

**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA
MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA TENACIDAD A LA
FRACTURA DEL MATERIAL DE LA MAZA DE RUEDA PORTADORA DE
LOS VAGONES DEL SISTEMA DE TRANSPORTE COLECTIVO METRO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA

ING. ADÁN RUÍZ RÍOS

DIRECTORA DE TESIS

DRA. RITA AGUILAR OSORIO



MÉXICO, NOVIEMBRE 2016.

Agradecimientos

A la Dra. Rita Aguilar Osorio:

Por darme la oportunidad de trabajar con ella, todo el apoyo, tiempo y recomendaciones dadas durante mi estancia en el posgrado.

Al Instituto Politécnico Nacional y a la SEPI - ESIME Zacatenco:

Por darme la oportunidad de realizar mi posgrado en sus instalaciones. Así como por ser el lugar donde conocí a muy buenos profesores y amigos.

Al CONACyT:

Por el apoyo económico que me brindo durante el tiempo que estuve realizando mi posgrado.

Al Ing. Gerardo López Ramírez:

Por el apoyo, tiempo dedicado y sus consejos durante la realización de las pruebas de impacto Charpy y las pruebas de tensión.

A la comisión revisora de este trabajo de tesis, al Dr. Jesús Alberto Meda Campaña, al Dr. Samuel Alcántara Montes, al Dr. José Félix Vázquez Flores y al Dr. Didier Samayoa Ochoa:

Por tomarse el tiempo para realizar la revisión de este trabajo, por sus correcciones, recomendaciones y consejos realizados.

Resumen

En esta investigación se determinó la tenacidad a la fractura del material del cual está fabricada la maza de rueda portadora (MRP) de los vagones del Sistema de Transporte Colectivo Metro (STC Metro). La determinación de la tenacidad a la fractura se obtuvo realizando pruebas de tensión siguiendo la metodología de la norma ASTM E399 [1] y también realizando pruebas de impacto Charpy siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM E23 [2]. Para realizar las pruebas de tensión se fabricaron probetas tipo compactas a tensión C (T) del mismo material del cuerpo de la MRP, las cuales fueron preagrietadas utilizando una carga de fatiga de 10 kN hasta alcanzar una longitud de grieta de 2.5 mm. Posteriormente, las probetas se ensayaron bajo cargas de tensión con incrementos de 0.5 kN/s, con el fin de obtener las curvas de carga contra el desplazamiento de abertura de la grieta. De acuerdo con las pruebas realizadas, se obtuvo que la tenacidad a la fractura del material fue de $44.02 \text{ MPa}\sqrt{m}$. Por otro lado, para determinar la tenacidad a la fractura realizando pruebas de impacto Charpy se fabricaron probetas con muescas en V las cuales se ensayaron en un péndulo para pruebas de impacto, del ensayo se obtuvo que la capacidad de absorción de energía del material fue de 160.07 J . Aplicando las correlaciones propuestas por J. M. Barson y S. T. Rolfe a la información obtenida se determinó que la tenacidad a la fractura del material de la MRP fue de $69.17 \text{ MPa}\sqrt{m}$.

Abstract

The determination of fracture toughness of the material which is manufactured wheel hub carrier (MRP) of the wagons in Collective Transportation System Metro (STC Metro) is presented in this thesis. The determination of the fracture toughness was obtained performing tension testing according to ASTM E399 [1] and Charpy impact tests according to ASTM E23 [2]. For tension testing were used compact tension specimens C (T), these were precracking using fatigue loads of 10 kN until a crack length of 2.5 mm, subsequently the specimens were tested under loads of tension with increments of 0.5 kN/s, for plotting the curves load-displacement, $P-v$. According to tests it was found that the fracture toughness of the material was $44.02 \text{ MPa}\sqrt{m}$. To determine the fracture toughness by Charpy impact tests were fabricated specimens Charpy V notch and tested in a pendulum impact test, of these tests it was found that the capacity of energy absorption of the material was 160.07 J , with this information and using the correlation proposed by J. M. Barson and S. T. Rolfe was obtained that the fracture toughness of the material $69.17 \text{ MPa}\sqrt{m}$.

Nomenclatura

σ_u	Esfuerzo último
σ_{ys}	Esfuerzo de fluencia
γ	Angulo de acenso del péndulo
β	Longitud de caída el péndulo
a	Longitud de la grieta
A (B)	Probeta en forma de arco a flexión
A (T)	Probeta en forma de arco a tensión
B	Espesor de la probeta
B_N	Profundidad de muescas laterales
BM- MRP	Brida mayor de la maza de rueda portadora
CVN	Probeta Charpy con muesca en V
C (T)	Probeta compacta a tensión
DC (T)	Probeta en forma de disco a tensión
E	Módulo de elasticidad
G	Tasa de liberación de energía
g	Gravedad
h	Altura del péndulo
Hz	Hertz
J	Joule
K	Factor de intensidad de esfuerzos
K_{Ic}	Tenacidad a la fractura en modo I de falla
kg	Kilogramo
K_Q	Tenacidad a la fractura preliminar
kN	Kilo newton
l	Longitud efectiva del péndulo
N	Newton
M	Masa
m	Metro
mm	Milímetro
MRP	Masa de rueda portadora
P	Carga
P_{max}	Carga máxima
P_Q	Carga determinada a partir de la curva de carga-desplazamiento
R	Tasa de esfuerzo
SE (B)	Probeta a flexión
SEM	Scanning Electron Microscopy
TEM	Transmission Electron Microscopy
v	Velocidad

Nomenclatura

v	Desplazamiento
W	Ancho de la probeta
W_P	Energía del péndulo durante su caída
W_a	Energía absorbida por la probeta

Índice general

Índice general

Resumen	I
Abstract	II
Nomenclatura	III
Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1 Introducción	2
1.2 Importancia de la caracterización de los materiales	5
1.3 Alcances	7
1.4 Objetivos	7
1.5 Aportaciones	8
1.6 Antecedentes	8
1.7 Metodología general.....	8
Capítulo 2: Análisis bibliográfico	11
2.1 Introducción	12
2.2 Métodos para determinar la tenacidad a la fractura	12
2.3 Publicaciones relacionadas la obtención de la tenacidad a la fractura K_{IC} utilizando métodos experimentales	15
2.4 Publicaciones relacionadas con pruebas de impacto Charpy.....	30
Capítulo 3: Determinación de la tenacidad a la fractura utilizando pruebas de tensión.....	37
3.1 Introducción	38
3.2 Fabricación de las probetas para la determinar de la tenacidad a la fractura.....	39
3.3 Características de la máquina pruebas	44
3.4 Preparación de las probetas.....	45
3.5 Condiciones de prueba.....	52
3.6 Procedimiento para obtener la tenacidad a la fractura realizando pruebas de tensión	52
Capítulo 4: Determinación de la tenacidad a la fractura utilizando pruebas de impacto Charpy	56
4.1 Introducción	57
4.2 Fabricación de probetas para realizar pruebas de impacto Charpy.....	57
4.3 Características del equipo de pruebas	59
4.4 Condiciones de prueba.....	60
4.5 Procedimiento para obtener la tenacidad a la fractura utilizando pruebas de impacto Charpy	61
Capítulo 5: Resultados y análisis de resultados	64
5.1 Resultados de las pruebas de tensión para determinar la tenacidad a la fractura.....	65
Conclusiones	93
Trabajos futuros.....	95
Bibliografía	96
Anexos	101

Índice figuras

Figura 1.1. Metodología general.	10
Figura 2.1 Máquina utilizada para pruebas de impacto Charpy.....	31
Figura 3.1. Principales partes de la maza de rueda portadora.	38
Figura 3.2. Microestructura de BM-MRP.	39
Figura 3.3. Microestructura del cuerpo de la maza.	39
Figura 3.4. Geometría del material.	40
Figura 3.5. Dimensiones del material.	40
Figura 3.6. Probeta tipo C (T).	41
Figura 3.7. Detalle de la muesca.	41
Figura 3.8. Probeta tipo C (T), en mm.	42
Figura 3.9. Detalle de la muesca, en mm.....	42
Figura 3.10. Dimensionamiento.	43
Figura 3.11. Desbaste del material.	43
Figura 3.12. Maquinado de los orificios.	43
Figura 3.13. Maquinado de los orificios.....	43
Figura 3.14. Maquinado de la muesca.	44
Figura 3.15. Probetas C (T).	44
Figura 3.16. Máquina de pruebas Instron 8502.	44
Figura 3.17. Controlador hidráulico.	44
Figura 3.18. Panel de control.	45
Figura 3. 19. Bomba Hidráulica.	45
Figura 3.20. Probetas C (T) pulidas.....	46
Figura 3.21. Dimensiones de la mordazas, en mm.	47
Figura 3.22. Mordazas.....	48
Figura 3.23. Condiciones de carga para realizar el preagrietamiento.	49
Figura 3.24. Colocación de la mordaza inferior y de la probeta C (T).	50
Figura 3.25. Mordazas y probetas colocadas.	51
Figura 3.26. Microscopio móvil.	51
Figura 3.27. Monitoreo del preagrietado.	51
Figura 3.28. Extensómetro.	53
Figura 3.29. Soportes de la probeta C (T).	53
Figura 3.30. Probeta C (T) con extensómetro.....	53
Figura 3.31. Determinación de P_{max} y P_Q	54
Figura 4.1. Probeta Charpy tipo A, dimensiones en mm.	57
Figura 4.2. Probeta Charpy tipo B, dimensiones en mm.	57
Figura 4. 3. Probeta Charpy tipo C, dimensiones en mm.	57
Figura 4.4. Dimensionamiento de las probetas Charpy.	58
Figura 4.5. Probetas tipo Charpy.....	58
Figura 4.6. Péndulo para pruebas de impacto Charpy.	59
Figura 4.7. Probeta no fracturada.	60
Figura 4.8. Probeta no fracturada.	60
Figura 4.9. Colocación de la probeta.	61
Figura 4.10. Posición de caída.....	61

Figura 4.11. Obtención del ángulo de ascenso.	62
Figura 5.1. Inicio de la grieta por fatiga.	65
Figura 5.2. Grieta por fatiga de aproximadamente 2.5 mm de longitud probeta uno.	66
Figura 5. 3. Grieta por fatiga probeta dos.	66
Figura 5. 4. Grieta de 2.5mm de la probeta dos.	66
Figura 5. 5. Medición de la longitud de la grieta, probeta número uno.	67
Figura 5. 6. Medición de la longitud de la grieta, probeta número dos.	68
Figura 5. 7. Curva carga-desplazamiento, P-v, probeta uno.	70
Figura 5. 8. Superficies de fractura probeta número uno.	71
Figura 5.9. Superficies de fractura probeta número uno.	71
Figura 5.10. Tipos de fractura dependiendo del espesor de la probeta.	72
Figura 5. 11. Curva carga-desplazamiento, P-v, probeta número dos.	72
Figura 5. 12. Superficie de fractura probeta dos.	73
Figura 5. 13. Superficie de fractura probeta dos.	73
Figura 5.14. Determinación de la carga P_Q de la probeta número uno.	74
Figura 5. 15. Determinación de la carga P_Q de la probeta número dos.	74
Figura 5. 16. Determinación de la sección sin agrietar de la probeta.	79
Figura 5. 17. Ángulo de ascenso de la probeta uno, 88°	81
Figura 5. 18. Ángulo de ascenso de la probeta dos, 82°	81
Figura 5. 19. Ángulo de ascenso de la probeta tres, 79°	82
Figura 5. 20. Ángulo de ascenso de la probeta cuatro, 81°	82
Figura 5. 21. Ángulo de ascenso de la probeta seis, 90°	82
Figura 5. 22. Ángulo de ascenso de la probeta siete, 83°	82
Figura 5. 23. Probeta 1.	88
Figura 5. 24. Probeta 2.	88
Figura 5. 25. Probeta 3	88
Figura 5. 26. Probeta 4.	88
Figura 5. 27. Probeta 5	88
Figura 5. 28. Probeta 6.	88
Figura 5. 29. Probeta 7.	88
Figura 5. 30. Regiones de fractura según norma.	89
Figura 5. 31. Probeta 1 totalmente fracturada.	89
Figura 5. 32. Probeta 2 totalmente fracturada.	89
Figura 5. 33. Probeta 3 totalmente fracturada.	90
Figura 5. 34. Probeta 4 totalmente fracturada.	90
Figura 5. 35. Probeta 5 totalmente fracturada.	90
Figura 5. 36. Probeta 6 totalmente fracturada.	90
Figura 5. 37. Probeta 7 totalmente fracturada.	90

Índice Tablas

Tabla 3.1. Dimensiones para fabricar la probeta C (T).....	41
Tabla 3.2. Condiciones utilizadas para el pulido de la probetas C (T).....	46
Tabla 3.3. Tiempo para realizar el preagrietado de las probetas.....	48
Tabla 3.4. Condiciones para realizar el preagrietado de las probetas C (T).....	50
Tabla 3.5. Condiciones de prueba.....	52
Tabla 4.1. Condiciones para realizar pruebas de impacto Charpy.....	60
Tabla 5.1. Mediciones de la longitud de la grieta probeta número uno.....	67
Tabla 5.2. Mediciones de la longitud de la grieta probeta número dos.....	68
Tabla 5.3. Mediciones de la longitud de las grietas.....	69
Tabla 5.4. Tenacidad a la fractura para las dos probetas ensayadas.....	78
Tabla 5.5. Ángulos de ascenso.....	83
Tabla 5.6. Energía absorbida del material en J.....	84
Tabla 5.6. Tenacidad a la fractura del material MPam.....	87
Tabla 5.8. Comparación de la tenacidad a la fractura.....	91

Capítulo 1: Introducción

En este capítulo se presenta una breve introducción de la caracterización de las principales propiedades mecánicas de los materiales.

1.1 Introducción

La necesidad de conocer y predecir el comportamiento de un material así como de valorar su utilidad para una o diversas aplicaciones, ha llevado a desarrollar nuevos métodos especializados para realizar su caracterización. El progreso de la tecnología está asociado directamente con la disponibilidad de los materiales para cada aplicación. La completa comprensión de un material es el primer paso en el progreso de la tecnología [4].

Los materiales tienen una gran influencia en nuestra vida cotidiana, como en el transporte, en la vivienda, en los medios de comunicación, etc. Actualmente, debido a los programas de investigación y desarrollo, se están desarrollando continuamente nuevos materiales. La caracterización y fabricación de nuevos materiales en los países desarrollados constituyen una parte importante de su economía actual [4].

La caracterización de los materiales determina las relaciones que existen entre la composición química, en tanto su estructura, las propiedades mecánicas de un material, con el fin de determinar si el material es óptimo para un diseño o para una aplicación determinada. Generalmente, las propiedades de un material son independientes de la forma y del tamaño que éste tenga. La vida útil de un material será óptima si el criterio para elegirlo fue el más adecuado tomando en cuenta lo mencionado anteriormente [5].

Hoy en día, dependiendo del problema que se necesite subsanar, se han desarrollado nuevas y novedosas técnicas para la caracterización de los materiales. Actualmente con la microscopía electrónica es posible realizar análisis morfológicos superficiales, análisis de composición química, determinación elemental de contaminantes en materiales sólidos y mapas de rayos X, con los cuales puede conocer la distribución de elementos presentes en el material y, además, se pueden analizar los mecanismos de falla de un determinado elemento mecánico [6].

Por lo general, para la determinar las propiedades mecánicas se necesita fabricar probetas estandarizadas que posteriormente son ensayadas en máquinas de pruebas especiales bajo condiciones de prueba determinadas. La tenacidad a la fractura es una importante propiedad mecánica pues caracteriza la resistencia de un material a la propagación de las grietas. Además, esta propiedad forma parte de criterio principal de la mecánica de la fractura, porque si la intensidad de los esfuerzos alrededor de la punta alcanza el valor de la tenacidad, el comportamiento de la propagación de las grietas cambia de estable a inestable y la fractura total del elemento mecánico o estructura puede ocurrir en cualquier momento.

La tenacidad a la fractura se determinada principalmente utilizando los procedimientos estandarizados que proponen por diferentes organismos como el American Society for Testing and Materials (ASTM) y el International Organisation for Standardisation (ISO)

En la determinación de la tenacidad a la fractura mediante pruebas de tensión se utilizan probetas estandarizadas con una muesca, las cuales deben de ser preagrietadas aplicando cargas de fatiga. La prueba consiste en cargar por tensión las probetas hasta la fractura final para así obtener una curva carga-desplazamiento, con lo que se obtiene el valor de la tenacidad a la fractura del material. Para realizar esta prueba es necesario cumplir con diversas especificaciones, condiciones de prueba y con altas tolerancias geométricas, lo que complica la realización de este tipo de prueba [8].

Por otro lado, también se puede obtener la tenacidad a la fractura utilizando pruebas de impacto Charpy, en la cual se utilizan probetas estandarizadas con una muesca, las cuales son ensayadas en una máquina de pruebas de impacto; de esta prueba se obtiene la energía que absorbe por el material y, posteriormente, utilizando algunas correlaciones, se obtiene la tenacidad a la fractura del material.

Con la obtención de la tenacidad a la fractura es posible determinar si la propagación de las grietas es estable o inestable. La propagación estable se asocia con un comportamiento dúctil del material y, por lo tanto, se considera que la fractura total del material no sucederá en este tipo de comportamiento. Por otra parte la propagación inestable de las grietas se asocia con

un comportamiento frágil, lo que tiene como consecuencia que la fractura total del material ocurra inesperadamente. Para materiales que tienen una tenacidad a la fractura relativamente alta, el comportamiento de la carga durante las pruebas puede progresar de lineal-elástico a elastoplástico; cuando esto sucede es necesario calcular parámetros no lineales, como la integral J o el desplazamiento de la abertura en la punta de la grieta (CTOD); y para materiales con comportamiento lineal el parámetro comúnmente obtenido es la tenacidad a la fractura en deformación plana K_{Ic} [9].

Al estudiar los procesos de fractura y de estabilidad estructural de un determinado material, se considera la formación y propagación de grietas en el material, lo cual ha evitado fallas catastróficas que pueden ocasionar diversos accidentes durante la operación de diferentes mecanismos, o peor aún, pérdida de vidas humanas. Los estudios de mecánica de la fractura también permiten mejorar el diseño, así como los procesos de fabricación de materiales.

La mecánica de la fractura utiliza los resultados obtenidos de las pruebas para después analizarlos y obtener criterios óptimos de retiro que aseguran la integridad de los componentes mecánicos. En la actualidad muchos componentes mecánicos no están completamente caracterizados, por lo cual es de suma importancia obtener la mayor información posible para poder realizar un retiro óptimo de estos componentes [10], lo tendrá como consecuencia un ahorro en su mantenimiento.

La información obtenida a partir de pruebas relacionadas con la mecánica de la fractura es utilizada para modelar el comportamiento de diferentes elementos mecánicos con el objetivo de desarrollar nuevos materiales con mejores propiedades, además se han podido determinar las causas de las fallas de diversos elementos mecánicos cuando se encuentran en servicio.

La selección efectiva de un material para satisfacer una necesidad de diseño se lleva a cabo todos los días en todas las áreas de conocimiento. El proceso de diseño puede variar desde simplemente volver a la especificación de un material utilizado anteriormente o utilizar uno nuevo con mejores características. [11].

1.2 Importancia de la caracterización de los materiales

La caracterización de los materiales tiene gran influencia en nuestra vida cotidiana, por ejemplo: en el transporte, en la vestimenta, en la comunicación, etc. La caracterización de los materiales ha sido de gran importancia para lograr el desarrollo de nuevos materiales con características especiales que satisfagan las necesidades actuales de nuestra sociedad.

Anteriormente el desarrollo y avance de los materiales fue muy lento, hasta que la caracterización de los materiales generó un avance significativo en esta materia, pues fue posible relacionar las propiedades de un material con una aplicación. Además, este campo de estudio abrió camino a la fabricación de nuevos materiales con mejores propiedades.

El desarrollo de nuevos materiales ha permitido un mejoramiento en la calidad de vida del hombre porque se han superado las expectativas de un gran número de áreas del conocimiento como es el caso de la ingeniería. En la actualidad no todos los países invierten en el desarrollo y tecnología, pero los que si lo hacen tienen la capacidad de generar su propia tecnología y, en algunos casos, expórtala.

El progreso de la tecnología va asociado con la disponibilidad de los materiales más adecuados. La completa comprensión de un material es el primer paso para el progreso de una tecnología, como ocurre con la fabricación de los automóviles que es posible gracias a la creación de un acero idóneo y de un costo aceptable [4].

Actualmente para el diseño de cualquier elemento o mecanismo es imprescindible conocer el material con el que se va a trabajar, lo cual incluye el tipo de estructura interna con el que cuenta, su composición y sus propiedades mecánicas, etc.; todo esto con la finalidad de seleccionar el material más adecuado para una determinada aplicación. Al hacer más eficientes los diseños y los procesos de fabricación se influye directamente en un óptimo gasto económico.

Los países con una inversión baja en investigación y de desarrollo tecnológico, como es el caso de México, tienen la necesidad de importar gran parte de su tecnología. Actualmente algunos de estos componentes mecánicos importados no cuentan con una caracterización completa del material del cual están fabricados; y en algunos casos la información que el proveedor de material otorga no incluye propiedades como la tenacidad a la fractura K_{Ic} . En estos casos la mejor opción es realizar una caracterización completa del material.

Una consecuencia de la baja inversión en investigación y desarrollo tecnológico en México es que se ha creado una dependencia tecnológica del extranjero. Un ejemplo de esta dependencia se observa en el STC Metro, el cual es un servicio vital para la Ciudad de México cuyo diseño y mantenimiento se realiza principalmente por tecnología y mano de obra extranjera.

Actualmente, el STC Metro opera en condiciones diferentes de las que fue diseñado debido al crecimiento de la población. Un componente mecánico considerado de seguridad y que no tiene un criterio de retiro óptimo es la MRP de los vagones del STC Metro. Es importante realizar nuevos estudios sobre los componentes mecánicos considerando nuevas variables como son el número de pasajeros, número de recorridos, el efecto del asentamiento del sueldo de la Ciudad de México, ya que, de no considerar esta información la MRP, se está retirando de forma empírica, lo cual puede tener como consecuencia un mayor gasto en su mantenimiento.

El primer paso para realizar estos estudios es determinar la tenacidad a la fractura del material de la MRP. Una vez determinada esta propiedad se establecerá la base para realizar un análisis mediante la mecánica de la fractura, lo cual permitirá establecer el tamaño crítico de las grietas y poder realizar un retiro óptimo de este componente.

1.3 Alcances

El alcance de este estudio es determinar la tenacidad a la fractura del material de la MRP de los vagones del STC Metro utilizando pruebas de tensión y pruebas de impacto Charpy.

1.4 Objetivos

Objetivo general:

Determinar experimentalmente la tenacidad a la fractura del material de la MRP de los vagones del STC Metro.

Objetivos particulares:

1. Realizar un análisis bibliográfico de las investigaciones, artículos y normas relacionadas con la obtención de la tenacidad a la fractura utilizando pruebas de tensión.
2. Realizar análisis bibliográfico de investigaciones, artículos y normas relacionadas con la determinación de la tenacidad a la fractura utilizando pruebas de impacto Charpy.
3. Fabricar y preparar probetas estandarizadas para obtener la tenacidad a la fractura utilizando pruebas de tensión.
4. Fabricar probetas estandarizadas para determinar la tenacidad a la fractura utilizando pruebas de impacto Charpy.
5. Realizar pruebas de tensión para determinar la tenacidad a la fractura.
6. Realizar pruebas de impacto Charpy para determinar la tenacidad a la fractura.

