



Universidad
Industrial de
Santander

**ESTUDIO EXPERIMENTAL EN CONDICIÓN ELASTO-PLASTICO DINAMICO
DE LA CELDA ROMBOIDAL DE UN METAL EXPANDIDO**

ANDREA BARRERA GUEVARA

LEIDY ALEXANDRA OTÁLORA RAMÍREZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2015

**ESTUDIO EXPERIMENTAL EN CONDICIÓN ELASTO-PLASTICO DINAMICO
DE LA CELDA ROMBOIDAL DE UN METAL EXPANDIDO**

ANDREA BARRERA GUEVARA

LEIDY ALEXANDRA OTÁLORA RAMÍREZ

Proyecto de Grado para optar al título de Ingeniera Mecánica

Director

ALBERTO DAVID PERTUZ COMAS

Ingeniero Mecánico PhD. M.Sc

Co-Director

CARLOS ALBERTO GRACIANO GALEANO

Ingeniero Mecánico PhD. M. Sc.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2015

DEDICATORIA

A Dios por permitirme culminar mis estudios.

A mis padres, que siempre recordare que su sudor es la tinta con la que estarán escritas las siglas Ing delante de mi nombre.

A mi hermana y compañera Leydi Carolina por su paciencia, amor, dedicación y apoyo durante mi proceso de formación académica.

A Albert Mauricio por sus consejos, ayuda, comprensión y cariño, fueron fundamentales para culminar con éxito un logro más en mi vida.

A mi amiga Karent Tatiana, por su paciencia, consejos, apoyo y presencia en todas mis alegrías y tristezas, por acompañarme con voz de aliento en los momentos que más los necesite y por hacer parte de este nuevo logro en mi vida.

A mi compañera de proyecto Leidy Alexandra por el apoyo brindado, esfuerzo y paciencia en los obstáculos presentados y alegrías en estos años de formación académica.

A todos mis compañeros de carrera porque me dejaron buenas enseñanzas y recuerdos.

Andrea Barrera Guevara

DEDICATORIA

Este proyecto de grado va dedicado:

A Dios quien me dio la bendición para poder estudiar y lograr ser profesional.

A mis padres Fidel y Mariela quienes me educaron con valores y que con su esfuerzo y dedicación lucharon a mi lado para que pudiera obtener el título como ingeniera.

A mis hermanos Carlos y Andrea por acompañarme siempre en los momentos difíciles, cuando más los necesite.

A mi hermosa hija Valeria quien me da día a día las fuerzas para seguir adelante y me motiva a ser cada día mejor persona.

A mi compañera Andrea, con quien uní fuerzas para lograr cumplir esta meta que tenemos en común.

A quienes hicieron parte de este camino, porque más adelante tendremos recuerdos compartidos.

Y a mí por ser una mujer que lucha por lo que quiere.

Leidy Alexandra Otálora R.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen de manera especial y sincera a las personas que de forma desinteresada colaboraron con el desarrollo de este proyecto.

A Carlos Borrás Pinilla Ph.D., M.Sc, por la orientación durante la fase de ejecución del proyecto, el apoyo incondicional y el aporte de su conocimiento en la fase final de nuestro proyecto de grado.

A David Alberto Montilla Parra, Estudiante de ingeniería metalúrgica por su colaboración en el proceso metalográfico de las pruebas realizadas.

A David Alberto Pertuz Comas, Dr. Ing. Mecánico y director del proyecto por la dirección del proyecto.

Agradecemos al Laboratorio de Caracterización de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander por la colaboración para la elaboración de los ensayos requeridos para la culminación del proyecto de grado.

Agradecemos al Laboratorio de Microscópica del Parque Tecnológico Guatiguara por la colaboración en la realización de pruebas en SEM para cumplir con los objetivos planteados en el proyecto de grado.

Agradecemos a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica por la colaboración en el análisis metalográfico de las probetas.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	18
1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	18
1.2 OBEJTIVOS DEL TRABAJO DE GRADO	18
1.2.1 Objetivo general	18
1.2.2 Objetivos específicos	19
2. MARCO TEÓRICO	20
2.1 METAL EXPANDIDO DEFINICIÓN	20
2.2.1 Ensayo de tracción.	21
2.2.2 Curva de tracción.	21
2.2.3 Esfuerzo – deformación.	23
2.2.4 Deformación ingenieril.	23
2.2.5 Deformación real.	24
2.3 FATIGA	25
2.3.1 Definición.	25
2.3.2 Fatiga en los metales.	26
2.3.3 Fenómeno de la fatiga oligociclica.	26
2.3.4 Fatiga controlada por deformación cíclica.	26
2.3.5 Endurecimiento y ablandamiento cíclico.	28
2.4 ANTECEDENTES	28
2.4.1 Trabajos de Grado.	29
3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	33
3.1 FLUJOGRAMA EXPERIMENTAL	33
3.2 MATERIAL Y DISEÑO DE PROBETAS	33
3.3 PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO	36
3.3.1 Normas aplicadas a los ensayos.	39

3.3.2 Descripción de los ensayos a Tracción..	39
3.3.3 Descripción de los ensayos a Fatiga.	42
3.4 PREPARACIÓN METALOGRAFICA	43
3.5 MICROSCOPIA ÓPTICA Y MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO	44
4. ANALISIS DE RESULTADOS	46
4.1 Tracción	46
4.2 Fatiga	49
5. ANALISIS DE FALLA	56
5.1 MICROSCOPIA OPTICA	56
5.1.1 Micrografía acero ASTM A-569.	56
5.1.2 Micrografía probetas a fatiga	57
5.1.2.1 Probeta romboidal a 375 MPa.	57
5.1.2.1 Probeta romboidal a 500 MPa.	58
5.1.2.1 Probeta romboidal a 625 MPa.	58
5.1.2.1 Probeta romboidal a 750 MPa.	59
5.2 COMPARACION DE MICROGRAFIAS	60
5.3 ZONA DE FRACTURA	62
5.3.1 Probeta de 375 MPa de carga aplicada.	62
5.3.2 Probeta de 500 MPa de carga aplicada.	63
5.3.3 Probeta de 625 MPa de carga aplicada.	65
5.3.4 Probeta de 750 MPa de carga aplicada.	67
5.4 ANALISIS GENERAL	69
6. CONCLUSIONES	71
BIBLIOGRAFÍA	72

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Especificación de la Malla expandida	20
Figura 2. Curva Esfuerzo vs Deformación	22
Figura 3. Curva esfuerzo – deformación ingenieril.....	24
Figura 4. Curva esfuerzo-deformación real.....	25
Figura 5. Representación de un ciclo de histéresis.....	27
Figura 6. Endurecimiento y ablandamiento cíclico.....	28
Figura 7. Curva carga aplicada – desplazamiento vertical.....	29
Figura 8. Lámina de metal expandido, suministrada por mallas especiales	34
Figura 9. Método de corte de la probeta	35
Figura 10. Probetas para ensayos	36
Figura 11. Material Testing Systems (MTS).....	37
Figura 12. Software propio de la MTS, sometiendo una probeta a tracción	38
Figura 13. Medidas longitudinal de las probetas.....	40
Figura 14. Método de sujeción de las probetas	41
Figura 15. Rotura de la probeta durante el ensayo de tracción	42
Figura 16. Desbaste mecánico con lijas	43
Figura 17. Pruebas de microscopia electrónica de barrido	44
Figura 18. Microscopio electrónico de barrido	45
Figura 19. Curva de esfuerzo – deformación ingenieril.....	47
Figura 20. Curva de esfuerzo – deformación real.....	48
Figura 21. Curva esfuerzo – deformación a carga de 375 MPa.....	50
Figura 22. Curva esfuerzo – deformación a carga de 500 MPa.....	51
Figura 23. Curva esfuerzo – deformación a carga de 625 MPa.....	52
Figura 24. Curva esfuerzo – deformación a carga de 750 MPa.....	53
Figura 25. Curva de vida en fatiga	55
Figura 26. Micrografía de la malla expandida, corte longitudinal, sin carga aplicada, magnificación de 20 x.	56
Figura 27. Micrografía probeta a 5700 ciclos y carga aplicada de 375 MPa.....	57

Figura 28. Micrografía de la probeta romboidal, corte longitudinal, con carga aplica de 500 MPa, magnificación de 20 x.....	58
Figura 29. Micrografía de la malla expandida, corte longitudinal, con carga aplica de 625 MPa, magnificación de 20 x.....	59
Figura 30. Micrografía probeta a 230 ciclos y carga aplicada de 750 MPa.....	60
Figura 31. Comparación de estructura granular entre la probeta original y luego de una deformación con carga aplicada de 375 MPa.....	60
Figura 32. Comparación de estructura granular entre la probeta original y luego de una deformación con carga aplicada de 500 MPa.....	61
Figura 33. Comparación de estructura granular entre la probeta original y luego de una deformación con carga aplicada de 625 MPa.....	61
Figura 34. Comparación de estructura granular entre la probeta original y luego de una deformación con carga aplicada de 750 MPa.....	62
Figura 35. Probeta de 375 MPa de carga aplicada.....	63
Figura 36. Probeta de 500 MPa de carga aplicada.....	64
Figura 37. Avance de grieta en probeta de 500 MPa.....	65
Figura 38. Probeta de 625 MPa de carga aplicada.....	66
Figura 39. Fin de la grieta con un comportamiento de fractura completamente dúctil de la probeta a 625 MPa.....	67
Figura 40. Superficie de crecimiento de la grieta, hoyuelos de deformación dúctil en la probeta de 750 MPa.....	68
Figura 41. Final de la grieta a 45° del plano de falla en la probeta de 750 MPa....	68

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resultados de la fuerza máxima según la orientación de las probetas	30
Tabla 2. Propiedades mecánicas del acero ASTM A-569	34
Tabla 3. Composición química del acero ASTM A-569	35
Tabla 4. Características de la MTS (Material Testing Systems)	38
Tabla 5. Parámetros para ensayo de fatiga	43
Tabla 6. Duración de ciclos a carga de 375 MPa	50
Tabla 7. Duración de ciclos a carga de 500 MPa	51
Tabla 8. Duración de ciclos a carga de 625 MPa	52
Tabla 9. Duración de ciclos a carga de 750 MPa	53
Tabla 10. Desviación estándar de ensayos fatiga	54
Tabla 11. Resultados de vida a fatiga de bajo ciclo	55

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO EXPERIEMTAL EN CONDICION ELASTO-PLASTICO DINAMICO DE LA CELDA ROMBIODAL DE UN METAL EXPANDIDO*

AUTOR: Andrea Barrera Guevara, Leidy Alexandra Otálora Ramírez**

PALABRAS CLAVES: Metal Expandido, Fatiga, Esfuerzos, Plasticidad.

DESCRIPCIÓN: En la actualidad se buscan nuevas aplicaciones de la malla de metal expandido, ya que es por su proceso de fabricación convencional, corte y estirado, da lugar a nuevas alternativas de uso industrial. El propósito fundamental de este proyecto de investigación es realizar el ensayo de dieciséis probetas de la malla de metal expandido, la cuales cuatro corresponde a la caracterización de la celda romboidal en condiciones estáticas, donde se tiene como resultado las gráficas de esfuerzo vs deformación ingenieril, esfuerzo vs deformación real y esfuerzo vs deformación en escala logarítmica, basándonos en las normas ASTM E8. Posteriormente se realizaron los ensayos dinámicos de las doce probetas de la celda romboidal donde se apreció el comportamiento dinámico, se obtuvieron las cuatro curvas de esfuerzo vs deformación dinámica cuando la celda romboidal fue solicitada a cuatro esfuerzos distintos, tomados de la caracterización estática, donde se pueden apreciar las curvas de esfuerzo vs el número de ciclos y la duración de cada ensayo realizado.

Finalmente se realizó un análisis microscópico, tomando la micrografía de cada zona de falla de las probetas que fueron ensayadas en condiciones dinámicas, donde se puede apreciar la estructura granular de la celda romboidal en su estado natural y la estructura granular de las probetas solicitadas a diferentes esfuerzo y se realizó la comparación de la deformación plástica de los granos a medida que va aumentando el esfuerzo y mediante la norma ASTM E112 se determina el tamaño del grano de la estructura granular original . Luego se tomaron micrografías por medio de microscopia electrónica de barrido donde se apreció la principal causa de falla de las probetas, ya que la malla de metal expandido debido a su bajo contenido de carbono posee la propiedad de un metal dúctil y la grieta es de tipo intergranular.

*Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica, Director: Alberto David Pertuz Comas, Ingeniero Mecánico.

ABSTRACT

TITLE: EXPERIMENTAL STUDY OF A RHOMBOIDAL CELL FROM A EXPANDED METAL: CASE OF A DYNAMIC ELASTO-PLASTIC CONDITION*

AUTHOR: Andrea Barrera Guevara, Leidy Alexandra Otálora Ramírez**

KEY WORDS: Expanded metal, fatigue, plasticity, strength of materials.

SUMMARY: At present new applications of expanded metal mesh is seeking, as it is for its conventional manufacturing process, cut and stretch, leading to new alternatives for industrial use. The main purpose of this research project is to test specimens sixteen expanded metal mesh, which corresponds to four characterizing the diamond cell under static conditions where the graphic results of engineering effort vs deformation, stress vs true strain and stress vs strain on a logarithmic scale, based on the ASTM E8 standards. Subsequently dynamic tests of the twelve samples of diamond cell where the dynamic behavior was observed were performed, the four corners of effort vs dynamic strain were obtained when the diamond cell was applied to four different efforts, holding static characterization, where can appreciate effort curves vs cycle number and duration of each trial.

Microscopic analysis of the United Nations eventually did, taking the micrograph of each fault zone were tested specimens under dynamic conditions where you can see the granular structure of the cell diamond in its natural state, and grain structure of specimens requested a different voltage and comparing the plastic deformation of the grains increases as the effort and ASTM E112 performed determines the grain size of the original granular structure. Then micrographs were taken through scanning electron microscopy where the main cause of failure of the specimens was observed, since the expanded metal mesh due to its low carbon has the property of a ductile metal and is crack type intergranular.

* Graduation project

** Faculty of Physical Engineering – Mechanical. School of Mechanical Engineering, Director: David Pertuz Alberto Comas, Mechanical Engineer.

INTRODUCCIÓN

A pesar de los grandes avances de la ingeniería de materiales en el área de deformaciones, todavía existen componentes que necesitan ser estudiados. Tal es el caso del metal expandido. Durante muchos años láminas de este material han sido utilizadas como barreras de protección de equipos.¹

El metal expandido es un material en forma de malla fabricado convencionalmente de una lámina de metal lisa que es cortada y estirada perpendicularmente hasta un ángulo máximo de 90° para formar una malla con aberturas que tienen substancialmente forma romboidal. Como el proceso de manufactura de estas láminas es bastante económico y las mismas pueden ser cortadas fácilmente es común encontrar este tipo de mallas en diversas formas y aplicaciones.²

A pesar de que el uso de láminas de metal expandido para aplicaciones estructurales data de hace más de cien años³. Con el fin de aportar a las diversas investigaciones que se le han realizado al metal expandido se desarrolla este estudio experimental, el cual consiste en caracterizar la celda romboidal solicitado a cargas estáticas, para con este determinar la carga a la cual se realizan los próximos ensayos y someter la celda romboidal a fatiga, con estos ensayos obtener la curva de esfuerzos vs número de ciclos; mediante las pruebas de fatiga se determina el punto de nucleación de la grieta en la celda romboidal.

¹ SÁNCHEZ, Roldan. Determinación de las propiedades mecánicas de láminas de metal expandido. Universidad Simón Bolívar, Venezuela, 2005.

² MULDER, F. Expanded Metal, Estados Unidos, 2005. 20 p.

³ STORCK, A. Concrete Block with Expanded Metal reinforce core, Estados Unidos, 1894

1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

El metal expandido es un material que se presenta en forma de malla, el cual su procedencia de fabricación está dada por una lámina lisa la cual es sometida a un proceso de corte y estirado donde se puede apreciar como resultado final una figura romboidal. En la actualidad, se han realizado diversos estudios dirigidos a aplicaciones estructurales del metal expandido, debido a su capacidad de absorción de energía.

Este proyecto de investigación surge por la necesidad de buscar un aporte a los diversos estudios que se le han realizado sobre el metal expandido. El estudio se realizará sobre una celda romboidal del metal expandido, cuando ésta es sometida a cargas dinámicas en su zona elasto-plástico, de tal forma que se pueda identificar donde se nuclea la grieta, con el fin de que el metal expandido pueda emplearse en próximas alternativas de diseño en diversas aplicaciones, tales como automotrices, aeronáutica y sísmicas.

1.2 OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO

1.2.1 Objetivo general

Contribuir a la misión de la Universidad Industrial de Santander, en la formación de profesionales con alto nivel investigativo, fomentando el desarrollo tecnológico, a través de la generación y adecuación de conocimientos; por medio de este trabajo de investigación que explora el comportamiento elasto-plástico dinámico del metal expandido; enfocándose en el desarrollo por parte del estudiante para acercarse a problemas reales con la intención de aportar crecimiento en el desarrollo ingenieril. Se espera analizar el comportamiento del metal expandido en su forma romboidal cuando este es sometido a cargas dinámicas.

