



**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL.**

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**E INDUSTRIAS EXTRACTIVAS.**

**SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN.**

**“ESTUDIO DE LA FRAGMENTACIÓN DE RECIPIENTES HERMÉTICOS  
SOMETIDOS A EXPLOSIÓN, FABRICADOS DE ACERO AL CARBONO AISI  
1020, 1040 Y 1060”**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA METALÚRGICA**

**PRESENTA:**

**ING. IND. GERARDO RODRIGUEZ HERNANDEZ.**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**DR. J. FEDERICO CHÁVEZ ALCALÁ, ASESOR.**

**MEXICO, D.F. 12 DICIEMBRE DEL 2011**



ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la ciudad de MEXICO D.F. siendo las 1600 horas del día 12 del mes de DICIEMBRE del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudio de Posgrado e Investigación de E.S.I.Q.I.E. para examinar la tesis de titulada: "ESTUDIO DE LA FRAGMENTACIÓN DE RECIPIENTES HERMETICOS SOMETIDOS A EXPLOSIÓN, FABRICADOS DE ACERO AL CARBONO AISI 1020, 1040 Y 1060 "

Presentada por el alumno:

RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ GERARDO  
Apellido paterno Apellido materno Nombres (s)

Con registro: 

B	0	9	1	6	0	6
---	---	---	---	---	---	---

Aspirante de: MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA METALÚRGICA.

Después de intercambiar opiniones los miembros de la comisión manifestaron **SU APROBACIÓN DE LA TESIS.** En virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Director de Tesis

  
DR. J. FEDERICO CHAVEZ ALCALA

  
DR. IVAN E. CAMPOS SILVA.

  
DR. DAVID HERNANDEZ SILVA

  
DR. JOSE A. ROMERO SERRANO

  
DR. FRANCISCO CALEYO CEREZO

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA  
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
UNIVERSIDAD UNIDOS MEXICANOS  
MEXICO, D. F.

  
DR. ALEJANDRO CRUZ RAMIREZ.

ESCUELA SUPERIOR DE  
INGENIERÍA QUÍMICA  
INDUSTRIAS EXTRACTIVAS  
SECCIÓN DE ESTUDIOS  
DE POSGRADO E  
INVESTIGACIÓN  
EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

  
DR. JOSÉ JAVIER CASTRO ARELLANO.



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

**CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS**

En la Ciudad de México el día 12 del mes diciembre del año 2011, el que suscribe Gerardo Rodríguez Hernández, alumno del programa Maestría en Ciencias en Ingeniería Metalúrgica con número de registro B091606, adscrito a la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de tesis bajo la dirección del Dr. J Federico Chavez Alcala y cede los derechos del documento titulado: "Estudio de la fragmentación de recipientes herméticos sometidos a explosión, fabricados de acero al carbono AISI 1020, 1040 y 1060", al instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficos o datos del trabajo sin permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: gerar2912@hotmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

  
Gerardo Rodríguez Hernández  
Nombre y Firma

# CONTENIDO.

	PAG.
<b>DESCRIPCIÓN.</b>	
<b>Resumen</b> .....	6
<b>Abstract</b> .....	7
<b>1. Introducción</b> .....	8
<b>2. Antecedentes</b> .....	12
2.1. Características de diseño relevantes del recipiente actual.....	12
2.1.1. Dimensionales.....	12
2.1.1. Mecánicas.....	12
2.2. Conceptos fundamentales.....	12
2.2.1. Proceso de forjado en caliente.....	12
2.2.2. Características de los aceros AISI 1020, 1040 y 1060.....	14
2.2.3. Tratamientos térmicos.....	16
2.2.4. Ensayo de dureza.....	16
2.2.5. Ensayo de resistencia a la tensión.....	17
2.2.6. Ensayo de impacto (Charpy).....	17
2.3. Estado del arte.....	17
<b>3. Metodología experimental</b> .....	26
3.1. Selección de la materia prima.....	26
3.2. Caracterización de la materia prima.....	27
3.2.1. Caracterización mecánica.....	27
3.2.2. Caracterización microestructural.....	28
3.3. Diseño y fabricación de los recipientes.....	28
3.4. Aplicación de los tratamientos térmicos.....	30
3.5. Caracterización del material con tratamiento térmico.....	31
3.6. Pruebas de campo.....	31
3.7. Caracterización de los fragmentos.....	35
3.7.1. Caracterización de la superficie de fractura.....	35
3.7.2. Caracterización microestructural.....	35
3.8. Estadística de los fragmentos.....	36
<b>4. Resultados obtenidos</b> .....	37
4.1. Caracterización de la materia prima.....	37
4.1.1. Caracterización mecánica.....	37
4.1.2. Caracterización microestructural.....	41
4.2. Caracterización del material con tratamientos térmicos.....	47
4.2.1. Caracterización mecánica.....	47
4.2.2. Caracterización microestructural.....	60
4.3. Caracterización de los fragmentos.....	62
4.3.1. Caracterización de la superficie de fractura.....	62
4.3.2. Caracterización microestructural.....	69
4.3.3. Ensayo de microdureza.....	80

4.4. Estadística de los fragmentos.....	81
<b>5. Discusión de resultados y conclusiones.....</b>	<b>84</b>
<b>6. Recomendaciones.....</b>	<b>86</b>
<b>7. Referencias.....</b>	<b>87</b>

## RESUMEN.

La industria nacional ha dependido desde la industrialización del país de tecnologías extranjeras, muchas de ellas muy antiguas o incluso obsoletas, dando lugar a la fabricación de instrumentos o mecanismos de bajo desempeño, comparado con los obtenidos en otros países. En este trabajo se hace una revisión de los procesos de fabricación y materiales más comunes empleados en recipientes herméticos sometidos a explosión. La finalidad del trabajo es proponer una alternativa en la composición química y tratamientos térmicos de las materias primas con el objeto de mejorar su desempeño (cantidad de fragmentos/masa).

Se fabricaron 24 recipientes herméticos, utilizando como materia prima 3 tipos de acero: AISI 1020, 1040 y 1060. Se les aplicó un temple en aceite agitado y un revenido a 300°C, 350°C y 400°C con 1 hora de duración.

En el interior del recipiente se colocó un alto explosivo (T.N.T.), el cual al ser excitado adecuadamente, detonó alrededor de 4400 m/s, provocando la destrucción del producto en múltiples fragmentos en un tiempo muy corto (del orden de unos pocos  $\mu$ s).

En base a la literatura reportada sobre este tipo de dispositivos, se analizó las características microestructurales y mecánicas de los aceros antes y después de aplicar los tratamientos térmicos, así como las características mecánicas (microdureza) y metalográficas de los fragmentos.

Se demostró que existe una clara diferencia, influenciada por la estructura, en las propiedades mecánicas y el comportamiento a la fractura en bajas (ensayo charpy) y altas velocidades (detonación por alto explosivo) de deformación en los aceros utilizados. No se encontró una relación ingenierilmente útil, que permita predecir el comportamiento de un material a altas velocidades de deformación, por medio de los ensayos estandarizados de dureza, impacto y resistencia a la tensión.

En los aceros AISI 1040 y 1060, se presenta un incremento en la relación: fragmentos/masa, conforme se aumenta el contenido de carbono y al aplicar un temple y revenido. Por el contrario, en el acero AISI 1020, se determinó un decremento en dicha relación al aplicar los tratamientos térmicos. En términos prácticos, **buscando la mayor relación: fragmentos/masa** y respetando los requerimientos del diseñador, se proponen **2 alternativas ingenierilmente viables**:

- a. Fabricar los recipientes de acero **AISI 1060 sin aplicar tratamiento térmico**.
- b. Fabricar los recipientes de acero **AISI 1040 con el tratamiento térmico 3**.

## ABSTRACT.

Since the industrialization of Mexico, our national industry has depended of foreign technologies, many of them very old or even obsolete, leading to the manufacture of underperformed technology compared with those obtained abroad.

This work reviews the manufacturing processes and the use of the most common materials employed in hermetic containers subject to explosion.

The purpose of this paper is to propose an alternative in the chemical composition and heat treatment of raw materials in order to improve their performance (number of fragments / mass).

24 sealed vessels were manufactured, using 3 types of steel AISI 1020, 1040 and 1060, these containers were applied with agitated oil and tempered of 300 ° C, 350 ° C and 400 ° C for 1 hour.

Inside the container was placed explosive (TNT) which exploded around 4400 m / s, causing destruction in multiple fragments in a very short time (of the order of a few microseconds).

According on the reported literature on these devices, we analyzed the metallographic and mechanical properties of steels before and after applying the thermal and mechanical characterization (microhardness) and metallographic fragments.

It was shown that there is a clear difference, influenced by the structure, mechanical properties and fracture behavior at low (charpy test) and high speed (high explosive detonation) of deformation in the steel used.

The analysis of results showed that there is no engineering relationship useful to predict the behavior of a material at high strain rates, using standardized tests of hardness, impact and tensile strength.

It was concluded that in steels AISI 1040 and 1060, there is an increase in the ratio: fragments / mass, as you increase the carbon content and applying a quenching and tempering. By contrast, in the steel AISI 1020, revealed a decrease in this ratio by applying the aforementioned thermal treatments. In practical terms, looking for the **highest ratio fragments / mass** and respecting the designer's requirements, we propose **two viable engineering alternatives**:

- a. Making the **AISI 1060 steel vessels without applying heat treatment.**
- b. Making the **AISI 1040 steel vessels with heat treatment 3.**

## 1. Introducción.

La dependencia tecnológica del extranjero, constituye uno de los lastres del desarrollo en nuestro país, pero es a la vez, un área de oportunidad para la generación de conocimiento y aplicación del mismo en productos y procesos que durante muchos años han dependido por completo de la adquisición de tecnología extranjera para subsistir o de lo contrario, caer en lo obsoleto y desaparecer.

Tal es el caso de la fabricación de armamento y municiones en México, el cual desde la década de los años 40's y hasta la fecha ha dependido científica y tecnológicamente del extranjero para satisfacer sus necesidades de diseño, materia prima y equipo de manufactura.

En forma similar a lo ocurrido en la década de los años 40's con la industria petrolera nacional, en la industria militar mexicana se observa una tendencia y un compromiso de generar su propia tecnología y conocimiento para satisfacer las necesidades del ejército y fuerza aérea mexicanos, en lo referente a la fabricación de armas y municiones.

Como parte de dicho compromiso, existe el área de oportunidad relacionada con la mejora de los productos que en dicha empresa se diseñan y/o manufacturan.

En el presente trabajo, se propondrá el tratamiento térmico y la materia prima a utilizar en un recipiente hermético sometido a explosión, con probable aplicación militar, el cual después de ser sometido a los esfuerzos generados por la detonación de un alto explosivo (hexolita) desde su interior, generará una mayor cantidad de fragmentos por unidad de masa, en comparación al utilizado actualmente.

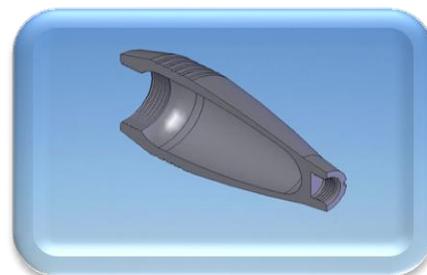
En la industria militar mexicana se fabrican recipientes herméticos utilizados como "cuerpos de granada" de diversos calibres, en el presente trabajo se analizara el utilizado como "cuerpo de granada de mortero calibre 60 mm.", descrito en las figuras 1 y 2.



Fig. 1. Granada de mortero calibre 60 mm.



(a)



(b)

Fig. 2. Secciones de la granada. (a) dividida en conjuntos; (b) Cuerpo seccionado.

Para la fabricación del cuerpo se parte de una barra cuadrada (billet) de 2.5" x 9 cm. de largo de acero AISI 1020, en la figura 3 se observa una pieza, denominada comúnmente como "tocho", con las medidas descritas anteriormente.

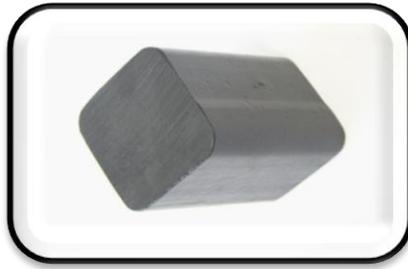


Fig. 3 tocho de materia prima.

El diseño del recipiente (incluyendo la materia prima y proceso de manufactura) es de origen estadounidense y fue entregado a México como una transferencia de tecnología en los años 40's, existiendo actualmente una gran variedad de materiales y procesos para su posible fabricación.

El uso actual de dicho recipiente es militar, en el interior del mismo se aloja un alto explosivo, generalmente T.N.T., el cual al ser excitado adecuadamente detona a aproximadamente 4,400 m/s, generando una gran cantidad de gases en un tiempo muy corto, lo cual provoca una gran presión en las paredes del recipiente, ocasionando su destrucción en múltiples fragmentos.

Como se muestra en la figura 4, se ha evidenciado una pobre fragmentación (pocos fragmentos en relación a la masa total) en el uso de recipientes fabricados con el proceso actual y el acero AISI 1020, lo cual muestra una clara área de oportunidad para la mejora.

La masa del fragmento crítica se determina en base a la naturaleza del blanco y al efecto que sobre él se requiere, ya que el efecto y alcance de los fragmentos varía en función de la energía cinética adquirida en la detonación. Queda fuera del alcance de este trabajo el cálculo de masa crítica.



Fig. 4. Fragmentación de recipiente utilizado en un mortero calibre 120 mm.

La forma en la que el recipiente fragmenta está influenciada por varios factores, siendo los más críticos los siguientes:

1. La velocidad de detonación del explosivo.
2. La relación entre el diámetro interior y el espesor de las paredes del recipiente.
3. Las propiedades metalúrgicas del recipiente.

Para efectos del presente trabajo, los primeros 2 factores se consideran constantes, enfocando este estudio únicamente a mejorar las propiedades metalúrgicas del recipiente para obtener mayor cantidad de fragmentos/masa.

Aunado a esto, no se tiene información detallada de los cambios en el proceso de manufactura, en específico los tratamientos térmicos y en las materias primas utilizadas para la fabricación de dichos recipientes, con el fin de obtener una microestructura que permita mejorar la fragmentación, sin afectar el uso seguro de dicha munición.

El proceso de fabricación actual del recipiente se describe en la figura 5.

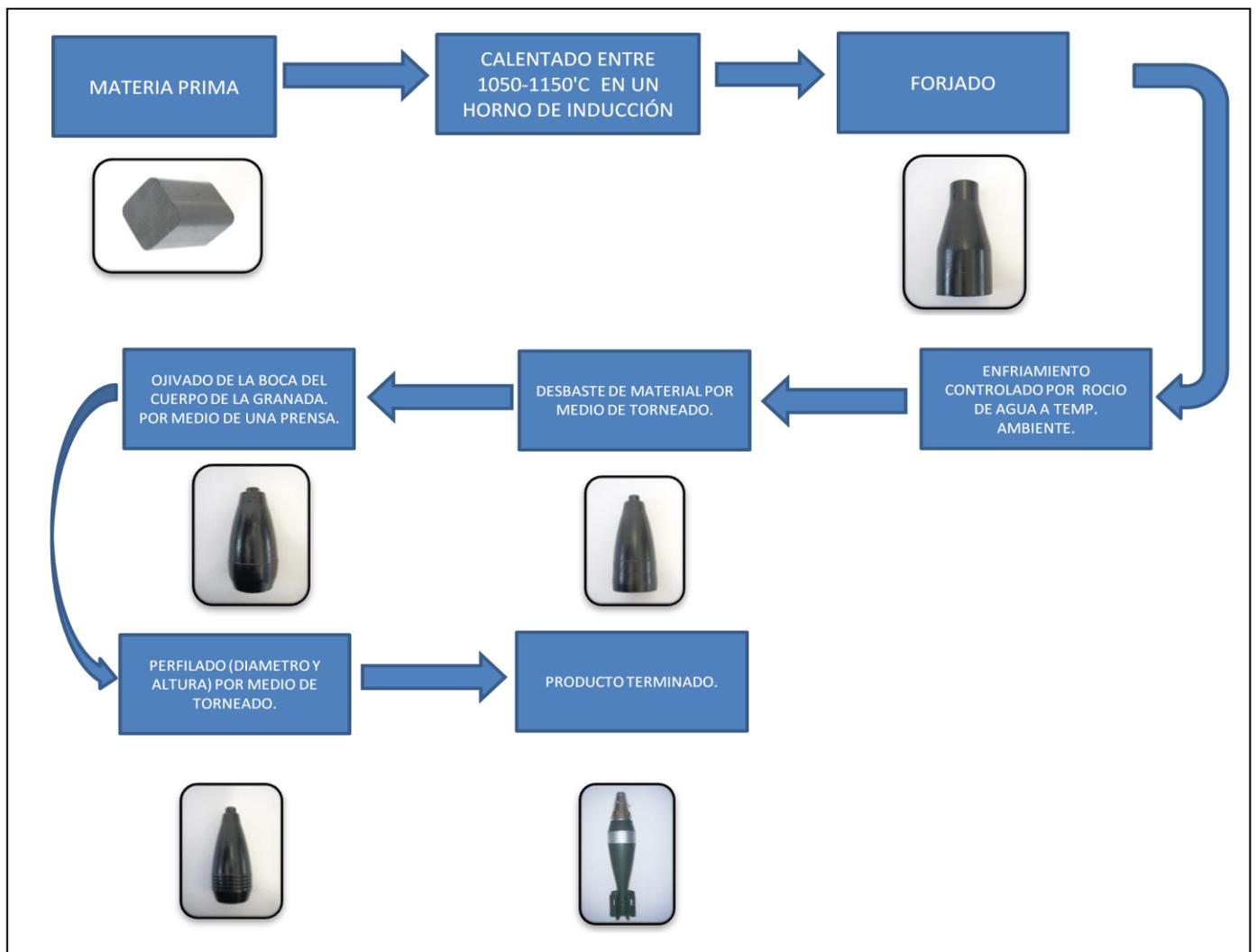


Fig. 5. Esquema del proceso de fabricación actual de los recipientes.

En base a lo descrito en los párrafos anteriores, este proyecto debe enfocarse a la determinación de la composición química más adecuada del acero que, aunada a tratamientos térmicos de temple y revenido, aplicados a un recipiente hermético sometido a explosión, produzcan una mayor cantidad de fragmentos por unidad de masa y que sus propiedades mecánicas permitan proponerla para granadas de mortero calibre 60 mm como una opción útil y segura en su desempeño.

Para ello se parte de la premisa de que al utilizar como materia prima un acero con mayor contenido de carbono, que el utilizado actualmente y aplicando un tratamiento térmico de temple y revenido al recipiente, se incrementará el número de fragmentos por unidad de masa, respetando los requerimientos mecánicos de diseño que permitan el uso seguro y útil de la munición.

De esta manera se establece la metodología para evaluar y comparar la fragmentación de los aceros al carbono AISI 1020, AISI 1040 y AISI 1060, utilizándolos para fabricar recipientes herméticos y sometiéndolos a explosión y determinar los tratamientos de temple y revenido que ofrezcan la mayor cantidad de fragmentos por unidad de masa, respetando los requerimientos mecánicos de diseño.

Para alcanzar estos resultados, se fabrica un lote de productos con el acero actual y los propuestos, se caracteriza mecánica y microestructuralmente el producto antes y después del tratamiento térmico y se desarrolla pruebas de campo de detonación de los recipientes fabricados, caracterizando asimismo los fragmentos obtenidos en su microestructura, superficie de fractura y realizando un análisis de fragmentación.

Estos resultados permiten documentar las características microestructurales más adecuadas para mejorar la fragmentación y en base a ello proponer el acero y tratamiento térmico factible de ser utilizado en la fabricación de granadas de mortero.

## 2. Antecedentes.

### 2.1. Características de diseño relevantes del recipiente actual.

#### 2.1.1. Dimensionales.

El espesor de la pared del recipiente oscila dentro del rango de 2.4 mm a 7 mm., (estos valores corresponden al cuerpo de granada de mortero cal. 60 mm).

#### 2.1.2. Mecánicas.

2.1.2.1. Resistencia a la cedencia (mínimo): 246 N/mm<sup>2</sup>.

2.1.2.2. Reducción de área (mínimo): 25%

2.1.2.3. Elongación (mínimo): 15%

### 2.2. Conceptos fundamentales.

#### 2.2.1. Proceso de forjado en caliente [1][2].

El proceso de forjado en caliente, es un proceso termomecánico utilizado para la fabricación de piezas con geometría compleja como: bielas, herramientas o como en nuestro caso, recipientes con paredes gruesas y relativamente profundos. Usualmente, la materia prima utilizada son aleaciones de aluminio, magnesio y aceros (al carbono o aleados). Cabe destacar que en muchas ocasiones se requiere realizar una serie de mecanizados por torno, fresa, etc., para dar el acabado y geometría final a las piezas forjadas.

Cuando la materia prima utilizada es acero, el primer paso es calentado a su temperatura de austenización (dependiendo del acero el rango va de 1150 a 1280 grados C) con el fin de disminuir su resistencia a la tensión e incrementar su plasticidad y maleabilidad; ya que se ha alcanzado la temperatura de austenización, se coloca en un dado (o matriz) y por medio de uno o mas punzonados, se realiza la deformación plástica del acero hasta una profundidad determinada..

La figura 6, muestra una fotografía en la que se observa a un trabajador sosteniendo una pieza que va a ser colocada en una prensa hidráulica de 2000 toneladas, para efectuar una operación de forjado.

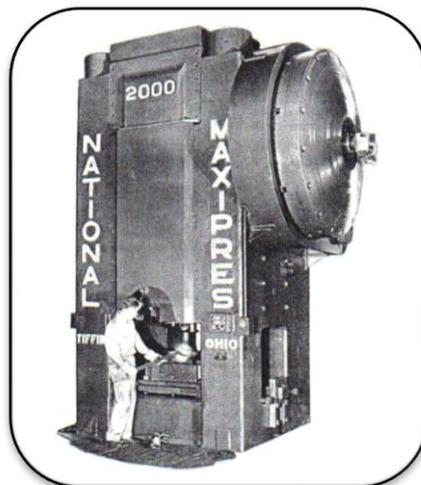


Fig. 6. Trabajador realizando una operación de forjado en caliente.

Para llevar a cabo la selección de un acero y considerarlo como factible de ser forjado, se deben considerar ciertas características, dentro de otras, que influyen directamente con la habilidad de dicho material para ser forjado, como son:

- a. Físicas: capacidad y conductividad térmica.
- b. Mecánicas: maleabilidad, plasticidad y resistencia a la tensión.

Por lo expuesto en el párrafo anterior, es importante detallar la influencia del contenido de carbono y algunos aleantes que se utilizan en los aceros, en las características físicas y mecánica más importantes en el proceso de forjado, como a continuación se explica:

a. **Carbono.**

- 1. Conforme se incrementa el contenido de carbono, su maleabilidad y conductividad térmica decrece.
- 2. Un contenido de carbono de hasta 1.4 % posee una buena "forjabilidad".

b. **Silicio.**

- 1. Incrementa la resistencia a la tensión y elasticidad.
- 2. No tiene una influencia apreciable en la maleabilidad del acero.

c. **Manganeso.**

- 1. Incrementa la resistencia al impacto y a la tensión del acero.
- 2. La conductividad térmica decrece conforme se incrementa el contenido de manganeso.
- 3. El manganeso incrementa la susceptibilidad del acero al sobrecalentamiento y a que ocurran fisuras; para evitar dicha situación indeseable, se deben prolongar los tiempos de calentamiento.
- 4. Aceros calentados a la temperatura y tiempos adecuados, presentan una buena "forjabilidad".

d. **Nickel.**

- 1. Incrementa la plasticidad, resistencia a la tensión y ductilidad del acero.
- 2. No tiene influencia sobre la maleabilidad de los aceros.
- 3. Tiende a formar cascarilla firmemente adherida a la superficie del acero calentado, lo cual representa un serio problema si se forja dicha cascarilla en el interior del acero, provocando una disminución de sus propiedades mecánicas.

e. **Cromo.**

- 1. Incrementa la dureza, elasticidad y resistencia a la tensión del acero, y al mismo tiempo reduce la capacidad térmica y la ductilidad del mismo.
- 2. La estructura del acero con cromo, presenta dificultad al forjado (cuando el punzón penetra la materia prima), por lo que debe ser calentado a una alta temperatura, con la finalidad de obtener una estructura fina.
- 3. Si no es calentado correctamente se tiene el riesgo de generar fisuras.

f. **Molibdeno.**

- 1. Acompañado con el cromo y nickel en el acero, incrementa su resistencia a la tensión y ductilidad, pero decrece su capacidad térmica.
- 2. A mayor contenido de molibdeno, mayor tiempo de calentamiento del acero;

incrementando la susceptibilidad de “sobrecalentar” el acero.

3. Se requiere una mayor potencia de la prensa para realizar el forjado, comparado con la de un acero al carbono.
4. Debe ser enfriado lentamente, ya que es susceptible a adquirir dureza, inclusive al enfriar al aire, con tendencia a generar fracturas.

**g. Vanadio.**

1. Incrementa la resistencia a la tensión y elasticidad del acero.
2. En lingotes, facilita la formación de una estructura de granos finos.
3. Mejora la “forjabilidad” y previene el sobrecalentamiento.

**h. Tungsteno.**

1. Incrementa la dureza y resistencia a la tensión del acero.
2. Disminuye ligeramente la ductilidad y la conductividad térmica.
3. Cuando se forja a bajas temperaturas, tiende a fracturarse.
4. Requiere un rango de calentamiento y una mayor temperatura de forjado, que los utilizados en aceros al carbono.

**i. Azufre.**

1. Contenidos de azufre superiores al 0.02-0.03% en aceros especiales y de 0-0.045% a 0.055 % en aceros ordinarios, pueden generar grietas y eventualmente fracturas en los aceros forjados.

**j. Fósforo.**

1. Se debe evitar un contenido de fosforo superior al 0.03-0.04% en los aceros, ya que puede ocasionar fragilidad a temperatura ambiente.

2.2.2. Características de los aceros AISI: 1020, 1040 y 1060 [3].

En la tabla 1 se detalla la composición química y propiedades mecánicas de los aceros AISI: 1020, 1040 y 1060.

Tabla.1 Composición química de los aceros AISI: 1020, 1040 y 1060

<b>Acero AISI 1020.</b>					
<b>Elemento.</b>	<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Si</b>
<b>Contenido %.</b>	0.18-0.23	0.30-0.60	0.04 (Max)	0.05 (Max)	N/a
<b>Acero AISI 1040.</b>					
<b>Elemento.</b>	<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Si</b>
<b>Contenido %.</b>	0.37-0.44	0.60-0.90	0.04 (Max.)	0.05 (Max).	N/a
<b>Acero AISI 1060.</b>					
<b>Elemento.</b>	<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Si</b>
<b>Contenido %.</b>	0.55-0.65	0.6-0.90	0.04 (Max.)	0.05 (Max).	N/a

Asimismo, en las tablas 2, 3 y 4 se detallan las propiedades mecánicas de los aceros AISI: 1020, 1040 y 1060, respectivamente.

Tabla 2. Propiedades mecánicas del acero AISI 1020.

Propiedades		Condiciones.	
		T (°c)	Tratamiento térmico
Resistencia a la tensión (N/mm <sup>2</sup> )	401-480	25	Recocido a 870°C
Resistencia a la cedencia (N/mm <sup>2</sup> )	300-353		
Elongación (%)	36.5		
Reducción de área (%)	66.0		
Dureza (HB)	111	25	Recocido a 870°C
Resistencia al impacto (j) (izod)	123.4	25	Recocido a 870°C

Tabla 3. Propiedades mecánicas del acero AISI 1040.

Propiedades		Condiciones.	
		T (°c)	Tratamiento térmico
Resistencia a la tensión (N/mm <sup>2</sup> )	528-600	25	Recocido a 790°C
Resistencia a la cedencia (N/mm <sup>2</sup> )	360-381		
Propiedades		Condiciones.	
		T (°c)	Tratamiento térmico
Elongación (%)	28-30	25	Recocido a 790°C
Reducción de área (%)	57.2		
Dureza (HB)	149		
Resistencia al impacto (j) (izod)	44.3	25	Recocido a 790°C

Tabla 4. Propiedades mecánicas del acero AISI 1060.

Propiedades		Condiciones.	
		T (°c)	Tratamiento térmico
Resistencia a la tensión. (N/mm <sup>2</sup> )	636-789	25	Recocido a 790°C
Resistencia a la cedencia. (N/mm <sup>2</sup> )	379-428		
Elongación. (%)	18-23		
Reducción de área. (%)	38.2		
Dureza. (HB)	179	25	Recocido a 790°C
Resistencia al impacto (j) (izod)	11.3	25	Recocido a 790°C

### 2.2.3. Tratamientos térmicos de aceros [4].

En términos prácticos, el tratamiento térmico de un acero se define como: una combinación de operaciones de calentamiento y enfriamiento a tiempos determinados, con el fin de conferirle propiedades particulares adaptadas a sus condiciones de servicio o utilización.

Cuando se efectúa un tratamiento térmico pueden observarse diferentes características en los aceros, por ejemplo:

- a. Producir modificaciones sin cambios en la composición química, pero sí en la naturaleza de los constituyentes presentes en el acero: temple por precipitación y el recocido.
- b. Cambios microestructurales en la dimensión, forma y distribución de constituyentes, sin modificar su naturaleza: recocido de globalización, tratamiento de refinamiento estructural, recristalización y normalización.
- c. Eliminar o reducir esfuerzos residuales u homogenizar la distribución de su microestructura: revenido.
- d. Provocar el restablecimiento de las propiedades físicas o mecánicas de un acero forjado, sin la modificación aparente de la estructura: tratamiento de restauración.

### 2.2.4. Ensayo de dureza [5] [6].

El ensayo de dureza tiene como finalidad determinar resistencia del material a la penetración de un objeto duro, por lo tanto tiene una correlación con la resistencia a la tensión del material y al desgaste.

Utilizando un indentador fijo durante el ensayo, la dureza se relaciona también con el flujo de deformación plástica de un material.

En la figura 7. Se observa un durómetro Rockwell, tomando la dureza de un componente automotriz.

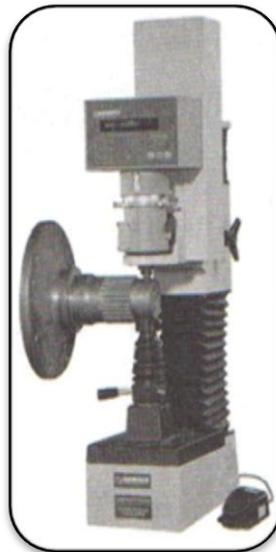


Fig. 7 fotografía de un durómetro Rockwell.[12]

### 2.2.5. Ensayo de resistencia a la tensión [5] [7].

El ensayo de resistencia a la tensión es uno de los más importantes exámenes realizados a un material. Éste se utiliza específicamente para determinar:

- La resistencia a la cedencia.
- Resistencia última a la tensión.
- La elongación del material.
- La reducción de área del espécimen.