7. Analizar los resultados de las pruebas de tensión para determinar la tenacidad a la fractura.
8. Analizar los resultados de las pruebas de impacto Charpy para determinar la tenacidad a la fractura.
9. Comparar los resultados obtenidos de las pruebas de tensión y de impacto Charpy para obtener la tenacidad a la fractura.

1.5 Aportaciones

- Obtención de la tenacidad a la fractura del material de la MRP utilizando pruebas de tensión.
- Obtención de la tenacidad a la fractura del material de la MRP utilizando pruebas de impacto Charpy.

1.6 Antecedentes

El antecedente inmediato de esta investigación es el trabajo de tesis realizado por Y. T. Tlapalama Fuertes [12] titulado “Análisis de la iniciación de grietas por fatiga en la maza de rueda portadora de los vagones del Sistema de Transporte Colectivo Metro, utilizando métodos numéricos y experimentales”.

1.7 Metodología general

Para cumplir con los objetivos propuestos para determinar experimentalmente la tenacidad a la fractura del material de la MRP de los vagones del STC Metro se siguió la siguiente metodología general:

- 1.- Realizar una revisión bibliográfica relacionada con la determinación de la tenacidad a la fractura utilizando pruebas de tensión.

- 2.- Realizar una revisión bibliográfica relacionada con la determinación de la tenacidad a la fractura utilizando pruebas de impacto Charpy.
- 3.- Fabricación y preparación de las probetas para determinar la tenacidad a la fractura utilizando pruebas de tensión.
- 4.- Fabricación de las probetas para determinar la tenacidad a la fractura utilizando pruebas de impacto Charpy.
- 5.- Determinar las condiciones de prueba para realizar las pruebas de tensión y de impacto Charpy.
- 6.- Obtener la tenacidad a la fractura del material realizando pruebas de tensión.
- 7.- Obtener la tenacidad a la fractura del material realizando pruebas de impacto Charpy.
- 8.- Realizar un análisis y comparación de los resultados obtenidos de las pruebas de tensión y de impacto Charpy para determinar la tenacidad a la fractura.

En la figura 1.1 se presenta un esquema donde se resume la metodología propuesta.

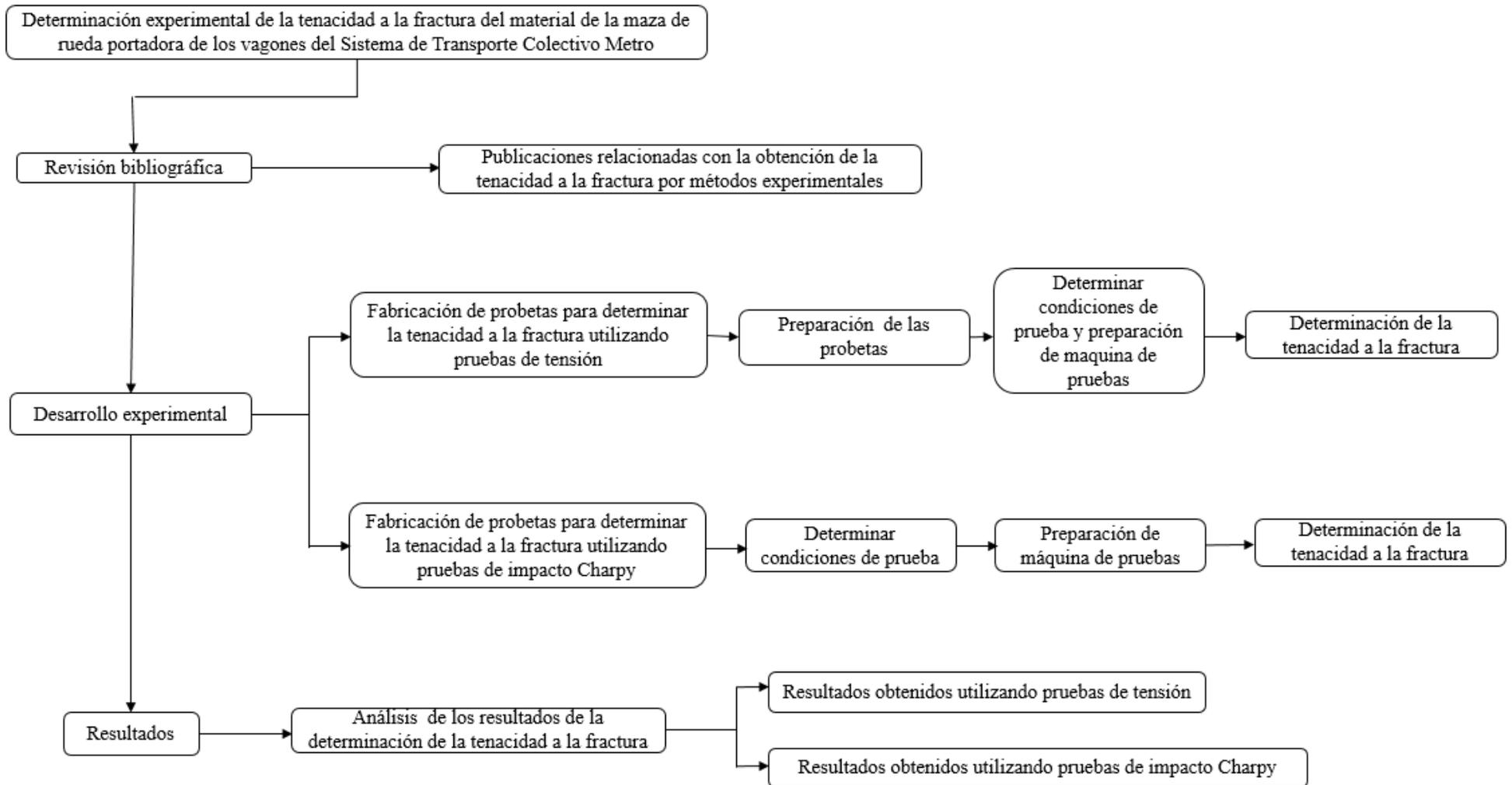


Figura 1.1. Metodología general.

Capítulo 2: Análisis bibliográfico

En este capítulo se presenta la revisión bibliográfica relacionada con la determinación de la tenacidad a la fractura utilizando métodos experimentales.

2.1 Introducción

Actualmente, en el proceso de diseño de elementos mecánicos, los materiales son considerados ideales, es decir, sin defectos; pero en casos reales todos los materiales contienen defectos como grietas. La tenacidad a la fractura K_{Ic} caracteriza la resistencia de un material a la propagación de las grietas. Utilizando esta propiedad y realizando un análisis utilizando la mecánica de la fractura es posible determinar el esfuerzo máximo que un material agrietado puede resistir. O a partir de las condiciones de operación de un elemento mecánico se puede determinar el tamaño crítico de las grietas y el tiempo que tomará alcanzar esta longitud. De esta manera se puede obtener un criterio para realizar el retiro óptimo de un componente.

En la actualidad existen distintas formas de determinar la tenacidad a la fractura. Entre las principales se encuentran las pruebas de tensión con probetas preagrietadas y las pruebas de impacto Charpy. A continuación se presenta una revisión bibliográfica de las publicaciones relacionadas con este tipo de pruebas.

2.2 Métodos para determinar la tenacidad a la fractura

Actualmente existen diferentes métodos para determinar la tenacidad a la fractura como lo son los métodos analíticos, numéricos y experimentales. Sin embargo, para poder utilizar los métodos analíticos y numéricos es necesario realizar pruebas experimentales para corroborar los resultados obtenidos. Por esta razón, esta investigación se centró en los métodos experimentales entre los que destacan los siguientes:

- Determinación de la tenacidad a la fractura a través de la metodología de la norma ASTM E399 [1].
- Determinación de la tenacidad a la fractura utilizando pruebas de impacto Charpy.

A continuación se describe cada uno de los métodos experimentales para obtener la tenacidad a la fractura:

Determinación de la tenacidad a la fractura a través de la metodología de la norma ASTM E399 [1]

En la actualidad el procedimiento propuesto por la norma ASTM E399 [1] es uno de los más utilizados para determinar la tenacidad a la fractura K_{Ic} en modo I de fractura (aplicación de cargas a tensión, perpendiculares a los bordes de la grieta de la probeta) y en condiciones de deformación plana. Este procedimiento es el más utilizado debido a que se ha observado que la mayoría de los componentes mecánicos y estructuras en servicio fallan totalmente bajo este tipo de condiciones.

Para realizar las pruebas experimentales se proponen diferentes tipos de probetas, aunque las más utilizadas son: la probeta a flexión y la probeta compacta a tensión. A las probetas se les debe realizar una preparación, la cual consiste en pulir sus superficies y en generar una grieta utilizando cargas de fatiga. A las probetas se les fabrica una muesca para asegurar que el agrietamiento por fatiga se produzca en el lugar correcto. Para asegurar condiciones de deformación plana se recomienda que el ancho W de las probetas sea el doble de su espesor B .

La prueba experimental consiste en cargar por flexión o tensión las probetas hasta la fractura total. Durante la duración total de las pruebas experimentales se debe de obtener la información de la carga P aplicada y del desplazamiento de abertura de la grieta, con el fin de generar la curva carga-desplazamiento. A partir de la información obtenida de esta curva se determina el valor de la tenacidad a la fractura. Finalmente, se realizan una serie de validaciones para garantizar que el valor de la tenacidad a la fractura sea válido.

La principal ventaja de este método es que el procedimiento utilizado es específico para determinar esta propiedad y la información obtenida puede ser utilizada directamente para mejorar el proceso de diseño. La principal desventaja de este método es el costo elevado para la fabricación de las probetas. Debido a las altas tolerancias y a su compleja geometría, la máquina de pruebas debe de tener la capacidad de obtener la información de la carga aplicada y del desplazamiento de la abertura de la grieta durante todo el tiempo que dure la prueba.

En caso de no contar con todos los accesorios necesarios, como las mordazas para realizar las pruebas, éstas deben de ser fabricadas de acuerdo con la máquina de pruebas y con las dimensiones de las probetas, lo cual aumenta el costo. Otra gran desventaja de esta prueba es que la validación de los resultados sólo es posible realizarlas una vez terminadas las pruebas experimentales. Además el hecho de seguir todas las recomendaciones propuestas por la norma no asegura resultados válidos.

Determinación de la tenacidad a la fractura utilizando pruebas de impacto Charpy

La tenacidad a la fractura también se puede obtener realizando pruebas de impacto Charpy. Este tipo de pruebas se realiza principalmente a partir de las recomendaciones de la norma ASTM E23 [2]. Para realizar las pruebas experimentales se propone sólo una geometría de probeta con tres tipos diferentes de muesca. La probeta más utilizada por su facilidad de fabricación es la probeta con muesca en V.

Para realizar las pruebas se utiliza un péndulo para pruebas de impacto. La prueba consiste en fracturar las probetas por cargas de impacto. El objetivo de esta prueba es determinar la energía que el material puede absorber. La energía absorbida por el material se obtiene calculando la diferencia de energía del péndulo antes y después del impacto con la probeta. Esto se realiza mediante las principales características de la máquina de pruebas como es la masa del péndulo, el ángulo inicial, o de caída del péndulo, y el ángulo registrado por la máquina de pruebas después de que el péndulo impactó la probeta (ángulo de acenso). Una vez obtenida la energía absorbida por el material se utilizan correlaciones para obtener la tenacidad a la fractura del material.

Las ventajas de este método es que los resultados obtenidos de la tenacidad a la fractura son más cercanos a al valor real. Además el costo para implementarlo es bajo, la fabricación de las probetas es sencilla, las probetas no necesitan ningún tipo de preparación, además de que no se requieren condiciones de prueba especiales, la máquina de pruebas utilizada solo necesita registrar el ángulo de acenso del péndulo, el procedimiento para realizar las pruebas es sencillo. Las desventajas de este método es que la validación de los resultados se realiza una vez terminadas las pruebas experimentales.

2.3 Publicaciones relacionadas la obtención de la tenacidad a la fractura K_{Ic} utilizando métodos experimentales

A continuación se presenta la revisión bibliográfica relacionada con la determinación de la tenacidad a la fractura utilizando pruebas de tensión:

En la publicación de A. R. Johnson [13] se determinó la tenacidad a la fractura de dos aceros: el AISI M2 y el AISI M7. La principal diferencia de estos materiales es la dureza y la temperatura de austenización, lo cual tiene como consecuencia una diferencia en sus microestructuras. Se utilizaron tres temperaturas 1095 °C, 1150 °C y 1205 °C. El principal objetivo fue observar las diferencias entre microestructuras y la diferencia de resultados utilizando pruebas de impacto Charpy, además, las pruebas se realizaron de acuerdo a las recomendaciones de la norma ASTM E399 [1].

Se utilizaron probetas compactas a tensión para obtener la tenacidad a la fractura K_{Ic} y probetas tipo Charpy para realizar pruebas de impacto instrumentadas. Las dimensiones de la probeta compacta a tensión fueron de 12.7 mm de espesor y un ancho de 41.2 mm. Por otro lado, las probetas de para las pruebas de impacto Charpy tuvieron dimensiones de 16mm de alto, 16 mm de ancho y 57 mm de largo. La preparación de las probetas compactas a tensión, como el preagrietado por cargas de fatiga, fue realizada de acuerdo con las recomendaciones de la norma ASTM E399 [1]. Además, para poder observar el crecimiento de las grietas las probetas compactas a tensión fueron pulidas en ambas superficies.

Para observar el crecimiento de las grietas por fatiga se utilizó un sistema de iluminación sobre la probeta, así como y un microscopio óptico de 4.5x magnificaciones. Para realizar el preagrietado de las probetas y las pruebas de tensión se utilizó una máquina universal de pruebas modelo no especificado. Para realizar el preagrietado se utilizó una precarga de 510 N en el que se dio la carga de fatiga total de 1881 N. También para alcanzar la longitud de grieta de 2.3 mm se necesitaron de 100000 ciclos a 300000 ciclos de carga. De las pruebas de tensión se obtuvieron las curvas carga-desplazamiento para obtener K_{Ic} . Para obtener el desplazamiento de abertura de la grieta se colocaron galgas sobre las probetas.

Por otro lado, para realizar las pruebas de impacto Charpy el autor utilizó una máquina de pruebas de impacto Riehler modificada con una capacidad de impacto de hasta 325 J . La máquina de pruebas disponía de galgas para obtener la deformación de las probetas, también estaba instrumentada para poder la curva carga-tiempo.

De acuerdo con los resultados obtenidos puede observarse que la tenacidad a la fractura de estos materiales es altamente dependiente de la dureza del material, la cual está relacionada con su microestructura. De acuerdo con los resultados la tenacidad a la fractura es mayor en materiales con menor dureza, los cuales fueron tratados a una temperatura de 1095 °C; mientras que para la temperatura de 1220 °C el valor de la tenacidad a la fractura es menor. Este comportamiento se observó para los dos materiales ensayados y bajo las dos pruebas realizadas.

En la publicación de J. R. Hawthorne and T. R. Mager [14] se presentan el análisis realizado para los resultados de las pruebas experimentales para obtener la tenacidad a la fractura K_{IC} y con probetas para pruebas de impacto Charpy. Estos resultados fueron comparados con otros obtenidos con probetas irradiadas con neutrones. El objetivo del estudio fue determinar las diferencias entre las probetas irradiadas y las no irradiadas. El material utilizado para realizar las pruebas fue un acero clase A533-B utilizado para fabricar recipientes a presión.

Las probetas para obtener K_{IC} fueron fabricadas de acuerdo con la norma ASTM E399 [1]. Se utilizaron probetas compacta a tensión C (T), en las cuales el espesor B utilizado fue el recomendado por norma, es decir, 1 pulgada por un ancho de 2 pulgadas. Las probetas que se irradiaron fueron previamente preagrietadas por fatiga, debido a que la irradiación de neutrones tiene como efecto en el material un aumento en sus propiedades, como el esfuerzo de fluencia σ_y , con lo cual dificultaría el preagrietamiento.

La validación de las pruebas de fatiga pudo ser realizada una vez terminadas las pruebas experimentales. La irradiación de las probetas se realizó en un reactor UCCR 4-A. Las pruebas experimentales fueron realizadas en una maquina universal de pruebas.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se observó una mejora en las propiedades mecánicas de las probetas irradiadas, como son el esfuerzo de fluencia, el cual, en probetas sin irradiar, fue de 74.2 ksi; mientras que en probetas irradiadas fue de 125.5 ksi; es decir, tuvo un aumento del 69% en esta propiedad. El esfuerzo a la tensión también se vio afectado: antes de la irradiación era de 94.2 ksi y después fue de 126.3 ksi, aumento un 34%. También el porcentaje de la reducción del área se vio afectada, de 61.7 a 43.8, se redujo un 29.01%.

En la publicación de F. I. Baratta y colaboradores [15] se realiza el cálculo teórico por complianza para la probeta arco a tensión A (T) y la verificación experimental de estas predicciones. Este espécimen es un segmento de un disco anular cargado a flexión de tres puntos con los soportes de rodillos situados en la superficie interior. La línea de complianza de carga se determina principalmente utilizando de la ecuación de Irwin, la cual relaciona la tasa el cambio de longitud de la grieta con la tasa de liberación de energía de deformación. La velocidad de liberación de energía de deformación se determinó a partir de la solución del factor de intensidad de esfuerzos

Los autores observaron que las grietas más profundas presentaban una deformación plástica significativa debido a los soportes de rodillos de la máquina de pruebas. Los resultados experimentales sugieren que cuando, existen pequeñas cantidades de desplazamiento, la probeta se deforma de acuerdo con la ecuación de predicción de Irwin.

Para que esto ocurra, la probeta debe estar relativamente libre para moverse con relación a los rodillos. Cuando los rodillos restringen este movimiento relativo, el único desplazamiento observado es el movimiento de la localización del soporte del rodillo en relación con el movimiento del punto de carga. Por último la fricción pin con la probeta puede cambiar drásticamente la respuesta de la complianza.

En cuanto a las pruebas para determinar K_{Ic} , después de terminadas las pruebas experimentales se realizó la validación de éstas, las cuales no fueron válidas. De acuerdo con probeta utilizada C (T), el espesor no fue suficiente para proporcionar valores K_{Ic} válidos.

Las pruebas para obtener K_{Ic} deberán ser repetidas utilizando probetas con un mayor espesor B o utilizando la norma ASTM 1820 [16].

En la publicación de H. Nordberg y B. Aronsson [17] se presentan el análisis de la propagación de las grietas por fatiga y la obtención de la tenacidad a la fractura en acero y en cinco aleaciones de aluminio. El análisis de la velocidad de propagación de la grietas se realizó utilizando la ley de Paris.

Los materiales utilizados fueron una fundición de acero con composición 0-17 C, 0.5 Mn, 0.5 Si, además cinco aleaciones de aluminio: la aleación Al-4.5 Mg, la aleación Al -5 Zn-1 Mg (MH), la aleación Al -5 Zn-1 Mg (OA), la aleación Al-1 Si-1 Mg-1 Mn (MH) y la aleación Al-1 Si-1 Mg-1 Mn (OA). A las últimas cuatro aleaciones de aluminio se les realizó un templado.

Las principales propiedades mecánicas de los materiales utilizados, como el esfuerzo de fluencia y la resistencia a la tensión, fueron presentadas. Donde la aleación de aluminio Al -5 Zn-1 Mg (MH) presentó el mayor esfuerzo de fluencia con 39 kPa/mm²; mientras que el acero presento el menor esfuerzo de fluencia con 20 kPa/mm². La aleación de aluminio Al -5 Zn-1 Mg (MH) también presentó la mayor resistencia a la tensión con 44 kPa/mm², seguida por el acero con 41 kPa/mm². La aleación de aluminio Al-1 Si-1 Mg-1 Mn (OA) presentó la menor resistencia a la tensión con 26 kPa/mm².

Las probetas utilizadas para las pruebas experimentales fueron compactas a tensión. Para las aleaciones de aluminio se utilizó una máquina de pruebas Sehenck y para el acero se usó una máquina de pruebas Amsler. El análisis fractográfico fue realizado con dos microscopios electrónicos de barrido el Phitips EM 300 y el microscopio electrónico de barrido Cambridge.

De los resultados obtenidos de las pruebas de fatiga se obtuvo para el acero la gráfica $\frac{da}{dN}$ contra la longitud de la grieta “a”; en ella se puede observar que la longitud máxima alcanzada en las probetas fue de 8 mm. Para las aleaciones de aluminio se presenta la graficas $\frac{da}{dN}$ contra

ΔK , en la cual se puede observar que la aleación Al -5 Zn-1 Mg (MH) muestra una mayor resistencia a la propagación de las grietas; mientras que la aleación Al-1 Si-1 Mg-1 Mn (MH) presentó la menor resistencia a la propagación de las grietas por fatiga.

Después de que se realizaron las pruebas experimentales las superficies de fractura fueron analizadas con los microscopios electrónicos de barrido y se observó que la iniciación de las grietas para los aceros ocurrió en inclusiones no metálicas depositadas durante la fabricación del material.

Se realizó el análisis de la propagación de grietas por fatiga en aleaciones de aluminio anodizado en la publicación de A. Cree y colaboradores [18]. Para las pruebas se utilizaron dos aleaciones de aluminio: la aleación 2014-T4 y la aleación 2024-T4. Para ver el efecto del anodizado en la propagación de grietas por fatiga también se utilizaron aleaciones sin anodizar.

Para las pruebas experimentales se fabricaron probetas con una muesca a tensión (SEN) con 55 mm de ancho y 140 mm de largo. Se utilizó una máquina servohidráulica ESH, con una carga mínima de 1.6 kN y máxima de 2.9 kN a una frecuencia de 25 Hz, con una tasa de esfuerzo $R=0.1$.

Además, durante las pruebas de fatiga se observó el crecimiento de las grietas con un microscopio móvil. Las pruebas experimentales fueron realizadas de acuerdo con la norma ASTM E647 [19] y ASTM E399 [1].

De la observación del crecimiento de las grietas se generó una gráfica del crecimiento de las grietas contra el número de ciclos aplicados a la probeta. En la gráfica se observa el comportamiento de las cuatro probetas dos anodizadas y dos sin anodizar. De la gráfica se puede observar que la probeta fabricada con la aleación 2014-T4 anodizada se fracturó totalmente aproximadamente a los 600 ciclos con una longitud de grieta de 18 mm. En tanto la probeta de la misma aleación sin anodizar se fracturó totalmente aproximadamente a los 700 ciclos con una longitud de grieta de 20 mm.

En tanto para las probetas fabricadas con la aleación 2024-T4 anodizadas la fractura total ocurrió aproximadamente a los 150000 ciclos con una longitud de grieta de 18 mm; mientras que la probeta sin anodizar se fracturó a los 300000 ciclos con una longitud de grieta de 18 mm.

De acuerdo con los resultados obtenidos, al realizar el anodizado a la aleaciones de aluminio utilizadas en esta investigación se reduce la resistencia a la propagación de la grietas por fatiga; esto se debe a que el anodizado crea una capa de óxido que protege a la aleación de aluminio contra ambientes corrosivos, pero esta capa que se crea con un gran número de defectos que actúan como concentradores de esfuerzos, reduciendo la vida a la fatiga del material.

Debido a que el material observado contiene gran cantidad de porosidades, se analizaron algunas publicaciones donde se investigó la manera en que éstas influyen, como en la publicación de E. Palma [20] en la cual se presenta el análisis de la influencia de las porosidades en el daño acumulado por fatiga, utilizando la regla de la acumulación de daño lineal Palmgren-Miner. Estos resultados fueron comparados con los obtenidos experimentalmente.

