

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL ACERO  
EN 10025-6 S690QL POR MEDIO DEL ENSAYO DE IMPACTO  
INSTRUMENTADO**

**Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecánico**

**AUTOR:**

Bach. Juan Jesús Isla Causso

**ASESOR:**

Mg. Ing. Raúl Carlos Hurtado Espejo

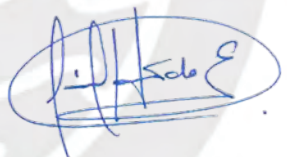
Lima, Agosto, 2024

## Informe de Similitud

Yo, **RAÚL CARLOS HURTADO ESPEJO**, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulada: **ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL ACERO EN 10025-6 S690QL POR MEDIO DEL ENSAYO DE IMPACTO INSTRUMENTADO**, del autor **JUAN JESÚS ISLA CAUSSO**, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de **22%**. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el **21/08/2024**.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima 21 de Agosto de 2024.

Apellidos y nombres del asesor: HURTADO ESPEJO, RAÚL CARLOS	
DNI: 10610827	Firma 
ORCID: 0000-0002-8511-1767	

## RESUMEN

La presente tesis aborda el estudio del comportamiento mecánico del acero de alta resistencia y baja aleación EN 10025-6 S690QL en respuesta a cargas de impacto, considerando la variación de la temperatura como un factor clave. Para lograrlo, se llevó a cabo una revisión de la literatura relacionada con aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA), su comportamiento mecánico, los distintos tipos de fractura, la caracterización de materiales y los ensayos de impacto instrumentado.

El estudio se inició con la caracterización del material. Posteriormente, se procedió a evaluar la influencia de la temperatura en el comportamiento mecánico del material frente a cargas de impacto. Se llevaron a cabo ensayos de impacto instrumentado a diversas temperaturas (-80°C, -60°C, -50°C, -40°C, -30°C, -20°C, 0°C y 20°C). Finalmente, se realizó un análisis de los resultados y se examinaron los gráficos obtenidos en dichos ensayos.

Se logró establecer una relación directa entre la disminución de la temperatura y los siguientes efectos en el material: una reducción en su capacidad para absorber energía, un aumento en su comportamiento frágil y una disminución en su tenacidad. Además, se verificó que la temperatura de transición calculada a partir de la curva Energía absorbida vs. temperatura se encuentra en proximidad al valor especificado en la especificación técnica del material.

**Palabras clave:** acero de alta resistencia y baja aleación (HSLA), S690QL, comportamiento mecánico, tipos de fractura, ensayo Charpy “V” notch, ensayo de impacto instrumentado, temperatura de transición dúctil-frágil.



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**

**TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

TÍTULO	: ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECANICO DEL ACERO EN 10025-6 S690QL POR MEDIO DEL ENSAYO DE IMPACTO INSTRUMENTADO
ÁREA	: Materiales
PROPUESTO POR	: Mg. Ing. Raul Carlos Hurtado Espejo
ASESOR	: Mg. Ing. Raul Carlos Hurtado Espejo
TESISTA	: Bach. Juan Jesús Isla Causso
CÓDIGO	: 20161866
FECHA	: 23.05.2023

**DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:**

El acero EN 10025-6 S690QL es un grado de acero estructural de alto límite elástico. Este acero ha sido diseñado para ofrecer una excelente combinación de alta resistencia, tenacidad, resistencia a la abrasión y soldabilidad. Entre sus aplicaciones se encuentran equipos de movimiento de tierra, volquetes, grúas móviles, entre otras.

Durante la vida útil de estos equipos, es posible que se generen fisuras como resultado de la fatiga a la que se someten en servicio. Por lo tanto, es fundamental estudiar el comportamiento del material para predecir la posibilidad de una falla catastrófica. Usualmente, se utiliza el ensayo de impacto Charpy "V" Notch para analizar el comportamiento mecánico y determinar de manera cualitativa el tipo de fractura, ya sea frágil o dúctil. Sin embargo, este trabajo busca determinar el comportamiento mecánico de forma cuantitativa.

El objetivo principal de esta tesis es determinar el comportamiento mecánico del material mediante el ensayo de impacto instrumentado. Para lograrlo, se plantean los siguientes objetivos específicos: caracterizar las propiedades del material, determinar el comportamiento por medio de ensayo de impacto Charpy "V" Notch, desarrollar un procedimiento de ensayo de impacto instrumentado de acuerdo con la normativa internacional y, finalmente, comparar los resultados de ambos ensayos.



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**

**TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECANICO DEL ACERO EN  
10025-6 S690QL POR MEDIO DEL ENSAYO DE IMPACTO  
INSTRUMENTADO**

Introducción

1. Marco teórico
2. Métodos experimentales
3. Análisis y discusión de resultados

Conclusiones y Recomendación

Bibliografía

Anexos

---

Mg. Ing. Raul Carlos Hurtado Espejo  
Asesor

## AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi agradecimiento al Ing. Raúl por su generosidad al brindarme su valioso tiempo en las asesorías, por compartir su vasto conocimiento, brindarme orientación y apoyo constante durante la realización de los ensayos en el CITE materiales PUCP. Su compromiso y dedicación fueron fundamentales para llevar a cabo esta tesis con éxito. Además, quiero extender mi gratitud al Ing. Renato por su colaboración en el mecanizado de las probetas. Su ayuda fue fundamental para la elaboración de esta tesis.

Quiero manifestar mi sincero agradecimiento por el inmenso apoyo brindado por mi familia a lo largo de mi vida universitaria y, en especial, durante la culminación de esta tesis. Estoy agradecido a mi padre por su apoyo económico constante, a mi madre por su apoyo emocional inquebrantable y a mi hermano por ser una fuente de inspiración, mostrando resiliencia y valentía.

Me siento realmente afortunado por contar con la compañía y el apoyo de mi pareja, Melani, a lo largo de este proceso. Agradezco la confianza que tuvo en mí en todo momento, ya que fue de gran valor para enfrentar los retos y desafíos que se presentaron en el camino.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	i
APROBACIÓN DEL TEMA DE TESIS .....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	viii
INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS.....	3
CAPÍTULO 1 .....	4
1. MARCO TEÓRICO .....	4
1.1. Aceros de alta resistencia y baja aleación.....	4
1.1.1. Reseña histórica.....	5
1.1.2. Características de los aceros de alta resistencia y baja aleación.....	7
1.1.3. Aplicaciones en diversas industrias.....	8
1.1.4. El acero EN 10025-6 S690QL y sus propiedades .....	11
1.2. Estudio del comportamiento mecánico de materiales.....	18
1.2.1. Importancia del estudio del comportamiento mecánico .....	20
1.2.2. Propiedades mecánicas de los materiales .....	21
1.2.3. Relación entre la microestructura y el comportamiento mecánico.....	21
1.3. Comportamiento mecánico de los aceros sometidos a cargas de impacto .....	24
1.3.1. Comportamiento frente a la carga estática y dinámica.....	24
1.3.2. Generación de grietas y fracturas .....	25
1.3.3. Tipos de fractura en metales .....	25
1.4. Caracterización del material .....	36
1.4.1. Análisis químico .....	37
1.4.2. Ensayo de tracción.....	37
1.4.3. Ensayo de doblado.....	39
1.4.4. Ensayo de dureza Rockwell.....	41
1.4.5. Metalografía.....	42
1.4.6. Ensayo de impacto Charpy "V" Notch .....	43
1.5. Ensayo de impacto instrumentado .....	46
1.5.1. Parámetros de medición en el ensayo de impacto instrumentado .....	47
1.5.2. Aplicaciones y limitaciones del ensayo de impacto instrumentado .....	52
1.5.3. Normativa .....	53

CAPÍTULO 2 .....	54
2. MÉTODOS EXPERIMENTALES.....	54
2.1. Caracterización del material .....	54
2.1.1. Análisis Químico .....	54
2.1.2. Ensayo de tracción.....	57
2.1.3. Ensayo de doblado.....	60
2.1.4. Ensayo de dureza Rockwell.....	62
2.1.5. Metalografía.....	64
2.1.6. Ensayo de impacto Charpy “V” Notch.....	67
2.2. Ensayo de impacto Instrumentado.....	71
2.2.1. Descripción.....	71
2.2.2. Objeto .....	72
2.2.3. Probeta.....	72
2.2.4. Procedimiento.....	72
CAPÍTULO 3 .....	74
3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	74
3.1. Caracterización del material .....	74
3.1.1. Análisis Químico .....	74
3.1.2. Ensayo de tracción.....	75
3.1.3. Ensayo de doblado.....	78
3.1.4. Ensayo de dureza Rockwell.....	80
3.1.5. Metalografía.....	81
3.1.6. Ensayo de impacto Charpy “V” Notch.....	85
3.2. Ensayo de impacto instrumentado .....	87
3.2.1. Ensayo a temperatura ambiente (20°C).....	87
3.2.2. Ensayo a temperatura 0°C .....	88
3.2.3. Ensayo a temperatura -20°C.....	90
3.2.4. Ensayo a temperatura -30°C.....	91
3.2.5. Ensayo a temperatura -40°C.....	93
3.2.6. Ensayo a temperatura -50°C.....	95
3.2.7. Ensayo a temperatura -60°C.....	97
3.2.8. Ensayo a temperatura -80°C.....	98
CONCLUSIONES.....	102
RECOMENDACIONES .....	104
BIBLIOGRAFÍA.....	105

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición química del análisis de producto <sup>a</sup> .....	12
Tabla 2. Características del ensayo de tracción a temperatura ambiente .....	14
Tabla 3. Energía absorbida de impacto sobre probetas longitudinales.....	15
Tabla 4. Energía absorbida de impacto sobre probetas transversales.....	16
Tabla 5. Valores mínimos recomendados del radio de curvatura interior para el plegado .....	17
Tabla 6. Características de fractura dúctil y frágil.....	27
Tabla 7. Resultados obtenidos del análisis químico .....	74
Tabla 8. Resultados obtenidos en el ensayo de tracción .....	77
Tabla 9. Valores calculados a partir de los resultados obtenidos en el ensayo de tracción .....	77
Tabla 10. Resultados obtenidos del ensayo de doblado .....	78
Tabla 11. Mediciones obtenidas en el ensayo de dureza Rockwell.....	80
Tabla 12. Resultados obtenidos del ensayo de impacto Charpy en probetas transversales .....	85
Tabla 13. Resultados obtenidos del ensayo de impacto Charpy en probetas longitudinales .....	85
Tabla 14. Resultados obtenidos de la expansión lateral .....	86
Tabla 15. Resultados obtenidos del ensayo de impacto instrumentado a 20°C .....	87
Tabla 16. Resultados obtenidos del ensayo de impacto instrumentado a 0°C .....	89
Tabla 17. Resultados obtenidos del ensayo de impacto instrumentado a -20°C .....	90
Tabla 18. Resultados obtenidos del ensayo de impacto instrumentado a -30°C .....	92
Tabla 19. Resultados obtenidos del ensayo de impacto instrumentado a -40°C .....	94
Tabla 20. Resultados obtenidos del ensayo de impacto instrumentado a -50°C .....	95
Tabla 21. Resultados obtenidos del ensayo de impacto instrumentado a -60°C .....	97
Tabla 22. Resultados obtenidos del ensayo de impacto instrumentado a -80°C .....	99

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Chapa de acero HSLA laminado en frío .....	5
Figura 1.2. Oleoducto TransAlaska manufacturado con acero HSLA .....	6
Figura 1.3. Puente de armadura de acero HSLA .....	8
Figura 1.4. Comparación del desglose de los grados de acero utilizados en un Chevrolet Malibu entre el 2004 y el 2016.....	9
Figura 1.5. Escala de resistencia/ductilidad del acero empleado en el sector automotriz	9
Figura 1.6. Acero HSLA en la construcción naval.....	10
Figura 1.7. Grúa pluma emplea acero HSLA en su manufactura.....	11
Figura 1.8. Influencia del tipo de cambio de sección en el tamaño de la concentración de esfuerzos .....	19
Figura 1.9. El efecto de la fatiga y la concentración de esfuerzos en la apariencia de la superficie de fractura por fatiga en flexión alternante.....	20
Figura 1.10. Proceso de estampación en caliente de acero.....	21
Figura 1.11. Tipos de fractura: (a) fractura frágil y (b) fractura dúctil.....	26
Figura 1.12. Etapas en la fractura de copa y cono. (a) Estricción inicial. (b) Formación de cavidades pequeñas. (c) Coalescencia de cavidades para formar una grieta. (d) Propagación de grietas. (e) Fractura por corte final en un ángulo de 45° con respecto a la dirección de la tracción.....	28
Figura 1.13. (a) Fractura de copa y cono en aluminio. (b) Fractura frágil en una fundición gris .....	28
Figura 1.14. Observación de la superficie de fractura mediante SEM.....	29
Figura 1.15. Fractografía electrónica de barrido que muestra hoyuelos esféricos característicos de la fractura dúctil resultante de cargas de tracción uniaxiales a 3300x. ....	30
Figura 1.16. Fotografía que muestra las marcas en forma de "chevrón" características de la fractura frágil. ....	31
Figura 1.17. Fotografía de una superficie de fractura frágil que muestra radial en forma de abanico .....	31
Figura 1.18. (a) Fractura transgranular, (b) Fractura intergranular .....	32
Figura 1.19. Fractografía electrónica de barrido de una superficie de fractura transgranular.....	32

Figura 1.20. Fractografía electrónica de barrido de superficie de fractura intergranular	33
Figura 1.21. Influencia de la temperatura en la energía absorbida.....	34
Figura 1.22. El buque Liberty S.S. Schenectady falló antes de abandonar el astillero (1943) .....	35
Figura 1.23. Curvas esquemáticas de los tres tipos generales de comportamiento de la energía de impacto absorbida frente a la temperatura .....	36
Figura 1.24. Esquema del ensayo de tracción .....	38
Figura 1.25. Curva típico tensión-deformación de ingeniería de un material dúctil hasta la fractura, punto F. La resistencia a la tracción TS se indica en el punto M.....	39
Figura 1.26. Esquema del ensayo de doblado en tres puntos .....	40
Figura 1.27. Durómetro de banco.....	41
Figura 1.28. Observación de la microestructura mediante un microscopio óptico .....	42
Figura 1.29. Esquema de un ensayo de impacto Charpy "V" Notch.....	44
Figura 1.30. Variación del aspecto de la superficie de fractura en el ensayo Charpy "V" Notch .....	45
Figura 1.31. Medidor de expansión lateral para probetas de impacto.....	46
Figura 1.32. Péndulo para ensayo de impacto instrumentado marca ZwickRoell .....	47
Figura 1.33. Grafica típica del ensayo de impacto instrumentado .....	48
Figura 1.34. Curva representativa fuerza-desplazamiento Tipo A.....	50
Figura 1.35. Curva representativa fuerza-desplazamiento Tipo B.....	51
Figura 1.36. Ecuaciones para estimar el porcentaje de ductilidad a partir de las fuerzas características.....	51
Figura 1.37. Curva representativa fuerza-desplazamiento Tipo C .....	52
Figura 2.1. Plano de la probeta para el análisis químico .....	55
Figura 2.2. Muestra preparada para análisis químico.....	56
Figura 2.3. Analizador químico de metales marca Bruker Magellan Q8.....	56
Figura 2.4. Chispero posicionado sobre la muestra.....	57
Figura 2.5. Plano de la probeta para ensayo de tracción .....	58
Figura 2.6. Probeta sujeta con extensómetro colocado.....	59
Figura 2.7. Plano de la probeta para ensayo de doblado .....	60
Figura 2.8. Ajuste de la longitud entre apoyos con una holgura adecuada. ....	61
Figura 2.9. Cepillado de la superficie exterior .....	61
Figura 2.10. Muestra lista para ensayar .....	63
Figura 2.11. Plano para probeta de metalografía.....	64

Figura 2.12. Corte para la extracción de la muestra .....	65
Figura 2.13. Prensa de briquetas empleada .....	66
Figura 2.14. Muestras desbastadas .....	66
Figura 2.15. Muestra analizada al microscopio .....	67
Figura 2.16. Plano de probeta para ensayo de impacto Charpy “V” Notch .....	68
Figura 2.17. Brochadora charpy empleada.....	69
Figura 2.18. Proyector de perfiles empleado marca ZwickRoell .....	69
Figura 2.19. Ingreso de la probeta a la cámara de temperatura .....	70
Figura 2.20. Medición de la expansión lateral .....	71
Figura 3.1. Curva fuerza-alargamiento de las probetas longitudinal y transversal .....	76
Figura 3.2. Probetas fracturadas del ensayo de tracción.....	78
Figura 3.3. Probeta transversal al término del ensayo.....	79
Figura 3.4. Probeta longitudinal al término del ensayo .....	79
Figura 3.5. Superficies exteriores de las probetas dobladas .....	80
Figura 3.6. Probeta después del ensayo de dureza Rockwell .....	81
Figura 3.7. Metalografía de la probeta longitudinal sin ataque químico a 100x aumentos .....	82
Figura 3.8. Metalografía de la probeta longitudinal sin ataque químico a 100x aumentos .....	82
Figura 3.9. Metalografía de la probeta longitudinal con ataque químico a 100x aumentos .....	83
Figura 3.10. Metalografía de la probeta longitudinal con ataque químico a 500x aumentos .....	83
Figura 3.11. Metalografía de la probeta transversal con ataque químico a 100x aumentos .....	84
Figura 3.12. Metalografía de la probeta transversal con ataque químico a 500x aumentos .....	84
Figura 3.13. Probetas después del ensayo de impacto Charpy "V" Notch.....	86
Figura 3.14. Curvas fuerza-desplazamiento de las probetas ensayadas a 20°C .....	88
Figura 3.15. Superficies de fractura de las probetas ensayadas a 20°C .....	88
Figura 3.16. Curvas fuerza-desplazamiento de las probetas ensayadas a 0°C .....	89
Figura 3.17. Superficies de fractura de las probetas ensayadas a 0°C .....	90
Figura 3.18. Curvas fuerza-desplazamiento de las probetas ensayadas a -20°C.....	91
Figura 3.19. Superficies de fractura de las probetas ensayadas a -20°C .....	91

Figura 3.20. Curvas fuerza-desplazamiento de las probetas ensayadas a $-30^{\circ}\text{C}$ .....	93
Figura 3.21. Superficies de fractura de las probetas ensayadas a $-30^{\circ}\text{C}$ .....	93
Figura 3.22. Curvas fuerza-desplazamiento de las probetas ensayadas a $-40^{\circ}\text{C}$ .....	94
Figura 3.23. Superficies de fractura de las probetas ensayadas a $-40^{\circ}\text{C}$ .....	95
Figura 3.24. Curvas fuerza-desplazamiento de las probetas ensayadas a $-50^{\circ}\text{C}$ .....	96
Figura 3.25. Superficies de fractura de las probetas ensayadas a $-50^{\circ}\text{C}$ .....	96
Figura 3.26. Curvas fuerza-desplazamiento de las probetas ensayadas a $-60^{\circ}\text{C}$ .....	98
Figura 3.27. Superficies de fractura de las probetas ensayadas a $-60^{\circ}\text{C}$ .....	98
Figura 3.28. Curvas fuerza-desplazamiento de las probetas ensayadas a $-80^{\circ}\text{C}$ .....	99
Figura 3.29. Superficies de fractura de las probetas ensayadas a $-80^{\circ}\text{C}$ .....	100
Figura 3.30. Gráfico de Energía absorbida vs. Temperatura de ensayo.....	101



## INTRODUCCIÓN

En el campo de la ingeniería mecánica, el estudio y comprensión del comportamiento de los materiales es fundamental para garantizar la seguridad y confiabilidad de las estructuras y equipos utilizados en diversas aplicaciones. El acero es uno de los materiales más ampliamente utilizados debido a su alta resistencia y tenacidad. Sin embargo, es crucial examinar detalladamente las propiedades mecánicas de diferentes grados de acero para evaluar su desempeño en condiciones de servicio específicas.

En este contexto, el presente trabajo de investigación se centra en el estudio del comportamiento mecánico del acero grado S690QL, que cumple con la norma EN 10025-6, mediante el empleo del ensayo de impacto instrumentado. El objetivo principal de esta tesis es proporcionar una evaluación cuantitativa del comportamiento mecánico de este tipo de acero, con el fin de predecir la posibilidad de fallas catastróficas asociadas a la generación de fisuras como resultado de la fatiga a la que se someten los equipos construidos con este material durante su vida útil.

La problemática principal que se aborda en este estudio radica en la necesidad de comprender en detalle la respuesta del acero S690QL ante condiciones de carga dinámica y su capacidad para resistir eventos de impacto. La generación de fisuras en los componentes de acero puede tener consecuencias graves, ya que puede provocar fallas repentinas y catastróficas en las estructuras y equipos. Por lo tanto, es esencial investigar y caracterizar el comportamiento de este acero en términos de su tenacidad y resistencia al impacto.

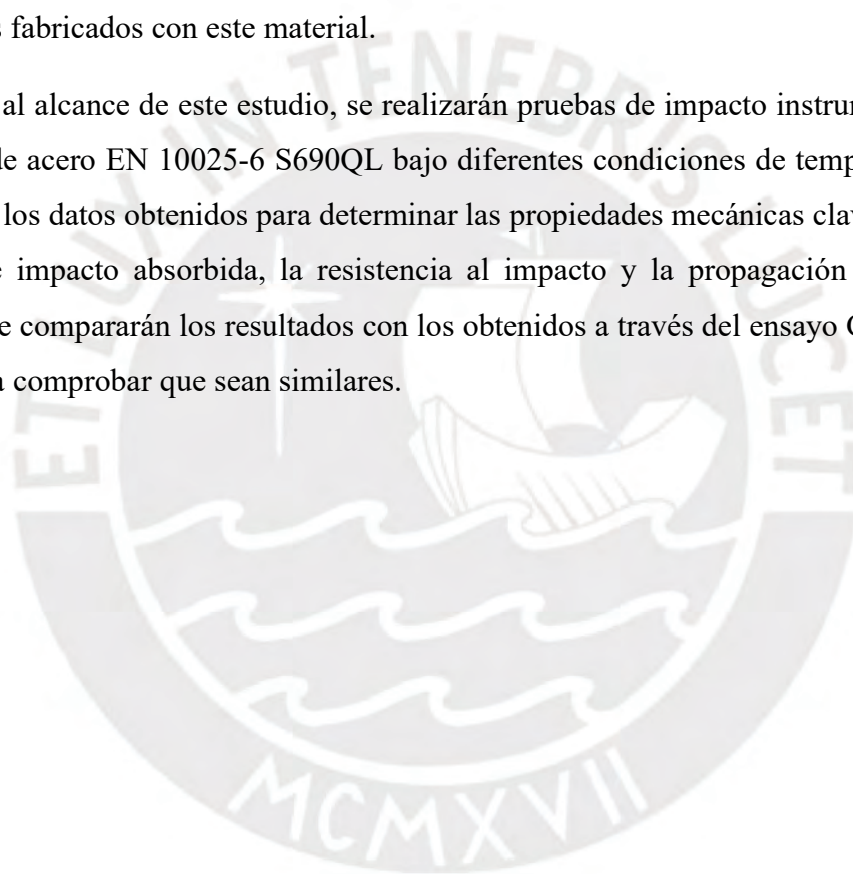
Como propuesta de solución, se empleará el ensayo de impacto instrumentado, una técnica avanzada que permite obtener datos cuantitativos y precisos sobre la respuesta mecánica del material frente a cargas de impacto. Este ensayo permite medir la energía absorbida por el material durante el impacto y determinar el tipo de falla ya sea frágil o dúctil con una aproximación cuantitativa. Además, se realizará una comparación con los resultados cualitativos obtenidos mediante el ensayo Charpy "V" Notch, un método ampliamente utilizado para evaluar la tenacidad de los materiales.

La justificación de este estudio radica en la importancia de conocer y comprender las propiedades mecánicas del acero S690QL para su aplicación segura y eficiente en la

industria. La capacidad de predecir la posibilidad de fallas catastróficas en equipos construidos con este material permitirá a los ingenieros tomar decisiones informadas sobre su diseño y utilización, garantizando así la integridad estructural y la seguridad de las personas.

El impacto de esta investigación se reflejará en la mejora de los estándares de seguridad y calidad en la industria, al proporcionar una base sólida de conocimientos sobre el comportamiento mecánico del acero EN 10025-6 S690QL. Los resultados obtenidos contribuirán al desarrollo de criterios de diseño más precisos y a la implementación de medidas preventivas que minimicen los riesgos de fallas catastróficas en los equipos y estructuras fabricados con este material.

En cuanto al alcance de este estudio, se realizarán pruebas de impacto instrumentado en muestras de acero EN 10025-6 S690QL bajo diferentes condiciones de temperatura. Se analizarán los datos obtenidos para determinar las propiedades mecánicas clave, como la energía de impacto absorbida, la resistencia al impacto y la propagación de grietas. Además, se compararán los resultados con los obtenidos a través del ensayo Charpy "V" Notch para comprobar que sean similares.



## OBJETIVOS

### OBJETIVO GENERAL

Determinar el comportamiento mecánico del material mediante el ensayo de impacto instrumentado.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar las propiedades del material.
- Desarrollar el procedimiento de ensayo de impacto instrumentado de acuerdo con la normativa ASTM E2298-18.
- Calcular de manera cuantitativa el porcentaje de fractura dúctil en las superficies de fractura de las probetas ensayadas en el ensayo de impacto instrumentado.
- Calcular la temperatura de transición dúctil-frágil del material y compararla con lo estipulado en la especificación técnica del material.
- Estudiar el comportamiento mecánico del material al ser sometido a cargas de impacto a distintas temperaturas.
- Estudiar la relación entre la forma de las curvas fuerza-desplazamiento, brindadas por el ensayo de impacto instrumentado, y el comportamiento del material para resistir cargas de impacto.

## CAPÍTULO 1

### 1. MARCO TEÓRICO

#### 1.1. Aceros de alta resistencia y baja aleación

Debido al gran interés en productos planos soldables de alta resistencia y sumado a la necesidad de utilizar espesores más ligeros para reducir el peso manteniendo el alto nivel de resistencia y la integridad estructural ha llevado al desarrollo de una clase de acero microaleados conocida como aceros de alta resistencia y baja aleación (Davis J. R., 1998).

Los aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA, por sus siglas en inglés: High-Strength Low-Alloy) poseen un bajo contenido de carbono menos al 0,3% y aproximadamente un 1% o inferior de elementos de aleación como molibdeno, silicio, níquel, manganeso, fósforo o cromo. Su microestructura está constituida por una fase de ferrita de grano fino y una fase de austenita.

La elevada resistencia característica de los aceros HSLA es producto de la microaleación y posterior tratamiento térmico rigurosamente controlados. Así pues en estos aceros, la mayor resistencia se obtiene por enfriamiento rápido para generar un tamaño de grano de ferrita muy fino, por fortalecimiento en solución sólida con fósforo, nitrógeno, manganeso y silicio y por formación de carburos con titanio, níquel y vanadio.

Estos aceros poseen mejores propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión y soldabilidad que los aceros dulces. Se manufacturan como productos laminados en caliente, como chapas laminadas en frío y como perfiles estructurales. Los aceros HSLA pueden alcanzar límites elásticos de hasta 485 MPa (70 ksi) sin tratamiento térmico. Este tipo de acero carece de conformabilidad y se utiliza para piezas estiradas de poca profundidad (Demeri, 2013).



Figura 1.1. Chapa de acero HSLA laminado en frío

Tomado de <https://www.indiamart.com/proddetail/hsla-420-cold-rolled-mild-steel-sheet-2850308047497.html>

### 1.1.1. Reseña histórica

En la década de 1950, se comenzó a investigar cómo la adición de pequeñas cantidades de niobio afectaba el comportamiento mecánico de los aceros convencionales, con el objetivo de mejorar sus propiedades de soldabilidad, conformabilidad y resistencia a la fractura. Este estudio reveló que la incorporación de niobio generaba un refinamiento del grano y un endurecimiento de la matriz en la estructura del acero, debido a la formación de pequeños precipitados de carburo de niobio.

Paralelamente, se analizó el impacto de añadir pequeñas cantidades de vanadio, titanio y aluminio, obteniendo resultados similares gracias a la formación de precipitados de carburos, nitruros y carbonitruros.

El origen de los aceros microaleados se remonta a Gran Bretaña a principios de los años 60, cuando surgieron los primeros aceros con bajo contenido de carbono que presentaban excelentes propiedades de soldabilidad y un alto límite elástico. Estas características los hicieron ideales para aplicaciones estructurales.

Antes de su aparición, la industria de la construcción utilizaba dos tipos de acero: los de baja resistencia, producidos mediante laminación en caliente o normalización, y los de alta resistencia, templados y revenidos. Sin embargo, ambos tipos de acero tenían

limitaciones en cuanto a soldabilidad, conformabilidad y resistencia a la fractura frágil. En los años 70, se comenzó a usar estos aceros como material para oleoducto para servicios a baja temperatura.



Figura 1.2. Oleoducto TransAlaska manufacturado con acero HSLA

Tomado de <https://elperiodicodelaenergia.com/el-oleoducto-transalaska-uno-de-los-mas-grandes-del-mundo-a-punto-de-echar-el-cierre/>

La evolución de los aceros HSLA se impulsó gracias a tres eventos clave:

- Desarrollo de métodos modernos de soldadura: Con la creación de nuevos procedimientos de soldadura, se hizo necesario incrementar la resistencia de los aceros.
- Crisis del petróleo de 1973: Debido a la severa escasez de combustible en el sector industrial, surgió la necesidad de reducir el peso de los automóviles para disminuir el consumo de combustible.
- Legislación medioambiental: La sustitución de aceros de baja resistencia por aceros de mayor resistencia permitió reducir el costo energético asociado a la extracción y manufactura de productos de acero. Esto se tradujo en una disminución de la cantidad de material necesario para las mismas aplicaciones, lo que a su vez contribuyó a una significativa reducción de la contaminación ambiental y permitió cumplir con las normativas ecológicas vigentes en ese momento.

En la actualidad, los aceros HSLA siguen evolucionando por las exigentes normativas en el sector de automotriz, por ejemplo, que requieren unas elevadas resistencias al impacto (Illescas, 2007).

