



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica

**ESTUDIO DE LA IMPORTANCIA DE EVALUAR LA TENACIDAD  
EN EL ACERO SAE 1045**

**Oswaldo Jose Melgar Acajabon**

Asesorado por Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez

Guatemala, noviembre de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO DE LA IMPORTANCIA DE EVALUAR LA TENACIDAD  
EN EL ACERO SAE 1045**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**OSWALDO JOSE MELGAR ACAJABON**

ASESORADO POR ING. CARLOS HUMBERTO PÉREZ RODRÍGUEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO**

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a.i.)
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Ing. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a.i.)
EXAMINADOR	Ing. Milton Alexander Fuentes Orozco
EXAMINADOR	Ing. Luis Alfredo Asturias Zúñiga
EXAMINADOR	Ing. Carlos Snell Chicol Morales
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **ESTUDIO DE LA IMPORTANCIA DE EVALUAR LA TENACIDAD EN EL ACERO SAE 1045**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 6 de febrero de 2023.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Oswaldo', is centered within a light gray rectangular box.

**Oswaldo Jose Melgar Acajabon**

Guatemala, 10 de agosto de 2023

Ingeniero  
Gilberto Enrique Morales Baiza  
Director de Escuela de Ingeniería Mecánica  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Ingeniero Morales:

Por este medio le doy a conocer que la revisión que he realizado del trabajo de graduación del estudiante **OSWALDO JOSE MELGAR ACAJABON**, con registro académico **201220173** y CUI **2329316150101**, titulado: **“ESTUDIO DE LA IMPORTANCIA DE EVALUAR LA TENACIDAD EN EL ACERO SAE 1045”**, se ha concluido satisfactoriamente.

En base a lo anterior, lo someto a su consideración a efecto de continuar con el trámite respectivo para su aprobación.

Sin otro particular,

atentamente,



Carlos Humberto Pérez Rodríguez  
INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL  
Colegiado 3071

**Carlos Humberto Pérez Rodríguez**  
**Ingeniero Mecánico Industrial**  
**Colegiado 3071**  
**ASESOR**



Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.EIM.038.2023

El Coordinador del Área de Materiales de Ingeniería de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado: **ESTUDIO DE LA IMPORTANCIA DE EVALUAR LA TENACIDAD EN EL ACERO SAE 1045** desarrollado por el estudiante **Oswaldo Jose Melgar Acajabon** con Registro Académico **201220173** y CUI **2329316150101** recomienda su aprobación.

*"Id y Enseñad a Todos"*



Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez  
Coordinador Área de Materiales de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica

Guatemala, agosto 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

LNG.DIRECTOR.231.EIM.2023

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador de área y la aprobación del área de lingüística del trabajo de graduación titulado: **ESTUDIO DE LA IMPORTANCIA DE EVALUAR LA TENACIDAD EN EL ACERO SAE 1045.**, presentado por: **Oswaldo Jose Melgar Acajabon**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”



Ing. Gilberto Enrique Morales Baiza  
Director  
Escuela de Ingeniería Mecánica

Guatemala, noviembre de 2023



Decanato  
Facultad de Ingeniería  
24189101- 24189102  
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.737.2023

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al Trabajo de Graduación titulado: **ESTUDIO DE LA IMPORTANCIA DE EVALUAR LA TENACIDAD EN EL ACERO SAE 1045**, presentado por: **Oswaldo Jose Melgar Acajalon**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Ing. José Francisco Gómez Rivera  
Decano a.i.



Guatemala, noviembre de 2023

JFGR/gaac

## **ACTO QUE DEDICO A:**

**Dios**

Por darme fortaleza.

**Mis padres**

Marta Lidia de Melgar y Oswaldo Melgar.

**Mis hermanos**

Leslie, Gabriel y Bogar Melgar.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

**Facultad de Ingeniería**      Por los conocimientos brindados.

**Ingeniero**                      Carlos Pérez, por los conocimientos compartidos.

# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN .....	XIII
OBJETIVOS .....	XV
INTRODUCCIÓN .....	XVII
1. IMPORTANCIA DE ESTUDIAR LA TENACIDAD EN EL ACERO SAE	
1045 .....	1
1.1. Acero SAE 1045 .....	1
1.1.1. Descripción del acero SAE 1045 .....	1
1.1.2. Usos y aplicaciones del acero SAE 1045 .....	1
1.1.3. Composición química del acero SAE 1045 .....	2
1.2. La tenacidad como forma de cuantificar energía .....	2
1.3. La importancia de estudiar la tenacidad en aceros .....	4
2. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO SAE 1045 .....	7
2.1. Tenacidad .....	7
2.2. Ductilidad .....	7
2.3. Módulo de elasticidad .....	8
2.4. Tensión última .....	8
2.5. Límite de proporcionalidad .....	9
2.6. Resiliencia .....	10
2.7. Punto de ruptura .....	11
2.8. Plasticidad .....	11

3.	ESTUDIO DE LA IMPORTANCIA DE EVALUAR LA TENACIDAD EN EL ACERO SAE 1045.....	13
3.1.	La tenacidad en el acero SAE 1045 .....	13
3.2.	Factores que afectan tenacidad del acero SAE 1045.....	13
3.2.1.	Corrosión .....	14
3.2.1.1.	Tipos de corrosión.....	15
3.2.1.2.	Agentes corrosivos.....	24
3.2.1.3.	Efecto de las altas temperaturas.....	24
3.2.2.	Defectos puntuales y lineales.....	25
3.2.3.	Inclusiones no metálicas .....	31
3.2.4.	Grietas como defecto por mala manufactura .....	42
3.2.5.	Defectos interfaciales .....	47
3.2.6.	Tratamientos térmicos .....	51
3.2.7.	Temperatura .....	62
3.2.8.	Modificación superficial .....	64
3.3.	Ensayo de impacto .....	69
3.3.1.	Descripción de la norma ASTM E23 .....	70
3.3.2.	Equipo utilizado para ensayo de impacto Charpy ...	71
3.3.3.	Dimensiones de las probetas a ensayar .....	73
3.3.4.	Realización del ensayo.....	73
3.4.	Transición dúctil-frágil.....	78
3.4.1.	Temperatura de transición.....	78
3.4.2.	Relación entre tenacidad y temperatura de transición .....	80
4.	ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS MEDIANTE NORMA ASTM .....	83
4.1.	Resultados del ensayo de impacto.....	83
4.2.	Análisis de la tenacidad .....	84

4.3.	Análisis de la temperatura de transición durante el ensayo.....	85
4.4.	Fracturas comunes producidas durante el ensayo de impacto .....	86
4.5.	Influencia del corte abrasivo y oxiacetilénico en la tenacidad .....	88
CONCLUSIONES .....		89
RECOMENDACIONES.....		91
REFERENCIAS .....		93
ANEXO .....		97



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

<b>Figura 1.</b>	Diagrama esfuerzo-deformación para materiales a tracción.....	3
<b>Figura 2.</b>	Diagrama esfuerzo-deformación de aceros al carbono.....	9
<b>Figura 3.</b>	Límite de proporcionalidad en diagrama esfuerzo-deformación ..	10
<b>Figura 4.</b>	Microfotografía de un depósito de cobre en latón .....	16
<b>Figura 5.</b>	Acero con capas de zinc y estaño expuesto a la atmósfera .....	18
<b>Figura 6.</b>	Corrosión por erosión en álabe de turbina Pelton .....	20
<b>Figura 7.</b>	Corrosión por esfuerzo en acero inoxidable del tipo 304 .....	21
<b>Figura 8.</b>	Corrosión por picaduras en superficie metálica.....	22
<b>Figura 9.</b>	Corrosión intergranular en superficie de metal pulido .....	23
<b>Figura 10.</b>	Vacante y átomo en posición autointersticial.....	26
<b>Figura 11.</b>	Dislocación de borde en un sólido cristalino.....	27
<b>Figura 12.</b>	Dislocación de borde.....	28
<b>Figura 13.</b>	Dislocación de tornillo .....	29
<b>Figura 14.</b>	Dislocaciones visibles en una aleación de titanio .....	30
<b>Figura 15.</b>	Diferentes fases de una fractura frágil .....	33
<b>Figura 16.</b>	Coeficientes de expansión térmica .....	36
<b>Figura 17.</b>	Partícula de MnS con Ca originadora de fractura frágil.....	38
<b>Figura 18.</b>	Aluminato cálcico causante de fractura frágil .....	39
<b>Figura 19.</b>	Isla frágil iniciada por una partícula de TiN.....	41
<b>Figura 20.</b>	Grieta ancha en la superficie de un acero 8620 .....	43
<b>Figura 21.</b>	Esquema de límites de grano de diferentes ángulos.....	48
<b>Figura 22.</b>	Aspecto de límite de grano en un sólido cristalino .....	50
<b>Figura 23.</b>	Acero al 1 % de carbono esferoidizado y recocido.....	55

<b>Figura 24.</b>	Acero al 1 % de carbono templado al agua.....	57
<b>Figura 25.</b>	Diagrama de dureza y tenacidad de una probeta con muesca....	60
<b>Figura 26.</b>	Acero SAE 1045 templado en agua y revenido a 600 °F .....	61
<b>Figura 27.</b>	Esquema del método por fricción agitación.....	66
<b>Figura 28.</b>	Microestructura del acero previo y posterior al procesamiento....	67
<b>Figura 29.</b>	Tenacidad del acero antes y después de ser procesado .....	69
<b>Figura 30.</b>	Péndulos y yunques usados en ensayo de impacto .....	72
<b>Figura 31.</b>	Probetas tipo V para ensayo de impacto Charpy .....	73
<b>Figura 32.</b>	Péndulo de impacto Charpy.....	74
<b>Figura 33.</b>	Probeta de acero SAE 1045 después de corte abrasivo.....	76
<b>Figura 34.</b>	Probeta de acero SAE 1045 después de corte oxiacetilénico.....	77
<b>Figura 35.</b>	Ensayo de impacto Charpy .....	78
<b>Figura 36.</b>	Temperatura de transición de distintos aceros al carbono.....	80
<b>Figura 37.</b>	Relación de la tenacidad con la temperatura .....	81
<b>Figura 38.</b>	Fracturas en acero SAE 1045 producidas después del ensayo ..	87

## TABLAS

<b>Tabla 1.</b>	Composición química del acero SAE 1045 .....	2
<b>Tabla 2.</b>	Tenacidad del acero SAE 1045 revenido desde 740 °C .....	62
<b>Tabla 3.</b>	Resultados del ensayo de impacto .....	83

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b><math>\theta</math></b>	Ángulo Theta
<b>S</b>	Azufre
<b>Ca</b>	Calcio
<b>C</b>	Carbono
<b>HB</b>	Dureza Brinell
<b>°C</b>	Grados Celsius
<b>°F</b>	Grados Fahrenheit
<b>Fe</b>	Hierro
<b>J</b>	Joules
<b>PSI</b>	Libras por pulgada cuadrada
<b>Mn</b>	Manganeso
<b>MPa</b>	Megapascales
<b><math>\mu\text{m}</math></b>	Micrómetros
<b>mm</b>	Milímetros
<b>Nm</b>	Newton-metro
<b>TiN</b>	Nitruros de titanio
<b>Ppm</b>	Partes por millón
<b>In (pulg)</b>	Pulgadas
<b>CaS</b>	Sulfuro de calcio
<b>MnS</b>	Sulfuro de manganeso
<b>Ti</b>	Titanio
<b>Zn</b>	Zinc



## GLOSARIO

<b>Acero</b>	Aleación de hierro con otros elementos aleantes cuya selección depende del tipo de acero a producir y sus aplicaciones.
<b>Acero al carbono</b>	Acero cuyo elemento principal es el carbono que se combina con otros elementos aleantes en función de su aplicación. Es el tipo de acero más común en el diseño de elementos mecánicos, al presentar buena tenacidad y ductilidad en estado de suministro.
<b>ASM</b>	American Society for Metals.
<b>ASTM</b>	American Society for Testing and Materials.
<b>Austenita</b>	Fase de estructura sólida en un acero que se caracteriza por ser dúctil. Se logra en la primera etapa del recocido.
<b>Cementita</b>	Fase de estructura sólida de un acero que genera una estructura dura con poca ductilidad y tenacidad. Aumenta la resistencia al desgaste por erosión.
<b>Clivaje</b>	Fractura frágil en un material. Puede producir la falla catastrófica de un acero.

<b>Dislocación</b>	Imperfección propia de los sólidos cristalinos que pueden ser de borde o helicoidales, las cuales afectan el comportamiento de la fractura en un acero.
<b>Fase</b>	Cambio en la estructura sólida o líquida de un acero.
<b>Hierro fundido</b>	Aleación de hierro que se caracteriza por sus altos niveles de dureza. Es común emplearlo en el diseño de elementos mecánicos donde la dureza y resistencia al desgaste sea requerida como en algunas poleas entre otros elementos de máquinas.
<b>Imperfección puntual</b>	Imperfección de un sólido cristalino, centrada en un solo punto, afectando el desplazamiento de las grietas que en consecuencia producen la fractura frágil.
<b>Impurezas</b>	Fragmentos o elementos no deseados en una fundición de acero. No forman parte de los elementos aleantes.
<b>Inclusiones</b>	Suelen ser impurezas cerámicas no deseadas en la fundición de una aleación. Las más comunes son los sulfuros de manganeso y los nitruros de titanio. Producen clivaje en el material.
<b>Perlita</b>	Fase de estructura sólida en un acero caracterizada por generar una microestructura con granos finos y uniformes, haciendo al acero más dúctil, generando también una microestructura de perlita gruesa.

<b>Recocido</b>	Tratamiento térmico que consiste en calentar la pieza por encima de su temperatura crítica dejando enfriar lentamente el material; ya sea dentro del horno, con aire forzado o con ventilación natural. Aumenta la ductilidad al refinar la estructura de los granos.
<b>Revenido</b>	Tratamiento térmico que consiste en calentar la pieza posterior al temple, por debajo de su temperatura crítica, dejando enfriar al acero lentamente. Aumenta la tenacidad al refinar la estructura de los granos, reduciendo la longitud de los límites de granos, reduciendo el riesgo de fractura frágil.
<b>Temple</b>	Tratamiento térmico que consiste en calentar la pieza para convertirla en una estructura sólida de martensita, logrando su dureza máxima. Se realiza un enfriamiento brusco por medio de algún líquido como agua, aceite o salmuera.
<b>Tratamientos térmicos</b>	Consiste en la aplicación de calor por encima de la temperatura crítica en un acero, variando los intervalos de tiempo y temperatura de calentamiento y enfriamiento, así como los medios empleados para enfriar el material, en función de las propiedades mecánicas que se deseen mejorar.



## RESUMEN

El presente estudio pretende establecer la importancia de evaluar la tenacidad en un material de amplio uso en el diseño de elementos de máquinas como es el acero SAE 1045.

Mediante una revisión bibliográfica exhaustiva acerca de los factores que afectan la capacidad de absorber cargas de impacto en el acero SAE 1045, que van desde factores inherentes a los procesos de producción como las inclusiones cerámicas o impurezas, hasta factores controlables como la corrosión, las imperfecciones y los tratamientos térmicos, se determina por medio del ensayo de impacto Charpy como la tenacidad es afectada, siendo de mayor relevancia la influencia de los tratamientos térmicos de temple y revenido. Además, se analiza la afectación del corte abrasivo y oxiacetilénico en la tenacidad, basándose en una investigación previa, en donde se ensayan probetas a distinta temperatura observándose su transición dúctil-frágil, identificándose en consecuencia la temperatura de transición en este material.

Pretende este estudio, por lo tanto, servir como una fuente de referencia para el diseñador o ingeniero de producción interesado en diseñar elementos de máquinas capaces de absorber cargas de impacto en determinadas aplicaciones, utilizando el acero SAE 1045 para su fabricación.



## **OBJETIVOS**

### **General**

Desarrollar un estudio de la importancia de evaluar la tenacidad en el acero SAE 1045.

### **Específicos**

1. Explicar el por qué estudiar la importancia de evaluar la tenacidad en el acero SAE 1045.
2. Definir las propiedades mecánicas del acero SAE 1045.
3. Realizar el estudio de la importancia de evaluar la tenacidad en el acero SAE 1045.
4. Analizar las muestras ensayadas mediante norma ASTM.



## INTRODUCCIÓN

El acero SAE 1045 es ampliamente utilizado para fabricar elementos de máquinas diversos, en los que se requiere que el material posea distintas características y propiedades, debido a distintos tipos de carga y esfuerzos a los que serán sometidos dichos elementos, tales como: las cargas de impacto, esfuerzos cortantes entre otros. Estos tienen gran relevancia, cuando pueden afectar la rentabilidad de los equipos, o la seguridad de los operadores.

Dentro de estas características se encuentran: su alta disponibilidad, moderado precio, alta maquinabilidad, permitiendo además buena soldabilidad al precalentarse y al utilizar métodos comunes. Las propiedades mecánicas que más destacan en este acero al carbono son entre otras, su buena ductilidad, y tenacidad. Esta propiedad, que es el objeto de este estudio, permite saber cuánta energía puede absorber un material, antes de fracturarse después de recibir cargas de impacto.

Mediante un estudio exhaustivo de los distintos factores que afectan la tenacidad, basándose en distintas fuentes bibliográficas, se pretende en este trabajo de investigación determinar qué importancia tiene evaluar esta propiedad en el acero SAE 1045. Es posible cuantificar la tenacidad mediante un ensayo de impacto Charpy basándose en la norma ASTM correspondiente. En el cuarto capítulo se analizan las probetas ensayadas.



# **1. IMPORTANCIA DE ESTUDIAR LA TENACIDAD EN EL ACERO SAE 1045**

## **1.1. Acero SAE 1045**

A continuación, se dará una descripción del acero SAE 1045.

### **1.1.1. Descripción del acero SAE 1045**

El acero SAE 1045 es un acero al carbono que contiene entre 0.43 % y 0.50 % de carbono además de fósforo, manganeso y azufre. Este acero responde fácilmente a la aplicación de distintos tratamientos térmicos entre ellos: el recocido, temple y revenido; además presenta buena soldabilidad al precalentarse, así como una buena maquinabilidad al ser estirado en frío. Al ser un acero de mediano contenido de carbono, posee buena tenacidad, y buena resistencia a la tracción en estado de suministro; convirtiéndolo en un acero versátil de uso frecuente en la fabricación de elementos de máquinas y herramientas de distinto tipo.

### **1.1.2. Usos y aplicaciones del acero SAE 1045**

El acero SAE 1045 es ampliamente utilizado en la fabricación de elementos de máquinas diversos: desde engranajes de bajas velocidades, hasta ejes, chavetas, piñones, pernos de anclaje, cigüeñales, acoplamientos, bielas y otros elementos que deban presentar valores relativamente altos de tenacidad, al estar la máquina en funcionamiento.

Es utilizado frecuentemente también en la fabricación de herramientas mecánicas, agrícolas y remaches.

### 1.1.3. Composición química del acero SAE 1045

En la tabla 1 se muestra la composición química del acero SAE 1045, observándose que, al ser un acero de mediano contenido de carbono, se encuentra en un rango de entre 0.43 % y 0.50 % de este elemento, además de sus elementos aleantes.

**Tabla 1.**

*Composición química del acero SAE 1045*

<b>Acero SAE 1045</b>	
<b>Carbono</b>	<b>0.43-0.50</b>
<b>Manganeso</b>	<b>0.60-0.90</b>
<b>Fósforo</b>	<b>0.040</b>
<b>Azufre</b>	<b>0.050</b>

*Nota.* Composición química del acero SAE 1045. Obtenido de E. Oberg, F. Jones, H. Horton y H. Ryffel (2012). *Machinery's handbook*. (p. 402.) Industrial Press, Inc.

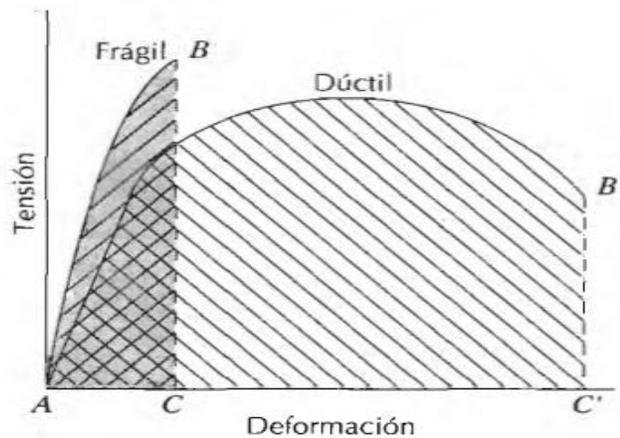
## 1.2. La tenacidad como forma de cuantificar energía

Los materiales poseen distinta capacidad de absorber energía por unidad de volumen. A este valor se le conoce como: densidad de la energía de deformación, el cual guarda una relación directa con la energía de deformación del material. Es una forma indirecta de cuantificar energía en un material, teniendo en cuenta la geometría de la probeta, y lo forma en que se aplique la carga. Por lo tanto, matemáticamente se puede expresar como: el cambio de energía por unidad de volumen.

Otra forma de cuantificar la energía que un material puede absorber antes de la fractura; es por medio del área del diagrama esfuerzo-deformación. Este diagrama es generado, mediante la realización de un ensayo de tracción, generándose automáticamente en una máquina universal moderna. Tanto el área bajo la curva dentro del límite de proporcionalidad, cuando el material es resiliente, como el área bajo el comportamiento plástico del material antes de la ruptura, se suman por métodos de integración, con el objeto de obtener la tenacidad o energía de deformación del material. Esto en el caso de baja velocidad de deformación. En la Figura 1, se representa como el área sombrada bajo la curva.