El material utilizado fue un hierro ASC 100.29, del cual se utilizaron dos tipos de probetas con diferentes porcentajes de porosidades, 12.4% y 4.1%, respectivamente. Las probetas utilizadas tenían una geometría cilíndrica con una longitud de 88 mm, un diámetro de 12.7 mm. La zona central de las probetas tenían un diámetro de 5 mm y una longitud de 10 mm.

Para las pruebas experimentales se utilizó una maquina servohidráulica con un esfuerzo de amplitud constante. La tasa de esfuerzo utilizada fue $R=-1$ con una frecuencia de 10 Hz. De las pruebas de fatiga se obtuvieron las curvas S-N para las probetas con diferente porcentaje de porosidades. De ellas se determinaron los siguientes límites de fatiga. Para la probeta con 12.4% el límite de fatiga se encontró a una amplitud de esfuerzo de 59 MPa a los 10^6 ciclos, por otro lado el límite de fatiga de la probeta con 4.1% de porosidades se encontró a una amplitud de esfuerzos de 115 MPa a los 10^6 ciclos.

La información obtenida de las curvas S-N fue comparada con la obtenida con la regla de Palmgren-Miner. Se obtuvo que el límite de fatiga para el material con 4.1% de porosidades se redujo a 105 MPa; y para el material con 12.4% de porosidades también se redujo a 46 MPa. Esto se debió a que la regla de la acumulación de daño lineal Palmgren-Miner considera que todo el daño por fatiga generado es absorbido por el material.

Se pudo observar que la probeta fabricada con el material con un contenido menor de porosidades es más resistente al daño acumulado por fatiga. Esto debido a que las porosidades actúan como concentradores de esfuerzos, los cuales demeritan las propiedades mecánicas del material.

En la publicación se presentan las dos micrografías obtenidas con un microscopio electrónico de barrido. En las dos microestructuras de los materiales utilizados en la investigación se pudo observar la gran cantidad de porosidades que contenía el material: 12.4%; en tanto el material con un 4.1% se le observaron una cantidad muy reducida de porosidades.

En el estudio de B. Kosec y colaboradores [21] se presenta el análisis de la propagación de grietas por fatiga en un rin de una aéreo nave por medio de pruebas no destructivas entre ellas la fractografía. El rin está fabricado de una aleación de aluminio 2014-T6. Las grietas detectadas eran grietas típicas de daño por fatiga.

Las grietas se detectaron durante la inspección periódica de los componentes, esto en función del número de horas de vuelo, el tiempo de vida de los componentes y lo especificado por las estrictas regulaciones internacionales. Los ensayos no destructivos más utilizados son: corriente de Foucault, ultrasonido, polvos magnéticos, líquidos penetrantes y examen radiográfico. En este caso la grieta fue revelada por el método de corriente de Foucault.

La grieta detectada tenía una longitud de 38 mm y se había propagado a través de la pared del rin. A simple vista también se detectaron pequeñas picaduras en la superficie donde existe el contacto de rin con el neumático. Algunas de estas picaduras eran por acción de la corrosión.

En el estudio se muestran diferentes micrografías de la superficie agrietada, las cuales presentan picaduras a diferentes aumentos.

Utilizando un microscopio electrónico de barrido (SEM) se obtuvo la morfología de las picaduras por corrosión. Además se observó que algunas de las grietas se fusionaron en una más grande. También se encontraron pequeñas picaduras de corrosión por todo el rin, las cuales sólo son visibles con el microscopio.

Se analizó el material de la superficie agrietada para obtener su composición química utilizando EDS (espectrometría de energía dispersiva), de la cual se obtuvo que los elementos en la superficie de fractura eran azufre y carbono que probablemente se depositaron sobre las superficies de las grietas durante el aterrizaje, cuando la temperatura del rin y el neumático se aumentó bruscamente.

Se obtuvo una probeta de la pared de la llanta para medir los parámetros de la ecuación de Paris, así como para calcular la velocidad de propagación de la grieta de fatiga, la relación R fue de $R=0.1$. Se obtuvo un diagrama de la tenacidad a la fractura contra el exponente “m”, de lo cual resultó que el valor del esfuerzo crítico, el cual fue de 150 MPa. No se dan más detalles del experimento.

Con este análisis se determinó que el tamaño de la grieta era menor al tamaño crítico para la propagación de la grieta inestable. No fue posible determinar el sitio de inicio de la grieta. Se puntualiza que el análisis se debe realizar por personal altamente capacitado y con un buen criterio para decidir qué medidas tomar, ya que si se detecta un desperfecto en cualquier componente este debe ser reparado o reemplazado de inmediato.

El análisis de la propagación de las grietas por fatiga de una aleación de Ti-48Al se presenta en la publicación de S. Hamada y colaboradores [22]. Para el realizar el análisis se utilizaron métodos experimentales y fractográficos; además las pruebas se realizaron al vacío y al aire libre.

Las pruebas experimentales se realizaron de acuerdo con la norma ASTM E399 [1]. Se utilizaron probetas del tipo compacta a tensión, con un largo de 35 mm y un espesor de 6 mm. Las pruebas se realizaron en una máquina de pruebas servohidráulica MTS, utilizando dos tasas de esfuerzo $R=0.1$ y $R=0.5$ a una frecuencia de 20 Hz.

De las pruebas experimentales y utilizando la ley de Paris se obtuvieron las gráficas del material en las diferentes condiciones de prueba. En ellas se puede observar que, a una tasa de esfuerzos $R=0.1$, el inicio de la propagación de las grietas ocurrió primero en la probeta que estaba al aire libre. Cuando utilizaron una tasa de esfuerzos $R=0.5$, la propagación de las grietas ocurrió también primero en la probeta cuya prueba se realizó al aire libre, pero la propagación de la grieta ocurrió más rápido.

La propagación de las grietas ocurrió primero en las probetas donde se realizó la prueba al aire libre debido a que el material que se encontraba al vacío se encontraba muy comprimido, dificultando la propagación de las grietas. También la propagación de las grietas ocurrió primero en las pruebas donde se utilizó una tasa de esfuerzos $R=0.5$ debido a que la amplitud de esfuerzos utilizada fue mayor.

Después de las pruebas de fatiga se realizó un análisis de las superficies de fractura utilizando un microscopio electrónico de barrido. En una imagen se observó la superficie de fractura del material al aire libre con una tasa de esfuerzo $R=0.1$, en ella se observa la trayectoria de la grieta, misma que presenta cambios en su trayectoria, además de la presencia de grietas secundarias. En otra imagen se muestra la superficie de fractura de una probeta analizada al aire libre, la cual tiene una tasa de esfuerzos $R=0.5$. En ella se observaron numerosas grietas secundarias, debido a que la amplitud de esfuerzos utilizada fue mayor. No presentan imágenes del material con condiciones de vacío.

X. Wang y J. Fan en su publicación [23] presenta el análisis de la iniciación y propagación de las grietas por fatiga, el cual se realiza por medio de microscopía electrónica de barrido a una aleación de magnesio.

El material utilizado fueron una aleación de magnesio AM50; de este se fabricaron probetas tipo compacta a tensión, el radio de la muesca utilizado fue de $\rho = 80 \mu\text{m}$, para facilitar la observación con el microscopio electrónico de barrido la superficie de las probetas fueron pulidas.

Las pruebas de fatiga fueron realizadas con una máquina servohidráulica a temperatura ambiente, se utilizó una tasa de esfuerzo $R=0.1$, a una frecuencia de 0.1 Hz, y las amplitudes de esfuerzo utilizadas fueron de 120 y 160 MPa. Las pruebas de fatiga se realizaron en un rango de 10^3 a 10^6 ciclos. De las pruebas experimentales se obtuvo la curva S-N, en la cual observó que el límite de fatiga se encuentra aproximadamente a una amplitud de esfuerzo de 60 MPa a los 10^5 ciclos. También se observó que la propagación de las grietas ocurrió a una amplitud de esfuerzo de 120 MPa a 82 657 ciclos.

Después de las pruebas experimentales se realizó un análisis fractográfico con un microscopio electrónico de barrido modelo no especificado. Se observó que cuando ocurrió el inicio de las grietas ésta comenzó con una bifurcación con un tamaño aproximado de 50 μm .

Se observó, además, que cuando el esfuerzo de fluencia del material fue rebasado, el crecimiento de las grietas comenzó; así mismo se observó que la geometría de inicio de las grietas tomó una forma en “V” atribuido a la microestructura. Una vez que la prueba de fatiga alcanzó los 140 639 ciclos, la geometría de la grieta pasó de “V” a una forma más recta con una longitud de grieta de 134 μm .

En la publicación de L. Batur y colaboradores [24] se presentan el análisis del efecto de la microestructura en el inicio y propagación de las grietas por fatiga en un acero 16Mn. La diferencia de la microestructura del material radica en que a una se le realizó un proceso de normalizado a altas temperaturas, mientras que a la otra no se le realizó ningún tipo de proceso después de su fabricación.

Para las pruebas de fatiga se utilizaron probetas a flexión a tres puntos preagrietadas. Para la analizar el inicio de daño por fatiga y la estimación de la vida total a la fatiga se utilizó una máquina Amsler 422 de alta frecuencia. La frecuencia utilizada fue de 110 a 130 Hz, mientras que la tasa de esfuerzo R utilizada fue de un rango de 0.2 a 0.6.

Para el análisis de la propagación de grietas por fatiga se utilizó una máquina de pruebas servohidráulica Instron 1251 a una frecuencia de 30 Hz. Para facilitar la visualización y el análisis de la propagación de las grietas se pulió la zona de propagación. Además, en la propagación de las grietas se colocaron dos microscopios móviles con características no especificadas, para ir analizando el proceso de la propagación de las grietas.

De los resultados de las pruebas de fatiga se obtuvieron las curvas S-N, en las cuales se observa que el inicio y la vida a la fatiga decrecen en el acero al que se le realizó el normalizado a altas temperaturas. Para la propagación se obtuvo el gráfico de la ley de París, tanto para el acero con microestructura normalizada y para el acero con microestructura sin ningún proceso después de la fabricación. En ellos se observa que la propagación de las grietas es menor en el acero que no recibió ningún tratamiento que en el que sí lo recibió.

En la publicación se presentan diferentes micrografías. En las primeras se observa la microestructura de ambas, en las que se puede observar que la microestructura del acero sin tratamiento de normalizado es más uniforme que la del acero con el tratamiento de normalizado a altas temperaturas. También se presentan micrografías de la grietas, en las cuales se observa que en el acero sin ningún tratamiento se tiene una sola dirección; mientras que en la microestructura que recibió el tratamiento de normalizado la dirección de grieta es menos uniforme.

También se presenta una micrografía obtenida con un microscopio electrónico de barrido de características no especificadas. En ella se puede observar que el inicio de las grietas se dio en una esquina de las probetas.

En la publicación de J. Schumble [25] se describe el procedimiento para analizar el crecimiento de las grietas por fatiga en una aleación de aluminio 7050-T7451, la cual es utilizada en la industria aeronáutica, la prueba se realizó con placas de diferente espesor. El autor señala que la aleación de aluminio 7050-T7451 es muy resistente en comparación con otras aleaciones de aluminio como la serie 7045. También se mencionó que la aleación de aluminio 7050-T7451 es un material anisotrópico que necesita una caracterización completa de todas sus propiedades.

La tenacidad a la fractura del material es conocida, la cual ésta varía con respecto a la orientación que se analice por ejemplo para la orientación L-T se tiene un K_{IC} de $31.9 \text{ Mpa}\sqrt{\text{m}}$, en T-L $27.5 \text{ Mpa}\sqrt{\text{m}}$, y S-L N/A, y para una placa más delgada se tiene un K_{IC} en la dirección L-T $26.4 \text{ Mpa}\sqrt{\text{m}}$, T-L $24.2 \text{ Mpa}\sqrt{\text{m}}$, S-L $23.1 \text{ Mpa}\sqrt{\text{m}}$.

En esta publicación se analizó el crecimiento de las grietas sólo en la dirección L-S. También se caracterizó la morfología de las grietas. El experimento para el análisis del crecimiento de las grietas por fatiga se basó en la norma ASTM E647 [19]. La probeta utilizada fue la compacta de tensión basado en la norma ASTM E399 [1]. Del experimento se realizaron gráficos o curvas da/dN contra ΔK , las cuales se analizaron para saber la influencia que tiene la longitud de grieta sobre los mecanismos asociados con la morfología de las grietas del material.

El experimento fue realizado con una máquina servohidráulica modelo MST 810 con una capacidad de 22 kip . La longitud de la grieta fue medida usando un telemicroscopio móvil. La inspección de la superficie fracturada fue realizada utilizando un microscopio electrónico de barrido. En la inspección se observó que había poros los cuales pueden ser los causantes del inicio de las grietas. También se hace una suposición en la cual se cree que estos poros se crearon durante la aplicación de un tratamiento térmico que se le da a la aleación (no se especifica el tipo de tratamiento).

Del estudio realizado se observó que en la orientación L-S el material está propenso a sufrir una redirección de las grietas, esto durante las primeras fases de crecimiento de las grietas. También se observó que la iniciación de las grietas se da en poros internos, probablemente debido a la laminación a lo largo de los granos, ya que estos se encuentran en números cada vez mayores hasta finalmente fundirse para formar grandes grietas internas en la probeta, dichas grietas son paralelas a la orientación de carga.

En la publicación realizada por K. Tokaji y colaboradores [26] se presenta el estudio del comportamiento de la propagación de las grietas por fatiga en probetas de dos aleaciones de magnesio, una rolada (AZ31) y otra extruida (AZ61). Además se observaron las superficies de las grietas con técnicas fractográficas con diferentes niveles de factor de intensidad de esfuerzos. Para la prueba se utilizaron probetas compactas de tensión con un ancho de 50,8 mm, además a las probetas se les realizó un preagrietamiento de 2 mm.

Las pruebas se realizaron en diferentes condiciones a temperatura ambiente para lo cual se mantuvo una temperatura en un rango entre 20 a 25 °C y una humedad entre el 50% al 70%; al aire seco en esta condición el punto de rocío se mantuvo en 60°C y por último en agua destilada la cual se mantuvo a 30 °C y se distribuyó con una bomba a una celda de corrosión unida a la superficie de la probeta.

La prueba experimental se realizó usando una máquina de ensayo de fatiga electro-hidráulica con una capacidad de carga de 19 kN. Se utilizó una relación de tensión $R = 0.5$. La frecuencia para la prueba fue sinodal de 10 Hz para la temperatura al ambiente y con aire seco, mientras que para el agua destilada fue de 1 Hz. Para examinar el efecto de la frecuencia en la propagación de grietas por fatiga también se utilizaron frecuencias de 0.01, 0.1, 1 y 10 Hz.

En la investigación se encontró que la tasa de propagación de grietas por fatiga en agua destilada y a temperatura ambiente era casi la misma, mientras que en aire seco era más lenta. Una vez que ocurrió la cerradura de grieta, la tasa de crecimiento de grieta por fatiga a temperatura al ambiente fue más rápida, seguida del agua destilada y en último lugar en el aire seco.

La longitud de grieta se midió con un microscopio móvil aplicando el método de complianza. Después del experimento las superficies de fractura fueron analizadas utilizando un microscopio electrónico de barrido (SEM). En las micrografías obtenidas en los diferentes niveles del factor de intensidad de esfuerzos se observó que la morfología de la superficie de fractura era parecida en ambas aleaciones. También se encontró que las superficies de fractura eran de característica frágil independientemente de nivel del factor de intensidad de esfuerzos.

Se comparó el comportamiento de las aleaciones de magnesio con otros metales más ligeros como las aleaciones de aluminio y titanio puro, y se encontró que la resistencia de las aleaciones de magnesio era considerablemente menor a la de las otras aleaciones de materiales ligeros. Después de la cerradura de grieta, ésta seguía siendo menor en resistencia a la propagación de grietas de las aleaciones de magnesio que otras aleaciones de materiales ligeros. Esta baja en la resistencia la atribuyeron al efecto del ambiente sobre la aleación de magnesio.

En la publicación de J. Pang y colaboradores [27] se muestran los resultados obtenidos de las pruebas experimentales y fractográficas realizadas en cuatro aleaciones de cobre Cu-Be denominadas A, B, C y D. El principal interés de la investigación fue analizar la iniciación y propagación de las grietas.

Las pruebas de fatiga con realizaron con una máquina servo hidráulica Instron 8801, a una frecuencia de 40 Hz, con una tasa de esfuerzo $R=-1$. De las pruebas experimentales se obtuvieron las curvas S-N de los materiales A, B, C y D. Se realizaron comparaciones entre las curvas obtenidas, lo cual dio como resultado que el material B mostró la mayor resistencia a la fatiga en un rango de ciclos de 104 a 107 con 323 MPa.

Mientras que el material A mostró una menor resistencia en un rango de ciclos intermedios de 104 a 106 ciclos. A ciclos altos en el rango de 106 a 107 los materiales A y D mostraron un comportamiento casi igual.

En la publicación no se da información del límite de fatiga para ningún material, pero de las curvas S-N se observa que para el material B su curva S-N comienza a ser horizontal a los 107 ciclos a una amplitud de esfuerzo de 320 MPa, aproximadamente. Para el material C la curva comienza a ser horizontal entre los 106 y 107 ciclos a una amplitud de esfuerzo de 240 MPa. Por último para los materiales A y D sus curvas comienzan a ser horizontales a los 107 ciclos a una amplitud de esfuerzo de 200 MPa.

Después de las pruebas de fatiga las superficies de fractura fueron analizadas con un microscopio electrónico de barrido Quanta 600. Con las micrográficas obtenidas se observó que la iniciación de las grietas a bajos niveles de esfuerzo se originó en defectos en la superficie del material y su propagación en este nivel de esfuerzo fue transgranular. A niveles de esfuerzo alto las grietas se originaron por clivaje y su propagación fue intergranular.

También se determinó el tamaño de los granos de los diferentes materiales, obteniendo que los materiales A, C y D tenían un tamaño de grano similar de aproximadamente 46 μm , mientras que el material B tenía un tamaño de grano mucho menor de aproximadamente 9 μm . Se observó que el tamaño de grano influyó en la resistencia a la fatiga, ya que el material con el tamaño de grano más pequeño fue el que mostro mayor resistencia a la fatiga.

En la publicación de G. P. Cammarota y colaboradores [28] se analizaron diferentes métodos estandarizados y no estandarizados para determinar la tenacidad a la fractura utilizando el material de una placa y de un tubo, ambos partes de un avión. Los dos materiales fueron fabricados de una aleación de aluminio 2024. Los métodos estandarizados de prueba fueron: pruebas de impacto Charpy, pruebas de flexión y pruebas para determinar K_{Ic} de acuerdo con la norma ASTM E399 [1].

Además se utilizaron probetas tipo Charpy no estandarizadas preparadas con diferentes profundidades de la muesca y fueron preagrietadas con una longitud de grieta de 1 mm.

Las pruebas de flexión y las realizadas utilizando el procedimiento de la norma ASTM E399 [1] se realizaron en una máquina de pruebas Instron modelo 1195 y otra modelo 8033. Las pruebas de impacto Charpy se realizaron en un péndulo Tinus Olsen modelo 74 y en una máquina de impacto automatizada e instrumentada Dynatup modelo ETI-300.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se pudo observar que el tamaño de la muesca en las probetas de impacto Charpy influyeron en gran manera en los resultados cuando la profundidad de la muesca se encuentra por debajo de los 2 mm incrementando el valor de la tenacidad a la fractura, de modo que la absorción de la energía está fuertemente relacionada con la geometría de los probetas de prueba.

También se observó que la energía de propagación de las grietas es un parámetro completamente independiente e intrínseco de la geometría del material. Por último, se observó que la tenacidad a la fractura de estos materiales es dependiente del tipo de microestructura que tiene el material lo cual fue corroborado realizando observaciones de su microestructura utilizando un microscopio electrónico de transmisión.

Finalmente, los autores concluyen que las relaciones entre los resultados obtenidos a partir de las pruebas de impacto Charpy y de las pruebas realizadas utilizando la metodología de la norma ASTM E399 [1] no difieren en gran medida, por lo cual se infiere que las pruebas de impacto Charpy son más accesibles de realizar por su menor costo, la facilidad para fabricar las probetas y en general la prueba tiene menos restricciones.

2.4 Publicaciones relacionadas con pruebas de impacto Charpy

En un inicio, las pruebas de impacto se realizaron para medir la respuesta de un material a la aplicación de una carga dinámica. Las máquinas de prueba más comunes utilizadas son el péndulo y la torre de caída. Los resultados obtenidos de las pruebas de impacto por lo general resultan en un único valor, el cual correspondiente a la energía de impacto o la energía gastada en fracturar la probeta.

También existen máquinas de pruebas con un grado de instrumentación mediante las cuales se puede obtener la información de las fuerzas de impacto, velocidades de impacto, desplazamientos y la energía de deformación del percutor en cualquier momento durante la prueba dinámica.

El ensayo de impacto Charpy a menudo se utiliza para evaluar la capacidad de absorción de energía de un material, por lo cual muchas veces, por lo práctico de la prueba y por su bajo costo, los resultados obtenidos de esta prueba se toman como la tenacidad a la fractura del material.

Durante la prueba, un péndulo que inicia su movimiento desde una altura conocida describe un arco y posteriormente golpea una probeta con muesca, la rompe y llega a una altura final menor a la inicial. Si se conocen las alturas inicial y final del péndulo, se puede calcular la diferencia de energía potencial.



Figura 2.1 Máquina utilizada para pruebas de impacto Charpy.

Esta diferencia es la energía de impacto absorbida para poder fracturar la probeta. La energía por lo general se obtiene en Joules J o $\text{kg}\cdot\text{m}$. A partir de esta prueba se pueden obtener las propiedades del material como es la temperatura de transición, que es la temperatura a la cual un material cambia de un comportamiento dúctil a un comportamiento frágil. Un material sujeto a cargas de impacto durante las condiciones de servicio deberá de tener una temperatura de transición por debajo de la temperatura de operación.

De acuerdo con L. P. Pook [7], la prueba experimental de impacto en metales se desarrolló de la observación de componentes mecánicos que, estando en operación bajo cargas de impacto, se comportaban de manera frágil. La máquina de pruebas de impacto fue desarrollada por Georges Charpy en 1904, pero fue Bent Russel en 1898 quien primero utilizó una máquina de impacto para realizar pruebas experimentales. A inicios del siglo veinte el uso de la máquina de pruebas de impacto fue completamente establecido como un método para la caracterización de materiales. La norma que rige esta prueba es la ASTM E23 [2].

Para realizar la prueba experimental se utilizan probetas estandarizadas, generalmente con dimensiones de 10x10x55 mm con una muesca en V en una de sus caras. La muesca en V debe tener una profundidad de 2 mm con un ángulo de 45° y un radio interno de curvatura de 0.25 mm. A continuación se presenta la revisión bibliográfica de publicaciones relacionadas con las pruebas experimentales de impacto Charpy.

En la publicación de J. M. Barsom y S. T. Rolfe [3] se realizaron pruebas para determinar si existe alguna correlación entre los resultados obtenidos de las pruebas de impacto Charpy y las pruebas para obtener K_{IC} . Las pruebas fueron realizadas en nueve aceros diferentes: A36, ABS-C, A302-B, HY-80, A517-F, HY-130, 10Ni-Cr-Mo-Co, 18Ni (180) y el 18Ni (250).