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar el comportamiento resistivo que presenta la forma romboidal de la malla de metal expandido de acero ASTM A569 bajo carga estática, mediante ensayos destructivos, con el fin de obtener parámetros elasto-plásticos.
- Determinar el comportamiento a la fatiga (esfuerzos vs números de ciclos) de la forma romboidal, en condiciones de carga tipo histéresis utilizando información adquirida en la caracterización estática.
- Identificar el punto de nucleación de la grieta que se presenta en el rombo de metal expandido, mediante ensayo de microscopía óptica, con la finalidad establecer la zona de mayor sollicitación microscópica de la malla.

2. MARCO TEÓRICO

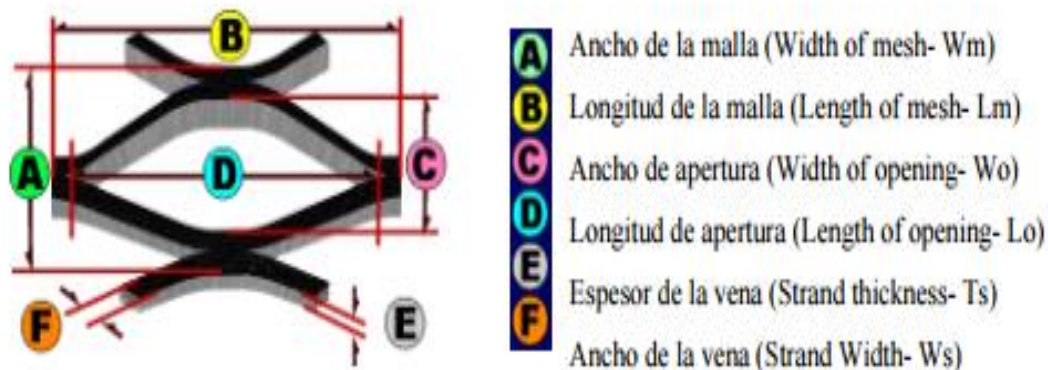
En este capítulo se presenta un pequeño resumen de los conceptos teóricos referentes a los modelos de curvas de deformación, el proceso de fabricación de la malla del metal expandido y algunos antecedentes nacionales e internacionales.

2.1 METAL EXPANDIDO DEFINICIÓN

El metal expandido es un material que se presenta en forma de malla, el cual su procedencia de fabricación está dada por una lámina lisa la cual es sometida a un proceso de corte y estirado donde se puede apreciar como resultado final un modelo romboidal como se puede apreciar en la figura 1.

Es poca la información que se puede adquirir de aplicaciones o usos del metal expandido en relación con su comportamiento estructural.

Figura 1. Especificación de la Malla expandida



Fuente: SMITH L, Dimas José. Estudio experimental de estructuras fabricadas con láminas de metal expandido sometidas a compresión axial [citado el 05 de marzo de 2015]
Disponibile en internet <<http://www.exmet.com/catwalks.php>>

Como el proceso de manufactura de estas láminas es bastante económico y las mismas se pueden ser cortadas fácilmente, es común encontrar este tipo de mallas en diversas formas y aplicaciones⁴. El corte y la deformación plástica producida en estas láminas permite generar un área final de hasta diez (10) veces su tamaño inicial y reducir su peso por metro cuadrado hasta un 80% en comparación con las láminas sólidas⁵.

2.2 TRACCION

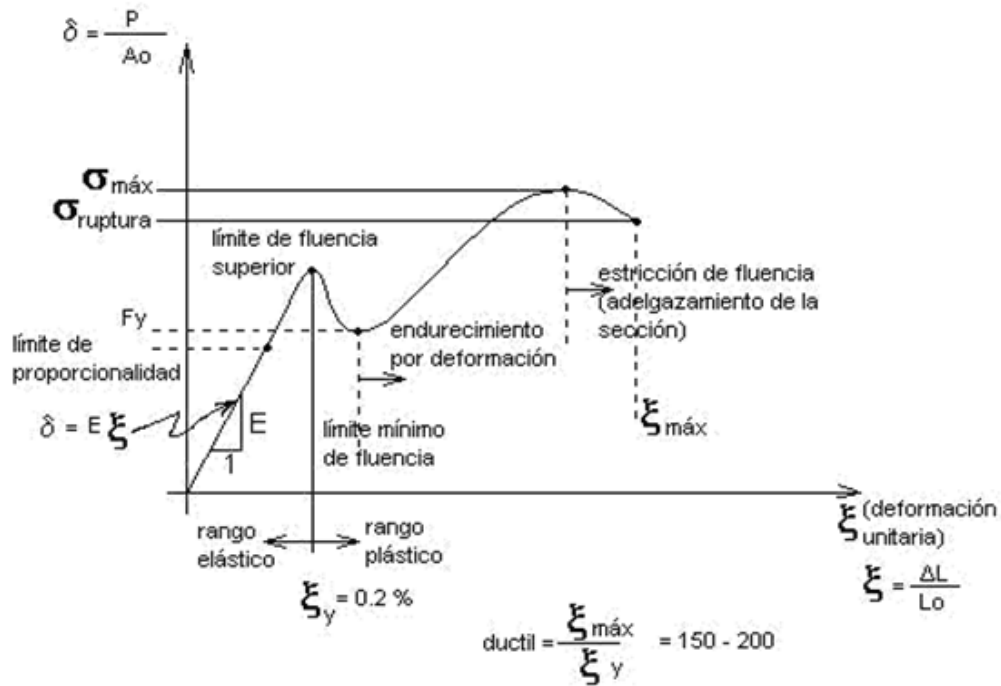
2.2.1 Ensayo de tracción. El ensayo de tracción (tensión o compresión) se emplea usualmente en probetas que son solicitadas a una carga axial creciente (estática) hasta el momento en el que ocurra la falla. Este tipo de ensayos estáticos son los más realizados, debido a que es el más simple de todos los ensayos mecánicos. El ensayo de tracción es el más apropiado para uso en general de gran parte de los metales pues determina las propiedades mecánicas de este. Después de realizar este tipo de ensayo se obtiene la curva tensión-deformación.

2.2.2 Curva de tracción. Esta curva permite identificar los puntos y zonas características del metal solicitado a un esfuerzo estático, es decir se puede analizar la relación que existe entre la carga estática que aumenta y las deformaciones que se producen tras la sollicitación. Un claro ejemplo de este comportamiento es el de un metal y se puede apreciar en la Figura 2.

⁴ MULDER, F. Expanded Metal, Estados Unidos, 2005. 20 p.

⁵ SÁNCHEZ, Roldan; GRACIANO, Carlos. Determinación de las Propiedades Mecánicas de Láminas de Metal Expandido. Tesis maestría, Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela.

Figura 2. Curva Esfuerzo vs Deformación



Fuente: JOSMVALA, Ensayos de acero estructural [citado el 05 de marzo de 2015]
 Disponible en internet <<http://descom.jmc.uffs.cl/proi/materiales/temario.htm>>

Haciendo una descripción de la curva tensión deformación se puede apreciar que tiene cuatro zonas las cuales se conocen como: deformación elástica, fluencia, plástica y estricción o rotura. A continuación una breve explicación de cada una de las zonas.

- Zona de deformación elástica: esta zona es característica porque el material después de ser solicitado recupera su forma inicial. Al coeficiente de proporcionalidad que existe entre la tensión y deformación se le conoce como módulo de elasticidad o de Young.
- Zona de fluencia: aquí es donde la probeta se deforma bruscamente sin incrementar la carga que se esté aplicando. Este suceso ocurre

uniformemente pero se concentra en las zonas en donde las dislocaciones están bloqueadas.

- Zona de deformación plástica: se denomina así porque al retirar la carga a la que es solicitado el material recupera su forma parcialmente, quedando deformado.

Zona de rotura o estricción: allí la deformación es localizada haciendo que una sección del material se reduzca hasta la rotura.

2.2.3 Esfuerzo – deformación. La resistencia mecánica de un material determina la cantidad de fuerza o carga que puede soportar antes de ceder. El criterio de falla que se utiliza en el diseño puede ser diferente para distintos materiales y, por consiguiente, existen múltiples criterios de resistencia. En el caso de los metales el criterio de diseño se fundamenta habitualmente en el esfuerzo de fluencia. Sin embargo, debido a que los materiales pueden haber experimentado un trabajo en frío o una deformación plástica previa, las resistencias a la cedencia puede variar desde el esfuerzo de fluencia para el caso de un material recocido, hasta el esfuerzo de fluencia para un material que ha sido endurecido por deformación. Para la mayor parte de los fines de diseño, se supone que el esfuerzo de fluencia es el mismo cuando se aplica tensión como cuando se aplica compresión.⁶

2.2.4 Esfuerzo Ingenieril. El esfuerzo ingenieril es construido a partir de sus condiciones originales (áreas y longitudes) antes de que se presenten la

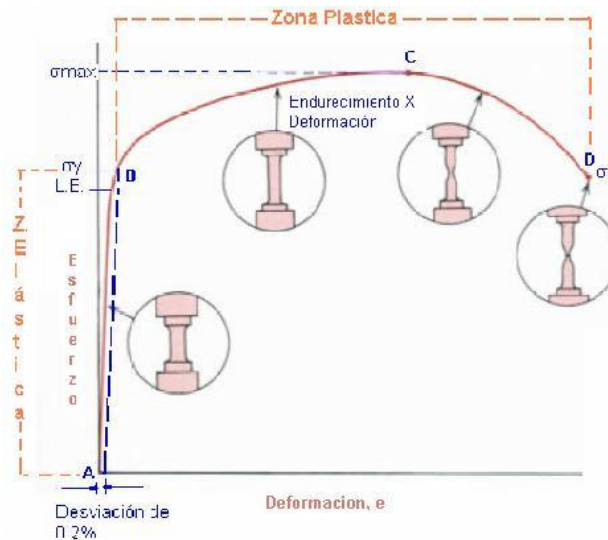
⁶ MANGONON, P. Ciencia de Materiales, Selección y Diseño. Editorial Parson Educación, México, 2001

deformación en los ensayos. El esfuerzo ingenieril está definido por la siguiente ecuación:

$$\sigma_e = \frac{F}{A_0}$$

En la figura 3 se representan las zonas a evaluar en una curva de esfuerzo ingenieril.

Figura 3. Curva esfuerzo – deformación ingenieril



Fuente: Disponible en internet: http://datateca.unad.edu.co/contenidos/256599/256599%20Materiales%20Industriales/a__curva_esfuerzo__deformacin_ingenieril.html [Citado el 16 de abril de 2015]. 14p.

2.2.5 Esfuerzo Real. En esta curva se analiza la zona plástica, donde se presenta la deformación. La diferencia entre la curva de ingeniería y la curva real se encuentra en la zona plástica, ya que la curva real su esfuerzo real está definido como:

$$\sigma = Ee$$

Y en su zona elástica el esfuerzo real se define como:

$$\sigma = Ke^n$$

En su zona plástica K está definido como el coeficiente de resistencia y n el exponente de endurecimiento o ablandamiento.

Figura 4. Curva esfuerzo-deformación real



Fuente: Disponible en internet: http://datateca.unad.edu.co/contenidos/256599/256599%20Materiales%20Industriales/a__curva_esfuerzo__deformacin_ingenieril.html [Citado el 16 de abril de 2015]. 14p.

2.3 FATIGA

2.3.1 Definición. La experiencia industrial ha mostrado que la rotura de las piezas de máquinas o estructuras en funcionamiento a menudo falla debido a la fatiga. A fin de precisar los diferentes aspectos de la fatiga en los metales, se comenzaron a realizar diferentes estudios con el fin de identificar las zonas donde se producen las deformaciones. Definiendo la fatiga como el fenómeno por el cual la rotura de los materiales bajo cargas cíclicas se produce fácilmente con cargas estáticas.

Definiendo la fatiga como una falla la cual se puede producir sin ningún tipo de aviso que pueda establecer un mecanismo de prevención contra ella, sabiendo que la fatiga se genera por numerosos ciclos de carga aplicados a un metal, forma, estructura el cual nos lleva a que en la superficie se presente una fisura que no puede ser detectada visualmente y requiere de la ayuda de un microscopio para ser

apreciadas.

Existen otras condiciones en las que se puede presentar la fatiga como son la concentración de esfuerzos, corrosión, temperatura, sobrecarga, tensiones residuales y finalmente se puede ocasionar tensiones combinadas. Para poder demostrar esto existen diversos tipos de ensayos en donde se puede apreciar el comportamiento del material analizado.

2.3.2 Fatiga en los metales. Dos de los primeros descubrimientos con relación a la naturaleza de la fatiga fueron: primero que a mayor magnitud de esfuerzo, el número de ciclos de carga necesarios para producir fatiga (la vida) se reduce en una relación exponencial y segundo, que la presencia de entallas agudas, grietas y en general, cualquier concentrador de esfuerzos reduce drásticamente el número de ciclos de falla. Esto se demostró claramente en los diagramas amplitud de esfuerzo vs. Logaritmo del número de ciclos de falla introducidos por Wolher, conocidos como curvas de vida⁷

2.3.3 Fenómeno de la fatiga oligocíclica. El fenómeno está descrito por la cantidad de ciclos aplicados a un metal cuando se encuentra en la zona plástica, por lo cual se describe que es fatiga plástica, a tal punto de llevar la probeta a sufrir una deformación. El objetivo fundamental es establecer el endurecimiento cíclico en relación con la deformación que sufre el metal y su resistencia a la rotura.

2.3.4 Fatiga controlada por deformación cíclica. Este tipo de ensayo controlando la deformación es también llamado fatiga a bajos ciclos, ya que la carga a la cual se manejan estos ensayos no superan ciclos de 10^4 , por lo cual se recomienda que se realicen aproximadamente de 10^3 ciclos de aplicación de carga.

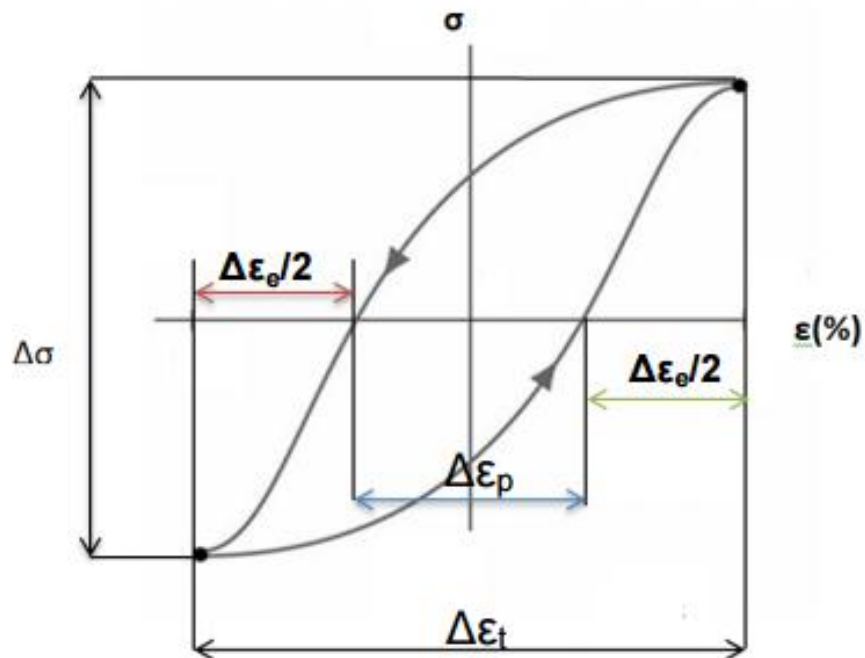
Si se monitorea la deformación y el esfuerzo durante una prueba de carga cíclica, la respuesta del material puede ser identificada claramente, por ejemplo para un comportamiento de flujo elasto – plástico homogéneo, la variación completa de

⁷ GONZALEZ V, Jorge Luis. Metalurgia Mecánica. Editorial Limusa S.A, México, 2003

carga (positiva y negativa) producirá una curva similar con se observa en la figura 5, la cual refleja tanto deformación elástica como plástica. El área contenida dentro del ciclo de histéresis representa una medida del trabajo de deformación plástica realizado sobre el material⁸.

El área contenida dentro del ciclo de histéresis representa una medida del trabajo de deformación plástica realizado sobre el material. En la figura 5 está representado el esfuerzo contra la deformación unitaria durante un ciclo, en donde, $\Delta\epsilon_e$ es el rango de la deformación unitaria elástica, $\Delta\epsilon_p$ es el rango de la deformación unitaria plástica, σ es el esfuerzo y ϵ es la deformación unitaria.

