



**EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE DOS METODOS
PARA RETARDAR EL CRECIMIENTO DE GRIETAS
EN LA FATIGA AXIAL**

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE DOS METODOS PARA RETARDAR EL CRECIMIENTO DE GRIETAS EN LA FATIGA AXIAL

**Monografía de Tesis de Maestría presentada por
BLEIDYS CECILIA BLASCHKE COLLADO
para obtener el grado de MAGISTRA EN INGENIERIA MECANICA**

**Dirigida por: HERIBERTO MAURY RAMIREZ
Doctor en Ingeniería Mecánica**

**UNIVERSIDAD DEL NORTE
DIVISION DE INGENIERIAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA
MAESTRIA EN INGENIERIA MECANICA
BARRANQUILLA
2006**

Aceptación:

Vo.Bo. Ing. Heriberto Maury R.
Director de la Investigación

Vo.Bo. Ing. José Wilches B.
Corrector

Vo.Bo. Ing. Jaime Torres S.
Corrector

Vo.Bo. Ing. Antonio Bula S.
Director de la Maestría en
Ingeniería Mecánica

Barranquilla, Julio de 2006

A Dios y a mis padres
ustedes son la luz que ilumina mi vida.

Gracias por su apoyo y comprensión.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mis más sinceros agradecimientos a:

Heriberto Maury Ramírez, Ingeniero Mecánico. Doctor en Ingeniería Mecánica. Profesor del Dpto. de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Norte y Director del trabajo de investigación. Gracias por la confianza que ha depositado en mi, su apoyo, constancia y dedicación me han llevado a ser un profesional con un futuro promisorio.

José Wilches Balseiro. Ingeniero Metalúrgico. Profesor del Dpto. de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Norte. Fueron muchos los conocimientos adquiridos con las investigaciones que emprendí bajo su supervisión. Hoy veo culminado mi proyecto de investigación de Maestría precisamente en el tema al que alguna vez condujiste mi interés, gracias por su apoyo y por ser uno de mis más grandes guías.

Dirección de Investigaciones y Proyectos Uninorte: Alexandra Bolaño, Yahem Baeza y Katherine Pardo. Por su apoyo económico, colaboración y amistad para el desarrollo de esta investigación.

Terminales Automotrices S.A. Por su total colaboración en el desarrollo de las pruebas de fatiga axial.

Elkin Espitia Fuentes. Ingeniero Mecánico, Universidad de los Andes. ExCoordinador Laboratorio de Calidad, Terminales Automotrices S.A.. Su colaboración ha sido una de las más importantes para la ejecución de la fase experimental de esta investigación.

Fabio Pabon. Auxiliar del Laboratorio de Calidad, Terminales Automotrices S.A.. Por su colaboración y dedicación en la fase experimental de la investigación.

Antonio Bula S. Ingeniero Mecánico. Doctor en Ingeniería Mecánica. Profesor del Dpto. de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Norte. Por haberme brindado la oportunidad y su incondicional colaboración para realizar mis estudios de maestría, confiando en mis capacidades profesionales.

Marco Sanjuán Mejía. Por las enseñanzas y la amistad que me ha brindado desde mi incorporación al Departamento de Ingeniería Mecánica.

Jaime Torres Salcedo Ingeniero Metalúrgico, Doctor en Ingeniería Industrial, Profesor del Dpto. de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Norte. Por sus aportes y conocimientos que ayudaron a encaminar mi investigación.

Alejandro Pacheco. Ingeniero Mecánico, Profesor del Departamento de Ingeniería Básica de la Universidad del Norte. Por su colaboración en la etapa de aplicación de las teorías de crecimiento de grieta, tus aportes fueron de vital importancia para esta investigación.

Humberto Gómez. Ingeniero Mecánico. Profesor del Dpto. de Ingeniería Básica de la Universidad del Norte. Por su colaboración en Microscopía Electrónica de Barrido.

Alfredo Gutierrez. Ingeniero Electrónico. Por su colaboración en algunos aspectos estadísticos de la investigación.

Alfredo Piñeres. Ingeniero Civil. Magíster en Vías y Transporte. Tu apoyo, colaboración y cariño, me ayudaron a no desfallecer en algunos momentos difíciles.

Cecilia Sanjuán y Astrid Collado. Mi abuela y mi tía. Por que su amor y comprensión siempre me han ayudado a ser cada día mejor. Gracias por cuidar de mí.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1 INTRODUCCIÓN-----	1
1.1 FORMULACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN-----	3
1.2 OBJETIVOS-----	3
1.2.1 Objetivo General-----	3
1.2.2 Objetivos Específicos-----	3
1.3 METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN-----	4
1.4 LIMITACIONES-----	4
1.5 MARCO TEORICO DE REFERENCIA-----	5
1.5.1 Mecánica de la Fractura-----	5
1.5.2 Concentración de Esfuerzos [2]-----	5
1.5.3 Condiciones de Fractura [3]-----	6
1.5.4 Factor de Intensidad de Esfuerzos y Tenacidad de Fractura [4, 5, 6]-----	7
1.5.5 Fenómeno de Fatiga [2, 5, 6, 7, 8]-----	8
1.5.6 Análisis de Covarianza [9]-----	10
2 ESTADO DEL ARTE-----	14
2.1 GENERALIDADES SOBRE FATIGA EN MATERIALES-----	14
2.2 FATIGA EN MATERIALES Y TOPICOS RELACIONADOS-----	14
2.3 TECNOLOGIAS PARA LA REPARACIÓN DE COMPONENTES AGRIETADOS-----	15
2.4 SOFTWARE PARA FATIGA Y CRECIMIENTO DE GRIETA-----	17
3 PLANIFICACIÓN METODOLÓGICA DE LA INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL-----	18
3.1 SECUENCIA METODOLÓGICA-----	18
3.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ACERO AISI 1045-----	19
3.3 ENSAYO DE TRACCIÓN-----	19
3.3.1 Materiales, equipos e insumos-----	19
3.3.2 Procedimiento-----	19
3.3.3 Tratamiento de la Información-----	20
3.4 ANALISIS METALOGRAFICO-----	20
3.4.1 Materiales, equipos e insumos-----	20
3.4.2 Procedimiento-----	20
3.4.3 Tratamiento de la Información-----	21
3.5 ENSAYOS DE FATIGA AXIAL-----	21
3.5.1 Materiales, equipos e insumos-----	21
3.5.2 Determinación de los Parámetros para las Pruebas de Fatiga Axial-----	26
3.5.3 Métodos de Reparación a Evaluar-----	26
3.5.4 Planteamiento Experimental para las Pruebas de Fatiga Axial-----	27
4 DETERMINACIÓN DE NIVELES DE CARGA PARA LOS ENSAYOS DE FATIGA-----	30
4.1 Resultados del ensayo de tracción en el acero 1045-----	30
4.1.1 Datos Iniciales del Ensayo de Tracción-----	30
4.1.2 Propiedades obtenidas del Ensayo de Tracción-----	31
4.2 Estimación de factores de corrección para análisis de la falla-----	31
4.3 obtención del diagrama S-N-----	33
4.4 Diagrama de Goodman Modificado-----	35
5 RESULTADOS DE LA INVESTIGACION-----	40
5.1 ENSAYOS DE FATIGA AXIAL-----	40

5.1.1	Datos Iniciales del Ensayo de Fatiga Axial -----	41
5.1.2	Crecimiento de la Grieta de Fatiga Axial -----	41
5.1.3	Resultados de los Ensayos de Fatiga Axial -----	43
5.2	CARACTERIZACIÓN MACROSCOPICA Y MICROSCOPIA DE LA SUPERFICIE DE FRACTURA -----	48
5.2.1	Caracterización Macroscópica de la Superficie de Fractura-----	48
5.2.2	Caracterización Microscópica de la Superficie de Fractura-----	49
5.3	CARACTERIZACIÓN METALOGRAFICA -----	52
5.4	MICRODUREZA -----	52
6	ANÁLISIS DE RESULTADOS-----	58
6.1	ANÁLISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS A PARTIR DE LOS ENSAYOS DE FATIGA AXIAL -----	58
6.1.1	Análisis de Covarianza para los Datos de Fatiga Axial -----	59
6.1.2	Análisis a partir de la Aplicación de las Teorías de Diseño y Mecánica de la Fractura Lineal Elástica-----	65
6.1.3	Modelo de Regresión para el Crecimiento de la Grieta de Fatiga-----	68
6.2	CARACTERIZACIÓN MACROSCOPICA Y MICROSCOPIA DE LA SUPERFICIE DE FRACTURA -----	71
6.2.1	Caracterización Macroscópica de la Superficie de Fractura-----	71
6.2.2	Caracterización Microscópica de la Superficie de Fractura-----	72
6.3	CARACTERIZACIÓN METALOGRAFICA -----	73
6.4	MICRODUREZA -----	73
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES-----	74
7.1	conclusiones -----	74
7.2	recomendaciones -----	75
8	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS -----	77

ANEXOS

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1. Líneas de fuerza en el borde de un orificio elíptico en una placa.	6
Figura 1.2. Modos de fractura.	7
Figura 1.3. Factor de configuración de carga para grietas que emanan de un agujero.	8
Figura 2.1. Frecuentes sitios de iniciación de crecimiento de grietas en aviones.	16
Figura 2.2. Reparación con parches en la superficie interior de una estructura sometida a vibración.	16
Figura 2.3. Reparación mediante taladrado y calentamiento en la punta de una grieta. ..	17
Figura 2.4. Programa desarrollado BEASY para crecimiento de grieta.	17
Figura 3.1. Fotografía de la probeta sin muesca empleada para el ensayo de tracción. ..	20
Figura 3.2. Extracción de probetas de la lámina de acero 1045.	22
Figura 3.3. . Probeta con muesca central CCT a emplear en la prueba de.	23
Figura 3.4. Geometría de la muesca con forma de ojo de cerradura: a) Fotografía de la muesca tomada en un proyector de perfiles, b) Dimensiones de la muesca para la probeta con $w = 50\text{mm}$	23
Figura 3.5. Fotografía de la probeta para crecimiento de grieta por fatiga axial.	23
Figura 3.6. Máquina de Ensayo de Fatiga Axial, actuador hidráulico MTS.	24
Figura 3.7. Controlador MTS 407, (<i>Terminales Automotrices S.A.</i>).	24
Figura 3.8. Dispositivos de agarre para las probetas. a) Vista explosionada de los componentes para el agarre, b) Ensamble de los componentes para el agarre de las probetas, c) Fotografía de los componentes (Material: AISI 4140).	25
Figura 3.9. a) Tejido de fibra de carbono para refuerzo estructural SikaWrap 300C.	25
Figura 3.10. Pines de acero 1020.	26
Figura 3.11. Métodos de reparación a implementar en las probetas.	27
Figura 4.1. Fotografía de la probeta sin muesca después del ensayo de tracción.	31
Figura 4.2. Diagrama S-N para el acero AISI 1045.	34
Figura 4.3. Onda de Esfuerzo Fluctuante para Cargas de Fatiga.	35
Figura 4.4. Diagrama de Goodman Modificado.	37
Figura 4.5. Diagrama de Goodman para determinar S'_{eqE}	39
Figura 5.1. Imágenes capturadas durante el crecimiento de la grieta de fatiga para la prueba piloto en el acero AISI 1045. a) A los 10000 ciclos de la prueba, no se observa crecimiento; b) A los 22000 ciclos de la prueba, grieta con 11,24mm de longitud; c) A los 31000 ciclos de la prueba, grieta con 18,46mm de longitud; d) A los 39000 ciclos de la prueba, grieta con 27,65mm de longitud; y e) Fractura de la probeta a los 40738 ciclos.	42
Figura 5.2. Crecimiento y fractura de la probeta de acero AISI 1045 reparada con pines, a) Crecimiento de la grieta hasta la longitud de reparación (22mm) con 31000 ciclos; b) Reparación de la probeta insertando los pines en el flanco de crecimiento; y c) Fractura de la probeta a los 43020 ciclos.	43
Figura 5.3. Crecimiento y fractura de la probeta de acero AISI 1045 reparada con parches de CFRP, a) Crecimiento de la grieta hasta la longitud de reparación (22mm), con 31000 ciclos; b) Aplicación del método de reparación cubriendo la sección de prueba de la probeta con el parche de CFRP; y c) Fractura de la probeta a los 44452 ciclos.	43
Figura 5.4. Grafica de Crecimiento de la Grieta de Fatiga Axial para la Prueba Piloto.	45