### 1.1.2. Características de los aceros HSLA

Estos aceros poseen ciertas propiedades características que los distinguen de los aceros convencionales. Conocer estas características ayudan a entender y comprender sus aplicaciones en diversas industrias. A continuación, se describe sus principales características:

1. **Alta resistencia mecánica:** Exhiben una resistencia a la tracción considerablemente superior en contraste a los aceros convencionales. Esto se logra a través de la adición controlada de elementos de aleación, con lo cual se fortalece la matriz del acero y contribuyen a la formación de compuestos intermetálicos.
2. **Buena tenacidad:** A temperatura ambiente y bajas temperatura, poseen una excelente tenacidad o sea absorben energía antes de fracturarse. Esta propiedad es especialmente valiosa en aplicaciones que requieren resistencia al impacto, como en la construcción de estructuras que estarán sometidas a cargas dinámicas.
3. **Ductilidad:** Los aceros HSLA pueden experimentar deformaciones considerables antes de fracturarse. Esta característica es crucial en procesos de conformado, como la estampación y el doblado, donde es necesaria la capacidad de adquirir formas complejas sin fallar. Así pues los aceros HSLA poseen una ductilidad que facilita su procesamiento y les permite adoptar a una amplia gama de formas sin perder sus propiedades mecánicas.
4. **Resistencia a la corrosión:** La categoría de aceros HSLA denominada *Aceros resistentes a la intemperie* muestran mayor resistencia a la corrosión en comparación con los aceros convencionales. Esto debido a que contienen pequeñas cantidades de elementos de aleación como cobre y fósforo. Lo cual se da como resultado de la presencia de elementos de aleación que forman óxidos protectores en la superficie del acero. Esta capa protectora actúa a modo de barrera contra los agentes corrosivos, lo que trae como resultado una mayor durabilidad y una vida prolongada (Davis J. R., 1998).
5. **Buena soldabilidad:** Estos aceros han demostrado tener una buena soldabilidad ya que se pueden unir fácilmente mediante diversos procesos de soldadura, como

la soldadura por arco eléctrico, la soldadura por resistencia entre otras. Esta característica se debe a su composición química y su microestructura, que facilita la transferencia de calor y la fusión adecuada durante el proceso de soldadura. La soldabilidad de los aceros HSLA los convierte en una opción atractiva para la construcción de estructuras metálicas, equipos pesados y aplicaciones en la industria automotriz, naval y aeroespacial, entre otras.

### 1.1.3. Aplicaciones en diversas industrias

En la industria estructural, reemplazan en muchas aplicaciones donde la resistencia estructural es crítica a los aceros al carbono comunes debido a que en ambientes normales algunos aceros HSLA son más resistentes a la corrosión. Por ejemplo: puentes, torres, columnas de soporte en edificios altos y recipientes a presión (Callister & Rethwisch, 2018).



Figura 1.3. Puente de armadura de acero HSLA

Tomado de <https://www.steel-sections.com/steelsections/a572-steel-angle.html>

Los aceros HSLA son ampliamente empleados en la fabricación de automóviles modernos debido a su excelente combinación de resistencia y tenacidad, así como su soldabilidad. Además, el empleo de estos aceros contribuye a reducir costo de material y a mejorar la eficiencia (Sha, 2013). Son comúnmente usados en la estructura del vehículo, en especial es destinada a aquellas partes estructurales que soportaran cargas significativas y donde se requiere una buena soldabilidad por puntos (Horvath, 2010).

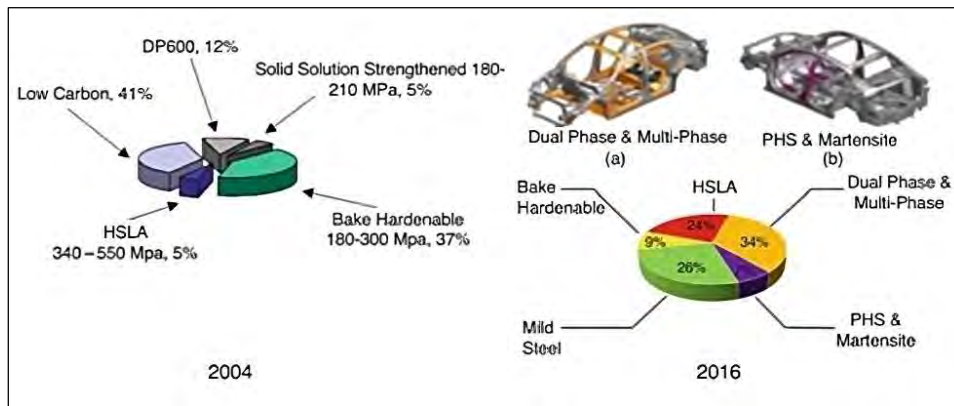


Figura 1.4. Comparación del desglose de los grados de acero utilizados en un Chevrolet Malibu entre el 2004 y el 2016

Tomado de “Cap.4 Advanced High-Strength Sheet Steels for Automotive Applications”, por Springer, 2021.

En la Figura 1.5 se muestra los distintos tipos de aceros usados en el sector automotriz en un gráfico que los compara en resistencia a la tracción y elongación. Este gráfico nos ayuda a ubicar los aceros HSLA y compararlos con los aceros avanzados de alta resistencia en términos de resistencia a la tracción y elongación.

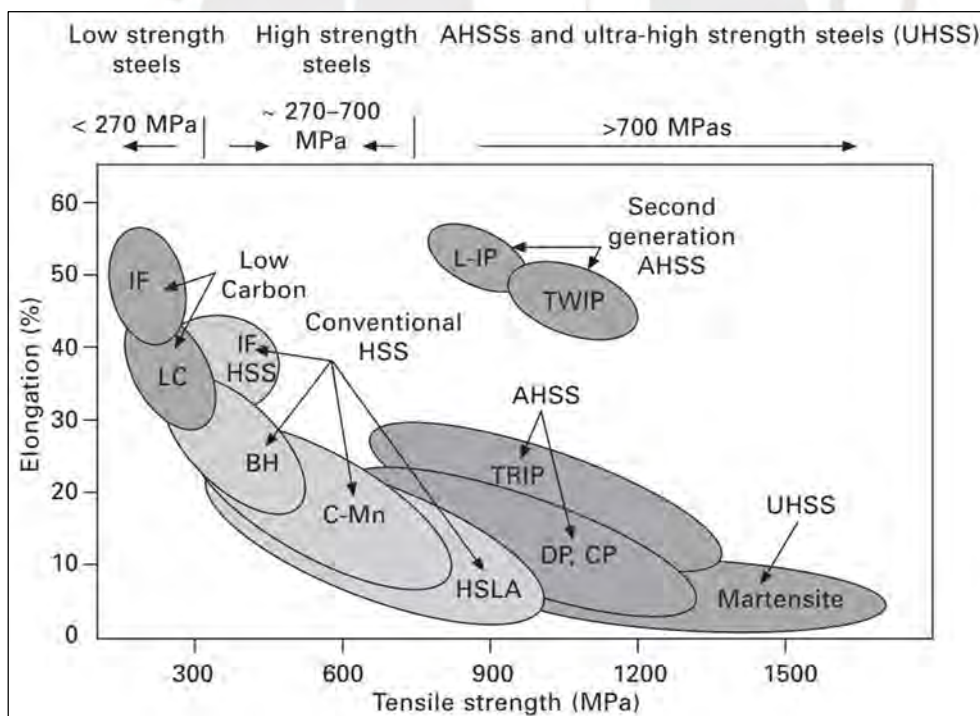


Figura 1.5. Escala de resistencia/ductilidad del acero empleado en el sector automotriz

Tomado de “Advanced steels for lightweight automotive structures”, por C. D. Horvath, General Motors, USA

Además de las dos aplicaciones antes mencionadas, los aceros HSLA tienen las siguientes aplicaciones:

a. Oleoductos y conducciones de gas

Esta fue una de las primeras aplicaciones de los aceros HSLA, especialmente en regiones árticas. Se usaban en oleoductos de gran diámetro que podían soportar altas presiones internas, alcanzando hasta 11 MPa.

b. Manufactura de barcos

Aunque su uso en la construcción naval está limitado por cuestiones de rigidez, ya que los aceros HSLA y los aceros dulces comparten el mismo módulo elástico, lo que implica que reducir el espesor también reduce la rigidez elástica, han permitido un avance importante. Los aceros HSLA han eliminado la necesidad de precalentamiento durante el proceso de soldadura, lo que representa un beneficio significativo en esta aplicación.



Figura 1.6. Acero HSLA en la construcción naval

Tomado de <https://blog.laminasyaceros.com/blog/el-acero-en-la-construcci%C3%B3n-naval>

c. Manufactura de maquinaria en general

Este tipo de aplicación abarca diversos equipos, como camiones, cisternas, grúas móviles, grúas plumas y maquinaria pesada. Al seleccionar materiales para estas aplicaciones, es crucial considerar propiedades clave como la resistencia, tenacidad, resistencia a la rotura frágil, soldabilidad y capacidad de mecanización.

En el caso específico de las grúas pluma (ver Figura 1.7), se requiere un límite elástico mínimo muy alto para garantizar una capacidad óptima de levantamiento de cargas pesadas. Por lo tanto, los materiales con un límite elástico de al menos 960 MPa ofrecen ventajas tanto económicas como técnicas en este ámbito. Además, la resistencia a la fatiga de las uniones soldadas es de vital importancia, ya que generalmente tienen un comportamiento inferior al del resto del material debido al impacto térmico durante el proceso de soldadura (Illescas, 2007).



Figura 1.7. Grúa pluma emplea acero HSLA en su manufactura

Tomado de <https://www.interempresas.net/Elevacion/Articulos/446030-Diez-gruas-torre-de-Liebherr-ayudan-a-construir-el-mayor-campus-de-madera-de-Europa.html>

#### 1.1.4. El acero EN 10025-6 S690QL y sus propiedades

Este acero es un material de alta resistencia ampliamente utilizado en aplicaciones estructurales y de ingeniería avanzada. Destaca por su elevada resistencia a la tracción, lo que lo convierte en una opción para proyectos que exigen una elevada resistencia mecánica y bajo peso estructural. Además, este tipo de acero exhibe una notable resistencia a la fatiga y mantiene una excelente tenacidad incluso a bajas temperaturas.

Clasificado como un acero HSLA, el S690QL cumple con los requisitos de la norma EN 10025-6. La cual establece la designación de productos de acero estructural con alto límite elástico, especificando su estado de suministro en condiciones de temple y revenido.

Según la designación establecida en la norma, el acero a ser estudiado posee la siguiente denominación: EN 10025-6 S690QL

- EN 10025-6: es el número de la norma
- S690QL: es la designación simbólica del acero
  - S: es el símbolo para los aceros estructurales.
  - 690: es el valor mínimo especificado del límite elástico (en MPa) para un espesor  $\leq 50$  mm.
  - Q: es el símbolo para la condición de suministro de templado y revenido.
  - L: esta letra corresponde para el grado con valores mínimos especificados de la energía de rotura por impacto a temperaturas no inferiores de  $-40$  °C.

Por otro lado, esta norma define los requisitos técnicos que deben cumplir los productos de acero estructural de alto límite elástico en condiciones de temple y revenido. A continuación, se mostrarán tablas que detallan los valores específicos que el material en estudio debe cumplir, conforme a lo establecido por la Asociación Española de Normalización (2020).

### Composición química

La composición química determinada en el análisis químico debe cumplir con los valores especificados en la Tablas 1.

Tabla 1. *Composición química del análisis de producto<sup>a</sup>*

Tipo	Grado	C	Si	Mn	P	S	N	B	Cr
		% máx.	% máx.	% máx.	% máx.	% máx.	% máx.	% máx.	% máx.
Todos los tipos	(sin símbolo)				0,030	0,017			
	L	0,22	0,86	1,80	0,025	0,012	0,016	0,0060	1,16
	L1				0,025	0,012			

a Dependiendo del espesor del producto y de las condiciones de fabricación, el fabricante puede añadir al acero uno o varios elementos de aleación hasta los valores máximos dados con el fin de obtener las características especificadas.

b Los elementos fijadores del nitrógeno deben estar en cantidades suficientes para fijar el nitrógeno.

*Nota.* Adaptado de “UNE-EN\_10025-6=2020”, por UNE, 2020.

Tabla 1. *Composición química del análisis de producto<sup>a</sup>* (continuación)

Tipo	Grado	Cu	Mo	Nb	Ni	Ti	V	Zr
		% máx.	% máx.	% máx. b	% máx.	% máx. b	% máx. b	% máx. b
Todos los tipos	(sin símbolo) L L1	0,55	0,74	0,07	4,10	0,07	0,14	0,17

a Dependiendo del espesor del producto y de las condiciones de fabricación, el fabricante puede añadir al acero uno o varios elementos de aleación hasta los valores máximos dados con el fin de obtener las características especificadas.

b Los elementos fijadores del nitrógeno deben estar en cantidades suficientes para fijar el nitrógeno.

*Nota.* Adaptado de “UNE-EN\_10025-6=2020”, por UNE, 2020.

## Características mecánicas

Las características mecánicas determinadas en los ensayos especificados deben cumplir con los valores indicados en las Tablas 2, 3, 4 y 5.

### 1. Ensayo de tracción

Es necesario verificar que los valores del límite elástico y la resistencia a la tracción obtenidos durante el ensayo de tracción cumplan con los parámetros indicados en la Tabla 2 para un espesor nominal de 12,7 mm (1/2 pulgada), el acero EN 10025-6 S690QL debe verificar un límite elástico mínimo de 690 MPa y una resistencia a la tracción debe estar dentro del rango de 770 a 940 MPa.

Tabla 2. Características del ensayo de tracción a temperatura ambiente

Designación	Límite elástico mínimo $R_{eH}$ [MPa]				Resistencia a la tracción $R_m$ [MPa]				Porcentaje mínimo de alargamiento después de la rotura % $L_0 = 5,65\sqrt{S_0}$
	Espesor nominal [mm]				Espesor nominal [mm]				
	$\geq 3$ $\leq 50$	$> 50$ $\leq 100$	$> 100$ $\leq 125$	$> 125$ $\leq 200$	$\geq 3$ $\leq 50$	$> 50$ $\leq 100$	$> 100$ $\leq 125$	$> 125$ $\leq 200$	
S460Q									
S460QL	460	440	400		550 a 720	500 a 670			17
S460QL1									
S500Q									
S500QL	500	480	440		590 a 770	540 a 720			17
S500QL1									
S550Q									
S550QL	550	530	490		640 a 820	590 a 770			16
S550QL1									
S620Q									
S620QL	620	580	560		700 a 890	650 a 830			15
S620QL1									
S690Q									
S690QL	690	650	630		770 a 940	760 a 930	710 a 900		14
S690QL1									
S890Q									
S890QL	890	830	830	-	940 a 1100	880 a 1100	880 a 1100	-	11
S890QL1									
S960Q									
S960QL	960	850	850	-	980 a 1150	900 a 1100	900 a 1100	-	10
S960QL1									

Nota. Adaptado de "UNE-EN\_10025-6=2020", por UNE, 2020.

## 2. Ensayo de impacto Charpy “V” Notch

Las características de resistencia al impacto se deben verificar sobre probetas longitudinales y transversales con entalla en V con los valores mínimos dados en la Tabla 3 y 4, respectivamente.

Conforme a lo establecido en la Tabla 3, las probetas longitudinales con entalla en V del acero EN 10025-6 S690QL deben presentar valores mínimos de energía absorbida al impacto de 50 J a 0°C, 40 J a -20°C y 30 J a -40°C.

Tabla 3. *Energía absorbida de impacto sobre probetas longitudinales*

Designación	Valores mínimos de energía absorbida por impacto en J a las temperaturas de ensayo, en °C			
	0	-20	-40	-60
S460Q				
S500Q				
S550Q				
S620Q	40	30	-	-
S690Q				
S890Q				
S960Q				
S460QL				
S500QL				
S550QL				
S620QL	50	40	30	-
S690QL				
S890QL				
S960QL				
S460QL1				
S500QL1				
S550QL1				
S620QL1	60	50	40	30
S690QL1				
S890QL1				
S960QL1				

*Nota.* Adaptado de “UNE-EN\_10025-6=2020”, por UNE, 2020.

Conforme a lo establecido en la Tabla 4, las probetas transversales con entalla en V del acero EN 10025-6 S690QL deben presentar valores mínimos de energía absorbida al impacto de 35 J a 0°C, 30 J a -20°C y 27 J a -40°C.

Tabla 4. *Energía absorbida de impacto sobre probetas transversales*

Designación	Valores mínimos de la energía absorbida por impacto en J a las temperaturas de ensayo, en °C			
	0	-20	-40	-60
S460Q				
S500Q				
S550Q				
S620Q	30	27	-	-
S690Q				
S890Q				
S960Q				
S460QL				
S500QL				
S550QL				
S620QL	35	30	27	-
S690QL				
S890QL				
S960QL				
S460QL1				
S500QL1				
S550QL1				
S620QL1	40	35	30	27
S690QL1				
S890QL1				
S960QL1				

*Nota.* Adaptado de “UNE-EN\_10025-6=2020”, por UNE, 2020.

### 3. Ensayo de doblado

Las características de doblado se deben verificar sobre probetas longitudinales y transversales con los valores mínimos dados en la Tabla 5. Según lo establecido en esta tabla, las probetas longitudinales del acero EN 10025-6 S690QL deben presentar valores mínimos recomendados de radio de curvatura interior de 50,8 mm (2”) y para las probetas trasversales de 38,1 mm (1 ½”).

Tabla 5. Valores mínimos recomendados del radio de curvatura interior para el plegado

Designación	Valores mínimos recomendados del radio de curvatura interior para espesores nominales (t)	
	$3 \leq t \leq 16 \text{ mm}^a$	
	Eje de doblado en la dirección perpendicular	Eje de doblado en la dirección longitudinal
S460Q		
S460QL		
S460QL1		
S500Q		
S500QL		
S500QL1		
S550Q		
S550QL	3,0t	4,0t
S550QL1		
S620Q		
S620QL		
S620QL1		
S690Q		
S690QL		
S690QL1		
S890Q		
S890QL		
S890QL1	4,0t	5,0t
S960Q		
S960QL		
S960QL1		

a Los valores son aplicables para ángulos de doblado  $\leq 90^\circ$ .

Nota. Adaptado de “UNE-EN\_10025-6=2020”, por UNE, 2020.

El proceso de fabricación del acero S690QL incluye un tratamiento térmico que combina el templeado y el revenido, lo cual optimiza sus propiedades mecánicas. Este proceso comienza calentando el acero a altas temperaturas, seguido de un enfriamiento rápido en agua o aceite, lo que aumenta su dureza. Luego, el acero se somete a un recalentamiento a una temperatura inferior y se mantiene en ese estado durante un tiempo específico para mejorar su resistencia y tenacidad.

En cuanto a sus aplicaciones, este acero es ampliamente utilizado en la construcción de estructuras de acero, como puentes, edificios y torres de transmisión. Su alta resistencia y bajo peso también lo hacen ideal para la fabricación de maquinaria pesada, como excavadoras y grúas, donde se requiere una combinación de durabilidad y ligereza.

## **1.2. Estudio del comportamiento mecánico de materiales**

El comportamiento mecánico se refiere a la respuesta de los materiales a las fuerzas externas. Las dos respuestas principales de los materiales a las fuerzas externas son la deformación y la fractura. Ambos son susceptibles a los defectos, la temperatura y la velocidad de carga.

Un material sometido a carga puede deformarse o romperse. Existe bastante diferencia entre los factores que determinan la resistencia a la deformación y la resistencia a la fractura. Cuando un material se deforma bajo pequeños esfuerzos, puede experimentar deformación elástica, lo que implica que recuperará su forma original cuando se elimine el estrés. La mayoría de la deformación elástica se recupera de inmediato, aunque puede haber una recuperación gradual en el tiempo. Este comportamiento elástico dependiente del tiempo se llama inelasticidad o viscoelasticidad. Por otro lado, grandes esfuerzos pueden causar deformación plástica. Lo cual implica que no volverá a su forma original cuando se elimine el esfuerzo.

La fractura es la rotura de un material en dos o más piezas y puede ser frágil si la fractura se da de manera súbita o dúctil si ha ocurrido una extensa deformación plástica antes de la rotura. Cabe señalar que la fractura generalmente ocurre tan pronto como se alcanza un estrés crítico, sin embargo, el material puede fracturarse ante menores esfuerzos cíclicos o fluctuantes repetidos, este fenómeno de falla se llama fatiga (Hosford, 2010).

Los concentradores de esfuerzos son otro factor importante para considerar, estos aumentan el esfuerzo experimentado por el material varias veces más el esfuerzo nominal

calculado en las zonas cercanas a los cambios bruscos en la sección transversal, así como las discontinuidades como agujeros, surcos, arañazos, etc.

En la Figura 1.8 se puede observar como el tipo de cambio de sección afecta en el tamaño de la concentración de esfuerzos, esto se visualiza en la distribución de esfuerzos de un material bajo carga axial.

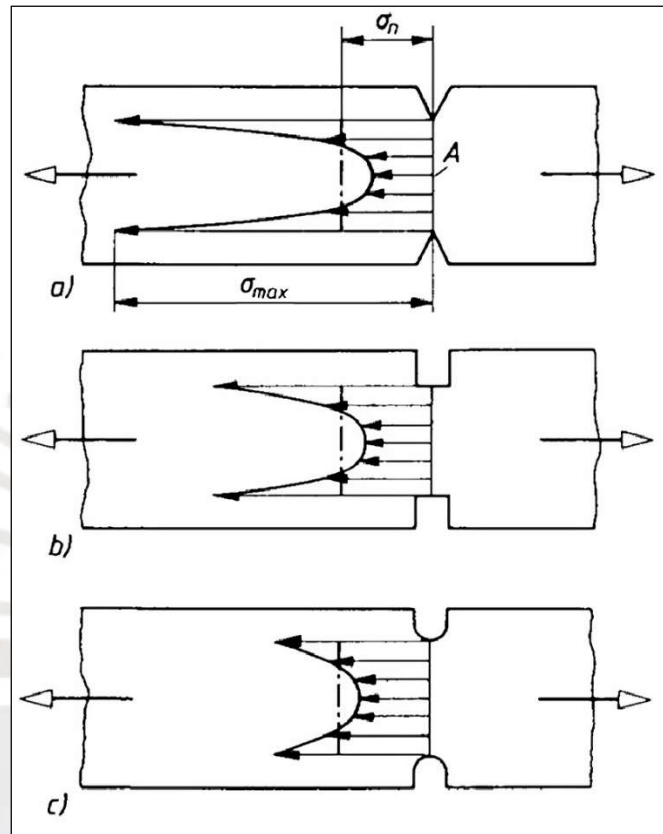


Figura 1.8. Influencia del tipo de cambio de sección en el tamaño de la concentración de esfuerzos

Tomado de “Cap. 2 Concentración de esfuerzos” por Sección Ingeniería Mecánica – Área de Diseño, Pontificia Universidad Católica del Perú.

En condiciones de servicio con esfuerzos cíclicos, estos concentradores suelen originar grietas por fatiga que comúnmente comienzan en una superficie libre. Esto facilita la identificación del punto de inicio de la fractura. Sin embargo, existen casos en los que las grietas por fatiga pueden iniciarse en el interior del material, debajo de la superficie libre, como en piezas fundidas con defectos internos graves (como sopladuras y contracciones) o en materiales con precipitados afilados. Aunque en estos casos las grietas se originan en el interior, las características de estas fracturas por fatiga son similares a las observadas en las fracturas por fatiga que comienzan en la superficie libre.

La extensión de cada zona de fractura por fatiga está influenciada por la magnitud de la concentración de tensiones, la amplitud de carga y la tenacidad a la fractura del material. Estos factores determinan hasta qué punto se propagará la grieta antes de que ocurra la fractura completa (González-Velázquez, 2020).

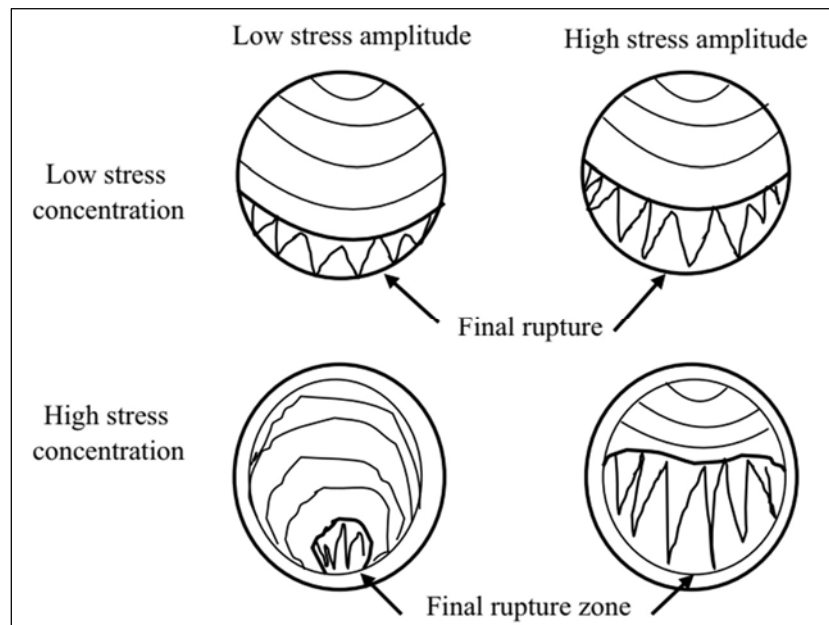


Figura 1.9. El efecto de la fatiga y la concentración de esfuerzos en la apariencia de la superficie de fractura por fatiga en flexión alternante

Tomado de “*Mechanical Behavior and Fracture of Engineering Materials*”, por Springer International Publishing, 2020.

### 1.2.1. Importancia del estudio del comportamiento mecánico

Su importancia radica en comprender como los materiales responden a las cargas consideradas en el diseño y desarrollo de componentes, herramientas y estructuras seguras y eficientes.

A continuación, se muestran las razones principales:

1. Diseño y optimización de materiales: El estudio del comportamiento mecánico posibilita diseñar componentes, herramientas y estructuras para resistir los esfuerzos y deformaciones producidas por su uso. Por otro, lado permite optimizar materiales para satisfacer requisitos específicos de rendimiento.
2. Mejora de la resistencia y durabilidad de los materiales: Mediante pruebas y análisis, es posible identificar las características estructurales y los mecanismos de deformación que permite comprender y controlar los mecanismos de fortalecimiento de los materiales, esto permite desarrollar estrategias de mejora,

como la optimización de la composición química, los tratamientos térmicos y la modificación microestructural por medio de procesos de termoconformado, por ejemplo estampado en caliente (ver figura 1.10). Lo que nos da la base para el diseño de nuevos materiales y procesos de fabricación con el fin de obtener propiedades mecánicas específicas y combinaciones óptimas entre ellas. Estas mejoras son de suma importancia para garantizar la fiabilidad y el rendimiento de los materiales en entornos exigentes y aplicaciones de alto esfuerzo (González-Velázquez, 2020).

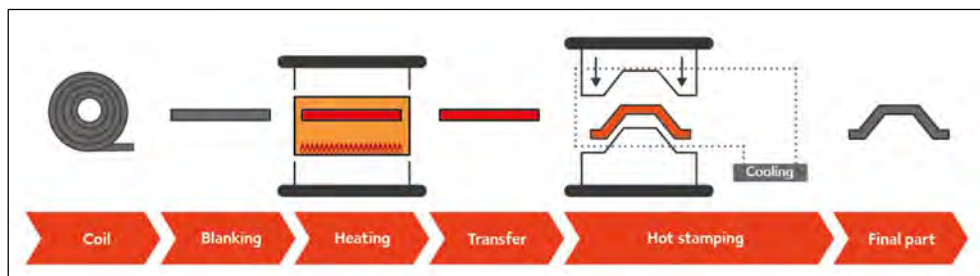


Figura 1.10. Proceso de estampación en caliente de acero

Tomado de [https://automotive.arcelormittal.com/products/flat/PHS/usibor\\_ductibor](https://automotive.arcelormittal.com/products/flat/PHS/usibor_ductibor)

3. Predicción del rendimiento y tiempo vida útil: Al comprender cómo los materiales se deforman, fracturan, o se fatigan cuando están sometidos a cargas y condiciones ambientales específicas, es posible predecir su rendimiento y tiempo de vida útil en condiciones de servicio. La comprensión del comportamiento mecánico también ayuda a identificar y prevenir posibles fallos y daños prematuros.

### 1.2.2. Propiedades mecánicas de los materiales

Las propiedades mecánicas son las propiedades físicas que un material presenta en respuesta a una carga aplicada. Entre las principales propiedades mecánicas tenemos a la resistencia a la tracción (límite elástico y resistencia a la tracción), resistencia a la penetración (dureza), rigidez (módulo de elasticidad), deformación máxima alcanzable (ductilidad), resistencia a la deformación (resiliencia) y energía de deformación (tenacidad) (González-Velázquez, 2020).

### 1.2.3. Relación entre la microestructura y el comportamiento mecánico

Las características físicas, especialmente el comportamiento mecánico, de un material a menudo se ven influenciadas por su microestructura. La microestructura se refiere a la organización y distribución de los componentes microscópicos en un material, como los

granos, fases, dislocaciones y defectos. La observación directa de la microestructura se puede lograr mediante el uso de técnicas de microscopía óptica o electrónica. En el caso de aleaciones metálicas, la microestructura se define por diversos factores, como la presencia de diferentes fases, sus proporciones relativas y la forma en la que se encuentran distribuidas o dispuestas en el material. La configuración microestructural de una aleación está sujeta a varias variables, entre las cuales se incluyen los elementos de aleación presentes, sus concentraciones y el tratamiento térmico aplicado a la aleación. Este tratamiento térmico, que involucra la temperatura, el tiempo de calentamiento a dicha temperatura y la velocidad de enfriamiento a temperatura ambiente, desempeña un papel fundamental en la determinación de la microestructura final del material (Callister & Rethwisch, 2018).

La comprensión de la relación entre la microestructura y el comportamiento mecánico es esencial para diseñar materiales con propiedades específicas. Diferentes características microestructurales, como el tamaño y la forma de los granos, la presencia de fases adicionales o la densidad de dislocaciones, pueden influir en las propiedades mecánicas, como la resistencia, la ductilidad y la tenacidad.

A continuación, se presentarán algunas características microestructurales y la influencia significativa que tienen en el comportamiento mecánico de los materiales:

- a. **Tamaño y forma de los granos:** El tamaño y la forma de los granos en un material policristalino afectan su resistencia y ductilidad. Un material con granos más pequeños tiende a tener una mayor resistencia mecánica debido a que un mayor número de límites de grano actúa como barreras para el movimiento de las dislocaciones, lo que dificulta la deformación y a su vez mejora la resistencia mecánica del material. Por el contrario, los materiales con granos más grandes suelen ser más dúctiles, ya que permiten una mayor movilidad de las dislocaciones a través de los límites de grano.