**Figura 1.**

*Diagrama esfuerzo-deformación para materiales a tracción*



*Nota.* Diagrama esfuerzo-deformación para materiales dúctiles y frágiles sometidos a ensayo de tracción. Obtenido de W. Callister (2006.) *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales.* (p. 129). Editorial Reverté.

Para obtener valores de energía directamente y de forma cualitativa, es necesario realizar un ensayo de impacto Charpy, según la norma ASTM E23. Después del impacto, se puede leer directamente de la escala graduada de la máquina de ensayo de impacto Charpy, el valor correspondiente de la energía absorbida por la probeta antes de la fractura. Se detallará en esta investigación, el procedimiento de dicho ensayo en el capítulo 3.

### **1.3. La importancia de estudiar la tenacidad en aceros**

Dentro de las propiedades mecánicas de los materiales que el diseñador de máquinas debe tener en cuenta, está entre otras: la tenacidad. Esta propiedad guarda una relación directa con la energía que puede absorber el elemento, antes de fracturarse y por ende de producirse una falla, que implique pérdidas económicas al no estar produciendo el equipo. Además de los daños materiales que detengan la producción u operación, maquinado o ensamblaje del producto, pueden ocurrir daños físicos a los operarios, resultando en prejuicios mayores en todo sentido.

Cuando existan cargas de impacto, o riesgo de ellas en algún elemento de una máquina; es de gran relevancia, por lo tanto, conocer la tenacidad del acero del que esté fabricado este elemento. Un diseño eficiente implica además de considerar las cargas de choque o impacto, también la consideración de las condiciones de operación, ambiente e imprevistos que deriven en un paro en el sistema, debido a la falla de un elemento de la máquina. Teniendo en cuenta estas consideraciones, es posible aumentar la eficiencia de la maquina o del sistema hacerlo más seguro para los operarios.

Los procesos de producción actualmente deben ser fiables y eficientes con el objeto de aumentar las utilidades en una planta. La ingeniería es una ciencia que se encuentra en constante cambio, debiendo el ingeniero mecánico actualizarse en cuanto a estudios de los materiales de ingeniería se refiere.

Este estudio, pretende resaltar la importancia de evaluar la tenacidad del acero SAE 1045, siendo un material ampliamente utilizado en el diseño de elementos de máquinas al presentar buena tenacidad en estado de suministro.



## **2. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO SAE 1045**

Se definen a continuación las propiedades mecánicas del acero SAE 1045.

### **2.1. Tenacidad**

La tenacidad puede definirse como la cantidad de energía que un material puede absorber antes de llegar a fracturarse. Los materiales dúctiles tienden a ser más tenaces que los materiales frágiles. De esta manera un material dúctil, tiene mayor capacidad de absorber energía, al recibir una carga o esfuerzo de impacto, que uno frágil, a medida que puede deformarse más, antes de la fractura.

Mediante una máquina de ensayos de péndulo Charpy, es posible obtener una medida cualitativa de la energía absorbida en el impacto o tenacidad, mediante la pérdida de energía que se calcula por medio de la diferencia de alturas y el peso del martillo del péndulo. A medida que un metal resista la rotura de impacto será más tenaz.

Al ser un material dúctil y un acero de medio carbono, el acero SAE 1045 presenta buena tenacidad con valores entre 19 J y 36 J a 40 °C templado al agua y revenido a 870 °C.

### **2.2. Ductilidad**

La ductilidad es la capacidad de un material de someterse a grandes deformaciones antes de fracturarse.

Un material dúctil, se caracteriza por presentar elongación y estricción. Ambas son propiedades de la ductilidad, que permiten cuantificarla, de forma directa; mediante un ensayo de tracción. Las ecuaciones se muestran a continuación.

$$\text{Elongación} = \frac{l_f - l_o}{l_o}$$

$$\text{Estricción} = \frac{A_f - A_o}{A_o}$$

El acero SAE 1045 presenta una elongación del 12 % y una estricción del 35 % en estado de suministro y a temperatura ambiente.

### **2.3. Módulo de elasticidad**

El módulo de elasticidad se denomina, como la razón entre el incremento de esfuerzo y el cambio de la deformación unitaria del material, sometido a una carga axial, produciéndose de esa manera el cambio de longitud. Es por ende una propiedad de los materiales dúctiles, se conoce también como módulo de Young representado por la constante E.

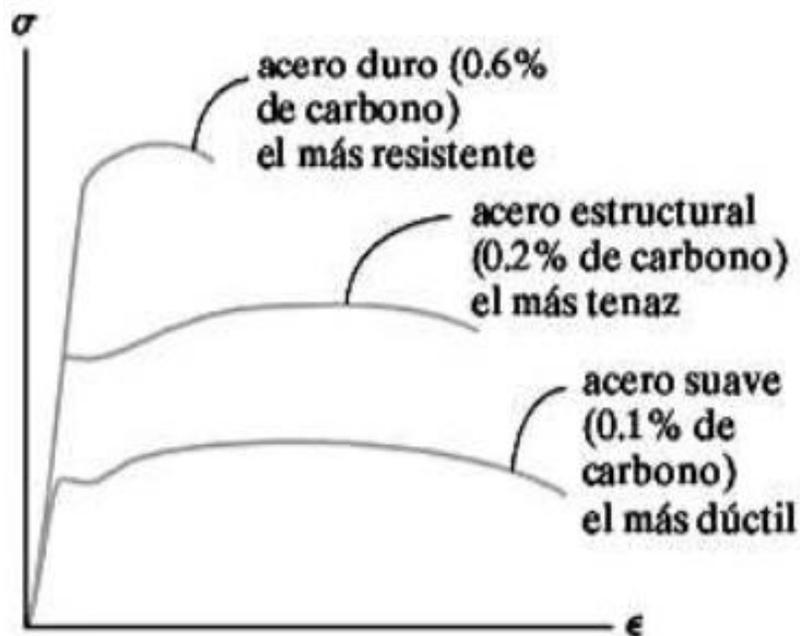
### **2.4. Tensión última**

En un material dúctil, esta tensión o esfuerzo último, indica el límite de plasticidad del material, al empezar a fracturarse. En el diagrama esfuerzo-deformación, se identifica como el máximo de la curva. En la Figura 2, se muestra el diagrama esfuerzo-deformación de distintos aceros al carbono, observándose que la tensión última varía, entre otras propiedades dependiendo del contenido de carbono. El acero de medio carbono SAE 1045 muestra un comportamiento

parecido a un acero de medio carbono, que estaría ubicado entre el acero duro con 0.6 % de carbono, y el acero más tenaz, el acero estructural con 0.2 % de carbono. La tensión última del acero SAE 1045 se estima de 630 Mpa a temperatura ambiente.

## Figura 2.

*Diagrama esfuerzo-deformación de aceros al carbono*



*Nota.* Diagrama esfuerzo-deformación para diferentes aceros al carbono. Obtenido de R. C. Hibbeler (2011). *Mecánica de materiales octava edición.* (p. 129.) Pearson Education.

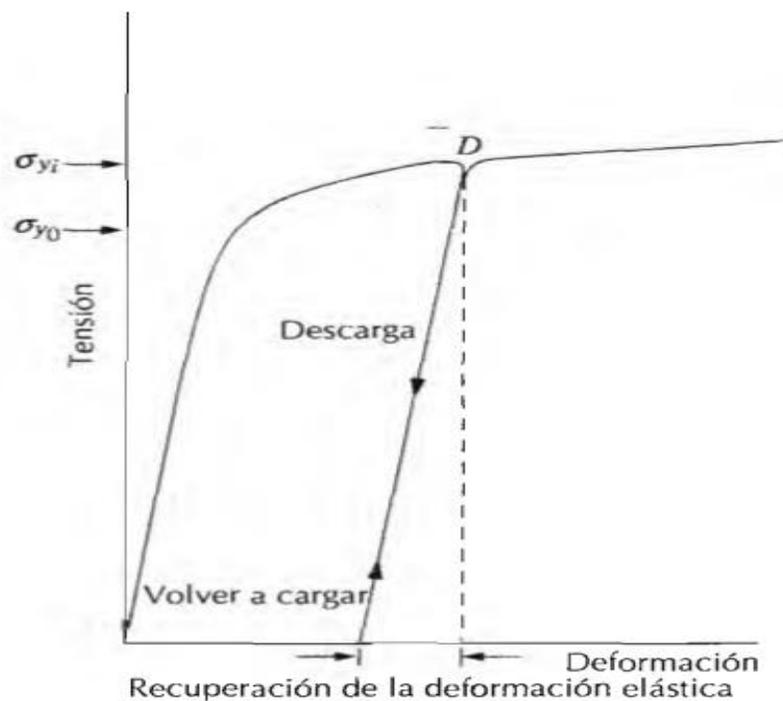
### 2.5. Límite de proporcionalidad

Representa la capacidad elástica del material, es decir la capacidad que tiene de regresar a su forma original, sin sufrir deformación permanente. En el diagrama esfuerzo-deformación está representado como el máximo esfuerzo, en

el que el comportamiento de la gráfica es proporcional representado con una recta de pendiente E. En la Figura 3, se representa con el punto D.

### Figura 3.

*Límite de proporcionalidad en diagrama esfuerzo-deformación*



*Nota.* Límite de proporcionalidad representado en un diagrama esfuerzo-deformación para materiales dúctiles y frágiles. Obtenido de W. Callister (2006.) *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales.* (p. 136.) Editorial Reverté.

## 2.6. Resiliencia

Es la capacidad de un material de absorber energía sin deformarse. En el diagrama esfuerzo-deformación se representa como el área sombreada bajo la recta de proporcionalidad, es decir dentro del límite elástico del material.

## **2.7. Punto de ruptura**

En un material dúctil, Indica el máximo esfuerzo que el material soporta antes de fracturarse o fallar por completo. En la curva esfuerzo-deformación es el punto de la curva al extremo derecho de esta, donde exactamente se produce la rotura.

## **2.8. Plasticidad**

Indica la capacidad que un material tiene de deformarse de forma permanente, antes de llegar a la rotura o esfuerzo de rotura.



### **3. ESTUDIO DE LA IMPORTANCIA DE EVALUAR LA TENACIDAD EN EL ACERO SAE 1045**

#### **3.1. La tenacidad en el acero SAE 1045**

El acero SAE 1045 es un acero de medio contenido de carbono que presenta buenos índices de tenacidad al emplearse a temperatura moderada, porque la tendencia de iniciación de fractura frágil en este material es inferior comparado con otros aceros con mayor contenido de carbono.

Algunos métodos como los tratamientos térmicos y la modificación superficial por fricción agitación, son aplicados a este material ya que aumentan sus índices de ductilidad y tenacidad de manera considerable. La tenacidad se ve afectada como se hará referencia más adelante en este capítulo, de distintos factores como: las inclusiones cerámicas, defectos por mala manufactura originadores de grietas en el proceso de colado, así como la corrosión, los defectos superficiales y las dislocaciones, entre otros.

Al considerarse un acero tenaz de alta disponibilidad y de bajo precio, es ideal para aplicaciones de diseño de máquinas y la fabricación de herramientas.

#### **3.2. Factores que afectan tenacidad del acero SAE 1045**

Existen distintos factores que afectan la tenacidad del acero SAE 1045; es decir su capacidad para absorber energía de impacto antes de la fractura. Los más relevantes son los descritos en las siguientes secciones de este capítulo.

### **3.2.1. Corrosión**

La corrosión consiste en el ataque químico sobre un material provocado por su interacción con un ambiente corrosivo; como resultado de una reacción química, en la cual su velocidad dependerá tanto de la temperatura como de la concentración de los productos y reactivos (Smith & Hashemi, 2006). Existen dos clasificaciones generales de corrosión: la corrosión química y corrosión electroquímica. En la corrosión química el material se disuelve en un líquido corrosivo. La corrosión electroquímica ocurre cuando hay pérdida de electrones por parte de los átomos del metal degradado.

Los metales son corroídos debido a que los electrones que estos poseen establecen celdas electroquímicas dentro de su estructura. Los principales agentes corrosivos en los metales son en gran parte el agua, y por ende la humedad presente en la atmosfera, asimismo agentes químicos controlados. Este ataque altera la composición, integridad o forma del material volviéndose porosos y débiles, siendo más notorio en metales.

Al ser un material económico, los aceros al carbono son utilizados ampliamente en gran variedad de equipos expuestos a humedad, siendo estos también seleccionados en gran parte por su resistencia a la tracción y tenacidad, sobre todo en los aceros de medio contenido de carbono, como es el caso del acero SAE 1045. Los aceros al carbono son utilizados ampliamente en estructuras que operan en exteriores, por ende, expuestas a agentes corrosivos.

La tenacidad del acero SAE 1045, se ve afectada de manera ascendente, al ser expuesto a los efectos de la corrosión producida por diferentes agentes corrosivos, en dos diferentes pruebas estandarizadas de corrosión. Se evidencia que existe una pérdida importante de la tenacidad, de alrededor del 63 % en las

probetas sometidas a la prueba de inmersión durante 45 días, observándose un deterioro bastante considerable del material. Es notorio también en las probetas ensayadas según la norma ASTM E-23, que la estructura afectada presenta una superficie rugosa con corrosión evidente en el interior, lo que hizo al material menos resistente al impacto. Así se evidencia que la tenacidad del acero SAE 1045 disminuye drásticamente, dependiendo del tiempo de exposición (Cárdenas et al., 2021).

Al tratarse de un factor destructivo, es de vital importancia para los ingenieros estudiar y controlar este fenómeno, el cual representa una enorme pérdida económica para la industria relacionada con aceros cada año.

### **3.2.1.1. Tipos de corrosión**

Como se mencionó, la corrosión se divide en dos tipos principales: corrosión química y corrosión electroquímica. Por su parte la corrosión electroquímica se presenta en diversos tipos, dependiendo del daño producido en el metal atacado.

En la corrosión química, el material es atacado y disuelto en un medio líquido que provoca la reacción. En este tipo de corrosión, el material se sigue disolviendo, ya sea hasta que este se disuelva completamente con el líquido o el líquido llegue a saturarse (Askeland, 1998).

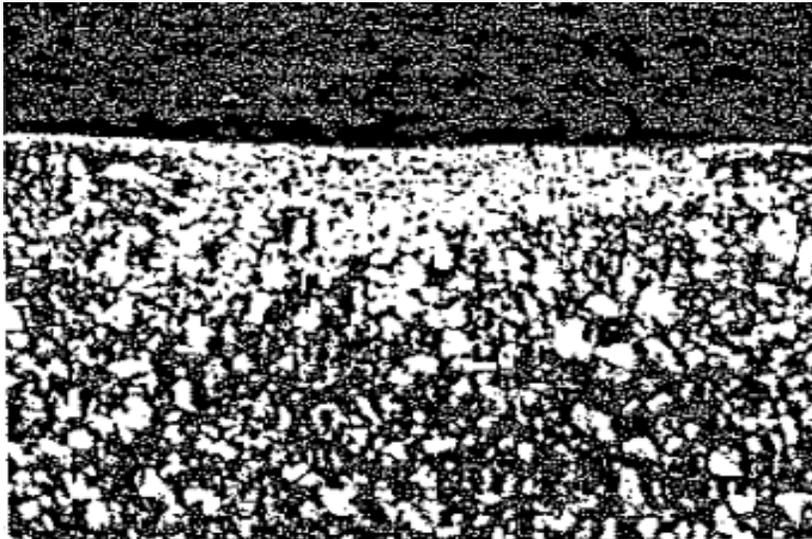
Así mismo, es importante señalar que la corrosión química o corrosión metal líquido es cada vez más frecuente en las aplicaciones industriales de los metales. Algunos metales como: el bismuto y el sodio, son ampliamente utilizados debido a sus propiedades que les permiten ser empleados como medios de transferencia de calor, sobre todo en aplicaciones como la producción

de energía atómica. Las altas temperaturas aumentan la solubilidad del metal, permitiendo que el material se disuelva alcanzando sus límites de solubilidad; disminuyendo al contrario la solubilidad a menores temperaturas, permitiendo que distintos agentes anticorrosivos sean más efectivos, protegiendo al metal de la corrosión en este caso. Es común encontrar esta situación en reactores nucleares (Avner, 1988).

La lixiviación selectiva es común en la corrosión química, esto debido a que un elemento específico de una aleación es disuelto del sólido. Esto ocurre frecuentemente en el latón, en el que ocurre un proceso de descincificación; en el cual existe pérdida selectiva del zinc en una aleación dejando al latón débil y poroso. Este fenómeno se puede observar en la figura 4, (Askeland, 1998).

**Figura 4.**

*Microfotografía de un depósito de cobre en latón*



*Nota.* Depósito de cobre en latón mostrando el efecto de la descincificación. Obtenido de D. Askeland (1998). *Ciencia e ingeniería de los materiales.* (p. 136.) International Tomson Editores.

Por su parte, un líquido ataca a un metal en regiones de límite de grano, al ser zonas de alto nivel de energía; presentándose en estas regiones fisuras, si la corrosión continúa. Este tipo de corrosión muestra un reto particular de ser prevenido o tratado debido al flujo del fluido, que acelera en gran medida el proceso de corrosión (Askeland, 1998).

En cuanto a la corrosión electroquímica, es de importancia señalar que existen distintos tipos. Estos se clasifican según el daño causado en el metal; poseyendo cada tipo características visuales distintivas. En las siguientes páginas se detallan los tipos encontrados con mayor frecuencia en aplicaciones industriales.

Dentro de los tipos más comunes de corrosión electroquímica en aceros se encuentran:

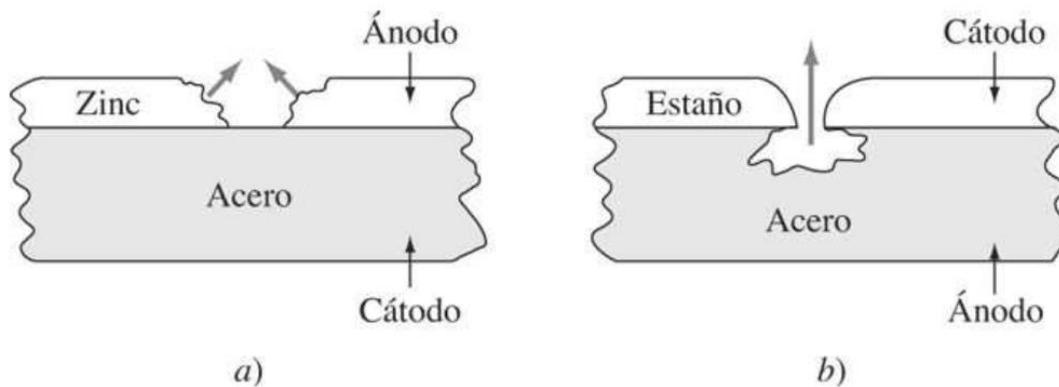
- Ataque corrosivo uniforme
- Corrosión galvánica
- Corrosión por fricción
- Corrosión por erosión
- Corrosión por picaduras
- Corrosión intergranular
- Corrosión por agrietamiento
- Corrosión por esfuerzo

El más destructivo en aceros es el ataque corrosivo uniforme. Este se caracteriza por presentar un daño superficial uniforme en el material corroído. Se mide en pérdida de peso en miligramos por decímetro cuadrado por día, y es común en todos los aceros, incluyendo los aceros al carbono.

La corrosión galvánica se presenta cuando se unen dos metales con el fin de remache, unión, o simplemente acople de elementos mecánicos o estructurales. Aquí lo que provoca corrosión, es la diferencia en su potencial electroquímico, como resultado de las celdas galvánicas formadas. Aquí el metal anódico, cumple la función de protector hacia el metal catódico. El metal anódico donde se producen iones metálicos, el cual posee un potencial negativo es el que presenta más susceptibilidad a corroerse, en el catódico se consumen los electrones (Smith & Hashemi, 2006). En la figura 5, se ejemplifica un comportamiento de este tipo, siendo el metal protector el zinc, al ser este el metal catódico.

**Figura 5.**

*Acero con capas de zinc y estaño expuesto a la atmósfera*



*Nota.* Comportamiento anódico-catódico de un acero con capas exteriores de zinc y estaño expuestas a la atmósfera. Obtenido de W. Smith., & J. Hashemi (2006). *Fundamentos de la Ciencia e ingeniería de materiales.* (p. 745.) Mc Graw Hill/Interamericana de México.