Éste ensayo define la reacción de un material a una carga hasta su punto de ruptura. Al definir las propiedades antes citadas, las cuales están asociadas con la reacción elástica y plástica cuando una fuerza es aplicada, se obtiene la correlación entre el esfuerzo y la deformación del material.

### 2.2.6. Ensayo de impacto (charpy) [5] [8].

Cuando un material que se encuentra en reposo y se somete súbitamente a una fuerza, se puede considerar que es sometido a un “impacto”.

El propósito del ensayo al impacto es: determinar la cantidad de energía absorbida por el material cuando se somete a una fuerza repentina y violenta, en la que la velocidad de deformación es extremadamente rápida.

En la figura 8 se observa un ensayo de impacto “charpy”, donde  $h_0$  = a la altura inicial del péndulo y  $h_f$  = la altura final del mismo.

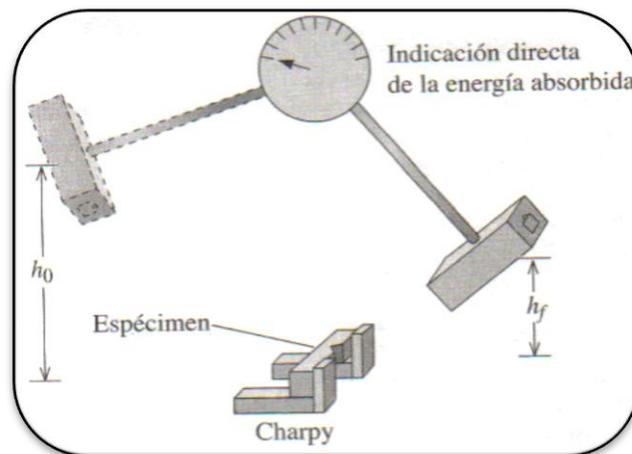


Fig. 8 prueba de impacto (charpy).

### 2.3. Estado del arte.

Enseguida se resumen los trabajos más importantes de los cuales se toma la información para la propuesta de éste trabajo.

2.3.1. En el año 2008, en el Laboratorio Nacional de Lawrence Livermore, Estados Unidos, R. Becker, T.J. Orzechowski, H.K. Springer y A.J. Sunwoo, realizaron un trabajo de investigación titulado: ““Investigation Of The Fracture And Fragmentation Of Explosively Driven Rings And Cylinders”[9].

Fabricaron cilindros y anillos de acero aleado “aermet 100” (o aermet para herramienta) y AISI 1018, los cuales fueron expuestos a una explosión en su interior, con el objeto de analizar el proceso de fragmentación y determinar las causas de las fallas para cada acero.

La composición de los aceros que estudiaron se describe en la tabla 5.

En la figura 9 se muestra una imagen de los aceros que utilizaron, usando la técnica de microscopia electrónica de barrido.

La micrografía “a” corresponde al acero aleado aermet 100, donde se observa una matriz martensítica con fases secundarias de carburos metálicos.

La micrografía “b” corresponde al acero AISI 1020, donde se observa una matriz de ferrita y “colonias” de perlita, así como inclusiones de MnS.

Tabla 5. Composición química de los aceros utilizados en el estudio.

Aleación	Carbono%	Nickel%	Cobalto%	Cromo%	Molybdeno%	Hierro%
Aermet 100	0.23	11.1	13.4	3	1.2	Resto
AISI 1020	0.18-0.23	0	0	0	0	Resto

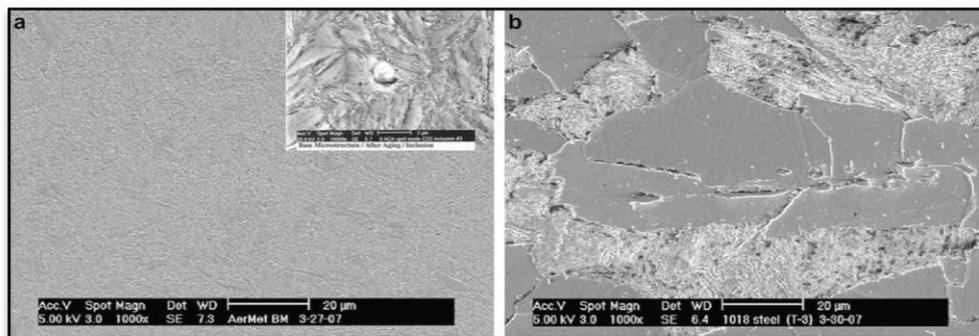
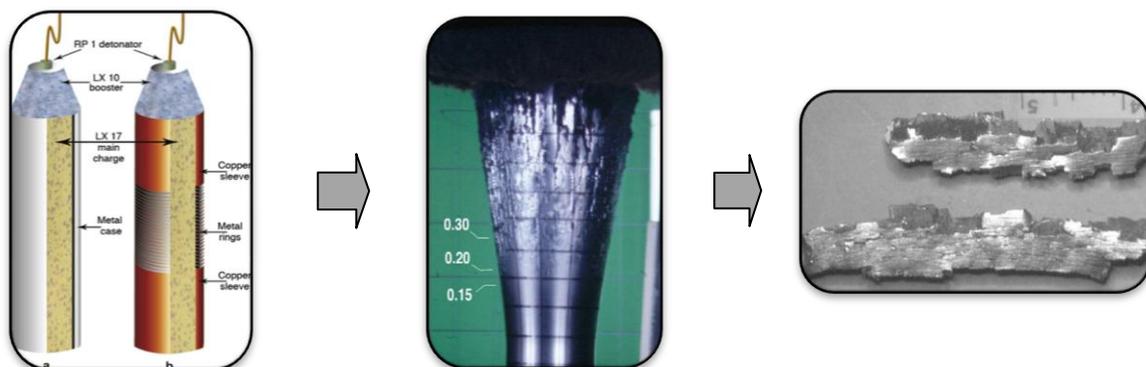


Fig. 9 Imágenes de microscopia electrónica de barrido, de los aceros Aermet 100 y AISI 1018.

La metodología que utilizaron fue la siguiente:



Fabricación de cilindros y relleno con explosivo “Lx 10”

Destrucción del cilindro por detonación del explosivo

Análisis metalográfico de los fragmentos

En las figuras 10 y 11 se observan las micrografías de los fragmentos correspondientes al acero Aermet 100 y AISI 1018, respectivamente.

Las principales observaciones a las que llegan éstos autores, en el caso del acero Aermet son:

1. La imagen “a” muestra un corte transversal de un fragmento. Evidenciando poca deformación de la martensita.
2. Las imágenes “b” y “c” evidencian que las fracturas crecen a lo largo de un “bandeamiento” muy estrecho, del orden de  $\leq 1\mu\text{m}$  y mucho más duro que el resto de material que lo rodea.
3. La imagen “d” muestra que la perturbación en la superficie del fragmento es ocasionada por la intersección de dos “bandeamientos”.

Y en el acero AISI 1018, son:

1. La imagen “a” muestra un corte transversal de un fragmento. Se evidencian fracturas y espaciamentos internos.
2. La imagen “b” evidencia una significativa deformación de la perlita y ferrita.
3. La imagen “c” muestra que las inclusiones de MnS ocasionan micro espaciamentos internos, los cuales se asocian con la generación y proliferación de las fracturas del material.
4. La imagen “d” muestra una fractura; a diferencia del aermet **no es un bandeamiento** y es más amplia ( $\geq 10\mu\text{m}$ ).

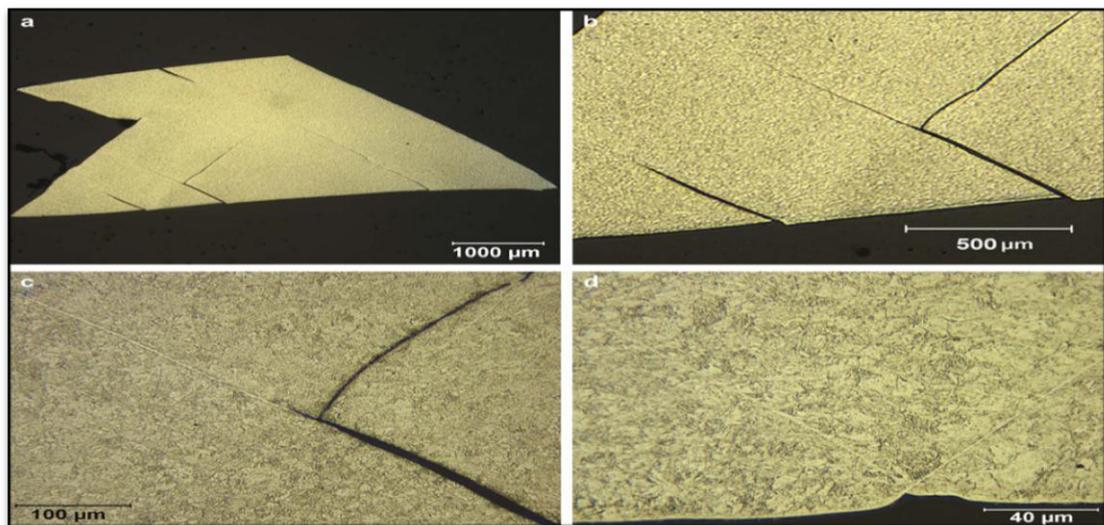


Fig. 10 Micrografía de fragmento de acero aermet 100.

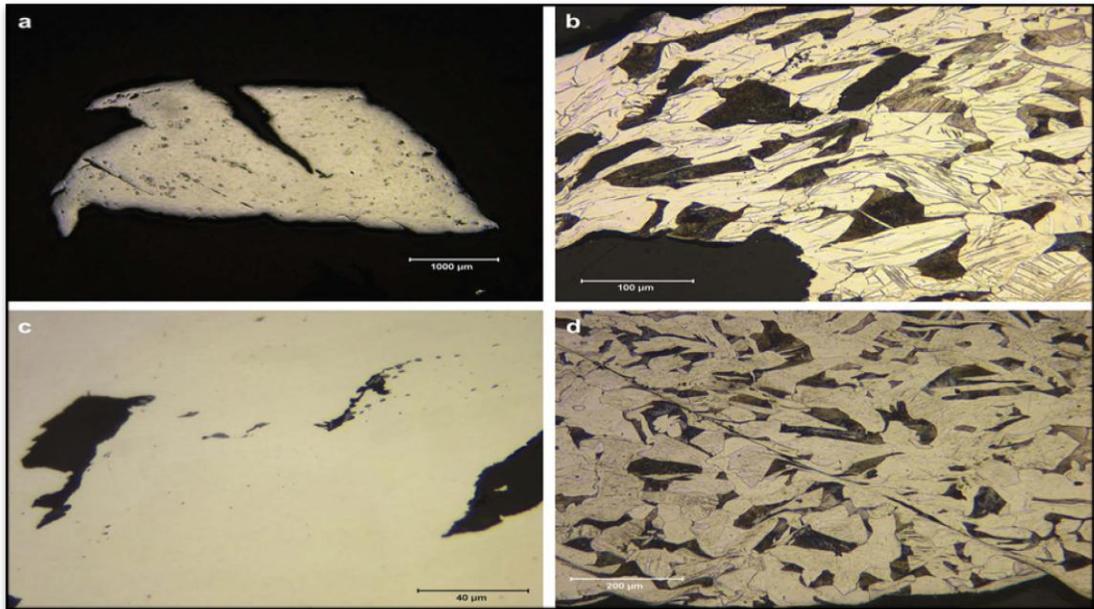


Fig. 11 Micrografía de fragmento de acero AISI 1018.

2.3.2. En el año 2006, en los Estados Unidos de America, V.M. Gold, E.L.I. Baker, W.J. Poulos y B.E. Fuchsse, desarrollaron un trabajo titulado: "Pafrag Modeling Of Explosive Fragmentation Munitions Performance." [10]

El objetivo de su trabajo fue desarrollar un modelo para predecir la fragmentación de municiones por explosión. Validando dicho modelo con pruebas destructivas de ojivas de acero "endurecido" de composición química y proceso de fabricación no especificado.

La fig. 12 muestra una fotografía de la ojiva (que no es otra cosa que un recipiente similar al de nuestro trabajo).

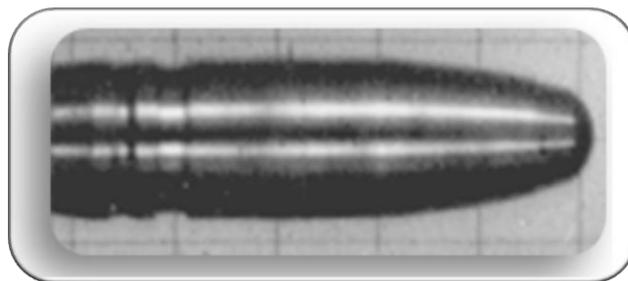


Fig. 12 fotografía de ojiva de acero endurecido.

Al igual que en el trabajo descrito en el punto 2.2.1. Destruyeron el recipiente (ojiva) con la detonación de un alto explosivo y procedieron a realizar un análisis de los fenómenos relacionados con la fragmentación.

En la figura 13 se muestra una imagen con rayos “x” a 27  $\mu$ seg. y 45  $\mu$ seg., así como una fotografía con cámara rápida a 27  $\mu$ seg.

Las principales observaciones a las que llegaron en su trabajo, son las siguientes:

1. Existe una significativa diferencia en la forma y los tamaños promedio de los fragmentos generados en las partes curva (nariz) y cilíndrica del cuerpo de la ojiva (recipiente).
2. En la parte cilíndrica, la mayor parte de las fracturas son en dirección axial al cuerpo la ojiva, lo cual provoca una “lluvia” de fragmentos con forma de “astillas” y orientados axialmente.
3. Por otro lado, en la parte curva, conocida como “nariz” de la ojiva, la orientación de las fracturas es aleatoria y la distancia entre las fisuras es más corta, lo cual provoca una “lluvia” de pequeños y compactos fragmentos de formas aleatorias.

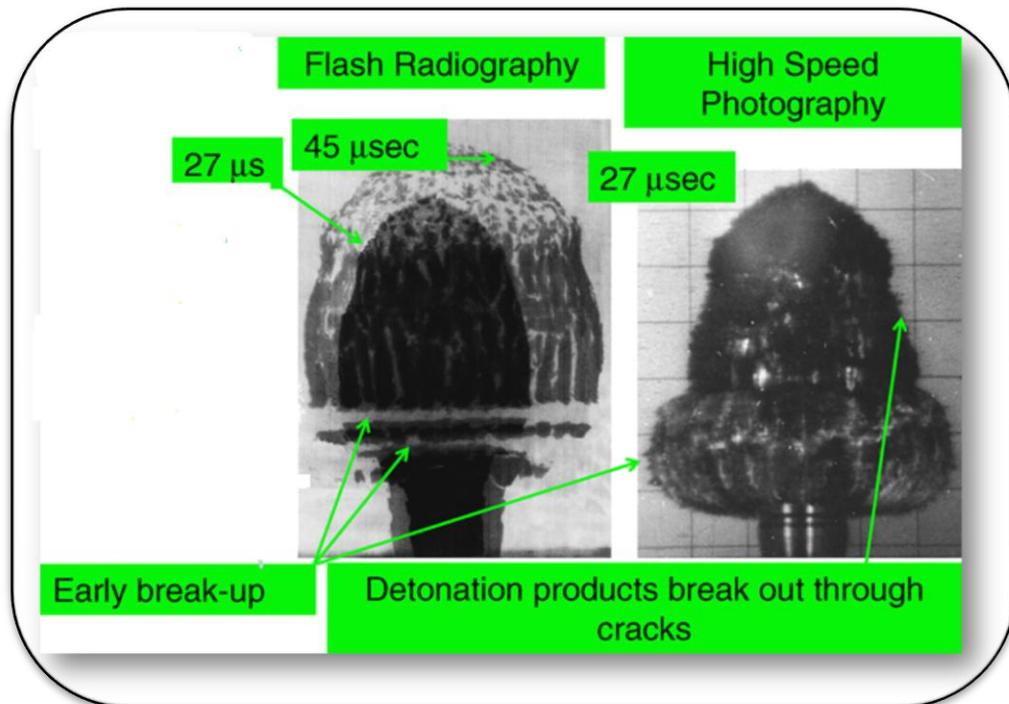


Fig. 13. Radiografía y fotografía de la ojiva (recipiente) durante su fragmentación.

2.3.3. En el año 2001, la empresa estadounidense “tank-automotive & armaments command”, desarrollo un proceso de fabricación para la ojiva de guerra (warhead) “OCSW”. [11]

Durante el desarrollo del nuevo proceso de manufactura, la citada empresa comparó la fragmentación de su ojiva (en forma de recipiente) utilizando como materia prima los aceros: AISI 9260, AISI 1340, AISI 1090, AISI 4340 así como un acero especial (de uso militar) desarrollado en los 60’s denominado como “hf-1”; el proceso de manufactura utilizado es el descrito en la figura 14.

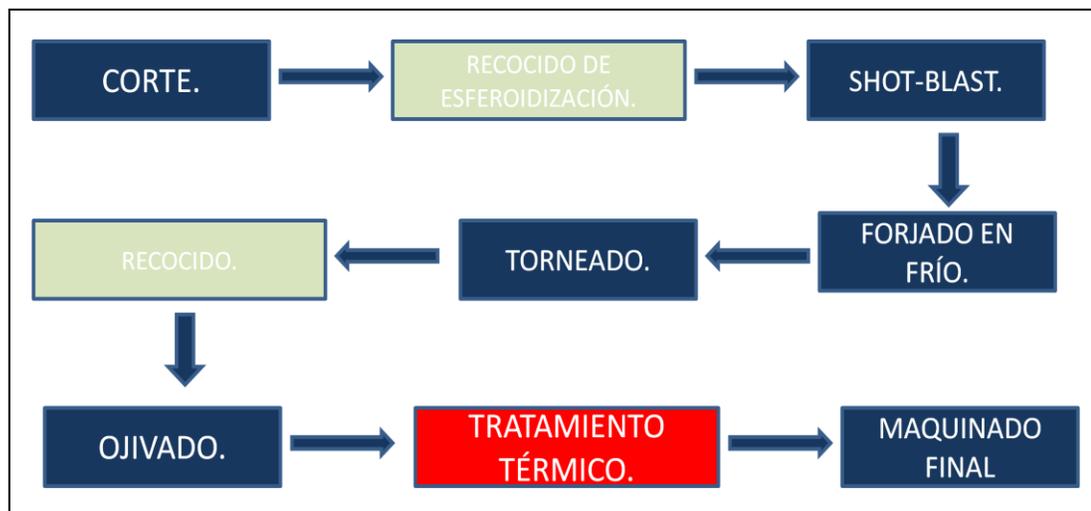


Fig. 14. Esquema del proceso de fabricación de la ojiva OCSW.

En la figura 15. Se observa la transformación desde el forjado hasta producto terminado de la ojiva (recipiente) ocsw.



Fig. 15. Diferentes etapas del proceso de fabricación del cuerpo de la ojiva (recipiente) OCSW.

Al igual que en los trabajos descritos en 2.2.1 y 2.2.2, se provocó la fragmentación de la ojiva (recipiente) ocsw por medio de la detonación de un alto explosivo alojado en su interior.

Como se observa en la figura 16, los fragmentos se agruparon en cinco grupos de acuerdo a su tamaño.

La conclusión a la que llegó dicha empresa, es que el acero AISI 1340, seguido por el acero AISI 9260, generaron la mayor cantidad de fragmentos

2.3.4. Con fecha 29 de julio del 2009, Adnan Calik de la universidad Demirel Süleyman de Turkia, publicó un trabajo titulado: "Effect of cooling rate on hardness and microstructure of AISI 1020, AISI 1040 and AISI 1060 steels". El objetivo de su trabajo fue determinar el efecto de la

velocidad de enfriamiento en la microestructura y propiedades mecánicas de los referidos aceros, para el efecto se aplicó un enfriamiento en agua, en aire y en el horno; llegando a los resultados indicados en las tablas 6 y 7.[12]

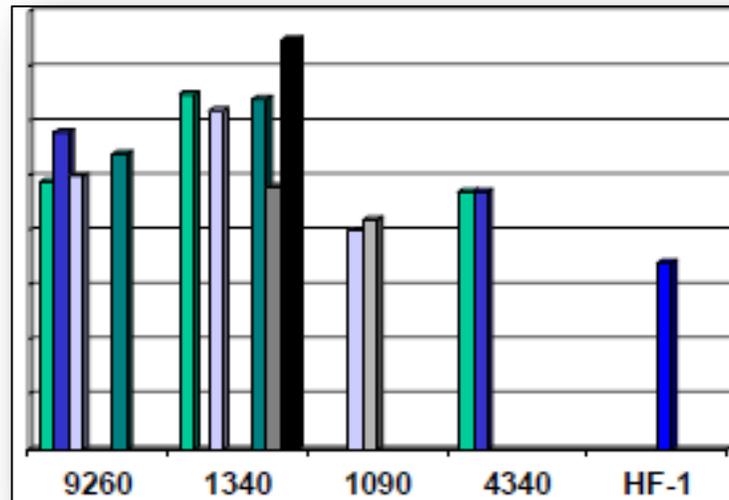


Fig. 16. Grafica donde se muestra la cantidad de Fragmentos por grupo vs. Tipo de acero.

Tabla 6. Porcentajes de fases presentes después de los tratamientos térmicos.

T.T.	Tipo de acero. (AISI)	Ferrita. (%)	Perlita (%)	Martensita (%)	Austenita retenida (%)
Temple en agua.	1020	15	70	5	10
	1040	20	60	20	-
	1060	5	60	30	5
Enfriamiento en aire	1020	45	55	-	-
	1040	30	50	20	-
	1060	30	65	5	-
Enfriamiento en horno	1020	55	45	-	-
	1040	50	40	-	10
	1060	50	50	-	-

Tabla 7. Valores de la microdureza de los aceros después de varios T.T.

Tipo de acero (AISI).	Dureza (HV <sub>0.1</sub> )		
	Temple en agua	Enfrto. en aire.	Enfrto. en horno
1020	476	149	125
1040	521	166	149
1060	610	203	167

Después de analizar los resultados, el autor llegó a las siguientes conclusiones:

1. Debido a la que la microestructura de los aceros al carbono, en su mayoría, es ferrita-perlita, tienen un buen balance entre resistencia y ductilidad.

2. La microdureza de los aceros al carbono se incrementa conforme sea mayor la velocidad de enfriamiento.
3. La microdureza se incrementa conforme aumenta el contenido de perlita en la estructura.
4. La microdureza se incrementa de manera muy rápida al aumentar el contenido de martensita en la microestructura.
5. De manera general, la microdureza se incrementa por el refinamiento de las fases primarias después de un enfriamiento rápido.
6. El incremento de la microdureza después del temple en agua, puede ser explicado por el aumento de las fases perlita y martensita en la microestructura.
7. La dureza asociada a la martensita, se incrementa al aumentar el contenido de carbono en los aceros.
8. Los tratamientos térmicos (calentamiento y enfriamiento) son utilizados con el fin de obtener características específicas en los aceros, como por ejemplo: mejorar la ductilidad, incrementar la dureza, remover esfuerzos residuales, etc.

### 2.3.5. Estadística internacional de los procesos de manufactura. [13]

Al realizar una estadística de los procesos de manufactura utilizados en más de 20 países para la fabricación de cuerpos de granadas (recipientes) en los años 2004 y 2005, se llegó a las siguientes conclusiones:

1. Aproximadamente un 50 % de los recipientes utilizados como cuerpo de granada de mortero, son fabricados utilizando proceso de forjado (en frío o caliente) con o sin tratamiento térmico y el otro 50 % es por fundición.
2. Para la fabricación de recipientes de granadas sometidas a mayores esfuerzos durante el tiro, como las de obusero, el 100% es fabricado por forjado en caliente con tratamiento térmico.

En la figura 17 se observa la estadística descrita en el párrafo anterior.

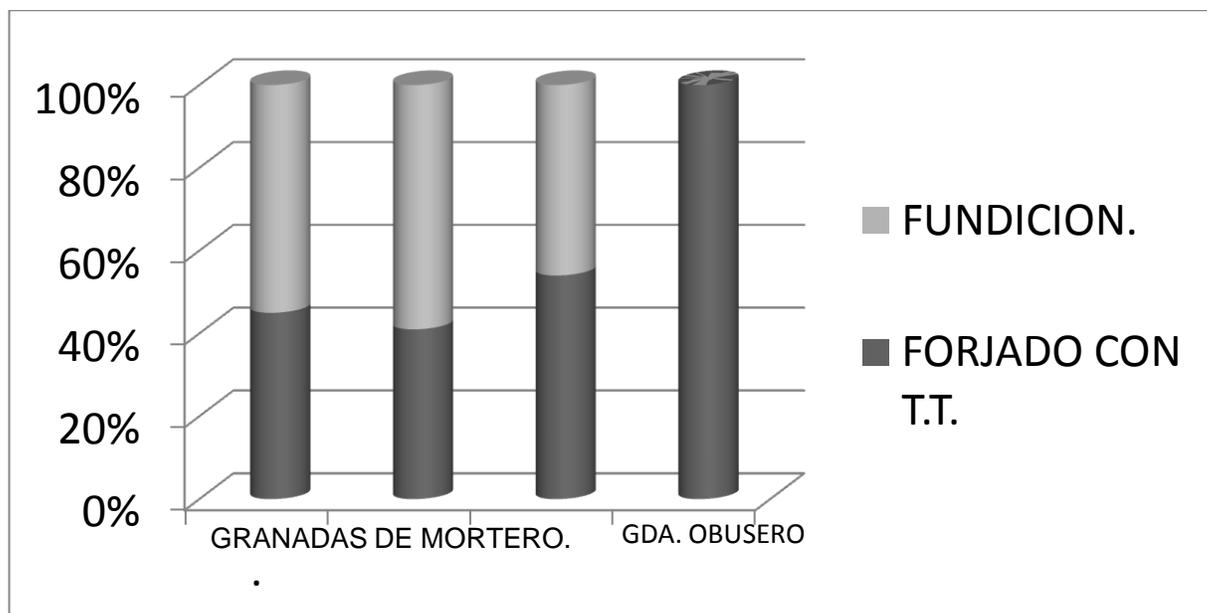


Fig. 17. Estadística de procesos de fabricación utilizados en más de 20 países para la fabricación de granadas de mortero 60 mm, 81 mm y 120 mm, así como de obusero cal 105 mm.

2.3.6. Ventajas y desventajas de procesos de manufactura utilizados para la fabricación de recipientes. [14]

Se realizando una evaluación de las ventajas y desventajas de 4 diferentes procesos de manufactura utilizados por el ejército de estados unidos para la fabricación de cuerpos de granadas, la síntesis de dicho análisis se muestra en la tabla 8.

Tabla 8. Síntesis de procesos de manufactura de para la fabricación de recipientes (cuerpos de granada) en los Estados Unidos de América.

Proceso.	Ventaja.	Desventaja.
Fundición	Bajo a mediano costo de producción.	Uso limitado a granadas de mortero con calibres de hasta 120 mm.
Forja en frío. Sin tratamiento térmico	Bajo costo de producción.	Alto costo de infraestructura. Limitado a cal. de hasta 81 mm.
Forja en frío. Con tratamiento térmico.	Gran versatilidad por los efectos proporcionados por el tratamiento térmico (en función de su empleo táctico). 60 mm. 81 mm. 120 mm. CAL. 105 mm.	Alto costo de infraestructura y mediano costo de producción. Limitado a cal. de hasta 81 mm.
Forja en caliente y tratamiento térmico.	Gran versatilidad por los efectos proporcionados por el tratamiento térmico (en función de su empleo táctico). Puede ser utilizado en desde pequeños hasta grandes calibres, gracias a que permite realizar embutidos muy profundos.	De mediano a alto costo de producción.

### 3. Metodología experimental.

#### 3.1. Selección de la materia prima.

Después de realizar un análisis de los trabajos desarrollados en el estado del arte (punto 2.2.3), se concluyó que el contenido de carbono de los aceros aleados AISI 1340 y 9260, servirían de referencia para la selección de la materia prima, ya que generaron la mayor cantidad de fragmentos/unidad de masa después de su destrucción por la detonación de un alto explosivo. En ese orden de ideas, se determinó que después del carbono, el segundo elemento de aleación principal de dichos aceros es el manganeso, el cual es utilizado para mejorar la templabilidad de los aceros, por otra parte, en el caso del acero AISI 9260, éste contiene además de manganeso, silicio como tercer aleante de importancia, el cual mejora la maquinabilidad de los aceros.

Por lo descrito anteriormente, no se considera de relevancia para el presente estudio el utilizar aceros con aleación de silicio, ya que los aceros al carbono tienen una excelente maquinabilidad en comparación de uno aleado y adicional a esto, considerando que el espesor de los recipientes piloto es de 3.62 mm y para efectos prácticos, dicho espesor de pared durante el temple es de 1.81 mm gracias a que su geometría es de cilindro, motivo por el cual, tanto las paredes internas como externas estarían en contacto con el aceite (agente de temple), lo cual nos permite prescindir del manganeso u otro elemento, como aleante para mejorar la templabilidad.

En la figura 17 se muestran las curvas de profundidad del temple de aceros AISI 1040 y AISI 1060, se observa que a una profundidad de aprox. 2 mm, el temple ha penetrado de manera aceptable, ya que existe más del 90 % de martensita y la dureza no ha disminuido más del 5 %. [15]

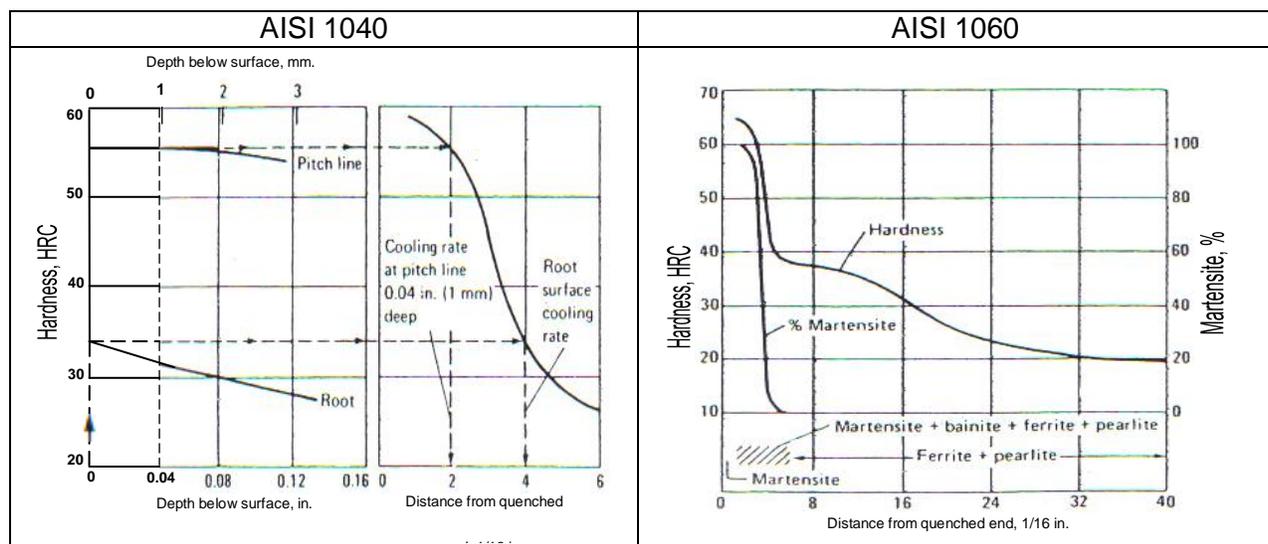


Figura 17. Curvas de profundidad de temple de aceros AISI 1040 y AISI 1060.