Figura 5. Representación de un ciclo de histéresis

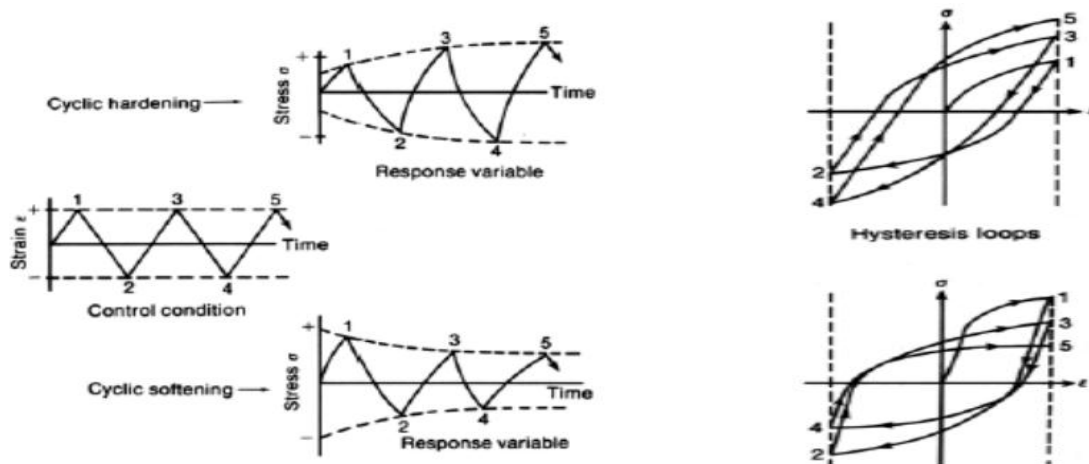


Fuente: JAIMES ORTIZ, Jackeline. Comportamiento mecánico del acero 35NCD16 sometido a ensayos de fatiga a bajo ciclo [Citado el 19 de agosto de 2015].25p

⁸ JAIMES O, Jackeline. Comportamiento mecánico del acero 35NCD16 sometido a ensayos de fatiga a bajo ciclo. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2013.

2.3.5 Endurecimiento y ablandamiento cíclico. La literatura establece que los metales con alto exponente de endurecimiento por deformación monótona ($n > 0.15$) experimenta endurecimiento cíclico, mientras que los que poseen un exponente menor ($n < 0.15$) presentan ablandamiento cíclico. En la figura 6 se muestra un metal que sufre ablandamiento y endurecimiento cíclico.

Figura 6. Endurecimiento y ablandamiento cíclico



a) Ablandamiento cíclico

b) Endurecimiento Cíclico

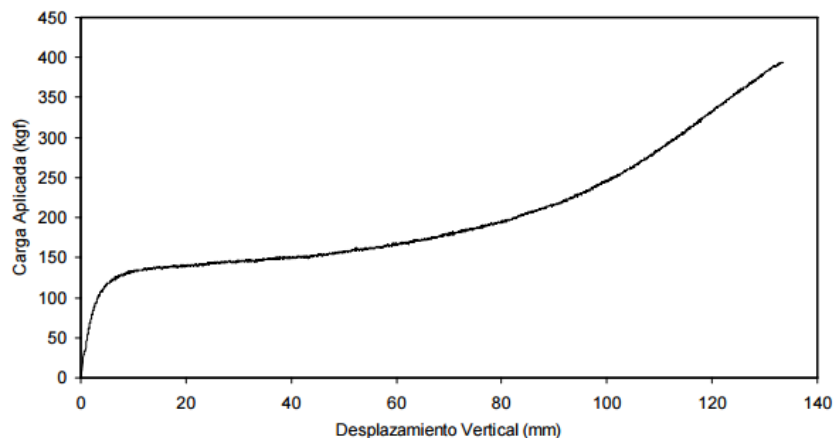
Fuente: Disponible en internet: http://campus.fi.uba.ar/pluginfile.php/99463/mod_resource/content/4/Introduccion_a_la_Fatiga.pdf [Citado el 20 de mayo de 2015].

2.4 ANTECEDENTES

En este apartado se mencionan los diferentes trabajos de grado que se han realizado a nivel internacional, nacional y locales, en materia de estudiar el metal expandido cuando es solicitado en distintas situaciones o formas.

2.4.1 Trabajos de Grado. Sánchez Barragán⁹, realizó un estudio para la determinación de propiedades mecánicas del metal expandido, con el propósito de buscar en un futuro, el desarrollo de nuevos componentes estructurales para ser utilizados en las defensas viales. Este proyecto se fundamentó en el análisis de una lámina de metal expandido de acero ASTM A569 de bajo contenido de carbono, para el cual fue necesario realizar probetas de 25 mm X 140 mm distribuidos para ser trabajadas en frío, para tratamiento térmico y para caracterización. Luego de realizar ensayos de microdureza, finalmente el metal expandido fue solicitado a ensayos de tracción para determinar la capacidad de absorción energía en estas condiciones dando como resultado una carga paralela al eje corto del rombo.

Figura 7. Curva carga aplicada – desplazamiento vertical



Fuente: SÁNCHEZ BARRAGAN, Roldán Vicente. Determinación de las propiedades mecánicas de láminas de metal expandido [Citado el 15 de marzo de 2015].79p

⁹ SÁNCHEZ BARRAGAN, Roldán Vicente. Determinación de las propiedades mecánicas de láminas de metal expandido. Universidad Simón Bolívar, Venezuela, Caracas, 2005.

Saavedra¹⁰, realizó un estudio para determinar la capacidad de absorber energía mediante la realización de probetas cilíndricas las cuales están construidas con la malla de metal expandido y sometidas a cargas de impacto utilizando el método de elemento finito. Utiliza probetas con una longitud de 400 mm, una masa de impacto de 20 kg y una velocidad de impacto de 15 m/s. Las probetas tienen una orientación de los rombos de 90° y 0°. Lo cual este estudio pudo demostrar que la variación de las dimensiones de las venas inciden en la absorción de energía por la probeta y que el aumento de la resistencia de la probeta de debe al aumento de la sección transversal de la vena. Los resultados obtenidos en este estudio se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados de la fuerza máxima según la orientación de las probetas

Orientación	Modelo	<i>F</i>_{máx} [kN]
$\alpha = 0^\circ$	H-24	1.8
	H-26	2.29
	H-27A	19.14
$\alpha = 90^\circ$	H-24	20.73
	H-26	43.29
	H-27A	145.29

Fuente: NIÑO MORENO, Ioleska Andreina. Diseño de banco de prueba de impacto para elementos fabricados con metal expandido. [Citado el 15 de marzo de 2015].15p

¹⁰ SAAVEDRA, Edwar. Estudio de estructuras fabricadas con láminas de metal expandido sometidas a cargas de impacto. Universidad Simón Bolívar, Venezuela, 2010

Dimas¹¹, realizó un estudio experimental a estructuras fabricadas en metal expandido cuando son solicitadas a compresión axial. El objetivo fundamental es determinar el comportamiento de la estructura de perfiles de sección cuadrada fabricados en este metal y analizar la capacidad de absorción de energía bajo estas solicitaciones. La geometría utilizada fue sometida a compresión axial, cuasi-estáticas para analizar su respuesta cuando se produce y una variación en la orientación y dirección de las celdas. Finalmente los resultados obtenidos se pudieron determinar la capacidad de absorción de energía, recuperación estática, eficiencia y mecanismos de colapso plástico de las geometrías utilizadas. Se estableció que los perfiles estudiados en la dirección del eje menor de las celdas proporcionan una respuesta más uniforme y controlada.

Un estudio preliminar se llevó a cabo en la Norwegian University of Science and Technology (NTNU), en colaboración con BALCUS AB. En este estudio, las vigas eran manufacturadas soldando las láminas de metal expandido a las esquinas de metal sólidas, formando una sección cruzada cerrada. El proyecto se desarrolló para estudiar el comportamiento elástico, la capacidad de transporte de carga, la capacidad de energía de absorción y las propiedades de transferencia de calor de la viga BALCUS. Como resultado, un modelo muy simple se presentó para la predicción de la capacidad de transporte de carga y para la rigidez de la viga. También se intentó utilizar esta investigación experimental como una base de datos para el uso potencial, como elementos de absorción de energía, de este tipo particular de viga.¹²

¹¹ SMITH LOPEZ, Dimas José. Estudio experimental de estructuras fabricadas con láminas de metal expandido sometidas a compresión axial. Sartenejas, Venezuela, 2008

¹² SÁNCHEZ, Roldán. Determinación de las propiedades mecánicas de lámina de metal expandido. Universidad Simón Bolívar, Venezuela, 2005. 40p.

Graciano, Martínez ¹³ realizaron un estudio para determinar la capacidad de absorción de energía de elementos estructurales fabricados con mallas de metal expandido cuando es solicitado a compresión axial; este está constituido por tres partes, la primera en la cual se realizaron los ensayos a probetas con diferentes direcciones, en la segunda parte proponen un modelo teórico de estructuras haciendo una aproximación de comportamiento rígido - plástico y por último se generaron modelos computacionales usando el método de elementos finitos. Como resultado se obtuvo que las estructuras con mallas de metal expandido tienen gran potencial para absorción de energía en deformación plástica, y que la orientación de la celda es un factor concluyente para la respuesta de la estructura en las probetas analizadas en dicho estudio.

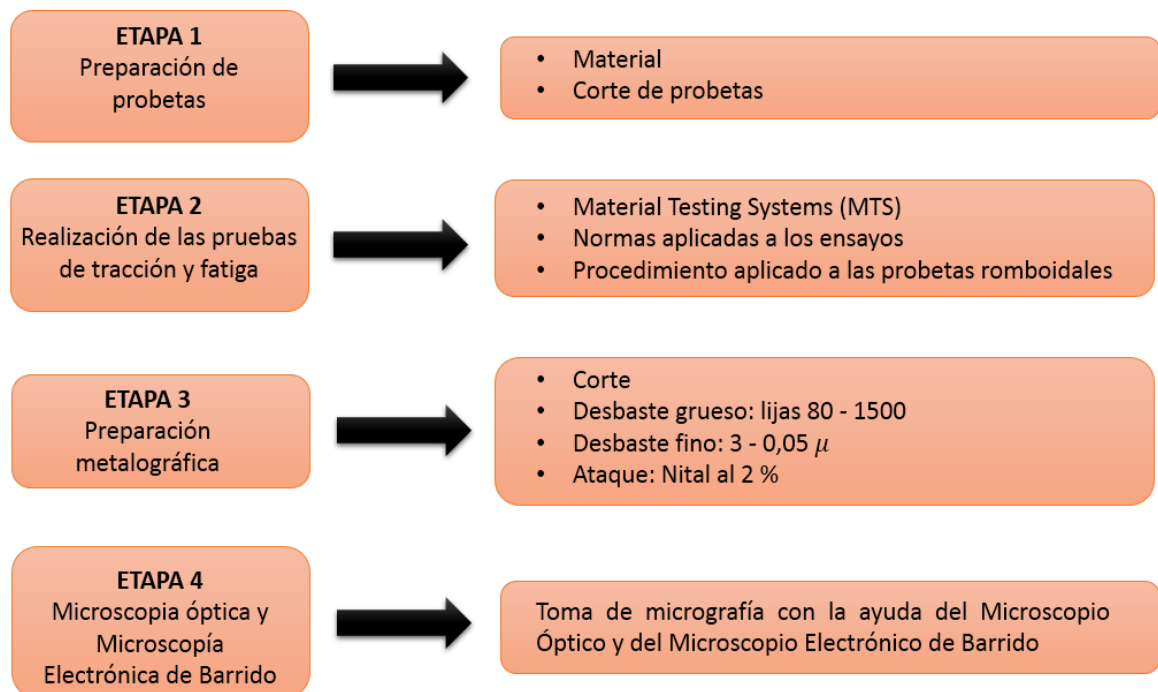
Se puede apreciar que en los antecedentes se encuentran diversos estudios que se han realizado al metal expandido solicitado a diferentes situaciones y modelado en diferentes estructuras. De tal forma que se demuestra que la celda romboidal del metal expandido no se ha estudiado en condiciones dinámicas.

¹³ GRACIANO; MARTÍNEZ, Carlos, Gabriela. Determinación de la capacidad de absorción de energía de elementos estructurales fabricados con mallas de metal expandido. Medellín, 2013.

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

En este capítulo se pretende presentar las normas ASTM que se rigen al momento de realizar los ensayos de tracción para determinar la capacidad de carga aplicar al momento de realizar los ensayos de fatiga, los procedimientos y medios a utilizar en los ensayos experimentales. También se establecen los parámetros de las probetas y sus propiedades mecánicas.

3.1 FLUJOGRAMA EXPERIMENTAL



3.2 MATERIAL Y DISEÑO DE PROBETAS

El metal expandido fue suministrado por la empresa Mallas especiales, ubicada en la ciudad de Bucaramanga. El material en el que se fabrica el metal expandido es el acero ASTM A-569, en seguida en la figura 8 se muestra la lámina de metal expandido en las que fue adquirido el material, cuyas dimensiones son de 1 m x 2,5 m.

Figura 8. Lámina de metal expandido, suministrada por mallas especiales



En el estudio realizado por Sánchez y Graciano¹⁴, se determinaron las propiedades mecánicas del acero ASTM A-569. A continuación se muestra la tabla 2 en la cual se aprecian los valores hallados en dicha investigación.

Tabla 2. Propiedades mecánicas del acero ASTM A-569

Propiedad	Dirección	
	Longitudinal	Transversal
Ensayos de Tracción		
S_y (MPa)	246,0	301,4
S_u (MPa)	385,2	406,7
E (GPa)	204,6	206,9

Fuente: SÁNCHEZ, Roldan; GRACIANO, Carlos. Determinación de las Propiedades Mecánicas de Láminas de Metal Expandido. [Citado el 17 de abril de 2015].36p

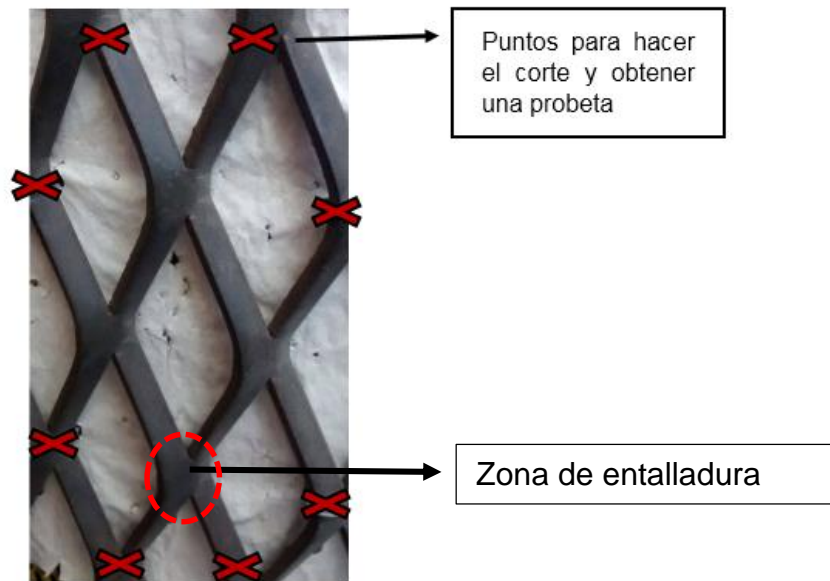
¹⁴ SÁNCHEZ, Roldan; GRACIANO, Carlos. Determinación de las Propiedades Mecánicas de Láminas de Metal Expandido

Tabla 3. Composición química del acero ASTM A-569

ELEMENTO	COMPOSICIÓN %
Carbono	0.15
Manganeso	0.60
Fosforo	0.035
Azufre	0.035
Cobre	0.20

Para obtener la probeta con la cual se van a realizar los ensayos de tracción y fatiga, se procede a cortar cuatro centímetros por arriba de la zona de entalladura y cuatro centímetros en su zona horizontal como se muestra en la figura 9, dichos cortes se realizan de esta forma para que la celda romboidal a la cual se van a hacer los ensayos no se vea afectada ni se alteren sus propiedades.

Figura 9. Método de corte de la probeta



Después de realizar los cortes pertinentes se obtienen las probetas que se necesitan para realizar los ensayos de tracción y de fatiga.

Figura 10. Probetas para ensayos



3.3 PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO

Todos los ensayos se realizarán en una máquina MTS (Material Testing Systems) 31850 mostrada en la Figura 11, esta máquina cuenta con un software propio y con la ayuda de esta interfaz se pueden apreciar los resultados que se obtienen al someter cada una de las probetas, en la Figura 12 se observa el modo en el que se puede apreciar la respuesta a un ensayo; las especificaciones generales de la máquina MTS se describen en la Tabla 4. La máquina MTS está ubicada en el laboratorio de caracterización de materiales de la Escuela de Ingeniería Civil, en el edificio Alvaro Beltrán Pinzón de la Universidad Industrial de Santander.

La máquina MTS cuenta con mordazas las cuales en su interior es una superficie rugosa lo cual evita el deslizamiento de las probetas que se sujetarán en los extremos del rombo a ser analizado, una vez que la probeta esté sujeta y fija se procede a aplicar carga. La realización de los ensayos consiste en someter como mínimo tres probetas a unas mismas condiciones, y así poder obtener un promedio de los valores que se tienen como resultado de cada ensayo.

En el caso de los ensayos a tracción se aplica hasta que el rombo analizado falle, para así poder obtener la gráfica de tracción, mediante la curva que se obtiene se toman cuatro valores de carga y con estos datos realizar las pruebas de fatiga; una vez que se someten a fatiga las probetas se podrá realizar la curva esfuerzo vs número de ciclos.

Figura 11. Material Testing Systems (MTS)



Fuente: Disponible en internet: http://www.upc.edu/sct/documents_equipament/d_77_id-412.pdf [Citado el 16 de abril de 2015]. 14p.