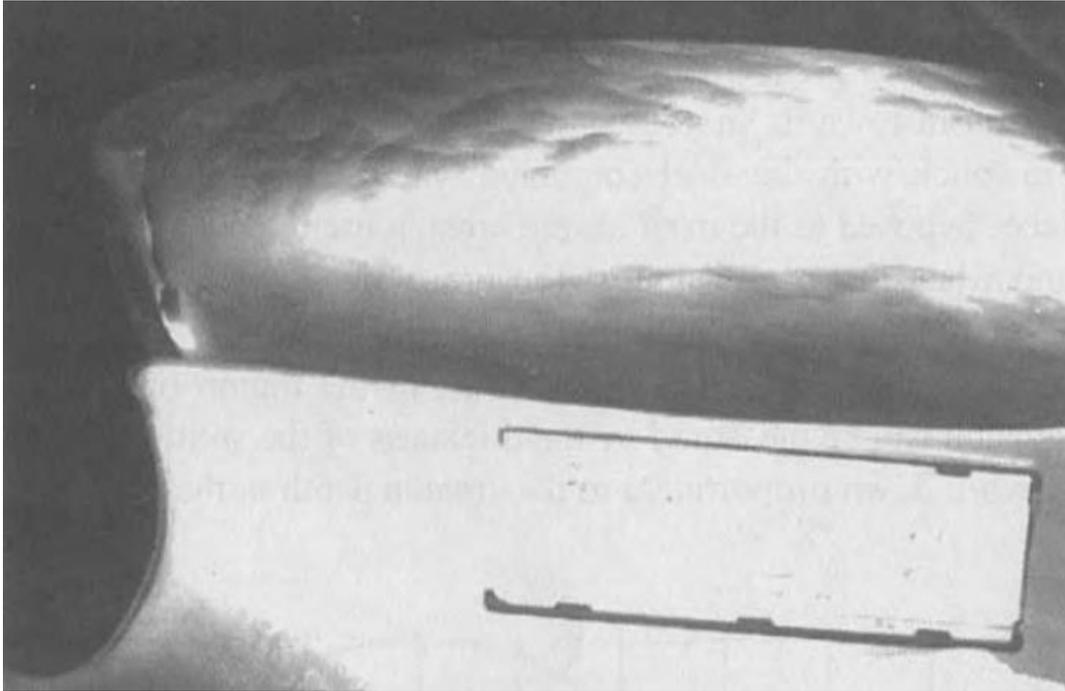
Cuando existe rozamiento entre dos o varias piezas metálicas, se produce corrosión por desgaste o fricción. Esta se produce por el rozamiento de las partículas metálicas entre las dos piezas; estas partículas se oxidan, produciéndose un material abrasivo consistente en partículas de óxido que causan el desgaste de los materiales en contacto.

Por su parte la corrosión por agrietamiento es un tipo de corrosión electroquímica, en el que se expanden grietas ya existentes en la superficie de los metales, a causa de la reacción química de la solución estancada. Estas grietas o zonas de estancamiento son creadas por la proximidad de dos materiales metálicos. En la grieta, existe una alta concentración de iones metálicos y agotamiento de oxígeno a su vez. Este tipo de corrosión es muy común en pernos, arandelas, tornillos, remaches entre otros, por lo tanto, el acero SAE 1045 es altamente susceptible a este tipo de corrosión.

Con la presencia de un fluido corrosivo se genera la corrosión por erosión, acelerando la degradación del metal. En esta aparecen huecos y valles, cuya presencia aumenta con la pérdida o degradación producto del movimiento del fluido corrosivo. La corrosión ocurre en dirección del fluido. Por lo tanto, este tipo de corrosión es común en equipos expuestos a fluidos en movimiento constante. En la figura 6 es posible observar el álabe de una turbina Pelton atacada por corrosión por erosión la cual estuvo expuesta a un fluido corrosivo.

**Figura 6.**

*Corrosión por erosión en álabe de turbina Pelton*

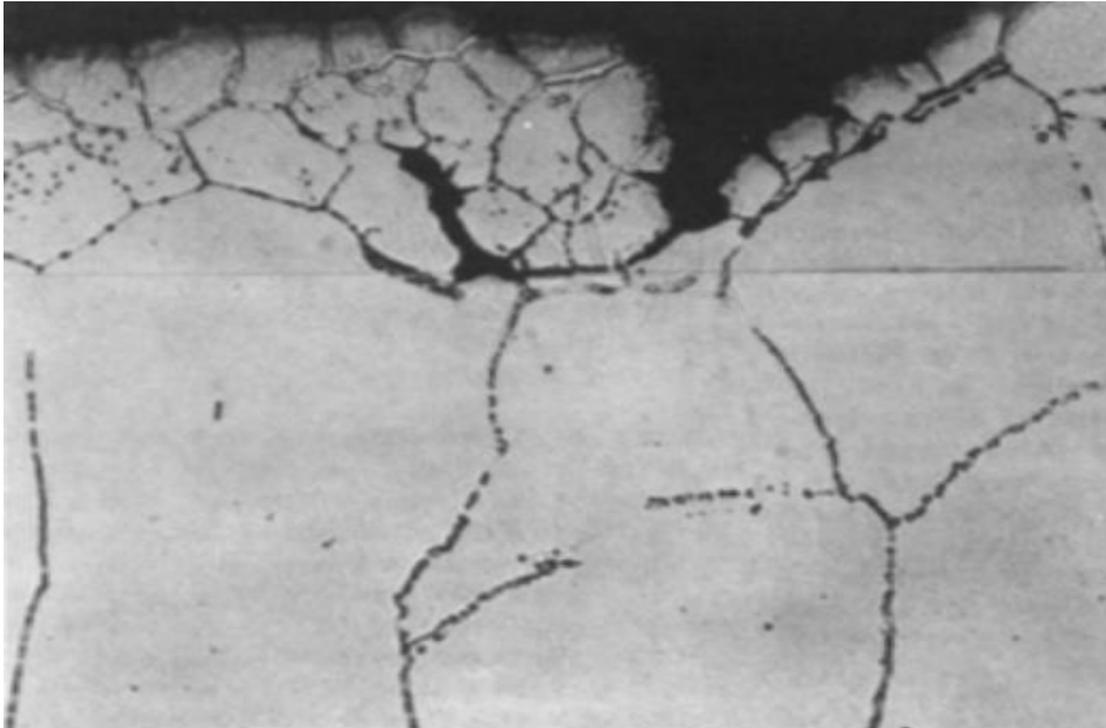


*Nota.* Corrosión por erosión producida por arena en álabe de turbina Pelton. Obtenido de C. Duan & V. Karelin (2002). *Corrosion Abrasive erosion & corrosion in hydraulic machinery* [Corrosión erosión abrasiva y corrosión en maquinaria hidráulica]. (p. 168.) Imperial College Press.

La corrosión por esfuerzo inicia en superficies discontinuas, frecuentemente como parte de corrosión inducida preexistente. Este tipo de corrosión es frecuente, en el desbaste o pulido previo a la soldadura. En la figura 7 se aprecia el inicio de corrosión por esfuerzo el cual provoca agrietamiento. Se aprecia una recristalización posterior a la soldadura encontrándose en esa grieta los cationes perjudiciales para la superficie del metal. Así mismo, este tipo de corrosión puede iniciarse como corrosión por picadura debido a la exposición al ambiente de servicio (American Society for Metals [ASM], 2003).

### **Figura 7.**

*Corrosión por esfuerzo en acero inoxidable del tipo 304*

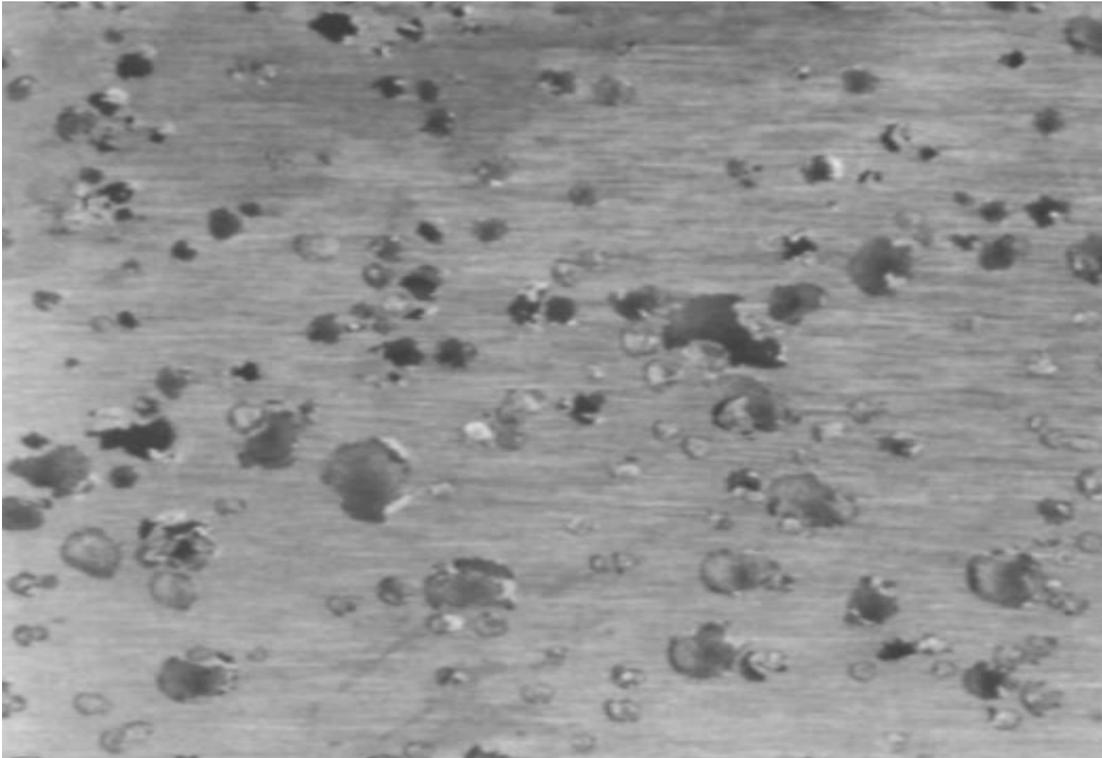


*Nota.* Microfotografía mostrando defectos en la superficie interna de una tubería de acero inoxidable del tipo 304 producido por corrosión por esfuerzo. Obtenido de American Society for Metals (2003). *ASM handbook, volume 13A, corrosion: fundamentals, testing and protection* [Manual de ASM volumen 13A, corrosión: fundamentos, pruebas y protección]. (p. 346.) ASM International.

La corrosión por picaduras inicia en una superficie metálica abierta o expuesta a un ambiente altamente corrosivo. Se trata de un tipo de corrosión que acelera la falla estructural de componentes. Esta corrosión causa la disolución de la capa protectora del metal expuesto, ya que se tratan de capas protectoras muy delgadas, generalmente medidas en nanómetros, en el caso de aceros inoxidables y aluminio, esto puede observarse en la figura 8, (ASM, 2003).

**Figura 8.**

*Corrosión por picaduras en superficie metálica*



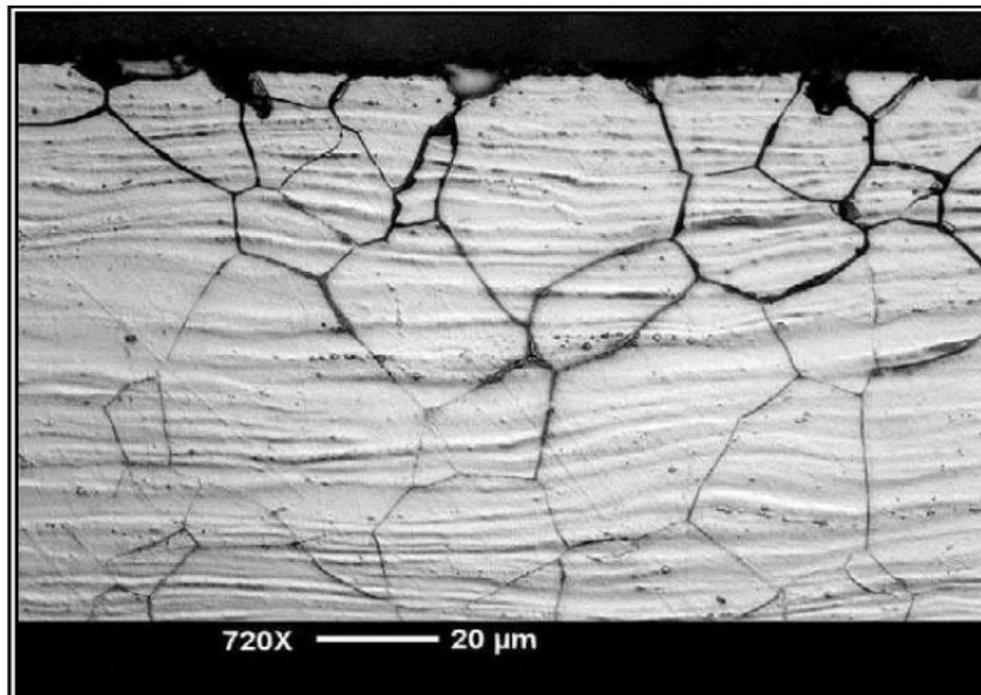
*Nota.* Superficie metálica atacada por corrosión por picaduras. Obtenido de American Society for Metals (2003). *ASM handbook, volume 13A, corrosion: fundamentals, testing and protection* [Manual de ASM volumen 13A, corrosión: fundamentos, pruebas y protección]. (p. 236.) ASM International.

La influencia de distintos parámetros en la corrosión por picaduras puede acelerar la degradación del metal atacado, e iniciar una falla por agrietamiento en el elemento mecánico expuesto. Algunos de estos incluyen: la temperatura, el ambiente, la condición de la superficie además de la composición química del metal (ASM, 2003).

La corrosión intergranular se refiere a una selectiva disolución de cualquier límite de grano o áreas con límite de grano adyacentes con menor corrosión. Es posible que la corrosión intergranular se presente debido a cambios bruscos de temperatura en algún tratamiento térmico realizado al metal o por impurezas en su proceso de producción. Los mecanismos de daño o degradación a la superficie metálica varían dependiendo de la aleación metálica expuesta a dicho ambiente. La figura 9 es una microfotografía de un metal pulido atacado por corrosión intergranular.

**Figura 9.**

*Corrosión intergranular en superficie de metal pulido*



*Nota.* Vista microscópica de una superficie de metal pulido atacado por corrosión intergranular. Obtenido de American Society for Metals (2003). *ASM handbook, volume 13A, corrosion: fundamentals, testing and protection* [Manual de ASM volumen 13A, corrosión: fundamentos, pruebas y protección]. (p. 241.) ASM International.

### **3.2.1.2. Agentes corrosivos**

Existen distintos factores que determinan el tipo y grado de corrosión en un material metálico, en este caso se hablará específicamente de los aceros al carbono. Entre ellos están los factores atmosféricos, tales como: la temperatura ambiente, el viento, humedad relativa o valores de PH del agua en contacto con el acero atacado. También influye la intensidad en que estos se presenten, así también como los tiempos de exposición a ambientes corrosivos que presente alguno de estos factores. Así mismo, las partículas salinas en ambientes marinos aceleran la aparición de distintos tipos de corrosión. Es posible que estas partículas presentes en el agua marina arrastren el ion cloruro disuelto. La sal absorbe humedad atmosférica y necesita entrar en contacto y humedecer, por ende, la superficie del acero atacada. (Alcántara, 2019).

Otros agentes debido a la exposición al calor, como: las altas temperaturas ambientales propias de un ambiente húmedo o la radiación solar son una causa importante de corrosión en metales siendo la condensación la razón principal. Además, estos agentes corrosivos aceleran en gran medida la corrosión.

La corrosión por erosión es frecuente en ambientes industriales donde el acero entre en contacto con fluidos corrosivos tales como: sulfuros, óxido de nitrógeno (producto de la combustión a altas temperaturas), entre otros. En combinación con la humedad, el ataque corrosivo producido por estos fluidos es mayor.

### **3.2.1.3. Efecto de las altas temperaturas**

Es necesario considerar en algunos diseños en ingeniería las altas temperaturas a las que opera un equipo o sistema con el fin de evitar la oxidación

catastrófica. Entre ellos se encuentran: las turbinas de gas, las estaciones petroquímicas, los altos hornos y los elementos o partes de un sistema sometidos a altas temperaturas producto de la combustión que; en conjunto con un ambiente corrosivo, aceleran de gran manera la corrosión en un material metálico. Por lo tanto, reducir las temperaturas en un sistema produce de igual manera la reducción de las velocidades de reacción, que en consecuencia disminuyen el ataque por corrosión en el material (Smith & Hashemi, 2006).

### **3.2.2. Defectos puntuales y lineales**

En ningún material su red cristalina es perfecta, presentándose distintos tipos de imperfecciones; clasificándose estas en tres categorías principales: imperfecciones puntuales, imperfecciones lineales e imperfecciones superficiales.

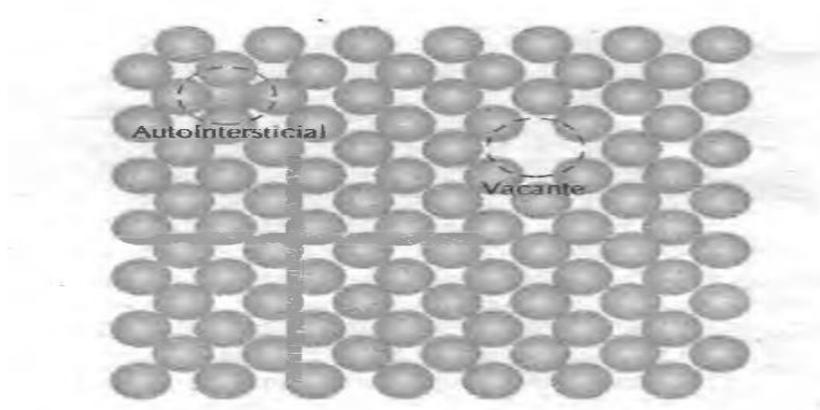
Estas imperfecciones afectan en gran medida las propiedades mecánicas y físicas de los materiales. En aceros, propiedades mecánicas como: la resistencia mecánica o la tenacidad se ven afectadas, siendo dos propiedades importantes por considerar en diseños de ingeniería.

Las imperfecciones puntuales como las vacantes se presentan en dimensión cero. Las vacantes aparecen debido a perturbaciones en el crecimiento de cristales, de la misma manera aparecen cuando existe un reordenamiento atómico en un cristal formado previamente. En metales, la concentración de vacantes es escasa con relación a la masa total de estos materiales. Así, una vacante es prácticamente un vacío o vacancia en la red cristalina del material; que en consecuencia altera las propiedades mecánicas de este (Smith & Hashemi, 2006).

Otro defecto puntual es el defecto autointersticial. Este es mucho menos probable que aparezca a diferencia de las vacantes como imperfecciones en materiales cristalinos. Aquí un átomo se desplaza a un lugar intersticial que es un espacio que se encontraba vacío por lo general, como puede observarse en la figura 10. Este átomo resulta ser generalmente más grande que el espacio a ocupar, introduciendo distensiones alrededor de la estructura cristalina del material afectado (Callister, 2006).

**Figura 10.**

*Vacante y átomo en posición autointersticial*



*Nota.* Representación bidimensional de una vacante y de átomo en posición autointersticial. Obtenido de W. Callister (2006). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales.* (p. 73.) Editorial Reverté.

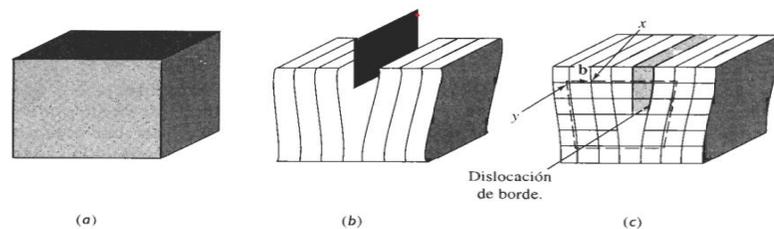
Por otro lado, las dislocaciones o imperfecciones lineales; crean una distorsión en la red cristalina producto de algunos átomos desalineados. Existen dislocaciones de cuña, así como dislocaciones de tornillo o helicoidales. Estas imperfecciones se introducen en la red cristalina como parte del proceso de solidificación de los sólidos cristalinos, hablando de metales, aparecen en su

deformación y endurecimiento. Por medio de la técnica de microscopio electrónico y evidencia experimental, fue posible determinar la relevancia de las dislocaciones; ya que se pudo comprobar que estas controlan y afectan algunas propiedades mecánicas de los aceros, como lo son: la resistencia mecánica y la ductilidad.

Las dislocaciones de cuña o de borde, corresponden a planos o semiplanos atómicos adicionales en una red cristalina. Es posible en este tipo de imperfección, visualizar la distorsión de la red cristalina, debido al tipo de esfuerzo al que los átomos del plano adicional son sometidos. Una parte de estos, están sometidos a tracción, mientras los otros a compresión. Se puede observar en la figura 11 una dislocación de borde en un sólido cristalino (Callister, 2006).

### Figura 11.

*Dislocación de borde en un sólido cristalino*



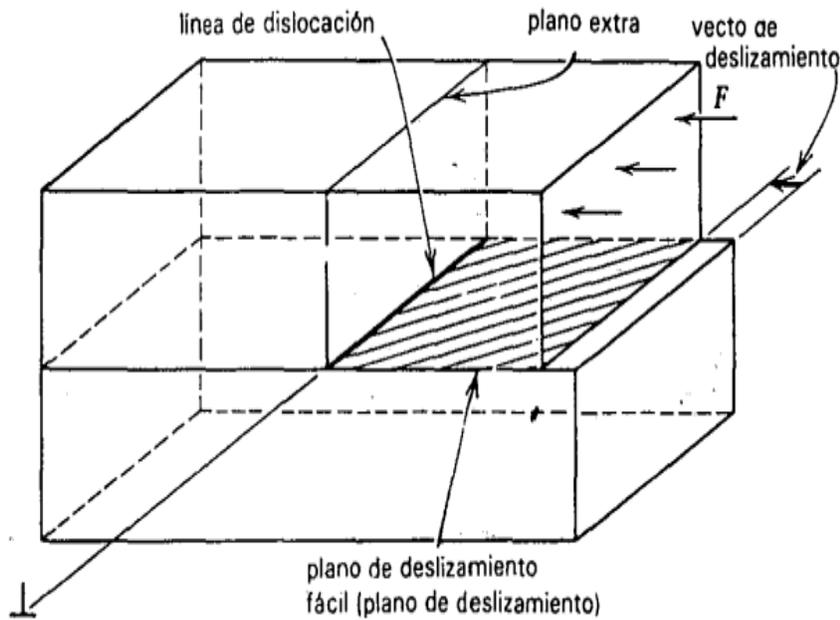
*Nota.* Dislocación de borde o cuña generada en un sólido cristalino perfecto. Obtenido de D. Askeland (1998). *Ciencia e ingeniería de los materiales.* (p. 76.) International Thomson Editores.