Con este conocimiento se logra el endurecimiento por tamaño de grano en materiales metálicos mediante la adición de refinadores de granos las cuales son partículas de nucleación con el objetivo de promover la nucleación y, en consecuencia, obtener un tamaño de grano más fino (Askeland D. R. et al., 2017).

- b. **Distribución de fases:** La presencia de ciertas fases en un material puede influir en su resistencia, ductilidad, dureza y tenacidad. La distribución y la proporción

de estas fases pueden afectar las propiedades mecánicas de manera significativa. Por ejemplo, la fragilización por presencia de fases más duras y frágiles puede debilitar el material y hacerlo más propenso a la fractura.

La fragilización por presencia de fases frágiles puede ocurrir debido a varios factores. Uno de los factores comunes es la presencia de inclusiones o precipitados frágiles en el material. Estas inclusiones pueden ser impurezas, segundas fases no deseadas o precipitados formados durante el procesamiento térmico del material. Estas fases frágiles actúan como concentradores de tensiones y debilitan el material, lo que reduce su resistencia y ductilidad.

- c. **Dislocaciones:** Las dislocaciones son defectos lineales en la estructura cristalina de un material y juegan un papel crucial en su comportamiento mecánico. La densidad y distribución de las dislocaciones pueden influir en la resistencia, la ductilidad y la capacidad de deformación de un material. Un mayor número de dislocaciones puede aumentar la resistencia del material, pero también puede promover la deformación plástica.

La deformación plástica macroscópica de un material está estrechamente vinculada al desplazamiento de múltiples dislocaciones. La capacidad de un metal para sufrir deformación plástica depende, en gran medida, de la movilidad de estas dislocaciones. Tanto la dureza como la resistencia de un metal (incluyendo el límite elástico y el límite de tracción) están directamente relacionadas con la facilidad con la que se produce la deformación plástica. Al disminuir la movilidad de las dislocaciones, se puede mejorar la resistencia mecánica, lo que implica que se requieren fuerzas mayores para iniciar la deformación plástica. En contraste, si las dislocaciones poseen una mayor libertad de movimiento, el metal se deformará con mayor facilidad, resultando en un material más dúctil pero menos resistente (Callister & Rethwisch, 2018).

- d. **Defectos y porosidades:** Los defectos estructurales, como las inclusiones, las grietas y la porosidad, tienen un efecto negativo en las propiedades mecánicas de los materiales. Estos defectos actúan como concentradores de tensiones y pueden debilitar el material, reduciendo su resistencia y tenacidad.

Es fundamental destacar que las características microestructurales mencionadas no operan de forma independiente, sino que interactúan tanto entre sí como con las fuerzas externas aplicadas al material. Por lo tanto, comprender la relación y el impacto de estas

características en el comportamiento mecánico requiere un enfoque integral que integre el análisis experimental, la caracterización microestructural y los modelos teóricos. Este enfoque holístico es necesario para obtener una comprensión completa y precisa de cómo estas características interactúan y contribuyen al comportamiento mecánico del material.

### **1.3. Comportamiento mecánico de los aceros sometidos a cargas de impacto**

Un material puede exhibir un comportamiento más frágil que el observado en un ensayo de tracción cuando se somete a una carga súbita y significativa, donde la velocidad de deformación es extremadamente alta (Askeland D. R. et al., 2017).

#### **1.3.1. Comportamiento frente a la carga estática y dinámica**

El comportamiento de los materiales frente a la carga estática y dinámica es de gran importancia para comprender su respuesta mecánica en diferentes condiciones de servicio. La carga estática se refiere a la aplicación de una fuerza constante o una carga gradualmente creciente sobre un material, mientras que la carga dinámica implica la aplicación de fuerzas o impactos de alta velocidad y corta duración.

Bajo cargas estáticas, los materiales se deforman de manera gradual y predecible. La respuesta mecánica de un material a la carga estática se puede analizar mediante ensayos de tracción, compresión, flexión u otros ensayos específicos. Estos ensayos permiten determinar propiedades como el límite elástico, la resistencia a la tracción, el módulo de elasticidad y la deformación plástica. El comportamiento de un material bajo carga estática se caracteriza por una respuesta lineal elástica seguida de una región plástica, donde se producen deformaciones permanentes.

Sin embargo, bajo cargas dinámicas, el comportamiento mecánico de los materiales puede ser significativamente diferente. Las cargas dinámicas suelen ser de alta velocidad y corta duración, lo que genera un estrés instantáneo en el material. Esto puede resultar en una respuesta no lineal y comportamientos inesperados, como la generación de fisuras o fracturas. En estas condiciones, el material puede exhibir una mayor fragilidad y una menor capacidad de deformación plástica en comparación con las cargas estáticas.

El comportamiento de los materiales bajo cargas dinámicas se estudia mediante ensayos de impacto, fatiga, etc. Uno de los ensayos más utilizados es el ensayo de impacto Charpy "V" Notch, donde se aplica una carga de impacto en forma de un golpe brusco y repentino en una muestra entallada. Este ensayo proporciona información sobre la tenacidad y la

capacidad de absorción de energía de un material frente a una carga dinámica. Los resultados del ensayo Charpy "V" Notch se representan mediante la energía absorbida durante la fractura de la muestra.

Es importante destacar que el comportamiento de los materiales bajo cargas dinámicas está influenciado por varios factores, como la velocidad de deformación, la temperatura, la microestructura y las propiedades intrínsecas del material. El estudio del comportamiento frente a la carga estática y dinámica es esencial para comprender la resistencia y la durabilidad de los materiales en situaciones de servicio reales, donde las cargas pueden ser variables y los eventos de impacto pueden ocurrir.

### **1.3.2. Generación de grietas y fracturas**

Los mecanismos que llevan a la formación de grietas varían según el tipo de material ya sea frágil o dúctil. La fragilidad de un material está estrechamente relacionada con el comportamiento de las dislocaciones en la zona donde se inicia la formación de la grieta. En materiales altamente frágiles, las dislocaciones tienden a ser prácticamente inmóviles. Por otro lado, en materiales dúctiles no hay restricciones significativas en el movimiento de las dislocaciones, aparte de las impuestas por la estructura cristalina inherente al material.

Cualquier irregularidad presente en un material que genere una concentración de esfuerzo puede dar lugar a la formación de grietas. Por ejemplo, escalones, estriaciones, depresiones, agujeros y otros elementos actúan como concentradores de tensiones en superficies que en apariencia son perfectas. En el interior del material, pueden encontrarse vacíos, burbujas de aire, partículas de fase secundaria, entre otros. La nucleación de grietas se producirá en el defecto más vulnerable, donde las condiciones sean más propicias (Meyers M. A. & Chawla K. K., 2009).

### **1.3.3. Tipos de fractura en metales**

Las fracturas se pueden clasificar en dos categorías generales: fractura dúctil y fractura frágil. Las fracturas dúctiles van asociadas a deformaciones plásticas antes de ocurrir, esto permite tomar medidas correctivas antes de tener consecuencias nefastas. Por otro lado, una fractura frágil comúnmente ocurre sin previo aviso de manera repentina lo cual según las circunstancias puede resultar catastrófica. La diferencia entre una fractura dúctil y frágil se ilustra en la Figura 1.11.

La Figura 1.11b muestra una superficie de fractura dúctil con una característica dúctil en forma de cono y copa, esto se ve usualmente en materiales como acero suave, latón, etc. Ambos tipos de fractura dúctil experimentan una deformación plástica significativa antes de suceder.

Las fracturas frágiles no involucran deformación plástica, la superficie de fractura es lisa y brillante. La Figura 1.11a corresponde a este tipo de fracturas. Los materiales que presentan fractura frágil cuando están sometidos a carga uniforme a temperatura ambiental y velocidad de carga moderada comprenden: vidrio, hierro fundido blanco y similares.

Cabe mencionar que las fracturas frágiles generalmente se presentan en materiales frágiles; no obstante, también pueden ocurrir en materiales dúctiles. La propensión a la fractura frágil en dichos materiales aumenta en determinadas condiciones, como la reducción de la temperatura, el incremento de la velocidad de deformación y las condiciones de esfuerzo triaxial. Por ejemplo, cuando un elemento con una muesca se somete a una carga de impacto a baja temperatura, puede provocar un comportamiento frágil en un material dúctil (Huda, 2022).

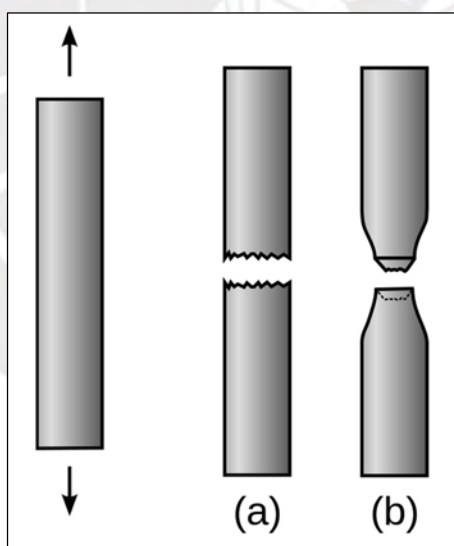


Figura 1.11. Tipos de fractura: (a) fractura frágil y (b) fractura dúctil.

Tomado de <https://www.freepng.es/png-mvy7g2/>

En la Tabla 6 se muestran las características de ambos tipos de fractura.

Tabla 6. Características de fractura dúctil y frágil

<b>Fractura dúctil</b>	<b>Fractura frágil</b>
1. Se trata de una gran deformación plástica del material antes de la falla.	No hay deformación plástica antes de la falla.
2. El material tiene alta energía de impacto.	El material tiene una energía de impacto baja.
3. La superficie de la fractura parece opaca y fibrosa mostrando una copa y un cono.	La superficie de fractura suele ser plana y brillante.
4. Las fractografías de microscopía electrónica de barrido (SEM) generalmente muestran hoyuelos esféricos debido a la coalescencia de microcavidades en los metales.	Las fractografías SEM de metales muestran la fractura transgranular y la fractura intergranular como mecanismos de fractura importantes.

*Nota.* Adaptador de “*Mechanical Behavior of Materials - Fundamentals, Analysis, and Calculations*”, por Huda, 2021.

### **Fractura dúctil**

Las superficies de fractura dúctil presentan características distintivas tanto a nivel macroscópico como microscópico, que exploraremos en detalle a continuación. Sin embargo, antes de ello, es crucial comprender el proceso que sigue este tipo de fractura.

El desarrollo de la fractura dúctil generalmente ocurre en varias etapas (ver Figura 1.12). En primer lugar, tras el inicio del estrechamiento, comienzan a formarse pequeñas cavidades o microcavidades en la sección transversal del material, como se ilustra en la Figura 1.12b. A medida que la deformación progresa, estas microcavidades se expanden, se unen y eventualmente se fusionan, dando lugar a una grieta de forma elíptica cuyo eje principal es perpendicular a la dirección del esfuerzo. La grieta sigue creciendo a lo largo de su eje principal mediante la coalescencia de más microcavidades (Figura 1.12c). Finalmente, la fractura se completa con la rápida propagación de la grieta alrededor del perímetro exterior de la contracción (Figura 1.12d), produciéndose una deformación por corte en un ángulo aproximado de  $45^\circ$  respecto al eje de tracción, que corresponde al ángulo donde el esfuerzo de corte es máximo.

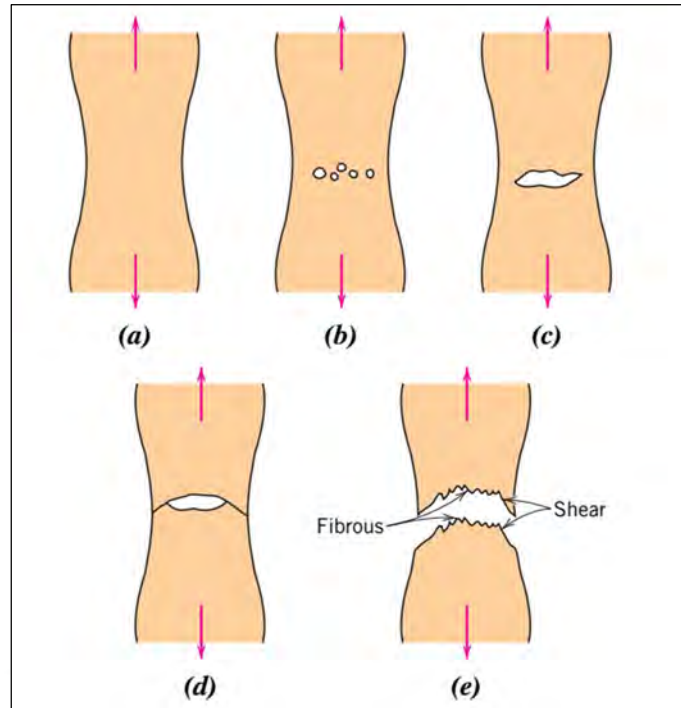


Figura 1.12. Etapas en la fractura de copa y cono. (a) Estricción inicial. (b) Formación de cavidades pequeñas. (c) Coalescencia de cavidades para formar una grieta. (d) Propagación de grietas. (e) Fractura por corte final en un ángulo de  $45^\circ$  con respecto a la dirección de la tracción.

Tomado de “*Fundamentals of Materials Science and Engineering - An Integrated Approach*”, por William D. Callister, David G. Rethwisch, 2015.

A menudo, una fractura con este característico contorno superficial se denomina fractura en forma de copa y cono, ya que una de las superficies adopta la forma de una copa, mientras que la otra toma la forma de un cono. En este tipo de fractura (ver Figura 1.13a), la parte central de la superficie interior presenta una apariencia irregular y fibrosa, lo cual indica la presencia de deformación plástica.



Figura 1.13. (a) Fractura de copa y cono en aluminio. (b) Fractura frágil en una fundición gris

Tomado de “*Fundamentals of Materials Science and Engineering - An Integrated Approach*”, por William D. Callister, David G. Rethwisch, 2015.

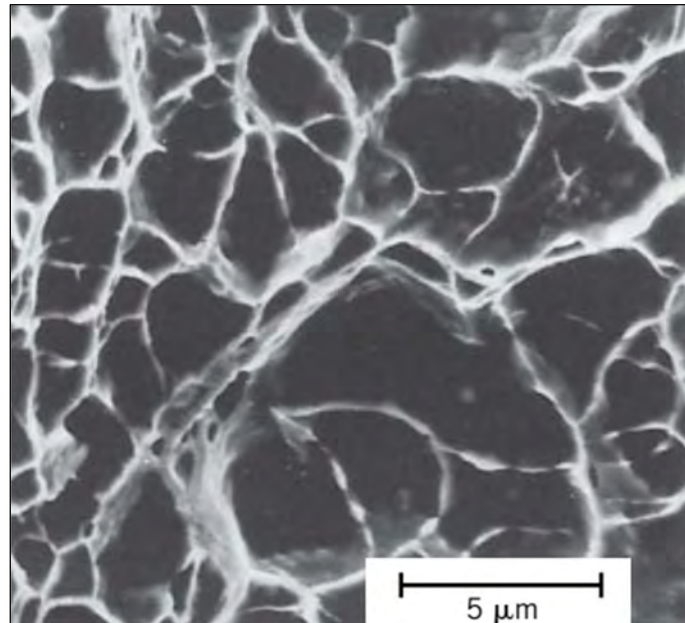
El examen microscópico proporciona la información más detallada sobre el mecanismo de fractura, siendo la microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés: Scanning Electron Microscopy) una de las técnicas más utilizadas para estos estudios, conocidos como análisis fractográficos. El SEM es preferido en estos exámenes debido a su alta resolución y mayor profundidad de campo en comparación con el microscopio óptico, lo que permite una visualización detallada de las características topográficas de las superficies de fractura.



*Figura 1.14.* Observación de la superficie de fractura mediante SEM

Elaboración propia, tomada en el CITEmateriales PUCP

Al examinar la región fibrosa central de una fractura en forma de copa y cono con un microscopio electrónico a alta magnificación, se pueden observar una serie de "hendiduras" esféricas (ver Figura 1.15). Esta estructura es típica de una fractura causada por una falla uniaxial bajo tensión. Cada hendidura representa una mitad de las microcavidades que se formaron y posteriormente se separaron durante el proceso de fractura.



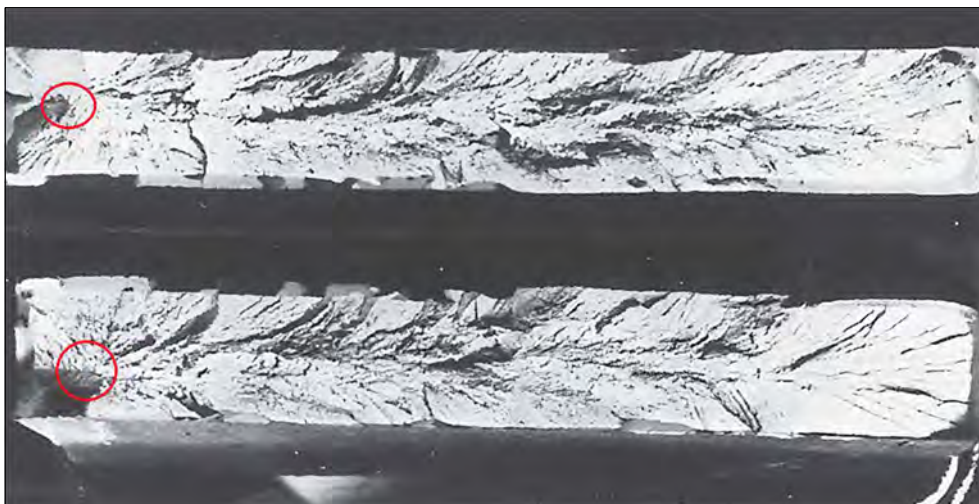
*Figura 1.15.* Fractografía electrónica de barrido que muestra hoyuelos esféricos característicos de la fractura dúctil resultante de cargas de tracción uniaxiales a 3300x.

Tomado de “*Fundamentals of Materials Science and Engineering - An Integrated Approach*”, por William D. Callister, David G. Rethwisch, 2015.

### **Fractura frágil**

La fractura frágil se caracteriza por la ausencia de deformación significativa y la rápida propagación de la grieta. Esta grieta avanza casi perpendicularmente a la dirección del esfuerzo de tracción aplicado, lo que resulta en una superficie de fractura relativamente plana, como se muestra en la Figura 1.13b.

Las superficies de fractura en materiales que experimentan fractura frágil presentan patrones distintivos y carecen de indicios claros de deformación plástica. Por ejemplo, en algunas piezas de acero, pueden formarse marcas en forma de "V", conocidas como "chevrón", cerca del centro de la sección transversal de la fractura, que apuntan hacia el punto donde se originó la grieta (ver Figura 1.16).



*Figura 1.16.* Fotografía que muestra las marcas en forma de "chevrón" características de la fractura frágil. Tomado de “*Fundamentals of Materials Science and Engineering - An Integrated Approach*”, por William D. Callister, David G. Rethwisch, 2015.

Algunas superficies de fractura frágil presentan líneas o crestas que irradian desde el punto de origen de la grieta, creando un patrón en forma de abanico (Figura 1.17). Estos patrones de marcas son generalmente lo suficientemente grandes como para ser visibles a simple vista. En metales muy duros y de grano fino, puede no observarse un patrón de fractura claro. En materiales amorfos, como los vidrios cerámicos, la fractura frágil produce una superficie relativamente lisa y brillante.



*Figura 1.17.* Fotografía de una superficie de fractura frágil que muestra radial en forma de abanico. Tomado de “*Fundamentals of Materials Science and Engineering - An Integrated Approach*”, por William D. Callister, David G. Rethwisch, 2015.

En la mayoría de los materiales cristalinos frágiles, la propagación de la grieta se produce mediante la ruptura sucesiva y repetida de enlaces atómicos a lo largo de planos cristalográficos específicos (Figura 1.18a), en un proceso conocido como clivaje. Este

tipo de fractura se denomina fractura transgranular (o transcristalina), ya que las grietas de fractura atraviesan los granos.

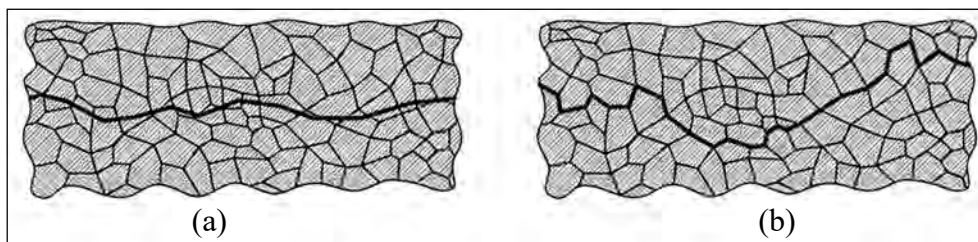


Figura 1.18. (a) Fractura transgranular, (b) Fractura intergranular

Adaptado de [https://www.researchgate.net/figure/Figura-212-Mecanismos-de-fractura-en-metales-Anderson-95\\_fig11\\_260835446](https://www.researchgate.net/figure/Figura-212-Mecanismos-de-fractura-en-metales-Anderson-95_fig11_260835446)

A nivel macroscópico, la superficie de fractura puede mostrar una textura granular o facetada (ver Figura 1.13b), resultado de las variaciones en la orientación de los planos de clivaje entre los diferentes granos del material. Esta característica de clivaje se aprecia con mayor detalle en la micrografía obtenida mediante microscopía electrónica de barrido, como se ilustra en la Figura 1.19.

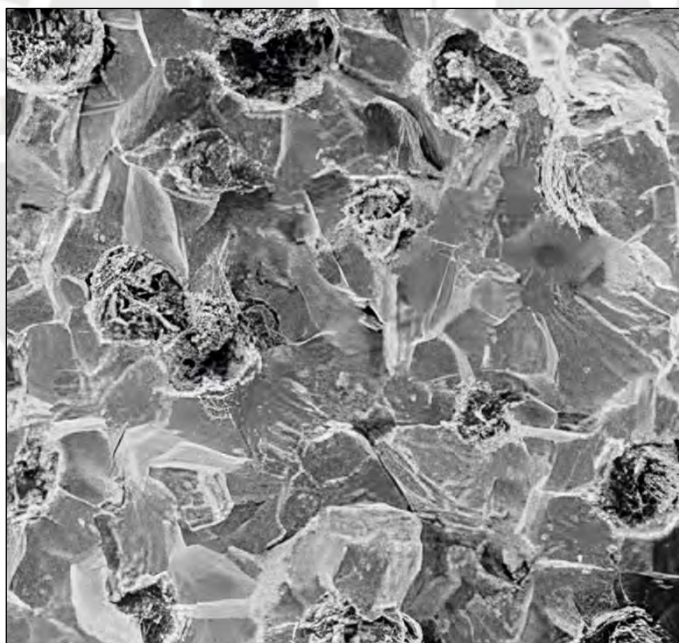
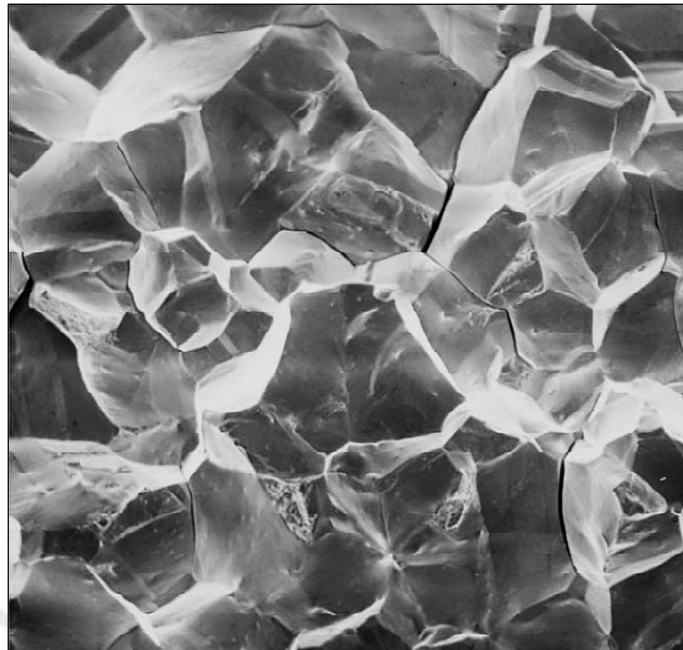


Figura 1.19. Fractografía electrónica de barrido de una superficie de fractura transgranular

Tomado de <https://mse429.cankaya.edu.tr/uploads/files/CH02.pdf>

En algunas aleaciones, la propagación de la grieta ocurre a lo largo de los límites de grano (ver Figura 1.18b), lo que se conoce como fractura intergranular. La Figura 1.20 muestra una micrografía electrónica de barrido que exhibe una fractura intergranular típica, revelando la naturaleza tridimensional de los granos. Este tipo de fractura generalmente

ocurre después de procesos que debilitan o vuelven frágiles las regiones de los límites de grano.



*Figura 1.20.* Fractografía electrónica de barrido de superficie de fractura intergranular

Tomado de <https://mse429.cankaya.edu.tr/uploads/files/CH02.pdf>

### **Temperatura de transición dúctil a frágil**

La transición de un comportamiento dúctil a uno frágil en un material está estrechamente vinculada con la influencia de la temperatura en la energía absorbida durante un impacto, como se ilustra en la Figura 1.21. Las pruebas principales para determinar si un material experimenta esta transición al disminuir la temperatura, y para identificar el rango de temperaturas en el que ocurre, son las pruebas de Charpy e Izod. A medida que la temperatura disminuye, la energía de impacto cae drásticamente dentro de un rango de temperatura relativamente estrecho. Por debajo de este rango, la energía de impacto se estabiliza en un valor bajo, lo que indica un comportamiento frágil de la fractura.

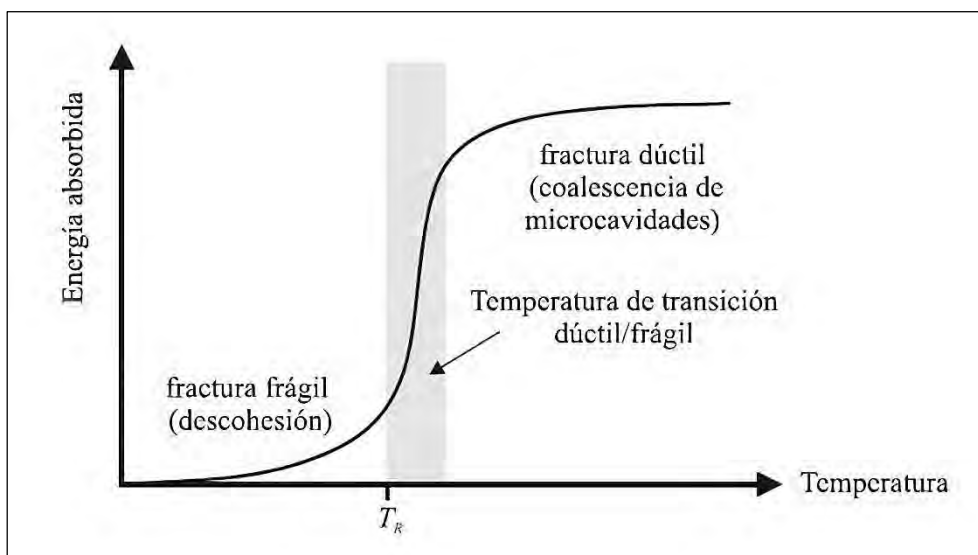


Figura 1.21. Influencia de la temperatura en la energía absorbida

Tomado de [https://oa.upm.es/47304/1/TFG\\_LUCIA\\_BAYONA\\_REVILLA.pdf](https://oa.upm.es/47304/1/TFG_LUCIA_BAYONA_REVILLA.pdf)

La apariencia de la superficie de fractura también proporciona pistas sobre la naturaleza de la fractura y puede utilizarse para determinar la temperatura de transición. Durante el cambio de comportamiento de dúctil a frágil, pueden observarse tanto características de fractura dúctil como frágil.

Para muchas aleaciones, existe un rango de temperaturas en el que se produce esta transición, lo que complica la definición de una única temperatura de transición dúctil a frágil. Dado que no existe un criterio explícito, esta temperatura suele definirse como aquella en la que la energía absorbida en el ensayo Charpy alcanza un determinado valor o se asocia con una apariencia específica de la fractura.

Las estructuras fabricadas con aleaciones que experimentan esta transición de dúctil a frágil deben operar a temperaturas superiores a la de transición para evitar fallas frágiles y catastróficas, como la famosa ruptura del buque Liberty S.S. Schenectady, que se partió por la mitad al no considerar la temperatura de transición en su diseño.



*Figura 1.22.* El buque Liberty S.S. Schenectady falló antes de abandonar el astillero (1943)

Tomado de <https://www.slideshare.net/HarshalPatil7/introduction-to-fracture-mechanics>

Además de la transición de dúctil a frágil, representada en la Figura 1.21, se han observado otros dos tipos generales de comportamiento de la energía de impacto absorbida en función de la temperatura, que se muestran esquemáticamente en las curvas superiores e inferiores de la Figura 1.23. Se puede observar que los metales FCC de baja resistencia (como algunas aleaciones de aluminio y cobre) y la mayoría de los metales HCP no experimentan una transición de dúctil a frágil, manteniendo altas energías de impacto y tenacidad a medida que disminuye la temperatura (correspondiendo a la curva superior de la Figura 1.23). Por otro lado, los materiales de alta resistencia (por ejemplo, aceros de alta resistencia y aleaciones de titanio) también presentan una energía de impacto relativamente insensible a la temperatura, pero poseen bajas energías de impacto, lo que indica su fragilidad (correspondiendo a la curva inferior de la Figura 1.23). La transición característica de dúctil a frágil se representa mediante la curva media de la Figura 1.23. Como se mencionó, este comportamiento se encuentra típicamente en aceros de baja resistencia con una estructura cristalina BCC.