Por lo expuesto en los párrafos anteriores, se determinó hacer uso de los aceros AISI 1040 y AISI 1060 para la fabricación de los recipientes piloto.

De la misma forma, se utilizara la materia prima actual (acero al carbón AISI 1020) con el fin de compara los resultados.

### 3.2. Caracterización de la materia prima.

El objetivo consistió en determinar las características mecánicas y metalográficas de las materias primas (en los 3 tipos de aceros), para compararlas con las características obtenidas después de los tratamientos térmicos.

#### 3.2.1. Caracterización mecánica.

##### 3.2.1.1. Ensayo de impacto (prueba charpy) [8].

Éste ensayo es de suma relevancia en el presente trabajo, ya que es el que más asemeja las condiciones de uso del recipiente (a pesar de que el explosivo detona en el interior del mismo a aprox. 4400 m/s muy superior a la velocidad de deformación del ensayo charpy).

Los criterios para la ejecución del ensayo de impacto serán de conformidad a lo establecido en la norma “ASTM E 23-02 a”.

Se fabricaron 3 probetas por cada tipo de acero con las dimensiones que se indican en la figura 18.

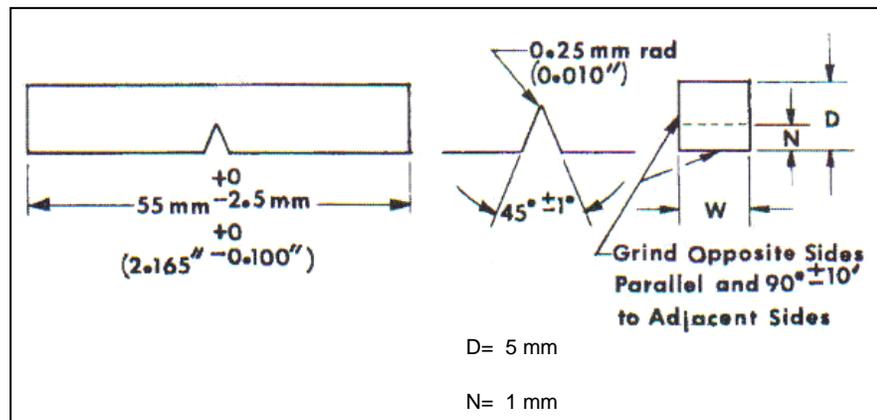


Fig. 18. Probeta para ensayo de impacto “charpy” (Subtamaño tipo “a”).

##### 3.2.1.2. Ensayo de dureza [6].

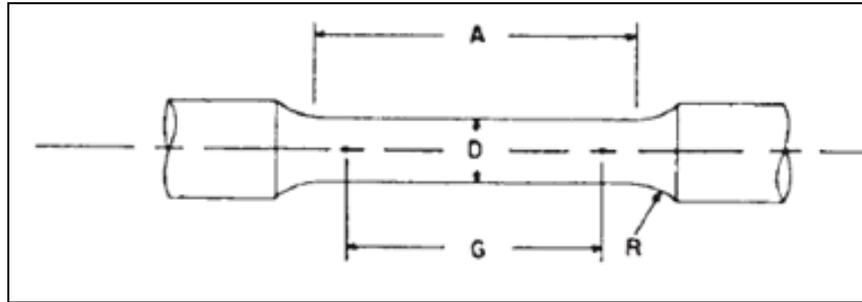
El ensayo de dureza se realizara de conformidad a lo establecido en la norma “ASTM E 18”, utilizada para medir la dureza Rockwell.

Se realizarán 10 lecturas de dureza por cada uno de los aceros.

##### 3.2.1.3. Ensayo de resistencia a la tensión [7].

El criterio para la toma de muestras, fabricación de las probetas y la técnica del ensayo será realizado conforme a la norma ASTM E 8-04.

Se fabricaran 3 probetas por cada tipo de acero con las dimensiones que se indican en la figura 19.



A=19.05 mm; D= 4.06 ± 0.07 mm; G= 16.25 ± 0.12 mm R= 3.9 mm

Fig. 19 Probeta para el ensayo de resistencia a la tensión (subtamaño proporcional al estandar).

### 3.2.2. Caracterización microestructural.

#### 3.2.2.1. Fases presentes.

Se tomaron diversas fotomicrografías por cada tipo de acero y a diferentes aumentos, para el efecto se utilizó un microscopio óptico, el objetivo es identificar las fases presentes.

#### 3.2.2.2. Tamaño de grano.

Se realizó la medición del tamaño de grano de cada uno de los aceros, de conformidad a lo establecido en la norma "ASTM E 112-96"; para el efecto se tomaron micrografías con diversos aumentos con microscopio óptico por cada tipo de acero.

#### 3.2.2.3. Análisis cualitativo de inclusiones.

Se realizó la identificación del tipo de inclusiones presentes en la materia prima, en cada uno de los aceros, de conformidad a lo establecido en la norma NMX-B-308-1987, con la finalidad de identificar si existe relación entre éstas y la iniciación y propagación de las fracturas.

### 3.3. Diseño y fabricación de los recipientes.

En el presente trabajo se consideró fabricar por torneado, un lote de recipientes de un tamaño más pequeño al de producción industrial, los cuales denominamos como "**recipientes piloto**", con un espesor que oscila en el rango de 3.55 a 3.70 mm. Por las siguientes consideraciones:

1. En los recipientes de producción industrial (munición de mortero), denominados como “**recipientes estándar**”, su espesor mínimo de pared está comprendido en un rango de 2.44 mm a 4.8 mm.
2. La composición química de la materia prima (contenido de carbono principalmente) y el tratamiento térmico aplicado a éste, son las variables que definirán, principalmente, las propiedades mecánicas y microestructurales para la mejora de la fragmentación.
3. Por razones de eficiencia en el uso de la materia prima y del proceso de producción.
4. Por la factibilidad de realizar las pruebas de campo en las instalaciones de la industria militar (Santa Fe, México D.F.). En el caso de haber utilizado el “recipiente estándar”, habría sido necesario acudir a los campos de tiro en Santa Gertrudis, Chihuahua, prolongando los resultados de los ensayos, debido a la complicación en la logística y trámites administrativos.

En la figura 20, se observa un dibujo con las dimensiones de uno de los recipientes piloto. Se excluyen los dibujos de las tapas, las cuales son comunes a todos los recipientes y fueron maquinadas a partir de una barra de acero AISI 1018.

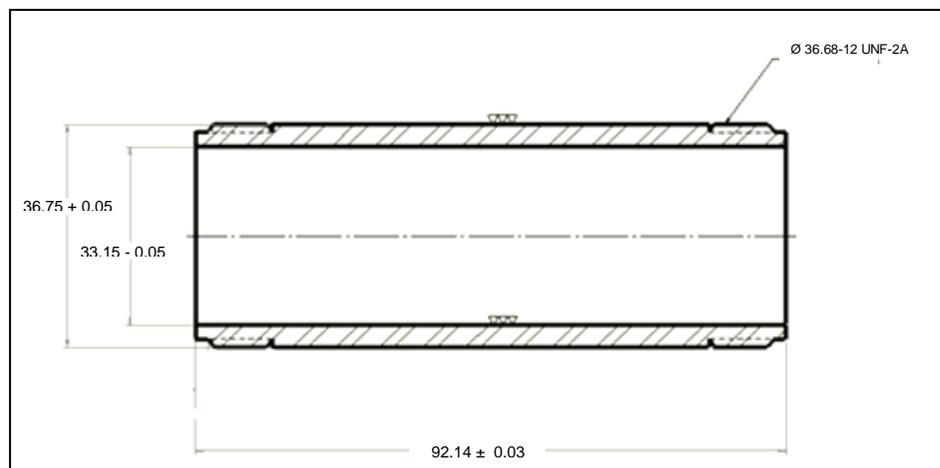


Fig. 20. Dibujo del cuerpo del “recipiente piloto”.

En la figura 21, se observa un esquema del recipiente piloto ensamblado y con una carga de alto explosivo en su interior y en la figura 22 se muestran una fotografías con de uno de los recipientes cargados con explosivo, en la tapa superior (lado izquierdo en la foto “A”) se observa ensamblada la espoleta, siendo ésta un dispositivo diseñado para iniciar la detonación y en la tapa inferior (lado derecho de la foto “A”), se observa un perno soldado a ésta el cuál se atornillara en el dispositivo utilizado en las pruebas de campo, en la sección 3.6. “pruebas de campo” se explica a detalle el ensamble y proceso que se siguió.

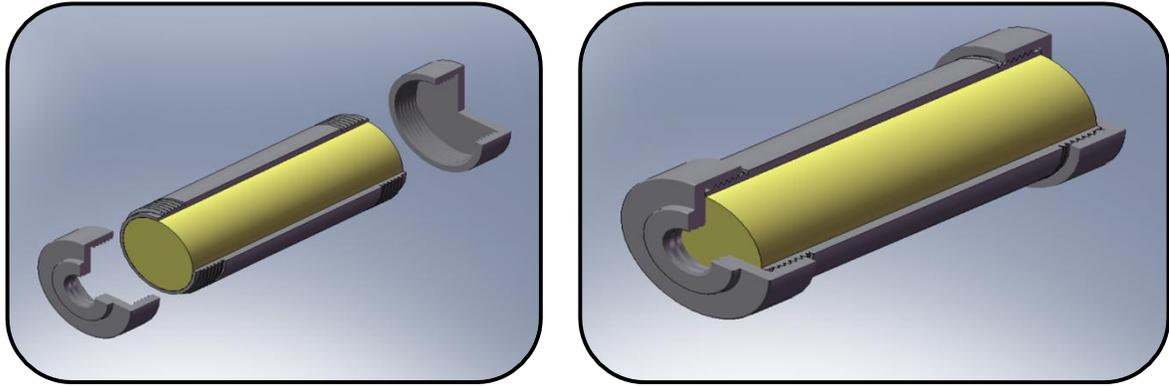


Fig. 21. Recipiente piloto ensamblado y con carga en su interior.



Foto "A"



Foto "B"

Fig. 22. Fotografías del recipiente piloto ensamblado y con carga en su interior.

Se fabricó 1 lote de 24 recipientes piloto, todos ellos con un espesor de pared comprendido en el rango de 3.55 mm a 3.70 mm, cómo se indica en las tablas 9 y 10.

Tabla 9. Fabricación de lotes de recipientes piloto por tipo de acero y tratamiento térmico.

MATERIAL	MATERIA PRIMA	T.T. 1	T.T. 2	T.T. 3	TOTAL
1020	2	2	2	2	8
1040	2	2	2	2	8
1060	2	2	2	2	8
<b>TOTAL</b>					<b>24</b>

### 3.4. Aplicación de los tratamientos térmicos.

Durante el desarrollo del presente trabajo, se realizó una búsqueda en la bibliografía y estudios reportados para determinar los tratamientos térmicos más adecuados en relación con el objetivo del estudio, es decir, modificar la microestructura del recipiente, la cual produzca la mayor cantidad de fragmentos en la detonación. En este orden de ideas, lo que se pretende es "fragilizar el material"

pero respetando los valores de resistencia a la cedencia, elongación y reducción de área del diseñador (punto 2.1.2).

Por tal motivo y según lo establecido en “la guía para tratamientos térmicos de hierros y aceros de la ASTM” [15], se determinó realizar el temple en aceite agitado y, como punto relevante, el revenido se efectuó en el rango de los 260 °C a 370 °C, zona en la cual se produce un fenómeno para los aceros al carbono denominado como “fragilización azul”; dicho evento es causado por “endurecimiento por precipitación”. Dos revenidos se realizarán en dicha zona y un tercero apenas 30 °C por encima del límite superior de la misma.

Los tratamientos térmicos aplicados a cada lote de recipientes son los que se indican en la tabla 10.

Tabla 10. Tratamientos térmicos aplicados a los recipientes piloto.

MATERIAL	AUSTENIZADO	REVENIDO	TEMPLE.
1020	870 °C y 20 min.	300 °C (T.T.1)	EN ACEITE AGITADO
		350 °C (T.T.2)	
		400 °C (T.T.3)	
1040	870 °C y 20 min.	300 °C (T.T.1)	
		350 °C (T.T.2)	
		400 °C (T.T.3)	
1060	870 °C y 20 min.	300 °C (T.T.1)	
		350 °C (T.T.2)	
		400 °C (T.T.3)	

### 3.5. Caracterización del material con tratamiento térmico.

El tipo, técnica y cantidad de piezas por caracterizar será idéntica a las descritas en el punto 3.2. “caracterización de la materia prima”, con excepción de la medición del tamaño de grano, el % de fases presentes y la identificación de inclusiones.

El fin es obtener información para comparar con la obtenida en la materia prima y de esta forma determinar los cambios en las características mecánicas y metalográficas del recipiente después de los tratamientos térmicos.

### 3.6. Pruebas de campo.

Simulando las condiciones a las que trabaja el “recipiente estándar”, se provocó la fragmentación de los lotes de “recipientes piloto”, destruyéndolos por la acción de expansión de los gases producto de la detonación del alto explosivo (hexolita) desde su interior.

Para tal efecto, se acondicionó una fosa de pruebas con tambos de acero llenos de arena, colocando en su interior los recipientes piloto, éstos a su vez, se encontraban confinados en medio de un cilindro de cartón, con la finalidad permitir que el volumen del recipiente se incrementara libremente hasta su fractura (según referencias de la empresa española EXPAL, cuyo objeto es el diseño, fabricación y comercialización de armamento, la expansión es de aproximadamente 50% adicional al volumen inicial). En la figura 22 se observa un esquema de la fosa de pruebas descrita anteriormente.

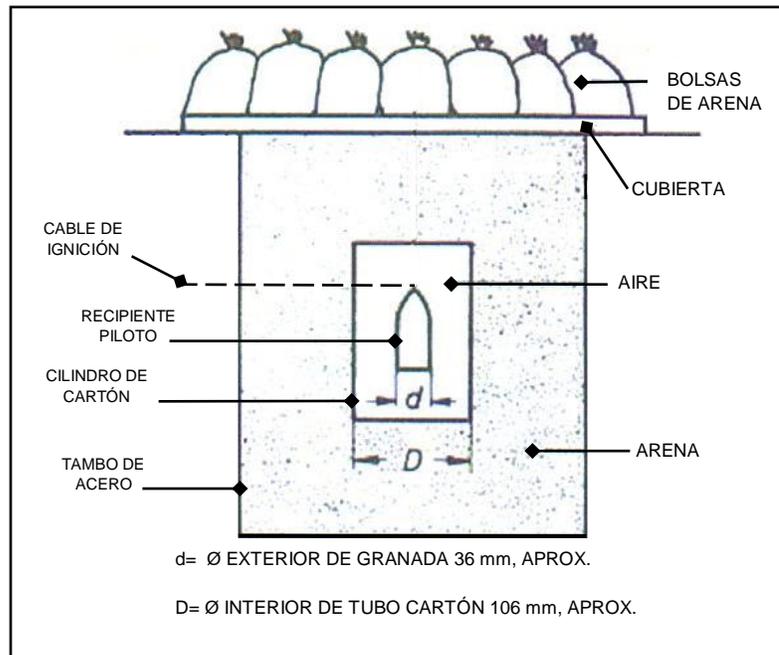


Fig. 22. Esquema de la fosa de pruebas para el ensayo destructivo.

Se conservó una relación de  $D/d=3$ , lo cual garantizó que el recipiente fragmentara libremente, es decir, sin que la arena ejerciera una acción de adosamiento y por tal motivo, una fuerza en sentido contrario a los gases producto de la detonación.

A continuación, se muestra gráficamente la metodología que se siguió durante los ensayos destructivos, como a continuación se describe:

1. Se colocó el recipiente piloto en el fondo de la fosa de pruebas (tambo): atornillando el perno soldado a la base del recipiente con una tuerca, que a su vez se encontraba soldada a la base del tambo (Fig. 23).
2. Posteriormente, se colocó un cordón a la chaveta de la espoleta, la cual actúa como un seguro que retiene el percutor en una posición segura (fig. 24).
3. Como paso siguiente, se colocó el tubo de cartón alrededor del recipiente piloto sellando la boca de dicho tubo con cinta canela para evitar filtraciones (Fig. 25).
4. A continuación se llenó de arena la fosa de pruebas colocando una tapa y un peso adicional en la misma, con la finalidad de adosar la arena (fig. 26).
5. Subsiguientemente, se resguardó el personal y se procedió a la extracción de la chaveta (seguro de la espoleta) por medio del cordón (fig. 27).
6. Posterior a la detonación, se recolectó la arena con los restos del recipiente, en un cernidor, los fragmentos se recuperaron por medio de un imán (figs. 28 y 29).

Es importante hacer referencia a que la malla utilizada en el cernidor, tiene una apertura de sus orificios de aproximadamente 2 mm<sup>2</sup>, siendo ésta una de las razones principales por la cual no se obtuvo una eficiencia del 100% en la recuperación de los fragmentos.



Figura 23. Colocación del “recipiente piloto” en el fondo de la fosa de pruebas (tambo).



Figura 24. Atado del cordón a la chaveta (seguro) de la espoleta.



Figura 25. Colocación del tubo de cartón alrededor del “recipiente piloto”.



Figura 26. Llenado de la “fosa de pruebas (tambo)” con arena y adosado de la tapa con una placa de acero.



Figura 27. Extracción de la chaveta (seguro).



Figura 28. Cernido de la arena con los restos del recipiente.



Figura 29. Recolección de fragmentos por medio de un imán.

### 3.7. Caracterización de los fragmentos.

Se seleccionaron 3 fragmentos por cada tipo de acero y tratamiento térmico aplicado, con el fin de realizar su caracterización.

#### 3.7.1. Caracterización de la superficie de fractura.

Se realizaron micrografías de la superficie de fractura de los fragmentos con microscopio electrónico de barrido, con el objeto de identificar patrones de fractura dúctil y/o frágil. Así como comparar dichos resultados por tipo de acero y tratamiento térmico aplicado.

#### 3.7.2. Caracterización microestructural.

Se tomaron micrografías con microscopio óptico de la superficie de los fragmentos, con el fin de identificar los mecanismos de iniciación y propagación de las fracturas en función de la microestructura, así como comparar dichos resultados por tipo de acero y tratamiento térmico aplicado.

### 3.8. Estadística de los fragmentos.

Se realizara un registro y estadística de la relación “numero de fragmentos/peso”, por cada tipo de acero y tratamiento térmico.

El análisis de los resultados, en función del tipo de acero y los tratamientos térmicos, nos permitirá determinar la combinación de “materia prima-tratamiento térmico” más eficiente para generar la mayor cantidad de fragmentos/masa.

#### 4. Resultados obtenidos.

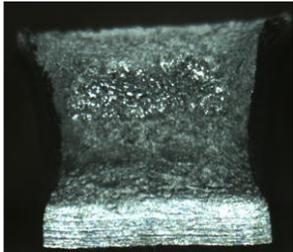
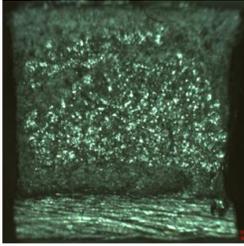
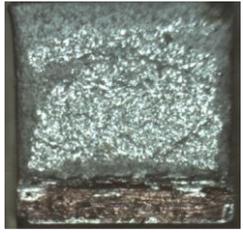
##### 4.1. Caracterización de la materia prima.

##### 4.1.1. Caracterización mecánica.

##### 4.1.1.1. Ensayo de impacto (prueba charpy).

Se realizó el ensayo de impacto a los tres tipos de aceros, con los resultados que se indican en la tabla 11.

Tabla 11. Resultados del ensayo de impacto (charpy).

	Material		
	1020	1040	1060
Fotografía			
Energía absorbida (valor promedio)	18.4 Joules	7.8 Joules	5.42 Joules
Expansión lateral (% de incremento)	18.6 %	7.42 %	5.33 %
Área frágil (%)	20.86 %	51.74 %	58.22 %

Se observa una relación inversa de: a mayor contenido de carbono menor cantidad de energía absorbida en el impacto y menor % de expansión lateral.

Por otro lado, a mayor contenido de carbono, mayor es el área donde ocurre la fractura frágil (zona más brillante del área de la superficie de fractura). En el punto 4.2.1.1. se dan detalles del método gráfico por el cual se calculó el % de área frágil.

##### 4.1.1.2. Ensayo de dureza.

La dureza obtenida es la que se indica en la tabla 12.

Tabla 12. Dureza de las materias primas.

MATERIAL	DUREZA (HRc)
AISI 1020	3 (85 HRb)
AISI 1040	11
AISI 1060	16

Se observa una relación directa de: a mayor contenido de carbono mayor es la dureza; de manera análoga, se comprueba una correcta relación de los resultados obtenidos y lo reportado en la literatura, según el punto 2.2.2.

#### 4.1.1.3. Ensayo de resistencia a la tensión.

Las curvas esfuerzo-deformación (ingenieril), así como los valores de interés de dicho ensayo para este estudio, se muestran en las figuras 30, 31 y 32, y en las tablas 13, 14 y 15, para los aceros AISI 1020, 1040 y 1060, respectivamente.

#### Para el acero AISI 1020.

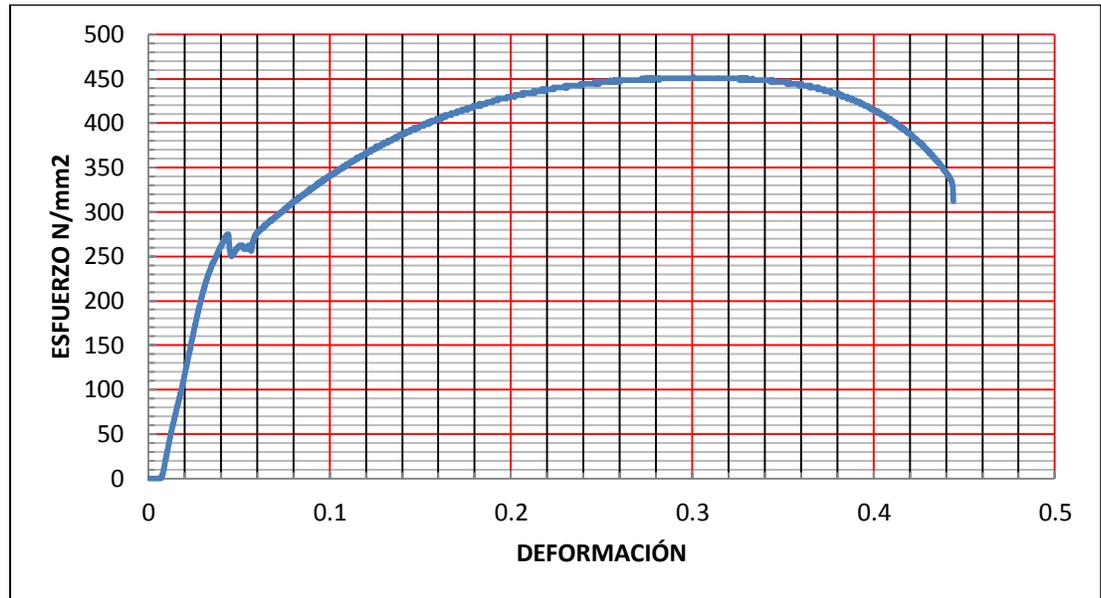


Figura 30. Curva esfuerzo-deformación (ingenieril) del acero AISI 1020 (materia prima).

Tabla 13. Información técnica relevante para el estudio, obtenida del ensayo de tensión del acero AISI 1020.

MATERIAL E IDENTIFICACION DE LA MUESTRA		ACERO AISI 1020; MUESTRA: "1.6"		
TIPO DE ESPECIMEN:		REDONDO (TAMAÑO REDUCIDO: $\varnothing 4.06 \pm 0.07$ mm)		
CARACTERISTICA	RESULTADOS DEL ENSAYO.		REPORTADO EN LA LITERATURA. (PUNTO 2.2.2).	
RESISTENCIA A LA CEDENCIA. (OFFSET 0.2%)	268.48	N/mm <sup>2</sup>	300-353	N/mm <sup>2</sup>
RESISTENCIA A LA TENSION.	450.23	N/mm <sup>2</sup>	401-480	N/mm <sup>2</sup>
ELONGACION.	44.39	% (16.25 mm LONG. DE GAGE.)	36.5	%
REDUCCION DE AREA.	65.23	%	66	%

**Para el acero AISI 1040.**

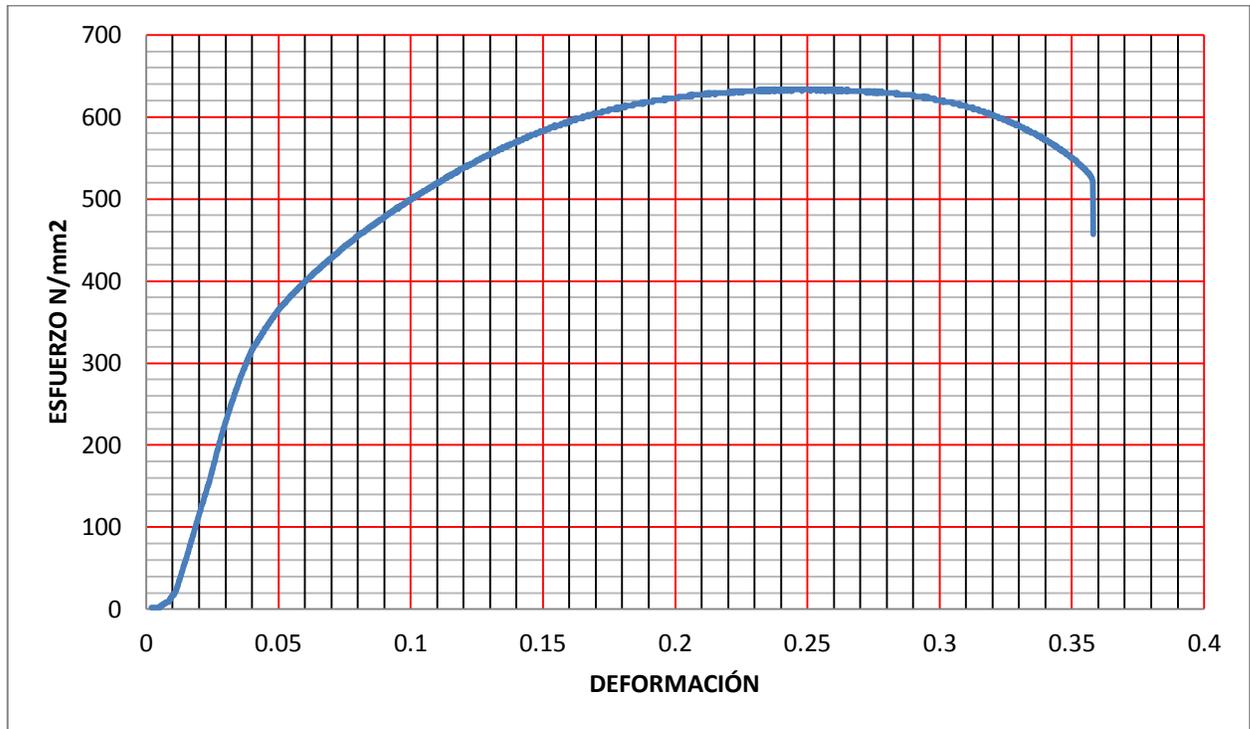


Figura 31. Curva esfuerzo-deformación (ingenieril) del acero AISI 1040 (materia prima).

Tabla 14. Información técnica relevante para el estudio, obtenida del ensayo de tensión, del acero AISI 1040.

MATERIAL E IDENTIFICACION DE LA MUESTRA		ACERO AISI 1040; MUESTRA: "2.4"		
TIPO DE ESPECIMEN:		REDONDO (TAMAÑO REDUCIDO: $\varnothing 4.06 \pm 0.07$ mm)		
CARACTERISTICA	RESULTADOS DEL ENSAYO.		REPORTADO EN LA LITERATURA. (PUNTO 2.2.2).	
RESISTENCIA A LA CEDENCIA. (OFFSET 0.2%)	381.76	N/mm <sup>2</sup>	360-381.	N/mm <sup>2</sup>
RESISTENCIA A LA TENSION.	633.32	N/mm <sup>2</sup>	528-600.	N/mm <sup>2</sup>
ELONGACION.	35.81	% (16.25 mm LONG. DE GAGE.)	28-30	%
REDUCCION DE AREA.	50.43	%	57.2	%

**Para el acero AISI 1060.**

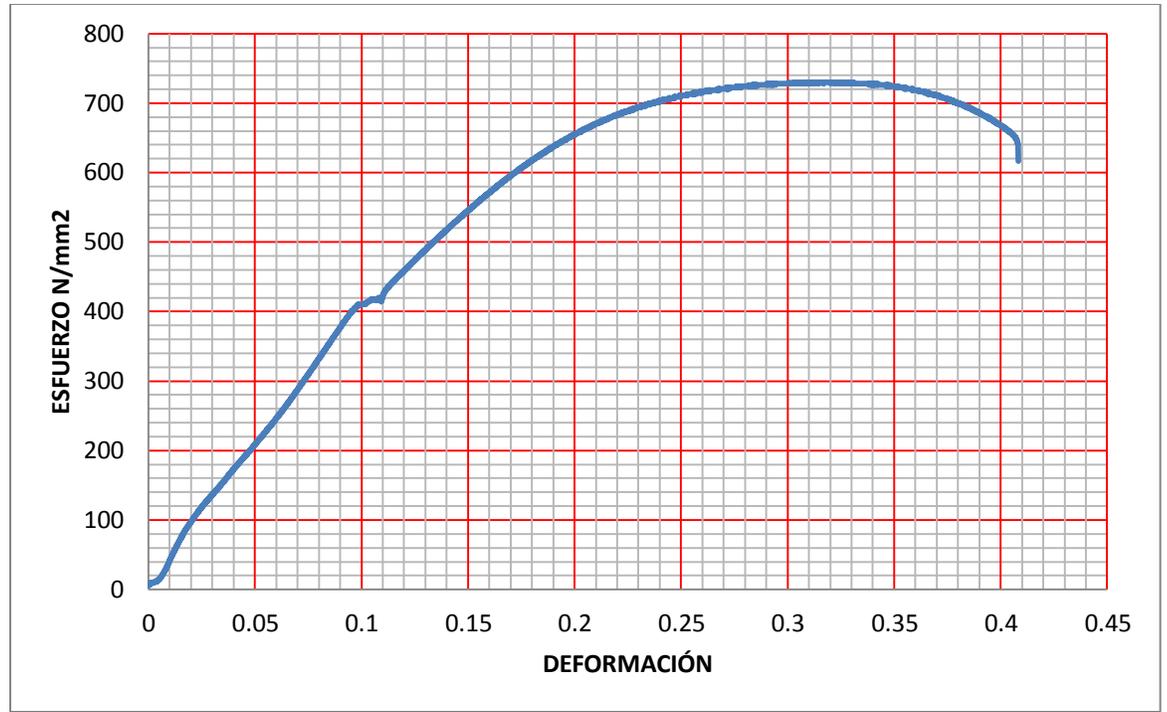


Figura 32. Curva esfuerzo-deformación (ingenieril) del acero AISI 1060 (materia prima).