Es posible observar en la figura 12, el movimiento que existe de un plano de átomos adicional que se mueve hacia la izquierda, estando originalmente en la parte derecha superior del sólido cristalino. El desplazamiento de este plano de átomos adicional sucede debido a una fuerza paralela aplicada a la mitad

superior del lado derecho del monocristal, generándose un esfuerzo cortante. El vector de deslizamiento también se aprecia en la figura (Verhoeven, 1987).

**Figura 12.**

*Dislocación de borde*



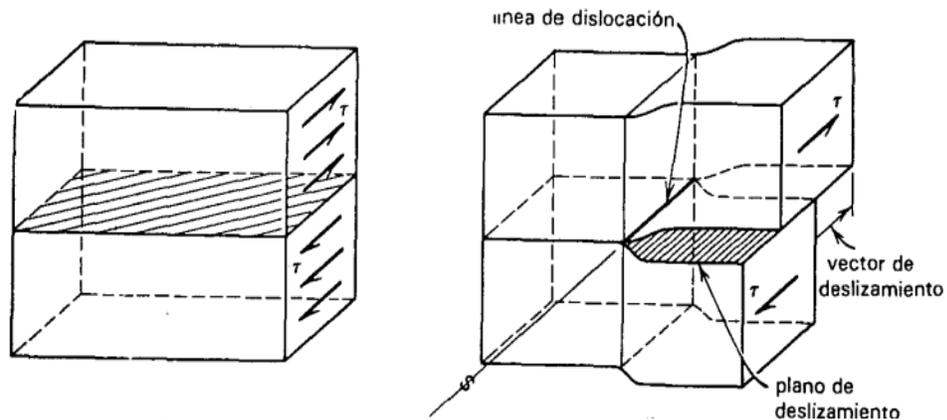
*Nota.* Dislocación de borde mostrando planos de deslizamiento Obtenido de J. Verhoeven (1987). *Fundamentos de metalurgia física.* (p. 93.) Editorial Limusa.

En las dislocaciones de tornillo la línea de dislocación es paralela a la dirección del vector de Burgers, llamado también vector de deslizamiento. A diferencia de la dislocación de borde, en la dislocación de tornillo al no implicar un plano extra de átomos; es necesaria una relativamente menor cantidad de energía en el proceso de difusión implicado, debido a que, en este tipo de dislocación, su movimiento no se restringe a su plano de deslizamiento (Verhoeven, 1987).

En las representaciones geométricas de las dislocaciones de hélice, como existe un desplazamiento de la parte superior del sólido, esta sección se disloca con respecto a la parte inferior. El vector de desplazamiento es paralelo a la línea de desplazamiento, por eso en estas representaciones macroscópicas del sólido cristalino, no se ilustra. El esquema de una dislocación de tornillo o hélice en un sólido cristalino se ilustra en la figura 13.

**Figura 13.**

*Dislocación de tornillo*



*Nota.* Dislocación de tornillo generada en un sólido cristalino perfecto. Obtenido de J. Verhoeven (1987). *Fundamentos de metalurgia física*. (p. 101.) Editorial Limusa.

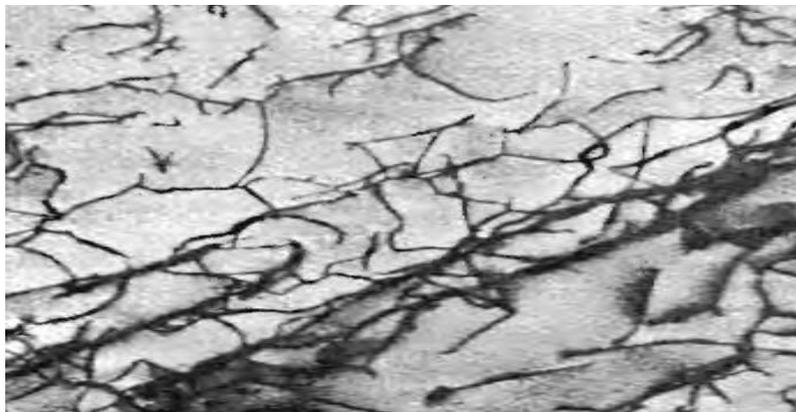
Cuando el ángulo entre el plano y el vector desplazamiento es diferente a 90 o 180 grados, la dislocación es de tipo mixta. Gráficamente es posible visualizar que estas dislocaciones aparecen en direcciones no rectas, describiéndose una forma curvada en la vista de planta del monocristal.

Las dislocaciones mixtas presentan tanto componentes del tipo borde como del tipo helicoidal, siendo mucho más frecuente encontrar este tipo de dislocaciones en los materiales cristalinos. Es importante aclarar, que el vector de desplazamiento apunta siempre en la dirección cristalográfica de empaquetamiento del sólido; independientemente de la dirección o ángulo de la línea de dislocación o desplazamiento (Callister, 2006).

En la figura 14, es posible visualizar una microfotografía captada por medio de un microscopio electrónico. En esta es posible observar dislocaciones en una aleación de titanio.

**Figura 14.**

*Dislocaciones visibles en una aleación de titanio*



*Nota.* Dislocaciones visibles en una microfotografía en una aleación de titanio. Obtenido de W. Callister (2006). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales.* (p. 80.) Editorial Reverté.

Aunque cierta cantidad de energía en los procesos de deformación plástica de metales es disipada en forma de calor; la mayor proporción de esa energía de deformación almacenada se relaciona con dislocaciones. En metales deformados plásticamente, la densidad de dislocaciones aumenta notoriamente

debido a la aparición de defectos internos o superficiales, los cuales actúan como concentradores de tensiones (Callister, 2006).

Es importante destacar, por lo tanto; la afectación de las dislocaciones en las propiedades mecánicas de los metales. Entre ellas, se puede destacar la ductilidad. Esta propiedad permite la aplicación de procesos de trabajo en caliente como la forja, debido a la disminución de la fragilidad en el metal. Al interferir el movimiento de las dislocaciones, es posible también alterar propiedades mecánicas como la resistencia mecánica; esto debido a que las dislocaciones actúan como obstáculos a otras imperfecciones de este tipo, las cuales requerirán de una fuerza mayor, haciendo al metal más dúctil y adquirirá mayor resistencia a la tracción (Askeland, 1998).

### **3.2.3. Inclusiones no metálicas**

Entre los distintos factores que afectan la tenacidad de un acero, se encuentran: las inclusiones. Estos pueden ser elementos no metálicos; que, aunque en pequeñas proporciones, son una parte inherente de los procesos de fabricación del acero.

La importancia del estudio de las inclusiones radica en que estas son elementos nucleantes de microgrietas que dan origen a la falla catastrófica del acero. Además, debido a que existe una fuerte dispersión obtenida de las diversas mediciones experimentales sobre tenacidad, en la transición frágil-dúctil de los aceros utilizados en aplicaciones industriales; en donde el factor más considerado es la temperatura, es útil también considerar el efecto de la microestructura del acero en la tenacidad, específicamente el de las inclusiones no metálicas (Linaza et al., 1994).

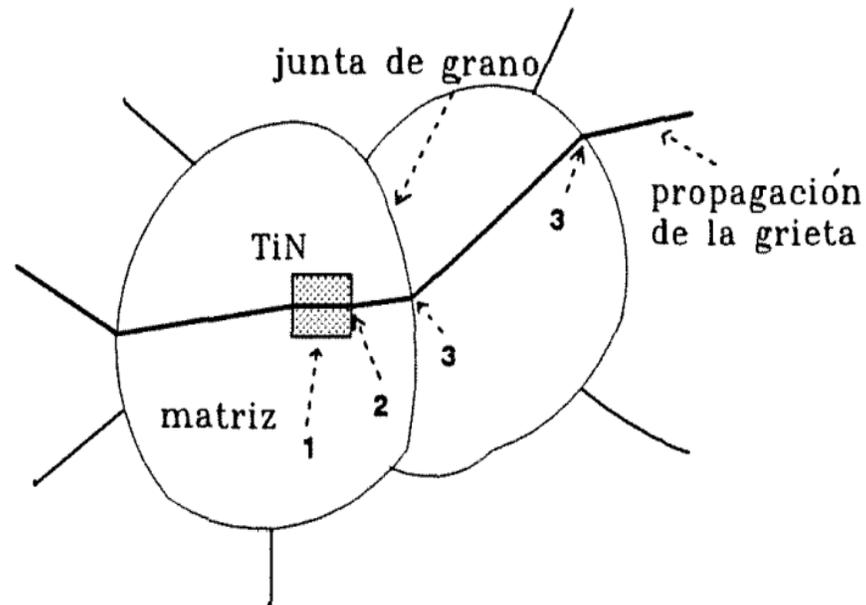
Un material que presenta buena tenacidad tiende a presentar una propagación más lenta de la grieta que origina la fractura frágil. Debido a esto, una microestructura que presente inclusiones no metálicas, específicamente cerámicas, hace que la fractura del espécimen presente menos mecanismos dúctiles, haciéndola menos estable y por ende provocando que aparezca una rápida propagación de la grieta que causará la falla catastrófica del acero (Linaza et al., 1994).

Analizando diferentes especímenes de un acero ferrítico-perlítico a 0.5 % de C a temperatura ambiente, Linaza et al. (1994) observaron que es posible que existe una relación directa entre la tenacidad y una extensión debido a un crecimiento de la fractura dúctil. En consecuencia, los especímenes más tenaces presentan una propagación más dúctil de la grieta, por lo que resulta de gran interés para los investigadores; identificar cuáles son los mecanismos que propician la aparición de una fractura frágil en el material.

La figura 15, muestra las distintas fases de una fractura frágil. En la primera fase, debido a la acción de una tensión tractiva; se nuclea una microgrieta en el elemento microestructural. En materiales metálicos es común que la propagación de la fractura frágil se presente en tres fases.

## Figura 15.

*Diferentes fases de una fractura frágil*



*Nota.* Esquema de las distintas fases de una fractura frágil. Adaptado de S. Linaza, S. Martín, I. San Martín, J.L. Romero, I. Rodríguez y J.J. Urcola. Influencia de las inclusiones no metálicas en la tenacidad de aceros de media-alta resistencia en la zona de transición. *Anales de mecánica de la fractura*. 11(1) p. 200-207. <https://gef.es/publicaciones/listado/influencia-de-las-inclusiones-no-metalicas-en-la-tenacidad-de-aceros-de-media-alta-resistencia-en-la-zona-de-transicion>

Posteriormente, en una segunda fase es necesario que la grieta atraviese la frontera partícula-raíz, sucediendo esto cuando el estado local de tensiones actuante supera al valor crítico (Linaza et al., 1994).

Por último, en una tercera fase, la grieta debe presentar una energía acumulada suficiente capaz de superar obstáculos diversos como: juntas o límites de grano, provocando cierta desviación de la grieta, a fin de que esta se

acomode al plano cristalográfico local. Estas tres fases se presentan de forma consecutiva, causando la rotura del metal (Linaza et al., 1994).

Un acero de baja tenacidad posee la característica de presentar una fractura frágil, presentándose las tres fases mencionadas anteriormente descritas. En los ensayos de tenacidad, las probetas ensayadas presentan una grieta realizada previamente, en la cual se aplica una carga de tracción en las proximidades de esta. Si esta grieta presenta una inclusión o elemento microestructural dentro de su zona plástica, tiende a presentarse la fractura frágil, haciéndolo por lo tanto al acero menos resistente a las cargas de impacto, es decir menos tenaz (Linaza et al., 1994).

Por el contrario, cuando no existen inclusiones o elementos microestructurales en las proximidades de la grieta o la grieta no supera la primera fase, el acero tiende a presentar mecanismos dúctiles de fractura. En cuanto a las cavidades cercanas a la grieta principal, se presenta coalescencia; produciendo esta una propagación dúctil y estable de la grieta (Linaza et al., 1994).

Por lo tanto, para mejorar la tenacidad del acero, se debe reducir al máximo la probabilidad de aparición de inclusiones cerámicas o frágiles en la microestructura de este. Esto se logra desarrollando una microestructura en la que se dificulte una propagación frágil de la grieta; o también evitando que se supere la primera fase de la fractura frágil (Linaza et al., 1994).

Diferentes características de las inclusiones cerámicas, desde el tamaño hasta el tipo de compuesto químico o el coeficiente de expansión térmica; afectan el comportamiento de la fractura del acero. Generalmente el tamaño de las inclusiones cerámicas que originan la propagación de la grieta propia de la

fractura frágil está comprendido entre 1 y 10  $\mu\text{m}$ ; mientras que las inclusiones de menor coeficiente de expansión térmica con respecto a la matriz de la microestructura del material son las más perjudiciales, ya que disminuyen los valores de tenacidad del acero (Linaza et al., 1994).

Las inclusiones no metálicas de tipo sulfuro, óxido o nitruro se forman inevitablemente durante el proceso de obtención del acero y es por tanto imposible su eliminación total. En otros casos las partículas (o fases) frágiles forman parte de la microestructura del acero y le confieren al mismo unas características mecánicas determinadas (este último caso es el de los carburos en las estructuras bainíticas). (Linaza et al., 1994, p.202)

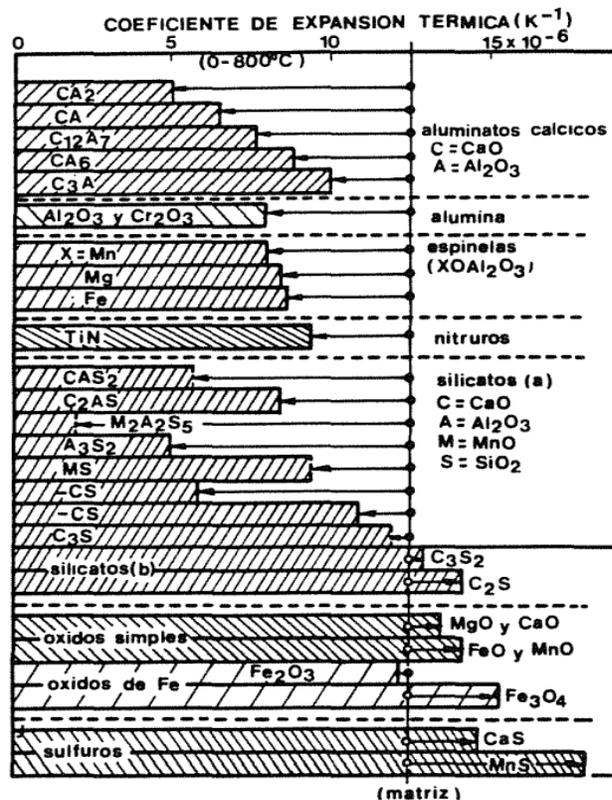
Es importante considerar que no todas las inclusiones cerámicas en aceros favorecen la iniciación de la fractura frágil como explica Linaza et al. (1994). Las perjudiciales serán las que estén unidas más fuertemente a la matriz del acero; cobrando preponderancia nuevamente el coeficiente de expansión térmica. Las inclusiones con menor valor de expansión térmica quedan embebidas por completo por la matriz durante el enfriamiento del acero, siendo estas las que más propician la aparición de la grieta propia de la falla frágil o catastrófica.

En la figura 16 se muestran los coeficientes de expansión térmica de distintas inclusiones no metálicas. Es evidente acá, que las inclusiones que poseen menor coeficiente de expansión térmica son: los silicatos compuestos, alúminas y TiN, las cuales como ha sido mencionado, favorecen la aparición de grietas que producen la falla catastrófica o frágil del acero. Por su parte las inclusiones de MnS y CaS conocidas como sulfuros, no afectan la tenacidad del

acero, al poseer por el contrario coeficientes de expansión térmica mayores a los de la matriz del acero (Linaza et al., 1994).

**Figura 16.**

*Coeficientes de expansión térmica*



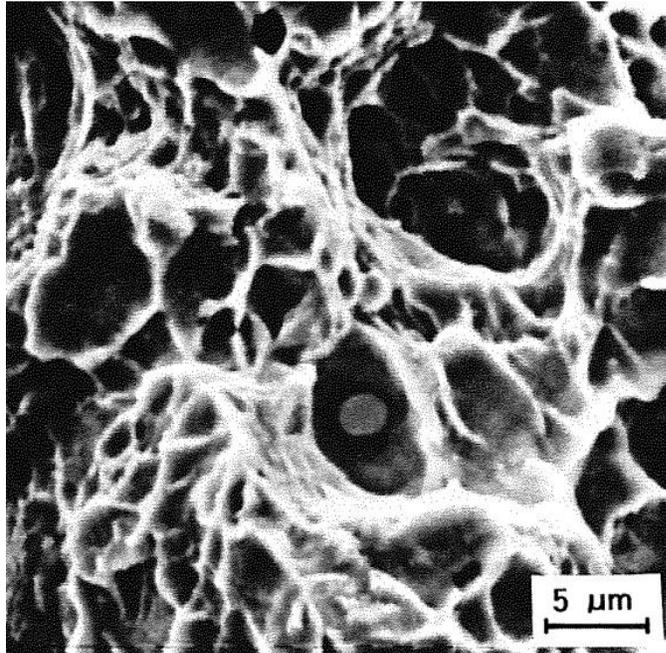
*Nota.* Coeficientes de expansión térmica de diferentes tipos de inclusiones. Adaptado de S. Linaza, S. Martín, I. San Martín, J.L. Romero, I. Rodríguez y J.J. Urcola. Influencia de las inclusiones no metálicas en la tenacidad de aceros de media-alta resistencia en la zona de transición. *Anales de mecánica de la fractura.* 11(1). p. 200-207. <https://gef.es/publicaciones/listado/influencia-de-las-inclusiones-no-metalicas-en-la-tenacidad-de-aceros-de-media-alta-resistencia-en-la-zona-de-transicion>

Se debe aclarar que ciertas inclusiones son inherentes al proceso de obtención del acero, por tanto, a la microestructura de este según Linaza et al. (1994). Tales inclusiones son los silicatos y las alúminas. Otras inclusiones forman parte de la composición química del acero, siendo posible, por lo tanto, controlar la cantidad de dichos compuestos como lo son los nitruros de titanio; esto dependiendo de la aleación que se desee fabricar en función de la aplicación del acero y de los índices de tenacidad que se requieran.

La razón de la existencia de dichos nitruros estriba en la presencia inevitable de Ti residual procedente de la chatarra (alrededor de 20 ppm). En consecuencia, este hecho demuestra que el Ti incluso en cantidades tan pequeñas como las correspondientes a los niveles residuales sigue siendo, en aquellos casos de solidificación lenta del acero (colada convencional), un factor nucleante de iniciación de fractura frágil). (Linaza et al., 1994, p. 203)

**Figura 17.**

*Partícula de MnS con Ca originadora de fractura frágil*



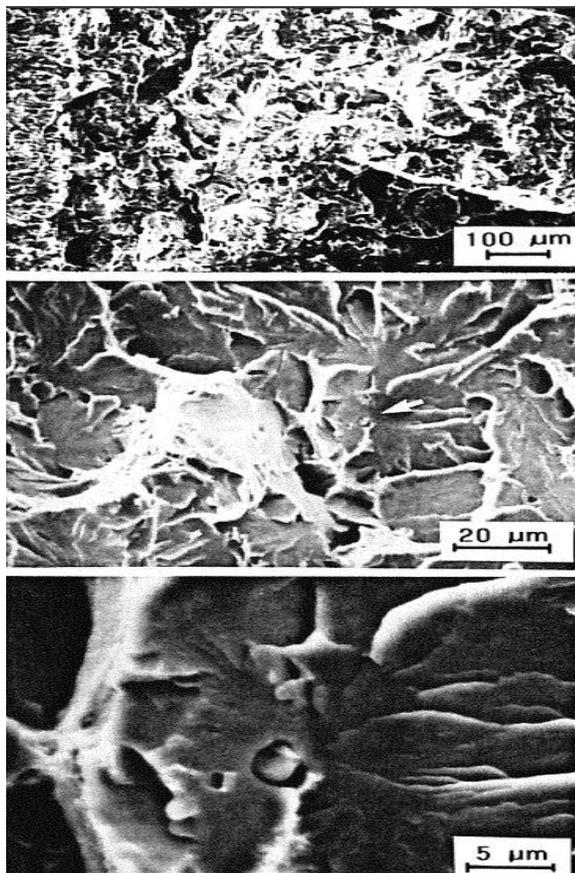
*Nota.* Partícula de MnS con Ca originadora de una cavidad en la zona dúctil previa a la propagación frágil en un acero ferrítico-perlítico con 0.5 % C. Adaptado de S. Linaza, S. Martín, I. San Martín, J.L. Romero, I. Rodríguez y J.J. Urcola. Influencia de las inclusiones no metálicas en la tenacidad de aceros de media-alta resistencia en la zona de transición. *Anales de mecánica de la fractura*. 11(1). p. 200-207. <https://gef.es/publicaciones/listado/influencia-de-las-inclusiones-no-metalicas-en-la-tenacidad-de-aceros-de-media-alta-resistencia-en-la-zona-de-transicion>

Otras inclusiones también perjudiciales; aunque en menor medida, son las de MnS. Estas pueden dar origen a la aparición de microgrietas causantes de fractura frágil, debido a la presencia de una alta concentración de tensiones derivado de la geometría de estas. Al tratarse el acero con Ca, este básicamente eferoidiza la geometría de las inclusiones, lo que provoca la formación de aluminatos cálcicos favorables para la propagación frágil, como se observa en la figura 17. Estas inclusiones pueden cambiar a formas más excéntricas y

alargadas, como parte de un conformado en caliente; aumentando la posibilidad de aparición de microgrietas en la microestructura del acero en cuestión (Linaza et al., 1994). En la figura 18, se puede apreciar este caso.