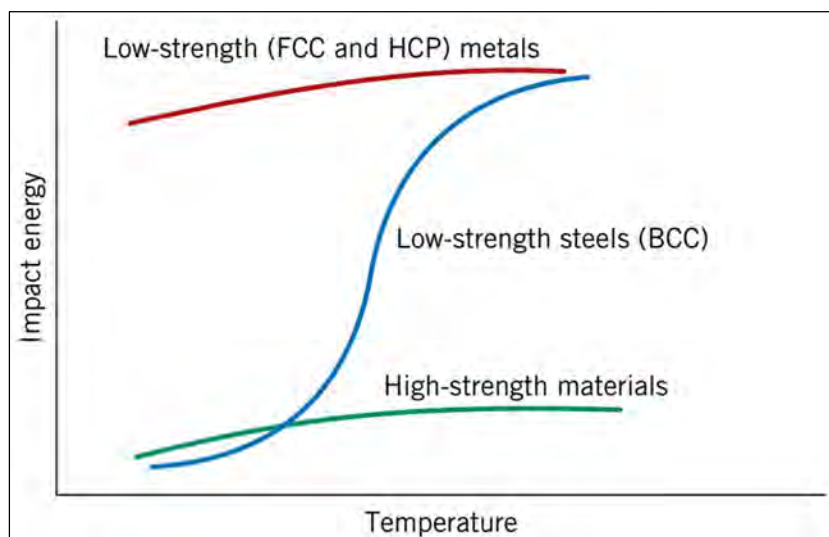


Figura 1.23. Curvas esquemáticas de los tres tipos generales de comportamiento de la energía de impacto absorbida frente a la temperatura

Tomado de “*Fundamentals of Materials Science and Engineering - An Integrated Approach*”, por William D. Callister, David G. Rethwisch, 2015.

En estos aceros de baja resistencia, la temperatura de transición se ve afectada tanto por la composición de la aleación como por la microestructura. Por ejemplo, una disminución en el tamaño promedio de los granos reduce la temperatura de transición. Por otro lado, aunque un mayor contenido de carbono aumenta la resistencia del acero, también eleva su temperatura de transición.

#### 1.4. Caracterización del material

La caracterización de un material es un proceso que se enfoca en la obtención de información detallada y precisa acerca de las propiedades y el comportamiento de un material específico. Este procedimiento implica llevar a cabo una serie de pruebas, análisis y evaluaciones con el objetivo de comprender las características físicas, químicas, mecánicas y estructurales del material en cuestión.

La caracterización de materiales desempeña un papel fundamental en varios campos científicos y tecnológicos, como la ciencia de materiales, la ingeniería, la física y la química. Proporciona información crucial para el diseño, desarrollo y selección de materiales en una amplia gama de aplicaciones.

### **1.4.1. Análisis químico**

El análisis químico es utilizado en la caracterización de materiales para determinar la composición química de un material. Se centra en identificar los elementos presentes y las proporciones relativas de cada uno de ellos.

Este análisis puede realizarse utilizando diferentes métodos y técnicas, dependiendo del tipo de material y los elementos que se deseen analizar. En este trabajo de investigación se seguirán los métodos establecidos en la norma ASTM E350 – 18 (ASTM International, 2018).

Estos métodos de prueba para el análisis químico de metales y aleaciones están destinados principalmente como métodos de referencia para probar los materiales mencionados en la norma y posteriormente verificar su cumplimiento con las especificaciones de composición. Estos métodos serán usados por analistas capacitados capaces de realizar hábil y seguramente procedimientos comunes de laboratorio. El trabajo se realizará en un laboratorio debidamente equipado y bajo prácticas apropiadas de control de calidad (ASTM E350 – 18).

### **1.4.2. Ensayo de tracción**

El ensayo de tracción es una de las pruebas más comunes y fundamentales en la caracterización de materiales. Es utilizado para determinar las propiedades mecánicas de un material, en términos de su resistencia y deformabilidad bajo cargas de tracción.

La prueba se lleva a cabo mediante la sujeción de un espécimen o probeta a un dispositivo de medición de carga, aplicando una simple carga uniaxial (o imponiendo una deformación dada) y midiendo la carga y la deformación correspondiente. En la Figura 1.24 se muestra un esquema de este ensayo (Kaufmann, 2012).

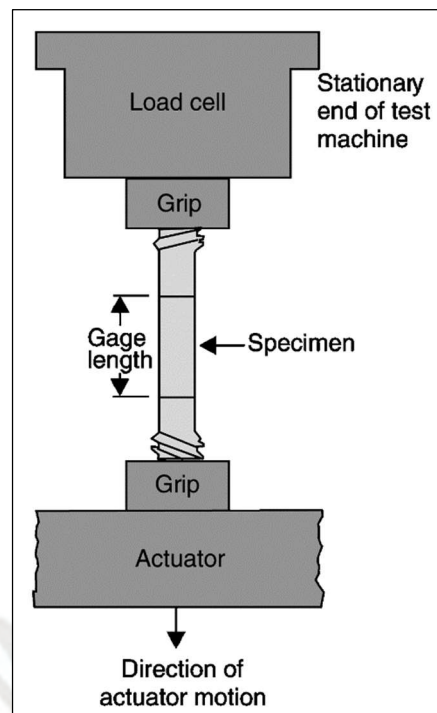


Figura 1.24. Esquema del ensayo de tracción

Tomado de “*Characterization of Materials*” por Elton N. Kaufmann, 2012.

El ensayo brinda como resultado una gráfica con la curva de esfuerzo-deformación, la cual proporciona información importante sobre las propiedades mecánicas del material, incluyendo:

1. Límite elástico: es el punto en la curva donde el material comienza a deformarse de manera permanente después de eliminar la carga.
2. Resistencia a la tracción: es el punto máximo en la curva, que indica la máxima resistencia del material a la tracción antes de sufrir la rotura.
3. Deformación unitaria: se refiere a la relación entre la deformación y la longitud original de la muestra. Proporciona información sobre la deformabilidad y ductilidad del material.
4. Módulo de elasticidad: también conocido como módulo de Young, es una medida de la rigidez del material. Se calcula como la pendiente de la parte lineal de la curva de tensión-deformación.

La siguiente figura muestra una curva típica para un material dúctil.

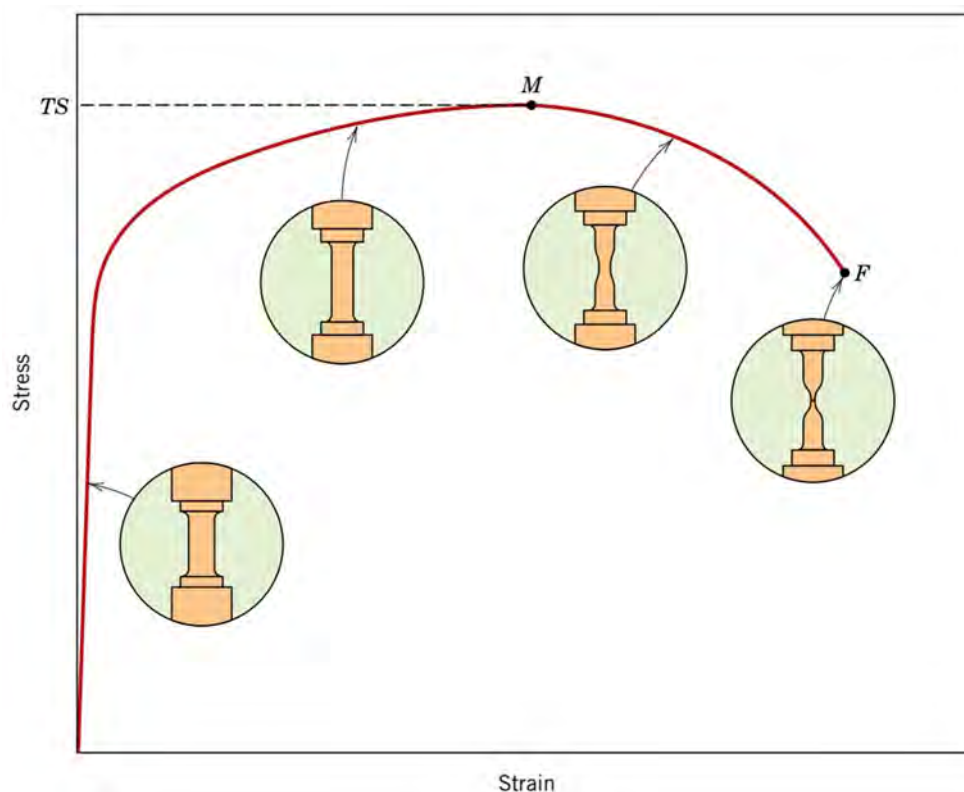


Figura 1.25. Curva típica tensión-deformación de ingeniería de un material dúctil hasta la fractura, punto F. La resistencia a la tracción TS se indica en el punto M.

Tomado de “Fundamentals of Materials Science and Engineering - An Integrated Approach”, por William D. Callister, David G. Rethwisch, 2015.

En el presente trabajo de investigación se seguirá los lineamientos establecidos en la norma ASTM E8/E8M - 22 (ASTM International, 2022) para realizar este ensayo.

### 1.4.3. Ensayo de doblado

El ensayo de doblado, también conocido como ensayo de flexión, se utiliza en la caracterización de materiales con el propósito de evaluar su resistencia y comportamiento cuando son sometidos a cargas de flexión.

En este ensayo, una muestra del material es sometida a una carga que genera un momento de flexión sobre ella. La muestra generalmente adopta la forma de una viga o barra rectangular y se coloca sobre dos puntos de apoyo separados por una distancia normalizada. Posteriormente, se aplica una fuerza en el centro de la muestra, la cual va aumentando gradualmente con el fin de inducir la flexión hasta que el material se doble por completo.

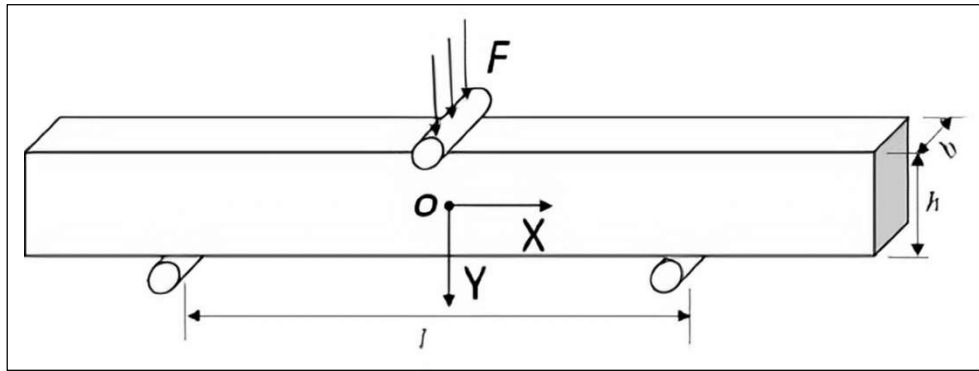


Figura 1.26. Esquema del ensayo de doblado en tres puntos

Tomado de [https://www.researchgate.net/figure/Scheme-of-three-point-bending-test\\_fig2\\_272168960](https://www.researchgate.net/figure/Scheme-of-three-point-bending-test_fig2_272168960)

Durante el ensayo, se registra tanto la carga aplicada como la deformación experimentada por la muestra a medida que se aplica el momento de flexión. Estos datos son analizados para obtener información sobre las propiedades mecánicas del material.

El ensayo de doblado proporciona diversos parámetros de importancia, entre ellos:

1. Resistencia a la flexión: es la máxima carga que la muestra puede soportar antes de fracturarse. Este valor indica la capacidad del material para resistir cargas de flexión sin sufrir daños irreversibles.
2. Deformación en el punto de rotura: se refiere a la cantidad de deformación que experimenta la muestra en el momento de su fractura. Esta medida puede indicar la ductilidad o fragilidad del material.
3. Rigidez: se determina a partir de la curva carga-deformación obtenida durante el ensayo. Representa la capacidad del material para resistir deformaciones elásticas bajo carga, es decir, su capacidad de mantener su forma original una vez que la carga se elimina.
4. Curva de flexión: muestra la relación entre la carga aplicada y la deformación resultante en la muestra durante el ensayo. Esta curva permite comprender el comportamiento del material frente a cargas de flexión y determinar si exhibe un comportamiento lineal o no lineal en función de la carga aplicada.

En el presente trabajo de investigación se seguirá los lineamientos establecidos en la norma ASTM E290-22 (ASTM International, 2022c) para realizar este ensayo.

#### 1.4.4. Ensayo de dureza Rockwell

Las pruebas de dureza estática por indentación, como Brinell, Rockwell, Vickers y Knoop, son ampliamente utilizadas para evaluar la dureza de los materiales. Estas pruebas se basan en aplicar una fuerza a un indentador para medir la resistencia del material a la penetración. La dureza se determina mediante la observación visual de la indentación o la medición de la profundidad o diámetro de esta, si el material es duro, se obtendrá una indentación relativamente pequeña o superficial, mientras que, si el material es blando, se obtendrá una indentación bastante grande o profunda. Estas pruebas se clasifican como macro o micro, dependiendo de la magnitud de la fuerza aplicada. También existen probadores de nanoindentación. Los probadores Rockwell y Brinell se encuentran en la categoría macro, mientras que los probadores Knoop se utilizan para pruebas de microindentación. Los probadores Vickers se emplean tanto en pruebas de macroindentación como de microindentación.

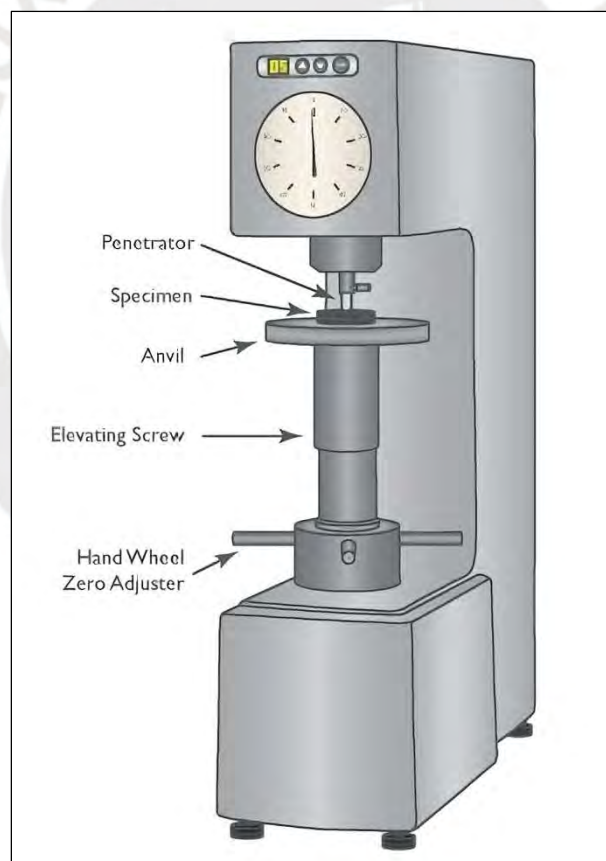


Figura 1.27. Durómetro de banco

Tomado de [https://ilovepaket.com/product\\_details/32845673.html](https://ilovepaket.com/product_details/32845673.html)

La dureza no es una propiedad fundamental de un material, pero se utiliza como herramienta de control de calidad. A partir de los valores de dureza, se pueden predecir

otras propiedades, como resistencia al desgaste, deformación plástica, módulo de elasticidad, límite elástico, ductilidad y tenacidad a la fractura. Existe una relación empírica entre la maquinabilidad y los valores de dureza, siendo 300-350 HB la dureza máxima tolerable para mecanizar aceros en producción. La dureza óptima para el mecanizado es de 180-200 HB (Kaufmann, 2012).

Para realizar el ensayo de dureza Rockwell del acero EN 10025-6 S690QL se empleará la norma ASTM E18-22 (ASTM International, 2022).

### 1.4.5. Metalografía

La metalografía es el estudio de la estructura microscópica de metales y aleaciones metálicas. Su historia se remonta a al menos 150 años, cuando se realizaron las primeras investigaciones científicas sobre el trabajo del metal. Cabe mencionar que la metalografía ha adquirido un papel central en los estudios metalúrgicos, con más de 20,000 referencias en la literatura científica que la mencionan como palabra clave.

El objetivo de la metalografía es examinar y comprender la estructura interna de un material metálico, incluyendo la disposición y distribución de los granos, las fases presentes, las inclusiones y las características microestructurales.



*Figura 1.28.* Observación de la microestructura mediante un microscopio óptico

Elaboración propia, tomada en el CITEmateriales PUCP

La preparación de muestras metalográficas ha evolucionado de un arte oscuro a una técnica científica precisa. El objetivo principal de esta preparación es obtener muestras representativas, libres de artefactos, es decir libre cualquier alteración, contaminación o distorsión que pueda afectar la observación y el análisis microestructural. La elección del procedimiento de preparación depende del sistema de aleación y del enfoque del estudio, que puede incluir la optimización de procesos, el control de calidad, el diseño de aleaciones, el análisis de deformación, el estudio de fallas y la ingeniería inversa.

La preparación de muestras metalográficas consta de dos etapas principales. En la primera etapa, se busca obtener una superficie plana y reflectante, con artefactos de menor escala que la microestructura. Esta etapa incluye el corte, el montaje (opcional), la abrasión mecánica y el pulido. La segunda etapa tiene como objetivo resaltar la microestructura, a través de técnicas como la disolución química selectiva o la formación de películas mediante ataques químicos. Los procedimientos discutidos en esta unidad también son aplicables a la preparación de composites de matriz metálica e intermetálica, así como a semiconductores, con pequeñas modificaciones adaptadas a las necesidades específicas (Kaufmann, 2012).

La metalografía proporciona información valiosa sobre las propiedades y el comportamiento del material, ya que la estructura microscópica puede influir en propiedades como la resistencia, la ductilidad, la dureza, la tenacidad y la resistencia a la corrosión. También ayuda a identificar defectos y problemas en la microestructura, como inclusiones no deseadas, segregación de elementos y cambios microestructurales debido a procesos de fabricación o tratamiento térmico.

El procedimiento para realizar la metalografía seguirá la norma ASTM E3-11 (ASTM International, 2017).

#### **1.4.6. Ensayo de impacto Charpy "V" Notch**

El ensayo de impacto Charpy es un método empírico ampliamente utilizado en la industria de los metales ferrosos y los plásticos. Se emplea debido a que ambos tipos de materiales presentan cambios en su comportamiento de fractura en relación con la temperatura. Este ensayo consiste en un péndulo con un martillo montado que puede moverse libremente y sin fricción. El martillo se suelta desde una altura específica, golpeando la muestra de prueba ubicada en una posición determinada según las indicaciones de la norma. En ese momento, la muestra se somete a una alta velocidad de deformación, lo que favorece la

fractura. Además, la muesca presente en el lateral de la barra de la muestra, sometida a carga de tracción, induce un estado de esfuerzo triaxial, lo cual también promueve la fractura. Por lo tanto, el ensayo de impacto implica una alta velocidad de deformación y un grado elevado de carga triaxial. Como resultado, representa una prueba rigurosa de la tenacidad de un material. La temperatura a la cual se realiza el ensayo puede variar, permitiendo así determinar la variación de la energía absorbida en la fractura por impacto en función de la temperatura.

Una vez que el martillo golpea y fractura la muestra, se eleva a una altura  $h'$  que es menor que la altura inicial  $h$ . La diferencia de energía potencial, representada por  $m \cdot g \cdot (h - h')$  como se muestra en la Figura 1.29, es la energía que se consume durante la fractura de la muestra. Esta energía incluye el trabajo plástico realizado antes de la fractura, así como el trabajo asociado con la formación y propagación de la grieta.

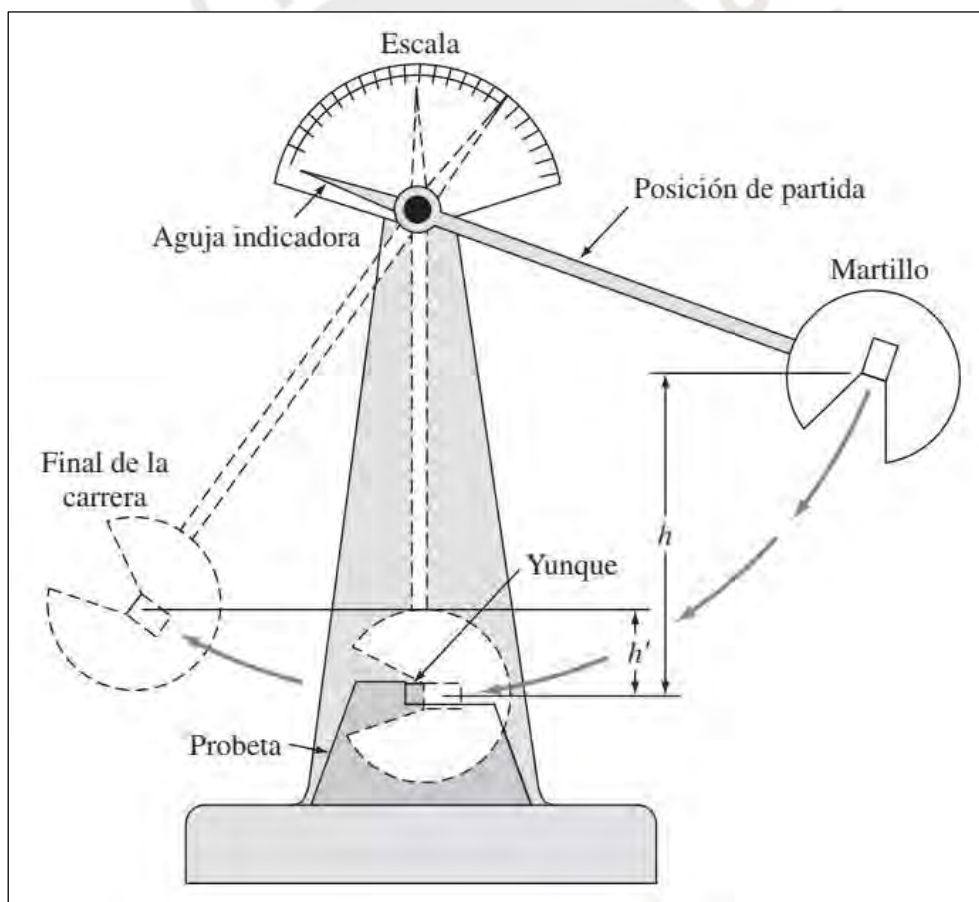


Figura 1.29. Esquema de un ensayo de impacto Charpy "V" Notch

Tomado de "Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales", por William F. Smith and Javad Hashemi, 2006

La inspección visual de la superficie de fractura en la muestra impactada puede proporcionar información valiosa. En el caso de los metales, la superficie puede presentar características fibrosas, lo que indica una fractura dúctil, o puede ser brillante y "cristalina", lo cual es evidencia de un frágil. En algunos materiales, especialmente aquellos que experimentan cambios en su modo de fractura con la temperatura, la superficie puede mostrar una combinación de características fibrosas y de clivaje. La región de clivaje se encuentra en el centro de la muestra y está rodeada en su periferia por una región de fractura fibrosa. El porcentaje de fractura fibrosa aumenta a medida que se incrementa la temperatura de prueba, como se ilustra en la Figura 1.30 (Courtney, 2005).

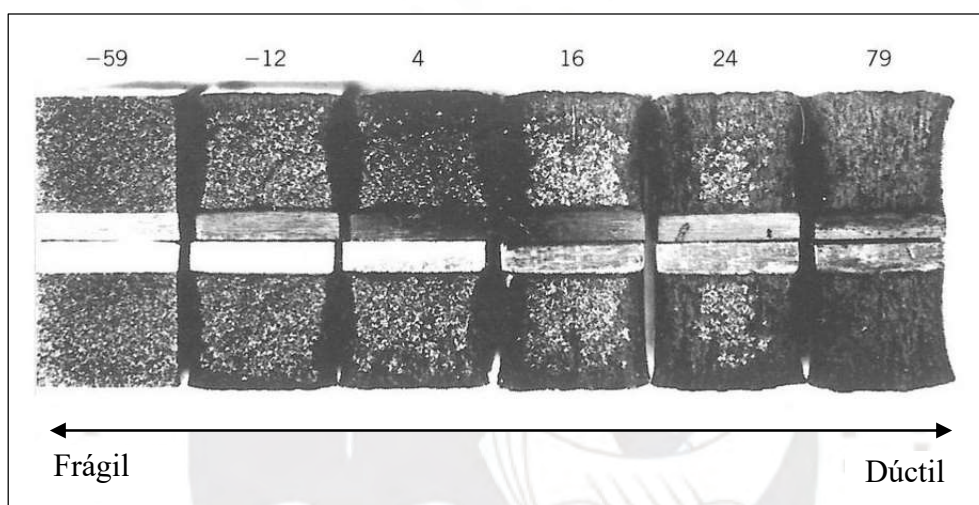


Figura 1.30. Variación del aspecto de la superficie de fractura en el ensayo Charpy "V" Notch

Adaptado de <https://slideplayer.es/slide/12100612/>

En el presente trabajo de investigación se seguirá los lineamientos establecidos en la norma ASTM E23-23a (ASTM International, 2023) para realizar este ensayo de impacto.

### **Expansión lateral de las muestras ensayadas**

Es un fenómeno observado en las probetas luego de haber realizado ya sea el ensayo de impacto instrumentado o el ensayo Charly convencional. La expansión lateral se refiere al aumento en la anchura en dirección perpendicular a la carga aplicada durante el impacto y se mide empleando un medidor de expansión lateral (ver Figura 1.31). Este fenómeno es consecuencia directa de las fuerzas y energía liberadas durante el impacto.

A medida que la carga de impacto se aplica a la muestra, el material experimenta deformaciones plásticas y se produce una propagación de grietas. Estas deformaciones y

la fractura generan ondas de tensión que se propagan a través del material, lo que resulta en la expansión lateral de la probeta.

Resulta importante la medición y registro de la expansión lateral, ya que proporciona información adicional sobre el comportamiento del material durante el ensayo de impacto. La expansión lateral puede variar dependiendo de las propiedades del material, como su ductilidad y resistencia. Materiales más dúctiles tienden a experimentar una mayor expansión lateral debido a la deformación plástica que ocurre antes de la fractura, mientras que materiales más frágiles pueden mostrar una expansión lateral mínima.

La magnitud y el patrón de la expansión lateral pueden ser indicativos del grado de deformación plástica y de la propagación de grietas dentro del material. Por ejemplo, una expansión lateral más uniforme puede sugerir una mayor capacidad de deformación plástica antes de la fractura, lo que indica una mayor tenacidad y resistencia al impacto del material. Por otro lado, una expansión lateral localizada o asimétrica puede indicar una fractura frágil y una menor resistencia al impacto (Meyers M. A. & Chawla K. K., 2009).



Figura 1.31. Medidor de expansión lateral para probetas de impacto

Tomado de <https://www.instron.com/en/products/testing-accessories/load-frame-accessories/impact-testing/mpx-and-si-series/charpy/w-3561>

## 1.5. Ensayo de impacto instrumentado

Este ensayo permite conocer el comportamiento mecánico de un material sometido a cargas de impacto y nos brinda información detallada esto es posible gracias a la variedad

de sensores y transductores que registran parámetros clave como la fuerza aplicada, la deformación experimentada por la muestra y la velocidad de impacto. Estos datos se utilizan para calcular la energía absorbida por la muestra durante el impacto, lo cual es un indicador importante de la resistencia al impacto del material. Además, se obtienen otros resultados significativos, como la ductilidad, la tenacidad y el tipo de fractura, que permiten evaluar la capacidad del material para deformarse plásticamente y resistir la propagación de grietas bajo condiciones de impacto.



*Figura 1.32.* Péndulo para ensayo de impacto instrumentado marca ZwickRoell

Elaboración propia, tomada en el CITEmateriales PUCP

### **1.5.1. Parámetros de medición en el ensayo de impacto instrumentado**

A diferencia del ensayo Charpy "V" notch, que únicamente nos proporciona el valor de la energía absorbida, el ensayo de impacto instrumentado nos brinda la variación de la carga aplicada en función del tiempo, representada en una curva fuerza-tiempo. Esta curva se obtiene registrando la señal de una celda de carga en el péndulo mediante un

osciloscopio y, a partir de ella, se genera la curva fuerza-desplazamiento. Esta última puede proporcionar datos relevantes, tales como la carga en el límite elástico, la carga máxima soportada por la muestra, la carga en la fractura, etc. La energía absorbida en el impacto se obtiene mediante la integración de la curva fuerza-desplazamiento. A partir de esta curva, se puede obtener la energía de fractura si se conoce la velocidad del péndulo (Meyers M. A. & Chawla K. K., 2009).

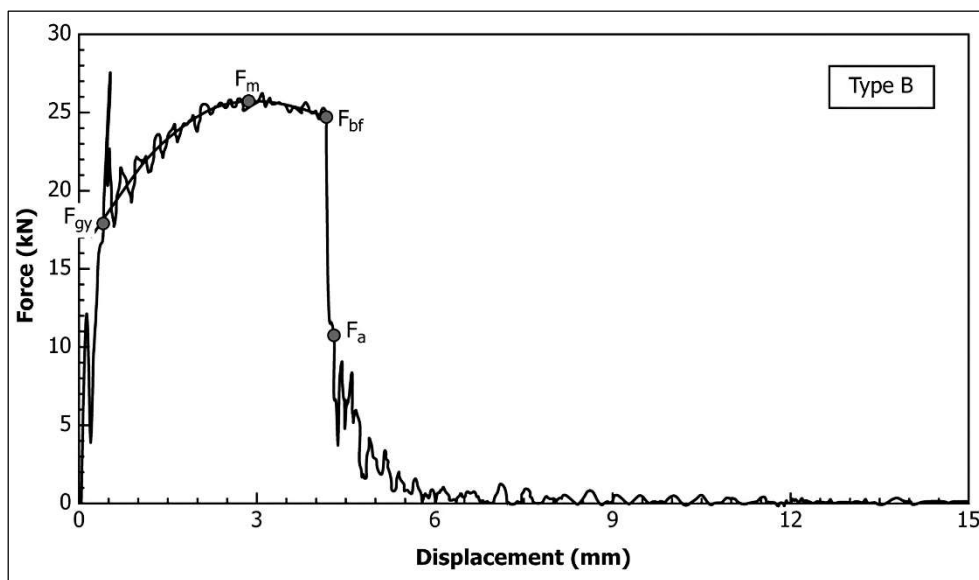


Figura 1.33. Gráfica típica del ensayo de impacto instrumentado

Tomado de la norma “ASTM E2298 – 18”, por ASTM, 2018

En la Figura 1.33 se pueden observar ciertos valores característicos de fuerza de una gráfica Tipo B según la norma ASTM E2298-18, como la fuerza de fluencia general ( $F_{gy}$ ), la cual representa la fuerza en el punto de transición desde la parte inicial lineal elástica (descartando los picos de inercia) hasta la parte curva creciente de la curva de fuerza-desplazamiento. Como una primera aproximación, sirve como una indicación preliminar de la resistencia a la deformación en todo el ligamento.