Figura 12. Software propio de la MTS, sometiendo una probeta a tracción

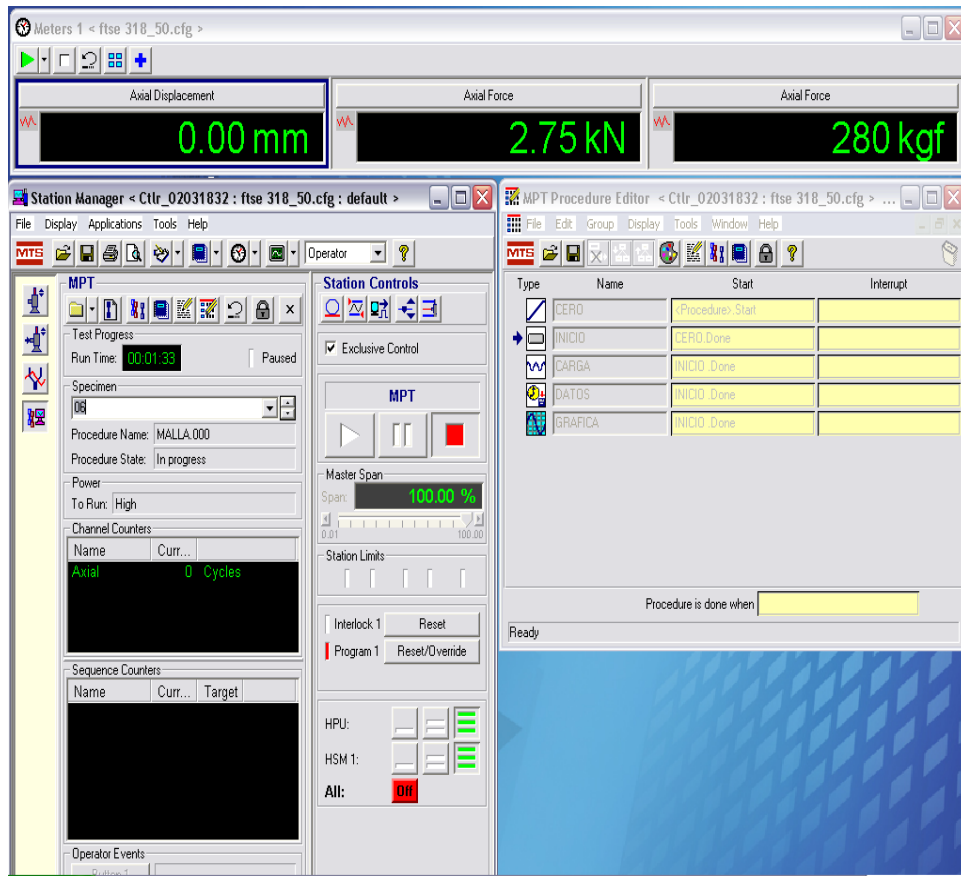


Tabla 4. Características de la MTS (Material Testing Systems)

Rango de fuerza	25 KN	100 KN	250 KN	500 KN
Rango de rendimiento disponible	alto		muy alto	
Material	compuestos	Aceros	súper aleaciones	
Tamaño de la muestra	estándar	medio	grande	
Tipo de prueba	ciclo alto de fatiga		ciclo bajo de fatiga	

Fuente: Disponible en internet: <http://www.upc.edu/sct/documents_equipment/d_77_id-412.pdf> [Citado el 17 de abril de 2014]. 14p

3.3.1 Normas aplicadas a los ensayos. Para la realización de los ensayos propuestos (tracción y fatiga), se implementan las norma conocidas internacionalmente ASTM (American Society for Testing Materials) la cuales serán utilizadas como estándares para los ensayos experimentales y cumplir a cabalidad los parámetros establecidos a nivel internacional para un resultado preciso y seguro. Aunque a nivel mundial existen diferentes normas que pueden ser soporte a los ensayos de tracción y ensayos de fatiga por ejemplo las normas británicas, pero se decide utilizar las ASTM por su reconocimiento internacional.

Para el estudio experimental de la forma romboidal del metal expandido se aplican las siguientes normas en cada ensayo.

Norma Ensayo de tracción. ASTM E8M – 00: Métodos de prueba para los ensayos de tensión en materiales metálicos.

Norma Ensayos de fatiga. ASTM E606M – 12: Método de prueba estándar para tensión y control de prueba de fátiga a bajo ciclo.

ASTM E739 Práctica estándar para el análisis estadístico de Lineal o Linearized Stress-Life (SN) y Strain-Life (ϵ - M) Fatiga de datos. La norma presenta el análisis estadístico en la interpretación de las curvas que se obtienen mediante los ensayos experimentales como son la curva de deformación vs números de ciclos y la curva esfuerzo vs números de ciclos, sabiendo que los datos obtenidos están definidos bajo condiciones de pruebas específicas. Para el estudio experimental de la forma romboidal de una malla de metal expandido se desea predecir el rendimiento de la forma romboidal cuando es solicitado a cargas dinámicas.

3.3.2 Descripción de los ensayos a Tracción. Se realizan cuatro ensayos de tracción a las probetas romboidales para determinar su límite de fluencia, determinar la fuerza máxima aplicada hasta llegar a su rotura.

Las probetas romboidales deben cumplir las especificaciones requeridas por la norma ASTM E8, donde se aclara que para los ensayos de tracción la probetas

deben tener una longitud mayor a los 50 mm, para el caso de este estudio experimental se cumple a cabalidad , ya que su longitud en su condición inicial es de 80 mm

Antes de iniciar los ensayos se deben tomar las medidas de cada probeta a ensayar para garantizar que los resultados obtenidos son válidos de acuerdo a la norma para ensayos de tracción, en la figura 13 se ilustran el punto de toma de medida de la longitud de las probetas a ensayar.

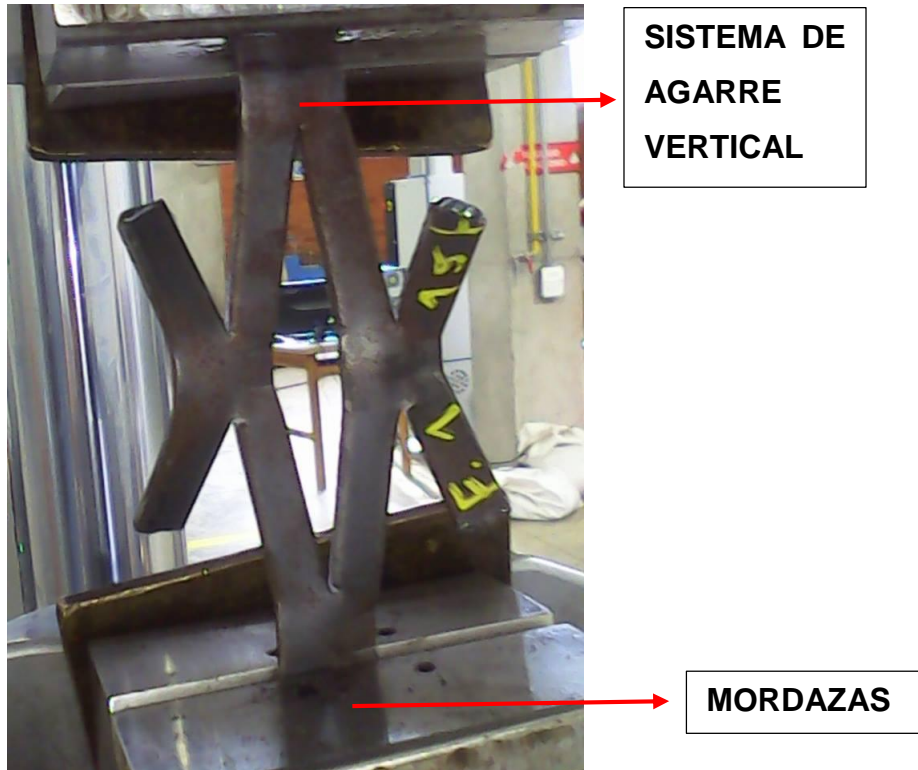
Figura 13. Medidas longitudinal de las probetas



Se realizan cuatro ensayos, los cuales están variando con respecto a la carga aplicada. Se empleó una velocidad de 0.8 mm/s, la carga es aplicada hasta alcanzar la rotura de cada probeta.

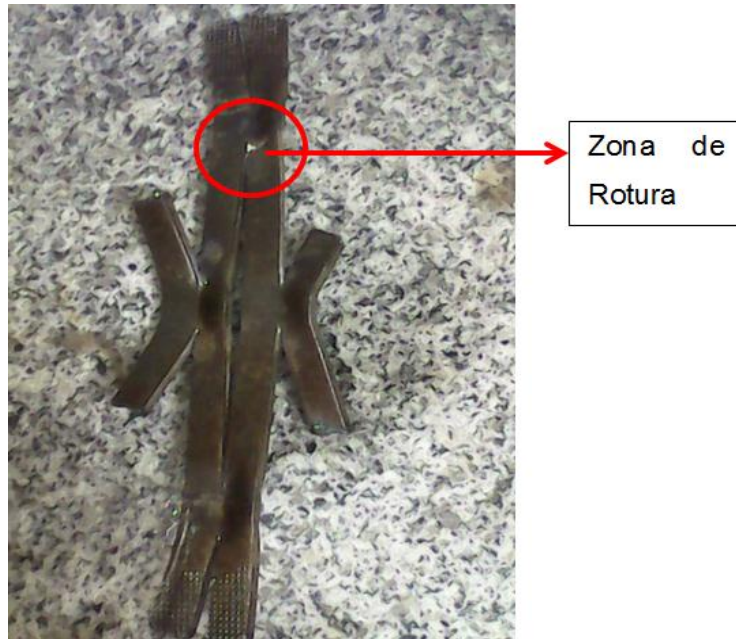
Se debe determinar principalmente la sujeción de las probetas en la máquina, debido a que sus extremos como se puede apreciar en la figura 13 no son totalmente lineales, ya que para realizar los ensayos debe quedar la probeta totalmente centrada con las mordazas de la máquina, el agarre se determina verticalmente como se aprecia en la figura 14.

Figura 14. Método de sujeción de las probetas



Una vez finalizado el ensayo, se puede observar que la rotura de las probetas se produce en uno de sus puntos extremos donde se determina que es un punto de mayor concentración de esfuerzo; por lo tanto, como se muestra en la figura 15 la probeta sufre una reducción de área significativamente.

Figura 15. Rotura de la probeta durante el ensayo de tracción



Una vez que se realizan los tres ensayos a tracción, se procede a realizar la gráfica de esfuerzo deformación ya que esta es fundamental para la realización de las pruebas a fatiga.

3.3.3 Descripción de los ensayos a Fatiga. De la curva que se obtuvo a tracción de la forma romboidal se determinó la zona elasto-plástica, de esta zona se seleccionan cuatro puntos, es decir que los puntos se tienen que encontrar por encima del punto de fluencia y por debajo del punto de resistencia a la rotura y una vez determinados se procede a realizar los ensayos de fatiga, por cada punto se llevan a cabo tres pruebas, en los que se aprecia el comportamiento del rombo sometido a cada carga aplicada.

Para ejecutar las probetas a fatiga es necesario emplear unas condiciones que deben ser constantes en todos los ensayos, de esta manera se obtienen resultados confiables. Los factores que se tienen en cuenta son:

Tabla 5. Parámetros para ensayo de fatiga

AMPLITUD	#1	#2	#3	#4
SEÑAL	Sinusoidal			
FRECUENCIA	1 Hz			

Es decir que se tienen cuatro valores de amplitud y para cada valor de amplitud se realizan tres ensayos de fatiga, lo cual determina en su totalidad doce probetas ensayadas a fatiga. La norma ASTM E606 es la encargada de regir este tipo de ensayos.

De cada tipo de carga se muestran las curvas en donde se aprecia el comportamiento de la probeta.

3.4 PREPARACIÓN METALGRÁFICA

Todas las probetas fueron cortadas por medio de una cortadora de disco, se realizó un desbaste mecánico con lijas de carburo de silicio de 80 hasta 1500, luego por paños con solución de alúmina Al_2O_3 con tamaño de partícula de 3 micras y de 0,05 micras para dejar la superficie a espejo, se realizó ataque químico de la superficie para revelar la microestructura con una solución de Nital al 2 %, según norma ASTM E 3.

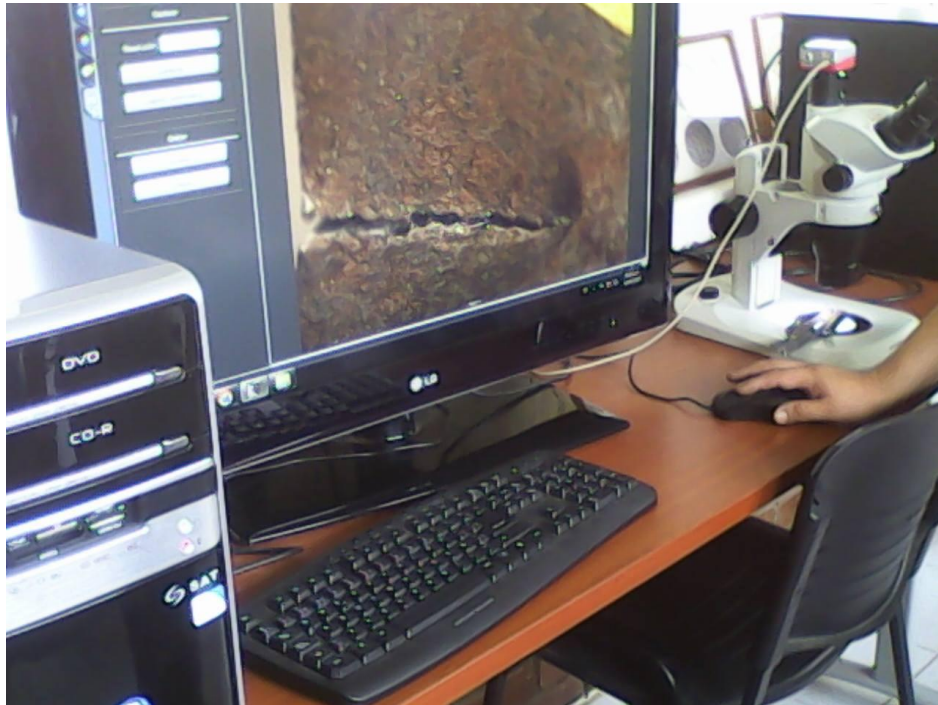
Figura 16. Desbaste mecánico con lijas



3.5 MICROSCOPIA ÓPTICA Y MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

El análisis de la superficie de falla se realizó en un microscopio óptico invertido marca OLYMPUS GX 71F, por medio de inspección visual con ayuda de una lupa, esto se logró gracias a la ayuda y servicios que prestan los laboratorios de Caracterización de Materiales y de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica.

Figura 17. Pruebas de microscopia electrónica de barrido



Por medio de microscopia electrónica de barrido sobre toda la superficie de falla, teniendo en cuenta la dirección de avance de la grieta. Este servicio fue prestado en Laboratorio de Microscopia Electrónica el cual se encuentra en el Parque Tecnológico de Guatiguará.

Figura 18. Microscopio electrónico de barrido



4. ANALISIS DE RESULTADOS

4.1 Tracción

En la figura 19, se muestra la gráfica de esfuerzo vs deformación ingenieril de la celda romboidal del metal expandido, se observa un comportamiento cuando es sometido a tensión. También se aprecia un comportamiento tipo polímero con una zona de elasticidad atípica para un metal, pero adecuado para la forma romboidal, semejante a lo reportado en el estudio experimental de Sánchez Barragán¹⁵. A fin de estimar los parámetros típicos del comportamiento estático, como se acotó en la curva de esfuerzo vs deformación ingenieril, de la cual se obtienen los valores del esfuerzo plástico a los cuales serán solicitados a la fatiga.