Tabla 15. Información técnica relevante para el estudio, obtenida del ensayo de tensión, del acero AISI 1060

MATERIAL E IDENTIFICACION DE LA MUESTRA		ACERO AISI 1060; MUESTRA: "3.3"		
TIPO DE ESPECIMEN:		REDONDO (TAMAÑO REDUCIDO: $\varnothing$ 4.06 $\pm$ 0.07 mm)		
CARACTERISTICA	RESULTADOS DEL ENSAYO.		REPORTADO EN LA LITERATURA. (PUNTO 2.2.2).	
RESISTENCIA A LA CEDENCIA. (UYS-LYS)	419.76	N/mm <sup>2</sup>	379-428	N/mm <sup>2</sup>
RESISTENCIA A LA TENSION.	729.86	N/mm <sup>2</sup>	636-798	N/mm <sup>2</sup>
ELONGACION.	40.82	% (16.25 mm LONG. DE GAGE.)	18-23	%
REDUCCION DE AREA.	44.97	%	38.2	%

De la observación y análisis de los ensayos de resistencia a la tensión se concluye que:

1. Los resultados son de una aceptable y coherente relación con los reportados en la literatura.
2. Tanto la resistencia a la cedencia, como la resistencia a la tensión, se incrementan conforme el contenido de carbono aumenta.

#### 4.1.2. Caracterización microestructural.

##### 4.1.2.1. Fases presentes.

#### Acero AISI 1020.

En la figura 33 se muestran dos microfotografías tomadas con un microscopio óptico a 200 x y 1000 x aumentos.

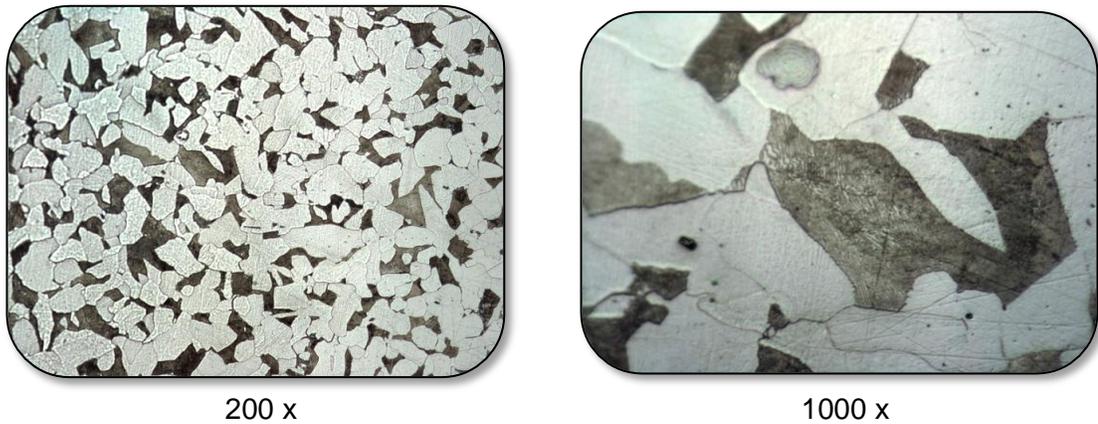


Figura 33. Fotomicrografías a 200 x y 1000 x, del Acero AISI 1020 (materia prima).

A continuación, en la figura 34 se muestra el análisis de % de fases presentes, mismo que fue realizado por medio del software AXIOVISION.

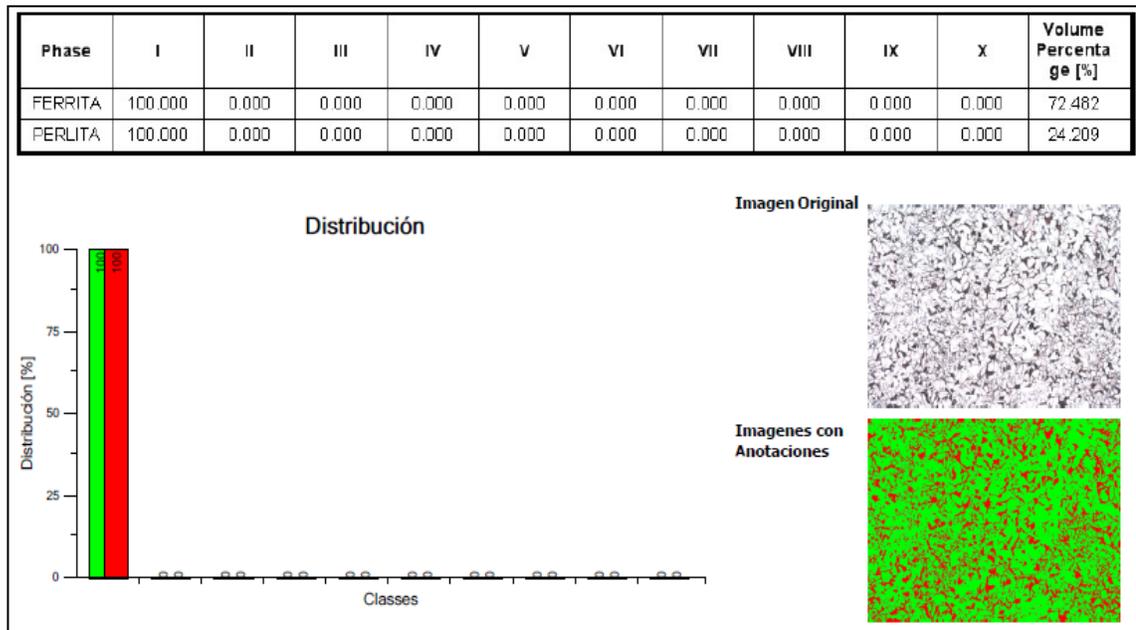
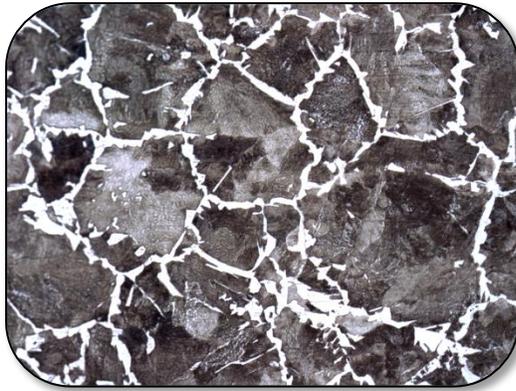


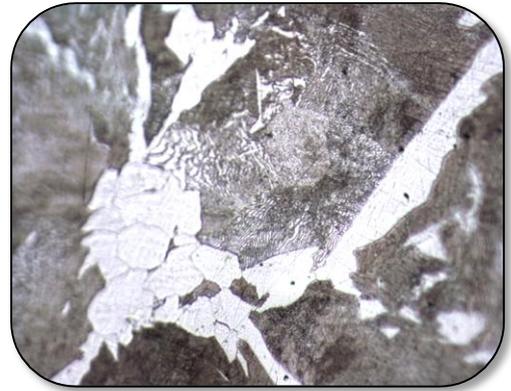
Figura 34. Gráfica con el análisis del % de fases presentes en el acero AISI 1020 (materia prima).

### Acero AISI 1040.

En la figura 35 se muestran dos microfotografías tomadas con un microscopio óptico a 200 x y 1000 x.



200 x



1000 x

Figura 35. Fotomicrografías a 200x y 1000x, del Acero AISI 1040 (materia prima).

A continuación, en la figura 36 se muestra el análisis de % de fases presentes, mismo que fue realizado por medio del software AXIOVISION.

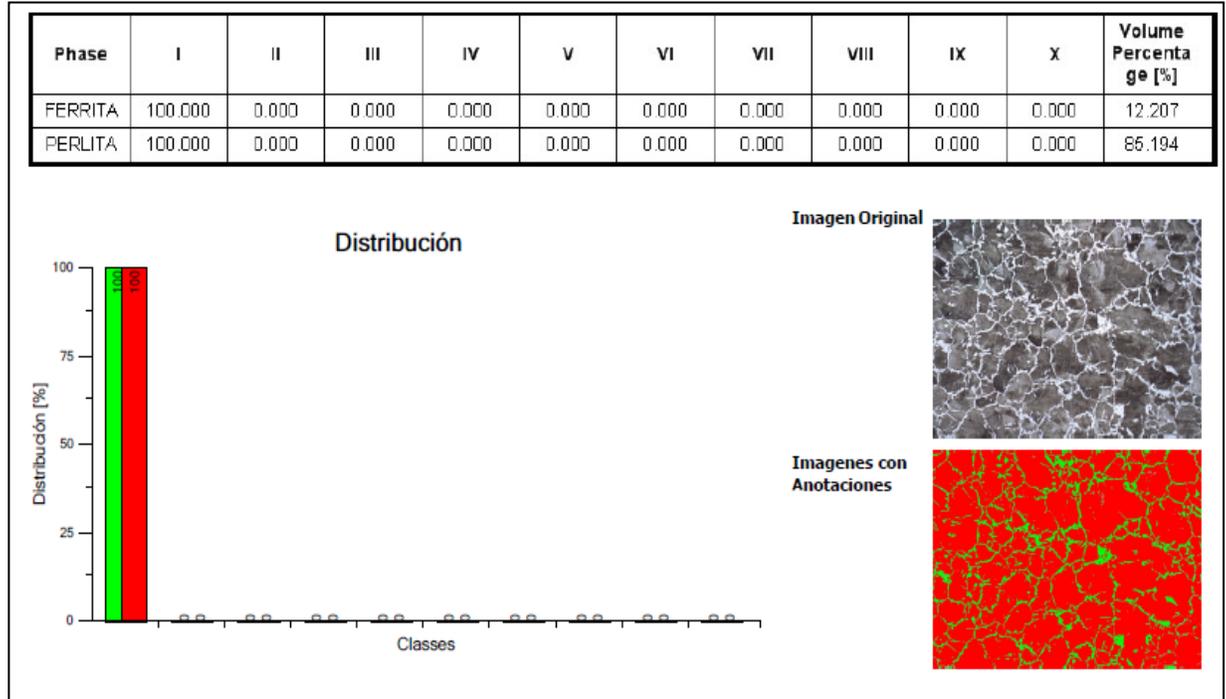


Figura 36. Gráfica con el análisis del % de fases presentes en el acero AISI 1040 (materia prima).

## Acero AISI 1060.

En la figura 37 se muestran dos microfotografías tomadas con un microscopio óptico a 100 y 1000 aumentos.

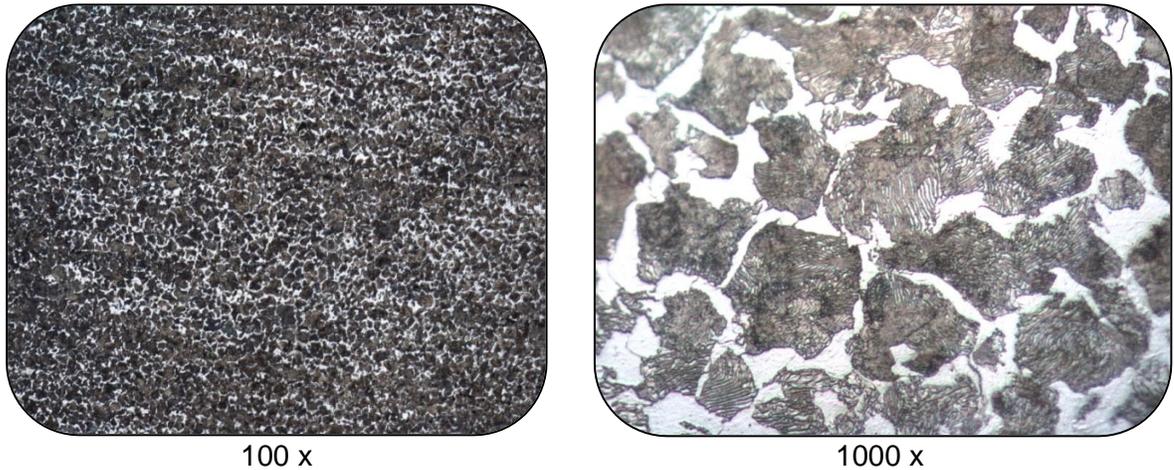


Figura 37. Fotomicrografías a 100 x y 1000 x, del Acero AISI 1060 (materia prima).

A continuación, en la figura 38 se muestra el análisis de % de fases presentes, mismo que fue realizado por medio del software AXIOVISION.

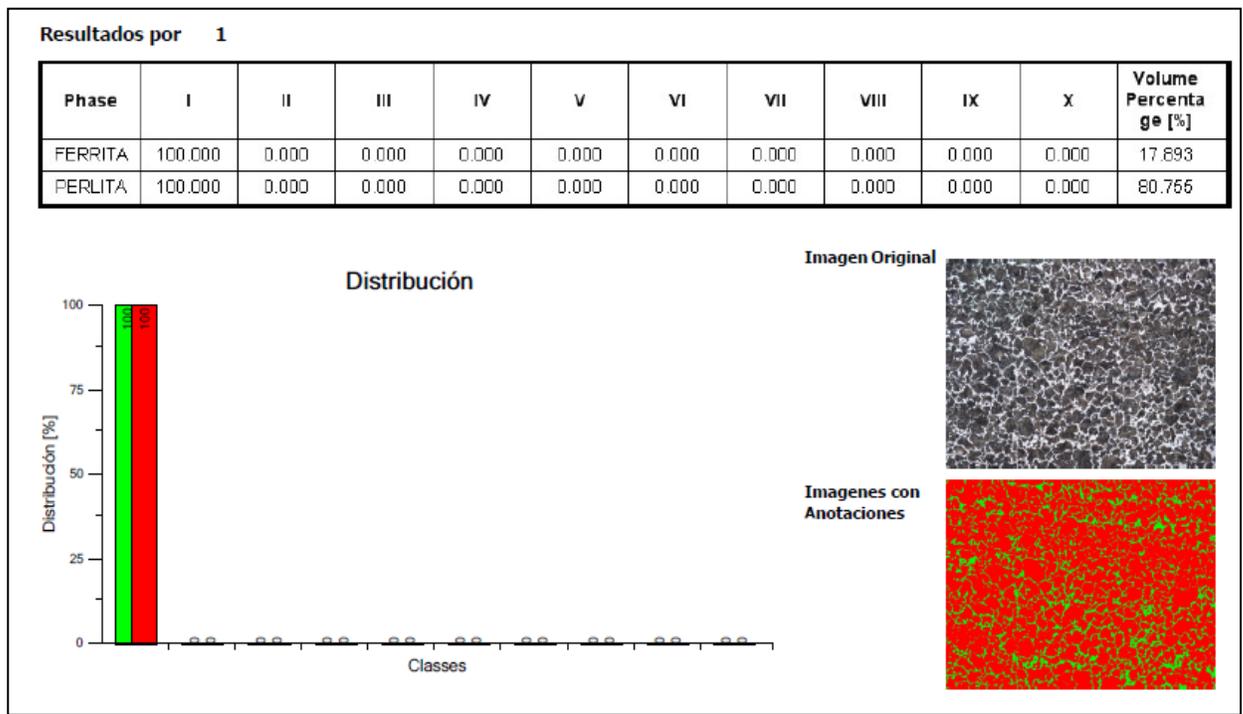


Figura 38. Gráfica con el análisis del % de fases presentes en el acero AISI 1060 (materia prima).

De la observación y análisis de los resultados se llegó a las siguientes conclusiones:

1. La microestructura de los aceros en estudio está constituida fundamentalmente de 2 fases: ferrita y perlita.
2. Conforme se incrementa el contenido de carbono en el acero, la cantidad de fase perlita aumenta.

#### 4.1.2.2. Tamaño de grano.

### Acero AISI 1020.

En la figura 39 se muestra el análisis y determinación del tamaño de grano por medio de un software especial (AXIOVISION).

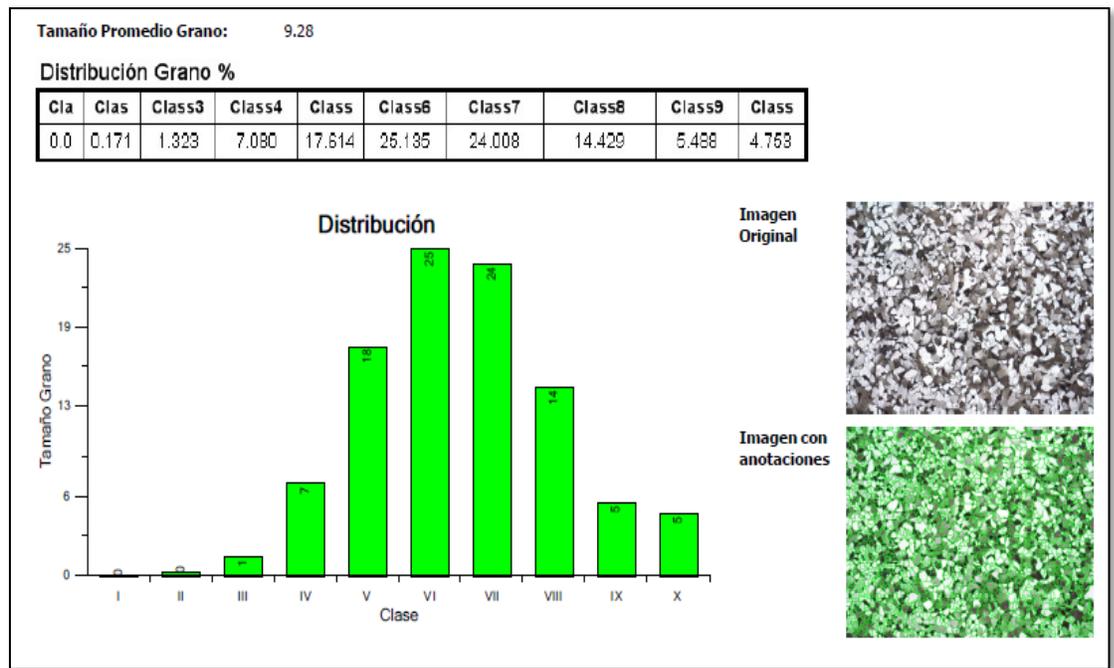


Figura 39. Tamaño de grano del acero AISI 1020 (materia prima).

### Acero AISI 1040.

En la figura 40 se muestra el análisis y determinación del tamaño de grano por medio de un software especial (AXIOVISION).

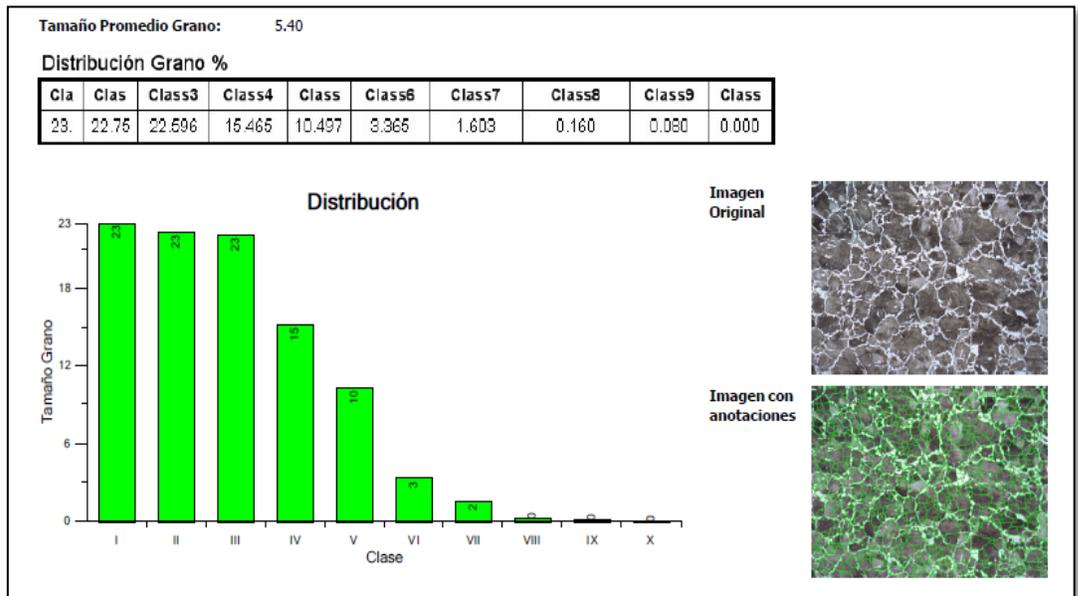


Figura 40. Tamaño de grano del acero AISI 1040 (materia prima).

### Acero AISI 1060.

En la figura 41 se muestra el análisis y determinación del tamaño de grano por medio de un software especial (AXIOVISION).

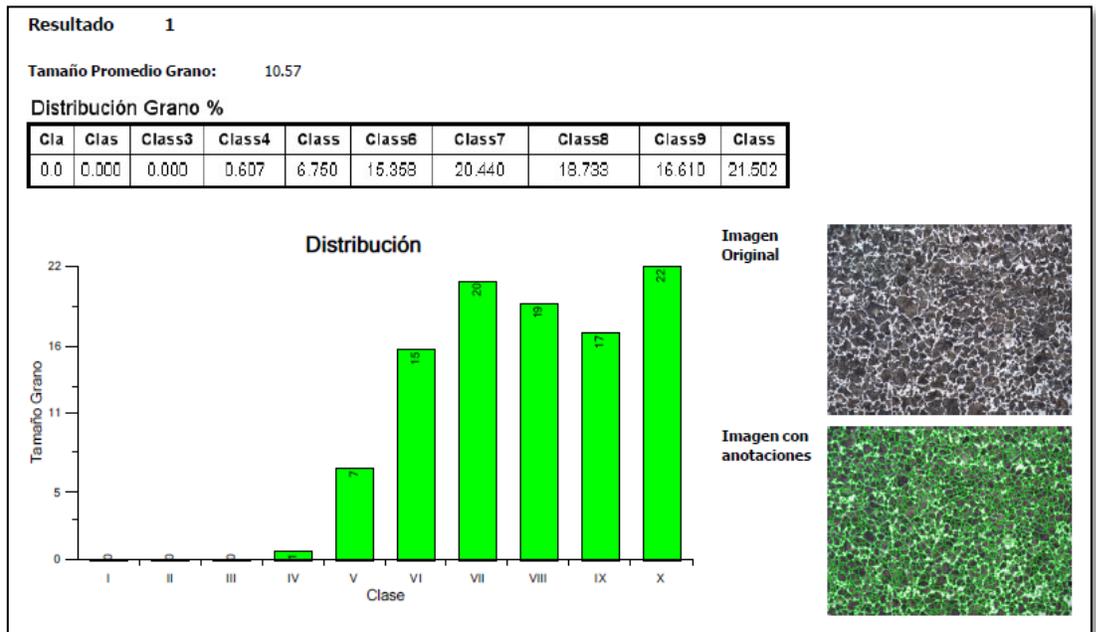


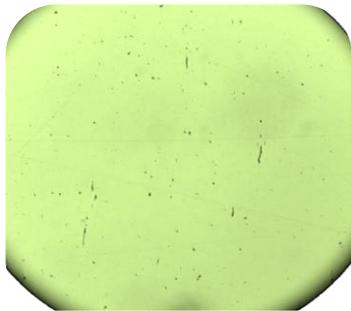
Figura 41. Tamaño de grano del acero AISI 1060 (materia prima).

No se observó algún patrón de relación del tamaño de grano y el contenido de carbono en los aceros, esto se debe a las diferencias entre los procesos de fabricación de cada uno de ellos.

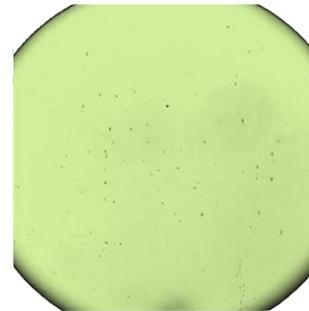
#### 4.1.2.3. Análisis cualitativo de inclusiones.

##### Acero AISI 1020.

En la figura 42 se observa el análisis del tipo de inclusiones presente en este acero.



INCLUSIONES TIPO SULFURO.

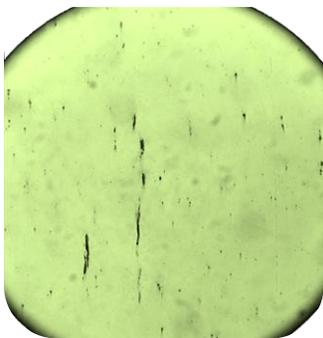


INCLUSIONES TIPO ÓXIDO GLOBULAR

Figura 43. inclusiones en el acero AISI 1020.  
(Fotomicrografías a 100 x)

##### Acero AISI 1040.

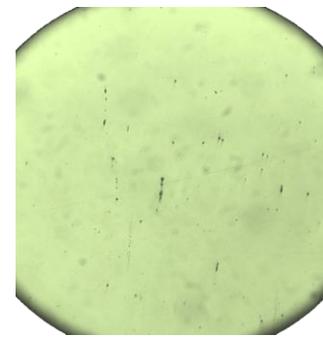
En la figura 44 se observa el análisis del tipo de inclusiones presente en este acero.



TIPO SULFURO.



TIPO ÓXIDO GLOBULAR

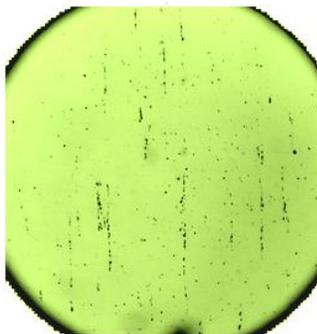


TIPO ÓXIDO DE ALUMINIO

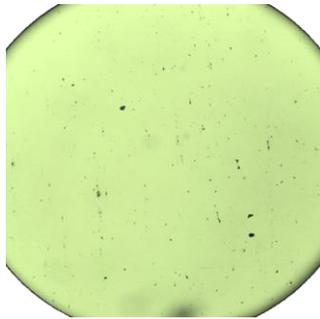
Figura 44. Inclusiones en el acero AISI 1040.  
(Fotomicrografías a 100 x)

### Acero AISI 1060.

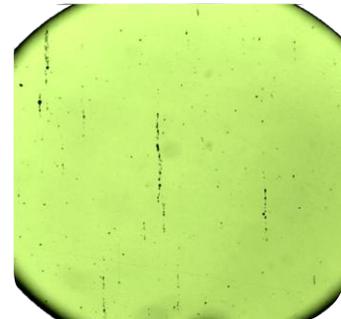
En la figura 45 se observan el tipo de inclusiones presentes en este acero. En la tabla 16 se presenta el resumen los resultados de este análisis.



TIPO SULFURO.



TIPO ÓXIDO GLOBULAR



TIPO ÓXIDO DE ALUMINIO

Figura 45. Inclusiones en el acero AISI 1060.  
(Fotomicrografías a 100 x)

Tabla 16. Resultados del análisis cualitativo del tipo de inclusiones.

Acero	Resultados.
AISI 1020	<ol style="list-style-type: none"><li>1. PRESENTA INCLUSIONES DEL <b>TIPO SULFURO</b> EN SERIES DELGADAS DEL NÚMERO 3 Y EN SERIES GRUESAS DEL NUMERO 2.</li><li>2. PRESENTA INCLUSIONES DEL <b>TIPO ÓXIDO GLOBULAR</b> EN SERIES DELGADAS DEL NÚMERO 3 EN SERIES GRUESAS DEL NÚMERO 2.</li></ol>
AISI 1040	<ol style="list-style-type: none"><li>1. PRESENTA INCLUSIONES DEL <b>TIPO SULFURO</b> EN SERIES DELGADAS DEL NÚMERO 2 Y EN SERIES GRUESAS DEL NUMERO 2.</li><li>2. PRESENTA INCLUSIONES DEL <b>TIPO ÓXIDO GLOBULAR</b> EN SERIES DELGADAS DEL NÚMERO 1 EN SERIES GRUESAS DEL NÚMERO 2.</li><li>3. PRESENTA INCLUSIONES DEL <b>TIPO ÓXIDO DE ALUMINIO</b> EN SERIES DELGADAS DEL NÚMERO 1.</li></ol>
AISI 1060	<ol style="list-style-type: none"><li>1. PRESENTA INCLUSIONES DEL <b>TIPO SULFURO</b> EN SERIES DELGADAS DEL NÚMERO 1.</li><li>2. PRESENTA INCLUSIONES DEL <b>TIPO ÓXIDO GLOBULAR</b> EN SERIES DELGADAS DEL NÚMERO 1 EN SERIES GRUESAS DEL NÚMERO 1</li><li>3. PRESENTA INCLUSIONES DEL <b>TIPO ÓXIDO DE ALUMINIO</b> EN SERIES DELGADAS DEL NÚMERO 4.</li></ol>

De la información anterior se concluye lo siguiente:

1. Las inclusiones tipo sulfuro y oxido globular están presentes en todos los aceros.
2. Las inclusiones tipo oxido de aluminio solo están presentes en los ceros AISI 1040 y 1060.
3. El tamaño de las inclusiones no presenta una relación en función del tipo de acero.