La obtención de K_{IC} fue realizada por cargas de flexión. Las probetas fueron preagrietadas por fatiga; además, éstas fueron fabricadas con un espesor de 1 in. Las pruebas se realizaron a una temperatura entre -320 °F a +80 °F. Las probetas CVN fueron probadas bajo cargas de flexión y por impacto, las probetas fueron fabricadas con un espesor de 1 in; éstas también fueron preagrietadas por fatiga. Las pruebas se realizaron con temperaturas de -320 °F a 200 °F.

De acuerdo con los resultados, se observó que en algunos aceros la energía absorbida como función de la temperatura fue mayor en las pruebas de impacto que en las pruebas de flexión. También se pudo observar que la temperatura de transición decrece con el incremento del esfuerzo de fluencia σ_{ys} .

Los resultados mostraron que si existe una correlación entre los resultados de las pruebas para obtener K_{Ic} y las pruebas de impacto Charpy, además utilizando estas correlaciones es posible estimar el valor de K_{Ic} a partir de los resultados obtenidos en una prueba de impacto Charpy.

En la publicación de D. J. Alexander y R. L. Klueh [29] se analizaron los efectos que tiene la variación en el tamaño de las probetas para realizar la prueba experimental de impacto Charpy en materiales ferrosos. Para realizar el análisis se fabricaron probetas con diferentes dimensiones. Unas probetas fueron fabricadas con las dimensiones que se recomiendan en la norma ASTM E 23 [27] de 10 x 10 x 55 mm, con una muesca con un ángulo de 45°, con un radio de 0.25 mm y 2 mm de profundidad. Otras fueron fabricadas con la mitad del tamaño, es decir, de 5 x 5 x 25.4 mm, con una muesca a 30°, con un radio de 0.075 mm y 0.76 mm de profundidad. Por último se fabricaron probetas con dimensiones tres veces menor de 3.33 x 3.33 x 25.4 mm, con una muesca a 30°, con un radio de 0.75 mm y 0.51 mm de profundidad.

Los resultados de muchas comparaciones entre las probetas de diferentes dimensiones mostraron que las probetas de menor tamaño muestran un comportamiento cualitativo similar al de las probetas con dimensiones más grandes, aunque en el rango de temperatura de transición su capacidad de absorción de energía disminuye.

El efecto del tamaño de la muesca utilizada en probetas de menor tamaño también fue analizada y observaron que la menor profundidad de ésta altera el patrón de deformación. También observaron que se reduce la estricción, lo cual tiene como consecuencia una mayor dificultad para que se inicie el clivaje.

Los autores mencionan que se necesita una mejor comprensión de las distribuciones de los esfuerzos y deformaciones para poder explicar completamente este fenómeno, lo cual se puede lograr realizando más pruebas pero con equipo que analice estos valores.

Por su parte, R. D. Koester y S. E Barcus [30] analizaron el efecto que tiene el método utilizado para la fabricación de las muescas de las probetas para realizar las pruebas de impacto Charpy. Para la fabricación de las muescas utilizaron dos métodos: el rectificado y el brocheo. El material utilizado para realizar las pruebas experimentales fue un acero AISI 4340.

Las características de las muescas que se tomaron en cuenta para realizar el análisis fueron: el ángulo de la muesca, el radio de la muesca y la microestructura de la superficie de las probetas. Otros parámetros tomados en cuenta fueron el largo, ancho y espesor de las probetas; además de las condiciones de prueba como la temperatura, la energía absorbida y la expansión lateral de las probetas.

Para realizar las pruebas de impacto Charpy las probetas tuvieron los mismos acabados excepto en las muescas, con dimensiones de 10 x 10 x 55 mm, con una muesca a 46°, con un radio de 0.25 mm y 2 mm de profundidad. Para fabricar las muescas por rectificado se utilizó una máquina Mitsui Modelo 6-12. El brochado se llevó a cabo con un equipo Blacks, Tipo CNB14 Broacher. Las pruebas experimentales se realizaron en una máquina de impacto Tinus Olsen modelo No.64, con capacidad de 358 J.

Las pruebas se realizaron de acuerdo con la norma ASTM E23 [2]. A partir de los resultados obtenidos de las pruebas de impacto Charpy, utilizando probetas con muescas fabricadas con diferentes métodos, se observó que tanto en el rectificado como en el brochado los valores que se obtienen son muy similares. A partir de lo anterior, los autores concluyen que se pueden utilizar libremente cualquiera de estos dos métodos para la fabricación de las muescas.

De acuerdo con la revisión bibliográfica realizada se observó que los métodos experimentales más comunes son las pruebas que utilizan cargas por tensión y flexión. En este tipo de pruebas se utilizan probetas estandarizadas preagrietadas utilizando cargas de fatiga. Las probetas deben de cumplir con dimensiones muy precisas para asegurar que durante el desarrollo de las pruebas se tenga un comportamiento de fractura en condiciones de deformación plana. Si este comportamiento no es asegurado durante la prueba, entonces la prueba será considerada como no valida.

La tenacidad a la fractura también se puede obtener realizando pruebas de impacto Charpy. La diferencia entre esta prueba es que las probetas Charpy no necesitan ninguna preparación como el preagrietado utilizando cargas de fatiga. Actualmente, las pruebas de impacto Charpy son muy usadas para determinar la tenacidad a la fractura debido a su bajo costo y a la sencillez en su realización. De acuerdo con las publicaciones revisadas, el valor que se obtiene de las pruebas de impacto Charpy es muy cercano a los obtenidos por las pruebas de tensión y de flexión. Para realizar las pruebas de impacto Charpy se utilizan principalmente las recomendaciones de la norma ASTM E23 [2].

Por otro lado, las pruebas de tensión realizadas mediante la metodología de la norma ASTM E399 [1] son exclusivas para obtener la tenacidad a la fractura. Sin embargo, realizar este tipo de pruebas es muy complejo debido a las condiciones de prueba, en especial las tolerancias en la fabricación de las probetas, el costo y el seguimiento estricto de las recomendaciones de la norma, lo cual no asegura obtener un resultado valido de la tenacidad a la fractura.

En las pruebas descritas por la norma ASTM E399 [1] hay muchas variables que influyen en el valor obtenido, como la microestructura del material, ya que, si el material contienen una cantidad considerable de imperfecciones, el valor de la tenacidad a la fractura puede variar de una probeta a otra bajo las mismas condiciones de prueba. De igual forma, el tamaño de las probetas también influye en los resultados obtenidos. Es de muy importante que el ancho de las probetas sea del doble del espesor para garantizar las condiciones óptimas para la deformación plana durante las pruebas experimentales

También fue posible observar que, para determinar la tenacidad a la fractura de acuerdo con la norma ASTM E399 [1], se pueden utilizar las recomendaciones de las normas ASTM 1820 [16] y ASTM E647 [19], pues en ellas se describe como determinar la carga máxima para realizar el preagrietado. Además, en caso de que se requieran, se incluye la información complementaria para el dimensionamiento y fabricación de las mordazas.

Finalmente, después de realizar las pruebas experimentales, se observó que es recomendable elaborar un estudio fractográfico sobre las superficies de fractura para analizar y relacionar los resultados obtenidos con las superficies de fractura, esto en caso de existir alguna irregularidad o inconsistencia en los datos obtenidos, lo cual ayudaría para determinar las posibles causas de dichas irregularidades.

Capítulo 3: Determinación de la tenacidad a la fractura utilizando pruebas de tensión

En este capítulo se presenta el procedimiento utilizado para realizar las pruebas experimentales de acuerdo con la norma ASTM E399 [1] para determinar la tenacidad a la fractura del material de la MRP.

3.1 Introducción

La tenacidad a la fractura es la propiedad de los materiales que caracteriza la resistencia de un material a la propagación de las grietas. Al determinar esta propiedad se establece la base para realizar un análisis utilizando la mecánica de la fractura, con el cual determinar un tamaño crítico de grieta y de la vida remanente de un componente agrietado. De esta manera se puede obtener un criterio óptimo para el retiro de los componentes agrietados, de ahí su importancia.

Para determinar la tenacidad a la fractura del material de la MRP de los vagones del STC Metro se realizaron pruebas de tensión de acuerdo con el procedimiento de la norma ASTM E399 [1] y pruebas de impacto Charpy las cuales se realizaron a partir del procedimiento de la norma ASTM E23 [2]. En la figura 3.1 se presentan las principales partes que componen la MRP.

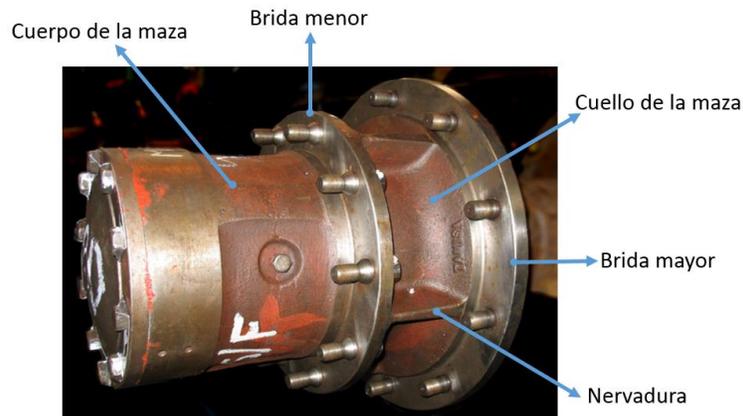


Figura 3.1. Principales partes de la maza de rueda portadora [32].

Debido a que el material del cual está fabricada la MRP no es de carácter comercial, para realizar las pruebas experimentales se utilizó el material de una MRP que fue otorgada por el personal del STC Metro. La MRP fue analizada y seccionada en trabajos anteriores, en estos trabajos se observó que la zona donde se generan los esfuerzos más bajos es en el cuerpo de la maza y por lo tanto esta zona debería de contener menor daño. Por otro lado, la brida mayor (BM-MRP) es una de las zonas en donde se generan los esfuerzos más grandes, además es una de las zonas donde se ha detectado que se inicia el crecimiento de las grietas. Para realizar las pruebas experimentales se contaba con el material del cuerpo de la maza y de la BM-MRP.

En la investigación realizada por Y. T. Tlapalama Fuertes [12] titulado “Análisis de la iniciación de grietas por fatiga en la maza de rueda portadora de los vagones del Sistema de Transporte Colectivo Metro, utilizando métodos numéricos y experimentales”, se obtuvieron imágenes de la microestructura del material. En ellas se observó que la microestructura del material de la BM-MRP se encontraba completamente dañada; por el contrario, en el material del cuerpo de la maza no se observó daño. Por esta razón se utilizó el material del cuerpo de la maza para fabricar las probetas que servirían para determinar la tenacidad a la fractura. En las figuras 3.2 y 3.3 se presentan las imágenes obtenidas de estas zonas de la MRP.

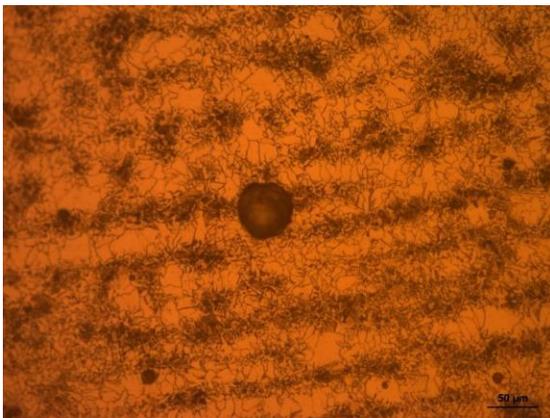


Figura 3.2. Microestructura de BM-MRP.

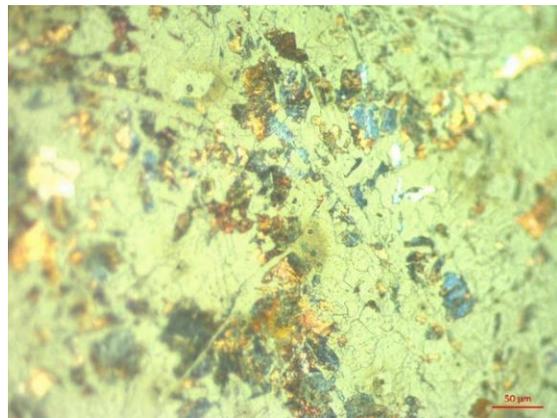


Figura 3.3. Microestructura del cuerpo de la maza.

A continuación se describe el procedimiento para obtener la tenacidad a la fractura utilizando pruebas de tensión de acuerdo con las recomendaciones de la norma ASTM E399 [1].

3.2 Fabricación de las probetas para la determinar de la tenacidad a la fractura

Para determinar la tenacidad a la fractura la norma ASTM E399 [1] propone probetas con diferente geometría, las cuales deben ser ensayadas utilizando cargas de tensión o flexión. Las principales probetas utilizadas son la probeta compacta a tensión C (T), la probeta a flexión SE (B), la probeta en forma de arco A (T), la probeta tipo arco a flexión A (B) y la probeta disco compacto DC (T).

La selección del tipo de probeta para realizar las pruebas experimentales fue en función de las dimensiones del material, su geometría y de acuerdo con la máquina de pruebas disponible para realizar las pruebas experimentales.

En las figuras 3.4 y 3.5 se presentan las dimensiones y geometría del material para realizar la fabricación de las probetas, se tomó en cuenta que la máquina para realizar las pruebas experimentales es una máquina para pruebas de tensión, por lo anterior, se tomó la decisión de utilizar la probeta C (T) para realizar la determinación de la tenacidad a la fractura.

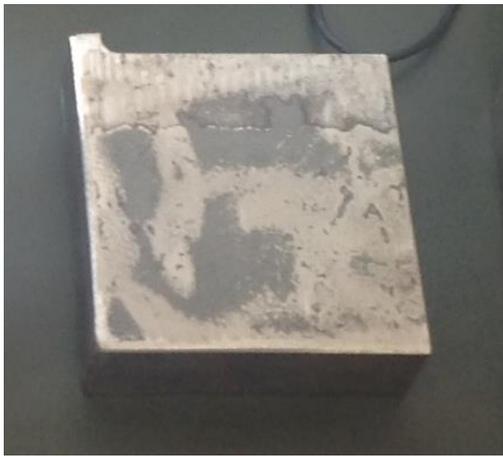


Figura 3.4. Geometría del material.

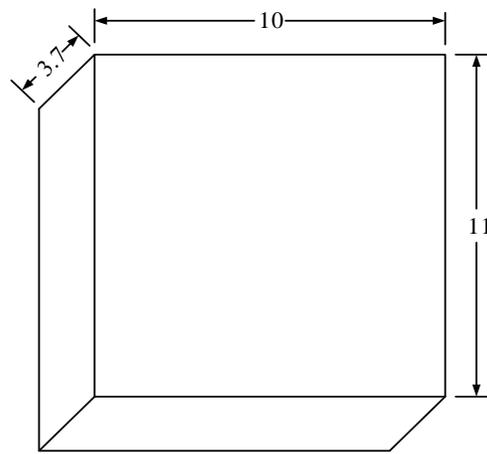


Figura 3.5. Dimensiones del material.

En las figuras 3.6 y 3.7 se presentan las principales dimensiones para la fabricación de la probeta C (T). Las dimensiones de la probeta C (T) y de la muesca se determinaron en función del espesor B y del ancho W . Además para obtener resultados válidos se recomienda que el ancho W sea el doble del espesor B ; esto se realiza para asegurar la condición de deformación plana durante las pruebas experimentales.

La fractura en condiciones de deformación plana es una condición esencial para que las pruebas experimentales resulten válidas y, con ello, obtener un valor certero de la tenacidad a la fractura. Esta condición es dependiente del espesor de la probeta por lo tanto es importante respetar la relación del ancho con respecto al espesor.

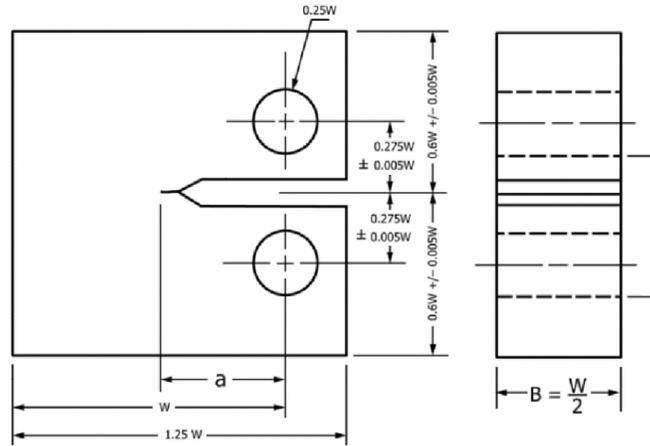


Figura 3.6. Probeta tipo C (T).

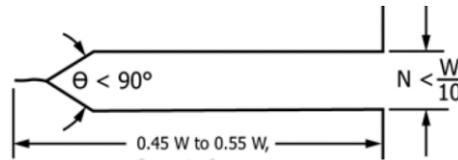


Figura 3.7. Detalle de la muesca.

De acuerdo con las dimensiones y la geometría del material para la fabricación de las probetas, en la tabla 3.1 se presentan las posibles dimensiones de las probetas C (T). Cabe señalar que todas las dimensiones presentadas respetan la condición que el ancho W sea el doble del espesor B para asegurar condiciones de deformación plana durante las pruebas experimentales.

Tabla 3.1. Dimensiones para fabricar la probeta C (T)

W [mm]	B [mm]	1.25 W [mm]	1.2 W [mm]	0.275 W [mm]	0.25 W [mm]	0.45 W [mm]	0.55 W [mm]	W/B
40	20	50	48	11	10	18	22	2
44	22	55	52.8	12.1	11	19.8	24.2	2
46	23	57.5	55.2	12.65	11.5	20.7	25.3	2
48	24	60	57.6	13.2	12	21.6	26.4	2
50	25	62.5	60	13.75	12.5	22.5	27.5	2
52	26	65	62.4	14.3	13	23.4	28.6	2
56	28	70	67.2	15.4	14	25.2	30.8	2
58	29	72.5	69.6	15.95	14.5	26.1	31.9	2
60	30	75	72	16.5	15	27	33	2

A partir de la información de la tabla 3.1 y las recomendaciones de la norma ASTM E399 [1], el ancho W que se utilizó para dimensionar las probetas C (T) fue de 50 mm y el espesor B fue de 25 mm.

De acuerdo con las recomendaciones de la norma ASTM E399 [1], la longitud de la muesca se debe de encontrar en un rango entre $0.45W$ a $0.55W$, esto es, de 22.5 mm a 27.5 mm. Además, se debe de considerar que estos valores incluyen la longitud de una grieta generada por cargas de fatiga.

Para determinar la longitud de la grieta las únicas restricciones que existen son que la longitud debe ser mayor al 5% de la longitud máxima de la muesca o mayor a 1.33 mm, se recomienda que la longitud de la grieta por fatiga sea de $0.1 B$, es decir, de 2.5 mm. Además la sección sin agrietar de la probeta ($W-a$), debe ser la mitad del nacho W o igual al espesor B . Teniendo en cuenta lo anterior, la muesca se fabricó con una longitud de 22.5 mm; y la longitud de la grieta generada por cargas de fatiga fue de 2.5 mm, con una longitud total de 25 mm. En las figuras 3.8 y 3.9 se presentan las dimensiones para la fabricación de la probeta C (T).

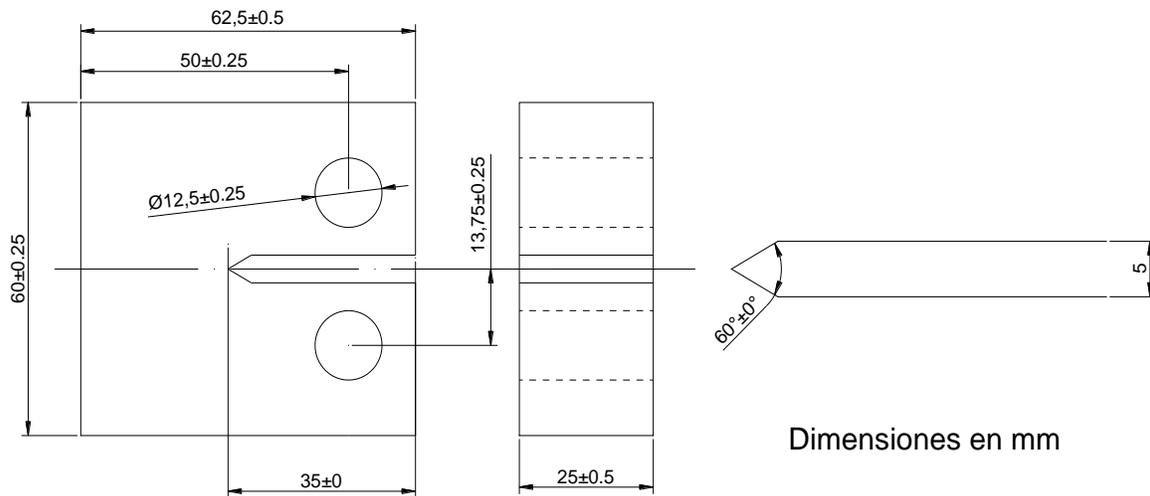


Figura 3.8. Probeta tipo C (T), en mm.

Figura 3.9. Detalle de la muesca, en mm.

Una vez determinadas las dimensiones para las probetas C (T) estas se fabricaron. Para su fabricación se utilizó una cortadora de segueta para seccionar el material de acuerdo con las dimensiones determinadas anteriormente. Para obtener el espesor deseado se utilizó una fresadora CNC debido a las altas tolerancias y geometría de las probetas C (T). Esto puede observarse en las figuras 3.10 y 3.11, el desbaste de material se realizó en ambas caras de las probetas para evitar cualquier irregularidad o defecto en las superficies del material.



Figura 3.10. Dimensionamiento.

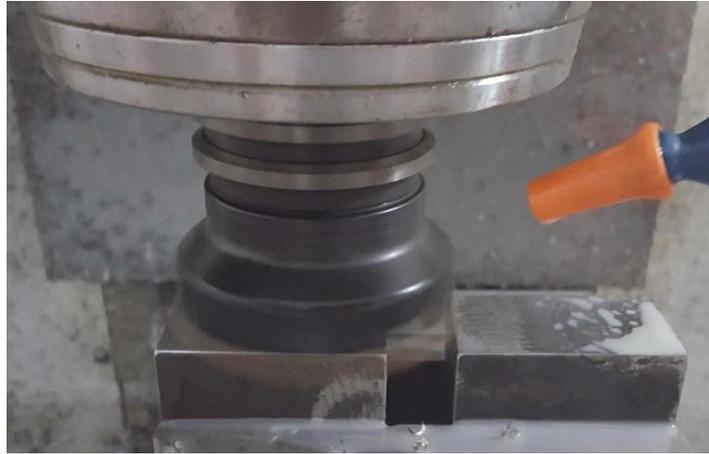


Figura 3.11. Desbaste del material.

Una vez obtenido el espesor de las probetas se maquinaron los orificios por donde se les aplicaron las cargas durante las pruebas experimentales. El proceso puede observarse en las figuras 3.12 y 3.13.



Figura 3.12. Maquinado de los orificios.

