. - Certificado - Certificate - Certificat: **288.477** Rechnung-Factura-Invoice-Facture

Werks-Nr. N.º de fabrica Our order N.º N.º Commande N.º 797.542	Bestell-Nr. Pedido n.º Your order N.º V.º Commande N.º 2450	Anforderungen/Exigencias/Requirements/Conditions	Werkstoff Material Materiel Nuence AISI-420
--	--	--	--

Entsprechend:
Corresponds:
According to: **ASTM A 276-97**
D'acord avec:
Ausgabe-Edition-Édition:

Prüfgegenstand-Perfil de prueba-Item inspected-Profil essaye: Stabstahl-Barras de acero-Steel bars-Barres d'acier:

Kennzeich-Distintivo-Distinctif-Identif. Erschmelzungsart: E-Argon Sauerstoffentsüchtung
Forma de fabrica: E-A.O.D.
Mating process:
Procédé d'elaboration:

Umfang der Lieferung Objeto del suministro Scope of delivery Objet de la livraison	Pos. Nr. Pos. N.º Sample N.º Échantillon N.º	Bündel Bullos Bundles Bulles Coils	Stäbe Barras Bars Barres	Gewicht Peso Kgs. Weight Poids	Gegenstand - Designation Shape and size - Produit et dimension	Probe Nr. Prueba N.º Sample N.º Échantillon N.º	Schmelze - Colada Heat - Cooled
		2		989	REDONDO 12,70 MM	1	701128

Zeichen des Lieferwerks - Anagrama del suministrador: Werkstoffsicherheitszeichen - Anagrama del receptor:
Works-inspector stamp - Signe de l'expert

1. Gewalzt Laminado	2. Gegülzt Recocido	3. Vergülzt Bonificado	4. Normalgühten Normalizado	5. Abgeschreckt Hiperenfriado	6. Gebätzt Decapado	7. Geschalt Tör. basto	8. Drehen Torneado	9. Geschliffen Rectificado	10. Poliert Pulido	11. Gezogen Enrollado	h. 10
	G								X	X	

Wärmebehandlung: Tratamiento termico: Heat treatment: Traitement thermique: Ergebnis der Prüfungen - Resultados de los ensayos - Test results - Resultats des ess

Abmessungen des Probestabs Medida de las Probetas Dimensions of Specimen Dimension des Eprouvettes	Temp. °C	Probe Nr. Pro. N.º Spec. N.º	0,2 % Rp N/mm.² MPA	1 % Rp N/mm.² MPA	RM N/mm.² MPA	A % L ₅₀	Z %	Karbonyl-Resilienza ISO V (J) Impact Test - Resilience	Härte Durezza Hardness Dureté HB
RED. 10 MM.	200	1	620	675	725	20	64		207

Schemetenanalyse - Analisis químico - Chemical analysis - Analyse chimique

Schemete Colada Heat Cooled	C. %	Si. %	Mn. %	P. %	S. %	Cr. %	Mo. %	Ni. %	Ti. %	Cu. %	N. %
	0,202	0,35	0,51	0,023	0,028	13,25					0,0300

Besichtigung und Ausmessung
Comprobación visual y medidas
Visual inspection and dimensional checks
Contrôle visuel et dimensionnel in Ordnung-Effectuos-Satisfactory.

ACEROS INOXIDABLES **OLARRA**, S.
Abt. Werkstoffprüfung



ANEXO D

UNIVERSIDAD CENTRAL
DE VENEZUELA



FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA DE INGENIERIA METALÚRGICA Y
CIENCIA DE LOS MATERIALES

Caracas, 17/10/2008

REPORTE TÉCNICO

Solicitante: Jesús Martínez

Tipo de Material: Acero Inoxidable

Elementos a determinar: Carbono (C), Azufre (S), Manganeso (Mn), Silicio (Si), Cromo (Cr), Níquel (Ni), Molibdeno (Mo) y Fósforo (P).

Métodos:

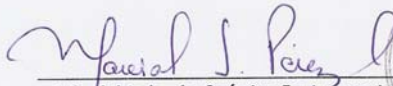
- Espectrofotometría de absorción atómica de llama para la determinación de Manganeso (Mn), Silicio (Si), Cromo (Cr), Níquel (Ni) y Molibdeno (Mo).
- Gasometría por radiación infrarroja para la determinación de Carbono (C) y Azufre (S).
- Fotocolorimetría para la determinación de Fósforo (P).

Procedimiento o norma:

- Análisis de aceros y fundiciones, código MT-10. Manual de Métodos analíticos PERKIN ELMER.
- Norma ASTM E663: Flame Atomic Absorption Analysis.
- Norma ASTM E350: "Standard Methods for CHEMICAL ANALYSIS OF CARBON STEEL, LOW-ALLOY STEEL, SILICON ELECTRICAL STEEL, INGOT IRON AND WROUGHT IRON".

RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICOS

Muestra	%C	%S	%Mn	%Si	%Cr	%Ni	%Mo	%P
M1	0.26±0.01	0.029±0.001	0.51±0.00	0.04±0.02	12.75±0.17	0.37±0.01	0.09±0.01	0.023±0.001


Jefe del Lab. de Química Instrumental
Prof. Marcial Pérez
pmarcialj@gmail.com



NOTA: La Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales garantiza los resultados reportados en este informe, pero no así la representatividad de la muestra, la cual fue suministrada por la parte interesada.