La fuerza máxima  $F_m$  corresponde al valor máximo de la curva ajustada a través de las oscilaciones de la curva de fuerza-desplazamiento después del inicio de la fluencia.

La fuerza en el inicio de la propagación inestable (fractura frágil) de la grieta  $F_{bf}$  es la fuerza al comienzo de la caída abrupta en la curva de fuerza-desplazamiento. Esto caracteriza el inicio de la propagación inestable de la grieta. La fuerza al final de la propagación inestable de la grieta es  $F_a$ .

Las fuerzas definidas anteriormente tienen desplazamientos correspondientes que reciben los mismos subíndices que las fuerzas. Tal cual lo veremos a continuación:

1. El desplazamiento en el inicio de la cedencia general del ligamento se denota como  $s_{gy}$ . Este punto marca el comienzo de la deformación plástica del material.
2. El desplazamiento en la fuerza máxima se representa como  $s_m$ . Este valor indica el desplazamiento correspondiente a la máxima resistencia del material antes de cualquier disminución significativa de la fuerza.
3. El desplazamiento en el inicio de la propagación inestable de la grieta se identifica como  $s_{bf}$ . Este punto marca el inicio de la fractura inestable (frágil) y la propagación de la grieta.
4. El desplazamiento en el final de la propagación inestable de la grieta se denomina  $s_a$ . Por lo general, se aproxima a  $s_{bf}$  debido a la caída abrupta en la curva de fuerza-desplazamiento entre la fuerza máxima ( $F_{bf}$ ) y el desplazamiento final de la grieta ( $F_a$ ).
5. El desplazamiento al final de la curva de fuerza-desplazamiento se representa como  $s_t$ . Este punto se define como el desplazamiento en el cual la fuerza ha disminuido hasta el valor de línea base previo al ensayo, marcando el final del comportamiento elástico del material.

Se puede dividir la curva de fuerza-desplazamiento para determinar las correspondientes energías absorbidas instrumentadas parciales. Estas energías parciales reciben el mismo subíndice que la fuerza al final de la parte correspondiente de la curva.

La energía absorbida total, abreviada como  $W_t$ , se calcula como el área bajo la curva completa de fuerza-desplazamiento hasta un punto dado,  $s_t$ .

Además, se definen tres energías absorbidas parciales específicas:

1. La energía absorbida instrumentada parcial hasta la fuerza máxima se denota como  $W_m$ .
2. La energía absorbida instrumentada parcial hasta la fuerza en el inicio de la propagación inestable de la grieta se representa como  $W_{bf}$ .
3. La energía absorbida instrumentada parcial hasta la fuerza en el arresto de la propagación inestable de la grieta se indica como  $W_a$ .

Es importante mencionar que debido a la caída abrupta en la curva de fuerza-desplazamiento entre la fuerza en el inicio de la propagación inestable de la grieta ( $F_{bf}$ ) y la fuerza en el arresto de la propagación inestable de la grieta ( $F_a$ ), generalmente se cumple que  $W_{bf}$  es aproximadamente igual a  $W_a$ .

La norma ASTM E2298-18 establece curvas de fuerza-desplazamiento representativas de varios tipos según su morfología. A continuación, se presentarán y explicarán estas curvas.

### Tipo A (fractura frágil)

En este tipo de curvas, generalmente solo ocurre la propagación de grietas inestables (fractura frágil). Se observa que la fuerza máxima  $F_m$  es igual a la fuerza en el inicio de la propagación inestable (fractura frágil) de la grieta  $F_{bf}$  y se considera como el mismo punto.

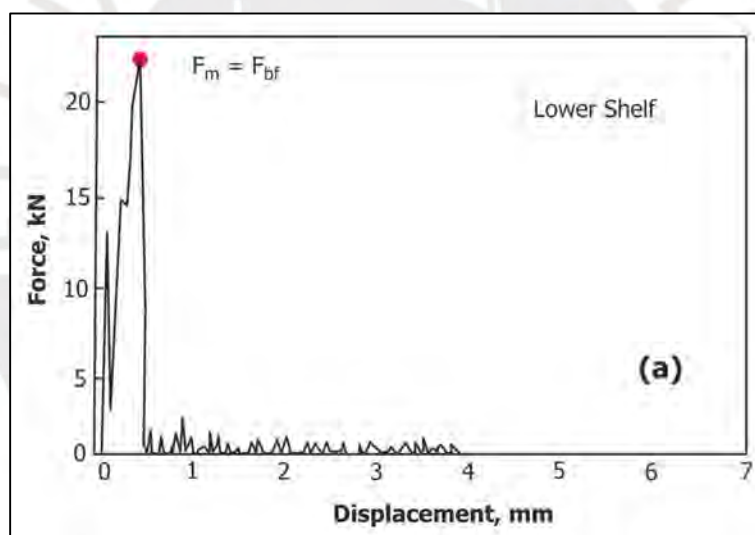


Figura 1.34. Curva representativa fuerza-desplazamiento Tipo A

Tomado de la norma “ASTM E23-23a”, por ASTM, 2023

Las curvas de fuerza-desplazamiento que tiene esta morfología Tipo A se consideran 0% dúctil.

### Tipo B (fractura de modo mixto)

En este tipo de curvas, existe la propagación de grietas tanto estable como inestable en distintas magnitudes, ya que la temperatura del ensayo se sitúa dentro del rango de transición del material.

La fractura comienza en la raíz de la entalla a través de un rasgado fibroso. A corta distancia de la entalla, la grieta se propaga de manera inestable y rápida ( $F_{bf}$ ) mientras el mecanismo de fractura cambia a clivaje o a un modo mixto, lo que produce marcas radiales características en la parte central de la muestra. Tras unos microsegundos, la propagación inestable de la grieta se detiene ( $F_a$ ). La fractura concluye de manera estable en el ligamento restante y en los lados de la muestra. Es relevante señalar que, durante la formación de los bordes de cizallamiento a los lados de la probeta, la bisagra plástica en el ligamento restante se rompe.

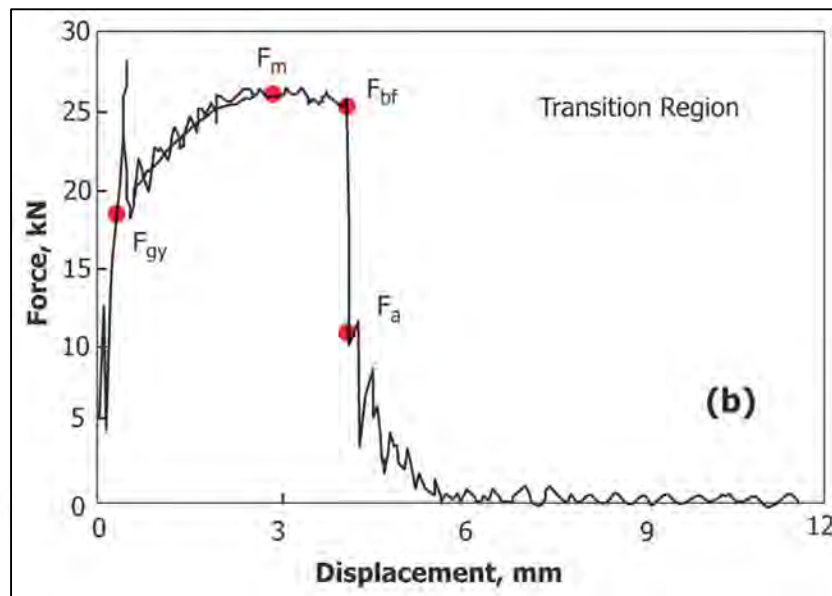


Figura 1.35. Curva representativa fuerza-desplazamiento Tipo B

Tomado de la norma “ASTM E23-23a”, por ASTM, 2023

Para determinar el porcentaje de ductilidad (SFA, ductile fracture surface) se usan las expresiones que aparecen en la Figura 1.36.

$$SFA = \left[ 1 - \frac{F_{bf} - F_a}{F_m} \right] \times 100$$

$$SFA = \left[ 1 - \frac{F_{bf} - F_a}{F_m + (F_m - F_{gy})} \right] \times 100$$

$$SFA = \left[ 1 - \frac{F_{bf} - F_a}{F_m + k(F_m - F_{gy})} \right] \times 100 \quad \text{with } k \approx 0.5$$

$$SFA = \left[ 1 - \sqrt{\frac{F_{gy} + 2}{F_m}} \times \left( \sqrt{\frac{F_{bf}}{F_m}} - \sqrt{\frac{F_a}{F_m}} \right) \right] \times 100$$

Figura 1.36. Ecuaciones para estimar el porcentaje de ductilidad a partir de las fuerzas características

Tomado de la norma “ASTM E23-23a”, por ASTM, 2023

## Tipo C (fractura dúctil)

En este tipo de curvas, solo existe la propagación de grietas estables (fractura dúctil).

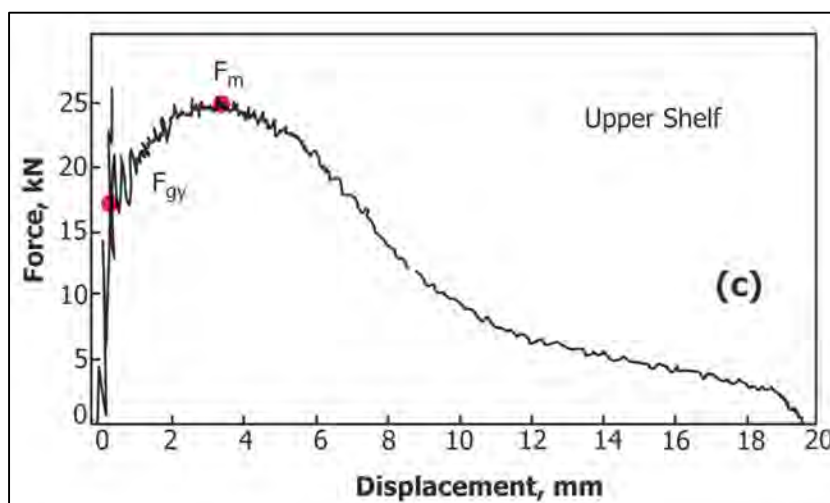


Figura 1.37. Curva representativa fuerza-desplazamiento Tipo C

Tomado de la norma “ASTM E23-23a”, por ASTM, 2023

En este tipo de curvas no ocurre una caída pronunciada de la fuerza lo indica que la proporción dúctil de la superficie de fractura asciende al 100 % del total de la superficie de fractura.

Cabe señalar que la norma menciona que en el caso en el que una muestra no se separe en dos mitades durante la prueba de impacto y la fractura ocurra sin evidencia de propagación inestable de la grieta, la fractura se considera 100% dúctil y se debe reportar como no roto.

### 1.5.2. Aplicaciones y limitaciones del ensayo de impacto instrumentado

El ensayo de impacto instrumentado tiene una amplia gama de aplicaciones en la caracterización de materiales y desempeña un papel fundamental en numerosas industrias. Sin embargo, también presenta ciertas limitaciones que es importante tener en cuenta al interpretar los resultados.

Una de las áreas principales donde se utiliza este ensayo es en la evaluación de materiales para aplicaciones estructurales, en la industria automotriz, aeroespacial y de construcción. Permite evaluar la resistencia al impacto de los materiales utilizados en componentes críticos, como carrocerías de automóviles, alas de aviones y estructuras de edificios.

Además, se utiliza en la investigación y desarrollo de nuevos materiales o en la mejora de los existentes. Permite evaluar cómo diferentes procesos de fabricación, tratamientos térmicos o aditivos afectan la resistencia al impacto y el comportamiento de los materiales bajo cargas dinámicas. Esto ayuda a los ingenieros y científicos a optimizar las propiedades de los materiales y a diseñar productos más seguros y duraderos.

El ensayo de impacto instrumentado también presenta ciertas limitaciones que deben tenerse en cuenta. Una limitación importante es que los resultados del ensayo representan una condición específica de impacto y pueden no ser directamente extrapolables a todas las situaciones reales. Las cargas de impacto pueden variar en términos de magnitud, velocidad y dirección (modificando la probeta), sin embargo, el ensayo no abarca todas las posibles condiciones de carga que un material puede experimentar en el mundo real.

Otra limitación del ensayo de impacto instrumentado es que no tiene en cuenta aspectos microestructurales y de defectos internos del material, que pueden tener un impacto significativo en su resistencia al impacto. Es posible que dos materiales con resultados similares en el ensayo de impacto instrumentado presenten comportamientos diferentes debido a diferencias en su microestructura y defectos internos.

Pese a estas limitaciones, el ensayo de impacto instrumentado sigue siendo una herramienta valiosa en la caracterización de materiales y en la evaluación de su resistencia al impacto. Al utilizarlo en conjunto con otros ensayos y considerando las condiciones específicas de aplicación, se pueden obtener resultados más completos y significativos.

### **1.5.3. Normativa**

Para la realización de este ensayo, existen diversas normas, entre las que destacan la norma ISO 14556:2013 y la norma ASTM E2298-18. En este caso, se empleará la norma ASTM E2298-18 (ASTM International, 2018) debido a su facilidad de aplicación, disponibilidad y al hecho de que la máquina utilizada en el laboratorio para llevar a cabo este ensayo cumple con los requisitos establecidos por la norma ASTM.

## CAPÍTULO 2

### 2. MÉTODOS EXPERIMENTALES

#### 2.1. Caracterización del material

Es fundamental realizar una completa caracterización del material utilizado en el estudio. Con el fin de conocer información detallada sobre sus propiedades físicas y mecánicas, lo cual resultara esencial para comprender su comportamiento y desempeño en diferentes condiciones.

La caracterización del material se lleva a cabo a través de una serie de técnicas y ensayos específicos, mediante los cuales obtendremos datos cuantitativos y cualitativos sobre sus propiedades. Estos datos serán de vital importancia para la correcta interpretación de los resultados experimentales.

A continuación, se presentarán las técnicas y ensayos empleados para la caracterización del material EN 10025-6 S690QL:

##### 2.1.1. Análisis químico

###### Descripción

El análisis químico es una técnica utilizada para determinar la composición química de un material. Se basa en una variedad de métodos y técnicas que permiten identificar y cuantificar los elementos y compuestos presentes en una muestra. Estos métodos pueden ser cualitativos, para determinar la presencia o ausencia de ciertos componentes, o cuantitativos, para medir la cantidad exacta de cada componente.

###### Objeto

El objetivo de este análisis es determinar con precisión la composición química para verificar el cumplimiento de los valores indicados en la norma EN 10025-6. Esto implica identificar los elementos de aleación presentes en el material, así como cuantificar su cantidad.

## Probeta

La muestra para realizar este análisis fue mecanizada a partir de una plancha de acero EN 10025-6 S690QL de  $\frac{1}{2}$ " de espesor. En la Figura 2.1 se muestra el plano empleado para su mecanizado.

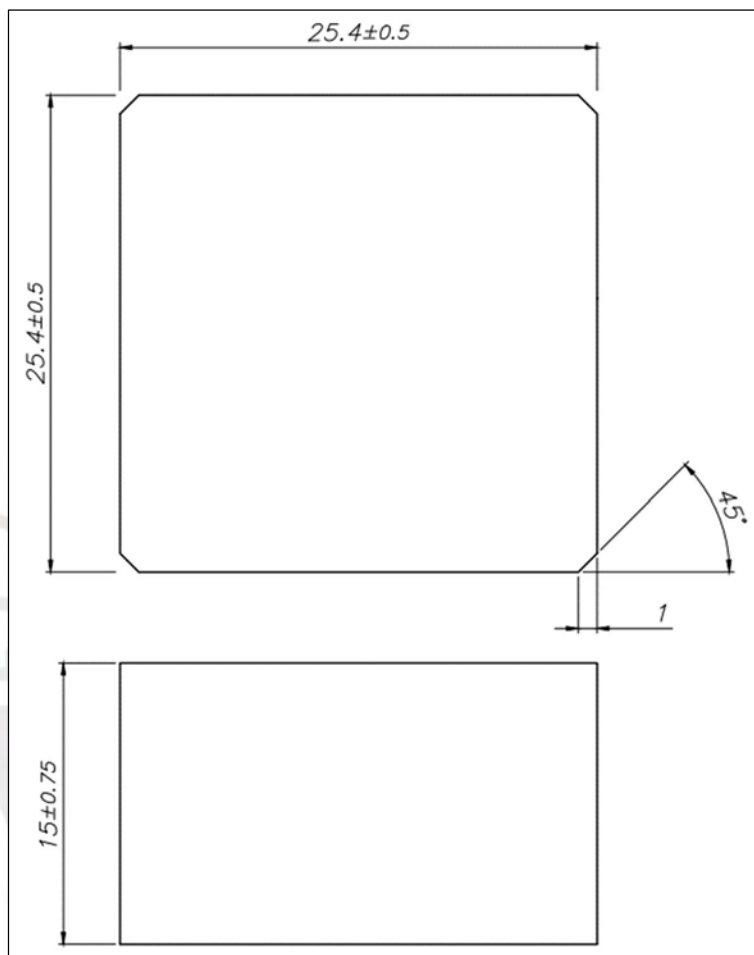


Figura 2.1. Plano de la probeta para el análisis químico

Elaboración propia

## Procedimiento

Para realizar el ensayo de tracción se siguieron los siguientes pasos:

1. Extraer la muestra mediante corte empleando la cortadora Lobotom marca LECO SX-100M, verificando la eliminación de cualquier contaminante que pueda alterar los resultados.



*Figura 2.2.* Muestra preparada para análisis químico

Elaboración propia

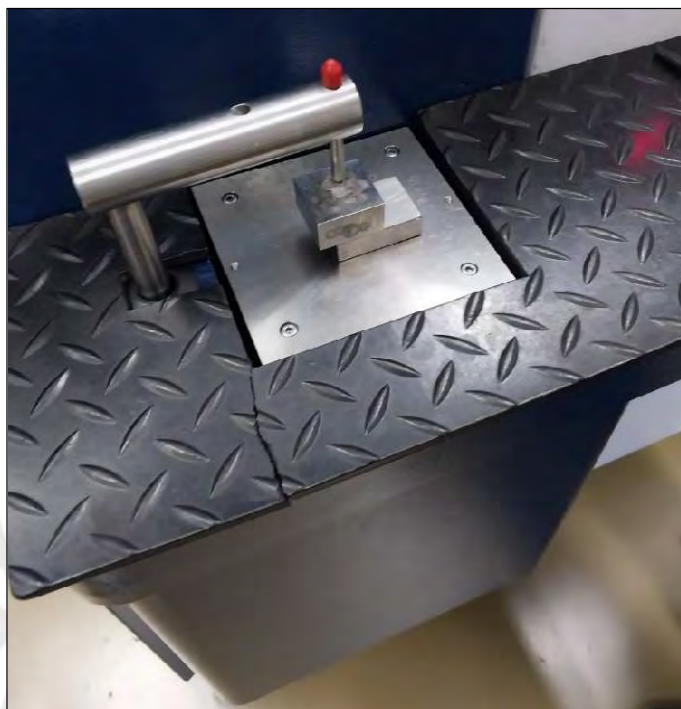
2. Calibrar el equipo analizador químico de metales marca Bruker Magellan Q8 y seleccionar el patrón de referencia adecuado al tipo de metal.



*Figura 2.3.* Analizador químico de metales marca Bruker Magellan Q8

Elaboración propia

3. Chispear en la superficie de la muestra para excitar los átomos y obtener la emisión de las líneas espectrales. Limpiar la muestra luego de cada chispazo y cambia de lugar el chispero.



*Figura 2.4.* Chispero posicionado sobre la muestra

Elaboración propia

4. Luego de haber realizado todas las tomas, eliminar alguna toma que se aleje mucho del resto de valores recabados.
5. Imprimir resultados obtenidos luego del análisis químico.

### **Criterio de aceptación**

Los resultados del análisis químico deben cumplir con los requisitos de la Tabla 1, que indica el porcentaje máximo de los elementos de aleación según los grados contemplados en la norma EN 10025-6.

### **2.1.2. Ensayo de tracción**

#### **Descripción**

El ensayo de tracción es una técnica utilizada para evaluar las propiedades mecánicas de un material al someterlo a fuerzas de tracción. Consiste en aplicar una carga gradual y continua a una muestra de material hasta que se produce su ruptura. Durante el ensayo, se registran y analizan la fuerza aplicada y la deformación resultante, lo que permite

determinar parámetros importantes como la resistencia a la tracción, el límite elástico y la ductilidad del material.

## Objeto

El objetivo del ensayo de tracción es obtener las propiedades mecánicas e información sobre su comportamiento frente a fuerzas de tracción para su posterior verificación con los valores establecidos en la norma EN 10025-6.

## Probeta

La muestra para realizar este ensayo fue mecanizada a partir de una plancha de acero EN 10025-6 S690QL de  $\frac{1}{2}$ " de espesor. En la Figura 2.5 se muestra el plano empleado para su mecanizado.

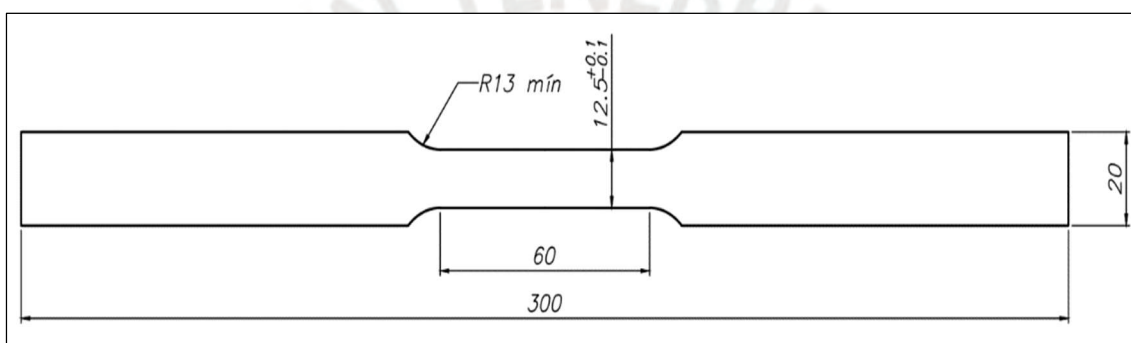


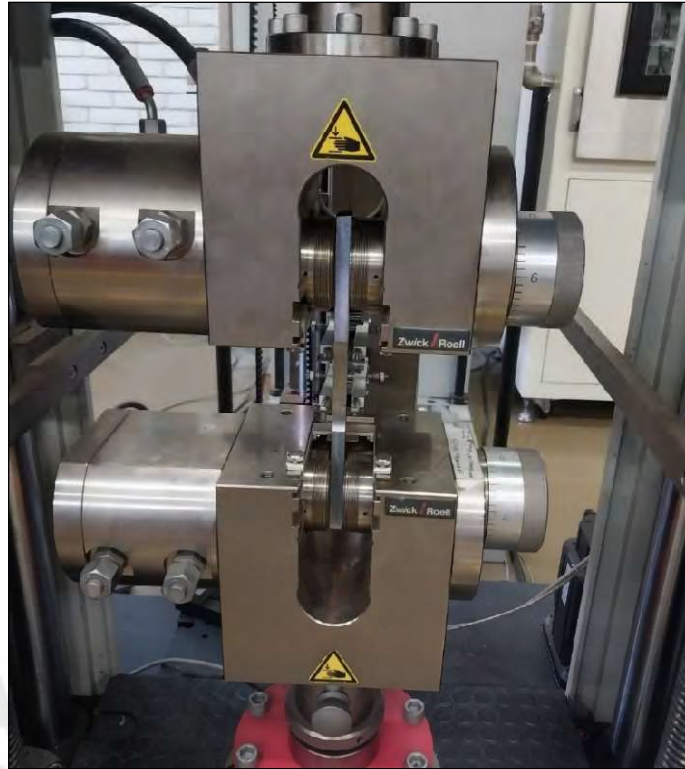
Figura 2.5. Plano de la probeta para ensayo de tracción

Elaboración propia

## Procedimiento

Para llevar a cabo el ensayo de tracción se siguieron los siguientes pasos:

1. Verificar que las dimensiones de las probetas mecanizadas concuerden con el plano proporcionado para su mecanizado.
2. Marcar la longitud calibrada de la probeta, en este caso, 50 mm.
3. Medir las dimensiones de la sección reducida de la probeta (ancho y espesor).
4. Sujetar la probeta firmemente con las mordazas de la máquina de ensayo y posicionar las pinzas del extensómetro.



*Figura 2.6.* Probeta sujeta con extensómetro colocado

Elaboración propia

5. Verificar la correcta posición de las pinzas del extensómetro en la probeta.
6. Iniciar el ensayo aplicando una velocidad de deformación constante.
7. Al finalizar el ensayo, tomar nota de los valores proporcionados por la máquina, como el esfuerzo de fluencia, el esfuerzo máximo y el alargamiento.
8. Calcular el esfuerzo de fluencia, el esfuerzo máximo y el alargamiento de acuerdo con los valores registrados.

Estos pasos permiten llevar a cabo el ensayo de tracción de manera sistemática y obtener información relevante sobre las propiedades mecánicas del material.

### **Criterio de aceptación**

Los resultados obtenidos en este ensayo deben verificarse con los valores indicados en la Tabla 2 que establecen los valores mínimos de límite elástico, resistencia a la tracción y porcentaje mínimo de alargamiento después de la rotura de acuerdo con su designación según la norma EN 10025-6.

### 2.1.3. Ensayo de doblado

#### Descripción

El ensayo de doblado es una técnica utilizada para evaluar la ductilidad y la flexibilidad de un material al someterlo a una fuerza aplicada que induce una deformación plástica en forma de doblez. Durante el ensayo, una muestra del material se somete a una carga de flexión hasta que se produce una deformación permanente en forma de curvatura.

Los resultados del ensayo de doblado se analizan para determinar si el material cumple con los estándares de calidad y las especificaciones requeridas. Entre los parámetros evaluados se encuentran el radio de doblado, la carga máxima soportada antes de la fractura y el ángulo de flexión máximo alcanzado.

#### Objeto

El objetivo del ensayo de doblado es obtener información sobre la ductilidad y sobre su capacidad para soportar deformaciones plásticas para su posterior verificación con los requisitos establecidos en la norma EN 10025-6.

#### Probeta

La muestra utilizada para llevar a cabo este ensayo fue mecanizada a partir de una plancha de acero EN 10025-6 S690QL con un espesor de  $\frac{1}{2}$ ". En la Figura 2.7 se muestra el plano de la probeta, junto con sus dimensiones correspondientes para el proceso de mecanizado.

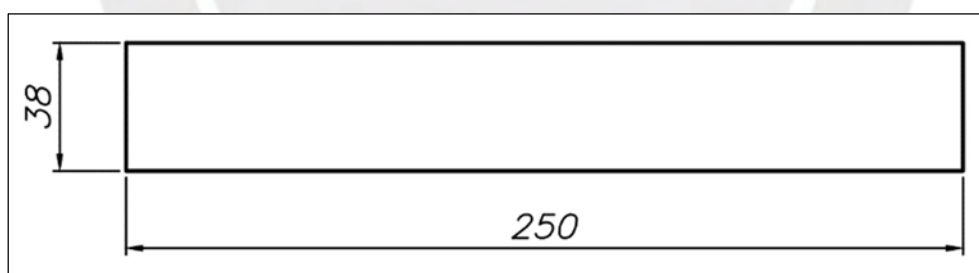


Figura 2.7. Plano de la probeta para ensayo de doblado

Elaboración propia

#### Procedimiento

Para realizar el ensayo de doblado se siguieron los siguientes pasos:

1. Seleccionar el diámetro de los pines de doblado de acuerdo con la norma del material (EN 10025-6).

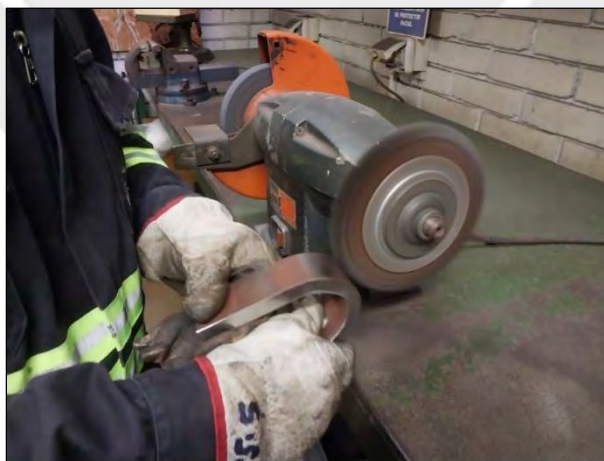
2. Realizar el ajuste y configuración de la máquina de ensayo, estableciendo la longitud entre apoyos y asegurándose de dejar una holgura de 1/8" de acuerdo con la norma ASTM E290-22.



*Figura 2.8.* Ajuste de la longitud entre apoyos con una holgura adecuada.

Elaboración propia

3. Proceder al doblado de la probeta utilizando la máquina de ensayo.
4. Cepillar cuidadosamente la superficie exterior de la zona de doblado para eliminar el óxido superficial.



*Figura 2.9.* Cepillado de la superficie exterior

Elaboración propia

5. Inspeccionar visualmente la superficie exterior de la zona de doblado en busca de fisuras u otras discontinuidades que puedan afectar la integridad del material.

## **Criterio de aceptación**

Después de ensayar las probetas transversales y longitudinales con los valores mínimos del radio de curvatura interior según la designación del material especificada en la norma EN 10025-6 (Tabla 5), no debe aparecer ninguna discontinuidad en la superficie exterior de la zona de flexión.

### **2.1.4. Ensayo de dureza Rockwell**

#### **Descripción**

El ensayo de dureza Rockwell es una técnica de caracterización de materiales ampliamente utilizada para evaluar la resistencia de un material a la penetración o indentación. Se emplea para determinar la dureza relativa de diversos materiales, incluyendo metales, plásticos, cerámicas y otros materiales sólidos. En este ensayo, se aplica una carga inicial (precarga de 10 kg) y luego la carga principal que dependerá de la escala empleada, y se mide la profundidad de penetración resultante para determinar la dureza del material.

Se diferencia de otros ensayos de dureza por su método de medición, que se basa en la profundidad de la indentación en lugar del diámetro. Esto permite una mayor precisión y reproducibilidad en los resultados.

#### **Objeto**

El objetivo del ensayo de dureza es obtener una medida cuantitativa de su resistencia a la deformación plástica y su capacidad para resistir la penetración. Este ensayo proporciona información relevante acerca de la dureza relativa del material en la escala Rockwell, la cual debe ser verificada con el valor calculado a partir del ensayo de tracción.

#### **Probeta**

Se empleará la misma probeta empleada en el análisis químico.