**Figura 18.**

*Aluminato cálcico causante de fractura frágil*



*Nota.* Aluminato cálcico causante del estallido frágil en un acero ferrítico-perlítico con 0.5 % C tratado al Ca. Adaptado de S. Linaza, S. Martín, I. San Martín, J.L. Romero, I. Rodríguez y J.J. Urcola. Influencia de las inclusiones no metálicas en la tenacidad de aceros de media-alta resistencia en la zona de transición. *Anales de mecánica de la fractura*. 11(1) p. 200-207.

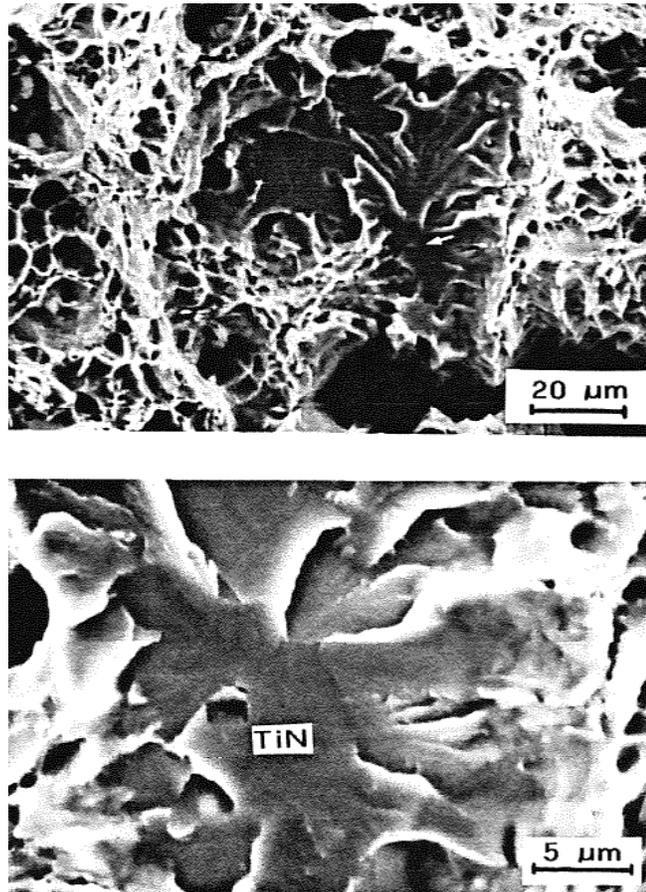
<https://gef.es/publicaciones/listado/influencia-de-las-inclusiones-no-metalicas-en-la-tenacidad-de-aceros-de-media-alta-resistencia-en-la-zona-de-transicion>

La propagación de la microgrieta que consta de tres fases mencionadas con anterioridad depende; además de la longitud de dicha grieta y de la tensión que actúa, de la desorientación entre la dirección de la tensión y del plano de clivaje del grano. Según Linaza et al. (1994), la capacidad de generar fractura frágil disminuye con el grado de desorientación que se presente. Este grado de desorientación existente, no es un parámetro controlable; por lo tanto, cuando una inclusión cerámica de la microestructura del acero presente una pequeña desorientación con respecto al plano adyacente; es posible que se de origen a la propagación de la grieta, causando una inminente fractura frágil.

En una microestructura fina la microgrieta tiende a interrumpir su avance; pese a que exista alguna desviación entre los primeros granos, ya que puede encontrarse con una nueva junta de grano, dificultando o impidiendo su avance. Por el contrario, en una microestructura gruesa o poco fina, la microgrieta tiende a propagarse con mayor facilidad a través de los granos adyacentes (Linaza et al., 1994). En la figura 19, se observa una isla frágil rodeada de zonas dúctiles de un acero microaleado de forja con tratamiento térmico.

**Figura 19.**

*Isla frágil iniciada por una partícula de TiN*



*Nota.* Isla frágil iniciada por una partícula de TiN y compuesta por varios granos en un acero microaleado de forja con tratamiento térmico. Adaptado de S. Linaza, S. Martín, I. San Martín, J.L. Romero, I. Rodríguez y J.J. Urcola. Influencia de las inclusiones no metálicas en la tenacidad de aceros de media-alta resistencia en la zona de transición. *Anales de mecánica de la fractura*. 11(1) p. 200-207. <https://gef.es/publicaciones/listado/influencia-de-las-inclusiones-no-metalias-en-la-tenacidad-de-aceros-de-media-alta-resistencia-en-la-zona-de-transicion>

### **3.2.4. Grietas como defecto por mala manufactura**

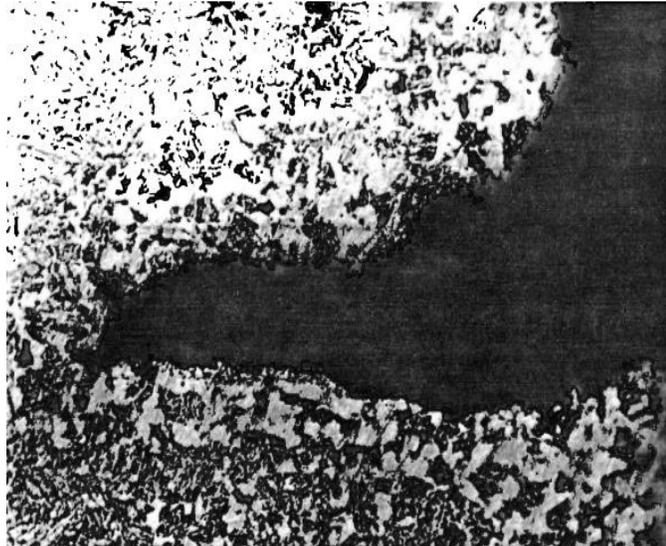
Las inclusiones y las porosidades son defectos en la microestructura del acero que aparecen durante el tratamiento del acero líquido y su colada. Estos favorecen la aparición de otros defectos; como las grietas, las cuales pueden producir la falla catastrófica del acero como consecuencia de la propagación de la fractura frágil. Las grietas longitudinales en lingotes aparecen en 1 o 2 e incluso 3 caras de este, siendo observadas por lo general, posterior a un desbaste.

Es frecuente observar este tipo de grietas en aceros con cierto rango de contenido de carbono. En estos, las colonias de perlita están rodeadas de una red de ferrita (Falcón, 1995).

Como anteriormente ha sido mencionado en esta investigación, las microgrietas se propagan debido a la presencia de defectos como las inclusiones cerámicas. Estas microgrietas, producen defectos a nivel macroscópico como lo son las grietas a nivel superficial del acero fracturado, que generalmente aparecen en las caras longitudinales. En la figura 20 se observa una grieta longitudinal encontrada en lingotes de acero producidos en serie de diferentes coladas.

**Figura 20.**

*Grieta ancha en la superficie de un acero 8620*



*Nota.* Grieta superficial observada en la superficie de un acero 8620 rodeada de una zona descarbada. Obtenido de L. Falcón (1995). *Análisis térmico durante y después de la solidificación de un lingote de acero 1045.* (<https://repositorio.tec.mx/handle/11285/631642>), consultado el 02 de mayo de 2023. De dominio público.

Las grietas aparecen debido a que el esfuerzo aplicado, supera el límite máximo a la tensión del acero. Este esfuerzo somete al material, debido a las diferencias de temperaturas durante la solidificación de este, así también debido al enfriamiento dentro y fuera de la lingotera. Por lo tanto, se deben considerar distintos parámetros dentro del proceso de colada del acero (Falcón, 1995).

- Posición de la lingotera
- Limpieza de las lingoterías
- Temperatura de vacío
- Velocidad de llenado

- Tiempo de permanencia
- Tipo de enfriamiento

Uno de los parámetros de mayor relevancia es la limpieza de las lingoteras, durante el proceso de vaciado. Comúnmente la limpieza de las lingoteras es inadecuada, causando que la mala condición superficial del molde afecte el lingote de acero producido. Estos defectos suelen ser no demasiado profundos, siendo posible eliminarlos con un tratamiento térmico posterior previo a un desbaste. Este tipo de defectos puede generar grietas o incrustaciones en el producto final (Falcón, 1995).

Es posible que las grietas se presenten como defectos por mala manufactura cuando algunos de los siguientes factores no están dentro de ciertos parámetros ideales, para el proceso de colada y solidificación del acero (Falcón, 1995).

- La cantidad de carbono y humedad en materiales lubricantes no es controlada.
- La temperatura y velocidad de vaciado no están controladas, siendo generalmente altas.
- La cantidad de humedad en los canales de alimentación no está controlada.
- Deficiente mantenimiento preventivo de los equipos de la planta.
- Mala calidad de la materia prima y falta de suministro de insumos.

Principios de fractura: se considera a la fractura como la fragmentación de un sólido en dos o más partes, por la acción de esfuerzos. Existen distintos tipos de fractura: dúctil, por fatiga, y frágil de la cual ya se hizo referencia anteriormente en este trabajo de investigación, por lo tanto, se omite en los párrafos siguientes.

La fractura dúctil se caracteriza por la deformación plástica previa, así mismo por la energía consumida produciendo la fragmentación del material, existiendo previamente la propagación de la grieta pudiendo ser trans o intergranular. En la fractura intergranular dúctil ocurre propagación de la grieta debido a la nucleación y coalescencia de microcavidades en inclusiones presentes, descohesión entre granos contiguos asociados con impurezas en los límites de grano, o cavidades producidas por esfuerzos a elevadas temperaturas. Está nucleación depende según Falcón (1995) del tipo de inclusión no metálica, su tamaño y los niveles de concentración de esfuerzos en la microestructura del acero.

La fractura por fatiga se caracteriza por la aparición de esfuerzos cíclicos los cuales producen la disminución del esfuerzo de cedencia del material. Existen diversos factores que aceleran la falla del material producida por fatiga. Entre ellos: el tamaño y temperatura de la probeta, estado de esfuerzos, microestructura del acero y el acabado superficial del espécimen (Falcón, 1995).

En resumen, existen distintos factores involucrados en el proceso de fabricación de los lingotes de acero, cuya afectación genera grietas como defectos por mala manufactura (Falcón, 1995). Entre ellos se encuentran:

- El tamaño del lingote
- La velocidad de enfriamiento

- El contenido de carbono en el acero siendo más frecuente este defecto en aceros de medio contenido de carbono (como el acero SAE 1045).
- Las condiciones de colada: velocidad y temperatura.
- Los altos contenidos de Al y N en la aleación.

Por lo tanto, en teoría, cualquier imperfección microestructural funciona como un concentrador de esfuerzos, siendo este un factor determinante en la aparición de grietas. Este agrietamiento puede aparecer a raíz de una diferencia de temperatura dentro del lingote generándose expansiones y contracciones volumétricas, originándose por ende grandes tensiones térmicas.

Por otro lado, es posible que se formen microcavidades originadores de grietas, cuando las dislocaciones se encuentran con obstáculos como límites de grano en su trayectoria concentrándose deformaciones en ese punto, producto de la concentración de esfuerzos (Falcón, 1995). Los concentradores de esfuerzos que disminuyen el esfuerzo de cedencia del acero son los siguientes:

- Inclusiones no metálicas
- Microporosidades
- Precipitados
- Desproporción en su composición química

En base a su investigación desarrollada, Falcón (1995) recomienda a las plantas de fabricación de aceros al carbono.

- Controlar la temperatura de colada, siendo recomendable mantenerla entre 1560 y 1580 °C.
- Controlar la velocidad de colada.

- Considerar el método de secado de las lingoteras.
- Controlar la temperatura de las lingoteras antes de la colada, de modo que se mantenga entre 80 y 120 °C.
- Evitar enfriamientos bruscos de los lingotes.

### **3.2.5. Defectos interfaciales**

La energía en la superficie externa de un sólido es mayor, comparada con la energía relacionada con las fuerzas de cohesión de los átomos en el interior de este. Este estado energético superior se relaciona directamente con los enlaces no realizados por los átomos de la superficie externa, ya que estos están enlazados con otros átomos solamente por un extremo. Asimismo, la superficie del metal suele ser más reactiva que el interior, en gran parte debido a imperfecciones inherentes como las ranuras o microgrietas propias del proceso de manufactura, es decir, la colada y solidificación del metal o aleación producida.

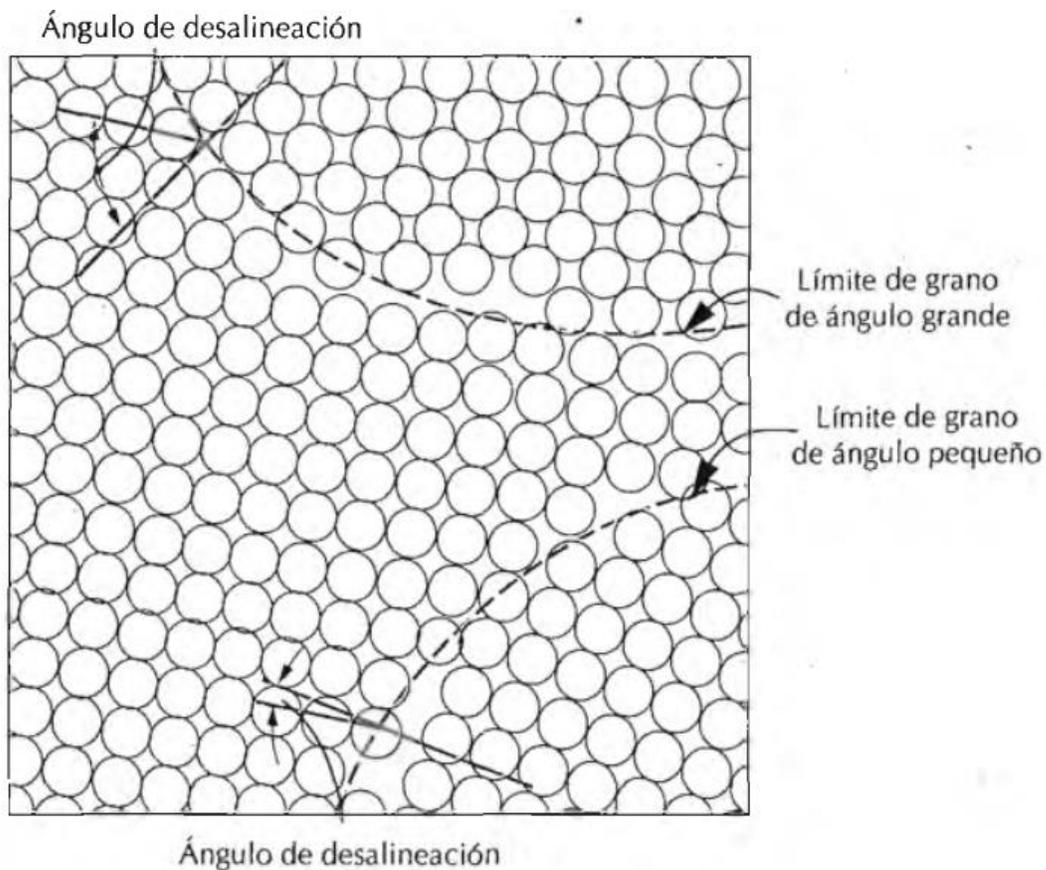
Fenómenos como la erosión o la corrosión se presentan con mayor facilidad en la superficie externa del metal, debido a este elevado estado energético y a la propia reactividad de la superficie derivada de las imperfecciones superficiales. La degradación del material va a depender de la agresividad de los agentes corrosivos del ambiente en el cual el acero o material será expuesto, además de las condiciones de operación, las cuales producen erosión y desgaste debido a las fuerzas de fricción involucradas entre elementos mecánicos, siendo estos de especial interés en esta investigación al ser el acero SAE 1045 ampliamente utilizado para la manufactura de dichos elementos.

Los límites de grano son otro defecto interfacial, que se generan durante la solidificación del material. Estas son regiones del sólido en los que también existen altos niveles de energía, esto debido a la falta de cohesión entre los

átomos, producto de una desviación en la orientación de los distintos granos que se encuentran en dicho límite. Dicha diferencia de orientaciones puede variar en cuanto a la magnitud del ángulo se refiere. Las dislocaciones de borde producen límites de grano de ángulo pequeño, mientras que las dislocaciones helicoidales o de tornillo generan límites de grano de ángulo pequeño torsionado. En la figura 21 se observa un esquema de un límite de grano de un cierto ángulo  $\theta$  (Callister, 2006).

**Figura 21.**

*Esquema de límites de grano de diferentes ángulos*



*Nota.* Límites de grano pequeño y grande de átomos adyacentes. Obtenido de W. Callister (2006). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales.* (p. 81.) Editorial Reverté.

La ausencia de enlaces atómicos completos, hacen a estas regiones más reactivas y susceptibles a que los átomos de impurezas puedan segregarse en esta zona, también debido a su alto estado energético. La energía depende directamente del ángulo de orientación, aumentado cuando el ángulo es mayor. Granos de mayor tamaño tienden disminuir las regiones de límites de grano, y de esta manera el estado energético de la región. Por esta razón, algunos tratamientos térmicos pueden aumentar la resistencia del material, disminuyendo la susceptibilidad de que se origine una fractura frágil (Callister, 2006).

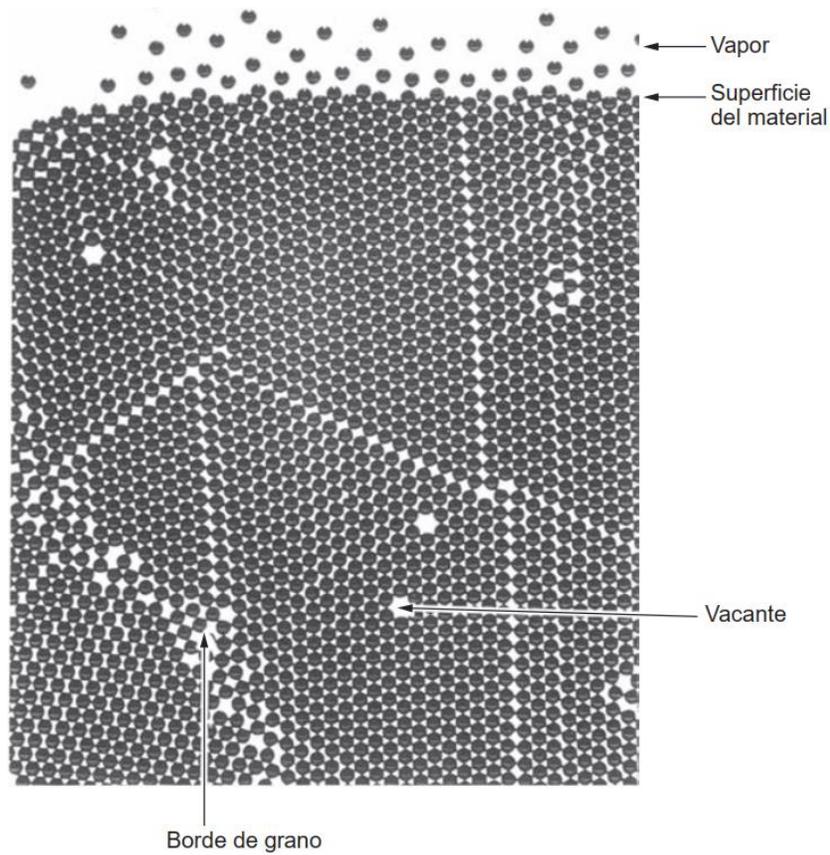
El aumento del tamaño de los granos libres de deformación deriva de la exposición del material a una elevada temperatura. Una reducción de la energía interfacial consecuencia de la disminución de los límites de grano es la fuerza motriz que produce el crecimiento del grano. Naturalmente no todos los granos pueden crecer, sin embargo, el tamaño medio de los granos aumenta gradualmente, ya que unos crecen a expensas de otros (Callister, 2006).

El menor orden atómico de los límites de grano y sus altos niveles energéticos, tienden a favorecer una difusión más rápida en el material, además favorecen el crecimiento de precipitados (Smith & Hashemi, 2006).

Por medio del uso de bolas de rodamientos es más fácil visualizar un límite de grano en un sólido cristalino. Esto genera una imagen similar a un empaquetamiento atómico en un sólido. En la figura 22 se puede visualizar como la estructura cristalina está alterada; sin embargo, los enlaces atómicos siguen siendo fuertes aún en esas regiones. Esto garantiza cierta estabilidad en la estructura de un sólido, a pesar de existir estas imperfecciones.

## Figura 22.

*Aspecto de límite de grano en un sólido cristalino*



*Nota.* Ejemplificación del aspecto de un límite de grano en un sólido cristalino. Obtenido de M. F. Ashby & D.R.H. Jones (2008). *Materiales para ingeniería 1, Introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño.* (p. 136.) Editorial Reverté.

Por su parte un límite de macla se caracteriza por ser la frontera de una imagen especular de dos planos adyacentes. La región entre estos dos planos es un límite de macla. Este es un tipo especial de límite de grano, el cual se produce debido a distintas fuerzas mecánicas que actúan sobre el material, asimismo por tratamientos térmicos como el recocido posterior a la deformación, llamándosele: maclas por recocido (Callister, 2006).