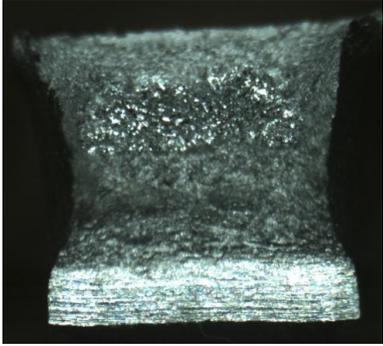
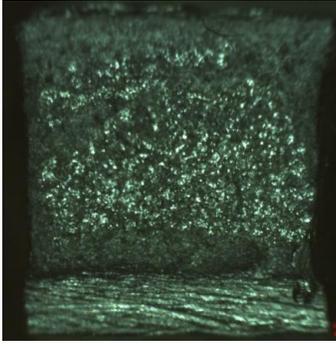
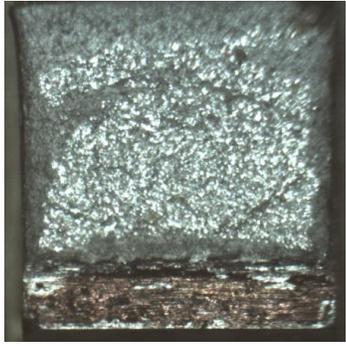
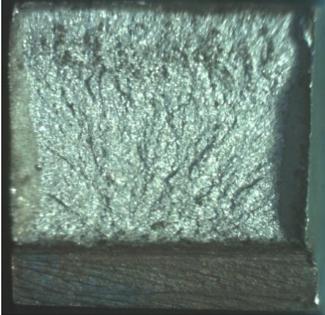
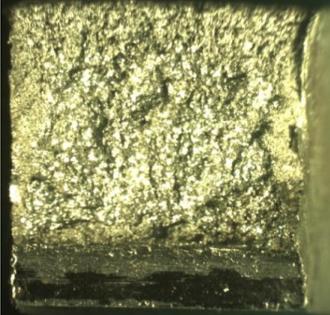
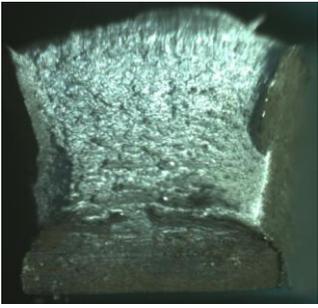
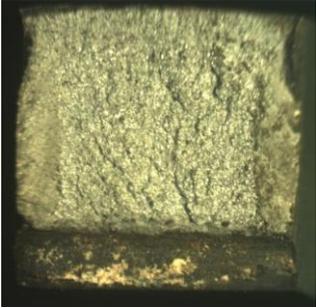
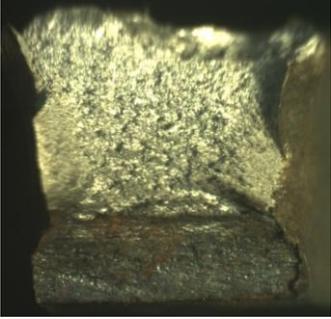
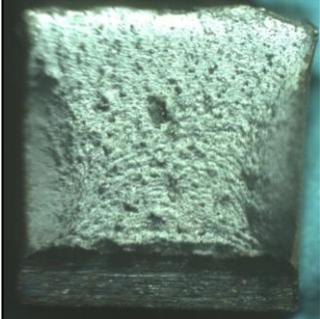
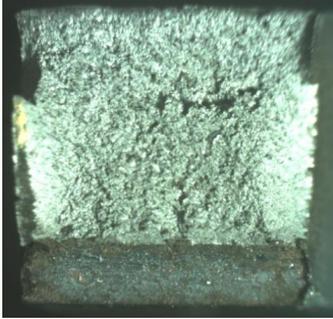
#### 4.2. Caracterización del material con tratamientos térmicos.

##### 4.2.1. Caracterización mecánica.

##### 4.2.1.1 Ensayo de impacto (prueba Charpy).

En la tabla 17 se presenta un resumen de las imágenes tomadas en microscopio estereoscópico de las superficies de fractura de las probetas.

Tabla 17. Superficie de fractura de las probetas, por tipo de acero y tratamiento térmico.

T.T.	MATERIAL		
	1020	1040	1060
M.P.			
T.T. 1			
T.T. 2			
T.T. 3			

Para determinar de la manera más precisa el % de fractura frágil, se utilizó un método gráfico, con los pasos descritos a continuación:

1. De las áreas originales (las observadas en la tabla 17), se seleccionó, por separado, el área total de fractura y el del área frágil (área más brillante observada en las fotos del microscopio estereoscópico). En la tabla 119 se observa dicha operación.
2. Por medio de un software para dibujo industrial (SolidWorks) se estableció una malla, en la cual se superpusieron las áreas seleccionadas en el paso anterior, respetando sus proporciones.
3. Se asignó un valor a cada cuadro de la malla, en función de las dimensiones transversales y longitudinales de la probeta, las cuales son conocidas (5 mm x 5 mm)
4. El software realizó el cómputo, por separado, del área de fractura dúctil y del área de fractura frágil. En la tabla 20 se observa gráficamente el cálculo de las áreas descritas, los valores son escalares, adimensionales y sin relación entre una figura y otra.
5. Como último paso, se realizó el cálculo de la proporción correspondiente al área frágil del total del área de fractura (suma del área dúctil + frágil).

Los resultados de este ensayo se observan en las figuras 46 (energía absorbida) y 47 (% área frágil).

Adicionalmente, se presenta en la tabla 18 un resumen del % de fragilidad adquirida en los aceros por cada tratamiento térmico aplicado; se tomó como referencia la energía absorbida por cada material en su condición de materia prima.

Tabla 18. Porcentaje de fragilidad adquirida en los aceros por el tratamiento térmico aplicado.

Condición	% de fragilidad adquirida por tipo de acero		
	AISI 1020	AISI 1040	AISI 1060
T.T. 1	-46 %	234%	268%
T.T. 2	650%	1695%	1748%
T.T. 3	683%	772%	785%

Tabla 19. Selección de las áreas de fractura dúctil (amarillo) y frágil (circunscrita por el amarillo).

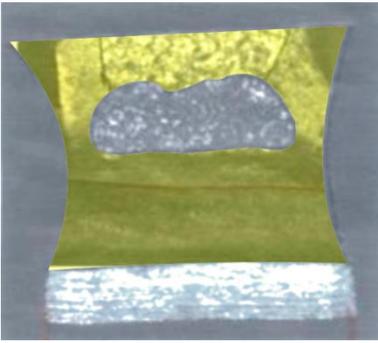
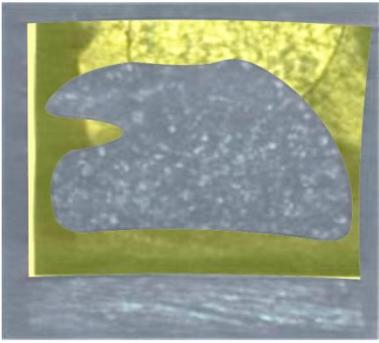
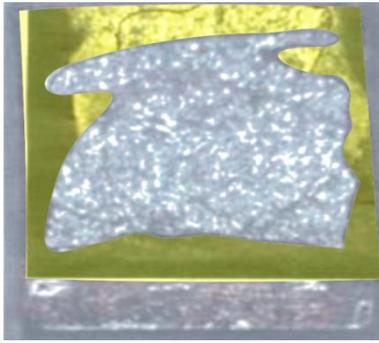
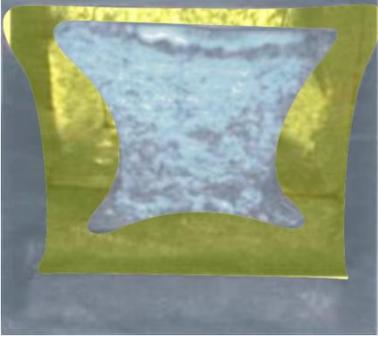
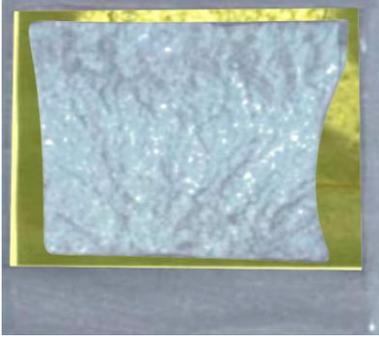
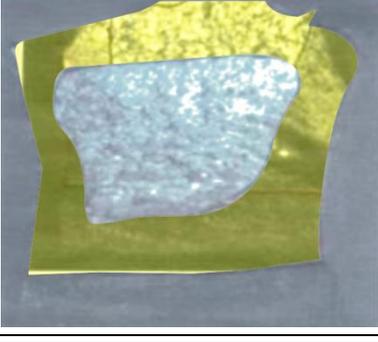
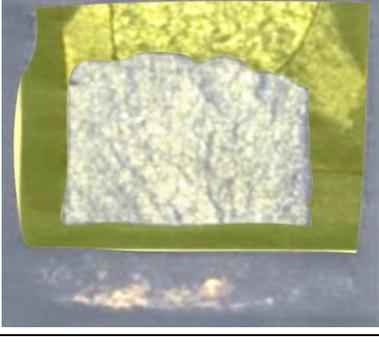
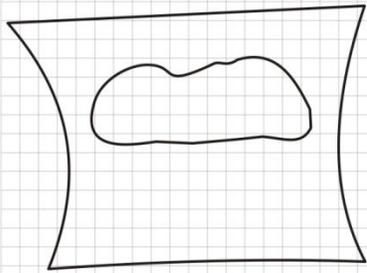
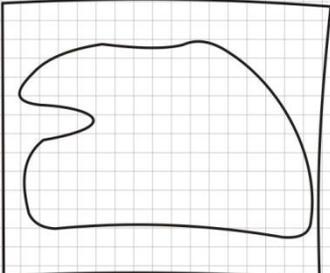
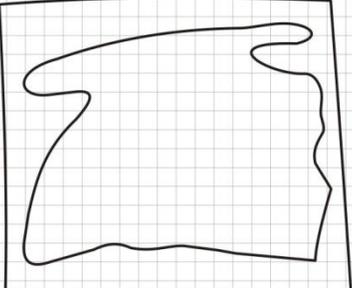
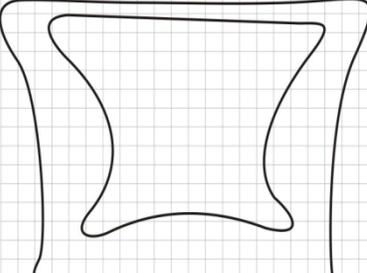
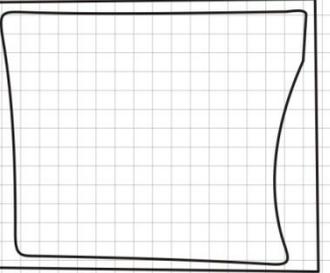
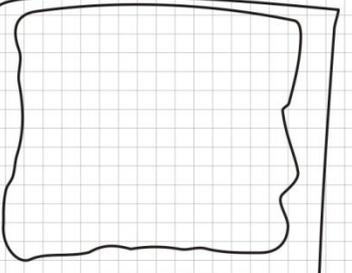
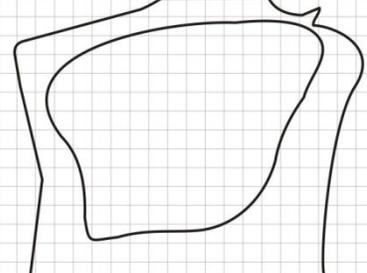
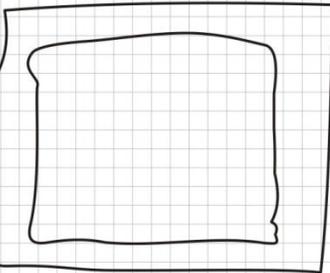
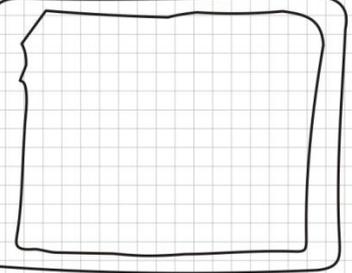
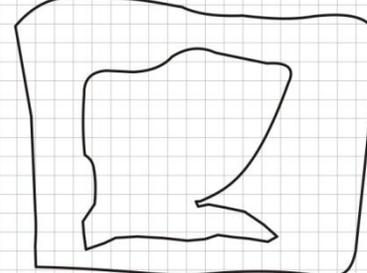
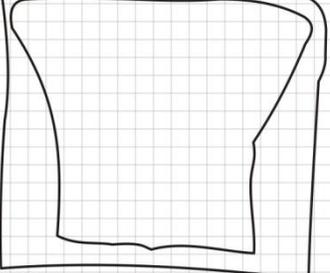
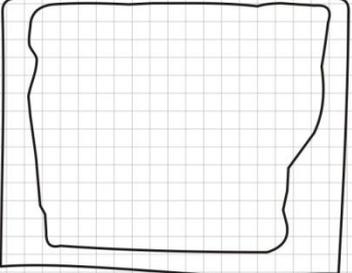
T.T.	MATERIAL		
	1020	1040	1060
M.P.			
T.T. 1			
T.T. 2			
T.T. 3			

Tabla 20. Calculo del área de fractura dúctil y frágil.

T.T.	MATERIAL		
	1020	1040	1060
M.P.			
	Área Dúctil 14.3 unidades Área Frágil 3.77 unidades	Área Dúctil 10.53 unidades Área Frágil 11.29 unidades	Área Dúctil 8.72 unidades Área Frágil 12.15 unidades
T.T. 1			
	Área Dúctil 11.75 unidades Área Frágil 9.94 unidades	Área Dúctil 4.73 unidades Área Frágil 15.09 unidades	Área Dúctil 5.97 unidades Área Frágil 15.95 unidades
T.T. 2			
	Área Dúctil 46.89 unidades Área Frágil 49.25 unidades	Área Dúctil 37.28 unidades Área Frágil 44.97 unidades	Área Dúctil 5.23 unidades Área Frágil 13.31 unidades
T.T. 3			
	Área Dúctil 44.37 unidades Área Frágil 22.32 unidades	Área Dúctil 8.15 unidades Área Frágil 14.82 unidades	Área Dúctil 6.23 unidades Área Frágil 14.66 unidades

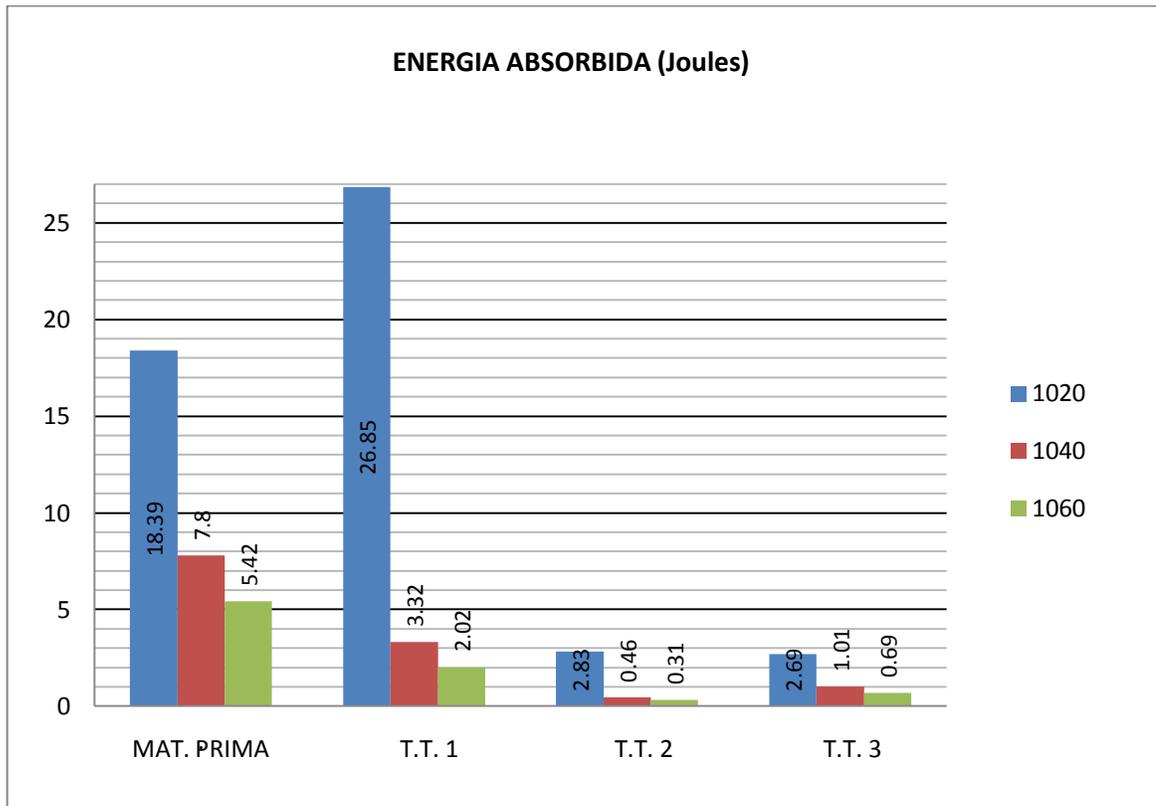


Figura 46. Resultados del ensayo de impacto: energía absorbida (J).

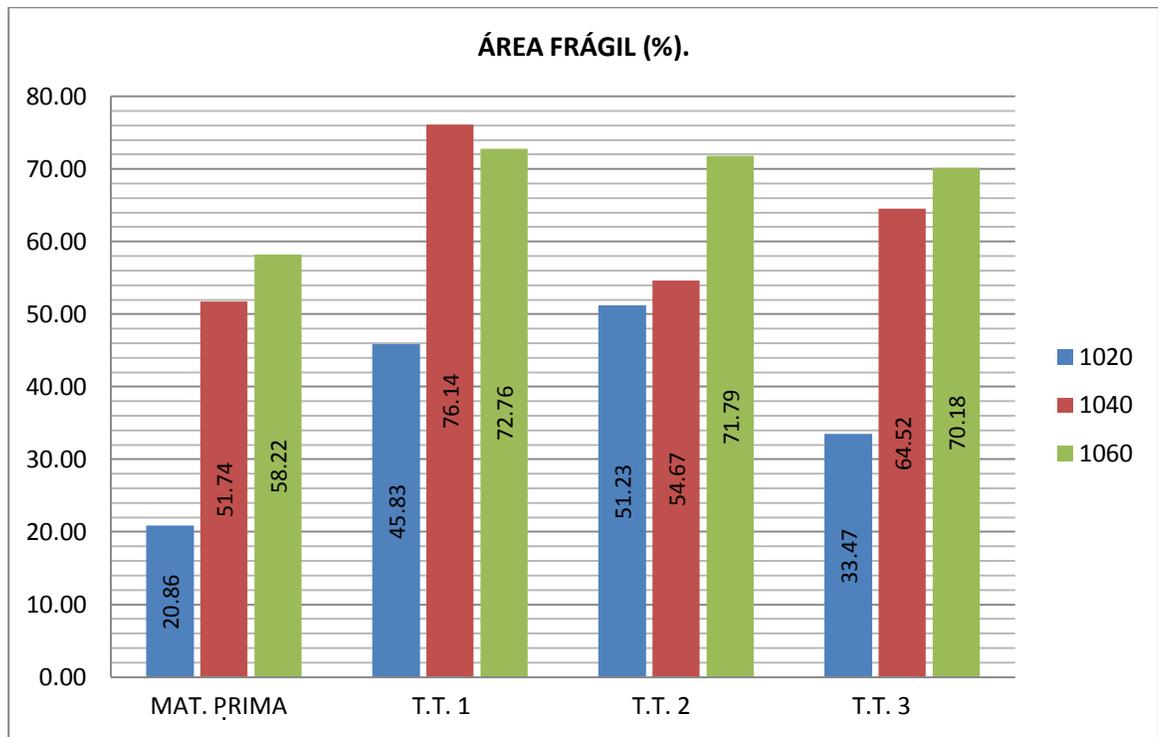


Figura 47. Resultados del ensayo de impacto: área frágil (%).

Del análisis de la información de este ensayo podemos concluir lo siguiente:

1. De manera general, el material adquiere una sensible fragilidad (de hasta un **1748% más** en el caso del AISI 1040 con el T.T.2) a causa de los tratamientos térmicos, principalmente con el T.T. 2 y el T.T. 3. Existe una excepción a este fenómeno en el acero AISI 1020, el cual adquirió una mayor tenacidad en el tratamiento térmico 1.
2. Con el T.T. 2, el acero AISI 1060 es el más frágil de todos, inclusive aún y agrupados en función del T.T., este material conserva dicha característica.
3. El segundo acero más frágil es el AISI 1040. Con el T.T.2 y T.T.3, no existe más de 0.15 J y 0.32 J, respectivamente, de diferencia entre este acero y el AISI 1060. lo que representa una diferencia de energía absorbida entre un 30% y 50% entre ellos (se le considera como una “mínima diferencia”, si observamos la energía absorbida inicialmente, en su condición de materia prima).
4. Se observa que la mayor fragilidad de los aceros AISI 1040 y 1060 ocurre con la aplicación del tratamiento térmico 2.
5. Se detecta un incremento en el % de área frágil con la aplicación de los tratamientos térmicos, sin embargo, no es tan sensible la ganancia de ésta área (menor al 52% en los aceros AISI 1040 y 1060, y de hasta un 150% más en el caso del AISI 1020), en comparación el incremento en la fragilidad de los aceros descrita en los párrafos 1 y 2
6. Salvo el caso de las materias primas, no se detecta una relación lineal entre el incremento de fragilidad y el aumento del % de área frágil.

#### 4.2.1.2. Ensayo de dureza.

Los resultados de este ensayo se observan en la figura 48 y en la tabla 21 se presenta un resumen del % de incremento en la dureza del material en función del T.T. aplicado; se tomo como referencia la dureza de cada tipo de acero en su condición de materia prima.

De este ensayo se concluye lo siguiente:

1. Sin importar la condición del material, es decir, con o sin tratamiento térmico, a mayor contenido de carbono, mayor es la dureza adquirida.
2. En los aceros AISI 1040 y 1060, la mayor dureza se presento en el T.T. 1, seguido por el T.T. 2 y finalmente el T.T. 3. Confirmando lo establecido en el punto 3.4 “aplicación de los tratamientos térmicos”, para el rango de temperatura de revenido de los 260 °C a 370 °C, en el cual se estimo que se presentaría una mayor dureza en el material.
3. El acero AISI 1060 es el que presento la mayor dureza con el T.T. 1

4. El diferencia en la dureza entre el acero 1020 y 1040 templados y revenidos, oscila entre un 203%(con el T.T. 3) a 325% (con el T.T.1); por otro lado, la diferencia entre el 1040 y el 1060 oscila entre 113% (con el T.T. 2) a 119% (con el T.T. 1). Lo cual nos permite verificar la sensibilidad en el incremento de las propiedades mecánicas (dureza) de los aceros en función del contenido de carbono, siendo esta diferencia más marcada entre los aceros de bajo a mediano contenido de carbono, esto es debido, principalmente, a la formación de la fase martensita en la estructura de los aceros, según lo referido en el punto 2.3.4.

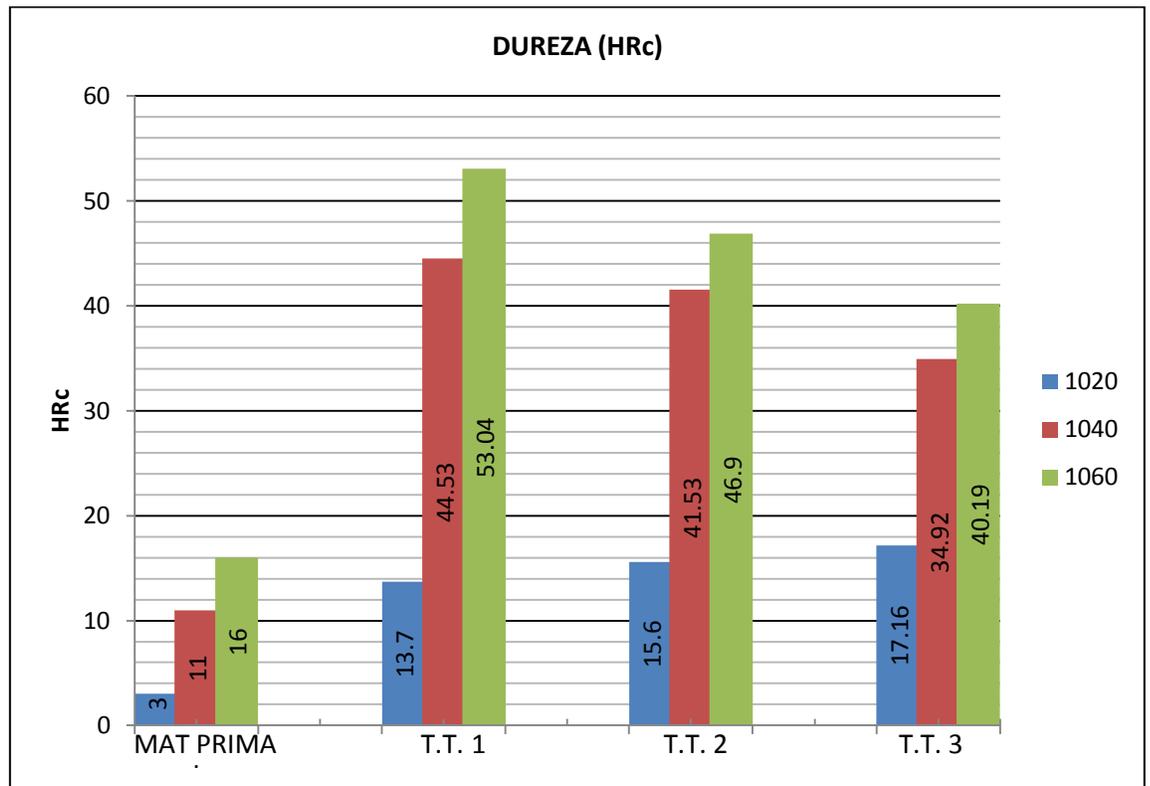


Figura 48. Resultados del ensayo de dureza.

Tabla 21. Porcentaje de incremento en la dureza en los aceros por el tratamiento térmico aplicado.

Condición	TIPO DE ACERO		
	AISI 1020	AISI 1040	AISI 1060
T.T. 1	456.6%	520%	572%
T.T. 2	404%	377%	317%
T.T. 3	331%	293%	251%

#### 4.2.1.3 Ensayo de resistencia a la tensión.

El resumen de los resultados de este ensayo se presentan en las tablas 22, 23, 24 y 25. Las graficas de las curvas esfuerzo deformación son observadas en las figuras 49, 50, 51, 52, 53, 54, y 55.

Tabla 22. Resumen del ensayo de tensión, por tipo de acero y tratamiento térmico.

MATERIAL	T.T.	RESISTENCIA A LA TENSION (N/mm <sup>2</sup> )	RED. DE AREA %	ELONG. %	PROBETA
1020	M.P.	450	63	33	16
	T.T. 1	625	68	27	13
	T.T. 2	1180	49	17	113
	T.T. 3	560	79	23	115
1040	M.P.	633	51.2	31	24
	T.T. 1	1648	50.63	12	22
	T.T. 2	1542	33	10.3	29
	T.T. 3	1044	57.17	15	217
1060	M.P.	730	43.5	21.9	33
	T.T. 1	1872	18.1	6.4	35
	T.T. 2	1601	32.5	6	39
	T.T. 3	1298	50	9.1	312

Tabla 23. Porcentaje de incremento en la resistencia a la tracción en los aceros por el t. t. aplicado, tomando como referencia el valor de materia prima.

Condición	TIPO DE ACERO		
	AISI 1020	AISI 1040	AISI 1060
T.T. 1	38 %	160%	156%
T.T. 2	162%	143%	119%
T.T. 3	24%	64%	77%

Tabla 24. Porcentaje de incremento en la reducción de área en los aceros por el t.t. aplicado, tomando como referencia el valor de materia prima.

Condición	TIPO DE ACERO		
	AISI 1020	AISI 1040	AISI 1060
T.T. 1	8%	-1.1%	-58.4%
T.T. 2	-22%	-35.5%	-25.28%
T.T. 3	25%	11.6%	14.9%

Tabla 25. Porcentaje de incremento en la elongación en los aceros por el tratamiento térmico aplicado, tomando como referencia el valor de materia prima.

Condición	TIPO DE ACERO		
	AISI 1020	AISI 1040	AISI 1060
T.T. 1	-18.18%	-61.3%	-70.7%
T.T. 2	-48.48%	-66.7%	-72.6%
T.T. 3	-30.30%	-51.51%	-58.44%

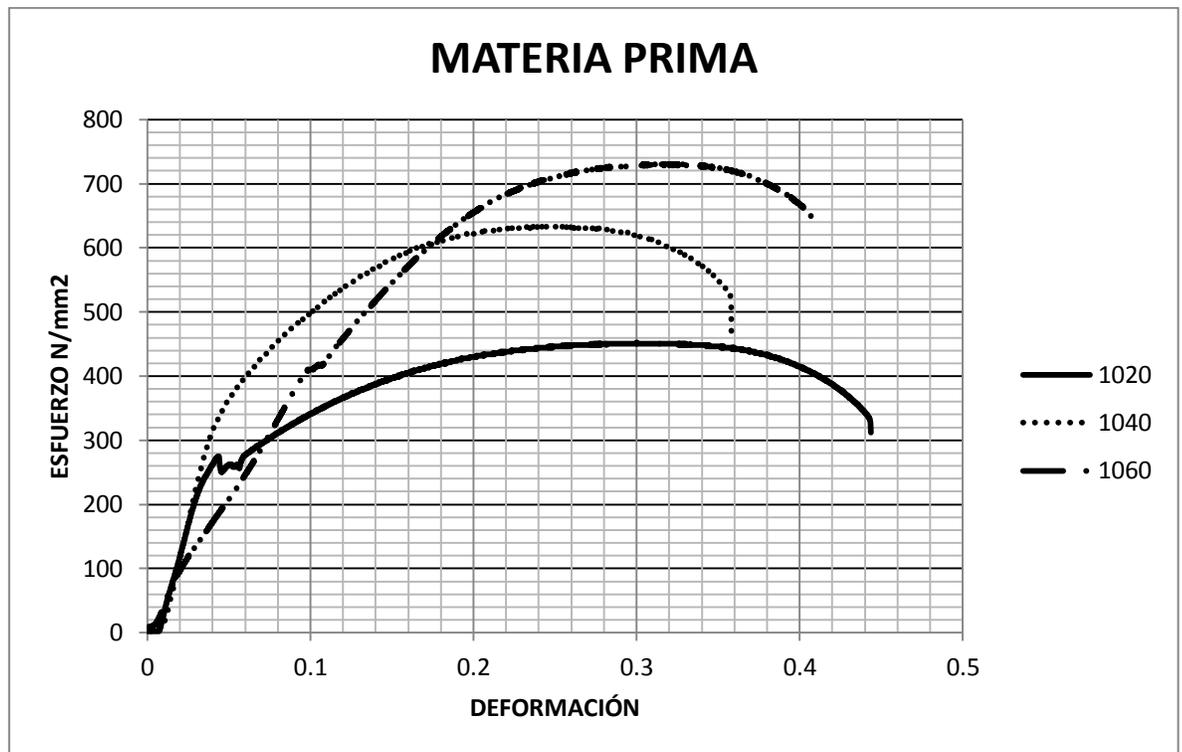


Figura 49. Grafico esfuerzo deformación, de las materias primas.