- $S_Y = 300 \text{ MPa}$
- $S_U = 775 \text{ MPa}$

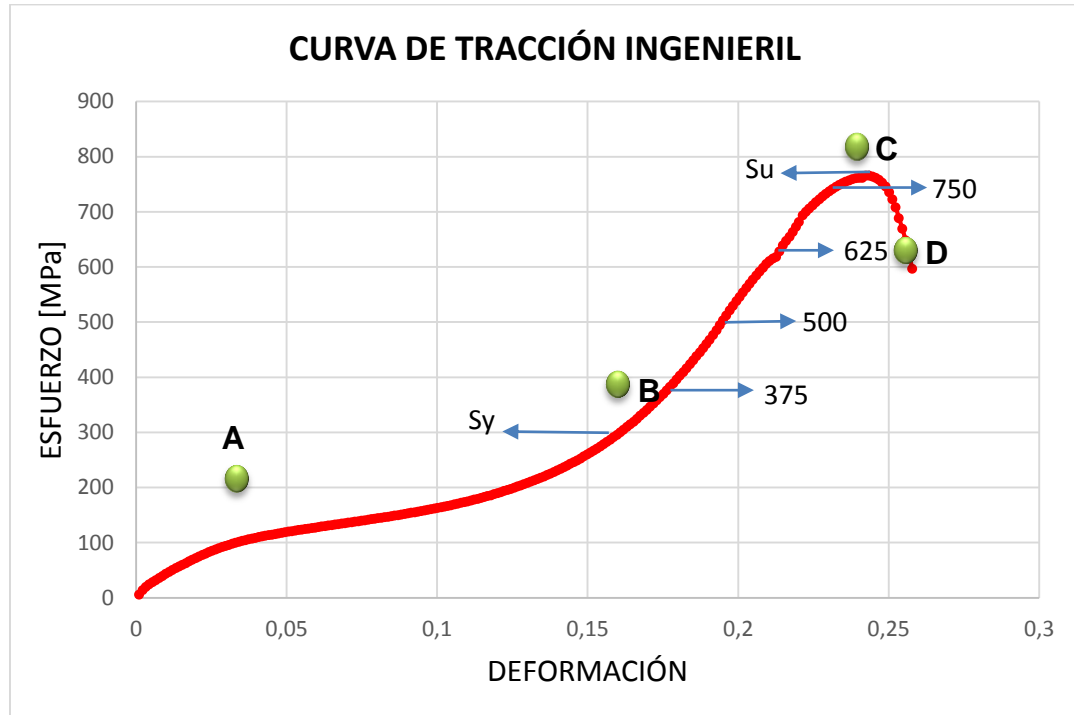
Los valores de esfuerzos seleccionados están comprendidos entre el esfuerzo de fluencia y esfuerzo último:

- Esfuerzo 1 = 375 MPa
- Esfuerzo 2 = 500 MPa
- Esfuerzo 3 = 625 MPa
- Esfuerzo 4 = 750 MPa

En la figura 19, se aprecian cuatro etapas, la etapa A se considera de estabilización de la forma romboidal. Entre la etapa A y B sucede el comportamiento elástico. En el punto B se separa el comportamiento de la forma al comportamiento del metal y corresponde al esfuerzo de fluencia; el punto C corresponde al esfuerzo máximo y por último en el punto D ocurre la fractura.

¹⁵ SÁNCHEZ BARRAGAN, Roldán Vicente. Determinación de las propiedades mecánicas de láminas de metal expandido. Universidad Simón Bolívar, Venezuela, Caracas, 2005.

Figura 19. Curva de esfuerzo – deformación ingenieril



En la figura 20, en su parte A, corresponde al comportamiento del esfuerzo vs la deformación real de la celda romboidal, para esta curva se han extraído del comportamiento de la forma y se observa el comportamiento del metal donde se aprecia un crecimiento exponencial típico del material y de una curva real asociada a su forma asimétrica. Esta curva es elaborada en base a los datos con los que se construyó la curva de tracción ingenieril y empleando dos ecuaciones se obtienen los valores para la construcción de la gráfica esfuerzo vs deformación real; las ecuaciones empleadas son:

$$\sigma_{Real} = \log_{10} \sigma_{ingenieril}$$

$$\varepsilon_{Real} = \ln(\varepsilon_{ingenieril} + 1)$$

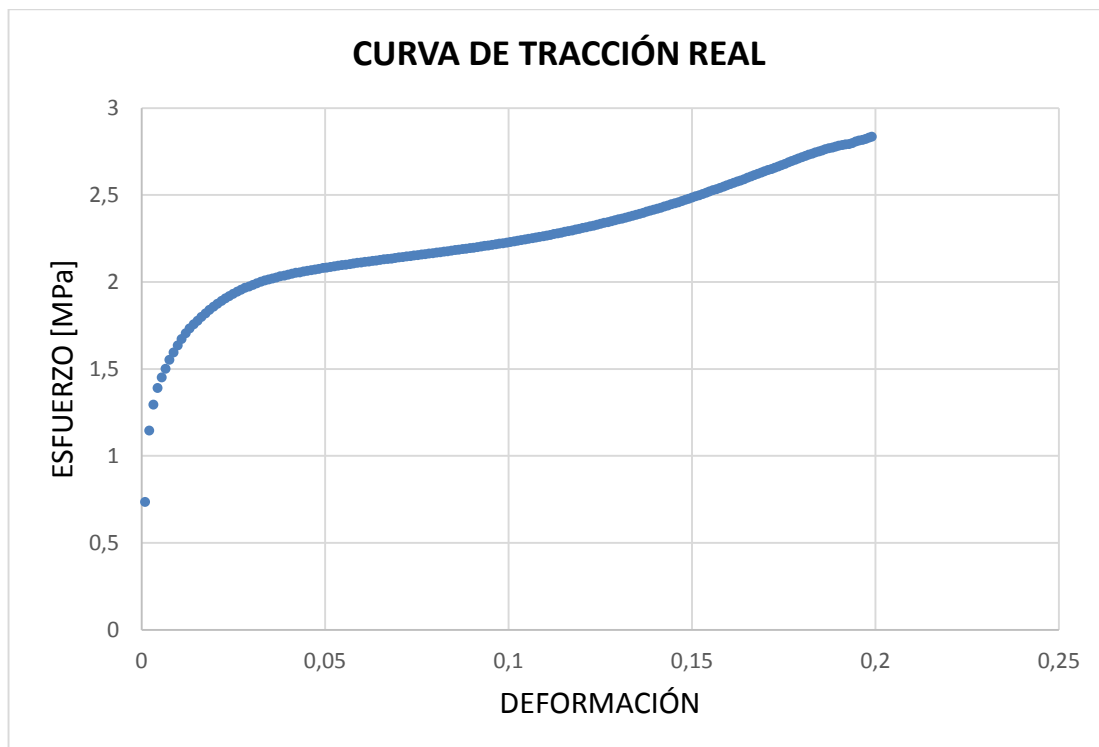
Donde:

$$\sigma = \text{Esfuerzo}$$

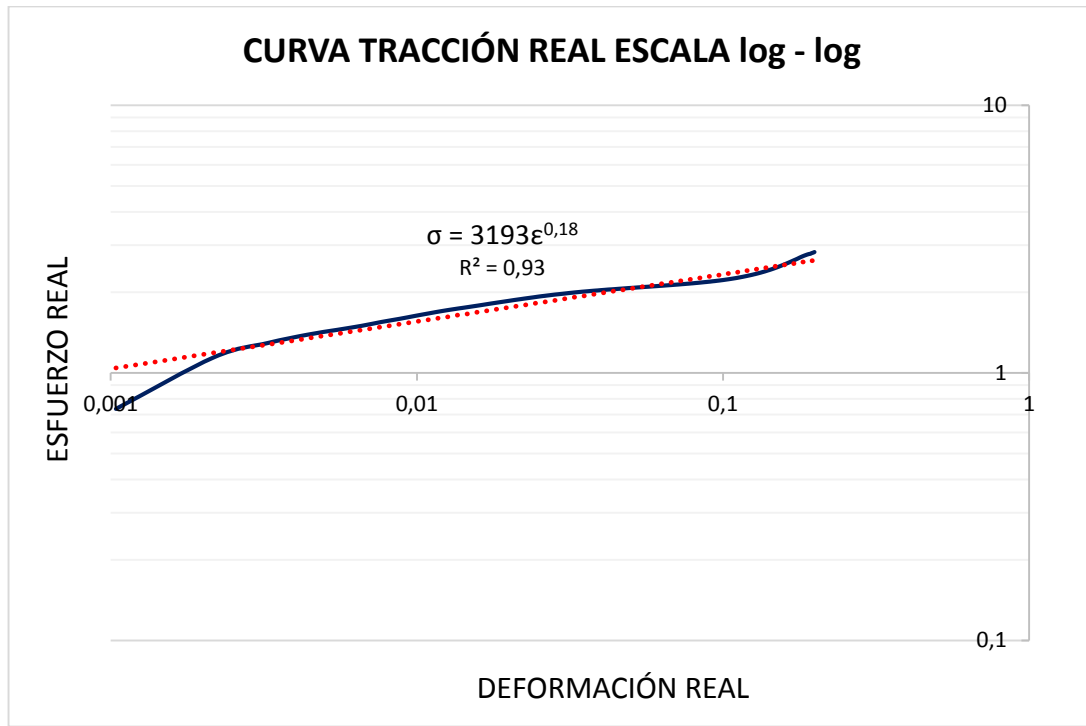
$$\varepsilon = \text{Deformación Unitaria}$$

En la parte B, corresponde al comportamiento del esfuerzo vs la deformación real a escala logarítmica, se muestra el módulo de endurecimiento por deformación el cual corresponde a un valor de 0.18, característico de un material dúctil, obtenida por su deformación plástica, como se puede apreciar en la parte A. Los valores obtenidos experimentalmente muestran una regresión lineal de 0.93, lo cual indica una buena representación de los ensayos.

Figura 20. Curva de esfuerzo – deformación real



a) Curva de esfuerzo – deformación real de la celda romboidal



b) Curva esfuerzo – deformación real trazada en una escala log-log, con ecuación $\sigma = 3193\epsilon^{0,18}$.

4.2 Fatiga

En las figura 21, 22, 23 y 24 se muestra el comportamiento dinámico de esfuerzo vs deformación de la celda romboidal a cuatro valores de carga diferente; las cuatro figuras muestran un comportamiento similar, en las cuales se aprecian dos líneas de tendencia, la superior indica el momento en que la probeta alcanza el esfuerzo máximo y la línea inferior indica el momento de descarga, alcanzando un esfuerzo mínimo. La zona A, asume el comportamiento de la celda cuando trata de alcanzar el esfuerzo programado para cada ensayo, la zona B es la zona de deformación volumétrica, donde se aprecia un crecimiento propio al comportamiento de un material que sufre endurecimiento al ser deformado plásticamente, la zona C es la

zona de deformación localizada en la cual se muestra un decrecimiento de la zona B a la Zona C y comienza a estabilizar, en esta zona se presenta la fatiga del material, con el inicio de una pequeña grieta hasta llegar el punto de rotura; cada zona tiene una duración de ciclos diferentes. Se observa que cuando se aumenta el valor del esfuerzo la respuesta de la celda romboidal disminuye en su duración de ciclos, esto se ve reflejado en las tablas 6, 7, 8 y 9 en las que se muestra el número de ciclos de cada zona.