#### **Procedimiento**

El procedimiento empleado para realizar el ensayo de dureza Rockwell C es el siguiente:

1. Seleccionar de la escala Rockwell C en el equipo de ensayo luego configurar la escala específica de penetración y carga.
2. Colocar la muestra en el equipo de ensayo.



Figura 2.10. Muestra lista para ensayar

Elaboración propia

3. Verificar la calibración de la maquina utilizando un patrón de referencia y comparándolas con dos indentaciones.
4. Realizar cinco mediciones en áreas diferentes de la muestra.
5. Descartar la medida más alta y la más baja, luego calcular el promedio de las tres mediciones restantes.

### **Criterio de aceptación**

Los resultados obtenidos en este ensayo no deben ser mayores a 22,18, este valor fue calculado a partir del esfuerzo máximo puesto que se relaciona de manera indirecta con la dureza Brinell mediante la siguiente formula (BILTRA, 2020):

$$HB \sim 3 * \sigma_{m\acute{a}x}$$

Donde:

- $HB$  es la dureza Brinell
- $\sigma_{m\acute{a}x}$  es el esfuerzo a la tracción o resistencia a la tracción (en  $\text{kgf}/\text{mm}^2$ )

Considerando que  $\sigma_{m\acute{a}x}$  tiene un valor de 777,6 MPa lo cual equivale a 79,3  $\text{kgf}/\text{mm}^2$  por lo que  $HB$  es 237,9 el cual a su vez es equivalente a 22,18  $HRC$  (dureza Rockwell C).

## 2.1.5. Metalografía

### Descripción

La metalografía es una técnica de caracterización de materiales que se utiliza para estudiar la estructura interna de los metales y las aleaciones. Consiste en la preparación de muestras metalográficas, su observación bajo un microscopio óptico o electrónico y el análisis de las características microestructurales presentes.

### Objeto

El objetivo de la metalografía en la caracterización del material es revelar y analizar la estructura interna del mismo, lo cual implica examinar la distribución de fases, las inclusiones, las características del grano y posibles imperfecciones. A través de este análisis, podremos verificar los tratamientos térmicos a los que el material fue sometido antes de su suministro.

### Probeta

La muestra para realizar este ensayo fue mecanizada a partir de una plancha de acero EN 10025-6 S690QL de  $\frac{1}{2}$ " de espesor. En la Figura 2.11 se muestra el plano empleado en el proceso mecanizado de la probeta.



Figura 2.11. Plano para probeta de metalografía

Elaboración propia

## Procedimiento

Para realizar la metalografía se deben seguir los siguientes pasos:

1. Extraer la muestra de metalografía mediante corte empleando la cortadora Lobotom marca LECO SX-100M.



*Figura 2.12.* Corte para la extracción de la muestra

Elaboración propia

2. Briquetear las muestras longitudinal y transversal extraídas utilizando la prensa briquetas con resina epoxica marca LECO LUCITE POWDER.



Figura 2.13. Prensa de briquetas empleada

Elaboración propia

3. Desbastar las muestras empleando diferentes lijas hasta obtener una superficie pulida.

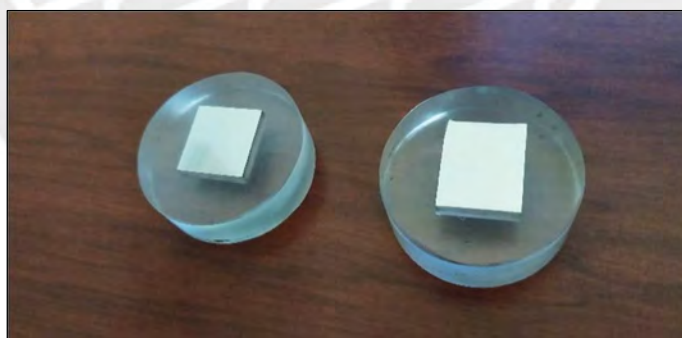


Figura 2.14. Muestras desbastadas

Elaboración propia

4. Pulir la superficie con lija de diamante de  $6\ \mu\text{m}$  en la pulidora marca Struers LaboPol-25 hasta que no se observen líneas en la superficie.
5. Repetir el procedimiento anterior utilizando un diamante de  $1\ \mu\text{m}$  para lograr una superficie completamente pulida.

6. Observar la muestra al microscopio en búsqueda de inclusiones u otras características relevantes.



*Figura 2.15.* Muestra analizada al microscopio

Elaboración propia

7. Realizar un ataque químico utilizando Nital al 2% durante 20 segundos para revelar la microestructura del material.
8. Observar la muestra al microscopio al 100X, 500X y 1000X para obtener una visualización más detallada.

### **Criterio de aceptación**

Los resultados obtenidos en la metalografía deben evidenciar que el material fue sometido a los tratamientos térmicos de templeado y revenido.

#### **2.1.6. Ensayo de impacto Charpy “V” Notch**

##### **Descripción**

El ensayo de impacto Charpy es una técnica utilizada para evaluar la tenacidad y la resistencia al impacto de un material a través de la aplicación de una carga de impacto de alta energía. Consiste en sujetar una muestra en forma de viga y con entalla en V en una máquina de ensayo de impacto, llamada máquina Charpy, y aplicar un golpe de impacto soltando el martillo oscilante desde una altura predeterminada. La energía absorbida durante la fractura de la muestra se registra y se utiliza para evaluar la capacidad del material para resistir el impacto.

## Objeto

El objetivo del ensayo de impacto Charpy "V" Notch consiste en determinar su resistencia al impacto y su comportamiento ante situaciones de carga súbita para su posterior verificación con los valores mínimos establecidos en la norma EN 10025-6.

## Probeta

La muestra utilizada para llevar a cabo este ensayo fue mecanizada a partir de una plancha de acero EN 10025-6 S690QL con un espesor de  $\frac{1}{2}$ ". En la Figura 2.16 se muestra el plano utilizado para el mecanizado, en el cual se pueden observar las tolerancias dimensionales y geométricas, así como el detalle A en la zona de la entalla.

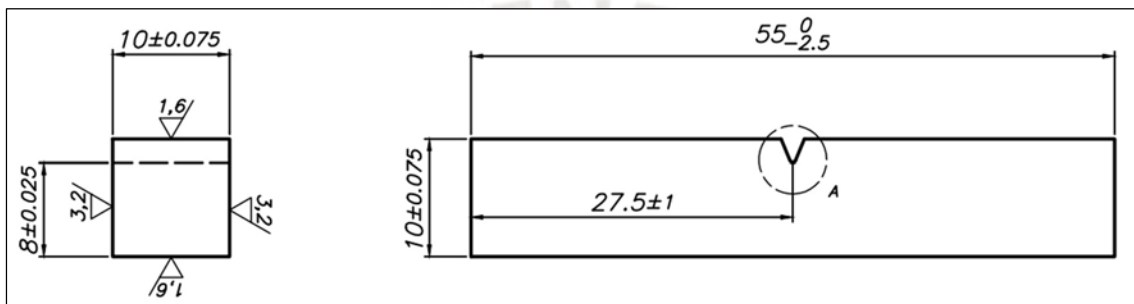


Figura 2.16. Plano de probeta para ensayo de impacto Charpy "V" Notch

Elaboración propia

## Procedimiento

Para realizar el ensayo de impacto Charpy, se deben seguir los siguientes pasos:

1. Mecanizar la entalla con la brochadora charpy marca BLACKS CHARPY



*Figura 2.17.* Brochadora charpy empleada

Elaboración propia

2. Verificar el correcto funcionamiento de la máquina de ensayo, asegurándose de que esté calibrada y en condiciones óptimas.
3. Verificar el aspecto y la calidad de la entalla haciendo uso del proyector de perfiles marca ZwickRoell notch vision.



*Figura 2.18.* Proyector de perfiles empleado marca ZwickRoell

Elaboración propia

4. Introducir las probetas en la cámara de temperatura controlada, para acondicionar las muestras a la temperatura específica requerida para el ensayo.



*Figura 2.19.* Ingreso de la probeta a la cámara de temperatura

Elaboración propia

5. Esperar un tiempo de 30 minutos para que las probetas alcancen la temperatura de prueba la cual fue establecida a  $0^{\circ}\text{C}$ .
6. Realizar el ensayo de impacto Charpy sobre las probetas, registrando los valores de energía absorbida en cada una de ellas.

Para realizar la medición de la expansión lateral se realizó el siguiente procedimiento:

1. Establecer el cero de referencia en el medidor de expansión lateral mediante una probeta patrón.
2. Posicionar la probeta fracturada asegurándose de que esté correctamente colocada.
3. Medir la expansión lateral de la probeta.
4. Leer y registrar la medición mostrada en el dial con la probeta correctamente colocado.

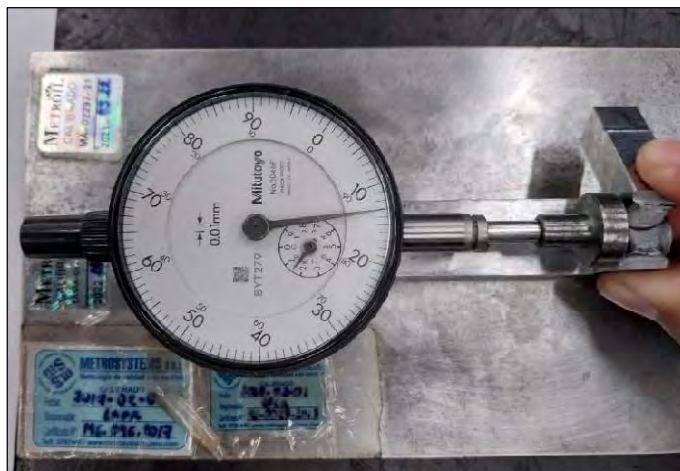


Figura 2.20. Medición de la expansión lateral

Elaboración propia

5. Repetir el mismo procedimiento para el otro lado de la probeta y sumar ambos valores.

## Criterio de aceptación

Los resultados obtenidos en este ensayo deben ser verificados con los valores indicados en la Tabla 3 para las probetas longitudinales y la Tabla 4 para las probetas transversales, las cuales establece los valores mínimos de energía absorbida de acuerdo con la designación del material según la norma EN 10025-6.

Según la designación de materiales de la norma EN 10025-6, se establece que se requiere un valor mínimo de energía absorbida de 50 J a 0°C para las probetas longitudinales, y un valor mínimo de 35 J para las probetas transversales a esa misma temperatura.

## 2.2. Ensayo de impacto Instrumentado

### 2.2.1. Descripción

El ensayo de impacto instrumentado, surgido en la década del 70, es una alternativa avanzada al ensayo Charpy “V” Notch que proporciona información precisa sobre la fractura dinámica. Mediante dispositivos eléctricos adaptados al martillo de impacto y al yunque, este ensayo permite determinar la carga versus el tiempo y analizar el comportamiento carga-desplazamiento durante el impacto. Además, integra los principios de la mecánica de fractura dinámica y proporciona datos sobre la carga de fluencia, carga máxima, carga para fractura frágil, tiempo para fractura frágil y energía absorbida. Esta técnica permite evaluar el proceso de propagación de grietas y separar la energía absorbida en diferentes componentes, ofreciendo una herramienta valiosa para el estudio

completo del comportamiento de los materiales en condiciones de impacto y propagación de grietas.

### **2.2.2. Objeto**

El objetivo del ensayo de impacto instrumentado en este trabajo de investigación es determinar la resistencia al impacto del material y analizar su comportamiento ante situaciones de carga súbita de manera cuantitativa. Estos resultados serán posteriormente comparados con los obtenidos a través del ensayo Charpy.

Además, otro objetivo es desglosar o disgregar la energía total absorbida durante la fractura del material.

### **2.2.3. Probeta**

Para llevar a cabo el proceso de mecanizado de las muestras utilizadas en este ensayo, se empleará el mismo plano de muestra utilizado en el ensayo de impacto Charpy (ver Figura 2.16).

### **2.2.4. Procedimiento**

Para realizar el ensayo de impacto instrumentado se siguieron los siguientes pasos basados en la norma ASTM E2298-18:

1. Preparar las muestras
  - a. Mecanizar las muestras del acero EN 10025-6 S690QL. Estas muestras deben tener las dimensiones especificadas en el plano elaborado para su mecanizado (ver Figura 2.16) y estar preparadas correctamente para la prueba.
  - b. Verificar el aspecto y la calidad de la entalla haciendo uso del proyector de perfiles marca ZwickRoell notch vision.
2. Verificar la calibración e instrumentación del equipo de ensayo
  - a. Verificar que el equipo de impacto instrumentado esté correctamente calibrado según las especificaciones del fabricante y la norma.
  - b. Verificar que los instrumentos de medición, como los transductores de carga y los transductores de desplazamiento, estén calibrados adecuadamente y conectados al equipo. Además, verificar que sean adecuados para las capacidades y rangos de medición necesarios.
3. Ajuste de parámetros de prueba

- a. Configura los parámetros de prueba necesarios, de manera correcta para obtener resultados precisos y coherentes, como la energía de impacto deseada y la velocidad de prueba, de acuerdo con las especificaciones de la norma.

La norma ASTM E2298-18 establece una velocidad de prueba recomendada para el ensayo de impacto instrumentado. Asegúrate de configurar la velocidad de prueba de acuerdo con las recomendaciones de la norma.

#### 4. Colocar las muestras

- a. Colocar las muestras en la cámara de temperatura controlada de manera segura y alineada en la posición de prueba. Asegurándote de insertarlos en la posición correcta.

#### 5. Realizar del ensayo

- a. Activar el dispositivo de impacto. El equipo de impacto instrumentado registrará automáticamente los datos de carga y desplazamiento durante el impacto.

#### 6. Registro y análisis de datos

- a. Registrar y almacenar los datos obtenidos durante la prueba, como la curva de carga-desplazamiento.
- b. Analizar los datos obtenidos para determinar las propiedades de resistencia al impacto del material, como la energía absorbida y el aspecto de la fractura.

#### 7. Documentación y presentación de resultados

- a. Documentar los resultados del ensayo, incluyendo los datos de carga-desplazamiento y los valores calculados de las propiedades de resistencia al impacto.
- b. Presentar todos los detalles relevantes del ensayo, los parámetros de prueba, los resultados y cualquier observación adicional.

## CAPÍTULO 3

### 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo, se presentará los resultados de los ensayos de caracterización así como el análisis y la discusión de los resultados obtenidos a través del ensayo de impacto instrumentado y el ensayo Charpy "V" Notch para el estudio del comportamiento mecánico del acero EN 10025-6 S690QL. Los datos recolectados se analizarán en detalle y se compararán entre sí, con el objetivo de obtener una comprensión cuantitativa y cualitativa del comportamiento del material bajo cargas de impacto.

#### 3.1. Caracterización del material

A continuación, se presentarán los resultados de los ensayos de caracterización realizados:

##### 3.1.1. Análisis Químico

En la Tabla 7 se presentan los valores obtenidos en este ensayo, así como los valores máximos establecidos en la norma del material (EN 10025-6).

Tabla 7. Resultados obtenidos del análisis químico

Elemento	% en peso		Observación
	Probeta	EN 10025-6 S690QL (valor máx.)	
C	0,092	0,22	Conforme
Si	0,2851	0,86	Conforme
Mn	1,010	1,80	Conforme
P	0,008	0,025	Conforme
S	0,0004	0,012	Conforme
N	-	0,016	-
B	0,0007	0,0060	Conforme

*Nota.* Elaboración propia

Tabla 7. Resultados obtenidos del análisis químico (continuación)

Elemento	% en peso		Observación
	Probeta	EN 10025-6 S690QL (valor máx.)	
Cr	0,543	1,16	Conforme
Cu	0,015	0,55	Conforme
Mo	0,196	0,74	Conforme
Nb	0,002	0,07	Conforme
Ni	0,210	4,10	Conforme
Ti	0,018	0,07	Conforme
V	0,008	0,14	Conforme
Zr	-	0,17	-

*Nota.* Elaboración propia

Luego de contrastar los valores podemos afirmar que el material cumple con lo establecido en la norma EN 10025-6.

### 3.1.2. Ensayo de tracción

Como resultado del ensayo de tracción, se ha obtenido la curva fuerza-alargamiento (Figura 3.1) para las probetas longitudinales y transversales, identificadas como TL y TT respectivamente. Al observar dicha curva, podemos afirmar que se trata de un material tenaz, ya que es capaz de soportar un alto esfuerzo axial y permite una deformación considerable antes de la fractura.

Los valores presentados en la Tabla 8 son consistentes con esta curva.

El método utilizado para determinar la carga de fluencia es el método convencional del 0,2% de fluencia. Consiste en trazar una línea paralela a la región elástica de la curva de esfuerzo-deformación, utilizando un desplazamiento del 0,2% de la deformación total para trazar dicha línea. La carga de fluencia se define como el punto de intersección de esta línea con la curva de esfuerzo-deformación.

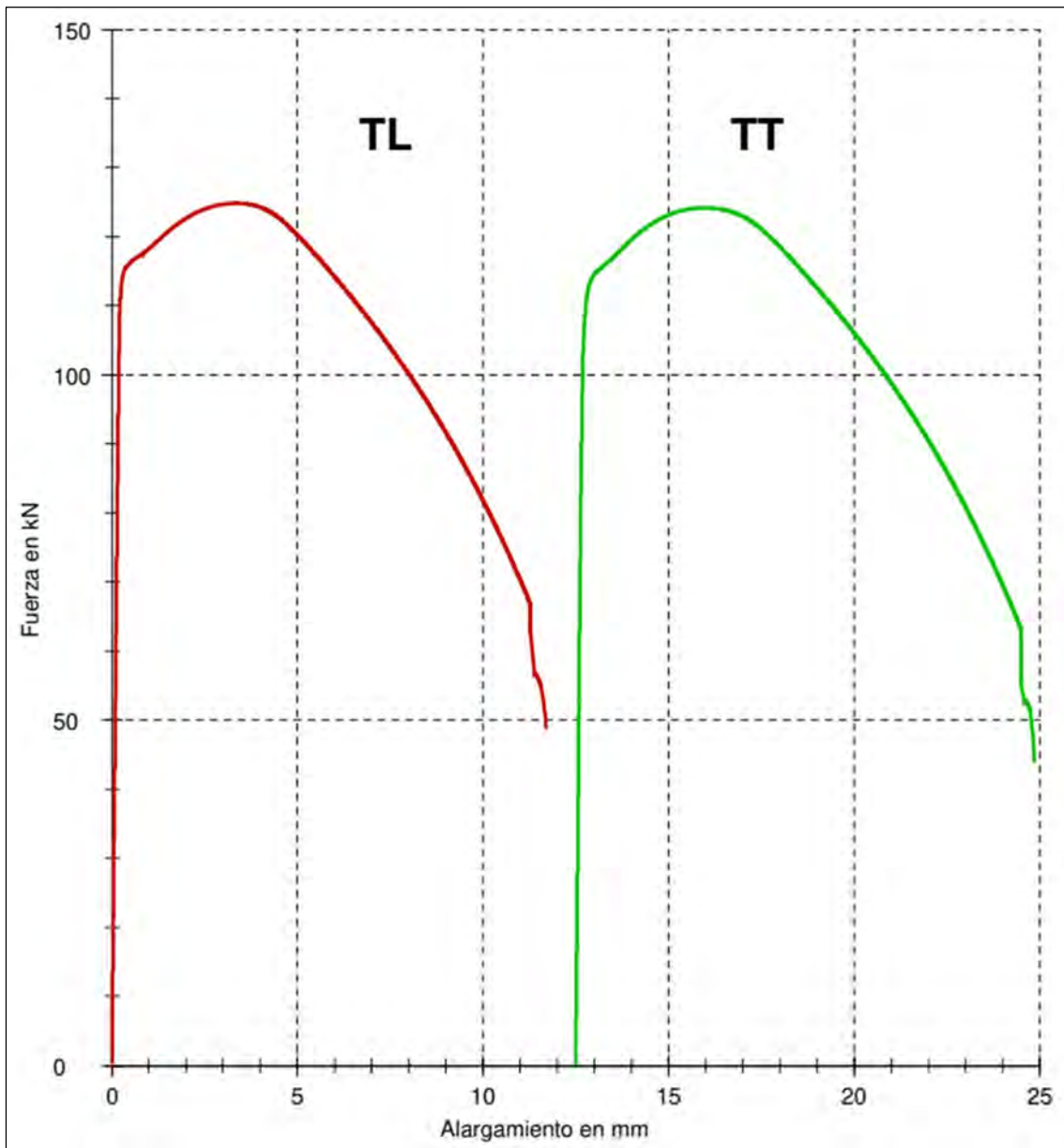


Figura 3.1. Curva fuerza-alargamiento de las probetas longitudinal y transversal

Elaboración propia

En la Tabla 8 se presentan los valores obtenidos en este ensayo en la probeta longitudinal y transversal. A partir de estos valores se calcularon los valores mostrados en la Tabla 9, además de los valores mínimos establecidos en la norma del material (EN 10025-6).

Tabla 8. Resultados obtenidos en el ensayo de tracción

	Probeta TL	Probeta TT
<b>Longitud entre marcas [mm]</b>	50	50
<b>Carga de fluencia [kN]</b>	115	110
<b>Carga máxima [kN]</b>	125	124
<b>Longitud final entre marcas [mm]</b>	61,6	62,3

Nota. Elaboración propia

Tabla 9. Valores calculados a partir de los resultados obtenidos en el ensayo de tracción

Propiedad	Probeta TL	Probeta TT	EN 10025-6 S690QL	Observación
<b>Límite elástico <math>R_{eH}</math> [MPa]</b>	715	689	690 (min.)	Conforme
<b>Resistencia a la tracción <math>R_m</math> [MPa]</b>	778	775	770 a 940	Conforme
<b>Alargamiento después de la rotura %</b>	23,2	24,6	14 (min.)	Conforme

Nota. Elaboración propia

Podemos afirmar que el material caracterizado cumple con los criterios de aceptación después de contrastar los resultados calculados con los valores de la norma EN10025-6.

En la Figura 3.2 se visualizan las probetas después de ser sometidas a ensayos de tracción, las cuales se encuentran fracturadas.



Figura 3.2. Probetas fracturadas del ensayo de tracción

Elaboración propia

### 3.1.3. Ensayo de doblado

Los resultados obtenidos en el ensayo de doblado se muestran en la Tabla 10. Además, no se encontró presencia de discontinuidades en la superficie exterior de las probetas dobladas.

Tabla 10. Resultados obtenidos del ensayo de doblado

Muestra	Ángulo de doblado	Presencia de discontinuidades	Observaciones
DT	180°	-	Conforme
DL	180°	-	Conforme

Nota. Elaboración propia

En la Figura 3.3 se observa la probeta transversal al finalizar el ensayo, utilizando un pin de 38,1 mm (1 ½") para realizar el doblado. Además, en la Figura 3.4 se visualiza la probeta longitudinal después de haber sido doblada por completo, empleando un pin de 50,8 mm (2").



Figura 3.3. *Probeta transversal al término del ensayo*

Elaboración propia



Figura 3.4. *Probeta longitudinal al término del ensayo*

Elaboración propia

Según los criterios de aceptación expuestos en el capítulo anterior, el material cumpliría los requisitos al no presentar discontinuidades visibles en la superficie externa de la zona de flexión tal como se observa en la Figura 3.5.



Figura 3.5. Superficies exteriores de las probetas dobladas

Elaboración propia

### 3.1.4. Ensayo de dureza Rockwell

Se tomaron cinco medidas de dureza en distintas zonas de la probeta durante el ensayo de dureza, como se muestra en la Tabla 11. Se descartaron los valores más bajos y altos, y luego se calculó el valor promedio de la dureza.

Tabla 11. Mediciones obtenidas en el ensayo de dureza Rockwell

Muestra	Mediciones					Dureza promedio	Dureza calculada máxima	Observación
	1	2	3	4	5			
1	21,4	21,5	22,1	21,3	21,2	21,4	22,2	Conforme

Nota. Elaboración propia

Según los criterios de aceptación establecidos para este ensayo en el capítulo anterior, el material cumple con los requisitos de aceptación, ya que la dureza obtenida en el ensayo es inferior a la dureza aproximada calculada.

La Figura 3.6 presenta la probeta con las marcas de indentación después de haber sido ensayada. Se pueden apreciar un total de siete marcas, de las cuales dos fueron realizadas como indentaciones de referencia para verificar la calibración de la máquina de ensayo.



*Figura 3.6.* Probeta después del ensayo de dureza Rockwell

Elaboración propia

### **3.1.5. Metalografía**

La norma ASTM E45 establece los procedimientos para determinar la cantidad, tamaño, distribución y naturaleza de las inclusiones no metálicas y los defectos en los materiales metálicos. Tomando como base esta norma, en las Figuras 3.7 y 3.8 se observan óxidos globulares tipo D de serie gruesa con una severidad de 1.0, lo que indica que la cantidad y el tamaño de las inclusiones son bajos. Esta severidad se calcula en una escala de 1 a 5, donde 1 indica una severidad baja y 5 una severidad alta.

Cabe señalar que, para observar las inclusiones, las probetas se observaron al microscopio antes del ataque químico.

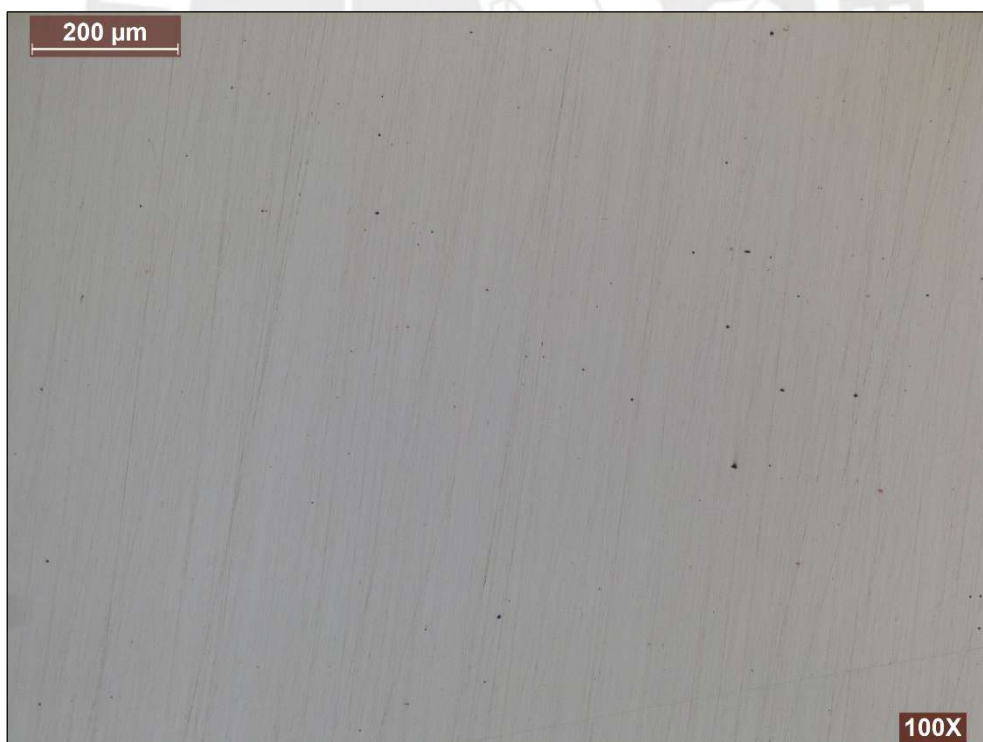
En las Figuras 3.9 y 3.10 se muestra la metalografía de la muestra longitudinal con ataque químico a aumentos de 100x y 500x. El objetivo del ataque químico es revelar la microestructura del material. La microestructura de la muestra es 100% martensita revenida con algunos carburos presentes.

En las Figuras 3.11 y 3.12 se muestra la metalografía de la muestra transversal con ataque químico a aumentos de 100x y 500x. La microestructura de esta muestra es 100% martensita revenida con presencia de algunos carburos.