Figura 5.5. Crecimiento de Grietas obtenidos para las pruebas de Fatiga Axial desarrolladas.	47
Figura 5.6. Fotografía de la superficie de fractura de la probeta de acero 1045 sometida a fatiga axial de alto ciclaje empleada en la prueba piloto, aquí se puede apreciar la muesca tipo ojo de cerradura en la zona central de la probeta, la zona de crecimiento de grieta se aprecia con un color gris claro entre la muesca y los extremos de la probeta, y en los extremos de la probeta la zona con apariencia más oscura muestra la falla súbita del material.	48
Figura 5.7. Fotografía de la superficie de fractura de la probeta de acero 1045 sometida a fatiga axial de alto ciclaje y reparada con pines de acero. a) Agujeros taladrados para introducir los pines, b) Pines anclados a la probeta después de la falla.	48
Figura 5.8. Fotografía de la superficie de fractura de la probeta de acero 1045 sometida a fatiga axial de alto ciclaje y reparada con parches de CFRP.	49
Figura 5.9. Fotomicrografía SEM de la superficie de fractura de una de las probetas de acero 1045 ensayadas a fatiga axial de alto ciclaje, 220X. Se observan las inclusiones producto del laminado del material como líneas oscuras verticales, el desprendimiento de material y la fractura dúctil del material se reflejan como líneas blancas.	49
Figura 5.10. Fotomicrografía SEM de la superficie de fractura de una de las probetas de acero 1045 ensayadas a fatiga axial de alto ciclaje, 7000X. Se observa una inclusión tipo hoyuelo.	50
Figura 5.11. Fotomicrografías SEM de la superficie de fractura de una de las probetas de acero 1045 ensayadas a fatiga axial de alto ciclaje. a) Acabado superficial de la muesca, 40X; b) Morfología de los inicios del crecimiento de la grieta, 45X; c) Acumulación de material en un extremo de los inicios, 300X.	51
Figura 5.12. Fotomicrografía SEM de la superficie de fractura de una de las probetas de acero 1045 ensayadas a fatiga axial de alto ciclaje, 35X. Nótese la zona de transición entre la etapa final del crecimiento de la grieta de fatiga y la falla súbita.	51
Figura 5.13. Fotomicrografías SEM de la superficie de fractura de una de las probetas de acero 1045 ensayadas a fatiga axial de alto ciclaje y a la cual se le ha aplicado parches de CFRP como método de reparación, 35X y 350X respectivamente. Se observa la zona de transición entre la etapa de crecimiento previa a la aplicación del método de reparación y posterior a la misma.	52
Figura 5.14. Fotomicrografías SEM de la superficie de fractura de una de las probetas de acero 1045 ensayadas a fatiga axial de alto ciclaje, empleada como prueba piloto, 40738 ciclos totales de falla con un crecimiento aproximado de 3133 ciclos/mm. Se observan las estriaciones de fatiga: a) Inicios de crecimiento de la grieta de fatiga, 6 estrías en 2 micras, 7500X, b) En una zona intermedia entre los inicios y la falla súbita, 5 estrías en 2 micras, 5500X, y c) En cercanías a la falla súbita, 9 estrías en 5 micras, 3700X.	53
Figura 5.15. Fotomicrografías SEM de la superficie de fractura de una de las probetas de acero 1045 ensayadas a fatiga axial de alto ciclaje, reparadas con pines, 43020 ciclos totales de falla con un crecimiento aproximado de 3309 ciclos/mm. Se observan las estriaciones de fatiga: a) Inicios de crecimiento de la grieta de fatiga, 6 estrías en 2 micras, 6500X, b) Antes de reparar, 6 estrías en 5 micras, 3000X, y c) Después de la reparación, 11 estrías en 5 micras, 3300X.	54
Figura 5.16. Fotomicrografías SEM de la superficie de fractura de una de las probetas de acero 1045 ensayadas a fatiga axial de alto ciclaje, reparadas con parches de CFRP, 45358 ciclos totales de falla con un crecimiento aproximado de 3489 ciclos/mm. Se observan las estriaciones de fatiga: a) Inicios de crecimiento de la grieta de fatiga, 5	

estrías en 2 micras, 5500X, b) Después de la reparación, 7 estrías en 5 micras, 3500X d) Antes de la falla súbita, 9 estrías en 5 micras, 3000X.	55
Figura 5.17. Metalografía realizada en cercanías a la superficie de fractura en la prueba piloto: Se observa la microestructura del acero AISI 1045, ferrita (áreas claras: 40%) y perlita (áreas oscuras: 60%), 100X, atacada con nital al 3%: a) Acero en estado de suministro, y b) Acero después de ser fracturado por fatiga.	56
Figura 5.18. Barrido de microdureza para la probeta utilizada en la prueba piloto.	56
Figura 5.19. Barrido de microdureza para la probeta reparada con pines de acero.	57
Figura 5.20. Barrido de microdureza para la probeta reparada con parches de CFRP. ...	57
Figura 6.1. Diagrama de dispersión para el Número de Ciclos de Vida a Fatiga – Vs – el Espesor de la probeta.	60
Figura 6.2. Gráfica de Residuales contra valores ajustados para el número de ciclos.	62
Figura 6.3. Gráfica de Residuales contra el Espesor de la Probeta.	62
Figura 6.4. Gráfica de Residuales contra Métodos de Reparación.	63
Figura 6.5. Diagrama de dispersión para el Número de Ciclos de Vida a Fatiga – Vs – La longitud inicial de la muesca.	64
Figura 6.6. Para la prueba piloto: a) Gráfica que relaciona el número de ciclos de vida de la probeta con el crecimiento de la grieta de fatiga, b) Gráfica que relaciona el número de ciclos de vida de la probeta con el Factor de Intensidad de esfuerzo. Se muestra la línea de tendencia de los datos y la ecuación de regresión que mejor se ajusta a la distribución de los datos.	66
Figura 6.7. Grafica que ilustra la relación entre el número de ciclos de vida de la probeta de fatiga, el factor de intensidad de esfuerzo en la misma y el crecimiento de la grieta ($\Delta a_k/\Delta a_k^*$, N/N^* , a_o/a_m).....	68
Figura 6.8. Para la prueba piloto PP1: a) Superficie de respuesta, y b) Comparación entre los valores de respuesta observados y los predichos	70

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1. Análisis de covarianza de un experimento de un solo factor con una covariable. -----	13
Tabla 3.1. Composición Química del acero AISI 1045 -----	19
Tabla 3.2 Propiedades Mecánicas del acero AISI 1045-----	19
Tabla 3.3. Factores Implicados en la experimentación-----	28
Tabla 4.1. Resultados del ensayo de Tracción-----	31
Tabla 5.1. Parámetros de ensayo para las Pruebas de Fatiga Axial-----	41
Tabla 5.2. Registros de Crecimiento de la Grieta de Fatiga obtenidos para la Prueba Piloto -----	44
Tabla 5.3. Registros de Crecimiento de la Grieta de Fatiga para las Pruebas de Fatiga Axial. -----	46
Tabla 6.1. Datos para el Análisis de Covarianza para el Espesor de la Probeta-----	60
Tabla 6.2. Análisis de Covarianza de los datos del Número de ciclos de Vida a Fatiga para el espesor de la probeta -----	61
Tabla 6.3. Comparación entre medias para los Métodos de Reparación. -----	61
Tabla 6.4. Datos para el Análisis de Covarianza para la Longitud inicial de la Muesca. --	63
Tabla 6.5. Análisis de Covarianza de los datos del Número de ciclos de Vida a Fatiga para la longitud inicial de la muesca. -----	64
Tabla 6.6. Resultados obtenidos para la variación del rango de esfuerzos y el factor de intensidad de esfuerzo, de acuerdo con el ciclaje y el crecimiento de grieta tabulados. Los datos de esta tabla corresponden a los obtenidos para la prueba piloto 1. -----	66
Tabla 6.7. Coeficientes de regresión para el modelo de regresión que se ajusta con los datos de la prueba.-----	69
Tabla 6.8. Coeficientes de Determinación Múltiple (R ²) para el modelo de regresión. ----	69
Tabla 6.9. Comparación entre los valores de crecimiento de grieta observados y los predichos. -----	69

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

La falla por fatiga es uno de los modos de falla más frecuente en componentes metálicos sometidos, durante su servicio, a cargas repetitivas o fluctuantes. “La fatiga es progresiva, localizada y permanente en un material sujeto a tensión, presentándose la falla a niveles de esfuerzos nominales que tienen un valor máximo menor que la resistencia a la fluencia del material” [1]. Este fenómeno, generalmente comienza en una irregularidad o alguna otra imperfección del material la cual crece cuando es expuesta a la acción de cargas cíclicas variables, hasta que finalmente se presenta la falla del componente.

Durante el ciclo de vida de los componentes metálicos, se pueden detectar dichas imperfecciones o irregularidades aplicando técnicas de ensayos no destructivos (END); así, una vez se advierte la presencia de una grieta de fatiga, es normal centrar la atención en el caso y proceder con acciones correctivas, que en la mayoría de los casos comprenden el reemplazo del componente o la reducción de cargas en el sistema, estas actividades tienen un impacto significativo en la industria ya que se incurre en pérdida de tiempo, un deficiente funcionamiento de la máquina, disminución en la producción o un incremento en los costos de operación.