Figura 21. Curva esfuerzo – deformación a carga de 375 MPa

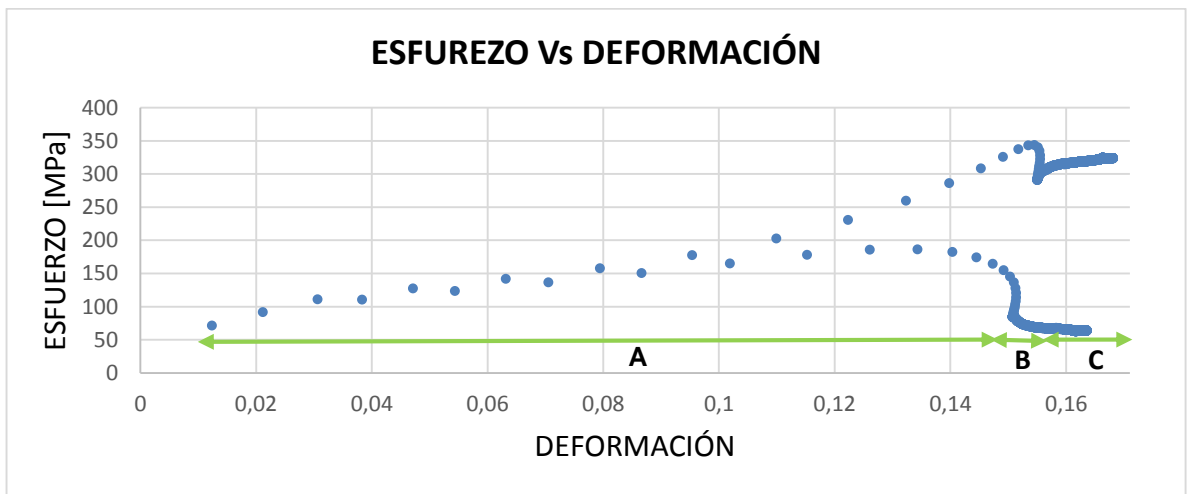


Tabla 6. Duración de ciclos a carga de 375 MPa

ZONA A	ZONA B	ZONA C	TOTAL
485 Ciclos	240 Ciclos	4975 Ciclos	5700 Ciclos

Figura 22. Curva esfuerzo – deformación a carga de 500 MPa

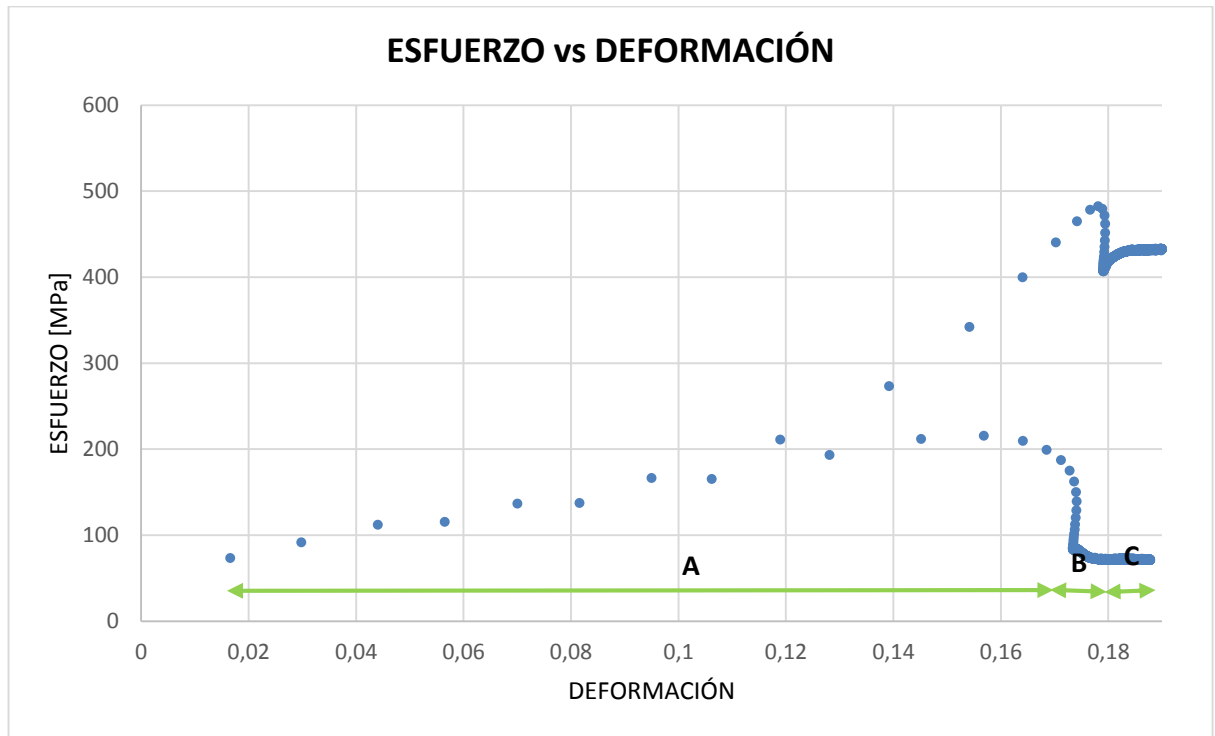


Tabla 7. Duración de ciclos a carga de 500 MPa

ZONA A	ZONA B	ZONA C	TOTAL
320 Ciclos	122 Ciclos	4622 Ciclos	5064 Ciclos

Figura 23. Curva esfuerzo – deformación a carga de 625 MPa

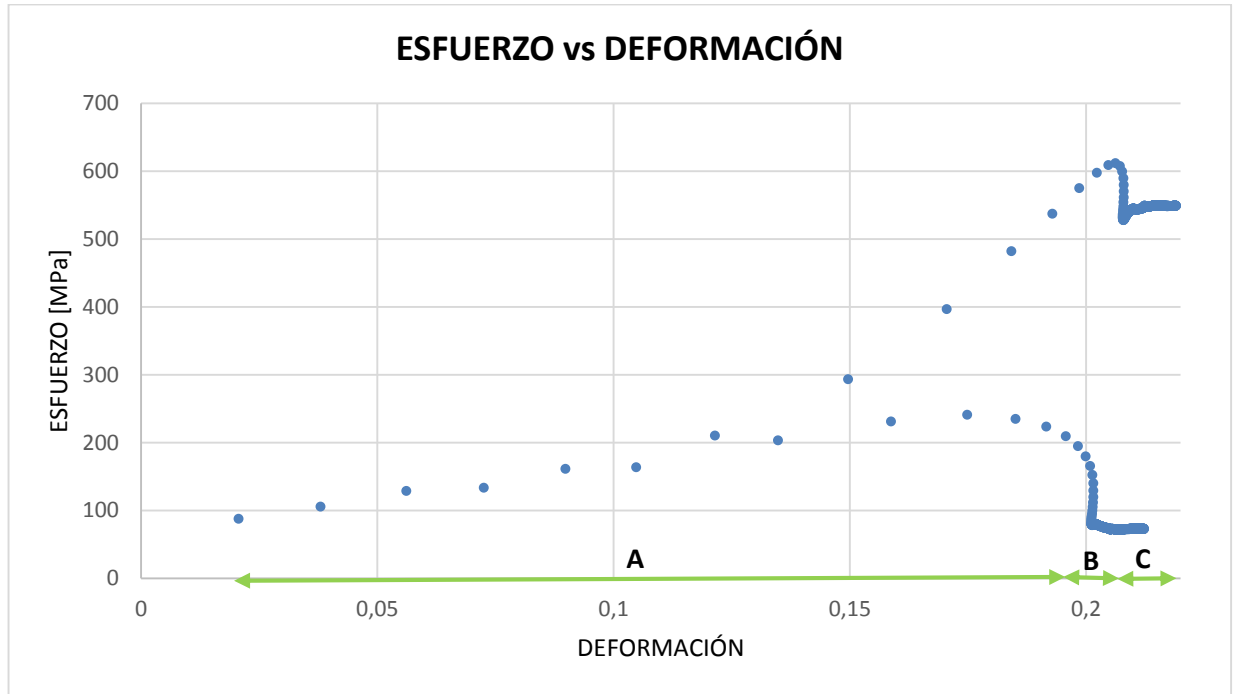


Tabla 8. Duración de ciclos a carga de 625 MPa

ZONA A	ZONA B	ZONA C	TOTAL
245 Ciclos	89 Ciclos	3844 Ciclos	4178 Ciclos

Figura 24. Curva esfuerzo – deformación a carga de 750 MPa

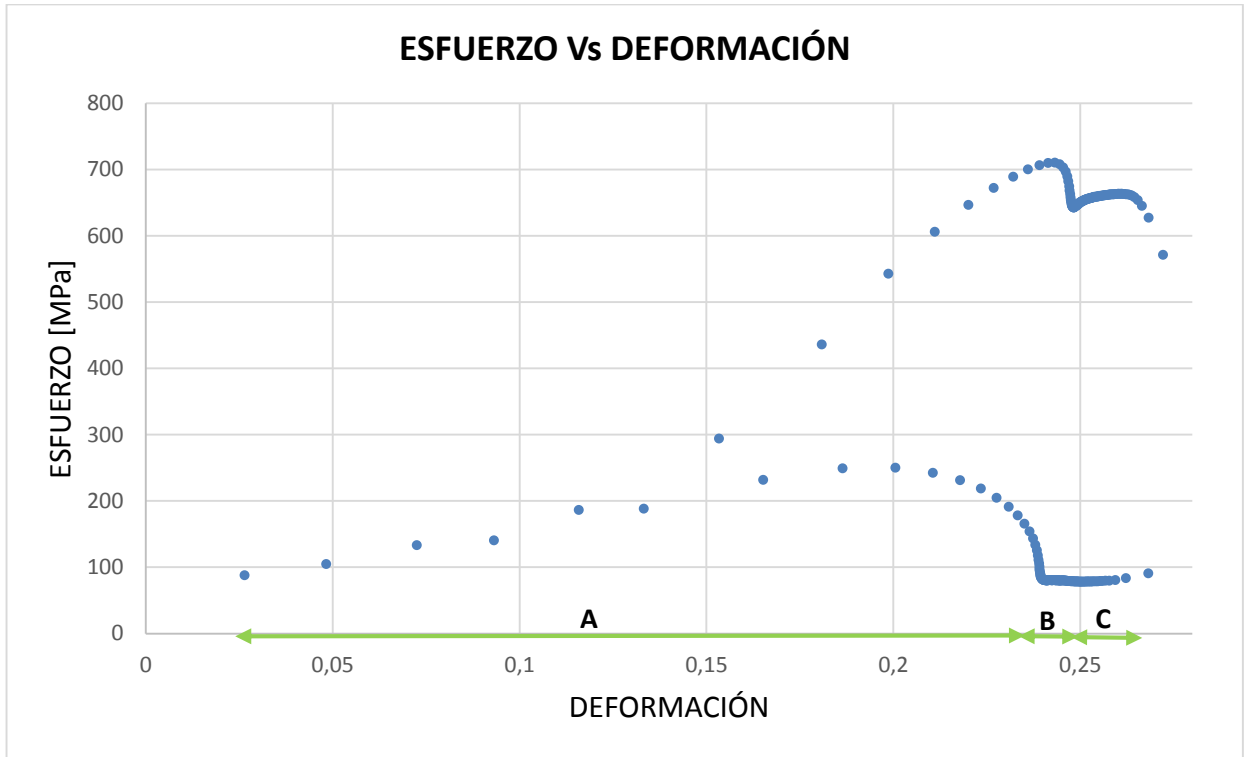


Tabla 9. Duración de ciclos a carga de 750 MPa

ZONA A	ZONA B	ZONA C	TOTAL
37 Ciclos	15 Ciclos	178 Ciclos	230 Ciclos

Mediante las siguientes ecuaciones se determinó la desviación estándar:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Donde:

\bar{x} = Promedio

n = Cantidad de la muestra

s^2 = Varianza

σ = Desviación estándar

Tabla 10. Desviación estándar de ensayos fatiga

	CARGA 375 MPa		CARGA 500 MPa	
	σ (MPa)	ϵ (mm/mm)	σ (MPa)	ϵ (mm/mm)
PROMEDIO	193,02	0,16	251,94	0,18
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	126,87	0,0054	171,93	0,0062

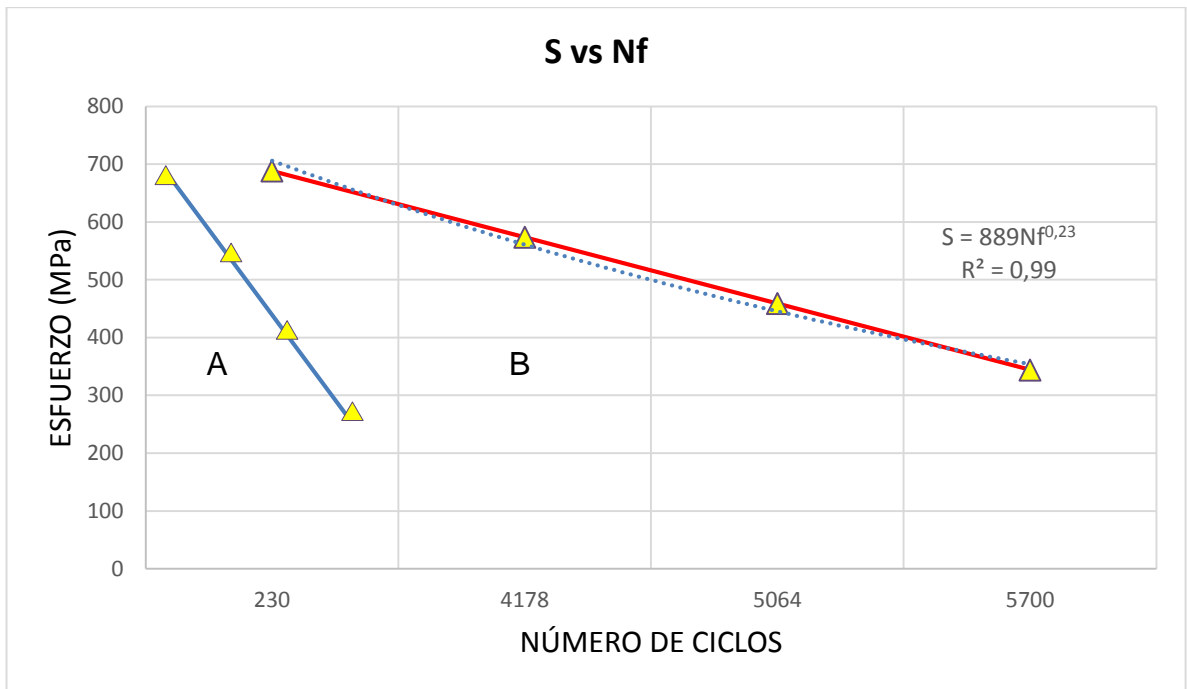
	CARGA 625 MPa		CARGA 750 MPa	
	σ (MPa)	ϵ (mm/mm)	σ (MPa)	ϵ (mm/mm)
PROMEDIO	237,76	0,39	367,56	0,24
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	189,77	0,11	280,31	0,031

En la figura 25, se construye la gráfica de esfuerzo vs número de ciclos que muestra el comportamiento de vida a la fatiga de la celda romboidal de un metal expandido, en ella se aprecia como la misma decrece con el aumento de los ciclos, corroborándose que el metal expandido sufrió un comportamiento similar al de un acero; cada punto de la curva se traza con el valor promedio de tres ensayos de fatiga a un mismo esfuerzo, los valores obtenidos experimentalmente muestran una regresión lineal de 0.99, lo cual indica una buena representación de los ensayos. Cuya ecuación es $S = 889N^{0,23}$ en donde, S es el esfuerzo y Nf corresponde al número de ciclos. La recta azul separa dos zonas; A, donde presenta nucleación y B, en donde se propaga la grieta.

Tabla 11. Resultados de vida a fatiga de bajo ciclo

	NÚMERO DE CICLOS (Nf) PROMEDIO	ESFUERZO (S)
1	230	688
2	4178	573
3	5064	458
4	5700	344

Figura 25. Curva de vida en fatiga



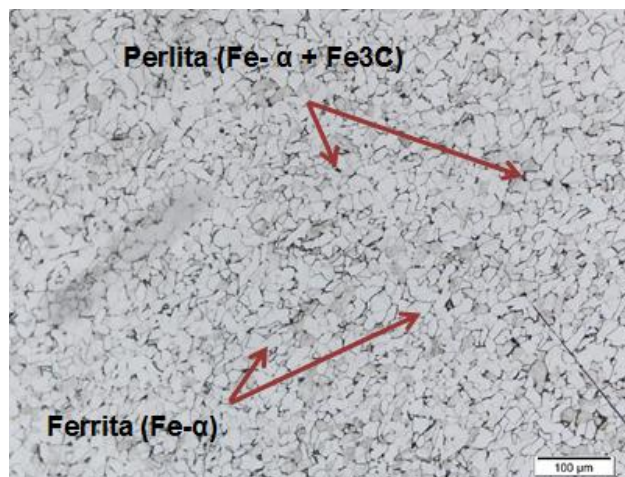
5. ANALISIS DE FALLA

El análisis de la superficie de falla se realizó por medio de inspección visual con ayuda de una lupa y por medio de microscopía electrónica de barrido sobre toda la superficie de falla, teniendo en cuenta la dirección de avance de la grieta.

5.1 MICROSCOPIA OPTICA

5.1.1 Micrografía acero ASTM A-569. Malla expandida de acero ASTM A 569, composición de 0,15 % C aproximadamente. En la figura 26 se muestra la microestructura del acero, por tener un porcentaje bajo en carbono la mayoría de granos son de ferrita (granos blancos), la ferrita posee la propiedad de ser una fase dúctil, es por eso que la conformación de la estructura se hace en frío, la perlita por ser un micro constituyente que está presente en cantidades muy pequeñas, éste se observa como zonas más oscuras en la micrografía, el tamaño de grano fue número 8, según la norma ASTM E 112.

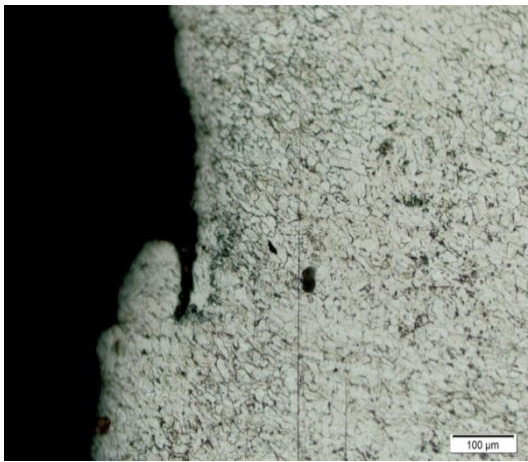
Figura 26. Micrografía de la malla expandida, corte longitudinal, sin carga aplicada, magnificación de 20 x.



5.1.2 Micrografía probetas a fatiga

5.1.2.1 Probeta romboidal a 375 MPa. Prueba de fatiga con 375 MPa [54,3ksi] de carga, 5700 ciclos aplicados y tiempo de ensayo 225 minutos. La figura 26 en la parte A muestra la microestructura de una probeta ensayada a fatiga a bajos ciclos, se observa una pequeña deformación de los granos a comparación con la micrografía original mostrada en la figura 27, la zona más cercana a la grieta presenta una mayor deformación, esto es debido a la gran concentración de esfuerzos que se presentan al momento de que se va desplazando la grieta a través del material, sin embargo más hacia el interior, la deformación de los granos no se observa tan notoriamente, en la parte B muestra más detallado la forma de los granos, lo cual se puede apreciar que la deformación de los granos es alrededor de 10% en comparación a la micrografía de la estructura original.

Figura 27. Micrografía probeta a 5700 ciclos y carga aplicada de 375 MPa



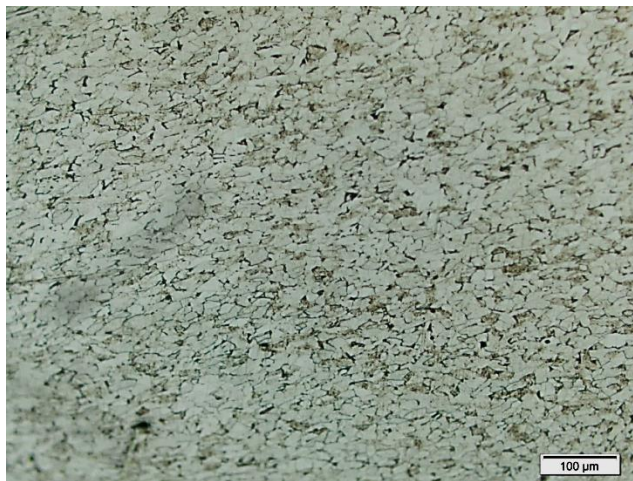
A) Micrografía de la probeta romboidal solicitada a 5700 ciclos, corte longitudinal, con carga aplicada de 375 MPa, magnificación de 20 x.



B) Micrografía de la probeta romboidal solicitada a 5700 ciclos, magnificación 50x.

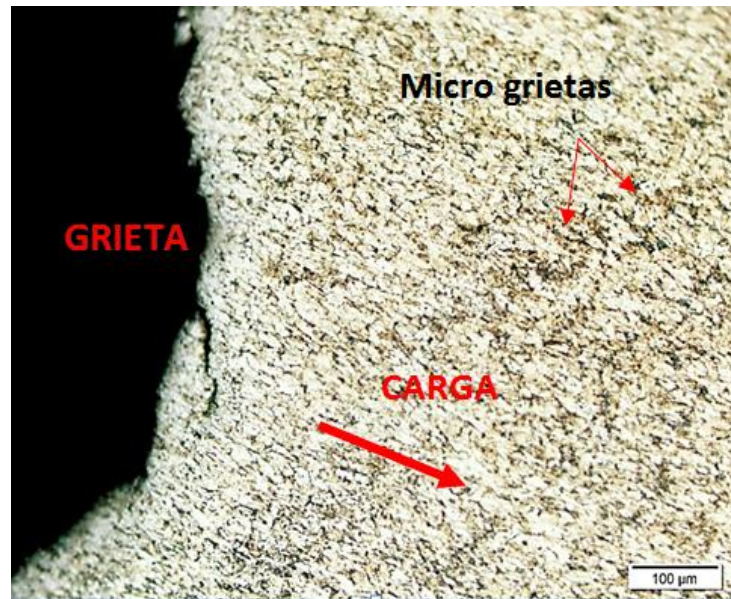
5.1.2.1 Probeta romboidal a 500 MPa. Prueba de fatiga con 500 MPa [72,5ksi] de carga, 5064 ciclos aplicados y tiempo de ensayo 85 minutos. La figura 28 muestra la micro estructura de la probeta luego de ser ensayada bajo una carga aplicada en tracción de 20 KN, se observa mayor deformación de los granos con respecto a la microestructura original, también se observa posibles zona de fisuración en los bordes de grano debido a que la energía se acumula en esos sectores. La deformación de los granos es de aproximadamente 35%.

Figura 28. Micrografía de la probeta romboidal, corte longitudinal, con carga aplica de 500 MPa, magnificación de 20 x.



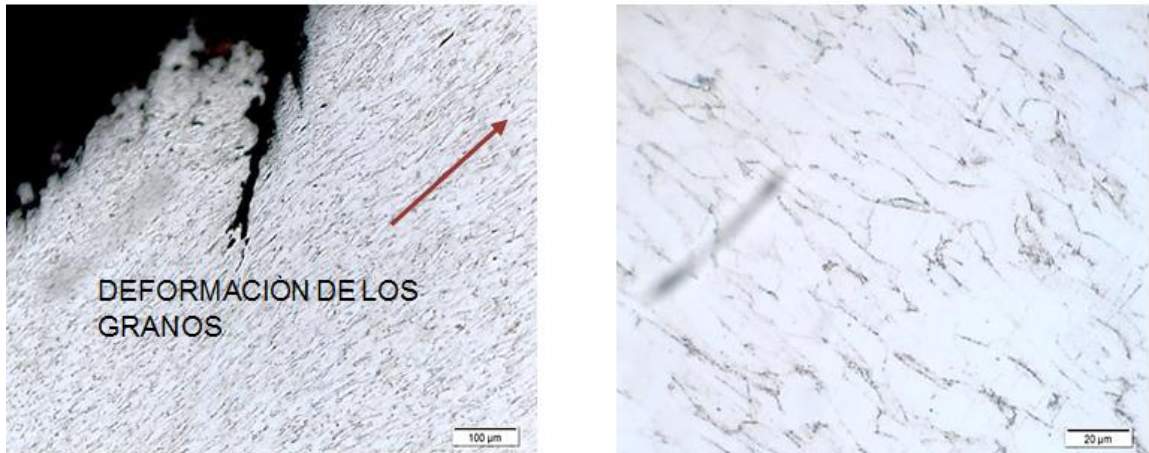
5.1.2.1 Probeta romboidal a 625 MPa. Prueba de fatiga con 625 MPa [90.6 ksi] de carga, 4178 ciclos aplicados y tiempo de ensayo 64 minutos. La figura 29 muestra la micrografía de la malla luego de aplicarle una carga axial de 25 KN en tracción, se observa el borde de la grieta y su ramificación hacia el interior del material, al igual que en la probeta de 20 KN los granos se han deformado un 60% a comparación de la microestructura original, las micro grietas se presentan por la acumulación de esfuerzos en los límites de grano de la ferrita.