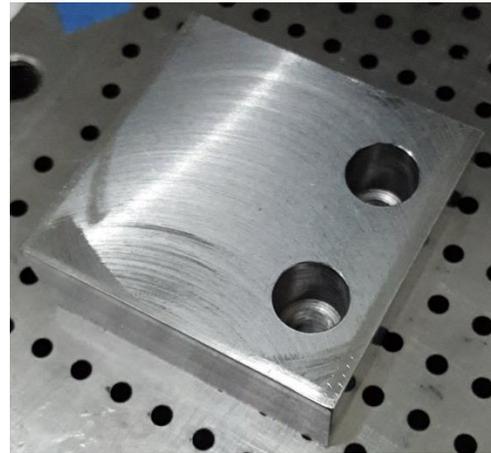


Figura 3.13. Maquinado de los orificios.

Para la fabricación de las muescas se utilizó la fresadora, además fue necesario utilizar electroerosión para maquinar la punta de la muesca debido a su forma compleja y a la alta precisión requerida. Finalmente, las probetas fueron rectificadas. En las figuras 3.14 y 3.15 se presentan las probetas C (T) fabricadas.



Figura 3.14. Maquinado de la muesca.



Figura 3.15. Probetas C (T).

3.3 Características de la máquina pruebas

Para realizar las pruebas experimentales se utilizó una máquina de pruebas servohidráulica Instron, modelo 8502, con una capacidad de carga de 250 kN y una frecuencia máxima de aplicación de cargas en pruebas de fatiga de 10 Hz. Este equipo se encuentra en el Laboratorio de Ensaye de Materiales de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, unidad Ticomán. En las figuras 3.16, 3.17, 3.18 y 3.19 se presentan sus principales componentes.



Figura 3.16. Máquina de pruebas Instron 8502.



Figura 3.17. Controlador hidráulico.



Figura 3.18. Panel de control.



Figura 3. 19. Bomba Hidráulica.

Entre las principales características del equipo de prueba destacan las siguientes:

- El tipo de celda de carga con el que cuenta el equipo de pruebas tiene la capacidad de registrar la carga aplicada durante la duración total de las pruebas. La máquina distribuye las cargas de forma simétrica con respecto a la muesca de la probeta C (T).
- Cuenta con un extensómetro, el cual se utilizó para medir el desplazamiento de abertura de la grieta durante las pruebas de tensión.
- Cuenta con un control automático para la aplicación de las cargas, el cual tiene la capacidad de obtener la información resultante de la prueba para así crear un registro del desplazamiento de abertura de la grieta y la carga que se aplicó durante la duración de las pruebas.

3.4 Preparación de las probetas

Para iniciar las pruebas experimentales fue necesario preparar las probetas C (T), la preparación consistió en pulir y preagrietar las probetas C (T) utilizando cargas de fatiga. Para realizar el pulido se utilizaron lijas con diferente número de grano y agua como medio de lubricación y el pulido se realizó de forma manual. Cada vez que se realizaba un cambio en el número de lija las probetas se giraron 90° para cambiar la dirección del lijado.

El pulido se realizó para eliminar cualquier irregularidad que haya dejado el maquinado sobre las superficies de las probetas C (T); esto con el fin de evitar que cualquier anomalía pudiera interferir con los resultados de las pruebas experimentales y también para facilitar la visualización de la longitud de la grieta durante el proceso de preagrietado. En la tabla 3.2 se presentan los datos de las lijas utilizadas, el tipo de lubricación y el número de repeticiones efectuadas para realizar el pulido de las probetas C (T). En la figura 3.20 se presentan las probetas C (T) pulidas y listas para realizarles el preagrietado.

Tabla 3.2. Condiciones utilizadas para el pulido de la probetas C (T).

Número de malla	Tipo de lubricación	Tiempo	Repeticiones
80	Agua	4 minutos	11
150	Agua	3 minutos	5
320	Agua	3 minutos	5
400	Agua	2 minutos	5
600	Agua	2 minutos	4
1000	Agua	2 minutos	6
1200	Agua	2 minutos	4
2000	Agua	3 minutos	3
4000	Agua	3 minutos	3



Figura 3.20. Probetas C (T) pulidas.

Una vez pulidas las probetas C (T) se les realizó el preagrietado utilizando cargas de fatiga. Este procedimiento se realizó bajo condiciones de control de cargas. Para poder realizar el preagrietado y las pruebas de tensión fue necesario fabricar de un par de mordazas y pernos, esto debido a que la máquina de pruebas no contaba con estos accesorios.

Las dimensiones de las mordazas y pernos se determinaron con base en las dimensiones de las probetas C (T); esto a partir de las dimensiones de la máquina de pruebas y tomando en cuenta las recomendaciones de las normas ASTM E399 [1] y E647 [19]. En la figura 3.21 se presentan las dimensiones de las mordazas.

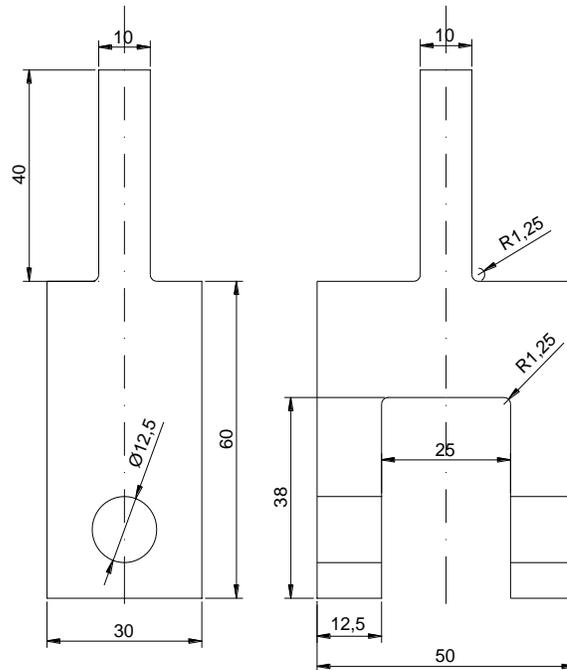


Figura 3.21. Dimensiones de la mordazas, en mm.

Para la fabricación de las mordazas y de los pernos se utilizó acero AISI 4340. Este material es recomendado por la norma ASTM E399 [1]. De acuerdo con la información del proveedor, este material tiene un esfuerzo de fluencia que varía entre 840 MPa y 1200 MPa, dependiendo del tamaño de la sección transversal del elemento.

Generalmente, este material es utilizado en la fabricación de piezas que requieren una buena combinación entre dureza y tenacidad como tornillería de alta resistencia, engranajes para máquinas, ejes para carros, cardanes, etc. La fabricación de las mordazas y de los pernos se llevó a cabo con las mismas herramientas que se utilizaron en la fabricación de las probetas C (T). Las mordazas y los pernos se presentan en la figura 3.22. Una vez fabricadas las mordazas se realizó el preagrietado de las probetas C (T).



Figura 3.22. Mordazas.

De acuerdo con la norma ASTM E399 [1], para alcanzar la longitud de la grieta deseada se necesitan aproximadamente de 10^4 a 10^6 ciclos. En la tabla 3.3 se estima el tiempo necesario para realizar el preagrietado utilizando frecuencias de 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz, 4 Hz, 5 Hz, 6 Hz, 7 Hz, 8 Hz, 9 Hz y 10 Hz.

Tabla 3.3. Tiempo para realizar el preagrietado de las probetas.

Tiempo de pruebas	1 Hz	2 Hz	3 Hz	4 Hz	5 Hz	6 Hz	7 Hz	8 Hz	9 Hz	10 Hz
Segundos	100000.00	50000.00	33333.33	25000.00	20000.00	16666.67	14285.71	12500.00	11111.11	10000.00
Minutos	1666.67	833.33	555.56	416.67	333.33	277.78	238.10	208.33	185.19	166.67
Horas	27.78	13.89	9.26	6.94	5.56	4.63	3.97	3.47	3.09	2.78
Días	1.16	0.58	0.39	0.29	0.23	0.19	0.17	0.14	0.13	0.12

De acuerdo con la tabla 3.3 el tiempo para realizar el preagrietado de cada probeta puede variar entre 2.78 horas y 1.16 días, dependiendo de la frecuencia utilizada.

Para reducir el tiempo del preagrietado es recomendable iniciarlo con una carga mayor a la usada durante la prueba. Una vez iniciada la grieta la carga se reduce para poder observar y obtener la longitud de grieta deseada. Se recomienda realizar el preagrietamiento con cargas tensión-compresión.

La carga para realizar el preagrietado se calculó utilizando la ecuación 3.1, la cual es recomendada por la norma ASTM E1820 [16].

$$P_m = \frac{0.4Bb_0^2\sigma_y}{2W + a_0} \quad (3.1)$$

Donde:

P_m = Carga para realizar el preagrietado.

B = Espesor de la probeta, 25 mm.

b_0 = Zona sin agrietar de la probeta, 25 mm.

σ_y = Esfuerzo de fluencia, 249.45 MPa [12].

W = Ancho de la probeta, 50 mm.

a_0 = Longitud inicial de la grieta, 2.5 mm.

De acuerdo con las dimensiones y propiedades mecánicas del material, la carga máxima para realizar el preagrietado fue de 15.21 kN. No obstante, debido a que fue necesario observar el crecimiento de la longitud de la grieta, se utilizó una carga con un magnitud de 10 kN a una frecuencia de 10 Hz y con una forma de carga senoidal. En la figura 3.23 se presentan las condiciones de carga para realizar el preagrietado de las probetas.

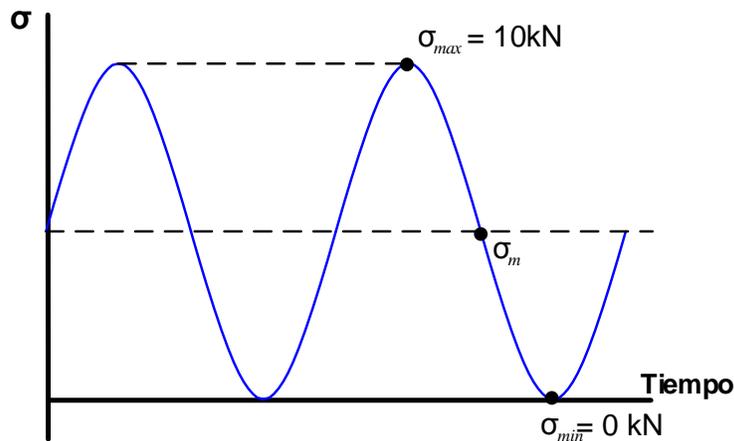


Figura 3.23. Condiciones de carga para realizar el preagrietamiento.

Para facilitar el proceso de preagrietado se marcó cada probeta con la longitud de grieta deseada. En la tabla 3.4 se resumen las condiciones utilizadas para realizar el preagrietado de las probetas C (T).

Tabla 3.4. Condiciones para realizar el preagrietado de las probetas C (T).

Condiciones para realizar el preagrietado de las probetas	
Tipo de carga	Tensión-compresión
Forma de la carga	Senoidal
Carga máxima	10 kN
Carga mínima	0 kN
Frecuencia	10 Hz
Tasa de esfuerzo	R = 0
Longitud de la grieta	2.5 mm
Temperatura	Temperatura ambiente

Para realizar el preagrietado se puso en marcha la máquina de pruebas y sus complementos. Posteriormente se colocaron las mordazas utilizando el controlador hidráulico y los controles integrados en la máquina de pruebas. Después se colocó la mordaza inferior con una presión de 2000 psi. Posteriormente se colocó la probeta sobre la mordaza y se fijó con uno de los pernos. Después se colocó la mordaza superior con la misma presión que la mordaza inferior. Finalmente y haciendo uso de los controles hidráulicos se colocó la probeta sobre la mordaza superior y se fijó con otro perno. En las figura 3.24 y 3.25 se presentan las imágenes de la colocación de las mordazas y la probeta en la máquina de pruebas.



Figura 3.24. Colocación de la mordaza inferior y de la probeta C (T).



Figura 3.25. Mordazas y probetas colocadas.

Para iniciar el preagrietado se ingresaron las condiciones de prueba, dadas en la tabla 3.4, en el panel de control de la máquina de pruebas. Una vez ingresadas las condiciones de prueba se inició el preagrietado de la probeta. Durante el preagrietado se tomó la información de los ciclos necesarios para generar la grieta de 2.5 mm.

El crecimiento de la longitud de las grietas fue monitoreado utilizando un microscopio móvil con capacidad de 20x de magnificación. El preagrietado se consideró finalizado cuando la longitud de la grieta alcanzó aproximadamente 2.5 mm. Durante el preagrietado fue necesario disminuir la frecuencia de 10 Hz a 5 Hz, debido a que cuando ésta se aumentaba la máquina de pruebas no mantenía la carga de 10 kN. La disminución de la frecuencia no tuvo ningún efecto en la grieta, simplemente se llevó más tiempo para alcanzar la longitud de grieta de 2.5 mm.



Figura 3.26. Microscopio móvil.

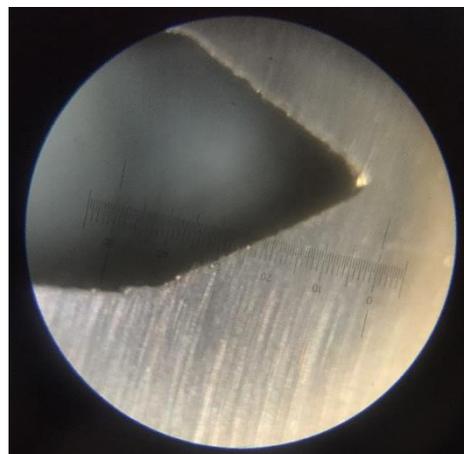


Figura 3.27. Monitoreo del preagrietado.

3.5 Condiciones de prueba

Una vez que se finalizó el proceso de preagrietado se realizaron las pruebas de tensión. Para realizar esta prueba se utilizó la máquina de pruebas Instron, modelo 8502. De acuerdo con las dimensiones de la probeta C (T), la norma ASTM E399 [1] recomienda incrementos de carga de 0.33 kN/s a 1.67 kN/s. En la tabla 3.5 se resumen las condiciones utilizadas para realizar las pruebas de tensión.

Tabla 3.5. Condiciones de prueba.

Condiciones para realizar las pruebas experimentales	
Tipo de carga	Estática con aumento gradual
Carga	Tensión
Magnitud inicial de la carga	0 kN
Incrementos de la carga	0.5 kN/s
Temperatura	Temperatura ambiente
Número de repeticiones	2

Para realizar la prueba, el tiempo estimado por probeta fue de 10 minutos; además, se consideró el tiempo empleado para montar la probeta y para la preparación de la máquina de pruebas. La prueba se consideró finalizada cuando la probeta se fracturó totalmente.

3.6 Procedimiento para obtener la tenacidad a la fractura realizando pruebas de tensión

Para determinar la tenacidad a la fractura fue necesario obtener durante la duración de la prueba la información de la carga aplicada y el desplazamiento de abertura de la grieta. Esta información se utilizó para generar la curva carga-desplazamiento, $P-v$, de cada probeta. La magnitud de la carga aplicada fue obtenida por la celda de carga de la máquina de pruebas.

Para monitorear el desplazamiento de abertura de la grieta se colocó un extensómetro sobre el frente de la probeta C (T). Para colocar el extensómetro fue necesario fabricar dos soportes los cuales se observan en las figuras 3.28 3.29 y 3.30.



Figura 3.28. Extensómetro.

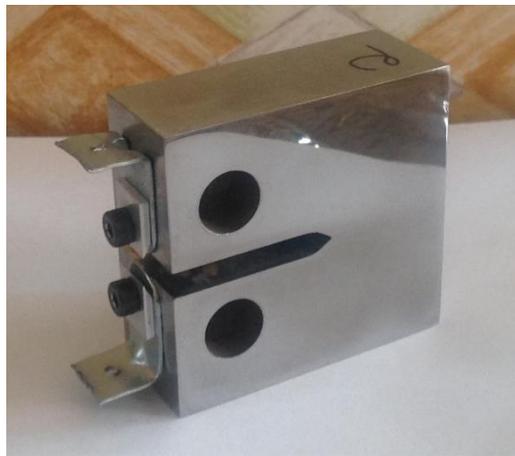


Figura 3.29. Soportes de la probeta C (T).



Figura 3.30. Probeta C (T) con extensómetro.

De acuerdo con la norma ASTM E399 [1], existen tres variantes de la curva carga-desplazamiento. En la figura 3.31 la primera curva corresponde a un material dúctil, la segunda a un material poco dúctil y la tercera a un material frágil. A partir de esta curva se determinan los parámetros P_{max} y P_Q , donde P_{max} es la carga máxima registrada durante la prueba; además, P_Q se determina trazando una línea que inicia desde el origen pero con una pendiente menor al 5% de la pendiente la parte lineal de la curva carga-desplazamiento.

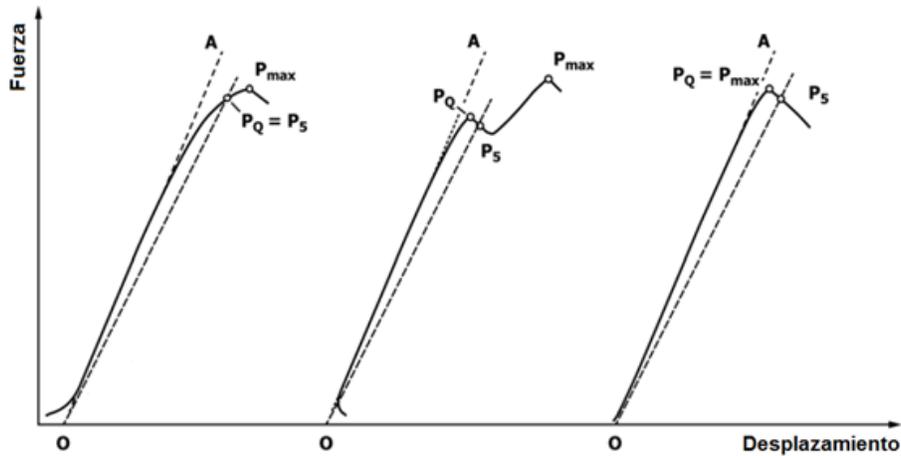


Figura 3.31. Determinación de P_{max} y P_Q [1].

A partir de las curvas carga-desplazamiento se calculó el valor de K_Q , el cual es un valor provisional de la tenacidad a la fractura. De acuerdo con la metodología propuesta por la norma ASTM E399 [1], este parámetro se obtuvo utilizando las ecuaciones 3.2 y 3.3:

$$K_Q = \frac{P_Q}{\sqrt{BB_N}\sqrt{W}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (3.2)$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{\left(2 + \frac{a}{W}\right) \left[0.886 + 4.64 \frac{a}{W} - 13.32 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14.72 \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5.6 \left(\frac{a}{W}\right)^4\right]}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \quad (3.3)$$

Donde:

K_Q = Tenacidad a la fractura provisional, $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$.

σ_{ys} = Esfuerzo de fluencia del material, MPa.

W = Ancho de la probeta, m.

a = Longitud de la grieta, m.

B = Espesor de la probeta, m.

B_N = Cuando las probetas tienen muescas laterales B_N es el valor de la profundidad de la muesca. Cuando la probeta no tiene muescas laterales B_N es igual al valor del espesor B

Ya que se obtuvo el valor de la tenacidad a la fractura preliminar K_Q , el resultado fue validado utilizando la siguiente ecuación:

$$2.5 \left(\frac{K_Q}{\sigma_{ys}} \right)^2 < (W - a) \quad (3.4)$$

Donde:

σ_{ys} = Esfuerzo de fluencia del material, MPa.

W = Ancho de la probeta, m.

a = Longitud de la grieta, m.

$(W - a)$ = Sección de la probeta sin agrietar, m.

Si la ecuación 3.4 se cumple, entonces K_Q será igual a K_{IC} ; en caso de lo contrario la prueba deberá ser corroborada utilizando una metodología para materiales con comportamiento elastoplástico. Esto se debe a que cuando la ecuación 3.4 no se cumple existe la posibilidad que el material durante la prueba de tensión haya cambiado su comportamiento de lineal elástico a un comportamiento elastoplástico. A partir de la obtención el valor de la tenacidad a la fractura K_{Ic} el resultado será comparado con los valores obtenidos con las pruebas de impacto Charpy.

Capítulo 4: Determinación de la tenacidad a la fractura utilizando pruebas de impacto Charpy

En este capítulo se presenta el procedimiento realizado y las condiciones de prueba utilizadas para determinar la tenacidad a la fractura utilizando pruebas de impacto Charpy.

4.1 Introducción

Debido a que es más sencillo realizar las pruebas de impacto Charpy por su menor complejidad para la fabricación de las probetas y como a su mayor disponibilidad del equipo de pruebas, resulta más práctico obtener la tenacidad a la fractura por medio de este tipo de pruebas. A continuación se presenta el procedimiento seguido para obtener la tenacidad a la fractura utilizando pruebas de impacto Charpy.

4.2 Fabricación de probetas para realizar pruebas de impacto Charpy

Las pruebas de impacto Charpy se realizaron siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM E23 [2], la cual propone varios tipos de probetas para realizar las pruebas experimentales. En las figuras 4.1, 4.2 y 4.3 se presentan las diferentes configuraciones de las probetas y sus principales dimensiones:

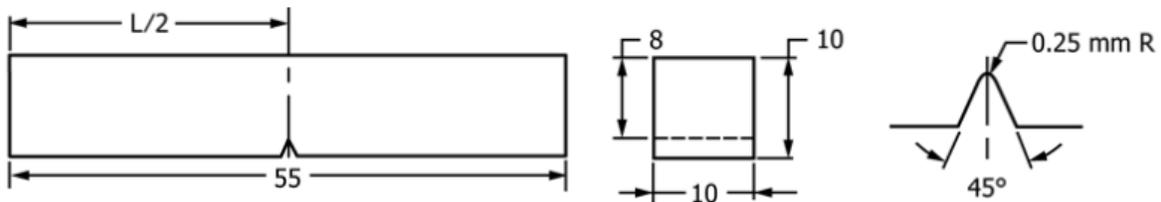


Figura 4.1. Probeta Charpy tipo A, dimensiones en mm.

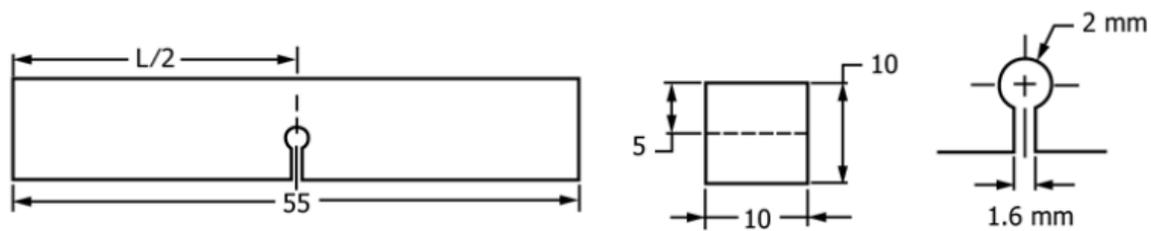


Figura 4.2. Probeta Charpy tipo B, dimensiones en mm.

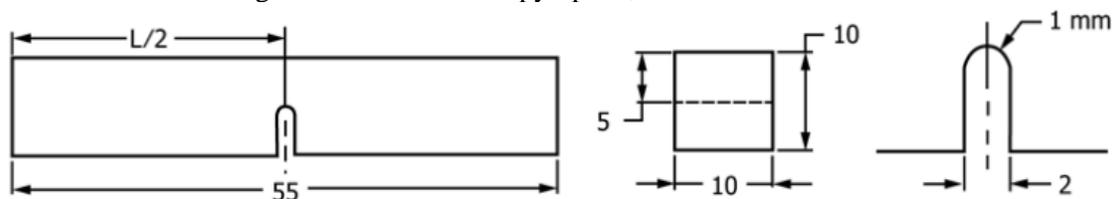


Figura 4. 3. Probeta Charpy tipo C, dimensiones en mm.