Una reparación a tiempo del componente que comienza a agrietarse como consecuencia del fenómeno de fatiga implica un ahorro de dinero, debido a que es más económico reparar los elementos mecánicos que reemplazarlos; ahorro de tiempo, al no tener que disminuir el ritmo de producción para el cual fue diseñado la máquina, y además se tiende a disminuir las probabilidades de ocurrencia de daños catastróficos.

El propósito de este trabajo de investigación es evaluar la eficacia de dos métodos de retardo del crecimiento de una grieta en probetas de acero AISI 1045 sometidas a ensayos de fatiga axial, con el propósito de ofrecer a la industria algunos conocimientos sobre dos alternativas para reparar sus estructuras recientemente agrietadas.

Los dos métodos de retardo del crecimiento de la grieta consisten en: 1) Taladrar un agujero en la punta de la grieta y posteriormente introducir un pin de acero como remache en dicho agujero, y 2) Aplicar parches de fibra de carbono (CFRP) cubriendo totalmente el

área agrietada. Las probetas reparadas se someten a ensayos de fatiga axial hasta que se presente la falla final; luego, se registra el número de ciclos totales que soporta el componente reparado y se comparan los valores registrados con datos de pruebas piloto previamente realizadas.

Para llevar a cabo este estudio, se realizan consultas bibliográficas como herramienta fundamental para conceptualizar la investigación. Por otra parte, se incluyen algunos conceptos generales sobre la mecánica de la fractura, crecimiento de grietas en componentes, y algunos tópicos estadísticos que son de gran interés para realizar el análisis de los resultados obtenidos.

Las pruebas de laboratorio desarrolladas durante la etapa experimental, incluyendo los ensayos de fatiga axial aplicando los métodos de reparación considerados, se comentan en la metodología de la investigación. El número de ciclos de vida hasta la falla obtenidos para cada uno de los componentes evaluados se registran en los resultados, que posteriormente son analizados desde el punto de vista: estadístico, para establecer un modelo de regresión que se ajuste con la tendencia de los datos; fractográfico, para estudiar el mecanismo de fractura y la topografía de la superficie de fractura; metalográfico, para determinar posibles cambios microestructurales en el material de las probetas; y mecánico, realizando ensayos de dureza para caracterizar mecánicamente el material después de realizar los ensayos de fatiga.

Finalmente, se plantean las conclusiones pertinentes con relación a los resultados obtenidos y analizados de la investigación, y se enuncian las respectivas recomendaciones sobre los trabajos futuros complementarios.

1.1 FORMULACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Algunos componentes metálicos como estructuras de máquinas, pines de sujeción, ejes de transmisión de potencia, entre otros, se encuentran sometidos a cargas de fatiga durante su servicio, y con el pasar del tiempo tienden a fracturarse debido a la presencia de agrietamientos generados en concentradores de esfuerzos.

El crecimiento deliberado de una grieta de fatiga se presenta debido a que la geometría de la punta de la fisura es un alto concentrador de esfuerzo, que conlleva al incremento en longitud de la irregularidad con el aumento en el número de ciclos de carga en tensión aplicados al componente.

Es por ello un aporte importante evaluar la posibilidad de aplicar algunos métodos de reparación en componentes que comienzan a agrietarse por el mecanismo de fatiga, con el objeto de retardar el avance de la grieta logrando así incrementar la vida en servicio del componente, hasta que se pueda realizar una reparación mayor o se disponga del componente de repuesto.

Mediante el desarrollo de esta investigación se propone evaluar la vida a fatiga de un componente sobre el cual se apliquen los dos métodos de reparación que se enuncian a continuación:

1. Elaborar un orificio en la punta de la fisura e introducir un pin de acero en dicho orificio que sirva como remache con el fin de deformar plásticamente la zona, y aprovechar el aumento de la resistencia local que se presenta para detener el rápido avance de la grieta.
2. Aplicar parches de CFRP (Carbon Fiber Reinforced Patch) sobre la sección agrietada, con el fin de conseguir un aumento en la sección transversal de la probeta y por ende una redistribución de los esfuerzos en la zona.

Por otro lado, se debe tener en cuenta que la mayoría de las investigaciones y pruebas realizadas hasta el momento con relación éste tema, se han enfocado en la aplicación de métodos de reparación en aleaciones de aluminio, por ello se plantea esta investigación teórico-experimental en el acero AISI 1045, debido a que este material de ingeniería es ampliamente utilizado en componentes mecánicos sometidos a la acción de cargas de fatiga en diversos tipos de aplicaciones estructurales, metalmecánica y minera, entre otras.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

Evaluar la efectividad de dos métodos de retardo del crecimiento de grietas de fatiga axial, en probetas de sección transversal rectangular de acero AISI 1045.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Recopilar y analizar la información necesaria sobre mecánica de la fractura, falla por fatiga, crecimiento de grietas, y análisis estadístico de datos, entre otros

tópicos relacionados con la investigación, para orientar y conceptualizar la investigación.

- Establecer una metodología de investigación para llevar a cabo las pruebas de laboratorio necesarias para el desarrollo de la investigación.
- Elaborar un diseño experimental para el desarrollo de las pruebas de fatiga axial.
- Obtener un modelo estadístico a partir de los resultados obtenidos en los ensayos de fatiga axial.
- Caracterizar fractográfica, metalográfica y mecánicamente las fracturas obtenidas después de la realización de los ensayos de fatiga.
- Realizar comparaciones entre los ensayos de fatiga realizados, desde el punto de vista de vida a fatiga, para establecer el método de reparación más eficaz.
- Emitir las conclusiones y recomendaciones pertinentes con relación a los resultados derivados de esta investigación.

1.3 METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN

El diseño metodológico de esta investigación de tipo teórico – experimental, inicia llevando a cabo una revisión bibliográfica con el fin de recopilar documentación sobre publicaciones relacionadas, normativas sobre las pruebas y conceptos teóricos de interés. Posteriormente, se procede con el diseño y desarrollo de la etapa experimental, que se encuentra enfocada en la realización de diferentes pruebas de laboratorio que se encuentran clasificadas en tres aspectos: en primer lugar, pruebas mecánicas y de microscopía antes y después de los ensayos de fatiga, para caracterizar el material y la superficie de fractura respectivamente; ensayos preliminares de fatiga axial para caracterizar la vida a fatiga del material; y finalmente, los ensayos de fatiga axial aplicando cada uno de los métodos de reparación sugeridos, para evaluar el crecimiento de la grieta.

Los resultados obtenidos de las pruebas se registran en los formatos de recolección de datos para luego ser analizados desde dos puntos de vista: el estadístico, con dos propósitos, el primero es determinar el método de reparación más eficaz en el retardo del crecimiento de la grieta de fatiga, y el segundo es establecer un modelo de regresión para el crecimiento de la misma; y del análisis de falla, para la caracterización macroscópica, microscópica, metalográfica y mecánica de la superficie de fractura. Finalmente, se emiten las conclusiones y recomendaciones pertinentes sobre la investigación y se procede con la divulgación de los resultados obtenidos.

1.4 LIMITACIONES

El diseño de las pruebas de fatiga axial se realiza con base en los resultados obtenidos del ensayo de tensión y los criterios de las teorías de diseño y la mecánica de fractura, y los ensayos de fatiga axial se realizan en la máquina de ensayos de fatiga de la empresa Terminales Automotrices (Mosquera – Cundinamarca); sin embargo, es importante tener en cuenta que el costo de cada prueba de fatiga es relativamente alto y que existen factores económicos influyentes para el desarrollo de esta investigación, por otra parte existen factores técnicos a nivel del equipo que son determinantes en la capacidad de carga y la frecuencia para los ensayos.

1.5 MARCO TEORICO DE REFERENCIA

En la industria, existen una gran cantidad de componentes estructurales sometidos a cargas que bien pueden ser estáticas o dinámicas, siendo estas últimas las que se presentan con mayor frecuencia en los elementos mecánicos que se encuentran en servicio. Las cargas dinámicas presentes son principalmente variables en el tiempo, y en el mismo, tienden a producir la falla prematura del material. Este tipo de fallas se conocen con el nombre de *Fallas por Fatiga* y tienen su origen en irregularidades geométricas del componente y/o metalúrgicas del material, inducidas en algún momento del ciclo de vida de la pieza.

A continuación, se comentan los conceptos de mayor interés con relación a la falla por fatiga, el crecimiento de grietas, desde el punto de vista de la mecánica de la fractura, y el análisis de covarianza, como tópico estadístico empleado para realizar el análisis de los resultados obtenidos de los ensayos de fatiga en esta investigación.

1.5.1 Mecánica de la Fractura

La mecánica de fractura tiene como propósito estudiar la resistencia mecánica de componentes estructurales con grietas; así como también la tasa de crecimiento de ellas, con el fin de evaluar teóricamente la vida residual de un componente estructural una vez se detecte una grieta en el mismo.

Las teorías de falla estática, consideran que el material es perfectamente homogéneo e isotrópico y por tanto libre de cualquier defecto como grietas, poros o inclusiones. Pero en realidad, este es un fenómeno ideal, porque de hecho todos los materiales tienen microgrietas (demasiado pequeñas para verse a simple vista), que sirven como elevadores de esfuerzos y favorecen la fractura del material.

Se puede definir la *fractura* como la culminación del proceso de deformación plástica. En general, se manifiesta como la separación o fragmentación de un cuerpo sólido en dos o más partes bajo la acción de un determinado estado de cargas.

En los materiales de ingeniería, se pueden presentar dos tipos de fractura: la *fractura frágil*, que es una fractura sin deformación plástica apreciable en el material, con poca absorción de energía antes de la rotura, y una propagación rápida de la grieta; y la *fractura dúctil*, en la cual se presenta una deformación plástica importante antes de la rotura y con una alta absorción de energía. En ingeniería es preferible la fractura dúctil, ya que presenta “*síntomas previos*” al deformarse plásticamente el material antes de producirse la rotura.

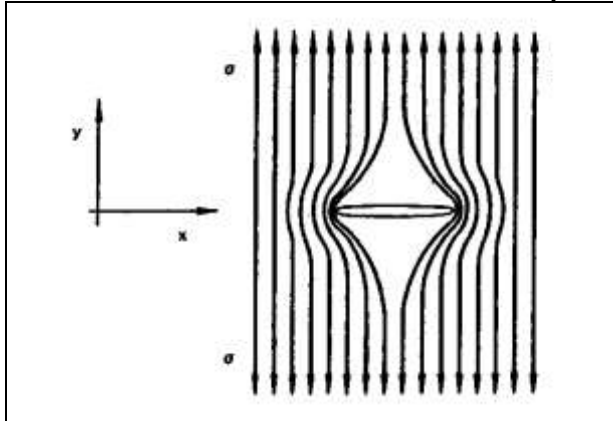
1.5.2 Concentración de Esfuerzos [2]

Las fallas que se presentan en máquinas y estructuras, se inician en sitios de concentraciones locales de esfuerzos, causadas por discontinuidades geométricas o

microestructurales. La concentración de esfuerzos, es un efecto altamente localizado que en algunos casos puede deberse sólo a la rayadura de una superficie.