### **3.2.6. Tratamientos térmicos**

Los tratamientos térmicos afectan las propiedades mecánicas de los aceros al modificar su microestructura. El acero SAE 1045 es un acero en el que la tenacidad es una propiedad importante, al ser utilizado en elementos de máquinas como: los engranajes de baja velocidad, los cigüeñales y bielas; razón por la cual la aplicación de tratamientos térmicos como el temple y el revenido pueden ayudar a mejorar esta propiedad mecánica.

Esta sección hace referencia a los principales tratamientos térmicos aplicados en aceros al carbono: revenido, recocido y temple; los cuales son realizados en talleres de torno y fresado, en los que se requiera un acero más duro, resistente o tenaz dependiendo de la aplicación.

Aplicar un tratamiento térmico a un acero consiste básicamente en calentar la pieza a cierta temperatura, posteriormente se le da un tiempo de permanencia a la temperatura alcanzada, y por último se deja enfriar; variando la velocidad de enfriamiento y los tiempos de permanencia, dependiendo de la propiedad mecánica que se busque alterar al acero obtenido de suministro.

Dentro de los parámetros a considerar, se encuentran los siguientes (Oporto, 2005).

- Velocidad de calentamiento
- Temperatura máxima a la que debe ser calentado el acero o temperatura de calentamiento.
- Tiempo de permanencia a la temperatura de calentamiento.
- Velocidad de enfriamiento.

Proceso general: inicialmente la pieza de acero se calienta hasta alcanzar su temperatura de calentamiento. Posteriormente se le da un tiempo de permanencia a esa temperatura, con el objetivo de que toda la pieza la alcance. Por último, se deja enfriar la pieza cierto tiempo, dependiendo la velocidad del tratamiento térmico y de la aplicación de dicha pieza o elemento.

El recocido: es un tratamiento térmico en el que se busca eliminar tensiones residuales en el acero, logrando con esto reducir su dureza y mejorar algunas propiedades mecánicas como: la resistencia, tenacidad y ductilidad. Otra propiedad, pero tecnológica como la maquinabilidad también es por ende mejorada. En el recocido se sigue el mismo proceso general para tratamientos térmicos referido con anterioridad: es decir, se calienta el acero a su temperatura de recocido, posteriormente se le da un tiempo de permanencia a esa temperatura y por último se deja enfriar.

Según Callister (2006), durante el calentamiento y enfriamiento del acero, existen gradientes térmicos entre la superficie y el interior del material, dependiendo de la magnitud de las dimensiones y por lo tanto del volumen de la pieza. Esto puede generar grietas o deformaciones, sobre todo cuando este gradiente de temperatura es grande, ya que se generan tensiones internas en el material. Por lo tanto, la temperatura de recocido, así como el tiempo de permanencia o la velocidad de enfriamiento son de gran relevancia.

Al aplicar el tratamiento térmico de recocido en una pieza de acero, se busca eliminar las tensiones residuales producto de un trabajo en frío. Estas tensiones se generan ya sea por los procesos de deformación plástica, un enfriamiento no uniforme de la pieza o una transformación de fase inducida por enfriamiento, en el que cada fase tiene una densidad diferente. Se busca que la temperatura de recocido sea relativamente baja con el fin de evitar la afectación

de otros tratamientos térmicos, o la eventual deformación de la pieza (Callister, 2006).

Existen distintos tipos de recocido, entre ellos: el normalizado, recocido total y el de esferoidización:

En el normalizado se busca según Callister (2006), una distribución de tamaños de grano más regular en aceros perlíticos en los cuales existió un trabajo en frío previo como la laminación. Una distribución de granos más fina mejora la tenacidad del acero al reducir tensiones residuales, posibles causantes de una fractura frágil del acero. El objetivo de este tipo de recocido es lograr una completa transformación a la fase de austenita, mediante la elevación de la temperatura de recocido entre 55 a 85 °C. Por último, se enfría la pieza por medio de aire hasta alcanzar la temperatura ambiente.

En el recocido total, explica Callister (2006) que se busca también eliminar tensiones residuales producto de algún trabajo en frío, aumentando la temperatura de recocido entre 15 a 40 °C. Aquí la pieza de acero se deja enfriar en el horno, permitiendo que ambos alcancen la temperatura ambiente. Este proceso suele durar varias horas. Esto genera una microestructura con granos finos y uniformes, haciendo al acero más dúctil, generando una microestructura de perlita gruesa. Este tipo de recocido es útil en aceros de bajo y medio contenido de carbono.

Por su parte el acero esferoidizado mejora su maquinabilidad, ya que aumenta la ductilidad y disminuye la dureza, haciendo los procesos de mecanizado más sencillos. Algunos aceros de alto contenido de carbono se esferoidizan para obtener su máxima ductilidad, la cual es requerida bajo ciertas condiciones de trabajo.

El objetivo del recocido por esferoidización es recocer el acero hasta obtener una microestructura de esferoiditas, esto se logra aumentando la temperatura hasta 700 °C justo por debajo de la línea del eutectoide. Una forma de carburo esferoidal es más estable, mejorando así la ductilidad. Para realizar este proceso es posible utilizar uno de los métodos siguientes (Avner, 1988).

- Mantener durante un tiempo prolongado a una temperatura justo por debajo de la línea crítica inferior, es decir de la temperatura de recocido.
- Calentar y enfriar alternadamente entre las temperaturas que están por debajo o por encima de la línea crítica.
- Calentar por encima de la temperatura crítica y dejar enfriar lentamente.

En la figura 23, es posible visualizar una microestructura esferoidizada en un acero al 1 % de carbono.

**Figura 23.**

*Acero al 1 % de carbono esferoidizado y recocido*



*Nota.* Acero de alto contenido de carbono recocido por esferoidización. Obtenido de S. Avner (1988). *Introducción a la metalurgia física 2.* (p. 256.) McGraw Hill/Interamericana de México.

Temple: con este tratamiento térmico se busca aumentar la dureza del material, mejorar su límite elástico, así como su resistencia al desgaste y a la tracción. Al aumentar la dureza del acero disminuye la tenacidad, al convertirse en un material más frágil. Al igual que en el recocido, para aplicar este tratamiento térmico en un acero al carbono, la pieza se calienta hasta alcanzar su temperatura crítica, seguido de un tiempo de permanencia a esta temperatura dejando por último enfriar bruscamente la pieza hasta alcanzar la temperatura ambiente.

El objetivo de calentar la pieza hasta la temperatura crítica y mantener un tiempo de permanencia es: transformar al acero al carbono en una fase de estructura sólida de austenita, dependiendo de su contenido de carbono, convirtiéndolo en un material más blando y dúctil. La tercera operación en la cual se enfría bruscamente la pieza transforma al acero de una estructura sólida de austenita a martensita, aumentando su dureza y por lo tanto haciéndose más frágil, sobre todo en aceros de alto contenido de carbono. De esta manera, se transforma desde un acero dúctil y blando, a uno duro con mayor fragilidad, pasando de una estructura de austenita a martensita, logrando una fase de estructura tetragonal centrada en el cuerpo durante el enfriamiento brusco, conocida como: martensita alfa.

Es importante aclarar, que una estructura sólida martensítica perfecta con máxima dureza se consigue solamente por medio del enfriamiento brusco de una fase austenítica, ya que es la única fase capaz de lograr dicha transformación. Esto se logra en aceros hipoeutectoides.

Es posible observar según la figura 24, que después de ser templado, es decir existiendo un enfriamiento brusco del acero, la fase de martensita aparece como una estructura tipo aguja o acicular, distinguiéndose esta forma más claramente en aceros de alto contenido de carbono. Esto resulta de la deformación plástica de la matriz ya que durante la transformación ocurre una expansión la cual produce altos esfuerzos localizados. Estas agujas observadas en las microfotografías son más finas a medida que el grado de subenfriamiento aumenta (Avner,1988).

**Figura 24.**

*Acero al 1 % de carbono templado al agua*



*Nota.* Módulos de martensita están retenidos en la matriz de austenita. Obtenido de S. Avner (1988). *Introducción a la metalurgia física 2.* (p. 261.) McGraw Hill/Interamericana de México.

Es importante entender también el mecanismo de eliminación de calor durante el temple, ya que, para obtener un material más blando y dúctil, es necesario considerar la diferencia entre las velocidades de enfriamiento, ya que si esta diferencia es mayor se logra este objetivo, aumentando la ductilidad; de lo contrario si la diferencia de entre las velocidades de enfriamiento es menor, se obtiene un acero con mayor dureza.

Es posible identificar tres etapas durante el proceso de enfriamiento brusco en el tratamiento térmico de temple (Avner,1988).

- En la primera etapa, la superficie del acero es bastante alta, por lo que el fluido o medio de enfriamiento se vaporiza al instante. Aquí se forma una capa de vapor en la superficie metálica, existiendo una transferencia de temperatura por radiación y conducción, siendo la velocidad de esta lenta, ya que una capa gaseosa es pobre conductora de calor.
- La segunda etapa es la más rápida, ya que el calor se elimina como calor latente de evaporización, ya que se produce una violenta ebullición en la superficie húmeda del acero.
- Cuando la superficie del acero alcanza la temperatura de ebullición del fluido o líquido de temple, se da la tercera etapa. Aquí el enfriamiento se lleva a cabo por conducción y convección. En esta última etapa la velocidad de enfriamiento disminuye.

En cuanto a los medios de temple, es decir de los líquidos o fluidos utilizados en medios industriales se encuentran:

- Agua
- Sales fundidas o líquidas
- Aceite soluble
- Aceite
- Aire
- Salmuera, 10 % de cloruro de sodio

Revenido: Avner (1988), explica que el revenido consiste en calentar al acero a una temperatura inferior a la temperatura crítica. Este es un tratamiento térmico que se aplica después del temple, con esto se busca disminuir la dureza del acero que tiene una estructura de martensita, resultado del enfriamiento

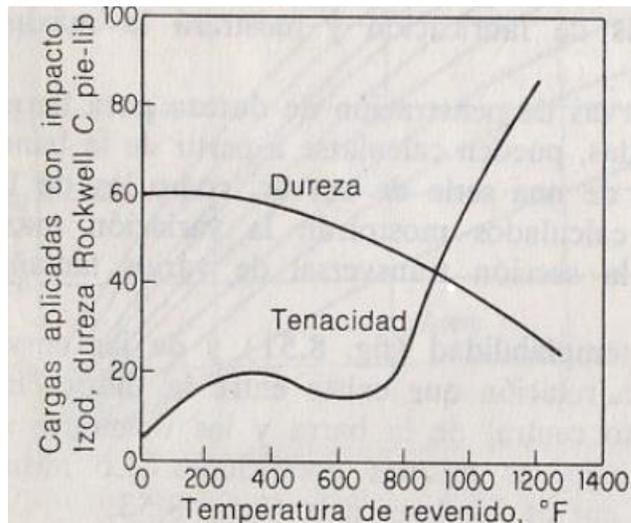
brusco como última etapa del temple. El aumento en la dureza del material como resultado del temple, conlleva a la aparición de tensiones residuales, teniendo como propósito el revenido eliminar estos esfuerzos mejorando su ductilidad y tenacidad, a cambio de perder dureza y resistencia al desgaste.

En cuanto a la tenacidad que es la propiedad mecánica de interés en esta investigación, es común un aumento si se cuantifica desde el resultado de una prueba de tracción para materiales dúctiles, esto después de un revenido entre 400 y 800 °F. La forma de cuantificar esta tenacidad consiste en calcular el área bajo la curva del diagrama esfuerzo-deformación para materiales dúctiles. Por otro lado, cuando se busca cuantificar la tenacidad por medio de un ensayo de impacto Charpy, es probable que, al existir un elevador de tensiones en la muesca realizada en la probeta, la capacidad de absorber energía de impacto de un acero disminuye, en comparación con el ensayo de tracción, esto pese a la pérdida de dureza y resistencia al desgaste.

Por lo tanto, es posible definir al rango de temperaturas de entre 400 y 800 °F como el rango en el cual se determina la dureza o la tenacidad del material, dependiendo de la aplicación del elemento del acero tratado. Para aumentar la tenacidad del acero, es necesario revenir por arriba de los 800 °F, eliminándose las tensiones residuales completamente cuando se alcanzan los 900 °F. Un cambio en la ductilidad puede indicar de mejor manera un aumento de tenacidad, siempre que se busque medir la tenacidad por medio de un ensayo de tracción, a diferencia de una barra con muesca empleada en un ensayo de impacto. Este fenómeno es aún motivo de investigación entre los especialistas en materiales de ingeniería y metalurgia (Avner, 1988). En la figura 25 se observa un diagrama mostrando a las cargas aplicadas con impacto en función de la temperatura, resaltando el rango crítico mencionado con anterioridad.

### Figura 25.

Diagrama de dureza y tenacidad de una probeta con muesca



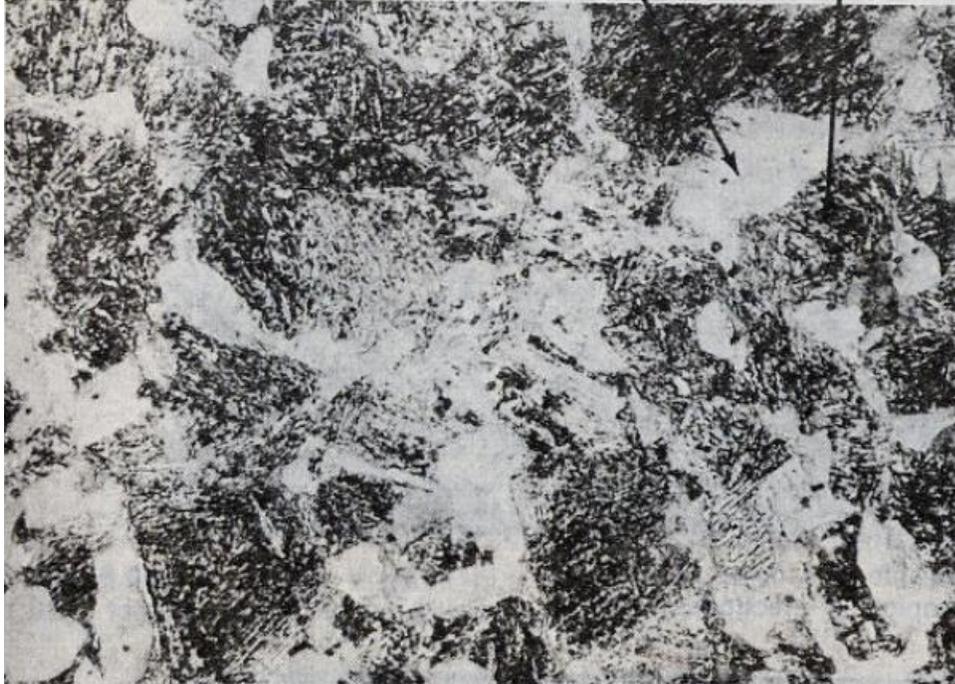
Nota. Acero 4140 después de revenir durante una hora a diferentes temperaturas. Obtenido de S. Avner (1988). *Introducción a la metalurgia física 2*. (p. 306.) McGraw Hill/Interamericana de México.

Existe un fenómeno particular, que se conoce como fragilidad de revenido. En este fenómeno existe una disminución de la tenacidad del acero. Esto ocurre después de revenir las muestras en un rango de temperaturas de entre 1,000 a 1,250 °F.

En el intervalo de 450 a 750 °F la estructura del acero adquiere una apariencia de masa negra conocida como trustita. Acá la ductilidad aumenta, aunque la tenacidad no presente cambios considerables, pese a existir disminución de la dureza del acero. Esta apariencia se visualiza en la microfotografía de la figura 26.

**Figura 26.**

*Acero SAE 1045 templado en agua y revenido a 600 °F*



*Nota.* Acero SAE 1045 templado en agua y revenido a 600 °F, observándose la trustita. Obtenido de S. Avner (1988). *Introducción a la metalurgia física 2.* (p. 309.) McGraw Hill/Interamericana de México.

En la tabla 2, se representa de mejor manera el aumento de tenacidad en el SAE 1045 después de los tratamientos de temple y revenido desde 740 °C.

**Tabla 2.**

*Tenacidad del acero SAE 1045 revenido desde 740 °C*

<b>Temperatura de revenido en °C</b>	<b>Tiempo en minutos</b>	<b>Energía absorbida en impacto en Joules</b>
	10	45.38
<b>550</b>	20	55.89
	30	61.49
	10	50.23
<b>600</b>	20	53.91
	30	80.91
	10	45.90
<b>650</b>	20	67.72
	30	80.68

*Nota.* Energía absorbida promedio de las probetas de acero SAE 1045 templadas desde 740 °C y revenidas según la temperatura indicada. Obtenido de J. Patiño, P. Potes (2017). *Influencia de la temperatura de revenido en la energía absorbida para un acero 1045 tratado térmicamente desde temperaturas intercríticas.* (<https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/6011>), consultado el 18 de mayo de 2023. De dominio público.

Tomando como referencia la tenacidad de 26.79 J que aproximadamente presenta el acero SAE 1045 en estado de suministro, es evidente un aumento de la capacidad de absorber energía de impacto en el material después de un tratamiento de temple y revenido desde 740 °C (Patiño, Potes, 2017).

### **3.2.7. Temperatura**

La temperatura es un factor de relevancia en el comportamiento mecánico de un material, sobre todo en cuanto a la ductilidad y tenacidad del material se refiere. Un material a bajas temperaturas tendrá un comportamiento frágil, disminuyendo su capacidad de ser dúctil, así como su capacidad para absorber energía de impacto.

Por el contrario, como se hizo referencia en el apartado de tratamientos térmicos, elevar la temperatura de un acero puede cambiar su microestructura como en el caso del recocido, con el objetivo de hacerlo más dúctil o tenaz. Sin embargo, algunos elementos de máquinas como ejes o engranajes de baja velocidad fabricados de acero SAE 1045, pueden presentar temperaturas superiores a la temperatura ambiente, producto de los esfuerzos generados por las fuerzas de fricción de los elementos en contacto, pese a estar debidamente lubricados.

En el caso de los aceros y otras aleaciones, se sabe que las altas temperaturas aumentan la ductilidad y la tenacidad del material. En el caso del acero SAE 1045 es notorio un aumento considerable de estas propiedades mecánicas que, aunque no estén directamente relacionadas, se ha observado en distintas evaluaciones de ensayos de impacto y tracción un aumento en sus valores de resistencia y tenacidad respectivamente.

Los aceros de bajo contenido de carbono tienen una relativamente alta temperatura de transición, es decir cuando un material pasa de ser dúctil a frágil, dependiendo de la temperatura. Esto puede representar un problema en aplicaciones y condiciones de operación en donde existan ambientes y temperaturas extremas. Se detallará la temperatura de transición la Sección 3.4 de esta investigación.

En cuanto a la fabricación de buques, Sekban et al. (2016) indica que es común utilizar aceros de bajo contenido de carbono, del denominado grado A, indicando esto que mantendrán sus propiedades mecánicas en rangos de operación de entre 0 y -20 °C; siendo un material tenaz, aun operando entre un rango de temperaturas de entre -40 y -60 °C. Dependiendo de la caída de temperatura, en aceros utilizados para la construcción de buques, puede

presentarse una falla frágil del material. Esta fractura frágil puede presentarse con aumentos o disminuciones radicales de temperatura.

Al fabricar la estructura de buques donde las partes o elementos estructurales son de acero de bajo contenido de carbono son consideradas las bajas temperaturas de operación. Dos propiedades de gran relevancia en este tipo de manufactura son la tenacidad y la temperatura de transición, al poder causar la falla catastrófica del sistema, resultando en ocasiones en la pérdida de vidas humanas, además de los costos materiales, independientemente de los fines para los que sea construido el buque, ya sean militares, comerciales o de transporte.

En esta industria, indica también Sekban et al. (2016) que se usan por lo general placas delgadas de acero de grado A, siendo este un material con buena resistencia y tenacidad, y considerando además el consumo de combustible, así como la emisión de dióxido de carbono al ambiente. Es posible mejorar ambas propiedades mecánicas, refinando los granos de la microestructura del acero, por medio de distintas técnicas; resultando en una ampliación del rango de temperatura de transición evitando la posible fractura frágil de la embarcación.

### **3.2.8. Modificación superficial**

La modificación superficial se logra con distintas técnicas como los tratamientos térmicos referidos con anterioridad. Una de las técnicas alternativas que resulta ser más práctica es la modificación superficial por fricción agitación.

Esta técnica ofrece cierta ventaja sobre los tratamientos ya que en estos existen cambios de fase en los aceros, donde por lo general cuando se mejora

una propiedad mecánica disminuye otra, como en el caso del temple, donde al aumentar la dureza del metal, disminuye la ductilidad y la tenacidad del material.

El objetivo de emplear esta técnica es el de refinar los granos de la microestructura de láminas metálicas de distintos aceros y aleaciones, entre ellos los aceros de medio y bajo contenido de carbono. Además, tiene la capacidad de mejorar diversas propiedades mecánicas del material desde su tenacidad, hasta la dureza y resistencia a la fatiga, así también de prevenir la corrosión en los aceros o aleaciones; basándose en el método de soldadura por fricción agitación que produce una modificación microestructural del acero.

Es importante aclarar que la modificación de la microestructura del acero producto del desbaste del material procesado por parte de la herramienta rotativa utilizada en esta técnica, depende de distintas variables como: la profundidad, la geometría del rodillo, el material procesado, y la velocidad de avance. Estas variables, permiten obtener una distribución más uniforme de los límites de grano produciendo ángulos más grandes de estos, debido al refinamiento propio del tamaño del grano en la superficie del acero procesado, dando como resultado el mejoramiento de algunas propiedades mecánicas.