*Figura 3.7.* Metalografía de la probeta longitudinal sin ataque químico a 100x aumentos

Elaboración propia



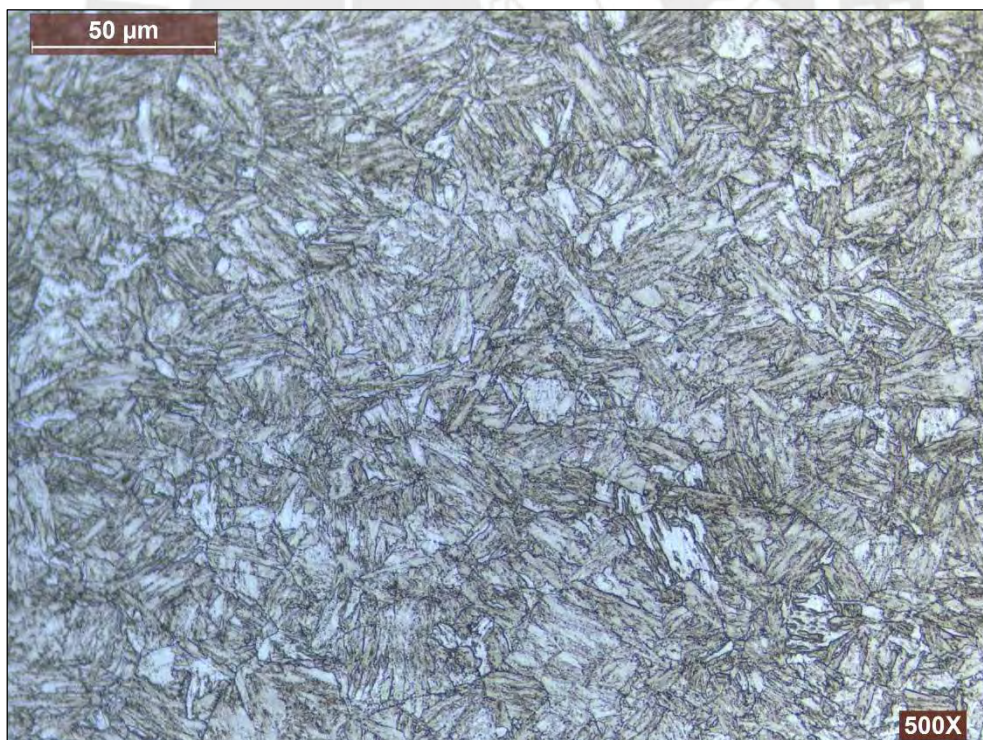
*Figura 3.8.* Metalografía de la probeta longitudinal sin ataque químico a 100x aumentos

Elaboración propia



*Figura 3.9.* Metalografía de la probeta longitudinal con ataque químico a 100x aumentos

Elaboración propia



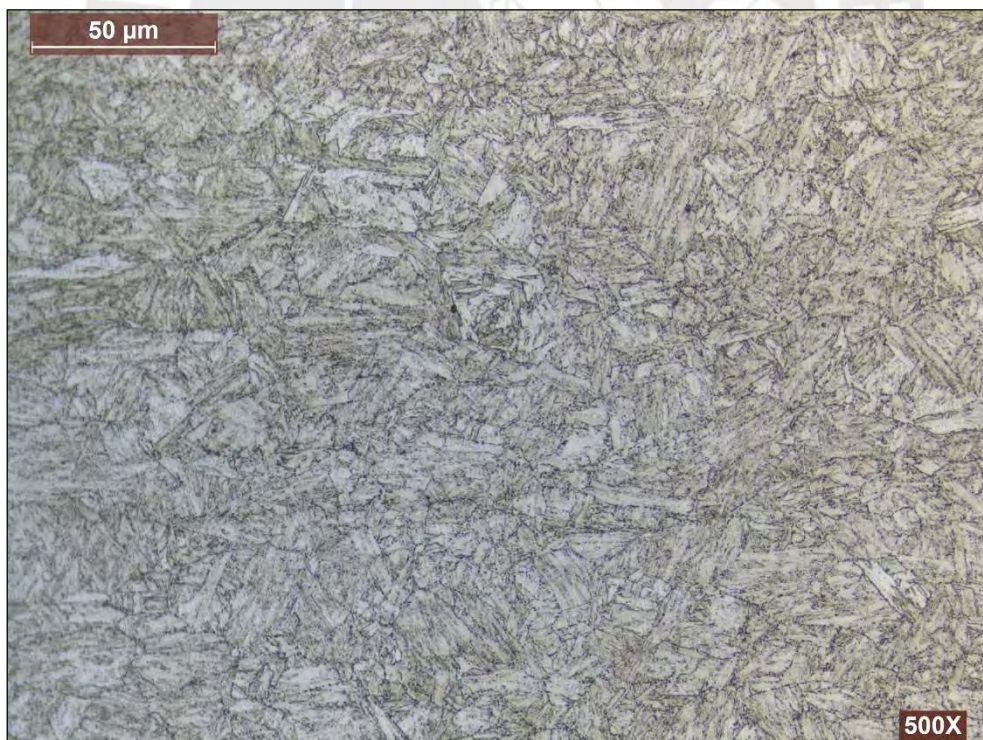
*Figura 3.10.* Metalografía de la probeta longitudinal con ataque químico a 500x aumentos

Elaboración propia



*Figura 3.11.* Metalografía de la probeta transversal con ataque químico a 100x aumentos

Elaboración propia



*Figura 3.12.* Metalografía de la probeta transversal con ataque químico a 500x aumentos

Elaboración propia

Sobre la base de la microestructura observada del material, podemos afirmar que se sometió a un proceso de temple para transformar la estructura cristalina en martensita y al que siguió un proceso de revenido para reducir la fragilidad de la martensita, comúnmente conocido como bonificado.

### 3.1.6. Ensayo de impacto Charpy “V” Notch

La Tabla 12 muestra los valores de energía absorbida para cada probeta transversal, mientras que la Tabla 13 muestra los valores para las probetas longitudinales. Cabe señalar que la temperatura de ensayo fue 0°.

Tabla 12. Resultados obtenidos del ensayo de impacto Charpy en probetas transversales

	Probeta T1	Probeta T2	Probeta T3	Promedio	EN 10025-6 S690QL	Observación
<b>Energía absorbida por impacto [J] a 0°C</b>	224	208	207	213	35 (min.)	Conforme

Nota. Elaboración propia

Tabla 13. Resultados obtenidos del ensayo de impacto Charpy en probetas longitudinales

	Probeta L1	Probeta L2	Probeta L3	Promedio	EN 10025-6 S690QL	Observación
<b>Energía absorbida por impacto [J] a 0°C</b>	224	248	236	236	50 (min.)	Conforme

Nota. Elaboración propia

Según los criterios de aceptación establecidos para este ensayo en el capítulo anterior, este material estaría conforme con los valores mínimo establecido en la normal EN 10025-6.

Adicionalmente se obtuvo los valores de expansión lateral, las cuales son presentadas en la Tabla 14.

Tabla 14. Resultados obtenidos de la expansión lateral

Muestra	Expansión del lado A [mm]	Expansión del lado B [mm]	Expansión total [mm]
T1	1,13	0,97	2,1
T2	0,93	0,95	1,88
T3	1,04	1,02	2,06
L1	0,95	1,03	1,98
L2	0,94	0,95	1,89
L3	0,9	0,96	1,86

Nota. Elaboración propia

De acuerdo con el código ASME B31.3-2016, los aceros al carbono y de baja aleación con una resistencia mínima igual o mayor a 656 MPa, como es el caso del acero estudiado en el presente trabajo de investigación, deben tener una expansión lateral no menor de 0,38 mm para todos los tamaños de muestra (ASME, 2016).

Este valor mínimo es superado ampliamente por el valor registrado de la expansión lateral en cada una de las muestras, tal como se puede observar en la Tabla 4.

En la Figura 3.12 se observan las probetas después de ser ensayadas, y es visible que ninguna de ellas se ha partido en dos. Esto nos da una idea de la buena tenacidad y resistencia al impacto del material.



Figura 3.13. Probetas después del ensayo de impacto Charpy "V" Notch

Elaboración propia

Tras analizar todos los resultados obtenidos, se confirma que el material cumple con los requisitos establecidos en la norma del material EN 10025-6 S690QL. En consecuencia, procederemos a realizar el ensayo de interés para la presente tesis.

### 3.2. Ensayo de impacto instrumentado

Se ensayaron cinco probetas a cada temperatura, las cuales fueron las siguientes: temperatura ambiente (20°C), 0°C, -20°C, -40°C, -60°C y -80°C.

#### 3.2.1. Ensayo a temperatura ambiente (20°C)

La Tabla 15 muestra la data recolectada por el péndulo para ensayo de impacto instrumentado a esta temperatura.

Tabla 15. Resultados obtenidos del ensayo de impacto instrumentado a 20°C

Nº de probeta	F <sub>max</sub> [kN]	S <sub>m</sub> [mm]	W <sub>m</sub> [J]	F <sub>gy</sub> [kN]	S <sub>gy</sub> [mm]	E <sub>a</sub> [J]	Resistencia al impacto [kJ/m <sup>2</sup> ]	Observación
1	25,23	2,77	56,78	10,27	0,2	215,76	2692,35	No rompió
2	27,28	0,41	3,17	1,12	0,16	224,24	2801,24	No rompió
3	33,53	1,28	16,77	6,31	0,18	223,03	2787,01	Rompió
4	31,33	1,11	13,87	5,40	0,18	224,85	2795,89	No rompió
5	31,47	1,24	17,21	5,70	0,18	229,68	2871,40	Rompió

Nota. Elaboración propia

A esta temperatura la energía absorbida promedio fue 223,5 J con una desviación estándar de 5 J.

En la siguiente figura se muestra las curvas fuerza-desplazamiento de las cinco probetas ensayadas a esta temperatura en un único gráfico. Se identifica que tienen la morfología de la curva Tipo C según la norma ASTM E2298-18.

Según esta morfología la fractura es 100% dúctil, lo cual va acorde al observar las superficies de fractura (Figura 3.15).

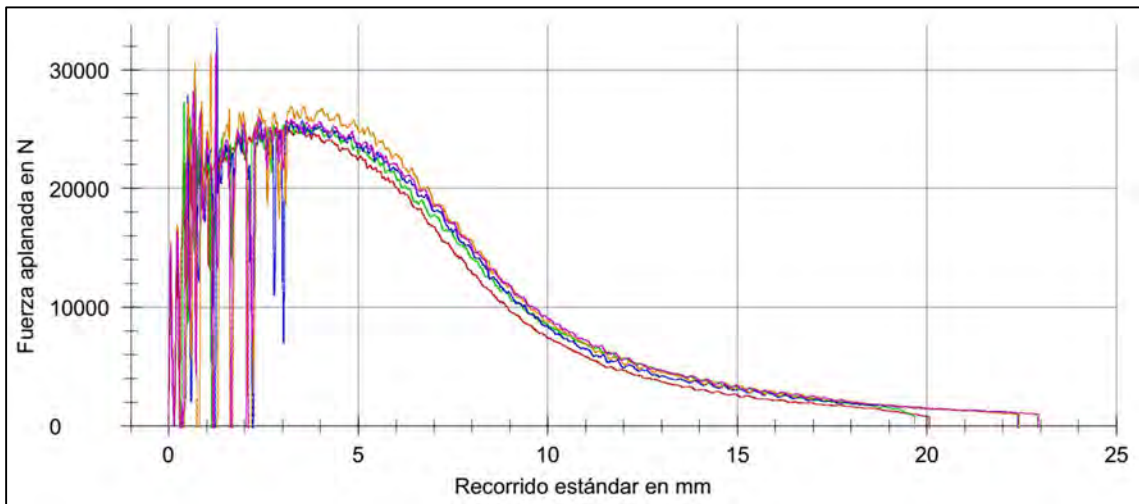


Figura 3.14. Curvas fuerza-desplazamiento de las probetas ensayadas a 20°C

Elaboración propia

A continuación, se muestra las superficies de rotura de las probetas ensayadas a esta temperatura:

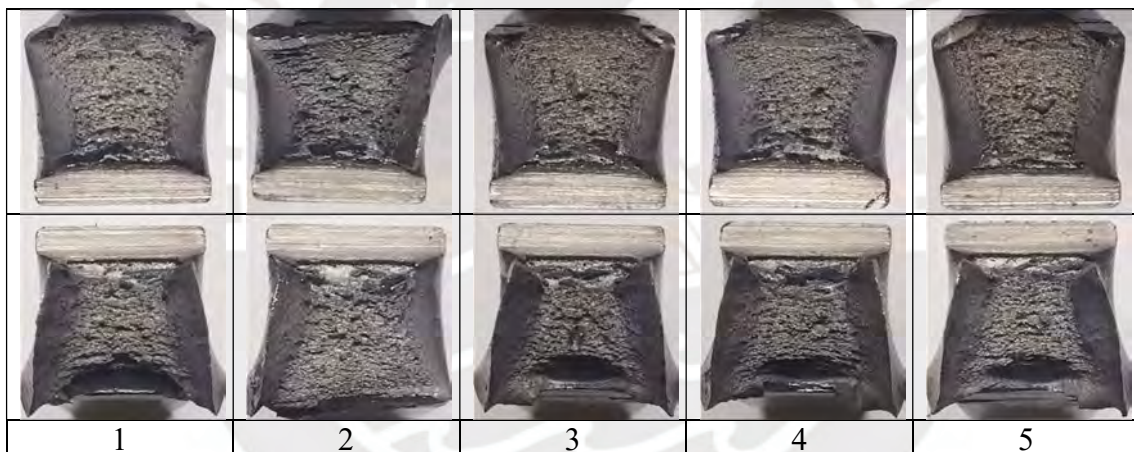


Figura 3.15. Superficies de fractura de las probetas ensayadas a 20°C

Elaboración propia

### 3.2.2. Ensayo a temperatura 0°C

La Tabla 16 muestra la data recolectada por el péndulo para ensayo de impacto instrumentado a esta temperatura.

Tabla 16. Resultados obtenidos del ensayo de impacto instrumentado a 0°C

Nº de probeta	F <sub>max</sub> [kN]	S <sub>m</sub> [mm]	W <sub>m</sub> [J]	F <sub>gy</sub> [kN]	S <sub>gy</sub> [mm]	E <sub>a</sub> [J]	Resistencia al impacto [kJ/m <sup>2</sup> ]	Observación
6	30,96	0,67	6,99	7,46	0,19	199,84	2494,52	No rompió
7	35,37	0,64	7,08	8,09	0,18	214,24	2688,01	No rompió
8	29,89	0,69	5,72	8,08	0,19	225,3	2811,13	Rompió
9	28,62	0,74	6,11	8,80	0,19	191,05	2392,68	No rompió
10	27,66	0,79	6,09	8,43	0,19	200,44	2503,65	No rompió

Nota. Elaboración propia

A esta temperatura la energía absorbida promedio fue 206,2 J con una desviación estándar de 13,5 J.

Al observar las curvas fuerza-desplazamiento se identifica que tienen la morfología de curva Tipo C según la norma ASTM E2298-18.

Según tipo de curva la fractura es 100% dúctil, lo cual va acorde al observar las superficies de fractura (Figura 3.17).

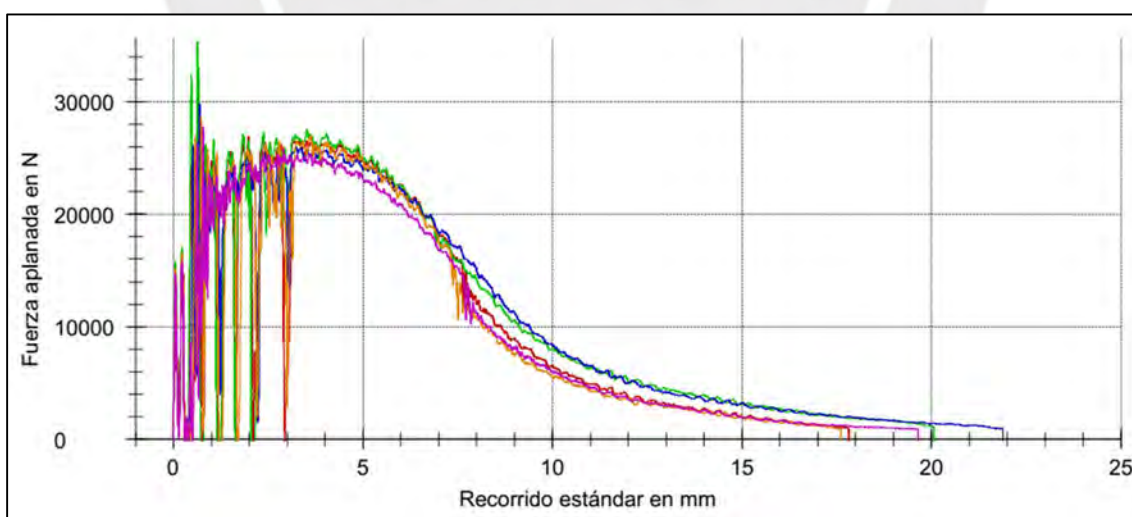


Figura 3.16. Curvas fuerza-desplazamiento de las probetas ensayadas a 0°C

Elaboración propia

A continuación, se muestra las superficies de rotura de las probetas ensayadas a esta temperatura:

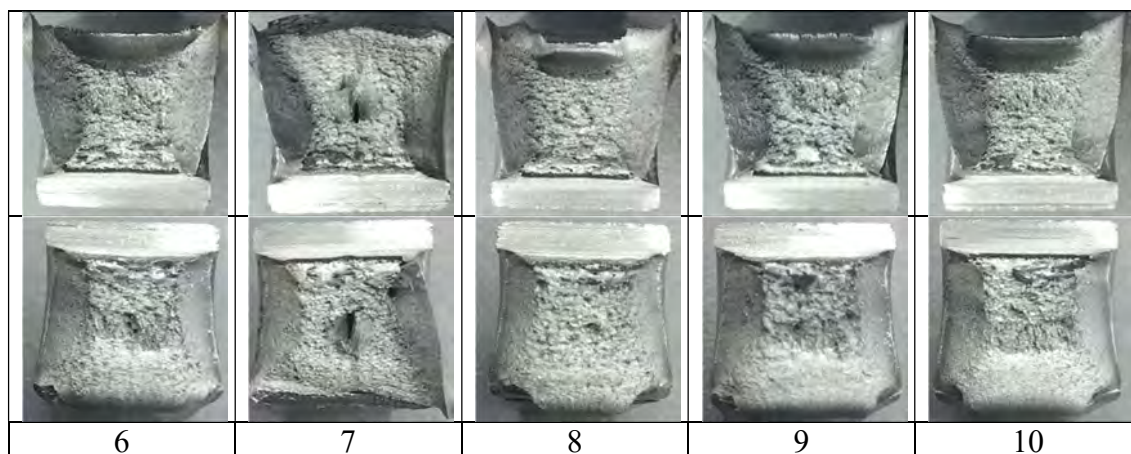


Figura 3.17. Superficies de fractura de las probetas ensayadas a 0°C

Elaboración propia

### 3.2.3. Ensayo a temperatura -20°C

La Tabla 17 muestra la data recolectada por el péndulo para ensayo de impacto instrumentado a esta temperatura.

Tabla 17. Resultados obtenidos del ensayo de impacto instrumentado a -20°C

N° de probeta	$F_{max}$ [kN]	$S_m$ [mm]	$W_m$ [J]	$F_{gy}$ [kN]	$S_{gy}$ [mm]	$E_a$ [J]	Resistencia al impacto [kJ/m <sup>2</sup> ]	Observación
11	40,19	0,5	3,84	0,03	0,15	152,4	1902,44	Rompió
12	27,19	0,63	7,11	6,18	0,18	167,71	2097,63	Rompió
13	28,63	0,63	7,2	6,54	0,18	187,27	2343,08	Rompió
14	27,82	0,64	5,83	7,29	0,19	189,84	2392,14	Rompió
15	25,62	2,65	54,82	8,46	0,19	205,75	2570,06	Rompió

Nota. Elaboración propia

A esta temperatura la energía absorbida promedio fue 180,6 J con una desviación estándar de 20,8 J.

Al observar las curvas fuerza-desplazamiento se identifica que tienen la morfología de curva Tipo C según la norma ASTM E2298-18.

Según tipo de curva la fractura es 100% dúctil, lo cual va acorde al observar las superficies de fractura en la Figura 3.19.

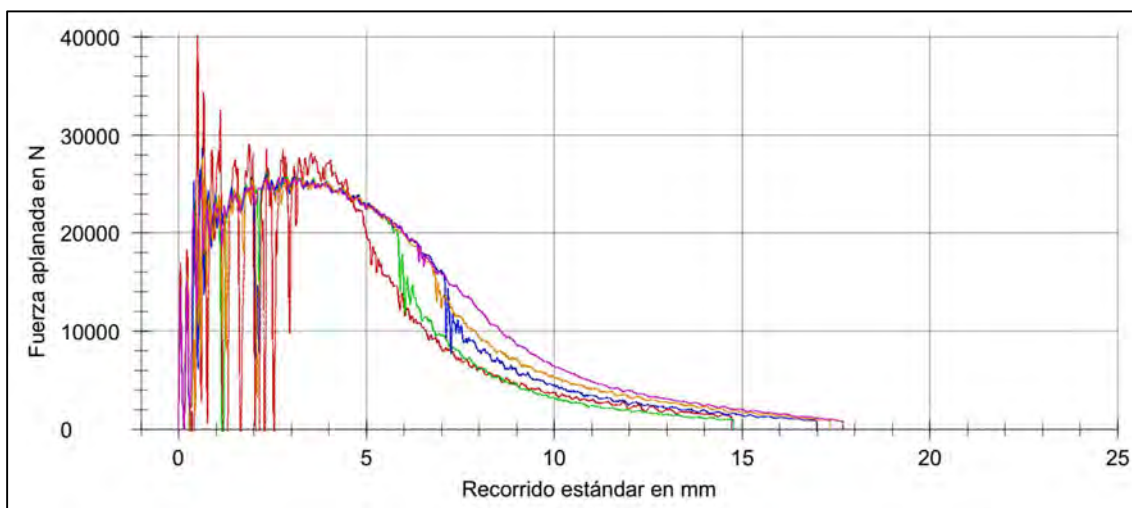


Figura 3.18. Curvas fuerza-desplazamiento de las probetas ensayadas a  $-20^{\circ}\text{C}$

Elaboración propia

A continuación, se muestra las superficies de rotura de las probetas ensayadas a esta temperatura:

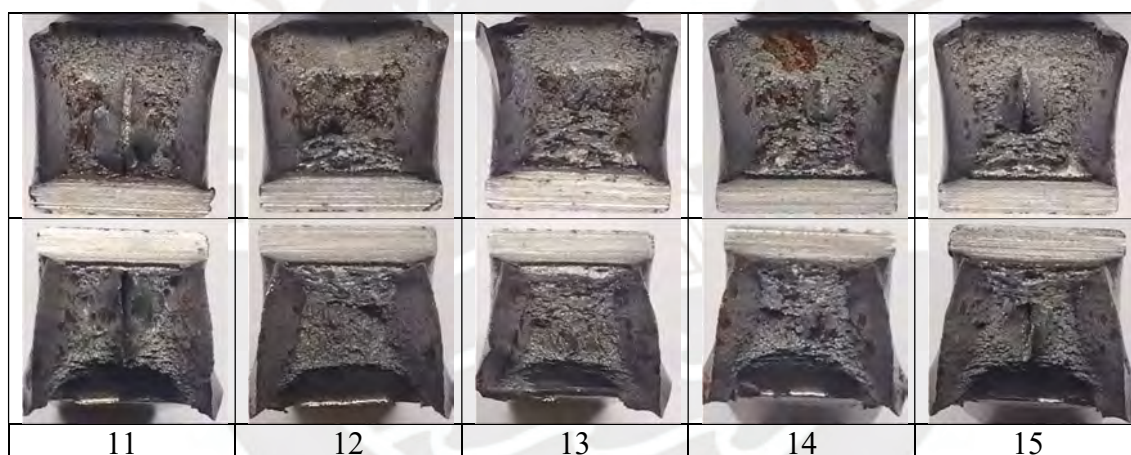


Figura 3.19. Superficies de fractura de las probetas ensayadas a  $-20^{\circ}\text{C}$

Elaboración propia

### 3.2.4. Ensayo a temperatura $-30^{\circ}\text{C}$

La Tabla 18 muestra la data recolectada por el péndulo para ensayo de impacto instrumentado a esta temperatura.

Tabla 18. Resultados obtenidos del ensayo de impacto instrumentado a  $-30^{\circ}\text{C}$ 

N° de probeta	$F_{\max}$ [kN]	$S_m$ [mm]	$W_m$ [J]	$F_{gy}$ [kN]	$S_{gy}$ [mm]	$E_a$ [J]	Resistencia al impacto [kJ/m <sup>2</sup> ]	Observación
36	28,10	0,63	6,75	6,89	0,18	170,71	2136,99	Rompió
37	29,61	0,64	7,45	6,46	0,19	139,95	1750,12	Rompió
38	29,40	0,7	7,6	6,94	0,2	116,2	1453,59	Rompió
39	28,02	0,58	5,83	6,77	0,21	156,4	1957,23	No rompió
40	39,06	0,64	6,99	7,70	0,22	188,63	2358,75	No rompió

Nota. Elaboración propia

A esta temperatura la energía absorbida promedio fue 154,4 J con una desviación estándar de 27,9 J.

Al observar las curvas fuerza-desplazamiento se identifica que dos curvas tienen la morfología de curva Tipo C y tres curvas son Tipo B según la norma ASTM E2298-18.

Las probetas 39 y 40 no rompieron y corresponden a las curvas Tipo C, según esto la fractura de estas probetas es 100% dúctil.

En las otras tres curvas se observa una caída de fuerza con lo cual correspondería la curva Tipo B. Para calcular su porcentaje de ductilidad de la fractura se podrían usar las ecuaciones de la Figura 1.36 sin embargo el equipo no brindó las fuerzas necesarias para usar esas ecuaciones. Por lo que no se puede calcular de manera cualitativa.

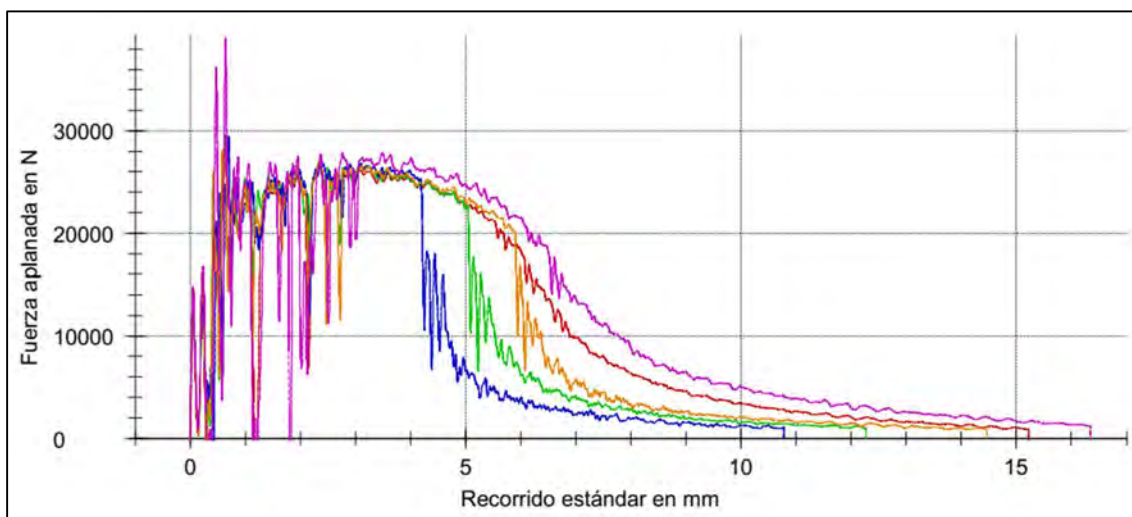


Figura 3.20. Curvas fuerza-desplazamiento de las probetas ensayadas a  $-30^{\circ}\text{C}$

Elaboración propia

A continuación, se muestra las superficies de rotura de las probetas ensayadas a esta temperatura:

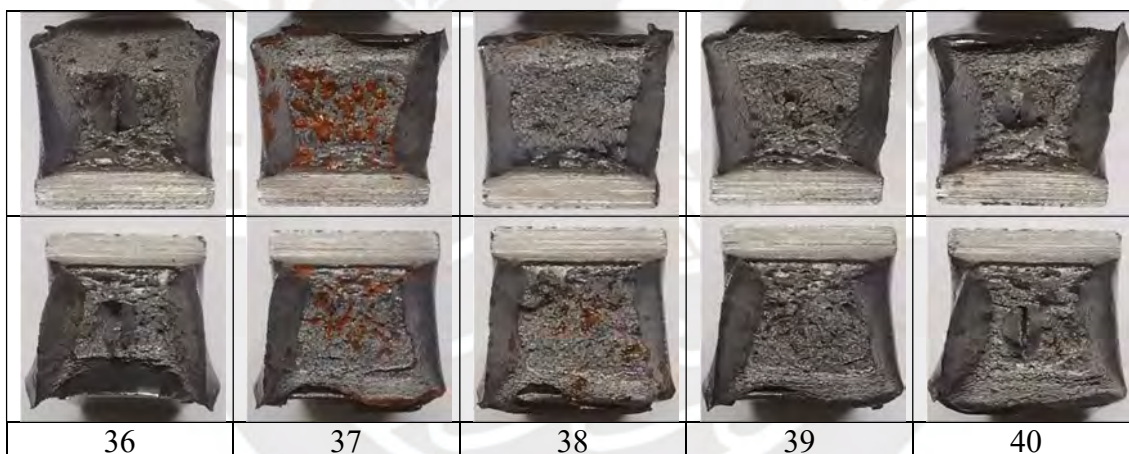


Figura 3.21. Superficies de fractura de las probetas ensayadas a  $-30^{\circ}\text{C}$

Elaboración propia

Al comparar de manera cuantitativa con los patrones establecidos en la norma ASTM E23-23a, se estima que la superficie de fractura presenta un 90% de ductilidad.

### 3.2.5. Ensayo a temperatura $-40^{\circ}\text{C}$

A La Tabla 19 muestra la data recolectada por el péndulo para ensayo de impacto instrumentado a esta temperatura.

Tabla 19. Resultados obtenidos del ensayo de impacto instrumentado a  $-40^{\circ}\text{C}$ 

N° de probeta	$F_{\max}$ [kN]	$S_m$ [mm]	$W_m$ [J]	$F_{gy}$ [kN]	$S_{gy}$ [mm]	$E_a$ [J]	Resistencia al impacto [kJ/m <sup>2</sup> ]	Observación
16	37,61	0,67	7,49	7,64	0,18	135,45	1691,23	Rompió
17	34,08	0,58	6,84	6,58	0,18	141,55	1772,86	Rompió
18	37,33	0,49	3,87	1,03	0,15	131,12	1638,04	Rompió
19	35,10	0,52	3,63	0,76	0,15	146,38	1811,85	Rompió
20	28,05	0,62	6,81	6,25	0,19	132,85	1664,28	Rompió

Nota. Elaboración propia

A esta temperatura la energía absorbida promedio fue 137,5 J con una desviación estándar de 6,4 J.

Al observar las curvas fuerza-desplazamiento se identifica que tienen la morfología de curva Tipo B según la norma ASTM E2298-18.

Según el tipo de curva, la fractura se manifiesta como una combinación de modo dúctil y frágil. Para calcular el porcentaje de ductilidad en estos casos, se podrían emplear las ecuaciones de la Figura 1.36. Sin embargo, debido a que el equipo no proporcionó las fuerzas necesarias para aplicar estas ecuaciones, no es posible hallar el porcentaje de ductilidad de manera cualitativa.

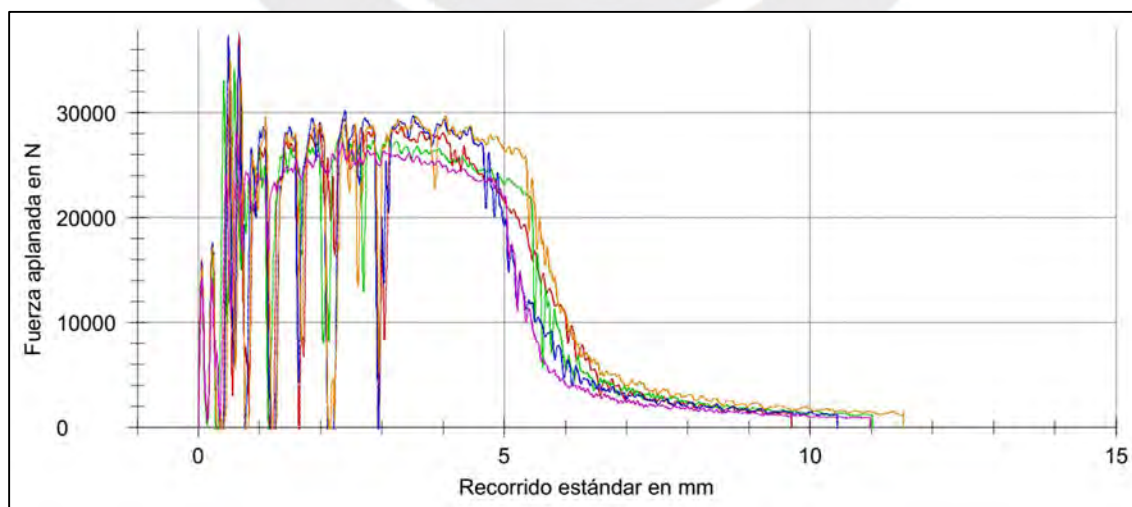


Figura 3.22. Curvas fuerza-desplazamiento de las probetas ensayadas a  $-40^{\circ}\text{C}$

Elaboración propia

A continuación, se muestra las superficies de rotura de las probetas ensayadas a esta temperatura:



Figura 3.23. Superficies de fractura de las probetas ensayadas a  $-40^{\circ}\text{C}$

Elaboración propia

Al comparar de manera cuantitativa con los patrones establecidos en la norma ASTM E23-23a, se estima que la superficie de fractura presenta un 70% de ductilidad.