La concentración de esfuerzos asociada a una discontinuidad geométrica puede conceptualizarse intuitivamente en términos de un *flujo de fuerzas* a través de un elemento mecánico o estructural, cuando es sometido a cargas externas (Figura 1.1).

Figura 1.1. Líneas de fuerza en el borde de un orificio elíptico en una placa.



Obtenido de: DE VEDIA, Luis A. Mecánica de Fractura. Argentina: Monografía tecnológica No. 1, 1986. p. 25

1.5.3 Condiciones de Fractura [3]

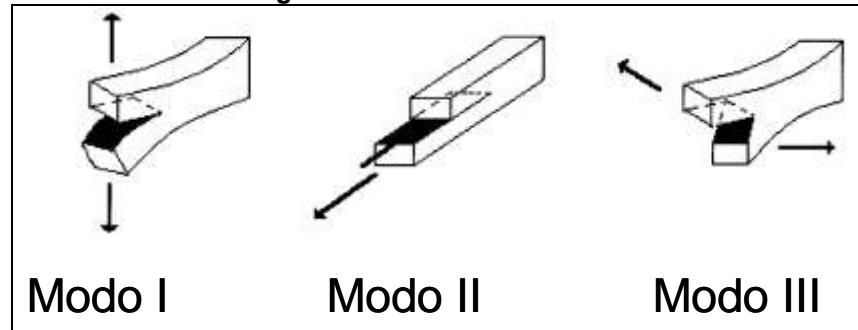
Para iniciar cualquier estudio relacionado con la fractura de una pieza estructural, es necesario identificar los posibles modos en que ésta puede romper. Para el análisis de esfuerzos en la punta de la grieta pueden definirse tres tipos básicos de campos de esfuerzo, cada uno asociado a un modo distinto de deformación por fractura, como se ilustra en la figura 1.2. Las tres formas posibles de separar o partir en dos una placa son:

- Modo de apertura* ("Modo I"), en el cual las caras de la fisura se separan casi paralelamente entre sí. En este modo solo se desarrollan tensiones de tracción.
- Modo de deslizamiento* ("Modo II") , en el cual las caras de la fisura se deslizan una sobre otra; bajo este modo solo se pueden generar tensiones tangenciales.
- Modo de desgarre o corte paralelo* ("Modo III"), donde las superficies resultantes de una fisura se deslizan lateralmente una con respecto a la otra, lo que corresponde un efecto de corte fuera del plano.

" En la práctica, el Modo I ha sido el más estudiado, debido a que se presenta con mayor frecuencia a nivel industrial; además, se han encontrado resultados satisfactorios en cuanto al análisis de esfuerzos y mediciones del factor crítico de intensidad de esfuerzo en comparación con los datos obtenidos experimentalmente" ¹.

¹ OLLER, Sergio. Fractura Mecánica: Un enfoque global. Barcelona, España: CIMNE.. Enero 2000. p. 5.

Figura 1.2. Modos de fractura.



Obtenido de: GARCÍA, Jaime Marco. Fundamentos para el cálculo y diseño de estructuras metálicas de acero laminado. Madrid - España: Editorial Mc. Graw Hill. Volumen 1, 1998. p. 226.

1.5.4 Factor de Intensidad de Esfuerzos y Tenacidad de Fractura [4, 5, 6]

Bajo condiciones normales de carga, en la vecindad del extremo de una grieta se genera un campo de esfuerzos complejo, cuya intensidad elástica es cuantificada por el *factor de intensidad de esfuerzo* (K_I), de manera que cuando éste alcanza o supera el valor de la *tenacidad a la fractura* (K_{IC}) del material, se presenta una falla por crecimiento de grieta. El subíndice I, indica la condición de fractura.

La tenacidad de fractura, se considera como una propiedad del material que cuantifica la resistencia a la propagación inestable de grietas, el valor de esta propiedad se encuentra referenciado en textos o puede ser determinada mediante ensayos de laboratorio, y depende de variables metalúrgicas, geométricas, temperatura y rapidez de aplicación de carga.

Cuando en un componente estructural actúa una carga cíclica de amplitud constante perpendicular al plano de una grieta, el esfuerzo nominal S aplicado varía en un ciclo de carga entre un esfuerzo máximo y un esfuerzo mínimo, entonces el K_I también varía entre un valor máximo y un mínimo como se expresa en las Ec. 1.1, 1.2 y 1.3.

$$K_{I \max} = \phi S_{\max} \sqrt{\pi a} \quad \text{Ec. 1.1}$$

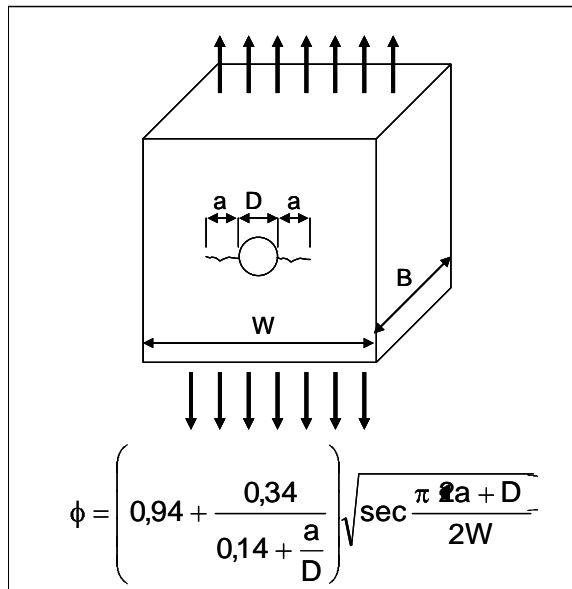
$$K_{I \min} = \phi S_{\min} \sqrt{\pi a} \quad \text{Ec. 1.2}$$

$$\Delta K = \phi \Delta S \sqrt{\pi a} \quad \text{Ec. 1.3}$$

Donde ϕ es el factor de configuración de carga, ΔS representa la diferencia entre los esfuerzos máximo y mínimo y a es la longitud de la grieta.

El factor de configuración de carga es un factor adimensional que depende del tipo de carga y de la relación del tamaño de la grieta a las dimensiones del componente [4] y se determina mediante la expresión referenciada en la figura 1.3.

Figura 1.3. Factor de configuración de carga para grietas que emanan de un agujero.



Obtenido de: HERNANDEZ, Héctor y ESPEJO, Edgar. Mecánica de Fractura y Análisis de Falla. Bogotá - Colombia: Colección sede Universidad Nacional. p. 37

1.5.5 Fenómeno de Fatiga [2, 5, 6, 7, 8]

La fatiga del metal es un proceso que causa la falla prematura o el daño de un componente sometido a repetidas alternancias tensionales. La fatiga se considera como un fenómeno progresivo, localizado y permanente, donde la falla es precedida por la iniciación y propagación de microgrietas hasta que estas alcanzan un tamaño destructivo para el elemento mecánico, rompiendo entonces en forma instantánea por deformación plástica o por fragilidad.

La iniciación de la grieta es de carácter más frágil que dúctil por lo que casi siempre aparece, como se ha visto, en los puntos de concentración de esfuerzos como poros y rechupes, dentro del material; en soldaduras, muescas o raspaduras, localizada en la superficie del material. En una pieza sometida a cargas cíclicas pueden distinguirse distintas etapas durante el proceso de fatiga (figura 1.4).

Región I: Corresponde a una etapa en donde se producen los primeros cambios microestructurales, debido a que se presenta fluencia plástica, lo que produce la distorsión y crea posteriormente bandas de deslizamiento a lo largo de los bordes del material, favoreciendo el aumento de densidad de dislocaciones y por consiguiente la formación de microgrietas, que son en últimas las que producen las zonas con daños irreversibles, (figura 1.5).

Figura 1.4. Representación esquemática de las etapas de crecimiento de grietas.

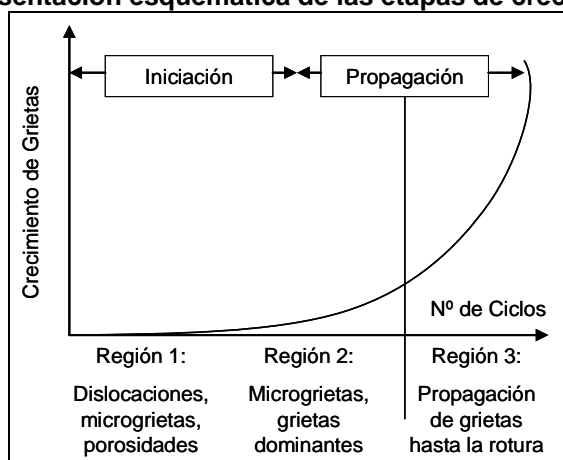
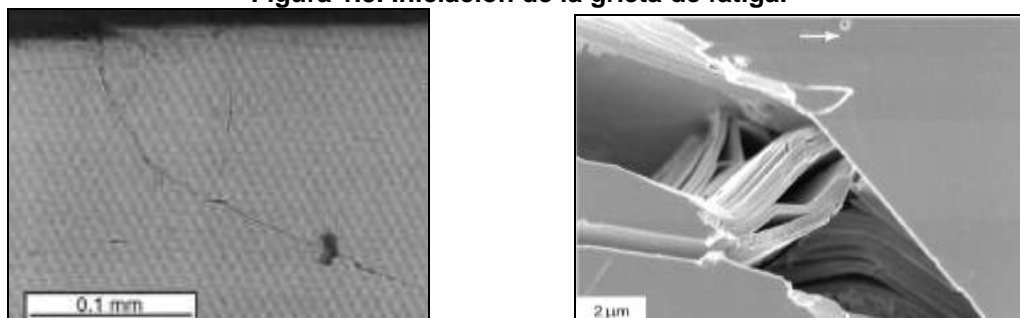


Figura 1.5. Iniciación de la grieta de fatiga.



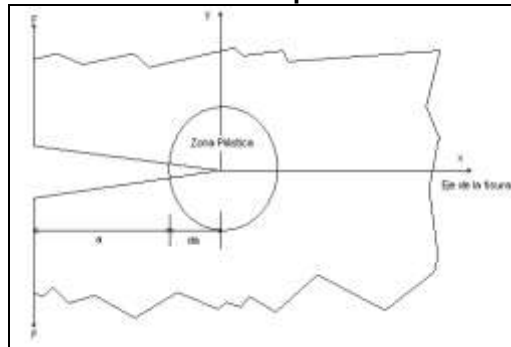
Obtenido de: DE ORTIZ J.E., A.P.Cisilino y OTEGUI J.L. Modelado Numérico de los Micromecanismos de Propagación de Fisuras en ADI. Jornadas SAM 2000 – IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga, Agosto de 2000, pg 527-534.