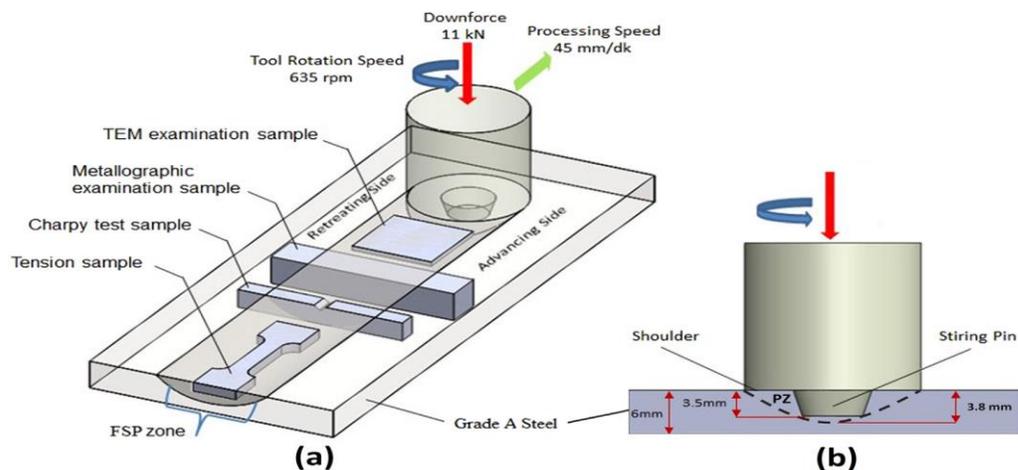
Sekban et al. (2016) describen el procesamiento por fricción agitación, en donde se emplea una herramienta rotativa de acero que no produce desgastamiento del material procesado, la cual, atraviesa la lámina en la dirección que sea de interés. El calor generado por la fricción entre el rodillo rotativo y la lámina de acero suaviza el volumen de material a ser procesado. El material que fluye a través del pin y del hombro de la herramienta rotativa sufre una severa deformación plástica y exposición térmica, cuando el rodillo o herramienta rotativa atraviesa la lámina de acero procesado. Por lo general, esta zona del material consiste en granos finos recristalizados de partículas primarias

fragmentadas, así como una uniforme distribución de segunda fase de partículas. En algunos casos este método de refinamiento transforma una microestructura inicial de granos gruesos, en una microestructura final consistente en ángulos grandes de límites de grano.

En la figura 27, se ilustra de forma esquemática los parámetros principales del procesamiento por la técnica de fricción agitación, además un corte o vista transversal donde se muestra la profundidad y forma resultante de la lámina procesada, así como algunas probetas procesadas, utilizadas en distintos ensayos destructivos de materiales.

**Figura 27.**

*Esquema del método por fricción agitación*



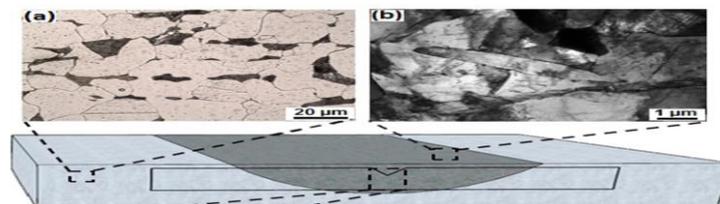
*Nota.* El esquema muestra el método por fricción agitación. Adaptado de D.M. Sekban, S.M. Aktarer, P. Xue, Z.Y. Ma y G. Purcek. Impact toughness of friction stir processed low carbon steel used in Shipbuilding [Dureza al impacto del acero bajo en carbono procesado por fricción y agitación utilizado en la construcción naval]. *Materials Science & Engineering* [Ciencia en ingeniería de materiales]. 672 (A) p. 40-48. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509316307201>

Como resultado del procesamiento por fricción agitación se observa un considerable refinamiento de grano en la microestructura del acero procesado. Los granos gruesos de ferrita y perlita son refinados debido a una severa deformación plástica, así como de una recristalización dinámica durante este procesamiento en la superficie metálica. La modificación superficial por esta técnica representa un ahorro de tiempo y recursos en comparación con los tratamientos térmicos.

Se visualiza en la microfotografía de la figura 28 que los granos refinados son separados en su mayoría por grandes ángulos de límite de grano. También es posible visualizar algunas dislocaciones. La distribución de estas dislocaciones según Sekban et al. (2016) parece ser normal, debido a la recristalización parcial y a la recuperación dinámica que ocurren durante la deformación. Es posible que exista pérdida de ductilidad en el material, así como aumento en la densidad de dislocaciones.

### Figura 28.

*Microestructura del acero previo y posterior al procesamiento*



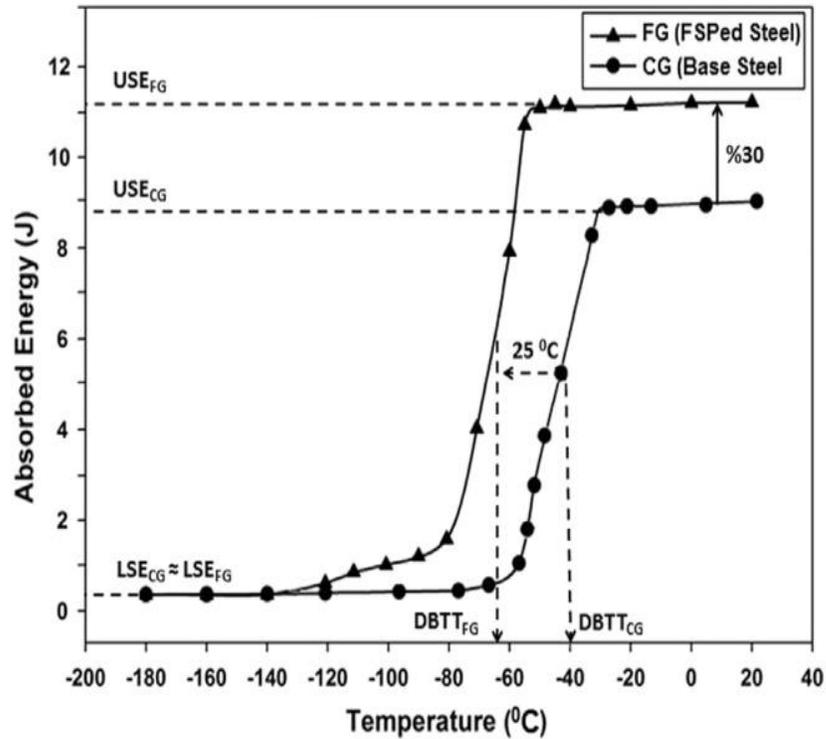
*Nota.* Microfotografía que muestra la microestructura del acero antes y después del refinamiento de grano por fricción agitación. Adaptado de D.M. Sekban, S.M. Aktarer, P. Xue, Z.Y. Ma y G. Purcek. Impact toughness of friction stir processed low carbon steel used in Shipbuilding [Dureza al impacto del acero bajo en carbono procesado por fricción y agitación utilizado en la construcción naval]. *Materials Science & Engineering* [Ciencia en ingeniería de materiales]. 672 (A) p. 40-48. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509316307201>

La tenacidad del acero grado A fue evaluada por Sekban et al. (2016), donde según los resultados obtenidos, afirman que el refinamiento de grano produce un cambio considerable, ya que se observa un incremento en la capacidad de absorber energía de 8.7 a 11.7 J, significando una mejoría considerable de esta propiedad, considerando que se produjo un refinamiento de grano por fricción agitación a temperatura ambiente. Esto significa un incremento aproximado del 30 % de su tenacidad en el rango de temperatura entre los máximos valores de energía absorbida durante el impacto. Es importante aclarar que la modificación superficial por esta técnica produjo una disminución de la temperatura de transición.

En la figura 29, se ilustra este comportamiento comparando ambos aceros mediante una gráfica.

**Figura 29.**

*Tenacidad del acero antes y después de ser procesado*



*Nota.* Gráfica comparativa que ilustra la tenacidad del acero antes y después de ser procesado por el método por fricción agitación. Adaptado de D.M. Sekban, S.M. Aktarer, P. Xue, Z.Y. Ma y G. Purcek. Impact toughness of friction stir processed low carbon steel used in Shipbuilding [Dureza al impacto del acero bajo en carbono procesado por fricción y agitación utilizado en la construcción naval]. *Materials Science & Engineering* [Ciencia en ingeniería de materiales]. 672 (A) p. 40-48. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509316307201>

### 3.3. Ensayo de impacto

A continuación, se describe la norma ASTM E23 para ensayo de impacto en metales, así como la realización de este.

### **3.3.1. Descripción de la norma ASTM E23**

La norma ASTM E23 establece los requerimientos necesarios para realizar un ensayo de impacto en metales. El alcance de esta norma permite evaluar los péndulos utilizados, los procedimientos a seguir, así también establece las medidas requeridas para las probetas metálicas con ranura; ya sea para prueba de impacto Charpy o Izod enfocándose esta investigación en el primero. También es posible por medio de uno de sus anexos determinar el porcentaje de fractura frágil en la superficie de las probetas metálicas normalizadas.

Básicamente el ensayo de impacto en metales se caracteriza por requerir un péndulo el cual posee la suficiente energía potencial, cinética y energía de impacto capaz por medio de su masa de fracturar una probeta metálica con ranura. Es también necesario utilizar los respectivos yunques y soportes que provean el suficiente agarre para las probetas normalizadas, siendo esencial también un aparato y escala capaz de medir la energía de impacto absorbida (American Society for Testing and Materials [ASTM], 2012).

Los métodos de evaluación de la norma ASTM E23 permiten probar especímenes metálicos con ranura sometidos a diferentes esfuerzos y cargas, en algunos casos a bajas y altas temperaturas, logrando predecir una fractura frágil en el metal. Se establecen también los requerimientos y precauciones a considerar al operar el péndulo de impacto.

En cuanto a la evaluación de las probetas ASTM (2012) establece las orientaciones de estas, considerando que la probeta Charpy se orienta con el fin de que la cara frontal que tiene la ranura quede en dirección opuesta al péndulo. Es importante aclarar que la norma en esta sección afirma que la selección del

tipo de probeta a utilizar ya sea Charpy dentro de sus distintas variaciones o Izod, depende del metal evaluado, considerando si se trata de un metal dúctil o un metal no ferroso o demasiado duro, siendo estos últimos excluidos ya que los resultados del ensayo podrían no ser útiles o determinantes en cuanto a impacto y tenacidad se refiere, por ser materiales poco dúctiles. Tampoco es recomendado para metales producidos por metalurgia de polvos.

En cuanto a la temperatura es importante considerar según ASTM (2012) como esta afecta a la tenacidad. En los materiales con estructura centrada en el cuerpo la transición de fractura dúctil a frágil sucede sobre rangos de temperatura que dependen en gran medida de la microestructura, así como de la composición química del metal evaluado. El rango de temperatura a las que se evaluarán las probetas depende de cual decida elegir el usuario de la norma, el cual debe considerar que metal o acero como es en el caso de este estudio, se va a evaluar.

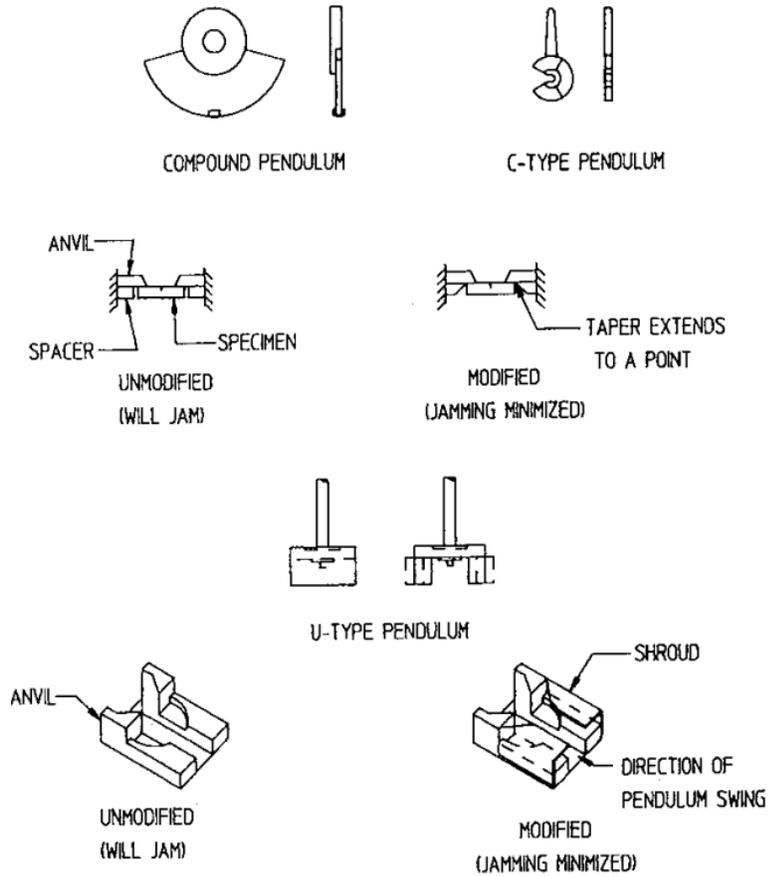
La energía absorbida de impacto o tenacidad es determinada por la escala de energía de la máquina y puede ser leída directamente del indicador o caratula de este péndulo de impacto. Perdidas por fricción y el viento son consideradas de forma automática por el equipo.

### **3.3.2. Equipo utilizado para ensayo de impacto Charpy**

Según la norma ASTM E23 los péndulos y yunques utilizados para impactar y sostener las probetas, deben poseer las características mostradas en la figura 30.

**Figura 30.**

*Péndulos y yunques usados en ensayo de impacto*



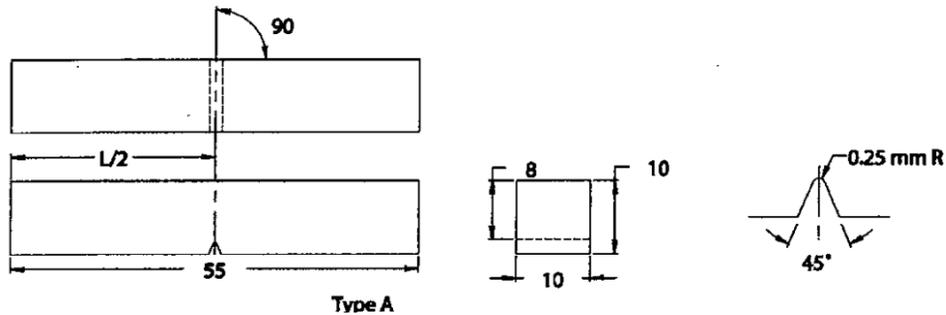
*Nota.* Péndulos y yunques utilizados comúnmente para ensayos de impacto Charpy, mostrando modificaciones para evitar atascamiento. Obtenido de ASTM (2013). *Standard test methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials E23-12c*. [Métodos de prueba estándar para pruebas de impacto con barras con muescas de materiales metálicos E23-12c]. (a. 1.) ASTM.

### 3.3.3. Dimensiones de las probetas a ensayar

A continuación, se detallan las dimensiones en milímetros de las probetas utilizadas en el ensayo de impacto Charpy en metales, según la norma ASTM E23-12c.

**Figura 31.**

*Probetas tipo V para ensayo de impacto Charpy*



*Nota.* Dimensiones en mm. para probetas usadas en ensayo de impacto Charpy. Obtenido de ASTM (2013). *Standard test methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials E23-12c.* [Métodos de prueba estándar para pruebas de impacto con barras con muescas de materiales metálicos E23-12c]. (p. 2.) ASTM.

### 3.3.4. Realización del ensayo

Para la realización del ensayo es preciso tener en cuenta las siguientes características del péndulo de impacto Charpy Oxlaj (2016).

Máquina de Charpy o Péndulo de impacto: este tiene tres escalas, debe poseer todos los requerimientos de la norma ASTM E23 citados con anterioridad.

- La primera escala indica el esfuerzo necesario para fracturar la probeta
- La segunda mide el ángulo de impacto en grados
- Una última indica la energía de impacto absorbida por el espécimen metálico.

En la figura 32, se muestra el péndulo de impacto Charpy utilizado en el ensayo.

**Figura 32.**

*Péndulo de impacto Charpy*



*Nota.* Péndulo utilizado para el ensayo de impacto Charpy. Adaptado de E. Oxlaj (2016). *Estudio comparativo de las propiedades mecánicas del acero 1045 bajo las normas ASTM E8, E10 y E23 mediante corte abrasivo y oxiacetilénico.* (<https://www.repositorio.usac.edu.gt/>), consultado el 8 de febrero de 2023. De dominio público.

Según Oxlaj (2016), para la realización del ensayo de impacto Charpy se utilizaron seis probetas en total, evaluando tres fabricadas con corte oxiacetilénico, así como tres fabricadas con corte abrasivo.

Es importante aclarar que el objetivo de este estudio radica en la importancia de evaluar la tenacidad en el acero SAE 1045, por lo tanto, no se hará énfasis en el proceso utilizado para la fabricación de las probetas, sin embargo, se tendrá en consideración al presentar los resultados obtenidos por Oxlaj (2016).

Procedimiento: De las seis probetas, dos fueron evaluadas a temperatura ambiente, otras dos a una temperatura mayor de 70 C y por último dos a una temperatura entre 0 y 10 C. Para alcanzar una temperatura mayor a 70 C, las probetas se calentaron en agua utilizando un recipiente doméstico. Las probetas evaluadas a bajas temperaturas se enfriaron utilizando hielo como medio, inmersas en otro recipiente metálico durante algunos minutos. Después de evaluar cada probeta se anotan los resultados mostrados por la máquina. Previamente a ser evaluadas se midió la masa de las seis probetas.

Los rangos de temperatura antes mencionados fueron seleccionados por Oxlaj (2016), basándose en la norma ASTM E23, la cual indica que el usuario puede establecer algunos parámetros como la temperatura; con el fin de determinar la influencia de esta en el metal evaluado, en este caso, en el acero SAE 1045. Será evidente en los resultados presentados en este estudio, cómo la temperatura influye en la capacidad del material para absorber energía de impacto.

En las figuras 33 y 34, se muestran las probetas utilizadas previo al ensayo de impacto, tanto después del proceso de corte oxiacetilénico como después del corte abrasivo.

**Figura 33.**

*Probeta de acero SAE 1045 después de corte abrasivo*



*Nota.* Probeta de acero SAE 1045 fabricado por proceso de corte abrasivo. Adaptado de E. Oxlej (2016). *Estudio comparativo de las propiedades mecánicas del acero 1045 bajo las normas ASTM E8, E10 y E23 mediante corte abrasivo y oxiacetilénico.* (<https://www.repositorio.usac.edu.gt/>), consultado el 8 de febrero de 2023. De dominio público.

**Figura 34.**

*Probeta de acero SAE 1045 después de corte oxiacetilénico*

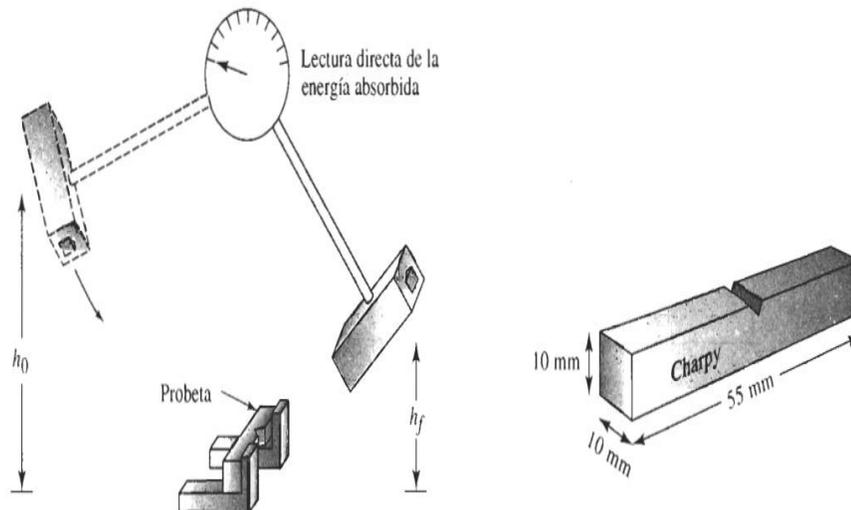


*Nota.* Probeta de acero SAE 1045 fabricado por proceso de corte oxiacetilénico. Adaptado de E. Oxlaj (2016). *Estudio comparativo de las propiedades mecánicas del acero 1045 bajo las normas ASTM E8, E10 y E23 mediante corte abrasivo y oxiacetilénico.* (<https://www.repositorio.usac.edu.gt/>), consultado el 8 de febrero de 2023. De dominio público.

En la figura 35, se ilustra el ensayo de impacto Charpy según la norma ASTM E23. Se observan el péndulo con sus respectivos yunques y carátula donde es posible leer directamente la energía cualitativa según la escala del equipo.

**Figura 35.**

*Ensayo de impacto Charpy*



Nota. Ensayo de impacto Charpy. Obtenido de D. Askeland (1998). *Ciencia e ingeniería de los materiales*. (p. 144.) International Tomson Editores.

### **3.4. Transición dúctil-frágil**

Existe una transición dúctil-frágil en un material cuando el comportamiento mecánico de este cambia de dúctil a frágil al ser afectado por la temperatura. Este rango de temperatura en el que ocurre un cambio en la microestructura del material se conoce como temperatura de transición.