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, Ciudad Universitaria, Los Chaguaramos, Apartado Postal 51717 Caracas 1050, Venezuela. Telf. 58-212-805.1527. FAX: 58-212-805.1515. e-mail: pmarcialj@gmail.com



ANEXO E



TABLE 1 Continued

UNS# Designation	Name	Carbon	Manganese	Phosphorous	Composition, % ^a					Nitrogen	Other Elements
					Sulfur	Silicon	Chromium	Nickel	Molybdenum		
S43035	439	0.07	1.00	0.040	0.030	1.00	17.0-19.0	0.50		0.04	Al 0.15, Ti 0.20+ 4x(C+N)-1.10
S43036	430Ti	0.10	1.00	0.040	0.030	1.00	16.0-19.5	0.75			Ti 5xC-0.75
S43400	434	0.12	1.00	0.040	0.030	1.00	16.0-18.0		0.75-1.25		
S43600	436	0.12	1.00	0.040	0.030	1.00	16.0-18.0		0.75-1.25		Cb 5xC-0.80
S44200	442	0.20	1.00	0.040	0.040	1.00	18.0-23.0	0.60			
S44300	443	0.20	1.00	0.040	0.030	1.00	18.0-23.0	0.50			
S44400	444	0.025	1.00	0.040	0.030	1.00	17.5-19.5	1.00	1.75-2.50	0.035	Cu 0.90-1.25 (Ti+Cb) 0.20+4x (C+N)-0.80
S44500		0.020	1.00	0.040	0.012	1.00	19.0-21.0	0.60		0.03	Cu 0.30-0.60, Cb 10x(C+N)-0.80
S44600	446	0.20	1.50	0.040	0.030	1.00	23.0-27.0	0.75		0.25	
S44626	XM-33	0.06	0.75	0.040	0.020	0.75	25.0-27.0	0.50	0.75-1.50	0.040	Cu 0.20, Ti 7x(C+N)-1.00, and Ti 0.20 min
S44627	XM-27	0.010	0.40	0.020	0.020	0.40	25.0-27.5	0.50	0.75-1.50	0.015	Cu 0.20, Cb 0.05-0.20, Ni+Cu 0.50
S44635	25-4-4	0.025	1.00	0.040	0.030	0.75	24.5-26.0	3.5-4.5	3.5-4.5	0.035	Ti+Cb 0.20+4x (C+N)-0.80
S44660	26-3-3	0.030	1.00	0.040	0.030	1.00	25.0-28.0	1.0-3.5	3.0-4.0	0.040	Ti+Cb 6x(C+N)-1.00, and Ti-Cb 0.20 min
S44700	29-4	0.010	0.30	0.025	0.020	0.20	28.0-30.0	0.15	3.5-4.2	0.020	Cu 0.15, C+N 0.025
S44735	29-4C	0.030	1.00	0.040	0.030	1.00	28.0-30.0	1.00	3.6-4.2	0.045	Ti+Cb 6x(C+N)-1.00, and Ti-Cb 0.20 min
S44800	29-4-2	0.010	0.30	0.025	0.020	0.20	28.0-30.0	2.0-2.5	3.5-4.2	0.020	Cu 0.15, C+N 0.025
S46800		0.030	1.00	0.040	0.030	1.00	18.0-20.0	0.50		0.030	Ti 0.07-0.30, Cb 0.10-0.60, and Ti+Cb 0.20+4x(C+N)-0.80
Martensitic Grades											
S40300	403	0.15	1.00	0.040	0.030	0.50	11.5-13.0				
S41000	410	0.15	1.00	0.040	0.030	1.00	11.5-13.5				
S41003		0.030	1.50	0.040	0.030	1.00	10.5-12.5	1.50		0.030	
S41008	410S	0.08	1.00	0.040	0.030	1.00	11.5-13.5				
S41026		0.15	1.00	0.02	0.02	1.00	11.5-13.5				Cu 0.50
S41040	410Cb	0.18	1.00	0.040	0.030	1.00	11.5-13.0	1.00-2.00	0.40-0.60		Cb 0.05-0.30
S41041		0.13-0.18	0.40-0.60	0.030	0.030	0.50	11.5-13.0	0.50	0.20		Al 0.05, Cb 0.15-0.45
S41400	414	0.15	1.00	0.040	0.030	1.00	11.5-13.5	1.25-2.50			
S41500		0.05	0.50-1.00	0.030	0.030	0.60	11.5-14.0	3.5-5.5	0.50-1.00		
S41600	416	0.15	1.25	0.06	0.15 min	1.00	12.0-14.0				
S41610	XM-6	0.15	1.50-2.50	0.06	0.15 min	1.00	12.0-14.0				
S41623	416Se	0.15	1.25	0.06	0.06	1.00	12.0-14.0				Se 0.15 min
S41800	615	0.15-0.20	0.50	0.040	0.030	0.50	12.0-14.0	1.80-2.20	0.50		W 2.5-3.5
S42000	420	0.15 min	1.00	0.040	0.030	1.00	12.0-14.0				
S42010		0.15-0.30	1.00	0.040	0.030	1.00	13.5-15.0	0.35-0.85	0.40-0.85		
S42020	420F	0.30-0.40	1.25	0.06	0.15 min	1.00	12.0-14.0		0.50		
S42023	420FSe	0.20-0.40	1.25	0.06	0.06	1.00	12.0-14.0		0.50		
S42200	616	0.20-0.25	0.50-1.00	0.025	0.025	0.50	11.0-12.5	0.50-1.00	0.90-1.25		Se 0.15 min
S42300	619	0.27-0.32	0.95-1.35	0.025	0.025	0.50	11.0-12.0	0.50	2.50-3.00		V 0.20-0.30
S43100	431	0.20	1.00	0.040	0.030	1.00	15.0-17.0	1.25-2.50			
S44002	440A	0.60-0.75	1.00	0.040	0.030	1.00	16.0-18.0		0.75		
S44003	440B	0.75-0.95	1.00	0.040	0.030	1.00	16.0-18.0		0.75		