Región II: La microgrieta ya establecida crea concentraciones de esfuerzos superiores, lo que provoca una zona plástica en el extremo de la microgrieta cada vez que el esfuerzo a tensión la abre (figura 1.6), creciendo así poco a poco y generando entonces las macrogrietas o grietas por efecto de los esfuerzos alternos a los que está siendo sometido el material.

Región III: La grieta inestable, crece hasta que su tamaño se hace lo bastante grande para elevar el factor de intensidad de esfuerzo al nivel de la tenacidad a la fractura del material y en el siguiente ciclo se produce la falla súbita.

La duración de cada etapa descrita, puede variar considerablemente en función del tipo de material, carga, geometría, temperatura, irregularidades, etc. Es importante resaltar lo difícil que es distinguir con claridad las etapas antes mencionadas.

Figura 1.6. Incremento en la longitud de la grieta debido a la plasticidad que se genera en el extremo o punta.

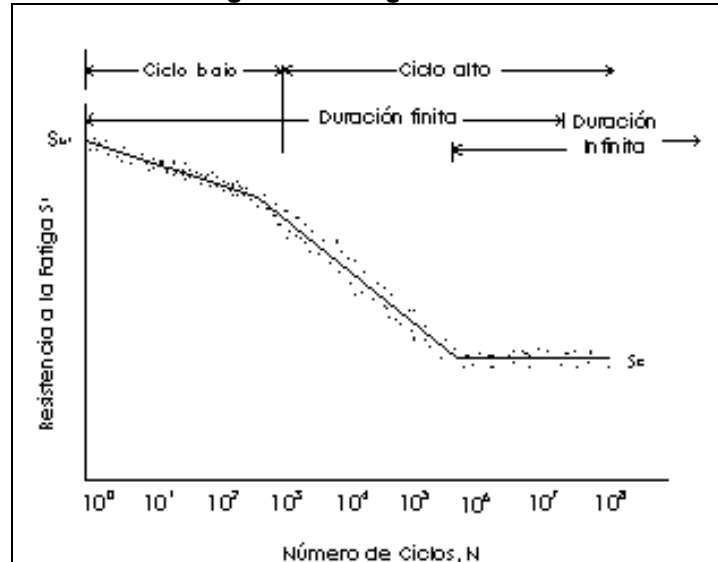


Obtenido de: OLLER, Sergio. Fractura Mecánica: Un enfoque global. Barcelona, España: CIMNE. Enero 2000. p. 29.

Regímenes de Fatiga [5, 6, 8]

Los ensayos de fatiga en materiales, se llevan a cabo con base en la aplicación de esfuerzos variables, de tal manera que la pieza soporte un determinado número de ciclos durante su vida útil. Se clasifica como Regimen de Fatiga de Bajo Ciclaje (LCF), el que se presenta de 1 a 10^3 ciclos y Regimen de Fatiga de Alto Ciclaje el que se presenta de 10^3 ciclos en adelante, como se observa en la figura 1.7, donde también se distingue entre una región de vida finita y una de vida infinita. El límite entre tales regiones no puede definirse con claridad, pero se localiza entre 10^6 y 10^7 ciclos en los aceros.

Figura 1.7. Diagrama S –N.



1.5.6 Análisis de Covarianza [9]

Dentro de las técnicas para el análisis estadístico de los datos obtenidos mediante experimentación, el análisis de Covarianza, es en ocasiones, es útil para mejorar la precisión de un experimento, principalmente en aquellos casos en que existe una variable perturbadora que no puede ser controlada por el experimentador (variable concomitante o

covariable) y que se relaciona linealmente con la variable de respuesta, viéndose esta última influenciada por la primera.

El análisis de covarianza es entonces un método de ajuste para los efectos de la covariable. Si no se hace este ajuste la covariable podría inflar el cuadrado medio del error y hacer que sean más difíciles de detectar las verdaderas diferencias de las respuestas debidas a los tratamientos. El procedimiento para la covarianza es una combinación del análisis de varianza y el análisis de regresión.

Procedimiento

El estudio inicia con la graficación de la variable de respuesta – versus – la covariable, con el fin de identificar una relación lineal entre las mismas, de acuerdo con ello el análisis de covarianza podría usarse para eliminar el efecto de la covariable sobre la variable de respuesta.

En un experimento de un solo factor con covariable, suponiendo que existe una relación lineal entre la respuesta y la covariable, un modelo estadístico apropiado se describe mediante la Ec.1.4.

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta (x_{ij} - \bar{x}_{..}) + \varepsilon_{ij} \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad \text{Ec.1.4}$$

Donde y_{ij} la observación j -ésima de la variable de respuesta, x_{ij} es la medición hecha de la covariable, $\bar{x}_{..}$ es la media de los valores de x_{ij} , μ es la media global, τ_i es el efecto del tratamiento i -ésimo, β es el coeficiente de regresión lineal que indica la dependencia de y_{ij} , x_{ij} , ε_{ij} . La covariable se expresa como $x_{ij} - \bar{x}_{..}$.

Los supuestos del análisis de covarianza son:

1. Los errores ε_{ij} son NID -Normalmente independientes- y $N(0, \sigma^2)$
2. La pendiente $\beta \neq 0$ y que la verdadera relación entre y_{ij} y x_{ij} es lineal
3. Los coeficientes de regresión de cada tratamiento son idénticos.
4. La suma de los efectos de los tratamientos es cero $\left(\sum_{i=1}^a \tau_i = 0 \right)$
5. La variable concomitante x_{ij} no se afecta por los tratamientos.

Notación para el análisis de covarianza

Para describir el análisis de covarianza se introduce la siguiente notación que se muestra de las Ec. 1.5.

S, T y E se usan para denotar las sumas de cuadrados y los productos cruzados del total, los tratamientos y el error respectivamente. Las sumas de cuadrados deben ser no negativas; sin embargo las sumas de los productos cruzados pueden ser negativas.

Ajuste de la variable de respuesta para el efecto de la covariable

Las expresiones para determinar la suma de cuadrados del error y la varianza del error experimental se relacionan mediante las Ec. 1.6 y 1.7.

$$\begin{aligned}
 S_{yy} &= \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 - \frac{y_{..}^2}{an} \\
 S_{xx} &= \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n x_{ij}^2 - \frac{x_{..}^2}{an} \\
 S_{xy} &= \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n x_{ij} y_{ij} - \frac{x_{..} y_{..}}{an} \\
 T_{yy} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a y_i^2 - \frac{y_{..}^2}{an} \\
 T_{xx} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a x_i^2 - \frac{x_{..}^2}{an} \\
 T_{xy} &= \sum_{i=1}^a x_i y_i - \frac{x_{..} y_{..}}{an} \\
 E_{yy} &= S_{yy} - T_{yy} \\
 E_{xx} &= S_{xx} - T_{xx} \\
 E_{xy} &= S_{xy} - T_{xy}
 \end{aligned}
 \tag{Ec.1.5}$$

$$SS_E = E_{yy} - \frac{E_{xy}^2}{E_{xx}} \quad ; \quad \text{con } a(n-1)-1 \text{ grados de libertad.} \tag{Ec.1.6}$$

$$MS_E = \frac{SS_E}{a(n-1)-1} \tag{Ec.1.7}$$

Ahora, se plantea el modelo de la Ec.1.8 suponiendo que no hay efecto de los tratamientos.

$$y_{ij} = \mu + \beta x_{ij} - \bar{x}_{..} + \varepsilon_{ij} \tag{Ec.1.8}$$

Luego la suma de cuadrados del error del modelo reducido está dada por la Ec.1.9.

$$SS'_E = S_{yy} - \frac{S_{xy}^2}{S_{xx}} \quad ; \quad \text{con } an-2 \text{ grados de libertad.} \tag{Ec.1.9}$$

Y la suma de cuadrados de los tratamientos ajustados es $SS'_E - SS_E$ con $a-1$ grados de libertad, para probar la hipótesis que no hay ningún efecto de los tratamientos; por consiguiente, para probar la hipótesis nula ($H_0 : \tau_i = 0$), se calcula el estadístico F_0 (Ec.1.10).

$$F_0 = \frac{SS'_E - SS_E}{SS_E} \cdot \frac{a-1}{a(n-1)-1} \tag{Ec.1.10}$$

Si la hipótesis nula es verdadera, se distribuye como $F_0 > F_{\alpha, a-1, a(n-1)-1}$. Dónde $F_{\alpha, a-1, a(n-1)-1}$, es el estadístico correspondiente a la distribución F con a-1, a(n-1)-1 grados de libertad.

La **tabla 1.1** resume de manera conveniente el análisis de covarianza para probar las hipótesis acerca de los efectos de los tratamientos.

Tabla 1.1. Análisis de covarianza de un experimento de un solo factor con una covariable.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados y productos			Ajustados para la regresión		
		x	xy	y	y	Grados de libertad	Cuadrado medio
Tratamientos	a-1	Txx	Txy	Tyy			
Error	a(n-1)	Exx	Exy	Eyy	SS _E	a(n-1)-1	MS _E
Total	an-1	Sxx	Sxy	Syy	SS' _E	an-2	
Tratamientos ajustados					SS' _E - SS _E	a-1	$\frac{SS'_E - SS_E}{a-1}$

Las medias ajustadas se calculan como $\bar{y}_{i, \text{ajustada}} = \bar{y}_i - \hat{\beta}(\bar{x}_i - \bar{x}_{..})$ donde $\hat{\beta} = \frac{E_{xy}}{E_{xx}}$.

Finalmente cabe recordar que se ha supuesto que el coeficiente de regresión β del modelo es diferente de cero. La hipótesis $H_0: \beta = 0$ puede probarse utilizando el estadístico de prueba (**Ec. 1.11**).

$$F_0 = \frac{\frac{E_{xy}^2}{E_{xx}}}{MS_E} \quad \text{Ec.1.11}$$

Por lo tanto $H_0: \beta = 0$ se rechaza si $F_0 > F_{\alpha, a-1, a(n-1)-1}$.

Capítulo 2

ESTADO DEL ARTE

En el análisis bibliográfico requerido para definir el estado del arte de la investigación, se pueden diferenciar varios aspectos claves según el tipo de información disponible actualmente, tales como aquellos documentos relacionados con generalidades acerca del fenómeno de fatiga en materiales, documentos con información especializada sobre tópicos de fatiga, investigaciones relacionadas con el crecimiento de grieta en materiales y posibles métodos de control del crecimiento, y adelantos tecnológicos en el estudio del fenómeno de fatiga, entre otros.