Figura 29. Micrografía de la malla expandida, corte longitudinal, con carga aplica de 625 MPa, magnificación de 20 x



5.1.2.1 Probeta romboidal a 750 MPa. Prueba de fatiga con 750 MPa [108.8 ksi] de carga, 230 ciclos aplicados y tiempo de ensayo 12 minutos. La figura 28 en la parte A muestra la microestructura de la probeta luego de ser aplicada una carga axial de 30 KN en tracción, se observa la máxima deformación apreciada en los ensayos, debido a la carga aplicada, la fractura se produjo en un tiempo de 12 minutos, en la parte B es una magnificación de 50x de la microestructura de la probeta ensayada, se observa un porcentaje de deformación del 95% respecto a la microestructura original.

Figura 30. Micrografía probeta a 230 ciclos y carga aplicada de 750 MPa



a) Micrografía de la malla expandida, corte longitudinal, con carga aplicada de 750 MPa, magnificación de 20 x.

b) Deformación de los granos luego de aplicada la carga de 30 KN

5.2 COMPARACION DE MICROGRAFIAS

Figura 31. Comparación de estructura granular entre la probeta original y luego de una deformación con carga aplicada de 375 MPa.



Figura 32. Comparación de estructura granular entre la probeta original y luego de una deformación con carga aplicada de 500 MPa.

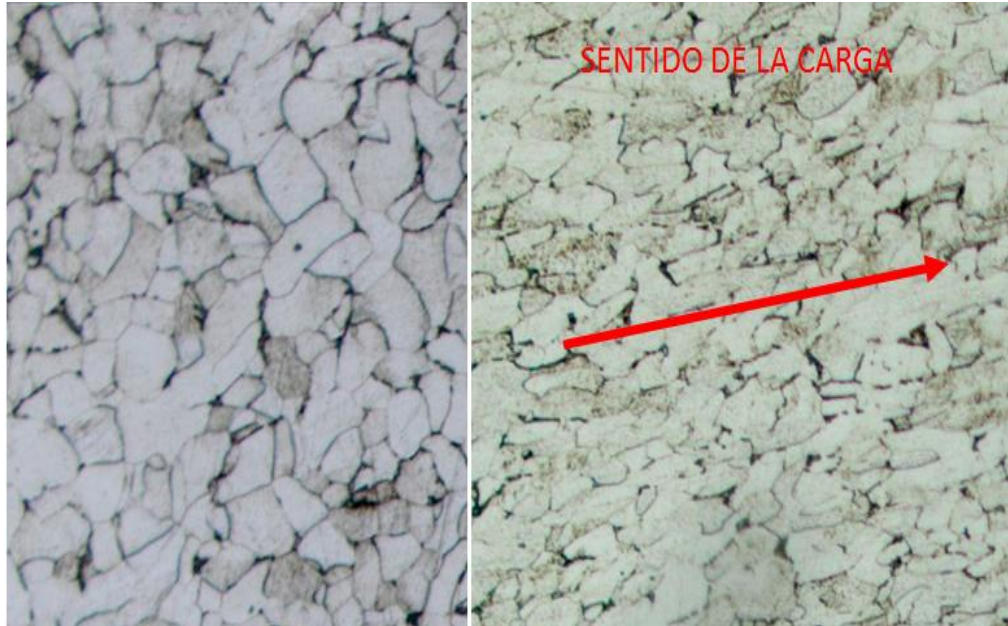


Figura 33. Comparación de estructura granular entre la probeta original y luego de una deformación con carga aplicada de 625 MPa.

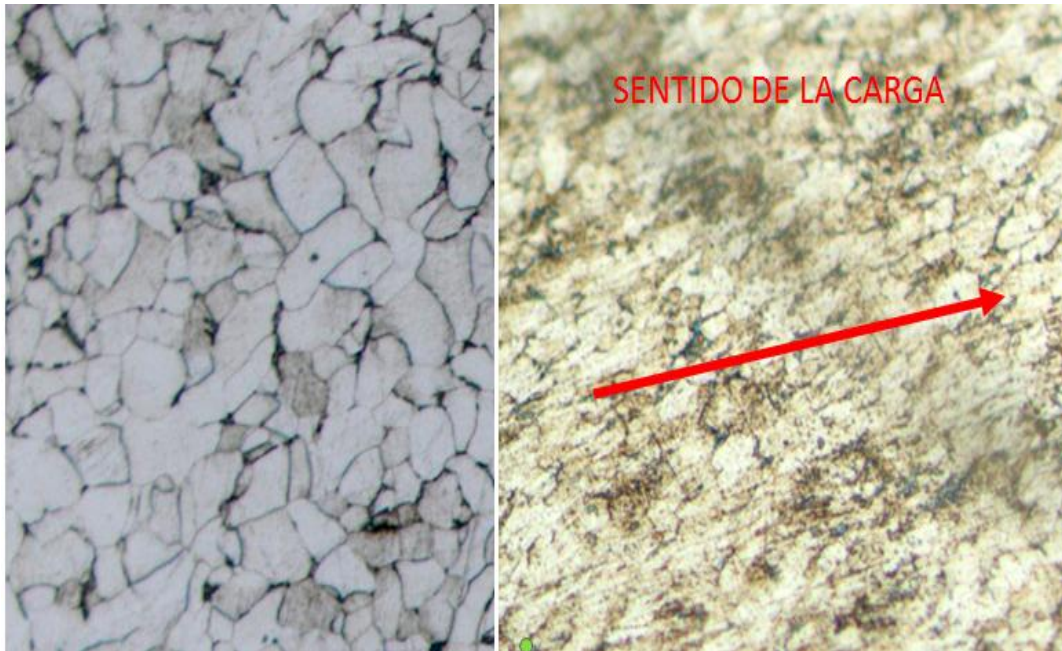
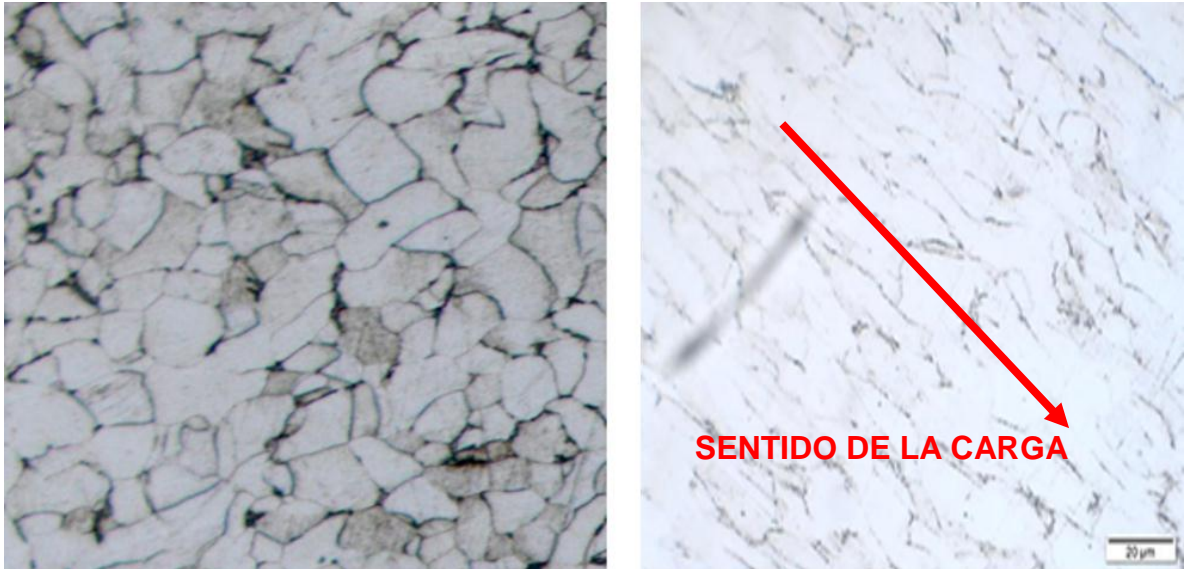


Figura 34. Comparación de estructura granular entre la probeta original y luego de una deformación con carga aplicada de 750 MPa.



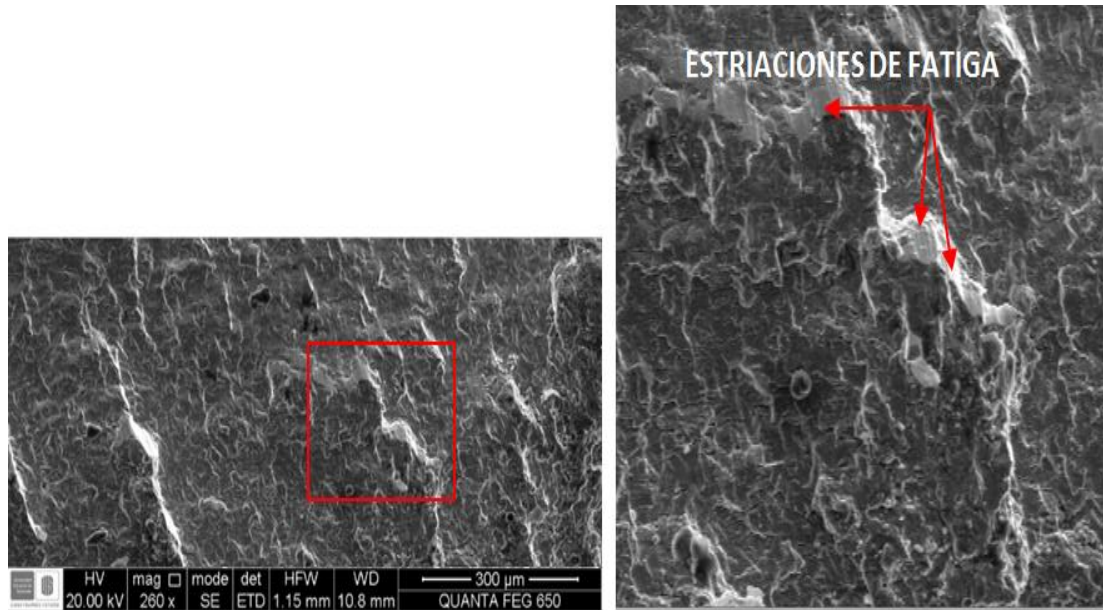
5.3 ZONA DE FRACTURA

El análisis se realizó por medio de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB o SEM), sobre la zona de fractura, con esta técnica se quiere verificar que la falla del material se debió a la aplicación de las cargas cíclicas y no a otro mecanismo de falla.

5.3.1 Probeta de 375 MPa de carga aplicada. La figura 35 muestra la micrografía tomada a la probeta con carga de 375 MPa, en la cual se observa la formación de hoyuelos que es una propiedad que poseen los materiales dúctiles, a medida que se le aplica una carga, el comportamiento de los límites de grano (donde se encuentra la perlita) que son zonas de mayor concentración de energía, las dislocaciones se agrupan en estas regiones aumentando su dureza y aumentando la facilidad de falla. Además se puede observar en algunos sectores de desplazamiento plano en donde se muestran algunas estrías, formados por la continua carga y descarga del ensayo.

Observando las micrográficas y teniendo en cuenta que el material es dúctil el inicio de la grieta se produce por la falta de coalescencia en los límites de grano en el centro de la probeta y comienza su desplazamiento hasta las zonas de mayor concentración de esfuerzos en las entallas de la pieza.

Figura 35. Probeta de 375 MPa de carga aplicada



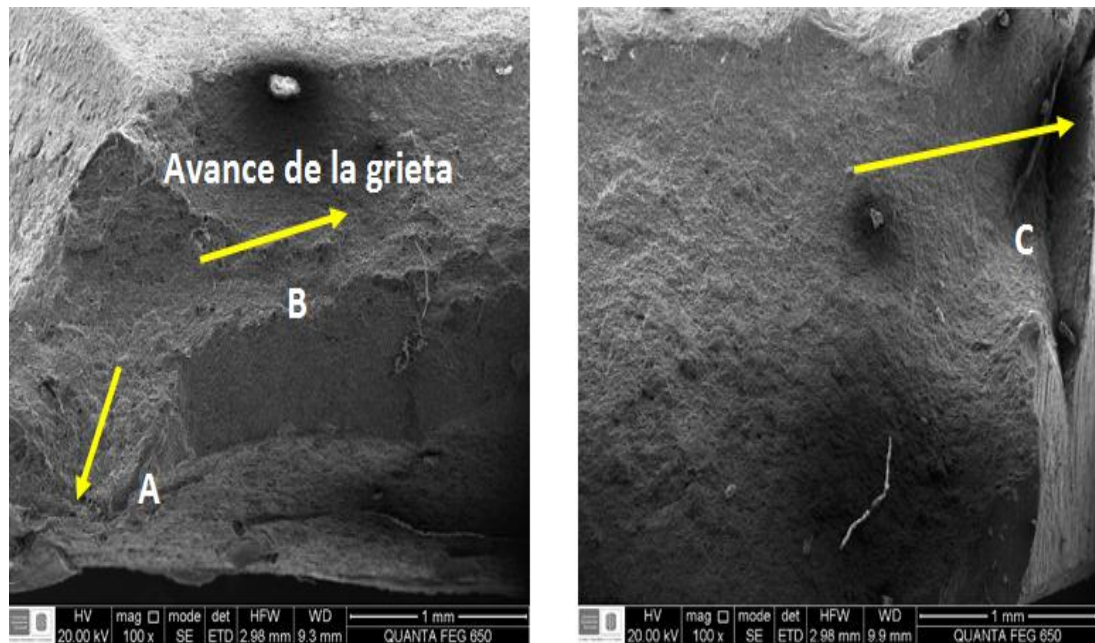
A) Micrografía tomada por SEM a 500x

B) Micrografía tomada por SEM a 1000x

5.3.2 Probeta de 500 MPa de carga aplicada. La figura 36, en la parte A muestra la micrografía de la probeta romboidal ensayada a condiciones de fatiga con 500 MPa de carga aplicada, se observa el inicio de la grieta por acumulación de esfuerzos en la zona A, esto se debe a que en la superficie de corte quedan imperfecciones o defectos que sirven como concentradores de esfuerzos y es la zona más preferible para el inicio de grietas, además el material por ser muy dúctil se presentan los hoyuelos, esto a medida que se aumenta la carga se hacen cada vez más pequeños debido a que en los límites de grano existe un endurecimiento por deformación cada vez mayor, aumentando el alargamiento de los granos y

disminuye la coalescencia de estos, produciendo una mayor cantidad de espacios que permite aumentar la probabilidad de falla. Zona B muestra el sentido de propagación de la grieta, terminado en un desgarramiento dúctil como se observa en la parte B.

Figura 36. Probeta de 500 MPa de carga aplicada



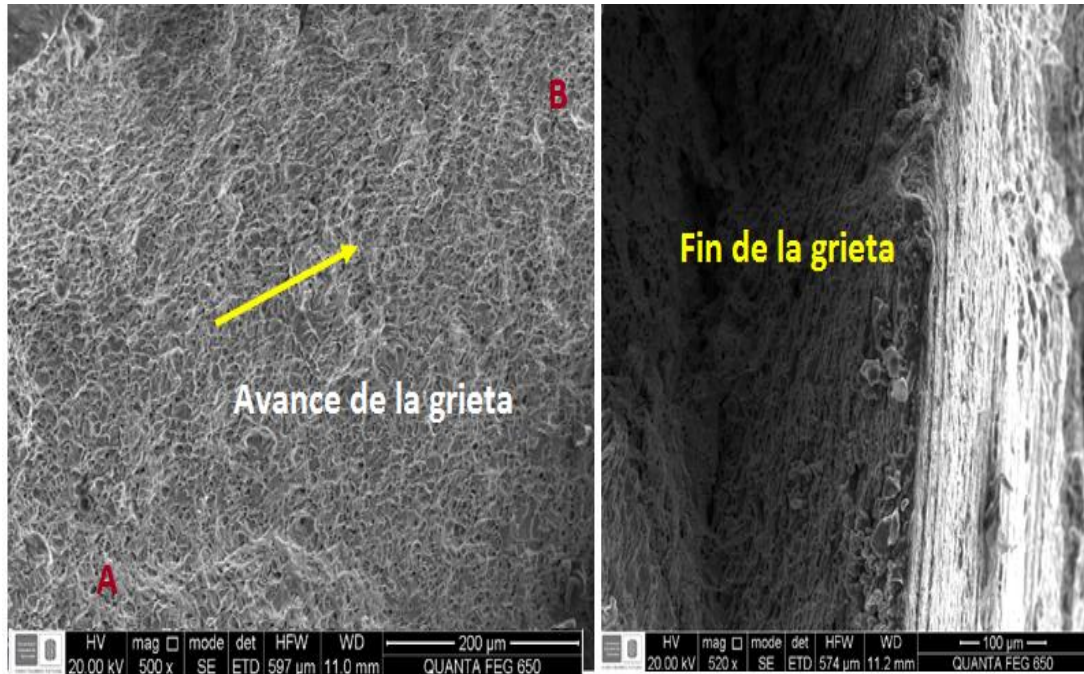
A) Muestra el inicio de la grieta donde se presenta una pequeña deformación plástica.