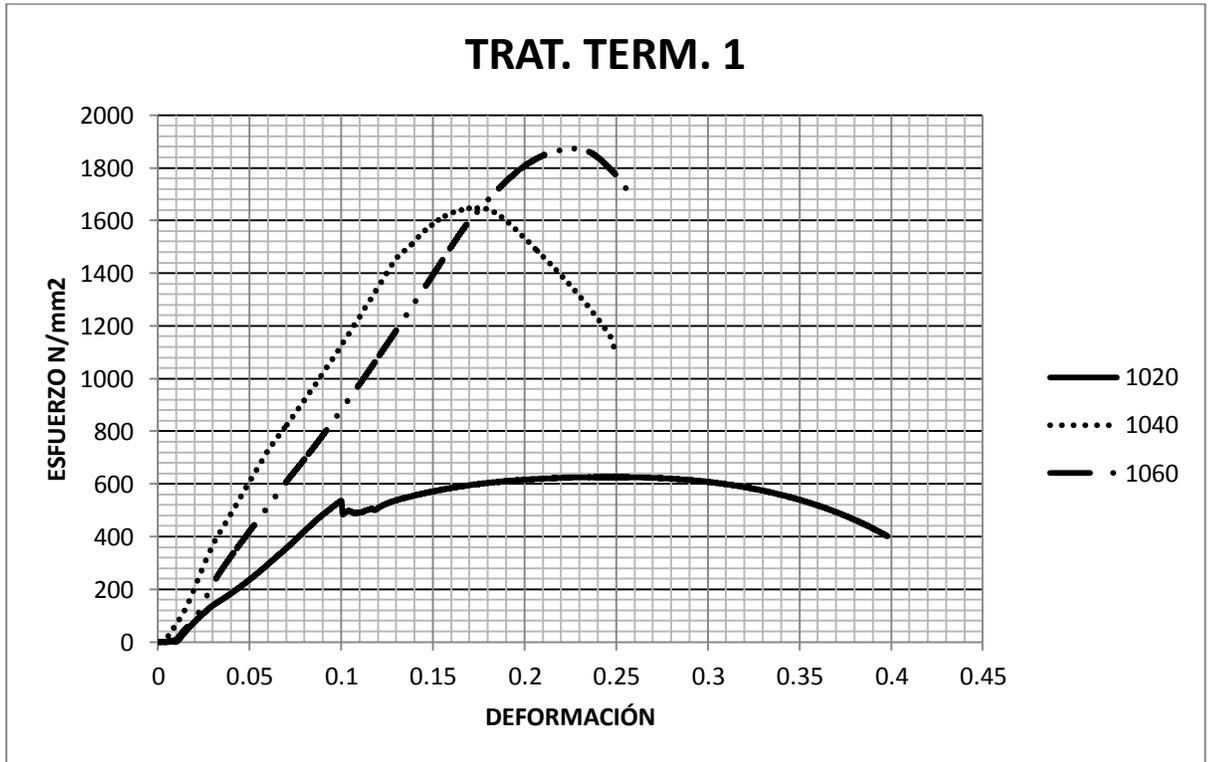


Figura 50. Grafico esfuerzo deformación, con el tratamiento térmico 1.

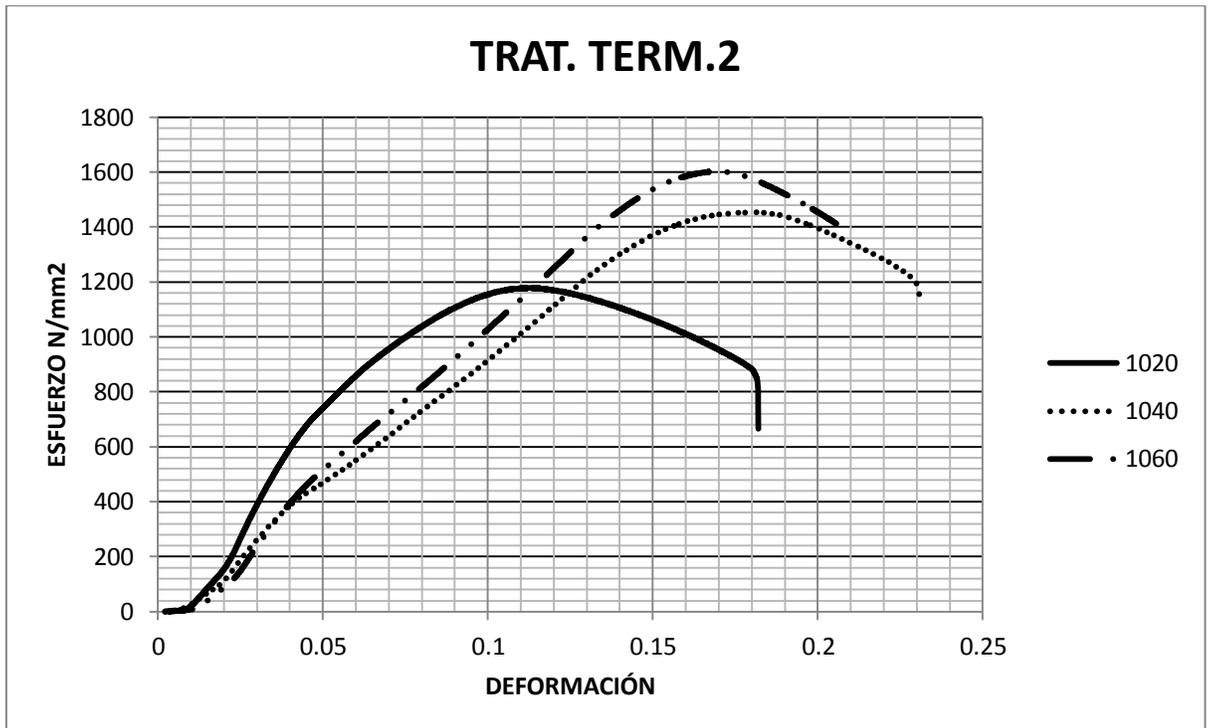


Figura 51. Grafico esfuerzo deformación, con el tratamiento térmico 2.

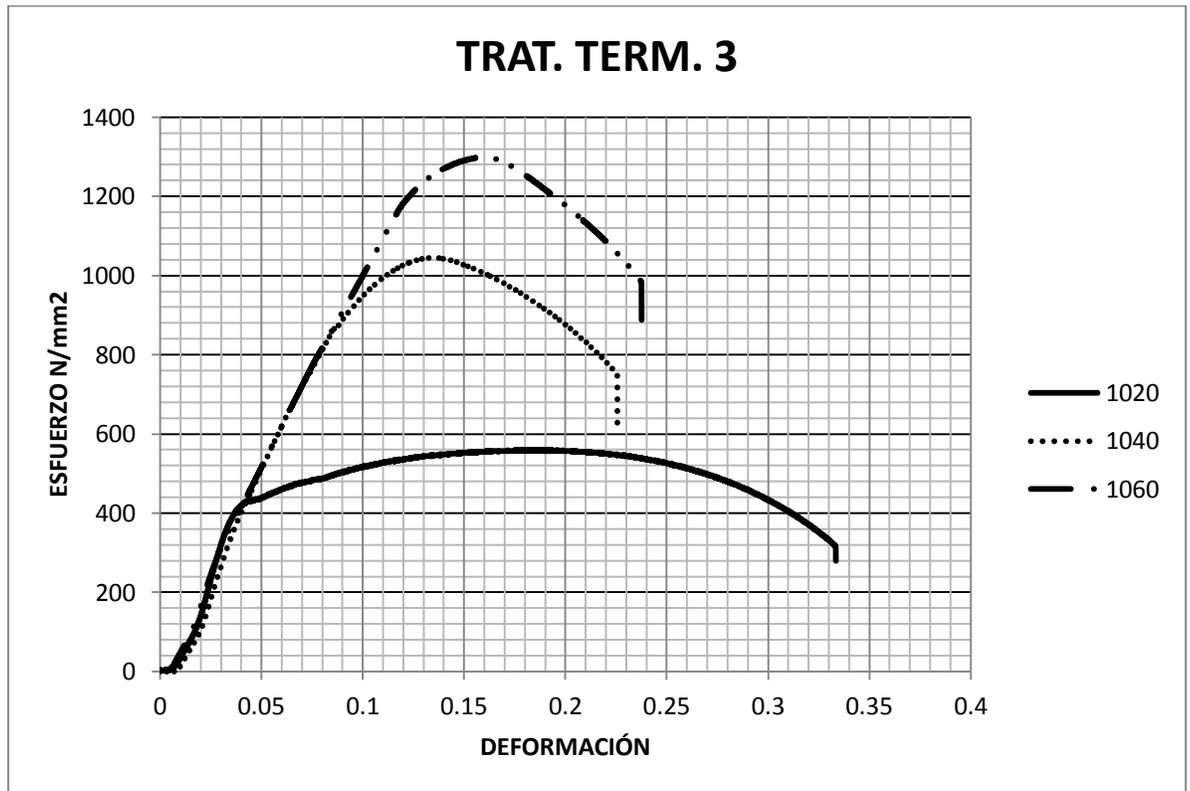


Figura 52. Grafico esfuerzo deformación, con el tratamiento térmico 3.

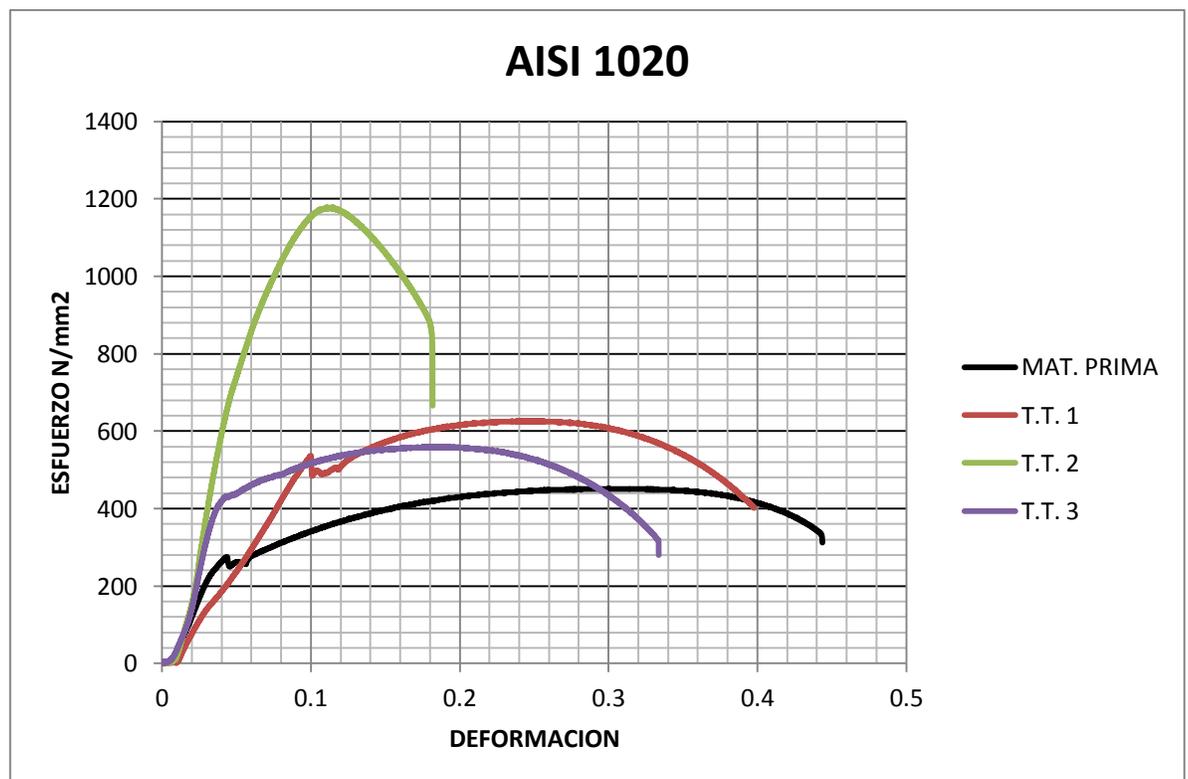


Figura 53. Gráficas esfuerzo-deformación del acero AISI 1020.

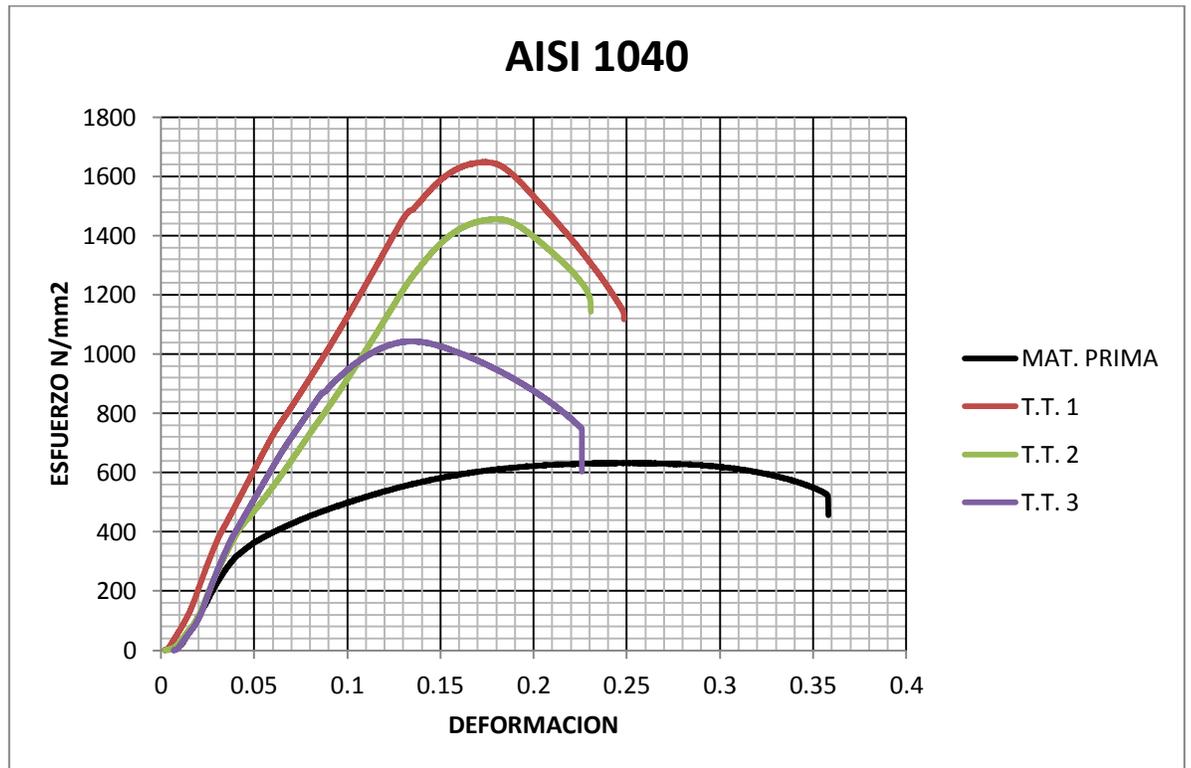


Figura 54. Gráficas esfuerzo-deformación del acero AISI 1040.

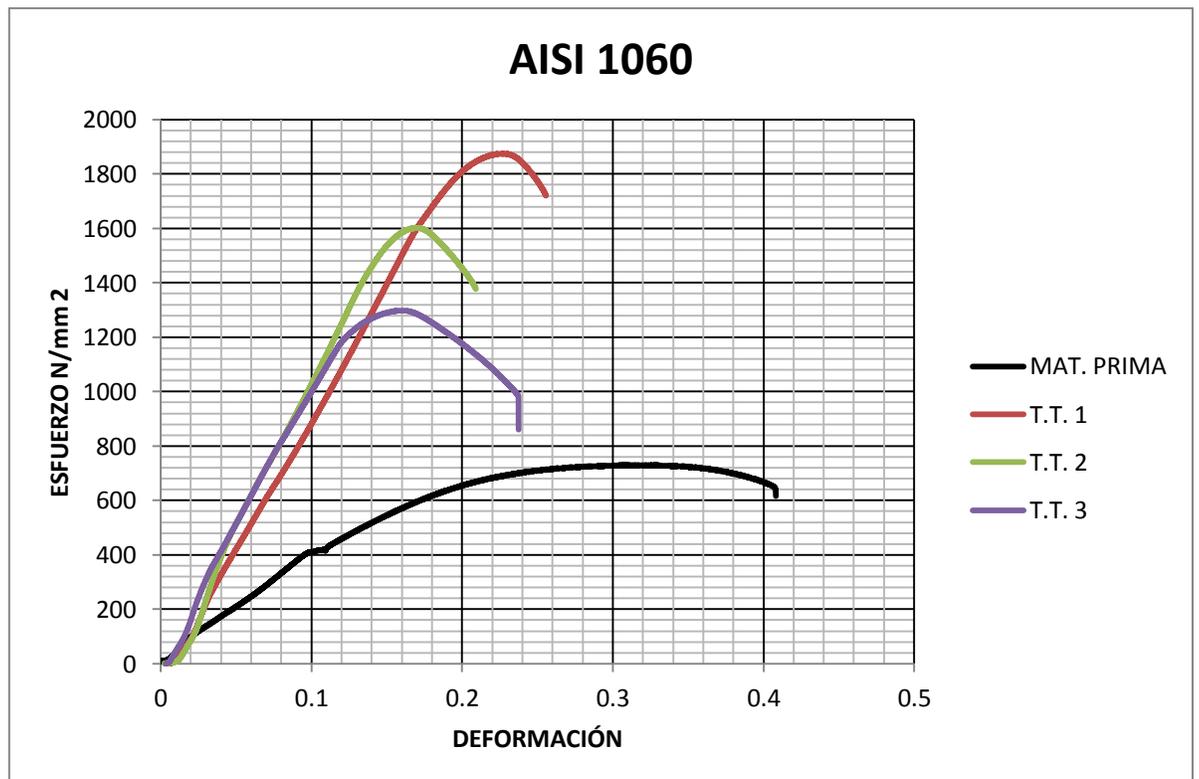


Figura 55. Gráficas esfuerzo-deformación del acero AISI 1060.

De los resultados de este ensayo se concluye lo siguiente:

1. De conformidad al punto 2.1.2. en el cual se establecen como valor mínimo de **resistencia a la cedencia 246 N/mm<sup>2</sup>**, podemos observar y afirmar que en **todos los aceros**, sin importar el tratamiento térmico, **se cumple con esta condición** de diseño.
2. De igual forma, en el mismo punto se establece como valor mínimo de **reducción de área un 25%, cumpliendo todos los aceros, salvo el caso del AISI 1060 en el T.T. 1**, dicha condición.
3. Así mismo, el diseñador establece un valor de **elongación mínimo de 15 %**, **Cumpliendo dicha condición el AISI 1020 con todos los tratamientos térmicos y el AISI 1040 con el T.T. 3.**
4. Al igual que en el ensayo de dureza, se observo que las propiedades mecánicas de resistencia a la tensión se incrementaron sensiblemente al aumentar el contenido de carbono en el acero.
5. De manera idéntica q el ensayo de dureza, en los aceros AISI 1040 y 1060, la mayor resistencia a la tensión se presento en el T.T. 1, seguido por el T.T. 2 y finalmente el T.T. 3. Confirmando lo establecido en el punto 3.4 “aplicación de los tratamientos térmicos”, para el rango de temperatura de revenido de los 260 °C a 370 °C, en el cual se estimo que se presentaría una mayor resistencia a la tensión en el material
6. El acero AISI 1060 es el que presenta la mayor resistencia a la tensión en todos los casos sin importar el tratamiento térmico aplicado, le sigue el AISI 1040 y finalmente el AISI1020.
7. En todos los aceros se observa una perdida en su elongación con la aplicación de los tratamientos térmicos; la más severa se presenta con el T.T. 2, seguida por el T.T. 1 y finalmente la menor con el T.T. 3. Coincidiendo de manera aceptable con lo descrito en el punto 3.4.
8. De manera similar a lo descrito en el párrafo anterior ocurre con la reducción de área en todos los aceros.

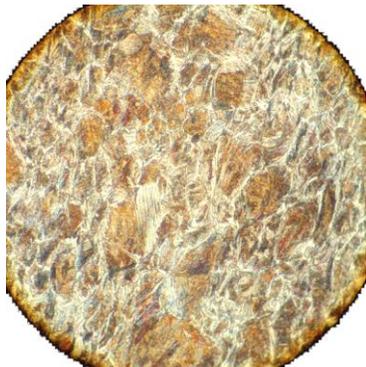
#### 4.2.2. Caracterización microestructural.

##### 4.2.2.1 Fases presentes.

En las tablas 26, 27 y 28 se observan grupos de micrografías de los aceros AISI 1020,1040 y 1060, respectivamente.

### ACERO AISI 1020

Tabla 26. Micrografías del acero AISI 1020, con los Tratamientos térmicos.

TRATAMIENTO TERMICO		
T.T. 1	T.T.2	T.T.3
		
500 X	500 X	500 X
<b>FASES PRESENTES:</b>		
Ferrita acicular en límite de grano, transformación parcial de martensita		

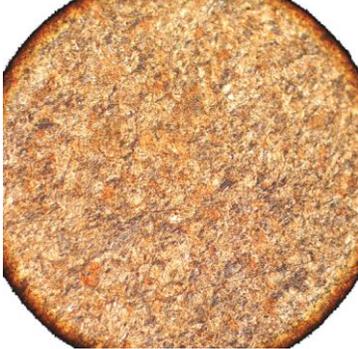
### ACERO AISI 1040

Tabla 27. Micrografías del acero AISI 1040, con los Tratamientos térmicos.

TRATAMIENTO TERMICO		
T.T. 1	T.T.2	T.T.3
		
500 X	500 X	500 X
<b>FASES PRESENTES:</b>		
MARTENSITA REVENIDA		

## ACERO AISI 1060

Tabla 28. Micrografías del acero AISI 1060, con los Tratamientos térmicos.

<b>TRATAMIENTO TERMICO</b>		
<b>T.T. 1</b>	<b>T.T.2</b>	<b>T.T.3</b>
		
500 X	500 X	500 X
<b>FASES PRESENTES:</b>		
MARTENSITA REVENIDA.		

De la observación de éste ensayo se concluye lo siguiente:

1. No se detecta una diferencia sensible entre las estructuras de los aceros AISI 1040 y 1060.
2. La por otro lado, si se evidencia una diferencia entre la estructura de los aceros descritos en el punto 1 y la del acero AISI 1020, el cual presenta formación de ferrita y además de una mezcla entre perlita-martensita, lo cual se atribuye al bajo contenido de carbono de referido acero.

#### 4.3. Caracterización de los fragmentos.

##### 4.3.1. Caracterización de la superficie de fractura.

En las tablas 29 a la 40 se presentan micrografías tomadas con microscopio electrónico de barrido a la **superficie de fractura** de fragmentos de los recipientes piloto, la finalidad es detectar posibles patrones de fractura dúctil y/o frágil, así como alguna diferencia entre éstos en función del tipo de acero y el tratamiento térmico aplicado.

## ACERO AISI 1020

Tabla 29. Micrografías del acero AISI 1020, con el T.T. indicado.

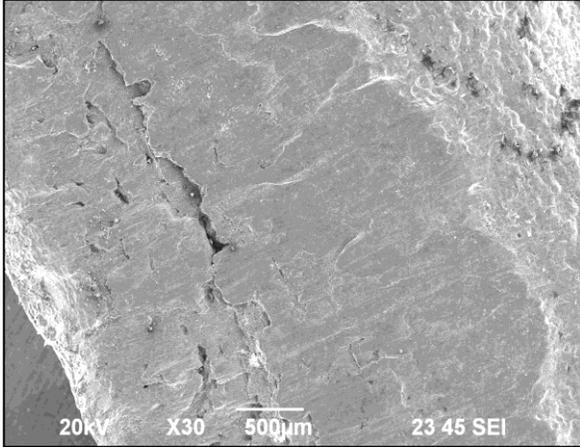
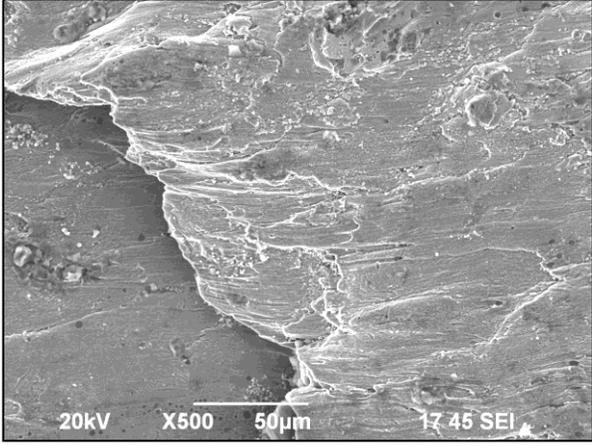
<b>TRATAMIENTO TERMICO: MATERIA PRIMA.</b>	
	
30 x	500 x
Superficie de fractura de características frágiles.	Superficie de fractura mixta, se observan patrones localizados de fractura dúctil

Tabla 30. Micrografías del acero AISI 1020, con el T.T. indicado.

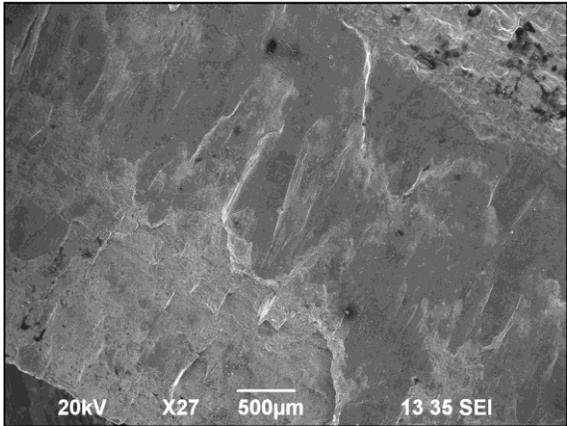
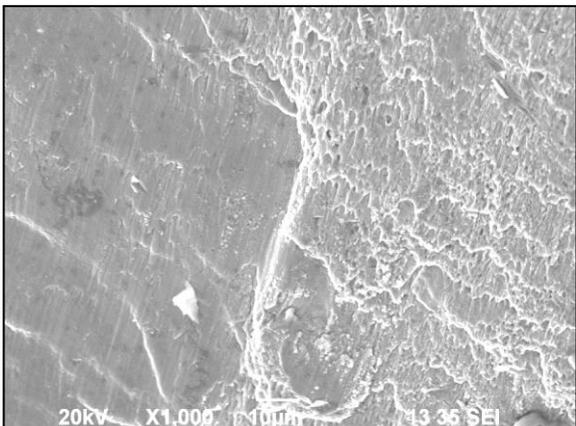
<b>TRATAMIENTO TERMICO: 1</b>	
	
27 x	1000 x
Superficie de fractura con patrones frágiles.	Superficie de fractura mixta, zonas oscuras y lisas de fractura frágil, zonas claras de fractura dúctil.

Tabla 31. Micrografías del acero AISI 1020, con el T.T. indicado.

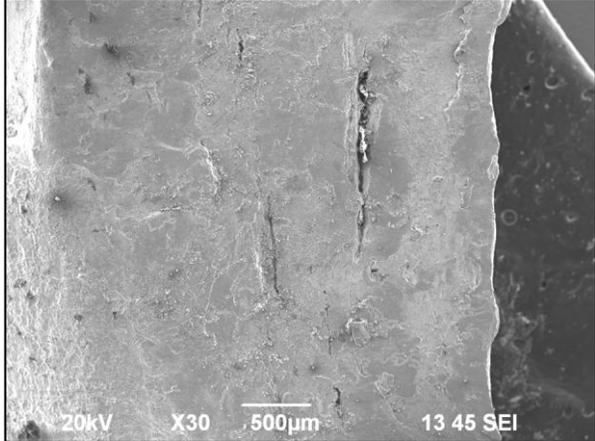
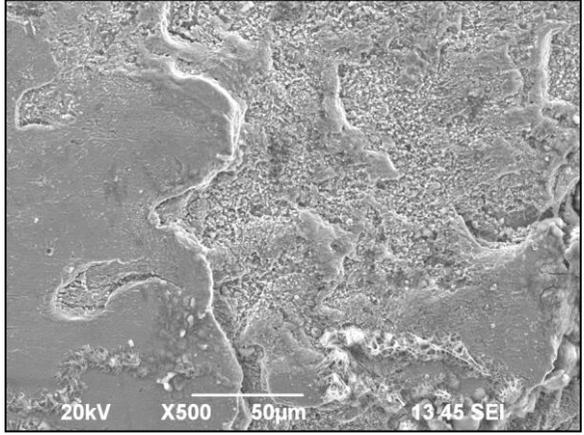
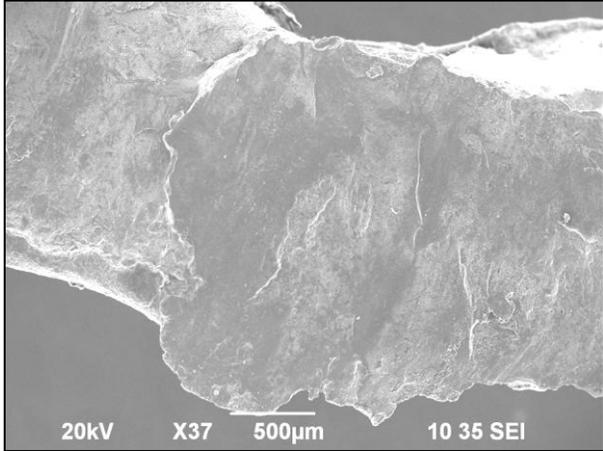
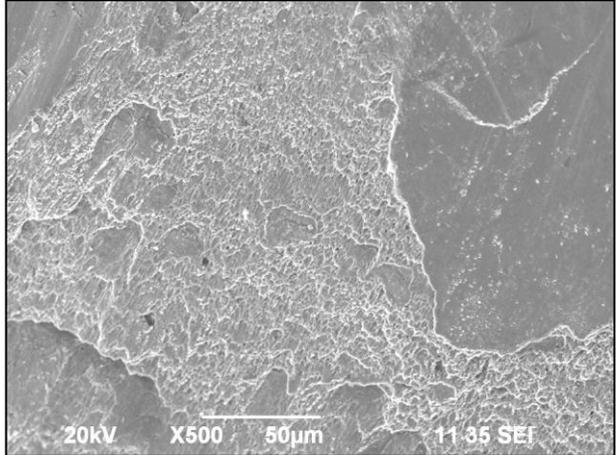
<b>TRATAMIENTO TERMICO: 2</b>	
	
30 x	500 x
Superficie de fractura con patrones frágiles.	Superficie de fractura mixta, zonas oscuras y lisas de fractura frágil, zonas irregulares (valles y picos) de fractura dúctil.