2.1 GENERALIDADES SOBRE FATIGA EN MATERIALES

Algunos autores han desarrollado documentos enfocados al estudio de los fundamentos de los materiales de ingeniería en los cuales comentan sobre sus propiedades mecánicas y con base en ello realizan una breve introducción al fenómeno de fatiga [10, 11, 12, 13 14].

Otros autores como lo es el caso de NORTON [15], SHIGLEY [16], y JUVINALL [17], en sus documentos sobre diseño en ingeniería, consignan información sobre tópicos generales de fatiga donde relacionan una visión global sobre el fenómeno de falla por fatiga en materiales y la mecánica de la fractura, con el fin de entender el fenómeno físico que se presenta en los materiales (cuando se encuentran sometidos a algún tipo de esfuerzo), ante la presencia de una grieta. Todos estos documentos forman parte de la literatura convencional en ingeniería para adquirir los conceptos básicos sobre el estudio de la fatiga en materiales.

2.2 FATIGA EN MATERIALES Y TOPICOS RELACIONADOS

Algunos autores se enfocan de manera puntual en el fenómeno de fatiga y los temas relacionados con el mismo, consignando en bibliografía especializada aspectos específicos sobre fatiga en metales [18, 19], donde se estudia desde la resistencia a la

fatiga y el crecimiento de grietas, hasta métodos estadísticos para analizar resultados obtenidos de pruebas de fatiga; mecánica de la fractura y análisis de falla [20], y los modos y formas de fractura de los metales [21].

Información relacionada con el desarrollo y aplicación de ensayos mecánicos, incluyendo los ensayos de fatiga, se encuentran las normas ASTM [22], y el Handbook de Fatiga [23].

Otras publicaciones se enfocan hacia el estudio del comportamiento mecánico de los materiales [24]; el análisis, predicción y prevención del fallo de los materiales desde la ingeniería de diseño [25]; el factor de concentración de esfuerzos [26]; y el análisis metalúrgico de falla de los materiales fracturados [27].

2.3 TECNOLOGIAS PARA LA REPARACIÓN DE COMPONENTES AGRIETADOS

Los estudios del fenómeno de la fatiga se han enfocado en la búsqueda de alternativas de solución para evitar la pérdida de los componentes que se encuentran bajo la acción de cargas fluctuantes, las cuales favorecen el agrietamiento del material y su posterior falla súbita. Para ello, se apoyan en las formulaciones y herramientas que ofrece la mecánica de la fractura, así como también en el análisis mediante pruebas de laboratorio con el propósito de comprender el origen de este fenómeno y hallar las posibles causas que dan origen a este tipo de fallo catastrófico en el material.

Documentación sobre investigaciones recientes del estudio de los mecanismos de falla por fatiga, adelantos científicos y tecnológicos para facilitar el estudio y valoración de datos obtenidos mediante pruebas de laboratorio, se publican en revistas de investigación de reconocida trayectoria como “*Engineering Failure Analysis*”, “*Engineering Fracture Mechanics*” “*Acta Materialia*” y “*Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*”, publicaciones estas que se pueden obtener tanto en medio físico como en internet. Si bien los artículos encontrados no muestran totalmente el tema de la presente investigación, sirven como base para la misma, ya que los modelos teóricos – experimentales que se exponen son una herramienta muy valiosa que se puede utilizar como guía para la realización de este proceso de investigación.

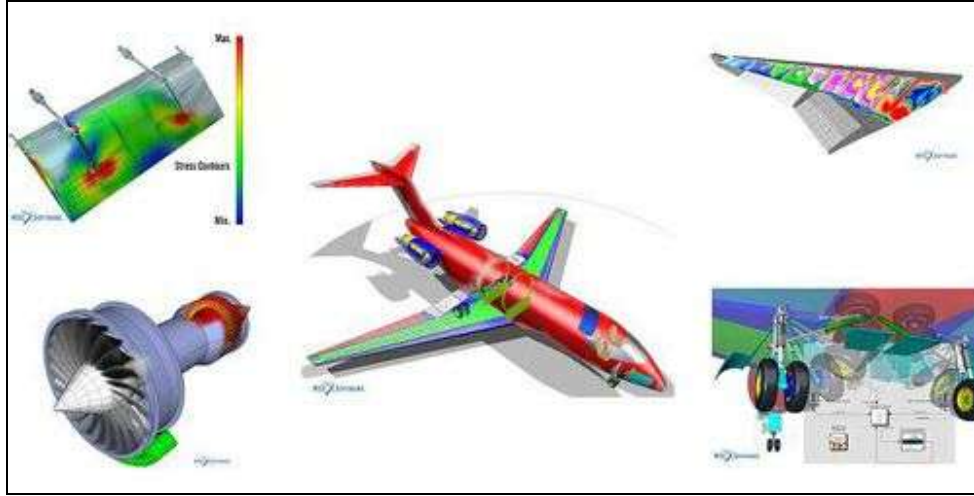
En algunos países la mayor parte de las investigaciones sobre métodos de control de crecimiento de grietas producidas por fatiga se han desarrollado para aleaciones de aluminio. Técnicas como reparación mediante soldadura, aplicación de parches de FRP, perforación en la punta de la grieta, entre otras, se aplican en placas representativas de la aleación de aluminio con miras en la evaluación de que técnica provee un incremento en la vida a fatiga del componente [28].

Algunas investigaciones en las que se han evaluado métodos para la reparación de un componente fatigado, caracterizan el crecimiento de la grieta en función del factor de concentración de esfuerzos [29], mientras que en otras se desarrollan modelos analíticos y simulaciones numéricas para la probeta de aluminio agrietada y reparada [30]. Los resultados de estas investigaciones han sido aplicados principalmente en la reparación de componentes metálicos de la industria aeronáutica (Figura 2.1), en donde son evaluados los métodos de retardo o control del crecimiento de la grieta [29, 30, 31].

El propósito de algunos investigadores se ha centrado en: a) estudiar el comportamiento

del refuerzo con CFP en placas de aluminio recién agrietadas y que se encuentran sometidas a vibraciones [29, 30, 32, 33], b) evaluar el efecto de los esfuerzos residuales en el crecimiento de la grieta [34], c) desarrollo de un modelo sobre el fenómeno de fatiga incluyendo la iniciación y el crecimiento del agrietamiento durante la etapa de propagación en placas reparadas con parches [35], d) estudios para analizar las reparaciones realizadas en placas usando parches de composite perfectos e imperfectos [36], e) y evaluación de otra técnica de reparación que emplea el criterio del retardo artificial del crecimiento de la grieta mediante la inserción de materiales foráneos [37]. Ver figura 2.2

Figura 2.1. Frecuentes sitios de iniciación de crecimiento de grietas en aviones.



Obtenido de: <http://www.mscsoftware.com.au/products/software/msc/index.htm>

Figura 2.2. Reparación con parches en la superficie interior de una estructura sometida a vibración.

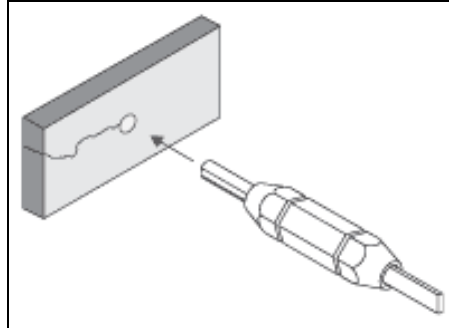


Obtenido de: WITHROW, M. (2002) C130 Durable Repair Patch (Reference document VA-04-02)

Algunas empresas como FTI (Fatigue Technology Inc) [38], ofrecen técnicas para mejorar la vida a fatiga de componentes, una de ellas es la que actualmente promocionan y consiste en taladrar un agujero en la punta de la grieta y aplicar un posterior calentamiento en la zona para disminuir los efectos residuales (Figura 2.3). Esta técnica

está recomendada para reparaciones fáciles y rápidas en estructuras de componentes aeroespaciales.

Figura 2.3. Reparación mediante taladrado y calentamiento en la punta de una grieta.

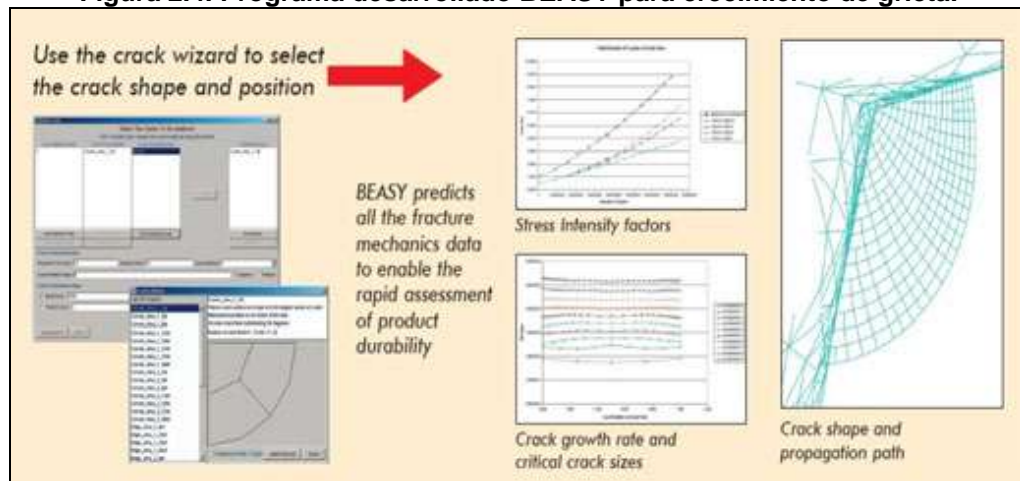


Obtenido de: http://www.fatiguetech.com/coldEX_stop_crack.html

2.4 SOFTWARE PARA FATIGA Y CRECIMIENTO DE GRIETA

Para facilitar el estudio del fenómeno de fatiga, el cálculo de la vida en servicio de componentes sometidos y el crecimiento de grieta se han desarrollado algunos programas de computadora que permiten llevar a cabo simulaciones numéricas para estimar el crecimiento de la grieta de fatiga utilizando BEM (Boundary Elements Method) o FEM (Finite Elements Method). Algunos de estos software son: BEASY Fatigue [39], el software desarrollado por la Universidad de Dublín para crecimiento de grietas [40], MSC Fatigue [41]: FATIMAS Fatigue Family, Zencrack Fracture Analysis, entre otros (Figura 2.4).

Figura 2.4. Programa desarrollado BEASY para crecimiento de grieta.