De las tres configuraciones posibles para fabricar las probetas se decidió utilizar la probeta Charpy tipo A, figura 4.1, debido a su menor complejidad para su fabricación. Tomando en cuenta el material del cuerpo de la MRP presentado en la figura 3.5 y considerando el material utilizado para la fabricación de las probetas C (T), se fabricaron ocho probetas para realizar las pruebas de impacto Charpy.

Para fabricar las probetas primero se establecieron las dimensiones de las probetas: 10 mm de espesor por 10 mm de ancho por 55 mm de largo. Para realizar este proceso se utilizó la cortadora de segueta y la fresadora, utilizadas en la fabricación de las probetas C (T), en la figura 4.4 se presentan las probetas Charpy con las dimensiones deseadas.

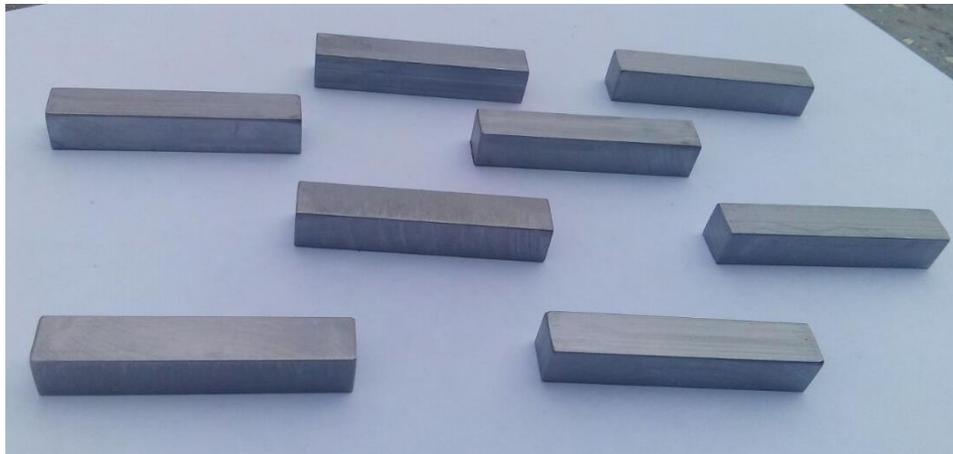


Figura 4.4. Dimensionamiento de las probetas Charpy.

Posteriormente, a las probetas se les fabricaron las muescas utilizando nuevamente la técnica de electroerosión. En la figura 4.5 se presentan las probetas Charpy fabricadas. En este tipo de prueba no es necesario realizar ningún tipo de preparación a las probetas.



Figura 4.5. Probetas tipo Charpy.

4.3 Características del equipo de pruebas

Para realizar las pruebas de impacto Charpy se utilizó un péndulo de construcción rígida Otto Wolpert-Werke, el cual se encuentra en el Laboratorio de Ensaye de Materiales de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, unidad Ticomán. En la figura 4.6 se presenta una imagen del péndulo utilizado.



Figura 4.6. Péndulo para pruebas de impacto Charpy.

Entre las principales características del equipo de pruebas destacan las siguientes:

- El péndulo para pruebas de impacto es de construcción rígida y con capacidad para realizar pruebas de impacto de entre 15 kg·m y 30 kg·m.
- El péndulo puede realizar pruebas de impacto Charpy e Izod.
- La masa del péndulo es de 19.8 kg.
- La longitud efectiva del péndulo es de 0.8 m.
- Se puede obtener el ángulo de acenso y de caída directamente del péndulo.

4.4 Condiciones de prueba

De acuerdo con las características de la máquina de pruebas, ésta puede realizar pruebas con cargas de impacto de 15 kg·m o de 30 kg·m. Para determinar con qué parámetro se realizarían las pruebas fue necesario realizar un ensayo con 15 kg·m para observar el comportamiento del material bajo esta carga.

Con este valor se obtuvo que el péndulo no fue capaz de fracturar totalmente la probeta; por lo tanto, las pruebas de impacto Charpy se realizaron con 30 kg·m. En las figuras 4.7 y 4.8 se observa la probeta utilizada para determinar la carga de impacto.



Figura 4.7. Probeta no fracturada.

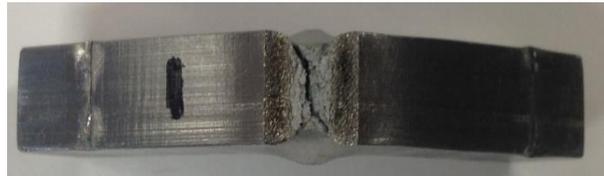


Figura 4.8. Probeta no fracturada.

En la tabla 4.1 se presentan las principales condiciones para realizar las pruebas experimentales de impacto Charpy.

Tabla 4.1. Condiciones para realizar pruebas de impacto Charpy

Condiciones para realizar las pruebas experimentales	
Tipo de carga	Impacto
Probetas	Charpy con muesca en V
Carga	30 kg·m
Temperatura	Temperatura ambiente
Número de repeticiones	7

4.5 Procedimiento para obtener la tenacidad a la fractura utilizando pruebas de impacto Charpy

Para determinar la tenacidad a la fractura realizando pruebas de impacto Charpy se verificó el pleno funcionamiento de los diferentes componentes de la máquina de pruebas. Posteriormente, se colocó la probeta en el portaprobetas de tal manera que la muesca quedara completamente centrada con respecto al lugar en donde recibirá el impacto del percutor del péndulo, tal como se muestra en la figura 4.9.



Figura 4.9. Colocación de la probeta.

Posteriormente, se colocó el péndulo en posición de caída, como se muestra en la figura 4.10, para obtener los 30 kg·m, se utilizó un ángulo caída de 160°. Una vez colocado el péndulo en la posición de caída se liberó el freno y con ello fracturar la probeta. Una vez fracturada la probeta se obtuvo el ángulo de ascenso directamente del péndulo, tal como se observa en la figura 4.11.



Figura 4.10. Posición de caída.



Figura 4.11. Obtención del ángulo de ascenso.

La prueba se consideró finalizada después de que el péndulo impactó a la probeta y regresó de la posición de ascenso. Para obtener la energía absorbida por el material primero se obtuvo la energía del péndulo durante su caída. Ésta se determinó utilizando la ecuación 4.1 propuesta por L .P. Pook [31]:

$$W_p = Mgl(1 - \cos\beta) \quad (4.1)$$

Donde:

W_p =Energía del péndulo durante su caída, J.

M = Masa del péndulo, kg.

g = Aceleración, m/s^2 .

l = Longitud efectiva del péndulo, m.

β = Ángulo de caída del péndulo.

Una vez que se obtuvo la energía del péndulo durante su caída se calculó la energía absorbida por el material. Ésta se obtuvo utilizando la ecuación 4.2 propuesta por L .P. Pook [31]:

$$W_a = W_p - Mgl(1 - \cos\gamma) \quad (4.2)$$

Donde:

W_a = Energía absorbida, J.

W_p = Energía potencial del péndulo, J.

γ = Ángulo de ascenso del péndulo.

Una vez que se obtuvo la energía absorbida por el material, se utilizaron las correlaciones propuestas por J. M. Barson y S. T. Rolfe [3] para determinar la tenacidad a la fractura del material. Las correlaciones utilizadas fueron las siguientes:

Correlaciones de Barson-Rofe:

$$K_{IC}^2 = (5)(\sigma_{ys})(CVN - \frac{\sigma_{ys}}{20}) \quad (4.3)$$

$$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}}\right)^2 = \frac{5}{\sigma_{ys}} \left(CVN - \frac{\sigma_{ys}}{20}\right) \quad (4.4)$$

Correlación de Rolfe-Novak:

$$K_{IC}^2 = (5)(\sigma_{ys})^2 \left(\frac{CVN}{\sigma_{ys}} - 0.05\right) \quad (4.5)$$

Donde:

K_{IC} = Tenacidad a la fractura, $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$.

σ_{ys} = Esfuerzo de fluencia del material, MPa.

CVN = Energía obtenida de las pruebas de impacto Charpy, $\text{kg}\cdot\text{m}$.

Ya que se obtuvieron los resultados de las pruebas de impacto Charpy, estos fueron analizados y comparados con los obtenidos con las pruebas de tensión.

Capítulo 5: Resultados y análisis de resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de las pruebas experimentales para la determinación de la tenacidad a la fractura utilizando pruebas de tensión y pruebas de impacto Charpy.

5.1 Resultados de las pruebas de tensión para determinar la tenacidad a la fractura

A continuación se presentan los resultados obtenidos de las pruebas de tensión realizadas de acuerdo a la norma ASTM E399 [1]. Para la determinación de la tenacidad a la fractura se utilizaron probetas tipo C (T) preagrietadas por cargas de fatiga y se ensayaron bajo cargas de tensión con el fin de obtener las curvas carga-desplazamiento, a partir de las cuales se determinó la tenacidad a la fractura del material de la MRP.

Para determinar la tenacidad a la fractura se utilizaron las ecuaciones 3.1 y 3.2 descritas en el capítulo 3. En estas ecuaciones se incluyen variables como las dimensiones de las probetas; la longitud de la grieta “ a ” obtenida a partir de las pruebas de tensión; así como la información obtenida de las curvas carga-desplazamiento. Las variables de las ecuaciones con respecto al espesor B y el ancho W de la probeta C (T) fueron determinadas en el capítulo 3. A continuación se presenta el procedimiento para la determinación de la longitud de la grieta a , también se incluye la validación del preagrietado realizado a las probetas C (T).

Durante el proceso de preagrietado, de acuerdo a las condiciones de prueba establecidas en el capítulo 3, se obtuvo que, para la probeta número uno fueron necesarios 138005 ciclos para que se observara el inicio de la grieta; un total de 152006 ciclos para que la grieta alcanzara una longitud de aproximadamente 2.5 mm. En la figura 5.1 se señala la zona de la probeta donde se observó el inicio de la grieta y en la figura 5.2 se observa la grieta con la longitud final de aproximadamente 2.5 mm.



Figura 5.1. Inicio de la grieta por fatiga.

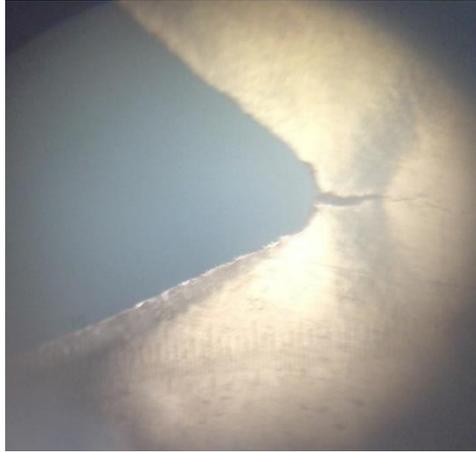


Figura 5.2. Grieta por fatiga de aproximadamente 2.5 mm de longitud probeta uno.

Para la segunda probeta fueron necesarios 125224 ciclos para alcanzar la longitud de grieta deseada, en este caso la grieta fue muy fina y no fue posible observar su inicio con el microscopio óptico, por lo tanto esta fue detectada hasta que alcanzó los 2.5mm. En las figuras 5.3 y 5.4 se puede observar la longitud total de la grieta pero no es posible observar su inicio.



Figura 5. 3. Grieta por fatiga probeta dos.



Figura 5. 4. Grieta de 2.5mm de la probeta dos.

De acuerdo con los resultados obtenidos durante el proceso de preagrietamiento de las probetas, existe una diferencia de 26782 ciclos para alcanzar la longitud de la grieta de 2.5 mm. Esto puede deberse por diferencias en la microestructura del material de cada probeta, debido a que éste no es homogéneo en su totalidad y la cantidad de imperfecciones en su microestructura es variable, lo cual tiene como consecuencia diferencia en su resistencia al daño por fatiga. Cabe señalar que los ciclos utilizados para alcanzar la longitud de la grieta están dentro del rango de la norma ASTM E399 [1] que va de 10^4 ciclos a 10^6 ciclos.

La validación del preagrietado se realizó cuando se concluyeron las pruebas de tensión. La validación consistió en obtener la longitud de la grieta en tres secciones de las superficies de fractura de las probetas C (T) como se muestra en la figura 5.5, imagen correspondiente a la probeta número uno. La validación también se realizó para verificar que la aplicación de las cargas durante las pruebas experimentales fue de manera simétrica con respecto a la muesca de la probeta. Las mediciones de la longitud de la grieta se realizaron utilizando un vernier.

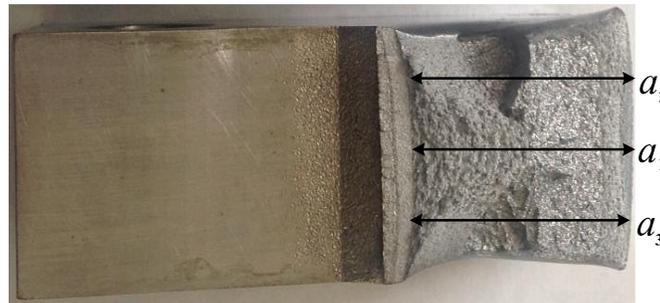


Figura 5. 5. Medición de la longitud de la grieta, probeta número uno.

En la tabla 5.1 se presentan las tres mediciones realizadas de la longitud de la grieta de la probeta uno:

Tabla 5.1. Mediciones de la longitud de la grieta probeta número uno.

Medición	Longitud mm
a_1	25.02
a_2	24.96
a_3	25

De las tres mediciones realizadas se calculó el promedio, con lo cual se obtuvo un valor de 24.99 mm. Este valor fue considerado como la longitud de la grieta a para realizar los cálculos correspondientes de la probeta número uno. Finalmente, para validar el preagrietado fue necesario que las variaciones entre las longitudes de a_1 , a_2 y a_3 no fueran mayores al 10% de a , es decir, 2.49 mm.

De tal manera se tienen los siguientes valores:

La variación de a_1 con respecto $a_2 = 0.06$ mm

La variación de a_1 con respecto $a_3 = 0.04$ mm

La variación de a_2 con respecto $a_3 = 0.04$ mm

De acuerdo con las comparaciones realizadas entre las mediciones de la longitud de la grieta de la probeta número uno, la diferencia entre estas no rebasa los 2.49 mm, por lo tanto el preagrietado realizado es válido para obtener el valor de la tenacidad a la fractura. Para realizar la validación del preagrietado de la probeta número dos se realizó el mismo procedimiento realizado para la probeta número uno. Las mediciones para determinar la longitud de la grieta se realizaron de acuerdo a la figura 5.6.

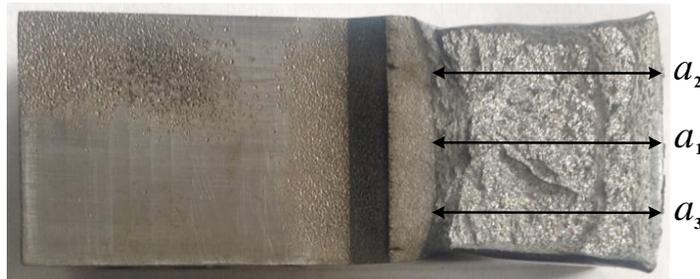


Figura 5. 6. Medición de la longitud de la grieta, probeta número dos.

En la tabla 5.2 se presentan las mediciones realizadas:

Tabla 5.2. Mediciones de la longitud de la grieta probeta número dos.

Medición	Longitud mm
a_1	24.4
a_2	24.34
a_3	24.38

Al igual que en la probeta número uno se calculó el promedio de las tres mediciones realizadas, obteniendo un valor de 24.37 mm. Este valor fue considerado como la longitud de la grieta a para los cálculos de la probeta número dos, para este caso el 10% de longitud de grieta a fue 2.43 mm.

Las variaciones de la longitud entre las mediciones de a_1 , a_2 y a_3 se presentan a continuación:

La variación de a_1 con respecto $a_2 = 0.06$ mm

La variación de a_1 con respecto $a_3 = 0.02$ mm

La variación de a_2 con respecto $a_3 = 0.04$ mm

De acuerdo con las comparaciones realizadas entre las mediciones de la longitud de la grieta de la probeta número dos, la diferencia entre ambas no rebasa los 2.43 mm; por lo tanto el preagrietado de la probeta número dos también es válido para obtener un valor de la tenacidad a la fractura.

Con estas comparaciones ha quedado validado el preagrietado para dos probetas utilizadas en la determinación de la tenacidad a la fractura en las cuales también se determinaron las longitudes de las grietas en ambas probetas, mismas que se presentan en la tabla 5.3.

Tabla 5.3. Mediciones de la longitud de las grietas.

<u>Probeta</u>	<u>Longitud mm</u>
Probeta 1	24.99
Probeta 2	24.38

Una vez obtenidas las longitudes de grieta a para las dos probetas y validado el preagrietado, se determinó el valor de la carga P_Q , para lo cual fue necesario graficar los datos obtenidos en las pruebas de tensión de cada probeta ensayada para así obtener las curvas carga-desplazamiento.

Para la probeta número uno se utilizaron los datos obtenidos de la prueba de tensión, con lo cual se obtuvo la siguiente gráfica carga-desplazamiento, la cual se presenta en la figura 5.7.

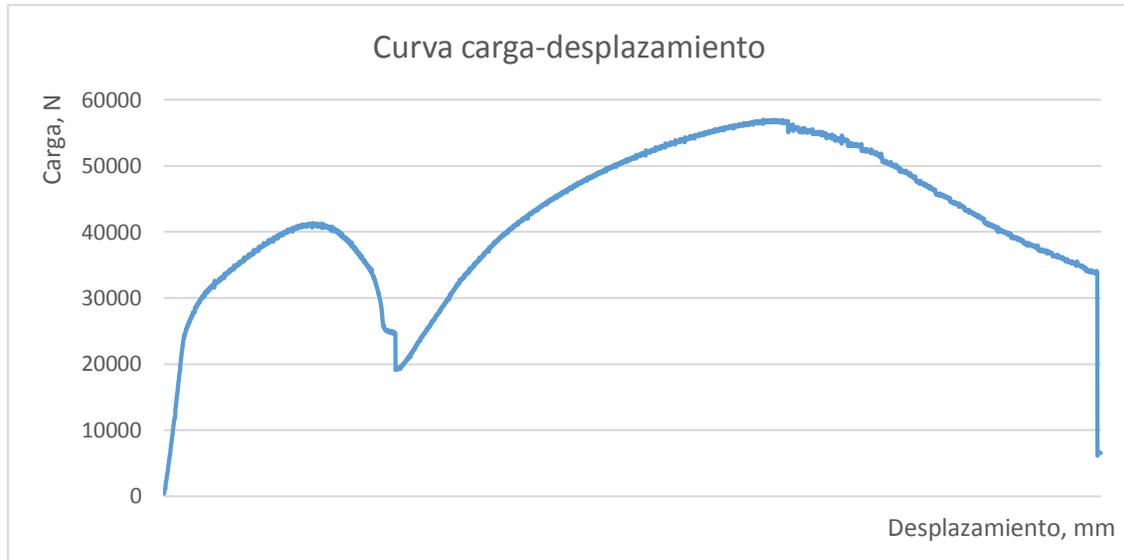


Figura 5. 7. Curva carga-desplazamiento, $P-v$, probeta uno.

En la gráfica se muestran los valores de carga-desplazamiento, $P-v$, de la probeta uno. En ella se puede observar que después del comportamiento lineal de la carga contra el desplazamiento de la abertura de la grieta el comportamiento de la resistencia del material tuvo una baja considerable de 40404.46 N a 19431.74 N. Esto puede ser a causa de las imperfecciones presentes en el material como porosidades o inclusiones no metálicas, las cuales son comunes en elementos mecánicos fabricados por fundición como lo es la MRP. Asegurar esto sólo es posible por medio de un análisis fractográfico sobre las superficies de fractura. Posteriormente, la resistencia del material se incrementó hasta una carga máxima de 56724.56 N, de modo que la prueba continuó de forma normal hasta la fractura total de la probeta.

En las figuras 5.8 y 5.9 se presentan las superficies de fractura de la probeta número uno. En ellas se puede observar que el tipo de fractura que ocurrió no fue por deformación plana como se esperaba. De acuerdo con la figura 5.10, el tipo de fractura que experimentó la probeta fue una fractura combinada, es decir, la deformación con respecto al eje z fue considerable tomando en cuenta las demás dimensiones de la probeta.

Como se puede observar en la figura 5.10, la condición de fractura en deformación plana es un comportamiento que depende del espesor de la probeta, cuanto mayor sea el espesor de la probeta más se garantiza esta condición.

La condición de fractura en deformación plana fue considerada en la tabla 3.1 en el capítulo 3, durante el dimensionamiento de la probeta, al tomar en cuenta el comportamiento de la probeta número uno durante la prueba de tensión y las previsiones tomadas para asegurar un estado de deformación plana durante las pruebas experimentales, se confirma la posibilidad que el material del que fue fabricada la probeta C (T) número uno contenía imperfecciones en su microestructura, mismas que influyeron en las pruebas experimentales.



Figura 5. 8. Superficies de fractura probeta número uno.

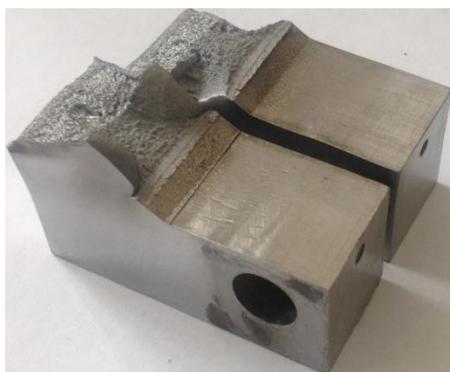


Figura 5.9. Superficies de fractura probeta número uno.

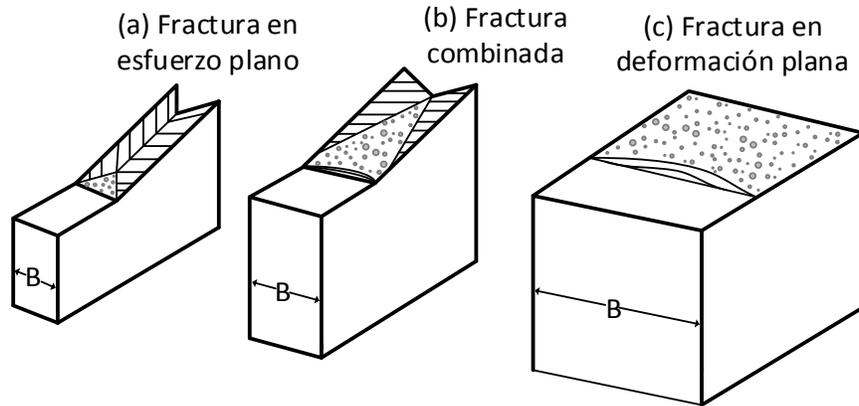


Figura 5.10. Tipos de fractura dependiendo del espesor de la probeta.

Para la probeta número dos se obtuvo la curva carga-desplazamiento que se presenta en la figura 5.11.