Tabla 32. Micrografías del acero AISI 1020, con el T.T. indicado.

<b>TRATAMIENTO TERMICO: 3</b>	
	
37 x	500 x
Superficie de fractura de características frágiles.	Superficie de fractura mixta, zonas oscuras y lisas de fractura frágil, zonas claras de fractura dúctil.

## ACERO AISI 1040

Tabla 33. Micrografías del acero AISI 1040, con el T.T. indicado.

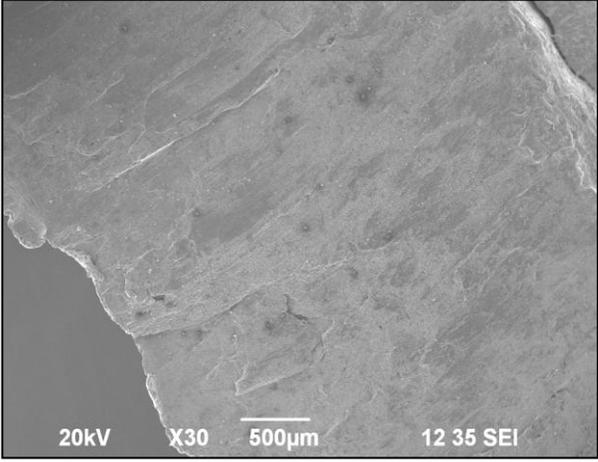
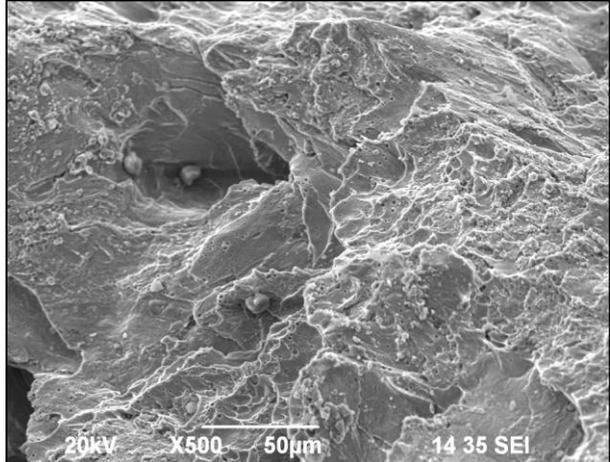
<b>TRATAMIENTO TERMICO: MATERIA PRIMA.</b>	
	
30 X	500 X
Superficie de fractura mixta. Zonas oscuras lisas de fractura frágil, zonas claras de fractura dúctil,	Zona clara, superficie de fractura con patrones de fractura dúctil.

Tabla 34. Micrografías del acero AISI 1040, con el T.T. indicado.

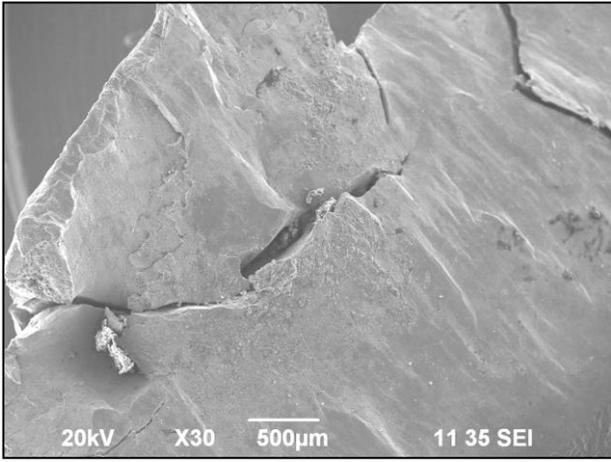
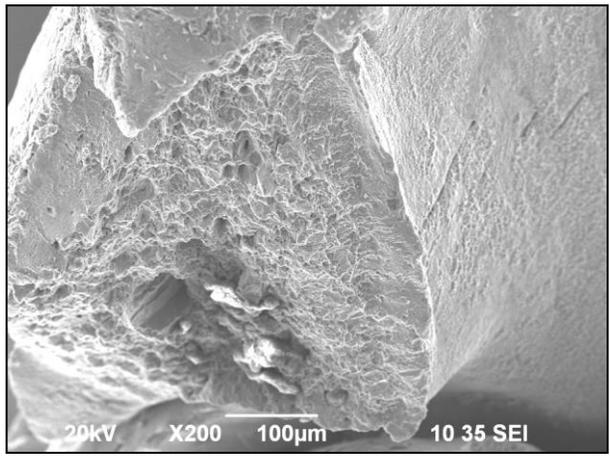
<b>TRATAMIENTO TERMICO: 1</b>	
	
30 X	200 X
Superficie de fractura de características frágiles.	Superficie de fractura frágil con pequeñas zonas de patrones de fractura dúctil,

Tabla 35. Micrografías del acero AISI 1040, con el T.T. indicado.

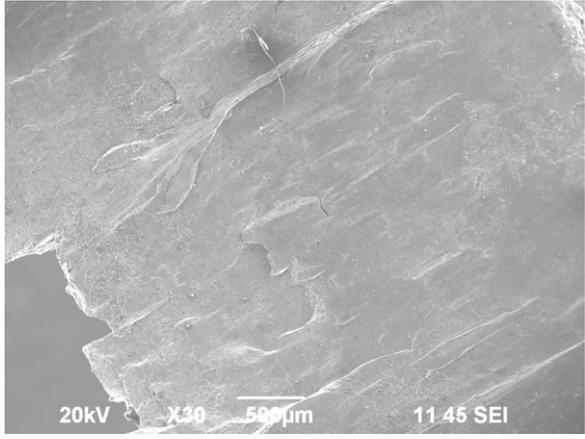
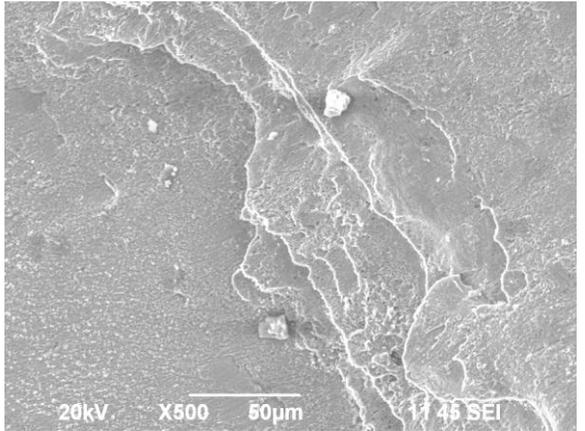
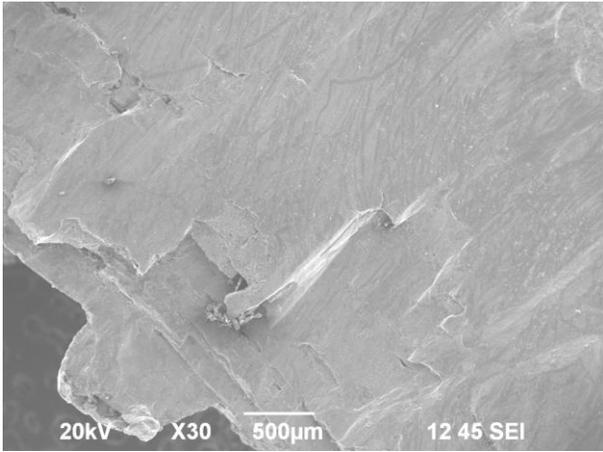
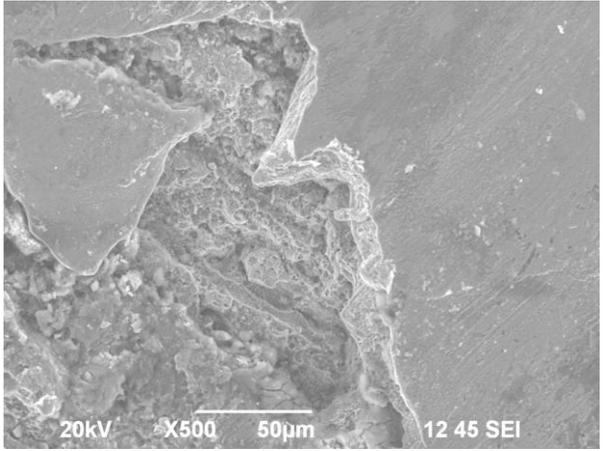
<b>TRATAMIENTO TERMICO: 2</b>	
	
30 X	500 X
Superficie de fractura de características frágiles,	Superficie de fractura frágil se observan esporádicos patrones de fractura dúctil

Tabla 36. Micrografías del acero AISI 1040, con el T.T. indicado.

<b>TRATAMIENTO TERMICO: 3</b>	
	
30 X	500 X
Superficie de fractura de características angulares frágiles,	Fracturas angulares con patrones esporádicos, muy localizados, de fractura dúctil.

## **ACERO AISI 1060**

Tabla 37. Micrografías del acero AISI 1060, con el T.T. indicado.

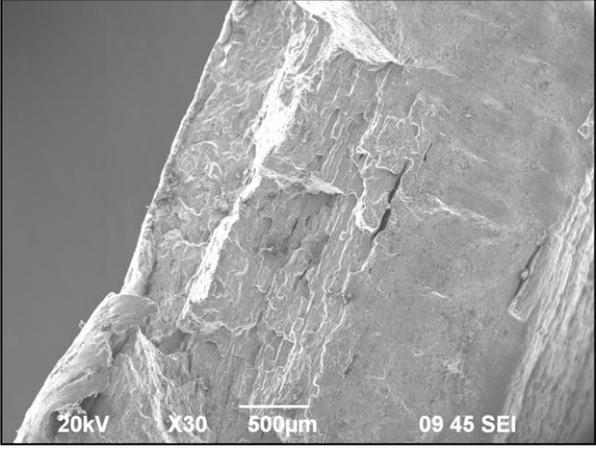
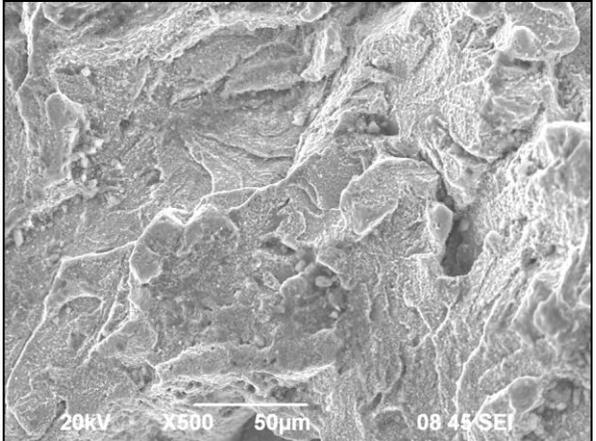
<b>TRATAMIENTO TERMICO: MATERIA PRIMA.</b>	
	
30 X	500 X
Superficie de fractura de características frágiles.	Se observan zonas con patrones de deformación, sin embargo son de características completamente frágiles.

Tabla 38. Micrografías del acero AISI 1060, con el T.T. indicado.

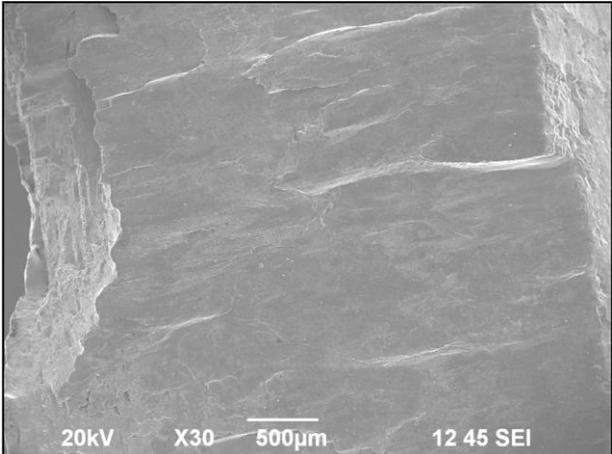
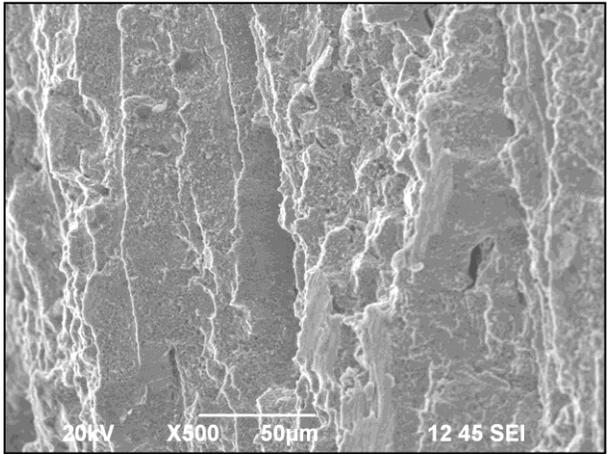
<b>TRATAMIENTO TERMICO: 1</b>	
	
30 X	500 X
Superficie de fractura de características completamente frágiles.	Patrones rectos con evidencia de deformación, fractura frágil.

Tabla 39. Micrografías del acero AISI 1060, con el T.T. indicado.

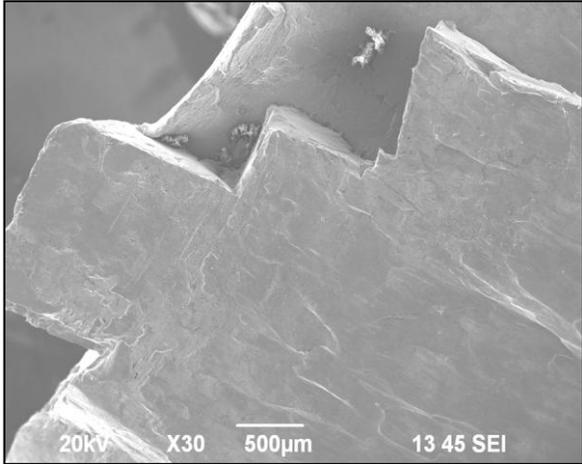
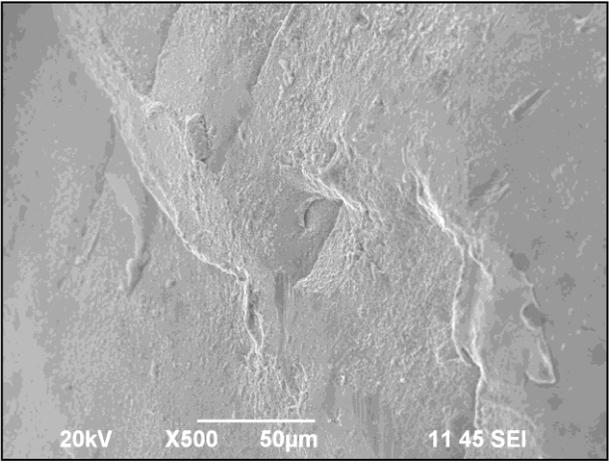
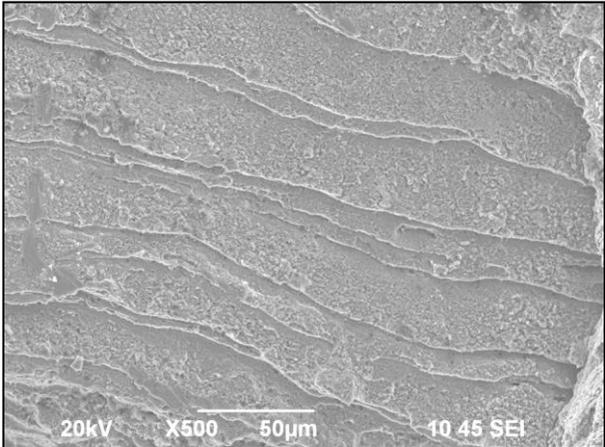
<b>TRATAMIENTO TERMICO: 2</b>	
	
30 X	50 X
Superficie de fractura con patrones angulares de características frágiles	Superficie de fractura lisa en su mayor parte, característica de fractura frágil.

Tabla 40. Micrografías del acero AISI 1060, con el T.T. indicado.

<b>TRATAMIENTO TERMICO: 3</b>	
	
30 X	500 X
Superficie de fractura de características frágiles.	Patrones lineales fractura frágil.

De los resultados observados en este ensayo podemos hacer constar los siguientes resultados:

1. En el acero AISI 1020 se presenta una superficie de fractura mixta: con patrones dúctiles y frágiles. Sin embargo, a nivel macro o en general, la apariencia de la superficie es frágil.
2. En el acero AISI 1040 con tratamientos térmicos se observa de manera general o a nivel macro, una superficie de fractura frágil, sin embargo se presentan zonas esporádicas, muy localizadas, con patrones de deformación dúctil.
3. Por otro lado, el mismo acero AISI 1040 en condición de materia prima, presenta una superficie de fractura mixta: con patrones dúctiles y frágiles. Sin embargo, a nivel macro o en general, la apariencia de la superficie es frágil.
4. En el acero AISI 1060 con tratamientos térmicos, se observa que la apariencia de la superficie de fractura es completamente frágil.
5. Por otra parte, en el mismo acero AISI 1060 en condición de materia prima, se observan pequeñas zonas de deformación, sin embargo, el patrón dominante es de fractura frágil.

Del análisis de los resultados podemos concluir lo siguiente:

1. Al incrementarse el contenido de carbono en el acero y aún en condición de materia prima, se hace evidente un incremento en la fragilidad del material, esto lo verificamos con el aumento de los patrones de fractura frágil.
2. En los aceros AISI 1040 y 1060, se hace evidente la sensible influencia del temple y revenido en el comportamiento del material, se infiere que la estructura martensítica, favorece la fragilidad del material, ya que a mayor presencia de dicha fase, más frágil se comportó el acero.
3. En un mismo tipo de acero, no se observó una influencia de los tratamientos térmicos en los patrones de fractura, es decir, en el acero AISI 1020 ya sea con el T.T. 1, el T.T. 2 ó el T.T. 3, los patrones de fractura son los mismos; de idéntica manera ocurre para los aceros AISI 1040 y 1060.

#### 4.3.2. Caracterización microestructural.

En las tablas 41 a la se presentan micrografías, tomadas con microscopio óptico, al área transversal de los fragmentos de los recipientes piloto, la finalidad es identificar los probables mecanismos de iniciación y propagación de las fracturas en función de su microestructura y de ésta manera, comparar dichos resultados por tipo de acero y tratamiento térmico aplicado.

**ACERO AISI 1020**

Tabla 41. Imágenes del corte transversal del fragmento, con el T.T. indicado.

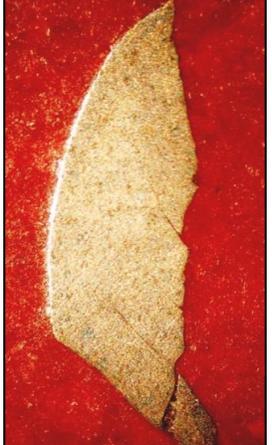
			
Materia Prima.	T.T. 1	T.T. 2	T.T. 3
<p align="center">El patrón de fractura en todas las muestras del grupo 1020 sigue una trayectoria aproximada a 45° de la superficie, independientemente del tratamiento térmico dado, como puede observarse en las micrografías</p>			

Tabla 42. Micrografías del acero AISI 1020, con el T.T. indicado.

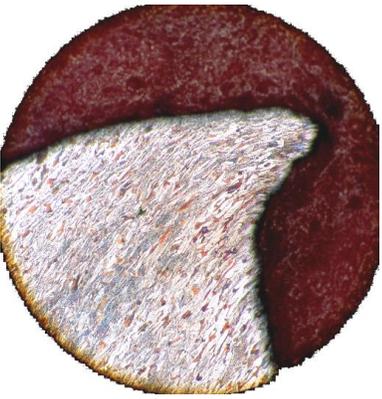
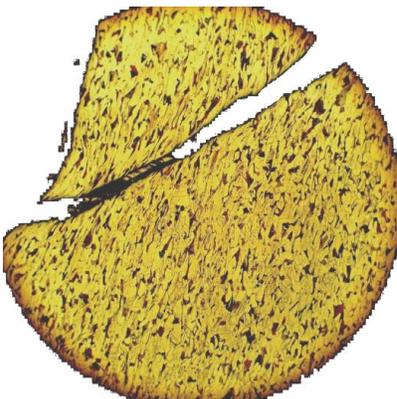
<b>TRATAMIENTO TERMICO: MATERIA PRIMA</b>		
		
100 X	200 X	500 X
<b>ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.</b>		
<p>Se observan diferencias en el comportamiento del material frente al avance de la fractura en función del estado termomecánico, la muestra presenta alta deformación de la estructura en las zonas del avance de la fractura y zonas contiguas, visible incluso a bajos aumentos</p>		

Tabla 43. Micrografías del acero AISI 1020, con el T.T. indicado.

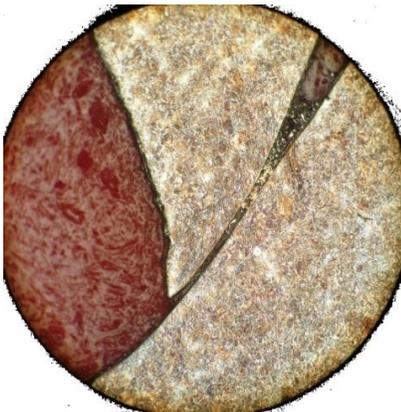
<b>TRATAMIENTO TERMICO: 1.</b>		
		
100 X	200 X	500 X
<b>ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.</b>		
<p>Se observa en su mayor parte, trayectorias de fractura rectas sin evidencia de deformación aparente a 100 x y 200 x, sin embargo a 500x es evidente que existe una deformación en la estructura en las zonas de fractura,</p>		

Tabla 44. Micrografías del acero AISI 1020, con el T.T. indicado.

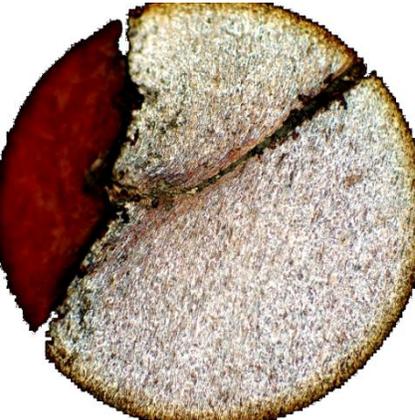
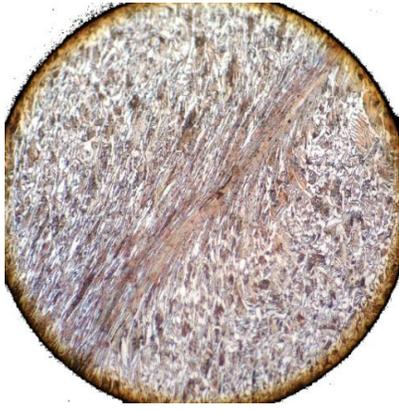
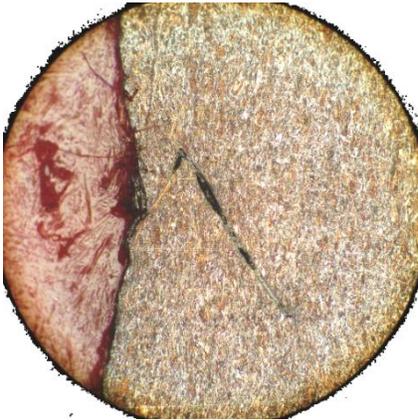
<b>TRATAMIENTO TERMICO: 2</b>		
		
100 X	200 X	500 X
<b>ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.</b>		
<p>El grado de deformación aumenta en relación a la muestra con tratamiento térmico 1, es poco visible a 100x y se hace evidente a 500x. La deformación de la estructura es observada únicamente alrededor de la zonas de fractura y líneas de avance de ésta.</p>		

Tabla 45. Micrografías del acero AISI 1020, con el T.T. indicado.

<b>TRATAMIENTO TERMICO: 3.</b>		
		
100 X	200 X	500 X
<b>ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.</b>		
<p>De forma similar a la muestra con el T.T. 2 ) la deformación de la estructura es poco visible a 100x, haciéndose evidente a 500x; dicha deformación sólo se observa en las zonas aledañas a la fractura y avance de la misma.</p>		

#### **CONCLUSIONES DEL GRUPO AISI 1020**

1. Todas las muestras tienen un comportamiento similar en cuanto al grado de deformación que presenta la estructura al frente (avance de la fractura) y zonas alrededor de la fractura.
2. Se Identificaron fracturas con mínima o ninguna deformación visible a pocos aumentos (100x y 200x) y zonas con deformación solo visible a 500x.
3. En la muestra con el T.T. 1 se presenta alteración de la estructura a los lados de la cara de fractura y al frente de la fractura se pueden observar zonas “claras” homogéneas.
4. En todas las muestras, el patrón de fractura no se altera observándose fracturas con trazos a 45° aproximadamente de la superficie.

**ACERO AISI 1040**

Tabla 46. Imágenes del corte transversal del fragmento, con el T.T. indicado.

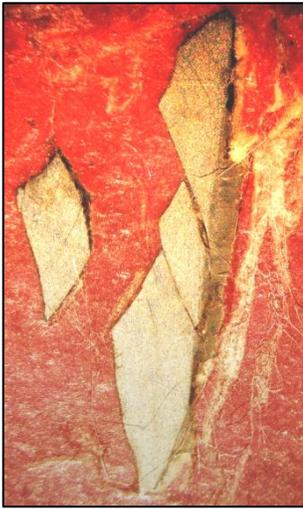
			
Materia Prima.	T.T. 1	T.T. 2	T.T. 3
El patrón de fractura en todas las muestras del grupo 1040 sigue una trayectoria aproximada a 45° de la superficie, independientemente del tratamiento térmico aplicado.			

Tabla 47. Micrografías del acero AISI 1040, con el T.T. indicado.

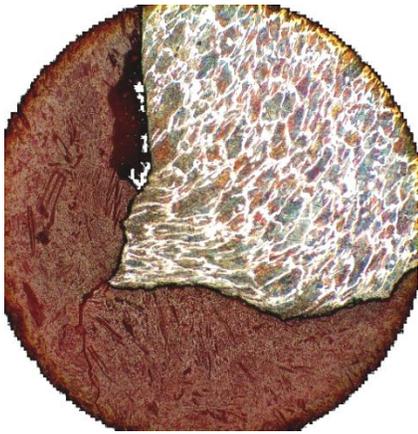
<b>TRATAMIENTO TERMICO: MATERIA PRIMA.</b>		
		
100 X	200 X	500 X
<b>ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.</b>		
Patrón de fractura a 45° aproximadamente, deformación en las zonas a ambos lados de la línea de fractura y en el frente de avance de la misma. La deformación es visible incluso a bajos aumentos.		

Tabla 48. Micrografías del acero AISI 1040, con el T.T. indicado.

<b>TRATAMIENTO TERMICO: 1</b>		
		
100 X	200 X	500 X
<b>ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.</b>		
<p>Fractura a 45° aproximadamente de la superficie, no se observa deformación, no es evidente sobre la línea de fractura, a 500x se observa una línea clara sin ataque químico, la cual sigue el trazo de la fractura, sin observarse evidencia de deformación en la zona,</p>		

Tabla 49. Micrografías del acero AISI 1040, con el T.T. indicado.

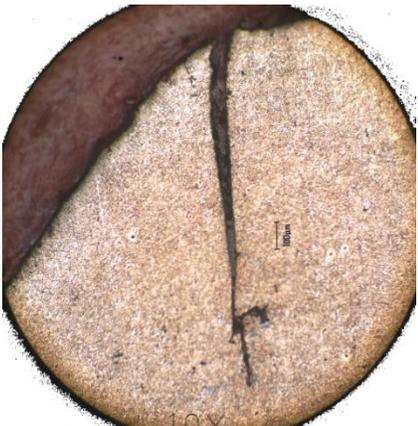
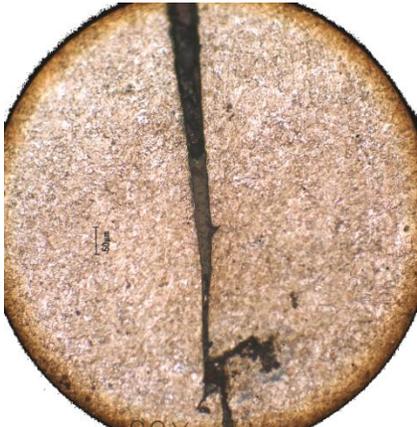
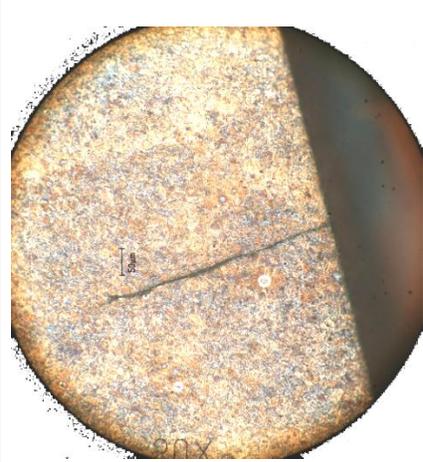
<b>TRATAMIENTO TERMICO: 2</b>		
		
100 X	200 X	500 X
<b>ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.</b>		
<p>No se observa deformación en la línea de fractura, se hace evidente a 500x una línea que podría relacionarse a deformación de la estructura, sin embargo su efecto va disminuyendo hasta un grosor de menos de 20 micras.</p>		

Tabla 50. Micrografías del acero AISI 1040, con el T.T. indicado.

<b>TRATAMIENTO TERMICO: 3</b>		
		
100 X	200 X	500 X
<b>ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.</b>		
<p>De forma similar a la muestra con el T.T. 2, no se observa deformación en el material, a 500x es posible observar al frente del avance de las fracturas: líneas claras relacionadas con deformación de la estructura pero en este caso su grosor es inferior a 40 micras.</p>		

### **CONCLUSIONES GRUPO AISI 1040**

1. El comportamiento de este grupo es similar al grupo 1020 en cuanto a los patrones de fractura a 45° de la superficie.
2. El material en condición de materia prima, presenta una deformación en su estructura en ambos lados de la línea de fractura y en el frente de avance de la misma.
3. Se presenta una menor deformación en su microestructura, comparado con el AISI 1020, casi nula, salvo en el caso del frente o avance de la fractura, en la cual dicha deformación se reduce a unas cuantas micras (menos de 40) en las muestras con el T.T. 2 y T.T. 3 , y prácticamente ausente en la muestra con el T.T.
4. Se observa de forma similar al grupo 1020, en algunas fracturas, zonas de color claro al frente y a los costados de las fracturas, sin ataque aparente, relacionadas con alteración de la estructura.
5. Se observan fracturas cuya orientación es a 90° de la superficie, sin embargo el patrón a 45° es dominante.
6. Las **zonas claras** relacionadas con el avance de la fractura, son visibles **únicamente en los aceros** con tratamiento térmico de **temple y revenido**.

**ACERO AISI 1060**

Tabla 51. Imágenes del corte transversal del fragmento, con el T.T. indicado.