### 3.2.6. Ensayo a temperatura $-50^{\circ}\text{C}$

La Tabla 20 muestra la data recolectada por el péndulo para ensayo de impacto instrumentado a esta temperatura.

Tabla 20. Resultados obtenidos del ensayo de impacto instrumentado a  $-50^{\circ}\text{C}$

N° de probeta	$F_{\max}$ [kN]	$S_m$ [mm]	$W_m$ [J]	$F_{gy}$ [kN]	$S_{gy}$ [mm]	$E_a$ [J]	Resistencia al impacto [kJ/m <sup>2</sup> ]	Observación
31	30,35	0,63	6,82	7,46	0,18	105,51	1319,34	Rompió
32	35,82	0,64	6,8	7,97	0,19	58,01	722,84	Rompió
33	43,91	0,68	8,15	8,85	0,19	79,56	993,79	Rompió
34	29,14	0,62	6,25	6,97	0,18	91,19	1138,80	Rompió
35	28,53	0,63	7,33	6,60	0,18	74,84	932,47	Rompió

Nota. Elaboración propia

A esta temperatura la energía absorbida promedio fue 81,8 J con una desviación estándar de 17,8 J.

Al observar las curvas fuerza-desplazamiento se identifica que tienen la morfología de curva Tipo B según la norma ASTM E2298-18.

Según el tipo de curva, la fractura se manifiesta como una combinación de modo dúctil y frágil. Para calcular el porcentaje de ductilidad en estos casos, se podrían emplear las ecuaciones de la Figura 1.36. Sin embargo, debido a que el equipo no proporcionó las fuerzas necesarias para aplicar estas ecuaciones, no es posible hallar el porcentaje de ductilidad de manera cualitativa.

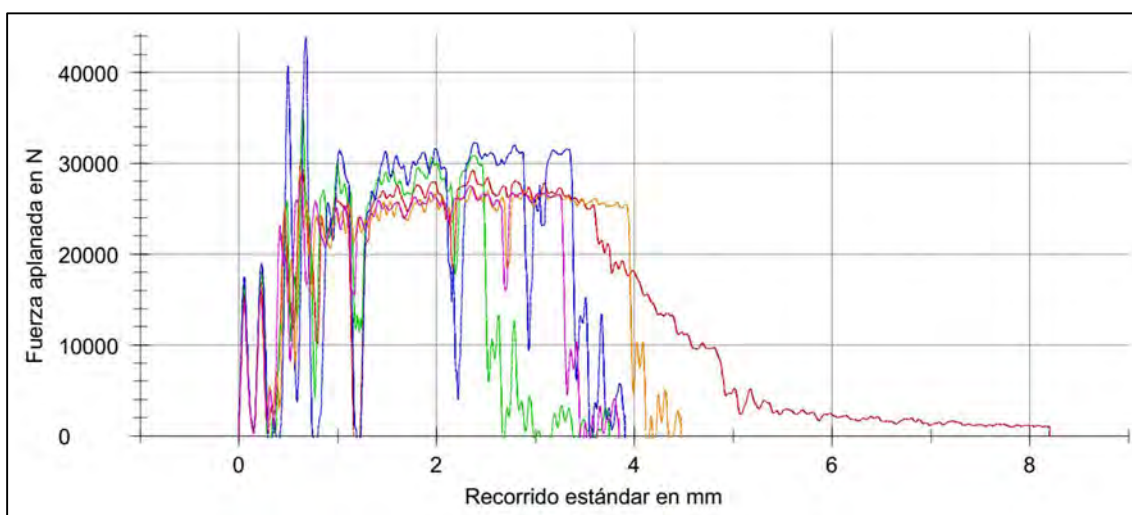


Figura 3.24. Curvas fuerza-desplazamiento de las probetas ensayadas a  $-50^{\circ}\text{C}$

Elaboración propia

A continuación, se muestra las superficies de rotura de las probetas ensayadas a esta temperatura:

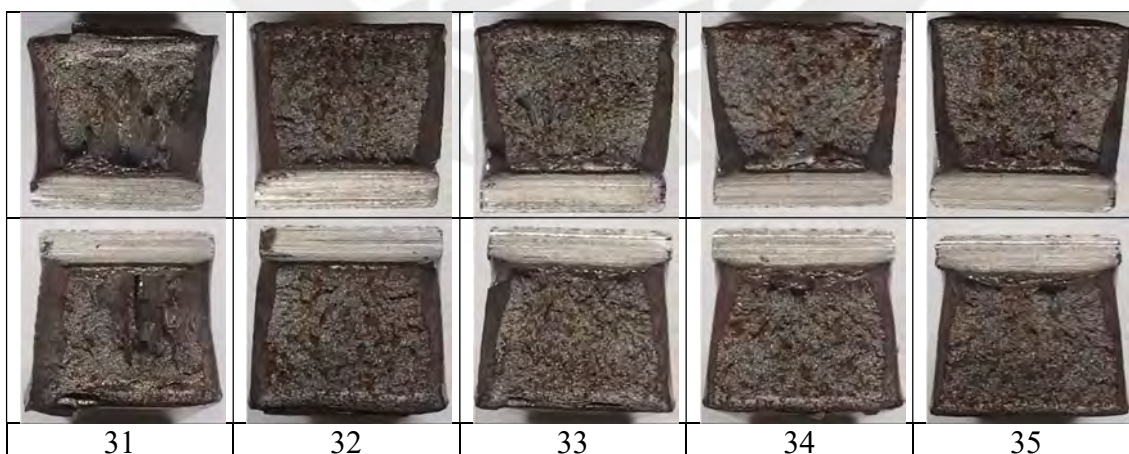


Figura 3.25. Superficies de fractura de las probetas ensayadas a  $-50^{\circ}\text{C}$

Elaboración propia

Al comparar de manera cuantitativa con los patrones establecidos en la norma ASTM E23-23a, se estima que la superficie de fractura presenta un 40% de ductilidad.

### 3.2.7. Ensayo a temperatura -60°C

La Tabla 21 muestra la data recolectada por el péndulo para ensayo de impacto instrumentado a esta temperatura.

Tabla 21. Resultados obtenidos del ensayo de impacto instrumentado a -60°C

N° de probeta	F <sub>max</sub> [kN]	S <sub>m</sub> [mm]	W <sub>m</sub> [J]	F <sub>gy</sub> [kN]	S <sub>gy</sub> [mm]	E <sub>a</sub> [J]	Resistencia al impacto [kJ/m <sup>2</sup> ]	Observación
21	34,93	0,93	6,22	7,54	0,19	31,28	391,58	Rompió
22	37,85	0,68	7,41	8,59	0,19	79,05	985,61	Rompió
23	32,42	0,63	6,49	7,40	0,19	48,58	610,85	Rompió
24	41,29	0,62	4,1	9,26	0,19	63,79	798,11	Rompió
25	29,07	2,45	46,94	4,62	0,28	60,64	760,33	Rompió

Nota. Elaboración propia

A esta temperatura la energía absorbida promedio fue 56,7 J con una desviación estándar de 17,9 J.

Al observar las curvas fuerza-desplazamiento se identifica que tienen la morfología de curva Tipo B según la norma ASTM E2298-18.

Según el tipo de curva, la fractura se manifiesta como una combinación de modo dúctil y frágil. Para calcular el porcentaje de ductilidad en estos casos, se podrían emplear las ecuaciones de la Figura 1.36. Sin embargo, debido a que el equipo no proporcionó las fuerzas necesarias para aplicar estas ecuaciones, no es posible hallar el porcentaje de ductilidad de manera cualitativa.

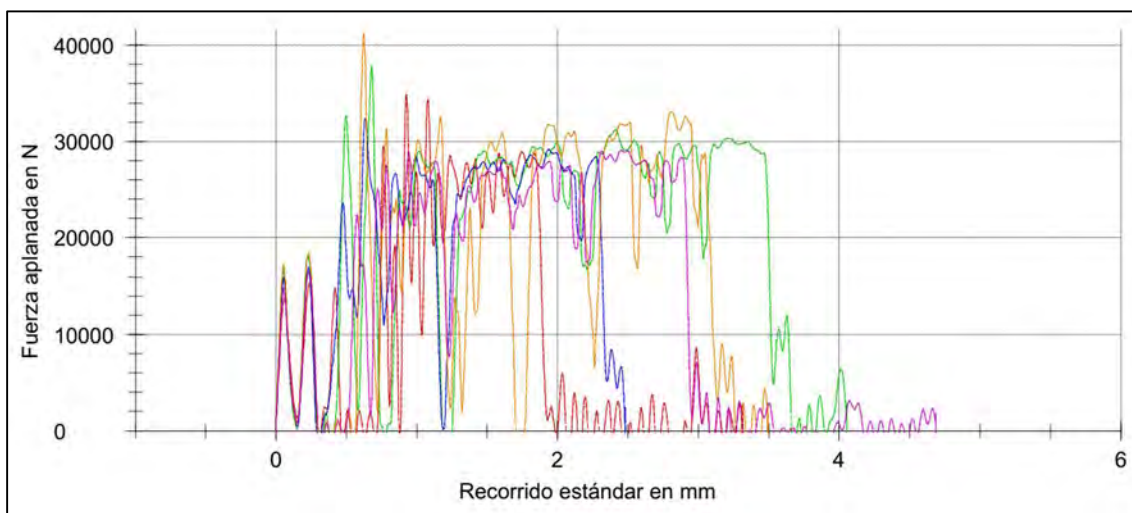


Figura 3.26. Curvas fuerza-desplazamiento de las probetas ensayadas a  $-60^{\circ}\text{C}$

Elaboración propia

A continuación, se muestra las superficies de rotura de las probetas ensayadas a esta temperatura:

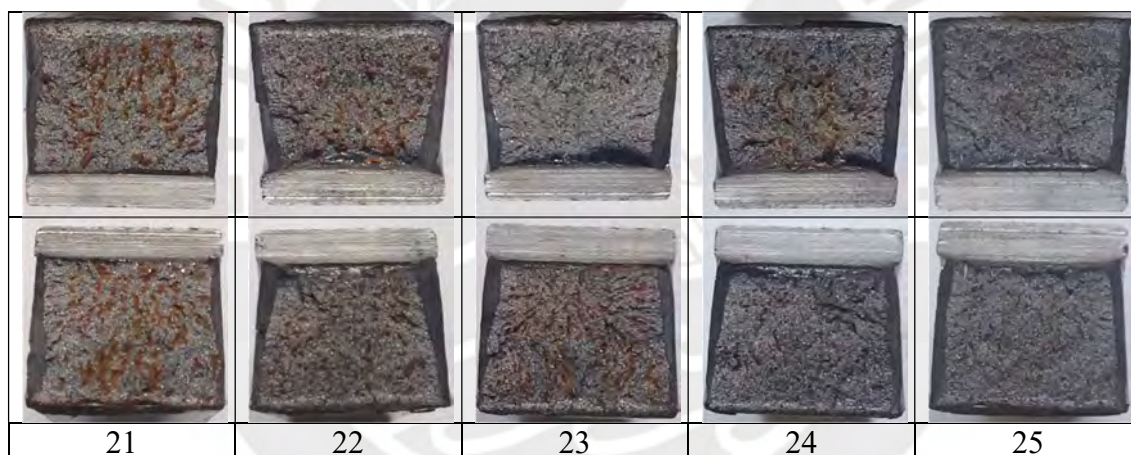


Figura 3.27. Superficies de fractura de las probetas ensayadas a  $-60^{\circ}\text{C}$

Elaboración propia

Al comparar de manera cuantitativa con los patrones establecidos en la norma ASTM E23-23a, se estima que la superficie de fractura presenta un 30% de ductilidad.

### 3.2.8. Ensayo a temperatura $-80^{\circ}\text{C}$

La Tabla 22 muestra la data recolectada por el péndulo para ensayo de impacto instrumentado a esta temperatura.

Tabla 22. Resultados obtenidos del ensayo de impacto instrumentado a  $-80^{\circ}\text{C}$ 

Nº de probeta	$F_{\max}$ [kN]	$S_m$ [mm]	$W_m$ [J]	$F_{gy}$ [kN]	$S_{gy}$ [mm]	$E_a$ [J]	Resistencia al impacto [kJ/m <sup>2</sup> ]	Observación
26	31,44	0,7	7,68	7,01	0,19	34,1	427,17	Rompió
27	27,21	0,7	7,3	6,73	0,18	20,91	261,70	Rompió
28	43,96	0,65	8,58	9,26	0,18	25	313,67	Rompió
29	44,39	0,68	8,64	10,87	0,19	33,36	416,48	Rompió
30	31,30	0,57	6,75	6,07	0,18	28,51	356,86	Rompió

Nota. Elaboración propia

A esta temperatura la energía absorbida promedio fue 28,4 J con una desviación estándar de 5,6 J.

Al observar las curvas fuerza-desplazamiento se identifica que tienen la morfología de curva Tipo A según la norma ASTM E2298-18.

Según tipo de curva la fractura es 0% dúctil, lo cual va acorde al observar las superficies de fractura (Figura 3.29).

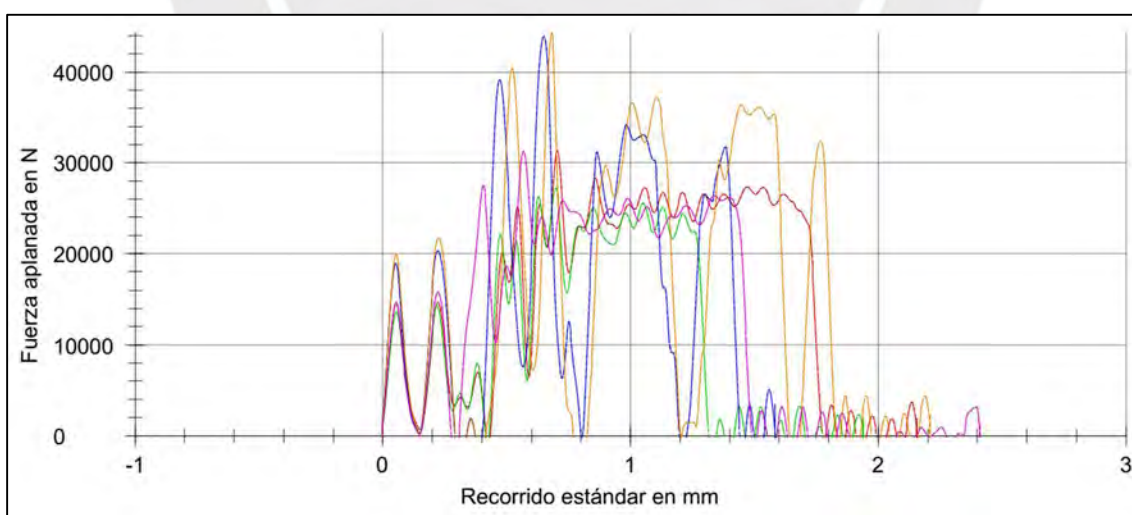


Figura 3.28. Curvas fuerza-desplazamiento de las probetas ensayadas a  $-80^{\circ}\text{C}$

Elaboración propia

A continuación, se muestra las superficies de rotura de las probetas ensayadas a esta temperatura:

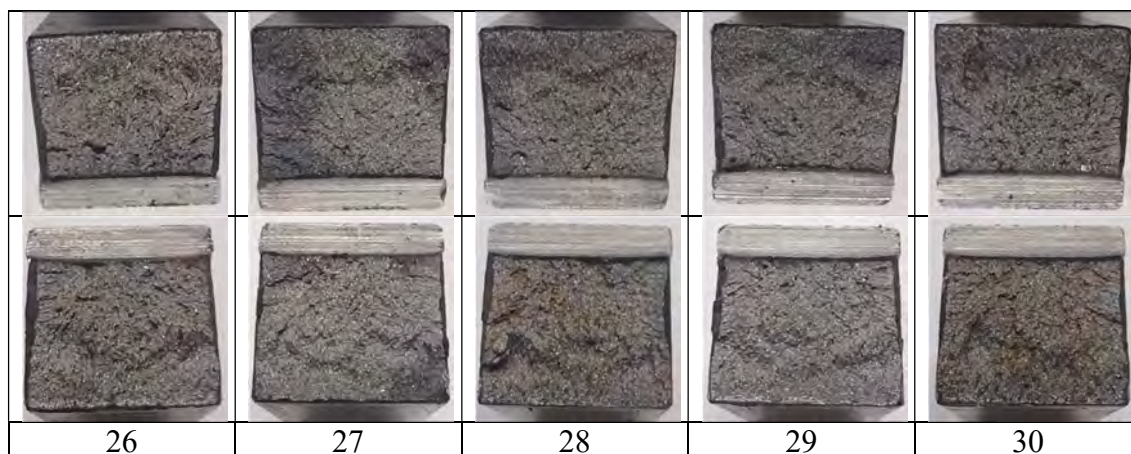


Figura 3.29. Superficies de fractura de las probetas ensayadas a  $-80^{\circ}\text{C}$

Elaboración propia

En la Figura 3.30 se han reunido todos los valores de energía absorbida de las cuarenta probetas ensayadas a sus respectivas temperaturas de ensayo, los cuales están indicados mediante puntos rojos. Esto nos permite visualizar la dispersión de los resultados y a su vez la curva fue construida utilizando los valores promedio energía absorbida correspondientes a cada temperatura.

Para determinar la temperatura de transición, se aplica el criterio de considerar la temperatura que corresponda a un valor de energía absorbida igual al promedio entre los valores superior e inferior. El promedio resultante es de 125,9 J, lo que corresponde a una temperatura de  $-42^{\circ}\text{C}$ , como se puede observar en la Figura 3.30, indicado por las flechas rojas.

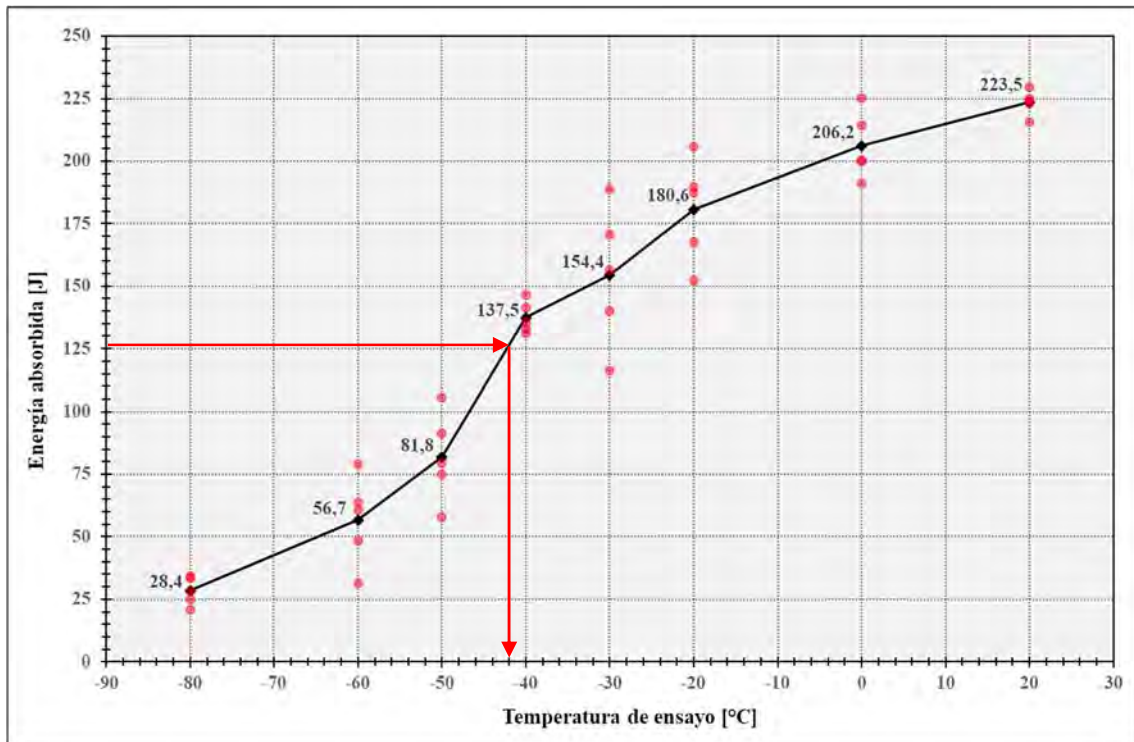


Figura 3.30. Gráfico de Energía absorbida vs. Temperatura de ensayo

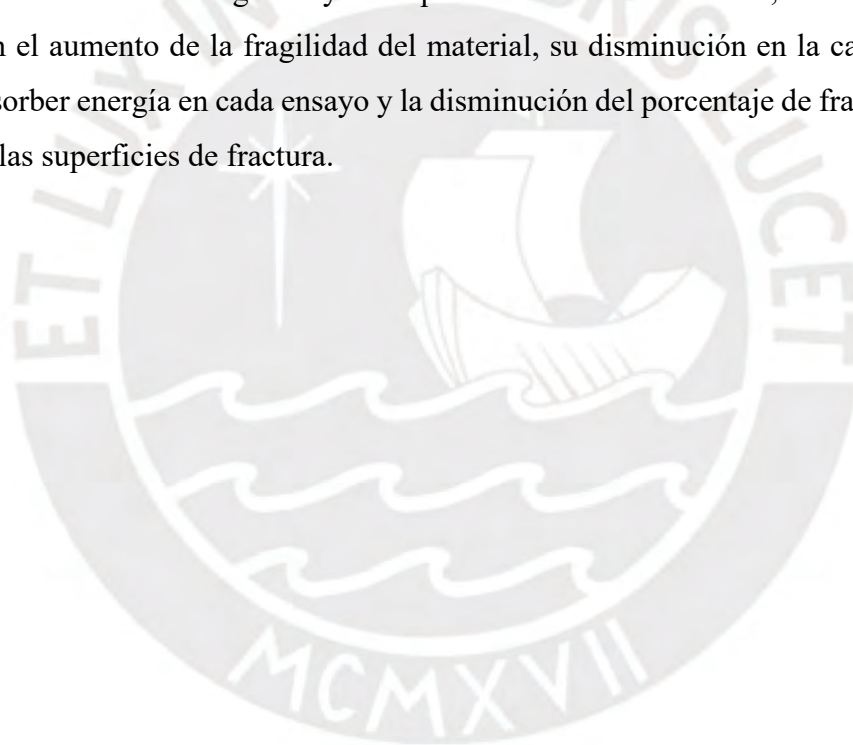
Elaboración propia

## CONCLUSIONES

- A partir del análisis minucioso de los resultados obtenidos de los ensayos realizados para caracterizar el material base podemos concluir que dicho material cumple de manera satisfactoria con las rigurosas especificaciones, criterios y parámetros establecidas por la normativa para el acero EN 10025-6 S690QL.
- Con el equipo de impacto instrumentado disponible, no es factible determinar el porcentaje de ductilidad en una fractura de manera cuantitativa, ya que no proporciona las fuerzas características necesarias para sustituir en las ecuaciones indicadas en la norma ASTM E2298-18, que se emplea en los ensayos de impacto instrumentado. Sin embargo, fue posible estimar el porcentaje de fractura dúctil utilizando las directrices establecidas en la norma ASTM E23-23a, que se emplea en ensayos de impacto Charpy “V” Notch.
- Los resultados de este estudio demuestran de manera concluyente que la temperatura de transición calculada a partir de la curva Energía absorbida vs. temperatura del material se sitúa en proximidad al valor estipulado dentro de las especificaciones técnicas para el acero EN 10025-6 S690QL. Esta confirmación respalda la idoneidad de este material para aplicaciones específicas en las que se requieren propiedades térmicas particulares.
- A medida que la temperatura desciende, se puede notar una marcada disminución en la capacidad de absorción de energía del acero EN 10025-6 S690QL, y al mismo tiempo, se incrementa su tendencia a exhibir un comportamiento frágil como se evidencia al examinar las superficies de fractura de las probetas. Este fenómeno conlleva a una progresiva reducción en la tenacidad del material mencionado. Es decir, a medida que la temperatura desciende, la capacidad del acero para resistir cargas de impacto cae progresivamente.
- El acero EN 10025-6 S690QL demuestra un desempeño sobresaliente en términos de tenacidad y resistencia al impacto en un rango de temperaturas bastante amplio, manteniendo su integridad hasta los  $-20^{\circ}\text{C}$ . Sin embargo, es importante destacar que, para aplicaciones que operen a temperaturas aún más bajas, no se considera una elección óptima. En tales casos, es esencial explorar alternativas de materiales que ofrezcan propiedades más adecuadas para garantizar la seguridad y eficiencia en el funcionamiento del proyecto. La elección de un material adecuado en

función de la temperatura de operación es fundamental para garantizar el éxito y la durabilidad de cualquier aplicación, y el acero S690QL debe considerarse dentro de su rango de temperatura óptimo para aprovechar al máximo sus beneficios.

- Tras la observación de los resultados del ensayo de impacto instrumentado en el acero EN 10025-6 S690QL, se concluye que existe una correlación significativa entre la forma de la curva fuerza-desplazamiento obtenido a partir de dicho ensayo y el comportamiento de este material. Cuando se detecta una caída abrupta en la curva es un indicativo claro de la presencia fractura frágil según se ha estudiado en la normal ASTM E23-23a para curvas Tipo B. En la región de transición dúctil-frágil, a medida que se baja la temperatura de ensayo disminuye, la caída en la curva aumenta en magnitud y el desplazamiento total se reduce, lo cual relaciona con el aumento de la fragilidad del material, su disminución en la capacidad de absorber energía en cada ensayo y la disminución del porcentaje de fractura dúctil en las superficies de fractura.



## RECOMENDACIONES

- Se recomienda continuar con la línea de investigación para estudiar el comportamiento de las variantes del material puro (EN 10025-6 S690QL), particularmente en una unión soldada, con el propósito de evaluar la zona afectada por el calor generada durante el proceso de soldadura.
- Se sugiere la provisión de apoyo especial por parte del laboratorio de manufactura a las tesis de pregrado que necesiten llevar a cabo el mecanizado de probetas para la realización de ensayos mecánicos. Este apoyo tiene como finalidad evitar la prolongación del tiempo requerido para la finalización de las tesis de pregrado.
- Se recomienda realizar una verificación de la calibración de la instrumentación presente en el péndulo utilizado para el ensayo de impacto instrumentado. Dado que el equipo no logró proporcionar los valores de fuerza característica en la curva fuerza-desplazamiento necesario para calcular el porcentaje de fractura dúctil, en particular, no brindó la fuerza en el inicio de la propagación inestable de la grieta ( $F_{bf}$ ) ni la fuerza al final de la propagación inestable de la grieta ( $F_a$ ).

## BIBLIOGRAFÍA

- Askeland D. R., Bhattacharya D. K., Ceja Cárdenas L., Chhabra R. P., Peralta Rosales L., Ponciano Guzmán J. N., & Wright W. J. (2017). *Ciencia e ingeniería de materiales* (Séptima edición). Cengage Learning.
- ASME. (2016). *ASME B31.3-2016*. <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/b31-3-process-piping>
- Asociación Española de Normalización. (2020). *UNE-EN 10025-6 Productos laminados en caliente de aceros para estructuras*.
- ASTM International. (2017). *E3 – 11 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*.
- ASTM International. (2018a). *E350 – 18 Standard Test Methods for Chemical Analysis of Carbon Steel, Low-Alloy Steel, Silicon Electrical Steel, Ingot Iron, and Wrought Iron*.
- ASTM International. (2018b). *E2298 – 18 Standard Test Method for Instrumented Impact Testing of Metallic Materials*.
- ASTM International. (2022a). *E8/E8M – 22 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*.
- ASTM International. (2022b). *E18 – 22 Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials*.
- ASTM International. (2022c). *E290 – 22 Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility*.
- ASTM International. (2023). *E23 – 23a Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*.
- BILTRA. (2020, March 18). *Ensayo de dureza Brinell*. <https://www.biltra.com/tratamientos-termicos-ensayo-de-dureza-brinell/>
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach*. In *Fundamentals of materials science and engineering : an integrated approach* (5th Edicion). Wiley.

- Courtney, T. H. (2005). *Mechanical Behavior of Materials* (2nd ed.). Waveland Press.
- Davis J. R. (1998). *Metals handbook desk edition (2nd edition)*. ASM International.  
<https://www.worldcat.org/title/1118488482>
- Demeri, M. Y. (2013). Chapter 2: Steel Fundamentals. In *Advanced-High Strength Steels* (pp. 23–58). ASM International.  
<https://doi.org/10.31399/ASM.TB.AHSSSTA.T53700023>
- González-Velázquez, J. L. (2020). *Mechanical Behavior and Fracture of Engineering Materials* (Vol. 12). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-29241-6>
- Horvath, C. D. (2010). Advanced steels for lightweight automotive structures. *Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles*, 35–78.  
<https://doi.org/10.1533/9781845697822.1.35>
- Hosford, W. F. (2010). *Mechanical Behavior of Materials* (2nd ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511810923>
- Huda, Z. (2022). *Mechanical Behavior of Materials*. Springer International Publishing.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-84927-6>
- Illescas, S. (2007). *Estudio del efecto de los elementos microaleantes en un acero HSLA*. Universidad Politécnica de Cataluña · Barcelona Tech - UPC.
- Kaufmann, E. N. (2012). *Characterization of materials* (Second Edition, Vol. 3). John Wiley & Sons.
- Meyers M. A., & Chawla K. K. (2009). *Mechanical behavior of materials* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Sha, W. (2013). Steels: From materials science to structural engineering. In *Steels: From Materials Science to Structural Engineering* (Vol. 9781447148722). Springer-Verlag London Ltd. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4872-2/COVER>