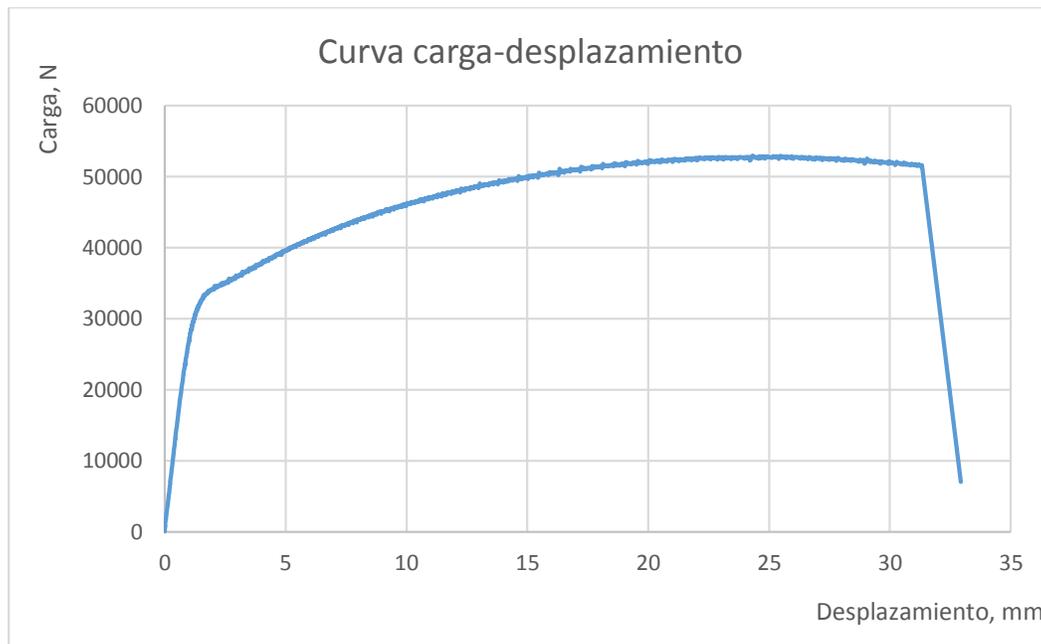


Figura 5. 11. Curva carga-desplazamiento, P-v, probeta número dos.

En la curva carga-desplazamiento de la probeta número dos se observa el comportamiento lineal de la carga y el desplazamiento de abertura de la grieta; además se puede observar que durante la prueba el material soportó una carga máxima de 52581.6 N.

En las figuras 5.12 y 5.13 se presentan las superficies de fractura de la probeta número dos. En ellas se observa que el tipo de fractura que experimentó la probeta fue en condiciones de deformación plana como se esperaba.



Figura 5. 12. Superficie de fractura probeta dos.



Figura 5. 13. Superficie de fractura probeta dos.

Además, en las superficies de fractura de la probeta número dos se pueden observar las diversas marcas que se formaron cerca del centro de la superficie de fractura, las cuales parten del lugar de inicio de la grieta (preagrietado por fatiga). Estas marcas son elevaciones formadas por la deformación plástica por efecto de la propagación de la grieta principal.

En la figura 5.14 se determina el punto correspondiente a la carga P_Q para la probeta número uno.

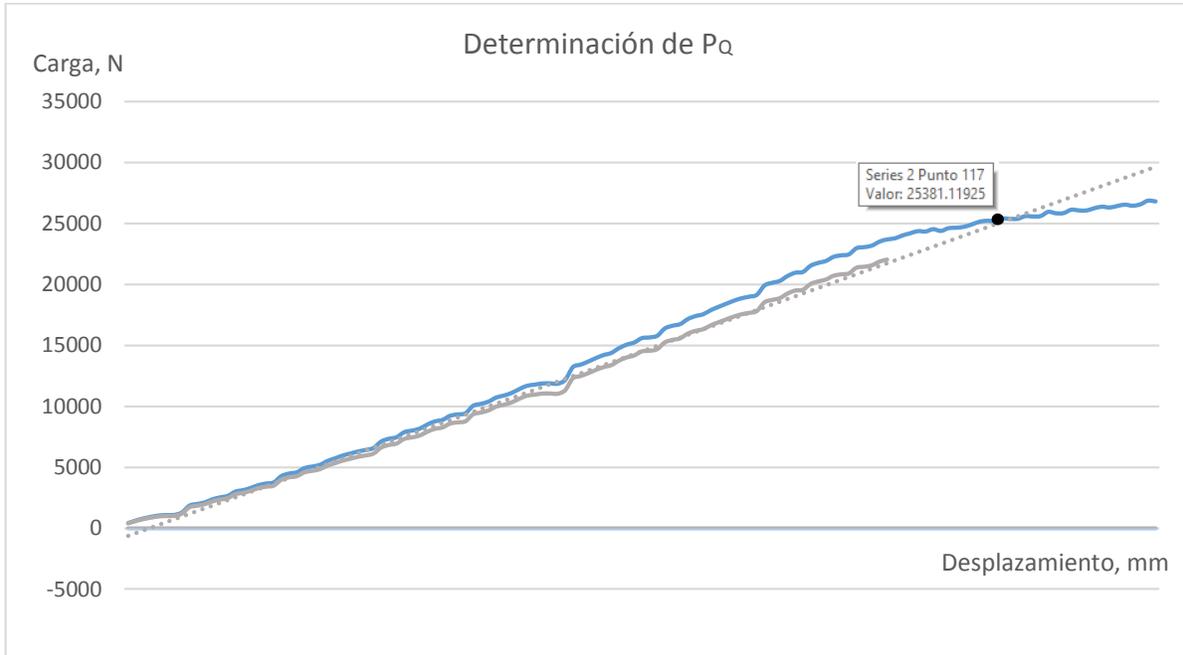


Figura 5.14. Determinación de la carga P_Q de la probeta número uno.

De acuerdo con la figura 5.14, la carga P_Q de la probeta número uno fue de 25381.19 N. En la figura 5.15 se presenta la gráfica que determina el punto correspondiente a la carga P_Q para la probeta número dos.

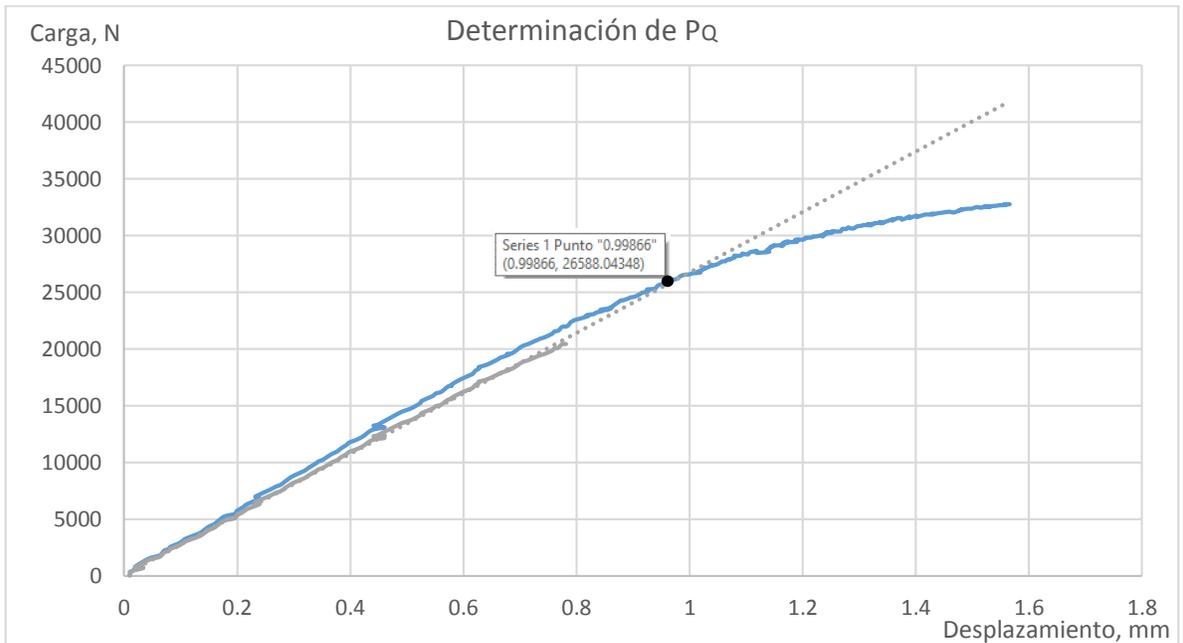


Figura 5. 15. Determinación de la carga P_Q de la probeta número dos.

De acuerdo a la figura 5.15, la carga P_Q para la probeta número dos fue de 26588.04 N. Al comparar los valores obtenidos en las dos probetas se encontró una variación de 4.53%. En este caso la probeta que desarrollo la mayor carga P_Q fue la probeta número dos. Comparando ambas gráficas para determinar las cargas P_Q , se observó que, aunque el comportamiento del material de las probetas durante las pruebas de tensión fue diferente, los datos obtenidos no difieren en gran medida.

Una vez determinadas todas las variables necesarias se obtuvo la tenacidad a la fractura del material de la MRP esta se calculó utilizando las ecuaciones 3.2 y 3.3 de la norma ASTM E399 [1]:

$$K_Q = \frac{P_Q}{\sqrt{B B_N} \sqrt{W}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (3.2)$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{\left(2 + \frac{a}{W}\right) \left[0.886 + 4.64 \frac{a}{W} - 13.32 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14.72 \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5.6 \left(\frac{a}{W}\right)^4\right]}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \quad (3.3)$$

Donde:

K_Q = Tenacidad a la fractura provisional, $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$

P_Q = Carga obtenida de la curva carga-desplazamiento, probeta número uno 25381.19 N, probeta número dos 26588.04 N

W = Ancho de la probeta, 50 mm

a = Longitud de la grieta, probeta uno 24.99 mm, probeta dos 24.38 mm

B = Espesor de la probeta, 25 mm

B_N = Cuando las probetas tienen muescas laterales B_N es el valor de la profundidad de la muesca; cuando la probeta no tiene muescas laterales B_N es igual al valor del espesor, 25 mm

Sustituyendo los datos para la probeta número uno se obtuvo lo siguiente:

$$K_Q = \frac{P_Q}{\sqrt{B B_N} \sqrt{W}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$

$$K_Q = \frac{25381.19}{\sqrt{(0.025)(0.025)} \sqrt{0.05}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$

$$K_Q = (4540325.29) f\left(\frac{a}{W}\right)$$

El valor de $f\left(\frac{a}{W}\right)$ se obtuvo de la siguiente manera:

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{\left(2 + \frac{a}{W}\right) \left[0.886 + 4.64 \frac{a}{W} - 13.32 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14.72 \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5.6 \left(\frac{a}{W}\right)^4\right]}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}}$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{\left(2 + \frac{0.02499}{0.05}\right) \left[0.886 + 4.64 \left(\frac{0.02499}{0.05}\right) - 13.32 \left(\frac{0.02499}{0.05}\right)^2 + 14.72 \left(\frac{0.02499}{0.05}\right)^3 - 5.6 \left(\frac{0.02499}{0.05}\right)^4\right]}{\left(1 - \frac{0.02499}{0.05}\right)^{3/2}}$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{(2.4998)(0.886 + 2.319072 - 3.327336533 + 1.837792883 - 0.349440335)}{(0.5002)^{3/2}}$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{(2.4998)(1.366087995)}{(0.5002)^{3/2}}$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3.414946769}{0.353765543}$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = 9.65$$

Finalmente se obtiene:

$$K_Q = (4540325.29)(9.65)$$

$$K_Q = 43.81 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

De acuerdo con los resultados obtenidos de la probeta número se determinó que el valor de la tenacidad a la fractura del material de la MRP es de $43.81 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$.

Sustituyendo los datos para la probeta número dos se obtuvo lo siguiente:

$$K_Q = \frac{P_Q}{\sqrt{B B_N} \sqrt{W}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$

$$K_Q = \frac{26588.04}{\sqrt{(0.025)(0.025)} \sqrt{0.05}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$

$$K_Q = (4756213.18) f\left(\frac{a}{W}\right)$$

El valor de $f\left(\frac{a}{W}\right)$ se obtuvo de la siguiente manera:

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{\left(2 + \frac{a}{W}\right) \left[0.886 + 4.64 \frac{a}{W} - 13.32 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14.72 \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5.6 \left(\frac{a}{W}\right)^4\right]}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}}$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{\left(2 + \frac{0.02438}{0.05}\right) \left[0.886 + 4.64 \left(\frac{0.02438}{0.05}\right) - 13.32 \left(\frac{0.02438}{0.05}\right)^2 + 14.72 \left(\frac{0.02438}{0.05}\right)^3 - 5.6 \left(\frac{0.02438}{0.05}\right)^4\right]}{\left(1 - \frac{0.02438}{0.05}\right)^{3/2}}$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{(2.4876)(0.886 + 2.262464 - 3.166880083 + 1.706470955 - 0.3017380884)}{(0.5124)^{3/2}}$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{(2.4876)(1.37150451)}{(0.5124)^{3/2}}$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3.411754619}{0.366786786}$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = 9.30$$

Finalmente se obtiene:

$$K_Q = (4756213.18)(9.30)$$

$$K_Q = 44.23 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

De acuerdo con los resultados de la probeta número dos se determinó que el valor de la tenacidad a la fractura del material de la MRP es de $44.23 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$.

Una vez obtenidos todos los valores requeridos para utilizar las ecuaciones 3.2 y 3.4, se calculó la tenacidad a la fractura. En la tabla 5.4 se presentan los resultados obtenidos de la tenacidad a la fractura para las dos probetas ensayadas:

Tabla 5.4. Tenacidad a la fractura para las dos probetas ensayadas.

Tenacidad a la fractura, MPa√m	
Probeta uno	43.81
Probeta dos	44.23

A partir de los resultados se obtuvo el promedio, con el cual se determinó que la tenacidad a la fractura del material de la MRP, al utilizar la metodología de la norma ASTM E399 [1], fue de 44.02 MPa√m. Finalmente el valor obtenido de la tenacidad a la fractura fue validado.

La validación de la tenacidad a la fractura se realizó por medio de la ecuación 3.4, la cual es descrita en el capítulo 3:

$$2.5 \left(\frac{K_Q}{\sigma_{ys}} \right)^2 < (W - a) \quad (3.4)$$

Donde:

K_Q = Tenacidad a la fractura provisional, probeta uno 43.81 MPa√m, probeta número dos 44.23 MPa√m

σ_{ys} = Esfuerzo de fluencia del material, 249.45 MPa [12]

W = Ancho de la probeta, 50 mm

a = Longitud de la grieta, probeta uno 24.99 mm, probeta dos 24.38 mm

$(W - a)$ = Sección de la probeta sin agrietar, probeta uno 24.99 mm, probeta número dos 24.38 mm

Para poder utilizar esta ecuación fue necesario determinar la sección sin agrietar ($W-a$) de la probeta C (T), la cual se determinó de acuerdo con la figura 5.16.

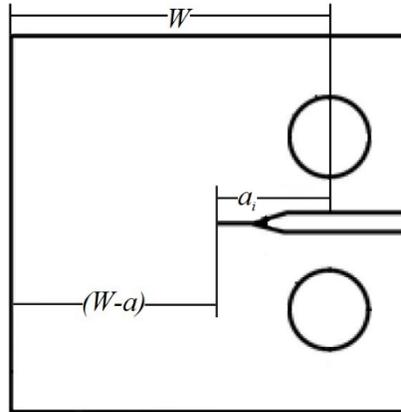


Figura 5. 16. Determinación de la sección sin agrietar de la probeta.

Al obtener el valor de la sección sin agrietar ($W-a$) para cada probeta se validaron los resultados obtenidos. Por lo tanto, en la probeta número uno se obtuvo lo siguiente:

$$0.0771 \text{ m} > 0.0249 \text{ m}$$

Y en la probeta número dos se obtuvo lo siguiente:

$$0.0785 \text{ m} > 0.0243 \text{ m}$$

Como puede observarse, la ecuación 3.4 no se cumple para ninguna de las dos probetas, lo cual significa que durante las pruebas experimentales el comportamiento del material pudo cambiar de lineal elástico a elastoplástico, es decir, el tamaño de la zona plástica localizado enfrente de la punta de la grieta alcanzó un tamaño considerable, el cual pudo interferir con los datos obtenidos.

Por lo tanto, se puede tratar de un material con un comportamiento elastoplástico, ya que fue necesario corroborar los resultados obtenidos con los resultados de las pruebas de impacto Charpy para comparar los valores obtenidos de ambas pruebas. Además, de poderse corroborar los datos obtenidos a partir de la repetición la prueba por medio de una metodología para materiales con comportamiento elastoplástico, se podría obtener un parámetro diferente a K_{Ic} como es el CTOD, J_{Ic} , etc.

5.2 Resultados de las de pruebas de impacto Charpy

Al finalizar las pruebas de impacto Charpy se realizó inmediatamente su validación para verificar que los resultados obtenidos fueran correctos. La validación consistió en la obtención de la velocidad de impacto del péndulo contra las probetas; si la velocidad de impacto se encontraba dentro del rango de 3 m/s a 6 m/s, los resultados de la prueba fueron válidos. La validación se realizó utilizando la ecuación 5.1 dada en la norma ASTM E23 [2]:

$$v = \sqrt{2gh} \quad (5.1)$$

Donde:

v = Velocidad, m/s

g = Gravedad, 9.81 m/s²

h = Altura de caída del péndulo, 1.3 m

Al sustituir valores en la ecuación 5.1, se determinó que la velocidad de impacto del péndulo contra las probetas fue de 5.05 m/s. Por lo tanto, los resultados obtenidos a partir de las pruebas de impacto Charpy son correctos.

Para obtener la tenacidad a la fractura por medio de las pruebas de impacto Charpy primero fue necesario obtener la energía del péndulo durante su caída; posteriormente se calculó la energía absorbida por el material; y finalmente se utilizaron las ecuaciones 4.3, 4.4 y 4.5 para obtener la tenacidad a la fractura. Para obtener la energía del péndulo se utilizó la ecuación 4.1 propuesta por L .P. Pook [31]:

$$W_p = Mgl(1 - \cos\beta) \quad (4.1)$$

Donde:

W_p = Energía del péndulo, J

M = Masa del péndulo, 19.8 kg

g = Aceleración, 9.81 m/s²

l = Longitud efectiva del péndulo, 0.8 m

β = Ángulo de caída del péndulo, 160°

Al sustituir los valores en la ecuación 4.1 se obtuvo lo siguiente:

$$W_p = Mgl(1 - \cos\beta)$$

$$W_p = (19.8 \text{ kg})(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})(0.8 \text{ m})(1 - \cos 160^\circ)$$

$$W_p = 301.41 \text{ J}$$

De acuerdo con las características del péndulo y a la ecuación 4.1, la energía del péndulo durante su caída fue de 301.41 J. Para obtener la energía absorbida por el material se utilizaron los ángulos de acenso obtenidos a partir de las pruebas experimentales. En las figuras 5.17, 5.18, 5.19, 5.20, 5.21 y 5.22 se presentan los ángulos de acenso obtenidos para cada probeta.



Figura 5. 17. Ángulo de acenso de la probeta uno, 88°



Figura 5. 18. Ángulo de acenso de la probeta dos, 82°



Figura 5. 19. Ángulo de acenso de la probeta tres, 79°



Figura 5. 20. Ángulo de acenso de la probeta cuatro, 81°



Figura 5. 21. Ángulo de acenso de la probeta seis, 90°



Figura 5. 22. Ángulo de acenso de la probeta siete, 83°

En la tabla 5.5 se presentan los ángulos de acenso de cada una de las siete probetas ensayadas.

Tabla 5.5. Ángulos de acenso.

Probeta	Ángulo de acenso γ
1	88
2	82
3	79
4	81
5	99
6	90
7	83

Para obtener la energía absorbida se utilizó la ecuación 4.2 propuesta por L .P. Pook [31]:

$$W_a = W_p - Mgl(1 - \cos\gamma) \quad (4.2)$$

Donde:

W_a = Energía absorbida por el material, J

W_p = Energía del péndulo durante su caída, 301.41 J

M = Masa del péndulo, 19.8 kg

g = Aceleración, 9.81 m/s²

l = Longitud efectiva del péndulo, 0.8 m

γ = Ángulo de acenso del péndulo

Al sustituir los valores en la ecuación 4.2 para la probeta uno se obtuvo lo siguiente:

$$W_{a1} = 301.41 J - (19.8 kg)(9.81 \frac{m}{s^2})(0.8 m)(1 - \cos 88^\circ)$$

$$W_{a1} = 151.44 J$$

Para la probeta número dos se obtuvo lo siguiente:

$$W_{a2} = 301.41 J - (19.8 kg)(9.81 \frac{m}{s^2})(0.8 m)(1 - \cos 82^\circ)$$

$$W_{a2} = 167.64 J$$

Para la probeta número tres se obtuvo lo siguiente:

$$W_{a3} = 301.41 J - (19.8 kg)(9.81 \frac{m}{s^2})(0.8 m)(1 - \cos 79^\circ)$$

$$W_{a3} = 175.66 J$$

Para la probeta número cuatro se obtuvo lo siguiente:

$$W_{a4} = 301.41 J - (19.8 kg)(9.81 \frac{m}{s^2})(0.8 m)(1 - \cos 81^\circ)$$

$$W_{a4} = 170.32 J$$

Para la probeta número cinco se obtuvo lo siguiente:

$$W_{a5} = 301.41 J - (19.8 kg)(9.81 \frac{m}{s^2})(0.8 m)(1 - \cos 99^\circ)$$

$$W_{a5} = 121.71 J$$

Para la probeta número seis se obtuvo lo siguiente:

$$W_{a6} = 301.41 J - (19.8 kg)(9.81 \frac{m}{s^2})(0.8 m)(1 - \cos 90^\circ)$$

$$W_{a6} = 146.01 J$$

Para la probeta número siete se obtuvo lo siguiente:

$$W_{a7} = 301.41 J - (19.8 kg)(9.81 \frac{m}{s^2})(0.8 m)(1 - \cos 83^\circ)$$

$$W_{a7} = 164.95 J$$

En la tabla 5.6 se presentan los valores de la energía absorbida para cada probeta ensayada.

Tabla 5.6. Energía absorbida del material en *J*.

Probeta	Energía absorbida J
1	151.44
2	167.64
3	175.66
4	170.32
5	121.71
6	146.01
7	164.95

De los resultados obtenidos de la energía absorbida por el material se calculó el promedio de los valores. Dicho promedio se realizó sin tomar en cuenta el valor máximo (probeta tres) y mínimo (probeta cinco), por lo tanto, el promedio se calculó solo con cinco valores, obteniendo que el material de la MRP tiene una capacidad de absorción de energía de 160.07 J o 16.31 kg·m.

Para determinar la tenacidad a la fractura se utilizó el valor promedio de la energía absorbida por el material y las correlaciones propuestas por J. M. Barson y S. T. Rolfe [3]; las correlaciones utilizadas fueron las siguientes:

Correlación de Barson-Rolfe:

$$K_{IC}^2 = (5)(\sigma_{ys})(CVN - \frac{\sigma_{ys}}{20}) \quad (4.3)$$

$$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}}\right)^2 = \frac{5}{\sigma_{ys}} \left(CVN - \frac{\sigma_{ys}}{20}\right) \quad (4.4)$$

Correlación de Rolfe-Novak:

$$K_{IC}^2 = (5)(\sigma_{ys})^2 \left(\frac{CVN}{\sigma_{ys}} - 0.05\right) \quad (4.5)$$

Donde:

K_{IC} = Tenacidad a la fractura, MPa \sqrt{m}

σ_{ys} = Esfuerzo de fluencia del material, 249.45 MPa [12]

CVN = Energía absorbida por el material, 16.31 kg·m

El esfuerzo de fluencia σ_{ys} utilizado para realizar los cálculos fue tomado de investigación de Y. T. Tlapalama Fuertes [12], donde las principales propiedades mecánicas del material de la MRP fueron obtenidas. De este modo, el valor utilizado fue $\sigma_{ys} = 249.45$ MPa. A continuación se presentan los cálculos realizados para la obtención de la tenacidad a la fractura.