#### **3.4.1. Temperatura de transición**

La temperatura de transición define la frontera en la que el material cambia sus propiedades mecánicas resultante del cambio de su microestructura. Esta frontera define cuando un material pasa de ser dúctil, es decir de tener un límite

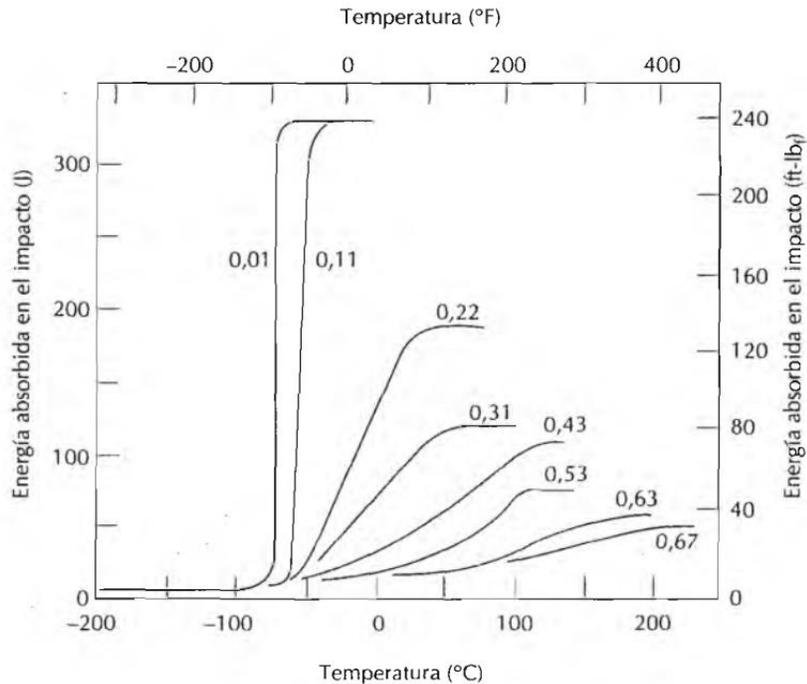
de fluencia definido, a ser un material frágil en el que no existe deformación plástica y en consecuencia donde se reducen algunas propiedades como la tenacidad y ductilidad.

La temperatura de transición es posible representarla como la energía promedio entre las regiones dúctil y frágil del material al absorber cierta energía de impacto. Es importante considerar según Askeland (1998) que la temperatura de transición del material debe ser menor a la temperatura de trabajo del elemento fabricado, con el objetivo de evitar la falla catastrófica de este resultante de la aparición de grietas originadoras de la fractura frágil.

En la figura 36, se ilustra por medio de una gráfica la temperatura de transición de distintos aceros al carbono. Es claro como los aceros con menor contenido de carbono son más tenaces; sin embargo, presentan mayor temperatura de transición los aceros más duros y frágiles que tienen mayor porcentaje de carbono.

**Figura 36.**

*Temperatura de transición de distintos aceros al carbono*



*Nota.* Tenacidad en función de la temperatura de distintos aceros al carbono donde se observa su temperatura de transición donde se indica el porcentaje de contenido de carbono. Obtenido de W. Callister (2006). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales.* (p. 214.) Editorial Reverté.

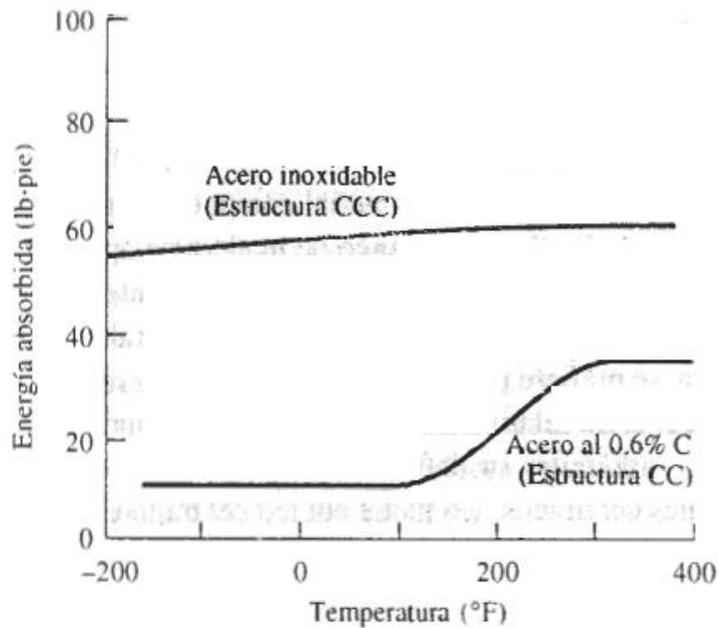
### 3.4.2. Relación entre tenacidad y temperatura de transición

Generalmente un material dúctil y resistente presenta buena tenacidad. Esto es claramente visible en los aceros al carbono, donde la temperatura de transición está bien definida. Otras aleaciones como los aceros inoxidables no presentan una frontera clara que defina cuando el material es dúctil o frágil.

En la figura 37, se muestra la comparación entre la temperatura de transición para un acero al 0.6 % de carbono con un acero inoxidable. Es evidente como un acero inoxidable presenta mayor tenacidad que un acero al carbono al mostrar un comportamiento más lineal sin tener una frontera o temperatura de transición claramente definida.

**Figura 37.**

*Relación de la tenacidad con la temperatura*



Nota. Gráfica que muestra la relación entre la temperatura y la tenacidad, mostrándose la temperatura de transición de un acero al 0.6 % de carbono. Obtenido de D. Askeland (1998). *Ciencia e ingeniería de los materiales*. (p. 146.) International Thomson Editores.



## 4. ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS MEDIANTE NORMA ASTM

### 4.1. Resultados del ensayo de impacto

Se presentan en la tabla 3 los resultados del ensayo de impacto Charpy según norma ASTM E23 obtenidos por Oxlaj (2016).

**Tabla 3.**

*Resultados del ensayo de impacto*

Aspecto	Esfuerzo (Nm/cm <sup>2</sup> )	Ángulo de impacto (°)	Energía de impacto (Nm)
Sin probeta	181.30	58	129.36
<b>Ambiente</b>			
Oxicorte	308.70	91	217.56
Hidrocorte	259.70	78	184.24
<b>Caliente (90 °C)</b>			
Oxicorte	333.20	92	219.52
Hidrocorte	289.10	84	197.96
<b>Frío (entre 0 y 10 °C)</b>			
Oxicorte	303.80	84	209.72
Hidrocorte	230.30	70	165.62

*Nota.* Energía de impacto absorbida de las probetas de acero SAE 1045 ensayadas según norma ASTM E23. Obtenido de E. Oxlaj (2016). *Estudio comparativo de las propiedades mecánicas del acero SAE 1045 bajo las normas ASTM E8, E10 y E23 mediante corte abrasivo y oxiacetilénico.* (<https://www.repositorio.usac.edu.gt/>), consultado el 8 de febrero de 2023. De dominio público.

## 4.2. Análisis de la tenacidad

Es evidente según los resultados obtenidos por Oxlaj (2016), que la energía de impacto absorbida por las probetas de acero SAE 1045 en estado de suministro a temperatura ambiente, se encuentra dentro del rango de valores de tenacidad que exponen los distintos fabricantes de este acero de mediano contenido de carbono.

Además, es notoria la influencia de la temperatura en este material, presentado mayor tenacidad cuando las probetas se encuentran en estado caliente, en este caso aproximadamente a los 90 °C, donde aumenta por ende la ductilidad del acero. Anteriormente se mencionó como las altas temperaturas pueden afectar la microestructura del acero como en el caso del recocido. Aunque el incremento de temperatura es considerable en este tratamiento térmico es importante considerar como el aumento de temperatura afecta las propiedades mecánicas del acero. Las turbinas de vapor es un caso práctico en el que se presentan altas temperaturas.

A bajas temperaturas, es decir entre 0 y 10 °C el material se vuelve frágil, provocando una alta susceptibilidad de presentar fractura frágil o clivaje presentándose la falla catastrófica del material, resultado de la propagación de microgrietas en la superficie de este acero al carbono. Esto se debe a que la energía requerida para romper los enlaces interatómicos es menor en comparación con la energía absorbida en un desgarro dúctil donde los valores de tenacidad son mayores. De esta manera la grieta se propaga entre un par de enlaces atómicos lo que produce una superficie por clivaje (Ashby & Jones, 2008).

Como anteriormente se indicó, según Sekban et al. (2016), la disminución en los valores de tenacidad de los aceros al carbono es un fenómeno que ocurre cuando la temperatura ambiente baja considerablemente, como en el caso de los buques. Allí es preponderante disminuir la susceptibilidad del material de volverse frágil, ya que absorberá menos energía de impacto poniendo en riesgo la operación de la embarcación.

#### **4.3. Análisis de la temperatura de transición durante el ensayo**

Según los resultados del ensayo de impacto obtenidos por Oxlaj (2016), es evidente como la temperatura de transición afecta el comportamiento dúctil-frágil del acero SAE 1045. Durante el intervalo de la temperatura de transición seleccionado para la realización del ensayo, las propiedades mecánicas del material se ven afectadas directamente.

Aunque las variaciones de energía obtenidas son leves, el acero SAE 1045 ensayado es capaz de absorber mayor energía de impacto cuando las temperaturas son altas, es decir a 90 °C; mediante un aumento de la ductilidad del material al cambiar levemente su comportamiento mecánico es posible aumentar la tenacidad del material.

La frontera de transición dúctil-frágil citada anteriormente es evidente en este acero de mediano contenido de carbono, ya que al evaluar las probetas con temperaturas entre los 0 y 10 °C disminuye su tenacidad, al convertirse en un material relativamente frágil. Las probetas ensayadas a temperatura ambiente, por su parte muestran los valores de tenacidad típicos del acero SAE 1045 en estado de suministro.

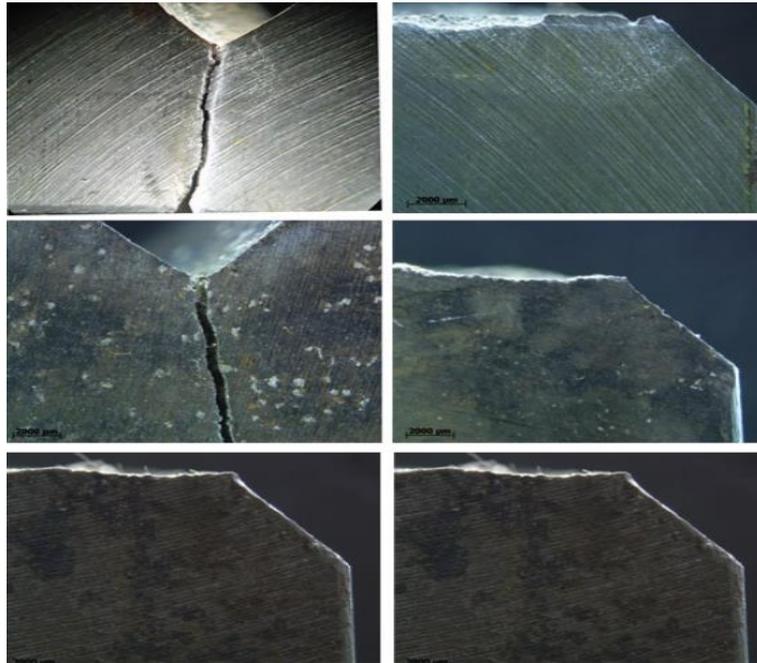
Se debe tener claro que la temperatura de transición de este acero debe ser menor que la temperatura de operación del elemento fabricado con este material, esto para evitar la falla catastrófica producto del cambio en su microestructura e inherente disminución de su ductilidad y tenacidad, resultando en la afectación de los procesos de producción o funcionamiento del sistema.

#### **4.4. Fracturas comunes producidas durante el ensayo de impacto**

Según Patiño y Potes (2017), las fracturas producidas por el péndulo de impacto Charpy en las probetas varía dependiendo del tratamiento térmico a los que el acero SAE 1045 haya sido sometido. En la figura 38 es posible visualizar ambos tipos de fractura en un acero SAE 1045 en estado de suministro y templado a dos temperaturas distintas.

**Figura 38.**

*Fracturas en acero SAE 1045 producidas después del ensayo*



*Nota.* Probetas de acero SAE 1045 ensayadas mediante ensayo de impacto Charpy, en estado de suministro y templadas a dos temperaturas diferentes. Adaptado de J. Patiño y P. Potes (2017). *Influencia de la temperatura de revenido en la energía absorbida para un acero 1045 tratado térmicamente desde temperaturas Intercríticas.* (<https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/6011>), consultado el 18 de mayo de 2023. De dominio público.

El acero SAE 1045 templado a 740 y 770 °C muestra mayor fragilidad, ya que este tratamiento térmico, como se ha citado anteriormente aumenta la dureza, disminuyendo su ductilidad y tenacidad. Se visualiza una fractura más limpia y clara evidenciando la fragilidad de este material posterior a este tratamiento térmico al pasar a convertirse en una estructura martensita.

El material de suministro presenta pequeñas crestas en la fractura según Patiño y Potes (2017), al ser un material considerablemente más dúctil y tenaz

teniendo mayor capacidad de absorber energía de impacto. Con un posterior revenido, existen aumentos considerables en la tenacidad del material.

#### **4.5. Influencia del corte abrasivo y oxiacetilénico en la tenacidad**

Es evidente un aumento en la tenacidad del acero SAE 1045 cortado por medio de corte oxiacetilénico. Según Oxlaj (2016), se debe al aumento de temperatura al que es sometido el material durante este proceso, afectando esto las propiedades mecánicas como la tenacidad y ductilidad del acero, como se ha citado con anterioridad debido al cambio en su microestructura.

Pese a la alta temperatura de la flama es decir arriba de los 3,000 °C, el cambio microestructural del acero es menor que el producido al aplicar un recocido o temple y revenido posterior, sobre todo por los tiempos de permanencia, entre otros factores.

## CONCLUSIONES

1. La importancia de evaluar la tenacidad en el acero SAE 1045 radica en que es un material de amplio uso en elementos de máquinas en múltiples aplicaciones industriales que van desde ejes, hasta engranajes de baja velocidad o chavetas, donde la capacidad del material de absorber energía de impacto determina que tan fiable será el elemento diseñado y que su tendencia a presentar fractura frágil o clivaje sea mínima o reducida, con la finalidad de evitar la falla catastrófica del material.
2. Las propiedades mecánicas del acero SAE 1045 permiten determinar la aplicación que se le proporcione al elemento diseñado con este tipo de acero, ya que es de relevancia para el diseñador de máquinas tener un concepto claro de cada una de estas propiedades del material previo al diseño.
3. Mediante el estudio de la importancia de evaluar la tenacidad en el acero SAE 1045 fue posible identificar qué factores afectan en mayor medida la capacidad de absorber energía de impacto en este material, considerando que la corrosión es sus distintos tipos, las impurezas, dislocaciones e inclusiones no metálicas son relevantes durante los procesos de producción, siendo esta información que el diseñador debe considerar. La afectación de la temperatura es también preponderante en los cambios microestructurales del acero como sucede en los tratamientos térmicos, o en las condiciones ambientales en las que funcione el sistema o elemento diseñado. Así mismo, por medio de la revisión de la ASTM E-23 se concluye también que los valores de energía obtenidos de forma

cualitativa durante el ensayo de impacto Charpy, son una importante referencia que considerar previo al diseño.

4. Las muestras ensayadas mediante el ensayo de impacto Charpy presentan fractura frágil cuando son sometidas a bajas temperaturas, por el contrario, cuando se ensayan a temperaturas elevadas presentan una fractura dúctil, mostrando claramente la afectación de la temperatura en el cambio microestructural, así como la transición dúctil-frágil del acero SAE 1045.

## RECOMENDACIONES

1. Evaluar la tenacidad del acero SAE 1045 con el objetivo de evitar fracturas y fallas catastróficas en los elementos mecánicos diseñados con este material, creando de esta manera sistemas, máquinas o herramientas más eficientes.
2. Resaltar la importancia de calcular la tenacidad debido a que es una propiedad mecánica de relevancia al seleccionar al acero SAE 1045 como material para el diseño de elementos mecánicos, ya que por lo general la dureza es el parámetro que los distribuidores de acero a nivel nacional usan como referencia.
3. Considerar los distintos factores que afectan la tenacidad del acero SAE 1045, ya que algunos son inmutables e inherentes al proceso de producción como en el caso de las impurezas y las inclusiones no metálicas. Sin embargo, otros factores como la temperatura y los tratamientos térmicos pueden afectar también las imperfecciones y dislocaciones en el material, alterando de esta manera el comportamiento de la fractura en este acero. Es una consideración directa al diseñador y al ingeniero de producción.
4. Analizar por medio de un ensayo de impacto Charpy las probetas sometidas a tratamientos térmicos previos, con el objeto de observar la tenacidad del acero SAE 1045 y determinar el comportamiento del material sometido a cargas de impacto o ya sea alterando la temperatura del

material para observar con claridad la transición dúctil-frágil de este material y por consecuencia establecer la temperatura de transición.

## REFERENCIAS

- Alcántara, J. (2019). *Corrosión atmosférica marina de aceros al carbono*. [Tesis de doctorado, Universidad Complutense de Madrid]. Archivo digital. <https://eprints.ucm.es/51717/>
- Ashby, M., & Jones, D., (2008). *Materiales para ingeniería 1, Introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño*. Editorial Reverté.
- Askeland, D. (1998). *Ciencia e ingeniería de los materiales*. International Thomson Editores, S.A. de C.V.
- ASM International (2003). *ASM Handbook, Volume (13A). Corrosion: Fundamentals, testing and protection* [Manual de ASM, volume (13A). Corrosión: fundamentos, pruebas y protección] <https://dl.asminternational.org/handbooks/edited-volume/46/Corrosion-Fundamentals-Testing-and-Protection>
- Avner, S. (1988). *Introducción a la metalurgia física 2*. McGraw Hill/Interamericana de México, S.A de C.V.
- Callister, W. (2006). *Introducción a la Ciencia e ingeniería de los materiales*. Editorial Reverté, S.A.
- Duan, C.G., & Karelin, V.Y. (2002). *Abrasive erosion of hydraulic machinery* [Erosión abrasiva de maquinaria hidráulica]. Imperial College Press.

Hibbeler Russell, C. (2011). *Mecánica de materiales*. Pearson Education de México, S.A.

Linaza, S., Martín, S., San Martín, I., Romero, J.L., Rodríguez I., y Urcola, J.J. (1994). Influencia de las inclusiones no metálicas en la tenacidad de aceros de media-alta resistencia en la zona de transición. *Anales de mecánica de la fractura*, 11(1), 200-207.  
<https://gef.es/publicaciones/listado/influencia-de-las-inclusiones-no-metalicas-en-la-tenacidad-de-aceros-de-media-alta-resistencia-en-la-zona-de-transicion>

Oberg, E., Jones, F., Horton, H., & Ryffel, H, (2012). *Machinery's Handbook* [Manual de maquinaria]. Industrial press, Inc.

Oxlaj, E. (2016). *Estudio comparativo de las propiedades mecánicas del acero 1045 bajo las normas ASTM E8, E10 y E23 mediante corte abrasivo y oxiacetileno*. [Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Archivo digital. <https://www.repositorio.usac.edu.gt/>

Patiño, J., y Potes, P. (2017). *Influencia de la temperatura de revenido en la energía absorbida para un acero 1045 tratado térmicamente desde temperaturas Intercríticas*. [Tesis de licenciatura, Universidad Distrital José de Caldas]. Archivo digital.  
<https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/6011>

Smith, W., & Hashemi, J. (2006). *Fundamentos de la Ciencia e ingeniería de materiales*. McGraw Hill/Interamericana de México, S.A de C.V.

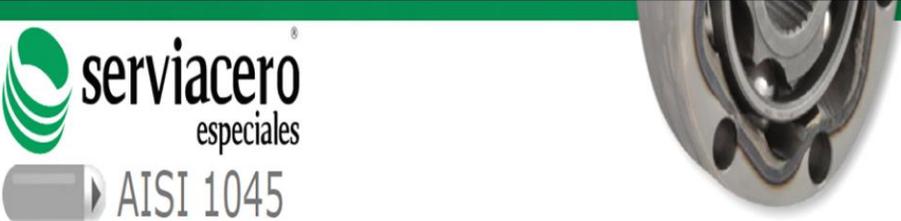
Verhoeven, J. (1987). *Fundamentos de metalurgia física*. Editorial Limusa, S.A.  
de C.V.



## ANEXO

### Anexo 1.

#### Ficha técnica del Acero SAE 1045



Equivalencia:		ASTM A 29/A29M - 16: 1045	DIN 1.1191	JIS S45C / S48C
Composición Química:	%C	0.43 - 0.50	0.60 - 0.90	0.040 máx.
	%Mn	0.60 - 0.90	0.050 máx.	---
Condición de Suministro:	%P	---	---	---
	%S	---	---	---
Recocido con una dureza estimada (SAE J414a) 179 HBN (~ 89 HRB) como Estirado en frío.				
Propiedades mecánicas (aprox. a temperatura ambiente):	Resistencia a la tensión	Límite elástico	% Elongación en 2.0"	Reducción de área
	MPa (Lb/in <sup>2</sup> )	MPa (Lb/in <sup>2</sup> )	%	%
	630 (91,000)	530 (77,000)	12	35

*Nota.* Ficha técnica del acero SAE 1045 donde se muestran los valores de sus distintas propiedades mecánicas en estado de suministro, además de su composición química. Obtenido de Serviacero. (2021). *Hoja Técnica acero SAE 1045.* (<https://www.serviacero.com/especiales/producto/1045>), consultado el 10 de junio de 2023.