			
Materia Prima.	T.T. 1	T.T. 2	T.T. 3
<p>El patrón de fractura dominante en todas las muestras sigue una trayectoria aproximada a 45° de la superficie, aunque pueden observarse fracturas en sentido transversal en las muestras con el T.T. 2 y T.T. 3.</p>			

Tabla 52. Micrografías del acero AISI 1060, con el T.T. indicado.

<b>TRATAMIENTO TERMICO: MATERIA PRIMA.</b>		
		
100 X	200 X	500 X
<b>ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.</b>		
<p>Patrón de fractura a 45° aproximadamente, deformación en las zonas alrededor de la fractura y en el frente del avance de la misma. Visible incluso a bajos aumentos.</p>		

Tabla 53. Micrografías del acero AISI 1060, con el T.T. indicado.

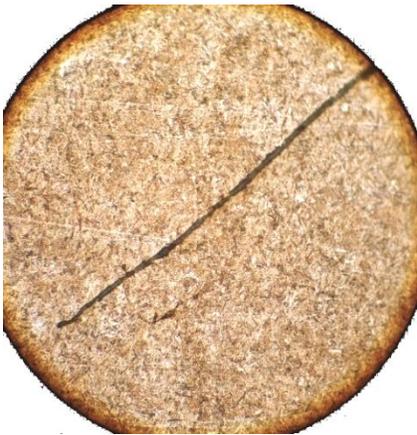
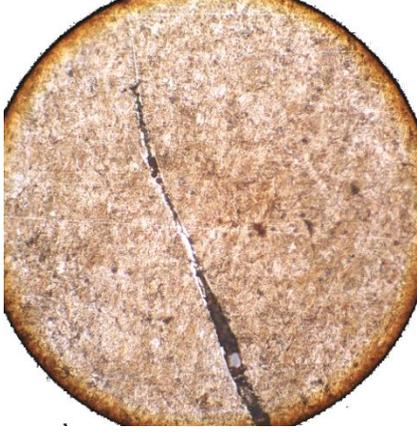
<b>TRATAMIENTO TERMICO: 1</b>		
		
100 X	200 X	500 X
<b>ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.</b>		
<p>Fractura a 45° aproximadamente de la superficie, no se observa deformación, no es evidente sobre la línea de fractura, a 500x se observa en algunas fracturas, en la cara de la fractura, zonas claras homogéneas siguiendo el trazo de la fractura, sin observarse evidencia de deformación en la zona</p>		

Tabla 54. Micrografías del acero AISI 1060, con el T.T. indicado.

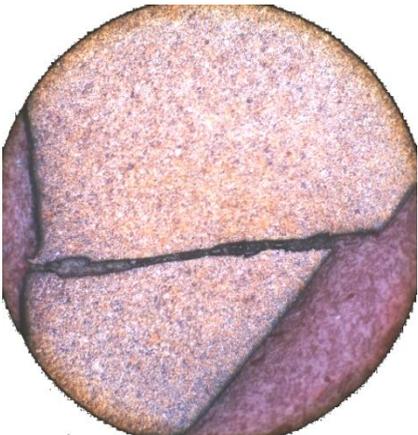
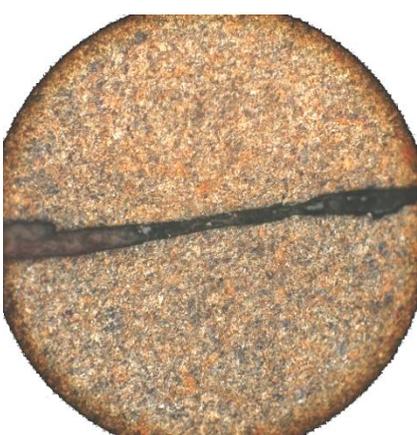
<b>TRATAMIENTO TERMICO: 2</b>		
		
100 X	200 X	500 X
<b>ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.</b>		
<p>No se observa deformación en la línea de fractura. Frente al avance de la fractura se hace evidente a 500x, aunque no en todas las líneas de fractura, una zona clara homogénea relacionada con alteración de la estructura sin evidencia de deformación.</p>		

Tabla 55. Micrografías del acero AISI 1060, con el T.T. indicado.

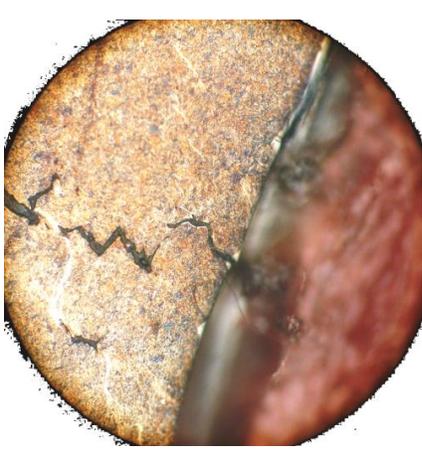
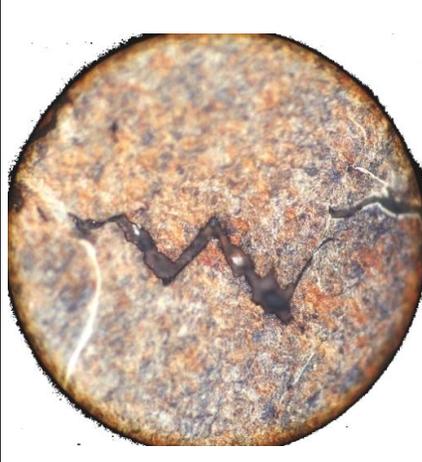
<b>TRATAMIENTO TERMICO: 2</b>		
		
100 X	200 X	500 X
<b>ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.</b>		
<p>Se hace evidente otro patrón de fractura de avance angular, en zigzag, que igual que la anterior no presenta evidencia de deformación. Al costado se observa la misma línea clara sin evidencia de deformación.</p>		

Tabla 56. Micrografías del acero AISI 1060, con el T.T. indicado.

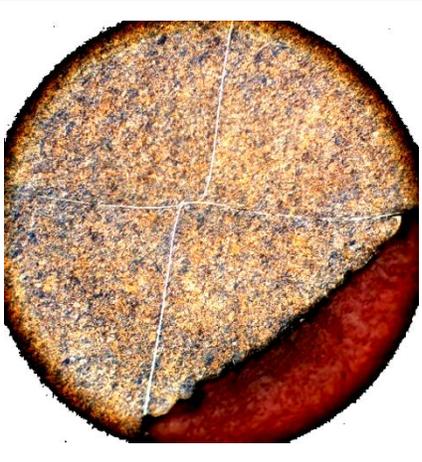
<b>TRATAMIENTO TERMICO: 3</b>		
		
100 X	200 X	500 X
<b>ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.</b>		
<p>No se observa deformación en el material, a 500x es posible observar al frente del avance de las fracturas, líneas claras relacionadas con alteración de la estructura, dichas líneas forman ángulos aprox. de 45 grados con la superficie, evidenciando una deformación de ésta última donde la línea la alcanza (en la imagen a 200x se evidencia). Se tiene la hipótesis que la deformación en la superficie de fractura, es por efecto del deslizamiento del material por efecto cortante de los esfuerzos generados en la detonación.</p>		

Tabla 57. Micrografías del acero AISI 1060, con el T.T. indicado.

<b>TRATAMIENTO TERMICO: 3</b>		
		
100 X	200 X	500 X
<b>ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.</b>		
<p>Patrones de fractura secundarios (parten de las fracturas rectas primarias) y presentan una trayectoria de fractura con mayor influencia de la estructura, son rectos con trayectoria irregular, influenciada por el tamaño de los cristales de martensita, como puede observarse en la fotomicrografía a 500x.</p>		

#### **CONCLUSIONES GRUPO AISI 1040**

1. Nuevamente el patrón de fractura es a 45 ° (aproximados) de la superficie de fractura.
2. La muestra con estructura perlita-ferrita es la que presenta deformación de la estructura asociada a la fractura.
3. No hay evidencia de deformación en la estructura asociada a la fractura, en las muestras con estructura de martensita revenida.
4. En las muestras con tratamiento térmico, se observan zonas (líneas) claras homogéneas asociadas a la fractura sin deformación apreciable de la estructura.
5. Se observa en la muestra con el T.T. 2 fracturas en zig-zag, con ausencia de deformación en su estructura. De nueva cuenta, hay zonas (líneas) claras homogéneas.

#### **CONCLUSIONES GENERALES.**

1. La trayectoria de fractura dominante en todos los grupos de muestras es a 45° aproximados de la superficie.
2. La estructura presente en las muestras no tiene influencia en la fractura primaria ya que esta se presenta en todas las muestras a 45 ° aproximadamente, independientemente del tratamiento térmico dado, incluyendo a los materiales con perlita y ferrita en su estructura.

3. El grado de deformación observable asociado al sistema de fracturas, disminuye en función de la estructura, los mayores grados de deformación corresponden a estructuras de perlita y ferrita (ferrita con distribución uniforme o intergranular).
4. La deformación observada en los grupos con tratamiento térmico, también disminuye en función del contenido de carbono, observándose una mayor deformación a menor contenido de carbono,
5. En las muestras con mayor contenido de carbono y con temple y revenido más severo (donde se fragilizó más el material según los ensayos del comportamiento mecánico del material), se observan sistemas de fracturas con avance angular (en zig-zag).

#### 4.3.3. Ensayo de microdureza.

Como se describe en el punto 2.3.1 del estado del arte, los investigadores concluyeron que en el acero aleado Aermet 100 **“las fracturas crecen a lo largo de un “bandeamiento” muy estrecho, del orden de  $\leq 1\mu\text{m}$  y mucho más duro que el resto de material que lo rodea”**, este comportamiento lo describió dicho material, el cual presentaba una estructura de martensita.

En el caso de nuestra investigación, los aceros AISI 1040 y 1060 con tratamientos térmicos, presentaron una estructura similar (martensita revenida), por tal motivo se seleccionó 1 pieza por cada uno de dichos aceros, ambos con el T.T. 3, y se realizaron mediciones de dureza sobre y alrededor de las líneas blancas homogéneas, asociadas a las fracturas, en la tabla 58 se describen los resultados.

Tabla 58. Dureza reportada sobre y alrededor de las líneas blancas y homogéneas de las muestras; resultados obtenidos del ensayo de nanodureza.

	AISI 1040			AISI 1060		
	HV	HRc	Observaciones	HV	HRc	Observaciones
<b>Dureza</b>	588.5	53.7	<b>Dureza alrededor de la línea</b>	547.7	51.3	<b>Dureza alrededor de la línea</b>
	626.8	55.7		547.7	51.3	
	605	54.6		485.1	47.4	
	619.5	55.4		521.8	49.7	
	706	58.2		547.7	51.3	
	742.8	61.6		<b>Dureza sobre la línea</b>	578.7	
	742.3	61.5				
<b>Máximo.</b>	<b>742.8</b>	<b>61.6</b>	<b>578.7</b>	<b>53.2</b>		
<b>Mínimo.</b>	<b>588.5</b>	<b>53.7</b>	<b>485.1</b>	<b>47.4</b>		
<b>Promedio.</b>	<b>661.5</b>	<b>57.2</b>	<b>538.1</b>	<b>50.7</b>		
Dureza reportada en el punto 4.2.1.2	<b>34.92 (HRc) (Dureza promedio)</b>		<b>40.19 (HRc) (Dureza promedio)</b>			

**Nota:** Las lecturas originales corresponden a las unidades HV, los valores de dureza en unidades de la escala HRc, corresponden a equivalencias tomadas de tablas de conversión de dureza.

Del análisis de este ensayo podemos concluir lo siguiente:

1. A pesar de que no se observa en el **microscopio óptico** una deformación a la estructura (martensita revenida) del acero de los fragmentos, sí se registró un incremento en la dureza de dichos materiales. El aumento corresponde a un 63.8% para el acero AISI 1040 y un 26.15% para el acero AISI 1060 (el cálculo se realizó en función de los valores promedio del acero en condición de fragmento vs. Dureza del mismo acero con el T.T.3).
2. Sí se registra una mayor dureza de las líneas blancas homogéneas en comparación de la observada en los alrededores de la misma (hasta un 15.6% y 12.2% mayor en el acero AISI 1040 y AISI 1060, respectivamente) y muy superior a la reportada en el punto 4.2.1.2. (76.4% y 32.37% mayor en el caso del AISI 1040 y AISI 1060, respectivamente).

#### 4.4. Estadística de los fragmentos.

En la tabla 59 se presenta el resumen de los resultados obtenidos en las pruebas de campo; en las figuras 56 y 57 se presentan las graficas comparativas de cantidad de fragmentos (con una eficiencia estimada del 100%) y relación: fragmentos/peso, respectivamente

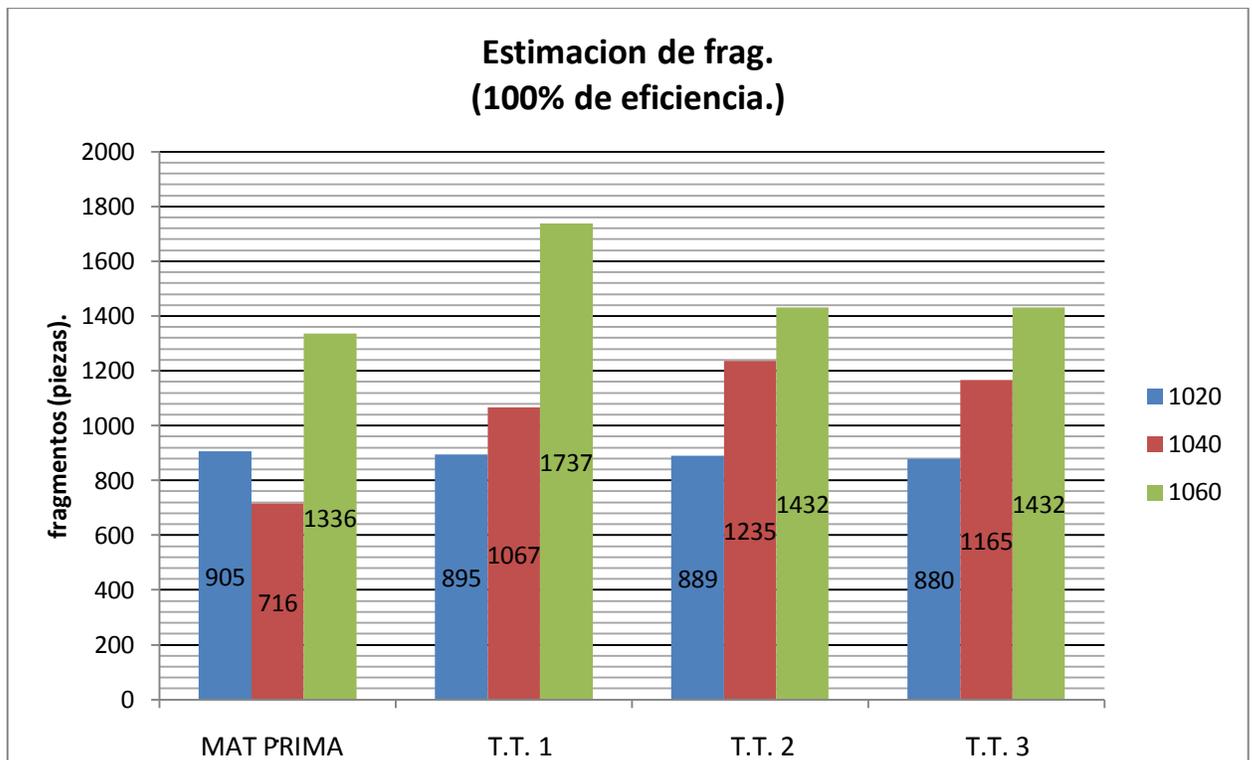


Figura 56. Grafico comparativo de la cantidad de fragmentos obtenidos por acero y tratamiento térmico.

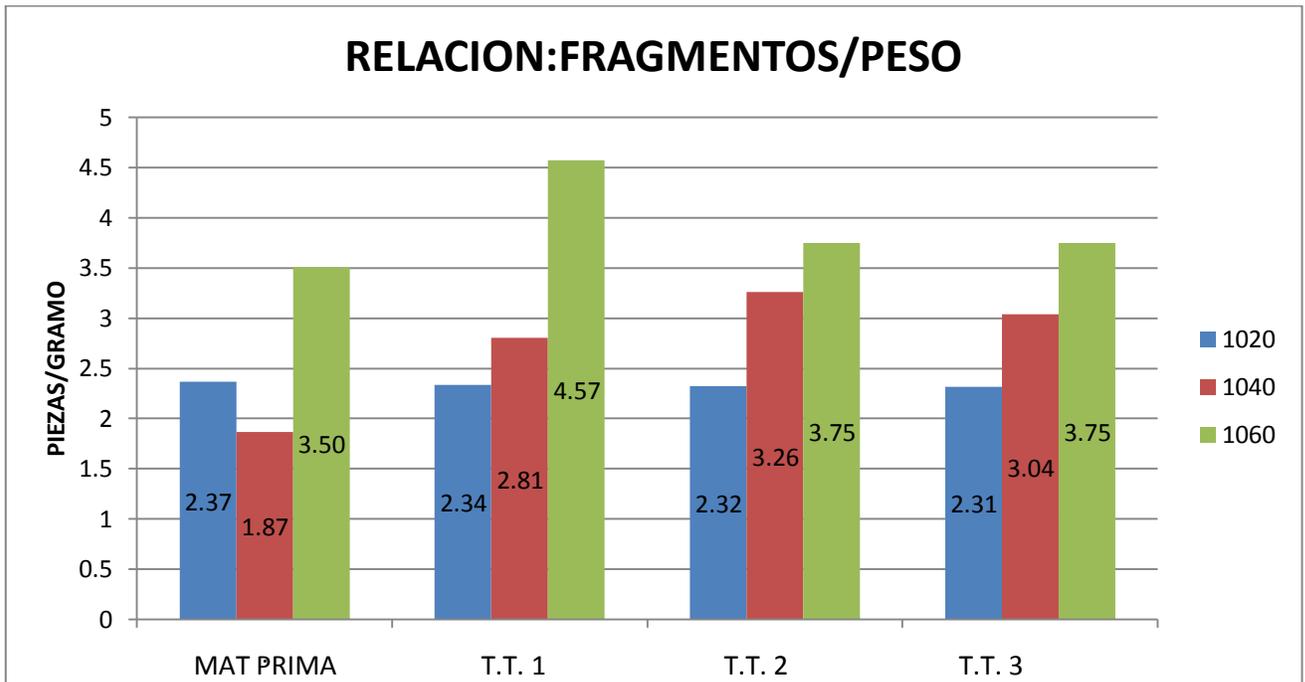


Figura 57. Grafico comparativo de la relación: fragmentos/peso, por acero y tratamiento térmico.

Tabla.59. Resumen de las pruebas destructivas.

No. Probeta	acero	T.T.	peso 1 (grs)	peso 2 (grs)	fragmentos (piezas)	Relación: fragmentos/peso2	eficiencia % (p2/p1)*100	Ganancia % ((Rel. Final/Rel. Orig.)-1)*100
10	1020	sin T.T.	382.6	273.4	647	2.37	71.46	0.00
12		T.T. 1	383	320.8	750	2.34	83.76	-1.21
14		T.T. 2	383	324.4	753	2.32	84.70	-1.91
15		T.T.3	380	303.3	702	2.31	79.82	-2.20
25	1040	sin T.T.	383.3	312.7	584	1.87	81.58	0.00
27		T.T. 1	380.2	327.4	919	2.81	86.11	50.30
29		T.T. 2	379	331.1	1079	3.26	87.36	<b>74.49</b>
31		T.T.3	383.4	331.6	1008	3.04	86.49	62.77
42	1060	sin T.T.	381.2	300.2	1052	3.50	78.75	0.00
43		T.T. 1	380.2	325.4	<b>1487</b>	<b>4.57</b>	85.59	30.40
45		T.T. 2	382.2	315.2	1181	3.75	82.47	6.92
48		T.T.3	382	325.5	1220	3.75	85.21	6.96

**Nota 1:** El **peso 1** corresponde al peso del recipiente piloto c/tapas y sin espoleta. El **peso 2** corresponde al peso de los fragmentos, excluyendo el aluminio de la espoleta.

**Nota 2:** Para el cálculo del **% de ganancia** se entenderá como "**Rel. Final**" al valor correspondiente al cociente de dividir el número de fragmentos entre el peso 2, ambos valores son los generados por cada probeta. Por otro lado, para el cálculo de la "**Rel. Orig.**", se obtuvo el cociente de dividir el número de fragmentos entre el peso 2, ambos valores, son los arrojados por las probetas sin tratamiento térmico.

Del análisis del ensayo destructivo se llegó a las siguientes conclusiones:

1. La mayor cantidad de fragmentos por unidad de peso la presentó el acero AISI 1060 con el tratamiento térmico 1 (temple y revenido a 300°C), con una relación de 4.57 fragmentos por cada gramo.
2. Aún y en condición de materia prima (laminado en caliente y recocido), el acero AISI 1060 presentó una mayor relación "fragmentos/peso<sup>2</sup>", que los aceros AISI 1020 y 1040 con y sin tratamiento térmico.
3. Con excepción del tratamiento térmico 1, el acero AISI 1060, no presenta una ganancia importante en la fragmentación con la aplicación de los tratamientos térmicos, esta oscila entre el 6.92 % a 6.96%, para el T.T.2 y el T.T.3, respectivamente.
4. El Acero AISI 1040 fue el que presentó el mayor incremento de fragmentación al aplicarle los tratamientos térmicos (con el T.T. 2, seguido por el T.T. 3 y finalmente el T.T. 1), con un porcentaje de ganancia entre un 50.3% y un 74.49%.
5. El acero AISI 1020 no presentó ganancia en la relación fragmentos/peso 2, con ninguno de los tratamientos térmicos aplicados, por el contrario y de manera inesperada, se obtuvo una pérdida en la fragmentación del orden de -1.2% a -2.2 %.

## 5. Discusión de resultados y conclusiones.

Después de realizar el análisis de los resultados, se llegaron a las siguientes conclusiones:

1. En términos generales y sin importar la condición del material, es decir, con o sin tratamiento térmico, **a mayor contenido de carbono, mayor es la dureza, la resistencia a la tensión de los aceros y la relación: fragmentos/masa**. Esto se debe a la formación de la fase martensita en la estructura. Siendo más marcado el incremento de dichas propiedades con la aplicación de los tratamientos térmicos, sobre todo entre el acero AISI 1020 y el AISI 1040, que entre éste último y el AISI 1060.
2. Al **incrementar la temperatura del revenido**, se verificó una **pérdida de dureza y de resistencia a la tensión** en todos los aceros, y viceversa. Esta relación **no fue observada en la relación: fragmentos/masa**, resultado del ensayo destructivo.
3. **No se observó una relación directa entre los resultados de las pruebas de impacto charpy y el de los ensayos destructivos** de un mismo acero y con idénticos tratamientos térmicos. La energía absorbida al impacto, en términos de % de fragilidad adquirida (ver la tabla 18) es mucho mayor al % de ganancia en la fragmentación (ver la tabla 59). Por tal motivo, **la información que arroja el ensayo charpy no es de utilidad para poder predecir el comportamiento de un material sometido a los esfuerzos producto de la detonación de un alto explosivo**. Se estima que esta diferencia es consecuencia a que la velocidad de deformación del material durante la detonación es mucho mayor a las desarrolladas en la prueba de impacto charpy, lo cual activa una mayor cantidad de mecanismo que inician y propagan las fracturas.
4. Del análisis de las superficies de fractura del ensayo charpy y las observadas con el microscopio electrónico de barrido, se puede afirmar que **sin importar que las velocidades de deformación de un material sometido en la detonación del explosivo (del orden de 4400 m/s) son muy grandes, siempre existirá un porcentaje** o parte del mismo que se deformara plásticamente (**dúctil**) antes de que ocurra la fractura frágil.
5. Se verificó que al igual que lo reportado en el punto 2.3.1 del estado del arte, en **los aceros con tratamiento térmico** (específicamente, los que se integran de estructura de fase martensita revenida) **la fractura se asocia con la presencia de una línea clara homogénea**, la cual presenta una mayor dureza que el resto de la estructura. Se desconoce el origen de dicha línea, así como su estructura. De igual forma, se registro un incremento en la dureza de la estructura después de la detonación, aunque a 500x no se percibe una deformación en la misma.
6. En **los aceros sin tratamiento térmico**, con estructura ferrita-perlita, la iniciación y propagación de **las fracturas pudieran estar asociadas a las inclusiones presentes** al material, no observándose dicho fenómeno en nuestras micrografías. Lo que si se pudo verificar, es la **deformación de la estructura** en las zonas circunscritas a la línea de fractura o por donde esta avanza. Se estima que la estructura aledaña a la fractura registraría una mayor dureza, por el hecho de que la deformación de la estructura activa mecanismos que incrementan dicha propiedad.
7. En todos los aceros y en términos generales, **las fracturas ocurren en un ángulo aproximado de 45° con respecto a la superficie del recipiente y entre ellas**; lo cual nos hace suponer, que en dicho ángulo se localiza el **esfuerzo cortante máximo** producto de la detonación.
8. De conformidad a los **requerimientos mecánicos** del recipiente estándar establecidos por el diseñador (mencionados en el punto 2.1.2), **todos los aceros** en condición de **materia prima, el AISI 1020 con todos los tratamientos térmicos y el AISI 1040 con el T.T. 3. cumplen** con tales requisitos.

9. En términos prácticos, y **buscando la mayor relación: fragmentos/masa** y respetando los requerimientos del diseñador, se tienen **2 opciones ingenierilmente viables**:

- a. Fabricar los recipientes de acero **AISI 1060 sin aplicar tratamiento térmico** alguno, con una relación de 3.5 fragmentos/1 gramo y una resistencia a la tensión de 730 N/mm<sup>2</sup>.
- b. Fabricar los recipientes de acero **AISI 1040 con el tratamiento térmico 3**, con una relación de 3.04 fragmentos/1 gramo y una resistencia a la tensión de 1044 N/mm<sup>2</sup>.

Ambos aceros mejoran la relación: fragmentos/masa con respecto al AISI 1020, en promedio un 37.5% y entre ellos la diferencia de **fragmentación** es de un 15% más en el AISI 1060 respecto al AISI 1040, **muy similares**. Sin embargo, una **importante diferencia** se registra en el incremento de la **resistencia a la tensión**, siendo **superior en un 30% en el AISI 1040 comparadas al AISI 1060**.

10. A pesar de incrementar sus propiedades mecánicas **con los tratamientos térmicos**, el acero **AISI 1020 no presentó una mejora en la fragmentación**, por el contrario, existió una pérdida. No se identifica claramente la causa de dicho empobrecimiento.

## **6. Recomendaciones.**

Como producto de los resultados de este trabajo, se estiman adecuadas declarar las siguientes recomendaciones para futuros trabajos sobre este tema:

### **Con el fin de mejorar el producto.**

1. Fabricar 2 lotes de recipientes con la geometría estándar (de tres piezas por cada tipo de acero), el primer lote sin aplicar los tratamientos térmicos y el segundo lote, aplicando un temple en aceite agitado y revenido a una temperatura de 450°C (50°C por encima de la máxima utilizada en el presente trabajo, con el objeto de mejorar la elasticidad del material). La finalidad sería verificar la influencia de la geometría en la detonación.
2. Clasificar los fragmentos en grupos, en función de su peso, para realizar un estudio estadístico de la distribución de frecuencias.
3. Elaborar los cálculos de energía cinética y velocidades que desarrollaría cada grupo de fragmentos, con la finalidad de verificar o establecer la eficiencia en el abatimiento de blancos de la munición.
4. Verificar con pruebas de campo los cálculos velocidades y energía cinética desarrollada por los fragmentos en la detonación, así como determinar las distancias o alcance de los fragmentos con el fin de establecer los radios de las zonas de abatimiento de blancos.
5. Definir la mejor relación costo-beneficio al seleccionar el material de los recipientes estándar.
6. Proponer el cambio en el proceso de fabricación: se sugiere realizar un temple y revenido en la etapa final del maquinado del recipiente estándar (posterior al perfilado), verificando la deformación que se genera en el temple. Quizás será necesario realizar un rectificado de geometrías críticas.

### **Con el fin de profundizar la investigación en el fenómeno de fragmentación.**

1. Realizar un análisis más profundo de las inclusiones y otros defectos en la estructura del material, con la finalidad de verificar y cuantificar su influencia en la fragmentación.
2. Realizar la caracterización de las zonas claras homogéneas relacionadas con el avance de las fracturas en los aceros templados. Se recomienda utilizar Difracción de rayos-x, M.E.B. y nanodureza.
3. Profundizar en el análisis de los mecanismos que se activan por la detonación y que se encuentran relacionados con la iniciación y propagación de las de las fracturas. Verificar las diferencias entre dichos mecanismos para los aceros con estructura ferrita-perlita y los aceros con estructura martensítica.

## 7. Referencias.

- [1] A.M. Sabroff y otros, Forging materials and practices, Reinhold Book Corporation, E.E.U.U., 1968.
- [2] G. Kamenshchikov y otros, Forging Practice, Peace Publishers, Moscú, sin año de publicación.
- [3] [http://www.efunda.com/materials/alloys/alloy\\_home/alloys.cfm](http://www.efunda.com/materials/alloys/alloy_home/alloys.cfm)
- [4] Maria Elena Sanchez Vergara y otros, Tratamientos Termicos de la a a la z, ed. trillas, México d.f., 2006.
- [5] Donald R. Azkeland y Pradeep P. Phulé, Ciencia e Ingeniería de los Materiales, 4ª. Ed., edit. Edamsa, México d.f., 2008.
- [6] ASTM E18 "rockwell hardness and rockwell superficial hardness of metallic materials".
- [7] ASTM E 8-04 "standard test methods for tension testing of metallic materials".
- [8] ASTM E 23-02a "standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials".
- [9] International Journal Of Impact Engineering, 35 (2008), 1547-1556 Pgs. "Investigation of the fracture and fragmentation of explosively driven rings and cylinders".
- [10] International Journal Of Impact Engineering, 33 (2006), 294-304 Pgs. "PAFRAG modeling of explosive fragmentation munitions performance".
- [11] [www.dtic.mil/docs/citations/ADA393816](http://www.dtic.mil/docs/citations/ADA393816)
- [12] International Journal of Physical Science Vol. 4 (9) pp. 514-518, September, 2009, "Effect of cooling rate on hardness and microstructure of AISI 1020, AISI 1040 and AISI 1060 Steels".
- [13] Jane's Ammunition Handbook 2004-2005 ed. by Charles L. Cutshaw and Leland Ness.
- [14] Military Handbook 756 (AR) "manufacture of projectiles, projectile components, and cartridge cases for artillery, tank armament, and mortars".
- [15] Harry Chandlers, Heat Treater'S Guide Practices For Irons And Steel, Astm.