Al sustituir los valores en la correlación de Barson-Rolfe se obtuvo lo siguiente:

$$K_{IC}^2 = (5)(\sigma_{ys}) \left(CVN - \frac{\sigma_{ys}}{20}\right) \quad (4.3)$$

$$K_{Ic} = \sqrt{(5)(\sigma_{ys}) \left(CVN - \frac{\sigma_{ys}}{20} \right)}$$

$$K_{Ic} = \sqrt{(5)(249.45) \left(16.31 - \frac{249.45}{20} \right)}$$

$$K_{Ic} = \sqrt{(1247.25)(3.8375)}$$

$$K_{Ic} = \sqrt{4786.3218}$$

$$K_{Ic} = 69.18 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

De acuerdo con la ecuación 4.3, la tenacidad a la fractura del material de la MRP es de 69.18 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$.

Al sustituir los valores en la segunda correlación de Barson-Rolfe se obtuvo lo siguiente:

$$\left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_{ys}} \right)^2 = \frac{5}{\sigma_{ys}} \left(CVN - \frac{\sigma_{ys}}{20} \right) \quad (4.4)$$

$$K_{Ic} = \left[\sqrt{\frac{5}{\sigma_{ys}} \left(CVN - \frac{\sigma_{ys}}{20} \right)} \right] \sigma_{ys}$$

$$K_{Ic} = \left[\sqrt{\frac{5}{249.45} \left(16.31 - \frac{249.45}{20} \right)} \right] (249.45)$$

$$K_{Ic} = \left[\sqrt{(0.02004)(3.8375)} \right] (249.45)$$

$$K_{Ic} = (\sqrt{0.0769})(249.45)$$

$$K_{Ic} = (0.2773)(249.45)$$

$$K_{Ic} = 69.17 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

De acuerdo con la ecuación 4.4, la tenacidad a la fractura del material de la MRP es de 69.17 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$.

Al sustituir los valores en la correlación de Rolfe-Novak se obtuvo lo siguiente:

$$K_{Ic}^2 = (5)(\sigma_{ys})^2 \left(\frac{CVN}{\sigma_{ys}} - 0.05 \right) \quad (4.5)$$

$$K_{Ic} = \sqrt{(5)(\sigma_{ys})^2 \left(\frac{CVN}{\sigma_{ys}} - 0.05 \right)}$$

$$K_{Ic} = \sqrt{(5)(249.45)^2 \left(\frac{16.31}{249.45} - 0.05 \right)}$$

$$K_{Ic} = \sqrt{(311126.5125)(0.01538)}$$

$$K_{Ic} = \sqrt{4785.1257}$$

$$K_{Ic} = 69.17 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

De acuerdo con la ecuación 4.4, la tenacidad a la fractura del material de la MRP es de 69.17 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$. En la tabla 5.7 se presentan los resultados obtenidos a partir de las correlaciones utilizadas.

Tabla 5.7. Tenacidad a la fractura del material $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$.

Correlación	Tenacidad a la fractura, $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$
Barson-Rolfe ecuación 4.3	69.18
Barson-Rolfe ecuación 4.4	69.17
Rolfe-Novak ecuación 4.5	69.17

De los resultados obtenidos por medio de las correlaciones se calculó el promedio; a través de él se obtuvo que la tenacidad a la fractura del material de la MRP utilizando pruebas de impacto Charpy fue de 69.17 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$.

De acuerdo con las condiciones de prueba que se presentaron, las pruebas de impacto Charpy se consideraron finalizadas una vez que las probetas se fracturaron totalmente; pero, como puede observarse en las figuras 5.23, 5.24, 5.25, 5.26, 5.27, 5.28, y 5.29 las probetas ensayadas no se fracturaron totalmente.



Figura 5. 23. Probeta 1.



Figura 5. 24. Probeta 2.



Figura 5. 25. Probeta 3



Figura 5. 26. Probeta 4.



Figura 5. 27. Probeta 5



Figura 5. 28. Probeta 6.



Figura 5. 29. Probeta 7.

De acuerdo con la norma ASTM E23 [2], una probeta puede ser reportada como fracturada totalmente si ésta se puede separar totalmente en dos al presionarla por sus extremos sin fatigarla. La fractura de las probetas se realizó conforme a las recomendaciones y fue posible fracturar totalmente las probetas presionándolas por sus extremos.

Una vez que se fracturaron las probetas por completo, se verificó que éstas hayan desarrollado en sus superficies de fractura las tres regiones características de fractura de este tipo de prueba, las cuales son: la región de inicio de fractura, la región de fractura frágil y la región de fractura final. En la figura 5.30 se presenta un esquema de las tres regiones de fractura de acuerdo con la norma ASTM E23 [2].

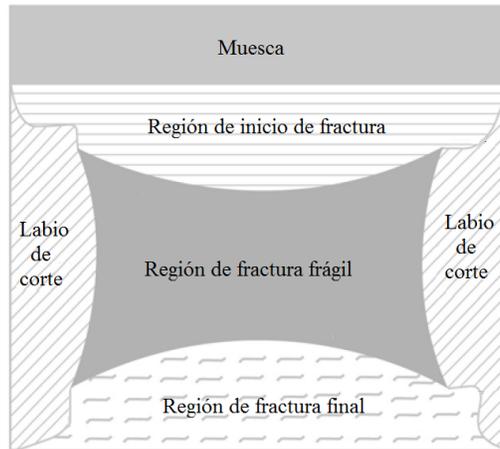


Figura 5. 30. Regiones de fractura según norma.

En las figuras 5.31, 5.32, 5.33, 5.34, 5.35, 5.36 y 5.37 se presentan las imágenes en donde puede observarse las superficies de fractura completamente fracturadas, en ellas es posible observar que estas presentaron las tres regiones de fractura. En consecuencia, las probetas son consideradas como fracturadas totalmente.



Figura 5. 31. Probeta 1 totalmente fracturada.



Figura 5. 32. Probeta 2 totalmente fracturada.



Figura 5. 33. Probeta 3 totalmente fracturada.



Figura 5. 34. Probeta 4 totalmente fracturada.



Figura 5. 35. Probeta 5 totalmente fracturada.



Figura 5. 36. Probeta 6 totalmente fracturada.



Figura 5. 37. Probeta 7 totalmente fracturada.

Es importante determinar si las probetas se fracturaron totalmente, debido a que si éstas no se fracturaron totalmente o no fueron posible fracturarlas de conforme con las recomendaciones de la norma ASTM E23 [2], el valor de la tenacidad a la fractura obtenido a partir de estas probetas estaría por debajo del valor real, debido a que las probetas tenían más capacidad de absorción de energía.

De acuerdo con los resultados obtenidos de las pruebas de tensión y de impacto Charpy es posible notar una gran diferencia en los resultados obtenidos. En la tabla 5.8 se presentan los resultados obtenidos de ambas pruebas, con lo cual se determina que existe una diferencia considerable de $20.15 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ en ambas pruebas.

Tabla 5.8. Comparación de la tenacidad a la fractura.

Tenacidad a la fractura, $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$	
Tensión	44.02
Impacto	69.17

Es común que los resultados entre las dos pruebas sean diferentes debido a que las pruebas se realizaron utilizando diferentes tipos de carga, como las cargas de tensión y cargas de impacto; además de que se utilizaron probetas con diferente geometría y, en el caso de las probetas utilizadas para las pruebas de tensión, fue necesario realizar un preagrietado utilizando cargas de fatiga.

Como ya se mencionó en el capítulo 2, otra de las desventajas de determinar la tenacidad a la fractura por medio del procedimiento establecido por la norma ASTM E399 [1] es que, a pesar de que se hayan considerado y respetado todas las recomendaciones incluidas las diferentes condiciones de prueba, esto no asegura que se obtendrán resultados válidos a partir de dichas pruebas. Esto se debe, principalmente, a que se requieren diferentes validaciones. Para este caso, de acuerdo con los resultados de la ecuación 3.4, se determinó que los resultados no son válidos para ninguna de las probetas ensayadas debido a que el material durante las pruebas experimentales de tensión pudo presentar un comportamiento elastoplástico.

En consecuencia los resultados que dependen de las pruebas de tensión deben de ser corroborados a partir de una metodología para materiales con comportamiento elastoplástico, como el procedimiento descrito por la norma ASTM E1820 [16], el cual determina un parámetro de la tenacidad a la fractura como el CTOD, J_{Ic} , etc.

En conclusión, el valor de la tenacidad a la fractura del material de la MRP es el obtenido utilizando pruebas de impacto Charpy con un valor de $69.17 \text{ MPa}\sqrt{m}$, debido a que estas pruebas fueron válidas en todos los aspectos.

Con la obtención de la tenacidad a la fractura se establece la base para poder realizar análisis por medio de la mecánica de la fractura con el fin de determinar el tamaño crítico de la grieta que puede tolerar el material. Es así como se define la resistencia del material en función del tamaño de grieta, con lo cual se podrá calcular el tiempo necesario para que ocurra la inestabilidad de la grieta, misma que podría causar la fractura total del material. La investigación realizada sirve como base para determinar de un criterio óptimo para el retiro de este elemento mecánico.

Conclusiones

A continuación se presentan las conclusiones obtenidas a partir de los resultados de las pruebas de tensión y de impacto Charpy para la determinación de la tenacidad a la fractura del material de la MRP.

A continuación se presentan las conclusiones obtenidas de los resultados de las pruebas para determinar la tenacidad a la fractura utilizando pruebas de tensión y de impacto Charpy:

- Para realizar el preagrietado de las probetas C (T) para alcanzar la longitud de grieta de 2.5 mm, fueron necesarios 152006 ciclos para la probeta número uno y 125224 ciclos para la probeta número dos.
- De las curvas carga-desplazamiento obtenidas de las pruebas de tensión, se determinó que la carga máxima soportada por la probeta número uno fue de 56724.56 N y de 52581.6 N para la probeta número dos.
- De las curvas carga-desplazamiento se determinó que la carga P_Q para la probeta número uno fue de 25381.19 N y de 26588.04N para la probeta número dos.
- Se determinó que la tenacidad a la fractura para el material de la MRP utilizando pruebas de tensión fue de $44.02 \text{ MPa}\sqrt{m}$.
- De acuerdo con los resultados de la ecuación 3.4 se determinó que el material pudo tener un comportamiento elastoplástico durante las pruebas experimentales por lo cual es necesario corroborar los resultados obtenidos por las pruebas realizadas por tensión utilizando una metodología para materiales con comportamiento elastoplástico o de alta tenacidad.
- Utilizando pruebas de impacto Charpy se determinó que el material de la MRP tiene una capacidad de absorción de energía de 160.07 J.
- De acuerdo con los resultados obtenidos de las pruebas de impacto Charpy se obtuvo que la tenacidad a la fractura del material de la MRP fue de $69.17 \text{ MPa}\sqrt{m}$.

Trabajos futuros

A continuación se presentan los trabajos futuros:

- Realizar un análisis de mecánica de la fractura utilizando el valor de la tenacidad a la fractura K_{Ic} obtenido en este trabajo, con el fin de determinar una longitud crítica de grieta.
- Analizar las superficies de fractura de las probetas C (T) utilizando técnicas fractográficas para observar, analizar y determinar si la microestructura del material intervino en los resultados obtenidos en esta investigación.
- Realizar simulaciones numéricas con los resultados de este trabajo utilizando diferentes condiciones de operación para obtener un criterio de retiro para este componente mecánico.
- Realizar estudios sobre la MRP utilizando la tenacidad a la fractura determinada en esta investigación considerando el efecto en más de una grieta.
- Obtener la tenacidad a la fractura utilizando la metodología propuesta en la norma ASTM E1820 [16] para materiales elastoplásticos y comparar los resultados con los valores obtenidos en este trabajo.

Bibliografía

[1] ASTM E399. Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{IC} of Metallic Materials. Pp. 33. 2012.

[2] ASTM E23. Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. Pp. 49. 2013.

[3] J. M. Barsom and S. T. Rolfe. Correlations Between and Charpy V-Notch Test Results in the Transition-Temperature Range. Impact Testing of Metals, STP 466. Pp. 287-308. 1970.

[4] B. S. Mitchell. An Introduction to Materials Engineering and Science: For Chemical and Materials Engineers, Pp. 380-536. 2004.

[5] Elton N. Kaufmann. Characterization of Materials. Pp. 1-17. 2012.

[6] ASTM Special Technical Publication No. 430. Fifty years of progress in metallographic techniques. Pp. 413. 1966.

[7] L.P. Pook. Understanding Pendulums. A Brief Introduction. History of Mechanism and Machine Science 12. Pp. 77-96. 2011.

[8] T. L. Anderson. Fracture mechanics Fundamentals and Applications. Pp. 630. 2005.

[9] P. Mäkelä and C. Fellers. An analytic procedure for determination of fracture toughness of paper materials. Nordic Pulp and Paper Research Journal Vol 27. Pp. 9. 2012.

[10] G. c. Sih, E. Sommer, W. Dahl. Application of Fracture Mechanics to Materials and Structures. Pp. 359-429. 1984.

- [11] ASM international, Metals Handbook: Vol. 10. Materials Characterization. Pp. 1310. 1986.
- [12] T. Y. Tlapalama Fuertes. Análisis de la iniciación de grietas por fatiga en la maza de rueda portadora de los vagones del sistema de transporte colectivo metro, utilizando métodos numéricos y experimentales. Pp. 325. 2014.
- [13] A. R. Johnson. Fracture Toughness of AISI M2 and AISI M7 High-Speed steels. Metallurgical Transactions A Volume 8A. Pp. 891-897. 1977.
- [14] J. R. Hawthorne and T. R. Mager. Relationship. Between Charpy V and Fracture Mechanics Kic Assessments of A533-B Class 2 Pressure Vessel Steel. Pp. 151-163. 1972.
- [15] F. I. Baratta, J. A. Kapp and D. S. Saunders. Load-Point Compliance for the Arc-Bend/Arc-Support Fracture Toughness Specimen. Fracture Mechanics: Twenty-First Symposmrn, STP 1074.
- [16] ASTM E1820-15a. Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness. Pp. 46. 2001.
- [17] H. Nordberg and B. Aronsson. A microfractographic investigation of fatigue crack propagation in a cast steel and some aluminium alloys. Swedish Institute for Metal Research. Pp 376-380. 1969.
- [18] A. Cree, G. Weldmann, R. Hermann. Film-assisted fatigue crack propagation in anodized aluminium alloys. JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE LETTERS 14. Pp. 1505-1507. 1995.
- [19] ASTM E647-15. Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates. Pp. 49. 2014.

[20] E. Palma. Investigation of influence of the porosities in fatigue crack propagation. Metal Research Institute. Pp 234-246. 1969.

[21] B. Kosec, G. Kovacic, L. Kosec, Fatigue cracking of an aircraft wheel. El sevier Science, pp 603–609, 2002.

[22] S. Hamada, H. Hamada, H. Suzuki, M. Tamin, A. Microstructure and environment-dependent fatigue crack propagation properties of Ti-48Al intermetallics. Journal of Materials Science 37. Pp. 1107-1113. 2002.

[23] X. Wang y J. Fan, SEM online investigation of fatigue crack initiation and propagation in cast magnesium alloy. Journal of Materials Science 39. Pp 2617 – 2620. “2004.

[24] L. Batum, G. Schaffer, J. Griffiths. Fatigue crack propagation in a sintered 2xxx series aluminium alloy. Materials Science and Engineering. Pp 1–6. 2006.

[25] J. Schumble. Fatigue crack propagation in 7050-T7451 plate alloy. Engineering Fracture Mechanics, pp 1037-1048, 2009.

[26] Tokaji, K. Nakajima, M. Uematsu, Y. Fatigue crack propagation and fracture mechanisms of wrought magnesium alloys in different environments, International Journal of Fatigue, pp 1137–1143, 2009.

[27] J. Pang, S. LI, Z. Zhang. High-cycle fatigue and fracture behaviours of Cu-Be alloy with a wide strength range. Fatigue & Fracture Engineering Materials & Structures. Pp 168–176. 2012.

[28] G. Cammarota, G. Garagnani, P. Bariani, M. Ciprandi, G. Donzelli and R. Trippodo. Fracture toughness characterization of light alloys for aeronautical use. International Journal of Fracture 29. Pp. 47-55. 1985.

[29] D. J. Alexander and R. L. Klueh. Impact behavior of reduced-activation steel irradiated to 24 dpa. *Journal on nuclear materials*. Pp. 736-740. 1994.

[30] R. D. Koester and S. E. Barcus. Evaluation of fabrication methods for making notches for Charpy V-notch impact specimens. *Charpy impact test: factor and variables*, STP 1072. Pp. 83-93. 1990.

[31] L.P. Pook. *Understanding Pendulums. A Brief Introduction*. Pp. 77-96. 2011.

[32] N. R. Felipe de Jesús. Análisis dinámico modal aplicando el método del elemento finito utilizando mallas híbridas para determinar el tamaño crítico de las grietas en la brida de la maza de rueda portadora de los vagones del metro. Pp. 183. 2012.

[33] ASTM Special Technical Publication No. 317. *Symposium on advances in electron metallography and electron probe microanalysis*. Pp. 215. 1961.

[34] K. Tokaji, M. Nakajima, Y. Uematsu. Fatigue crack propagation and fracture mechanisms of wrought magnesium alloys in different environments, *International Journal of Fatigue*, pp 1137–1143, 2009.

[35] Morland, E. Fracture Toughness in the Transition Regime for A533B-1 Steel: The Effect of Specimen Sidegrooving. *Fracture Mechanics. Twenty-First Symposium* STP 1074. Pp. 215-237. 1990.

[36] R. M. Brissey, H. A. Liebafsky and H. G. Pfeiffer. Examination of metallic materials by x-ray emission spectrography. *Symposium on fluorescent x-ray spectrographic analysis* STP 157. Pp. 43-56. 1953.

[37] ASTM Special Technical Publication No. 436. *Electron fractography*. Pp. 236. 1967.

[38] ASTM Special Technical Publication No. 436. Review of developments in plane strain fracture toughness testing.

[39] ASTM Special Technical Publication No. 480. Applications of modern metallographic techniques. Pp. 281. 1969.

[40] ASTM Special Technical Publication No. 557. Metallography, a practical tool for correlating the structure and properties of materials. Pp. 241. 1973.

[41] ASTM STP 1074. Fracture Mechanics: Twenty-First Symposium. Pp. 615. 1990.

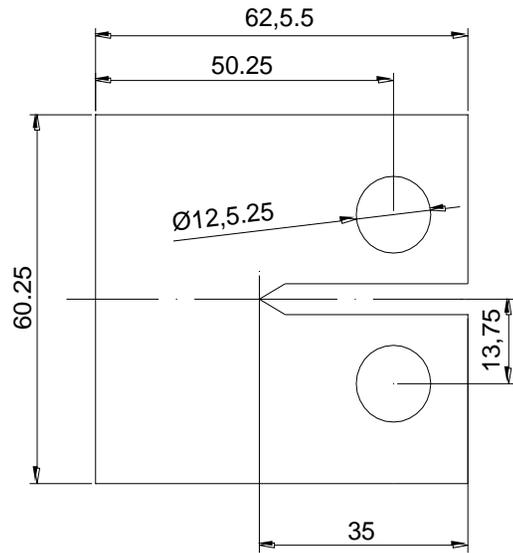
[42] Metals Handbook. Vol. 7. Atlas of Microstructures of Industrial Alloys. Pp. 3-54. 1972.

[43] Metals Handbook: Vol. 9. Metallography and Microstructures. Pp. 131-149. 2004.

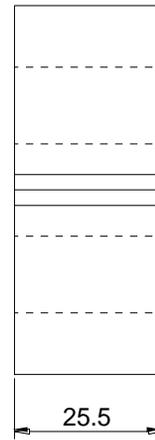
[44] G. R. Irwin. Fracture dynamics. In: Fracturing of metals, symposium of American Society for Metals. Transaction ASM 40A. Pp. 66–147. 1948.

Anexos

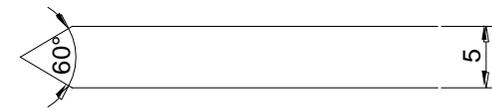
Planos de las probetas y mordazas utilizadas.



Vista lateral

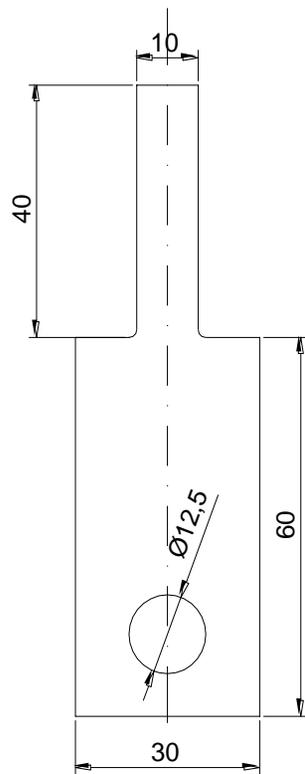


Vista frontal

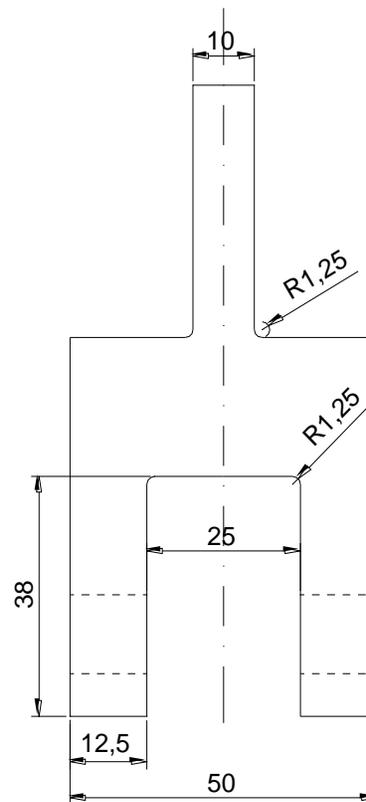


Detalle de la muesca

Diseñado por: Adán Ruíz Ríos Fecha: 08/08/2016		Probeta compacta a tensión para la determinación de K_{IC}	
Revisado por: XXX Fecha: 08/08/2016			
Escala: 1/1	Unidades: mm	Número de dibujo: No. 1	Hoja: 1/1

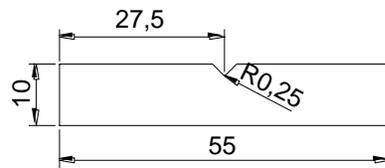


Vista lateral

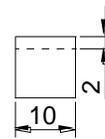


Vista frontal

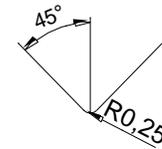
Diseñado por: Adán Ruíz Ríos Fecha: 08/08/2016		<h1>Mordazas para pruebas de tensión</h1>	
Revisado por: XXX Fecha: 08/08/2016			
Escala: 1/1	Unidades: mm	Número de dibujo: No. 1	Hoja: 1/1 103



Vista lateral



Vista frontal



Detalle de la muesca

Diseñado por: Adán Ruíz Ríos Fecha: 08/08/2016		Probeta para pruebas de impacto charpy	
Revisado por: XXX Fecha: 08/08/2016			
Escala: 1/1	Unidades: mm	Número de dibujo: No. 1	Hoja: 1/1 104