Obtenido de: <http://www.beasy.com/>

Capítulo 3

PLANIFICACIÓN METODOLÓGICA DE LA INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL

Para llevar a cabo la etapa experimental de la investigación es útil la elaboración de un diseño metodológico que sirva de guía para el desarrollo de las pruebas de laboratorio necesarias; por ello en este capítulo se exponen tanto los ensayos requeridos, adicionales a las pruebas de fatiga axial, como la planificación de los mismos, incluyendo un listado de los recursos físicos que se requieren para cada caso y el tratamiento que debe darse a los resultados obtenidos de cada una de las pruebas

3.1 SECUENCIA METODOLÓGICA

El propósito de la etapa experimental de la investigación es la realización de las pruebas de fatiga axial para evaluar el crecimiento de la grieta de fatiga en el acero AISI 1045 cuando se implementan métodos de reparación. Sin embargo, es necesaria la realización de algunos ensayos de laboratorio que permitan caracterizar el material para posteriormente establecer los parámetros bajo los cuales se realizarán las pruebas, para lo cual se requiere el seguimiento de la siguiente metodología:

1. Documentarse sobre las características generales del acero AISI 1045 que suministran los proveedores.
2. Adquisición del acero AISI 1045 para los ensayos.
3. Planear ensayos de laboratorio, de acuerdo con las normas ASTM, con el fin de corroborar las propiedades mecánicas y químicas suministradas por los proveedores en sus catálogos de producto. Se deben realizar pruebas de metalografía y ensayos mecánicos de tracción y dureza.
4. Planear la ejecución de los ensayos de fatiga axial: elaboración de probetas de acuerdo con las normas ASTM, diseño de la prueba preliminar y con los métodos de reparación, y tabulación de los resultados obtenidos.
5. Realizar nuevamente pruebas de metalografía y dureza, para observar variaciones en la microestructura del material.

3.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ACERO AISI 1045

Los datos de composición química y propiedades mecánicas para el acero 1045 que suministran los catálogos solo sirven como una guía para tener un conocimiento previo de las características del material que se va a utilizar; las [tabla 3.1](#) y [3.2](#) muestran dichos datos para el acero AISI 1045 en el estado de suministro (Laminado en Caliente). Sin embargo, se plantea la realización de ensayos de tracción y dureza para obtener datos propios de las propiedades mecánicas del acero que se va a utilizar.

Tabla 3.1. Composición Química del acero AISI 1045

Carbono	Manganeso	Fósforo	Azufre	Silicio
0,43 – 0,5%	0,6 – 0,9%	0,04% máx.	0,05% máx.	0,2 – 0,4%

Obtenido de: Catalogo Virtual de la Compañía General de Aceros.

Tabla 3.2 Propiedades Mecánicas del acero AISI 1045

Resistencia a la tracción, Kg/mm ²	Límite Elástico, Kg/mm ²	Alargamiento, %	Reducción de área, %	Dureza Brinell aproximada.
60	38	16	40	220/240

Obtenido de: Catalogo Virtual de la Compañía General de Aceros.

3.3 ENSAYO DE TRACCIÓN

El ensayo de tracción se realiza con el propósito de determinar las propiedades mecánicas del acero AISI 1045 suministrado por el proveedor y los resultados obtenidos de este ensayo permiten elaborar el diseño de las pruebas de fatiga axial.

3.3.1 Materiales, equipos e insumos

Para llevar a cabo los ensayos de tracción se utilizan seis probetas de acero AISI 1045: tres sin muesca central y tres con muesca, con dimensiones de 50mm de ancho, 200mm de largo y 3mm de espesor (similares a las probetas para los ensayos de fatiga axial – ver [item 3.5.1](#)). Los ensayos se realizan en la Máquina Universal de Ensayos y se mide la longitud de prueba utilizando calibrador pie de rey.

3.3.2 Procedimiento

Previo a la realización de la prueba, se verifican las dimensiones generales de las probetas, luego se marca la longitud calibrada (50mm en el centro de la probeta de acuerdo con las normas ASTM E8), como se ilustra en la [figura 3.1](#), para posteriormente proceder con el montaje de dicha probeta en la maquina universal y dar inicio al ensayo.

Durante el ensayo de tracción se registran los datos de carga aplicada y elongación en la medida que la probeta se deforma, estos datos luego serán analizados para determinar algunas de las propiedades más relevantes de esta prueba.

Figura 3.1. Fotografía de la probeta sin muesca empleada para el ensayo de tracción.



3.3.3 Tratamiento de la Información

Los datos de carga y elongación registrados durante el ensayo se utilizan para determinar los valores de resistencia a la fluencia y resistencia última a la tracción del acero AISI 1045, a partir de estas propiedades se establecen los parámetros recomendados bajo los cuales se deben llevar a cabo las pruebas de fatiga axial, aplicando las correspondientes teorías de falla por fatiga, los criterios de falla y elaborando el respectivo diagrama S-N.

3.4 ANALISIS METALOGRAFICO

El análisis metalográfico del acero AISI 1045 se realiza con el propósito de mediante observación las fases microestructurales existentes en el material. Por otra parte, es recomendable realizar la metalografía antes y después de los ensayos de fatiga axial, para observar si existen variaciones en la microestructura del material por el efecto de las cargas dinámicas de este ensayo.

3.4.1 Materiales, equipos e insumos

La metalografía se realiza sobre una pequeña muestra del acero AISI 1045. Para la extracción de la muestra y su preparación se requiere: cortadora de disco, prensa hidráulica, pulidora semiautomática y el microscopio óptico, como equipos para la preparación de la muestra y, papel esmeril de diferentes tamaño de grano (100, 240, 320, 400, 600), alúmina de 0.3 micras y nital al 3% como insumos para el pulimento y ataque de la misma.

3.4.2 Procedimiento

Se corta una pequeña muestra del acero utilizando la cortadora de disco; una vez obtenida la muestra del material se procede con el montaje en bakelita para facilitar su manipulación durante las tareas subsiguientes, luego comienza la labor de esmerilado pasando desde la lija de grano mas grueso hasta la de grano mas fino para mejorar el acabado superficial de la muestra; posteriormente, se realiza el pulimento fino en la pulidora aplicando alúmina de 0.3 micras para lograr una apariencia superficial especular, y finalmente se ataca la superficie de la muestra con Nital al 3% (reactivo) lo cual facilita la visualización de la microestructura del material y revela las fases presentes en el material.

3.4.3 Tratamiento de la Información

La microfotografía obtenida muestra las fases sólidas presentes en el acero, se debe determinar de ella el porcentaje de carbono aproximado presente en el material para posteriormente corroborar con los datos suministrados por el proveedor.

Por otra parte, existe una estrecha relación entre la microestructura del material y la resistencia a la fatiga del mismo: para un acero con presencia de ferrita y perlita existe un valor específico para el coeficiente de la expresión del límite de endurecimiento (Ver ítem 4.2); por consiguiente, cuando se determine la presencia de ferrita y perlita, como es de esperarse en este acero, debe ubicarse en el texto de Shigley [3.2] cuál es el valor correspondiente de dicho coeficiente para determinar el límite de endurecimiento.

Finalmente, se comparan las microfotografías del acero antes y después de la aplicación del ensayo de fatiga axial para evaluar variaciones microestructurales.

3.5 ENSAYOS DE FATIGA AXIAL

Los ensayos de fatiga axial en el acero AISI 1045 se realizan con el propósito de determinar la vida a fatiga de este acero bajo las condiciones de ensayos diseñadas (pruebas piloto), y para evaluar la eficacia de dos métodos de reparación en el retardo del crecimiento de la grieta de fatiga.

3.5.1 Materiales, equipos e insumos

Para llevar a cabo las pruebas de fatiga axial se requieren los siguientes recursos:

- Tres probetas de acero ASTM 1045 con muesca para realizar pruebas piloto de fatiga axial.
- Ocho probetas de acero ASTM 1045 con muesca para realizar ensayos de fatiga axial aplicando los métodos de reparación (cuatro para cada método).
- Dispositivos para agarrar las probetas en la máquina de fatiga.
- Ocho pines de acero 1020 de 3.3mm de diámetro x 6mm de largo.
- Broca de 1/8in
- 4 Parches de CFRP SikaWrap 300C de 100x120mm
- 25cc de Epóxico Sikadur 330.
- Máquina de ensayo de Fatiga Axial.
- Taladro de banco.
- Lupa para observar crecimiento de la grieta de fatiga.
- Martillo de cabeza redonda.
- Balanza digital.
- Calibrador pie de rey.

A continuación se hace referencia a algunos de estos equipos, herramientas e insumos necesarios para la ejecución de las pruebas de fatiga.

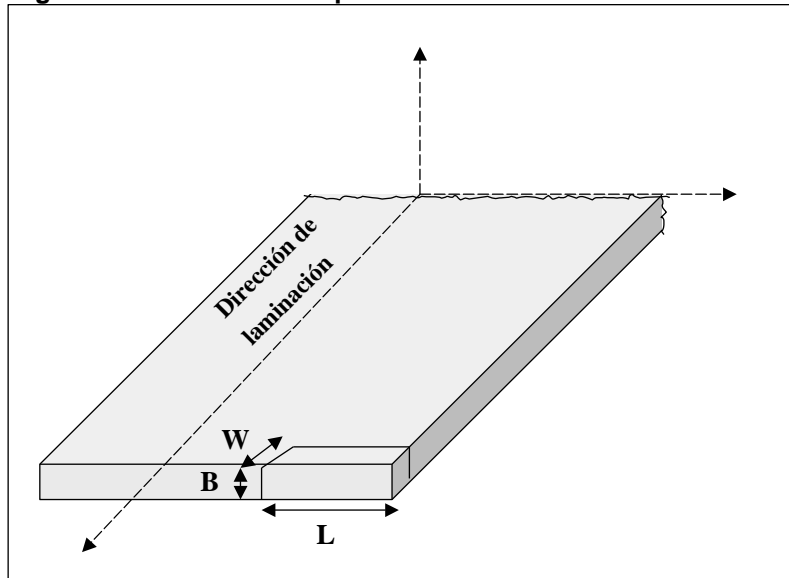
Probetas para ensayos de fatiga axial:

Obtención de Probetas

Del acero AISI 1045 en lámina, se extraen las probetas requeridas con las dimensiones deseadas aplicando corte mecánico refrigerado, para no ocasionar alteración en las propiedades del material en estado de suministro.

Todas las probetas se obtienen de la misma lámina para garantizar uniformidad en sus propiedades; el corte se realiza en sentido transversal a la dirección del laminado; con el propósito de que la dirección de las fibras sea perpendicular a la fuerza aplicada en el ensayo y así obtener la menor resistencia mecánica del material. En la **figura 3.2** se esquematiza la extracción de las probetas desde la lámina, donde B es el espesor de la probeta, W es el ancho y L es la longitud.

Figura 3.2. Extracción de probetas de la lámina de acero 1045.