B) Muestra el final de la falla donde se presenta un desgarramiento dúctil.

La figura 37, en la parte A muestra de forma más detallada el inicio de la grieta en la zona A, se observa una superficie muy similar a la que se presentó con una carga de 375 MPa, esto se debe a que la fuerza que está produciendo el rompimiento de los granos es muy poca a comparación con la resistencia del material, sin embargo llega a un punto en donde los granos no aguantan la cantidad de carga aplicada y comienza el desgarramiento zona B. En la parte B muestra el final de la grieta, es

completamente un comportamiento de desgarre del material debido a que ya no es capaz de soportar la fuerza ejercida por la carga aplicada.

Figura 37. Avance de grieta en probeta de 500 MPa



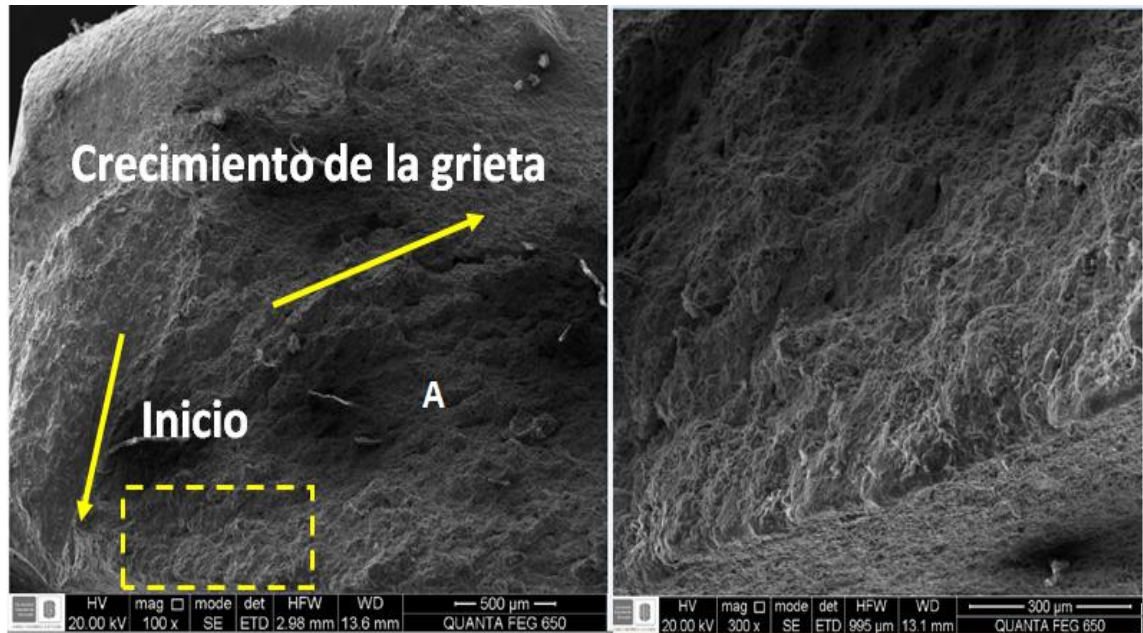
A) Zona de inicio de la grieta [A], se observa la formación de hoyuelos por efecto de deformación plástica de los límites de granos.

B) Fin de la grieta comportamiento de fractura completamente dúctil se presenta el labio a 45° típico de los materiales dúctiles.

5.3.3 Probeta de 625 MPa de carga aplicada. La figura 38, en la parte A muestra el inicio de la grieta para la probeta romboidal con carga aplicada de 625 MPa, se observa que la carga aplicada produce una mayor velocidad de avance de la grieta a través de los granos, así como produciendo un endurecimiento por deformación y a su vez disminuyendo los tiempo y el número de ciclos que aguanta la probeta, para esta carga ya no se observa un comportamiento tan dúctil al inicio, es decir no

se presentan una gran cantidad de hoyuelos, principalmente se produce es un desgarramiento de los límites de granos. La parte B se observa más detallada la superficie fibrosa formada por el desplazamiento y rompimiento de la estructura granular.

Figura 38. Probeta de 625 MPa de carga aplicada

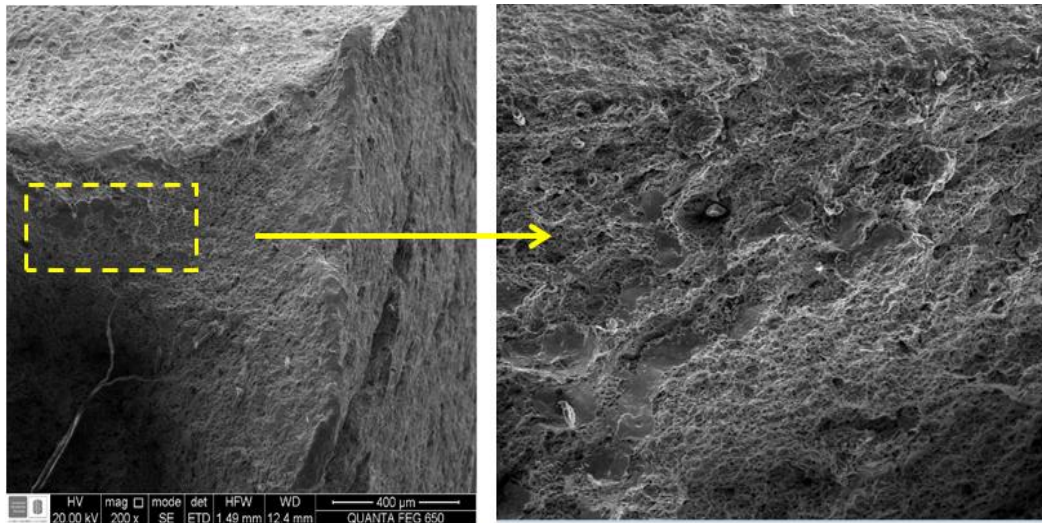


A) Zona de inicio de la grieta [A], se observa la formación de hoyuelos por efecto de deformación plástica de los límites de grano.

B) Superficie fibrosa

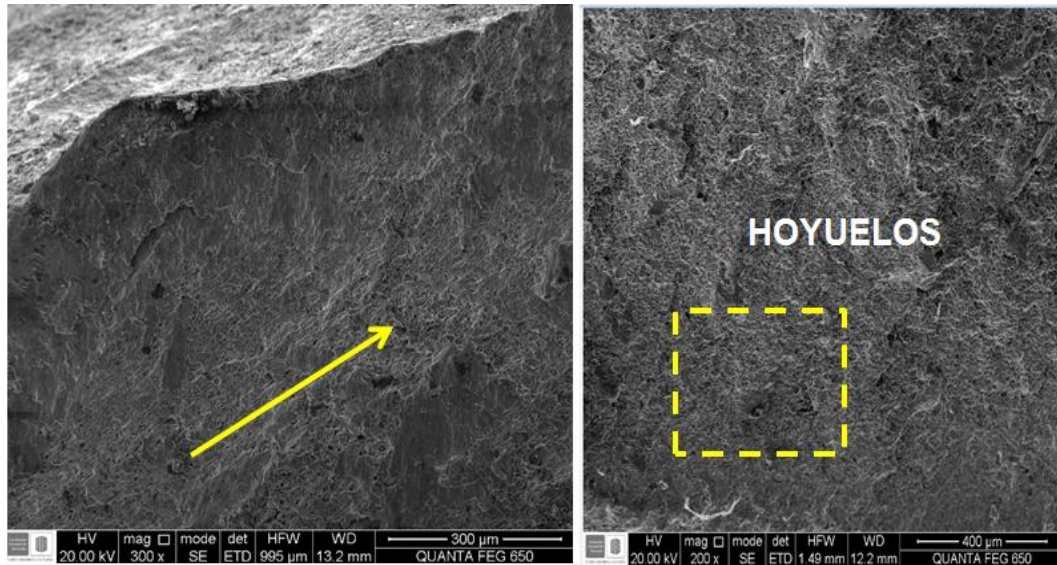
La figura 39 muestra la zona final de la fractura, a medida que se va aumentando la carga esta zona va ocupando una mayor área, es decir que el material va romper más rápido debido a que no es capaz de soportar los esfuerzos producidos sobre los límites de grano.

Figura 39. Fin de la grieta con un comportamiento de fractura completamente dúctil de la probeta a 625 MPa.



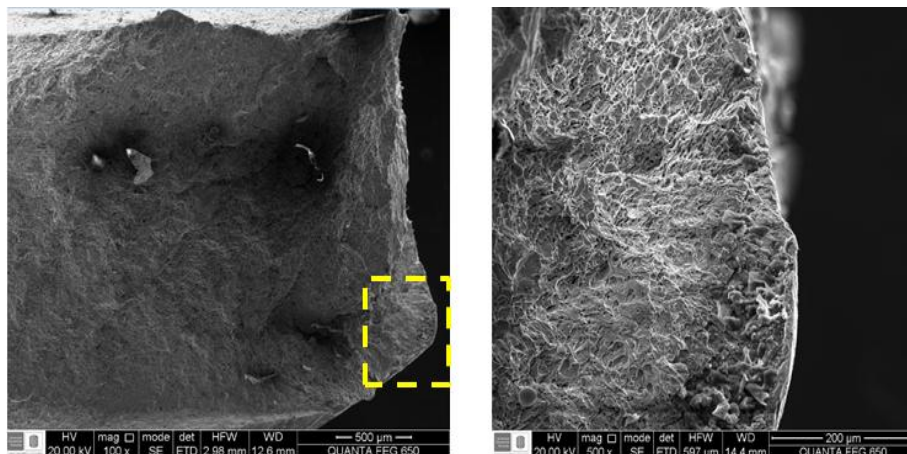
5.3.4 Probeta de 750 MPa de carga aplicada. La figura 40 muestra la micrografía tomada de la probeta ensayada con carga de 750 MPa , como se observó en el análisis metalográfica esta probeta fue la que sufrió una mayor deformación plástica, aumentando el endurecimiento por deformación, esto conlleva a que la probeta se fracture más rápido porque no le da lugar a que las dislocaciones se acomoden. Los límites de grano se fracturan más rápido por ser una zona de alta energía, la fractura se produce intergranular por pérdida de cohesión de los límites. La superficie presenta al igual que en las otras pero el tiempo de falla y el número de ciclos fue mucho menor, esto produce una zona de fractura rápida mucho más grande que en las anteriores.

Figura 40. Superficie de crecimiento de la grieta, hoyuelos de deformación dúctil en la probeta de 750 MPa.



La figura 41 muestra el final de la grieta, se observa la rotura completamente dúctil a 45° del plano de falla. La probeta a pesar de ser de un material completamente dúctil, su comportamiento debido a la carga aplicada la hace fluir muy rápido y deforma la estructura, la mayoría de las probetas fallaron en la zona donde se colocó la mordaza, mas no en los puntos de interés que era la zona de mayor concentración de esfuerzos que son las puntas del rombo.

Figura 41. Final de la grieta a 45° del plano de falla en la probeta de 750 MPa.



5.4 ANALISIS GENERAL

Las probetas ensayadas hacen parte de una malla expandida en forma romboidal, está fabricado de un material completamente dúctil con 0.15% de carbono, su estructura metalográfica es una mezcla de ferrita (hierro alfa) y perlita (cementita laminar y ferrita), como se observó en la micrografía original tomada a 10x, a medida como se le aplica la carga axial los granos van sufriendo una deformación cada vez mayor como se observó en las figuras 27, 28 y 29, esta deformación produce un endurecimiento y las zonas de mayor energía que son los límites de grano donde está la perlita que es de mayor resistencia que la ferrita empieza a perder cohesión y se comienza a producir aun agrietamiento intergranular.

Las imágenes tomadas por SEM muestran específicamente la forma de cómo se propaga la grieta cada vez que se realiza un ciclo de tensión y descarga, a menores cargas de tensión la zona de propagación de la grieta aumenta, facilitando que los granos fluyan un poco más lento, amentando así los números de ciclos y el tiempo requerido para fallar. A medida que la carga aplicada se aumenta la propagación de la grieta es mayor produciendo que los granos no fluyan si no desgarrándolos produciendo una superficie más irregular.

La falla de cualquier pieza comienza o nuclea siempre en un sitio en donde se produzca la mayor cantidad de esfuerzos, puede ser una entalla, inclusiones o imperfectos del material, zonas afectas térmicamente, zonas expuestas a tratamientos térmicos inadecuados, o simplemente debido a una superficie irregular. Como se observó en las micrografías la superficie de la probeta es muy irregular, además posee una alta cantidad de esfuerzos residuales debido la deformación en rio que sufre la malla al momento de su fabricación, la mayoría de fallas comenzaron exactamente en esas zonas de superficie irregular como se observó en las figuras mostradas.

Una de las características principales de materiales ensayados a fatiga es la presencia de marcas de playa y de estrías de fatiga, estas aseguran que la causa de falla fue debido a la fatiga del material, no obstante la ausencia de una o de ambas no excluye a la fatiga como causa de la fractura. Si la fractura se produce muy rápido, estas marcas no aparecen, además si hay evidencias de deformación plástica se tomara y analizara como una fractura dúctil.

Debido a la propiedad del material de ser tan dúctil estas marcas no son tan definidas porque no le da tiempo de que la grieta se propague transversalmente, la carga aplicada produce una deformación de los granos y acumulación de dislocaciones sobre los límites de grano produciendo así una deformación de cada uno de los granos y la formación de hoyuelos típicos de fracturas dúctiles, sin embargo a esfuerzos relativamente bajos [375 MPa] se observa la presencia de algunas estrías debido a las cargas cíclicas, lo que concluye que el mecanismo de falla fue producido por fatiga, a altas cargas la deformación plástica es tan elevada que no permite que el material cumpla con altos ciclos de vida, se presenta es un desgarramiento de los granos.

Los sitios de mayor sollicitación o de mayor concentración de esfuerzos se consideran las puntas o entallas de los rombos y la superficie afectada por los cortes de la conformación en frío, micro estructuralmente se puede considerar la perlita como la responsable del comienzo de micro grietas, por ser las zonas de mayor energía y poca capacidad de deformación.

6. CONCLUSIONES

- Se logró caracterizar el rombo de la malla de metal expandido, mediante el promedio de tres ensayos a tracción; estableciendo una curva donde se aprecia el comportamiento de esfuerzo (MPa) vs deformación, en la cual se muestra que pese a ser un acero de bajo contenido de carbono su forma romboidal influye en los resultados obtenidos en dichos ensayos de tracción, esto se observa en la gráfica debido a que su comportamiento es atípico a lo que comúnmente se ve en la literatura.
- Se determinó el comportamiento a la fatiga en condición de bajo ciclaje de una forma romboidal, se pudo graficar el comportamiento de esfuerzo vs el número de ciclos típica de la forma, el cual se aprecia que es similar al de un metal de bajo contenido de acero. Se encontró una curva a fatiga cuya ecuación que la representa es $S = 889N^{f0,23}$.
- Las grietas por fatiga a bajo ciclo se inician después de una estabilización volumétrica como se muestra en las figuras 21,22,23 y 24 en el material y su zona de nucleación se localiza en los puntos donde contienen alta energía o concentradores de esfuerzo, encontrándose físicamente la mayoría en la parte superior de la celda romboidal.

BIBLIOGRAFÍA

T.L, Anderson. Fracture mechanics fundamentals and applications. Editorial Taylor & Francis Group, USA, 2005, Capitulo 10.

HERTZBERG, Richard W. Deformation and fracture mechanics of engineering materials. Editorial Copyright, New Jersey, 1996, Capitulo 13 y 14.

DIETER, George E. Mechanical metallurgy. Editorial McGraww – Hill, Maryland 1988, Capitulo 6 y 7.

BATHIAS, Claude y BAILON, Jean Paul. La fatigue des matériaux et des structures. Editorial Hermes, Paris, 1997.155-170p.

GROOVER, Mikell P. Fundamentos de manufactura moderna. Editorial Prentice Hall, México, Capitulo 3.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Trabajos escritos, Presentación y referencias bibliográficas. Bogotá D.C.: ICONTEC, 2008. 110 p. ISBN 978-958-9383-81-0.

CALLISTER, William D. Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. Editorial Reverte S.A, Barcelona, 2007, Capitulo 7.

SMITH, William F y HASHEMI, Javad. Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales cuarta edición. Editorial McGraw-Hill, 2006.