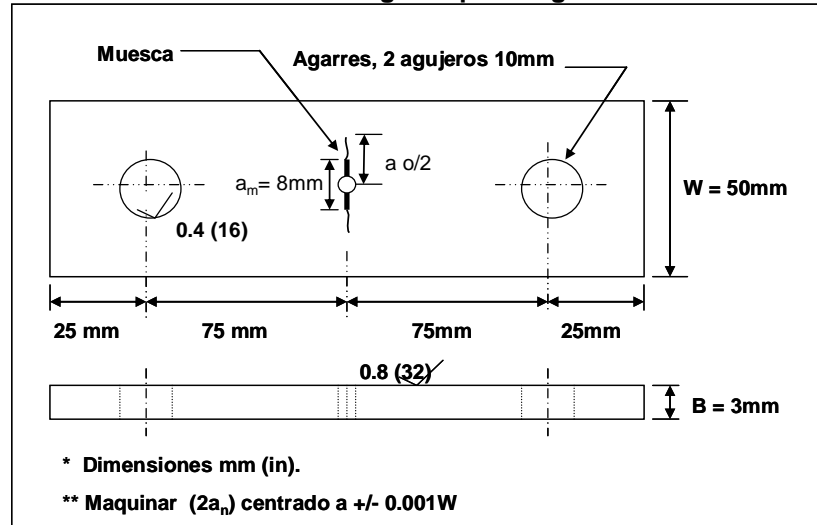


Geometría de las Probetas

La norma *Designation* ASTM E647 para crecimiento de grietas por fatiga con cargas de amplitud constante, a velocidades inferiores a 10^{-8} m/ciclo, recomienda una probeta con muesca central (CCT: Center-cracked-tension). De acuerdo con lo anterior, se procede a dimensionar el espécimen de prueba para su fabricación en el acero 1045, teniendo presente los diferentes espesores de lámina disponibles en el mercado y las especificaciones de la máquina de ensayo. La **figura 3.3** muestra las dimensiones para las probetas de ensayo a emplear en esta investigación.

Esta norma, también permite seleccionar el tipo de muesca central para la probeta dentro de cinco diferentes opciones, en ella se dispone que la selección del tipo de muesca a emplear se realiza teniendo presente la facilidad para la fabricación de la misma en el centro de la probeta; por tal motivo se propone elaborar una muesca con forma de ojo de cerradura como se muestra en la **figura 3.4**. La **figura 3.5** muestra una fotografía de la probeta ya fabricada.

Figura 3.3. . Probeta con muesca central CCT a emplear en la prueba de crecimiento de grieta por fatiga axial.



* Esta geometría de probeta es recomendada para un ancho de la probeta $\leq 75\text{mm}$.
 De acuerdo con: Norma ASTM E647

Figura 3.4. Geometría de la muesca con forma de ojo de cerradura: a) Fotografía de la muesca tomada en un proyector de perfiles, b) Dimensiones de la muesca para la probeta con $w = 50\text{mm}$.

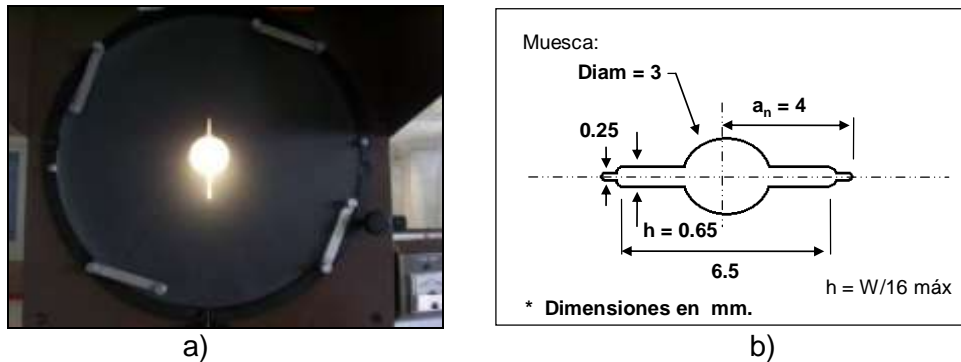


Figura 3.5. Fotografía de la probeta para crecimiento de grieta por fatiga axial.



Es importante comentar, que la muesca con forma de ojo de cerradura se ha seleccionado como concentrador para la probeta de ensayo debido precisamente a la

facilidad en la fabricación, ya que contiene radios que pueden ser elaborados con fresas; sin embargo, se debe tener presente que algunas de las dimensiones que se muestran en la **figura 3.3** dependen de los calibres disponibles en el mercado para la herramientas de corte y es por ello que la norma no restringe dichas dimensiones, pero sí determina que el espesor de la línea del ojo de la cerradura no debe ser mayor que 1/16 el ancho de la probeta ($h=1/16*\text{ancho de la probeta}$ –máximo-).

Maquina de fatiga axial:

La máquina de Fatiga axial (**figura 3.6**), consta básicamente de un actuador hidráulico acoplado a un sistema de control (**figura 3.7**) mediante el cual se ajustan los parámetros que se desean para la prueba y se pueden registrar y contabilizar el número de ciclos o desplazamientos que realiza el actuador sobre la probeta de ensayo.

Figura 3.6. Máquina de Ensayo de Fatiga Axial, actuador hidráulico MTS. Modelo: 204,62, Area: 5,23in², Fuerza: 70kN. (Terminales Automotrices S.A.)

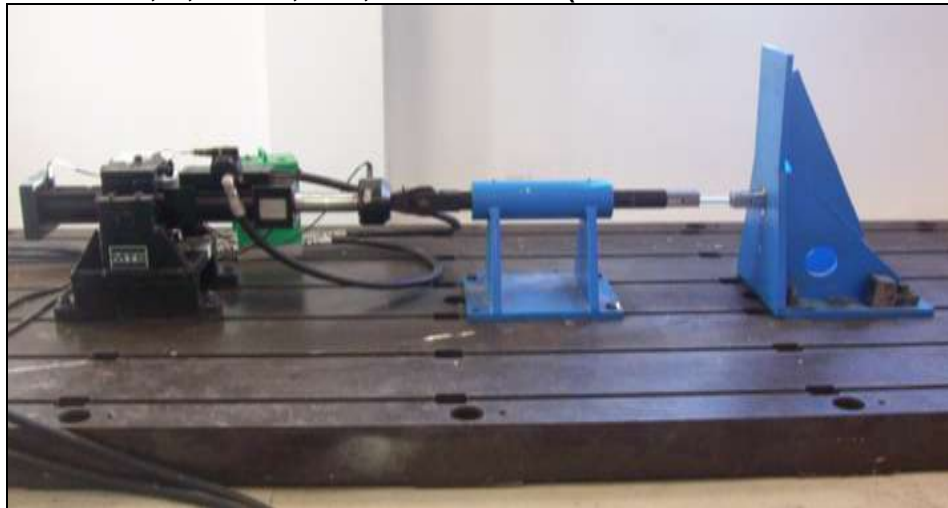


Figura 3.7. Controlador MTS 407, (Terminales Automotrices S.A.).



Dispositivos de agarre:

La sujeción de la probeta de ensayo en la máquina de fatiga axial requiere el diseño de un sistema de agarre adecuado para la probeta, que permita sostenimiento y fijación de la misma entre los dos cabezales de la máquina durante las pruebas; por tal razón, elabora

un dispositivo de agarre que consta de una chapa metálica, un par de platinas de refuerzo y un pasador con sus respectivas arandelas para cada agarre de la probeta (figura 3.8).

Parches de CFRP (Fibras de carbono reforzado):

Los parches de CFRP son un tejido de fibra de carbono que se utiliza actualmente en la industria de la construcción para refuerzo estructural. La ficha técnica para el CFRP se encuentra en el anexo 1. Para efectos de ésta investigación, se emplea dicho tejido y una resina (anexo 2) para la elaboración del material compuesto que se utiliza como parche en uno de los dos métodos de reparación considerados para las probetas de acero 1045, con el fin de observar cual es su comportamiento como método de retardo del crecimiento de la grieta de fatiga. En la figura 3.9 se muestra una fotografía del tejido de fibra y dicha resina de impregnación.

Figura 3.8. Dispositivos de agarre para las probetas. a) Vista explosionada de los componentes para el agarre, b) Ensamble de los componentes para el agarre de las probetas, c) Fotografía de los componentes (Material: AISI 4140).

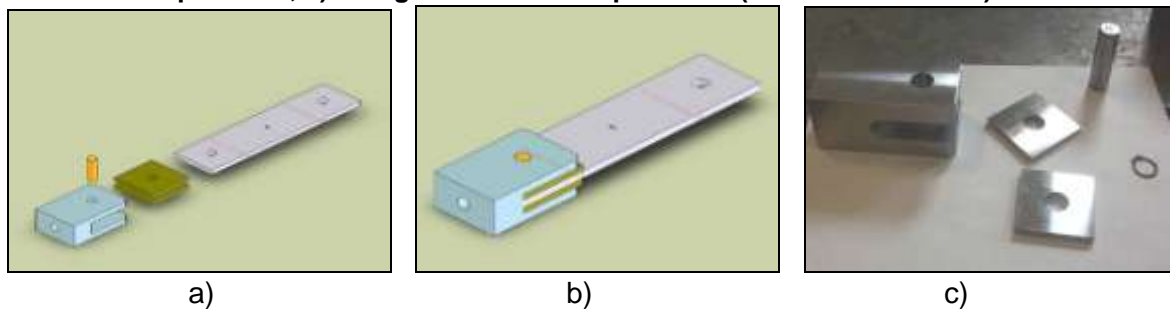
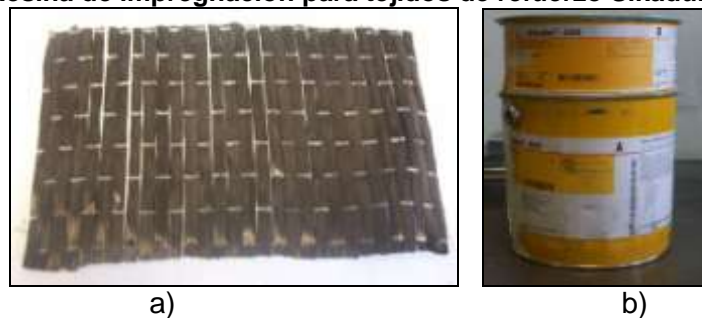


Figura 3.9. a) Tejido de fibra de carbono para refuerzo estructural SikaWrap 300C. b) Resina de impregnación para tejidos de refuerzo Sikadur 330.



Pines de acero:

Otro de los métodos de reparación considerados para retardar el crecimiento de la grieta considera el uso de pines de acero (Figura 3.10). Para llevar a cabo la aplicación de éste método se elaboran pines de acero 1020 de 6mm de largo y 3.25mm de diámetro. Con una longitud un poco mayor a la del espesor de la probeta, para que una vez introducidos en el agujero previamente taladrado en la punta de la fisura, permitan ser remachados.

Figura 3.10. Pines de acero 1020.



3.5.2 Determinación de los Parámetros para las Pruebas de Fatiga Axial

Los datos de resistencia última y fluencia obtenidos del ensayo de tracción, sirven ahora para determinar los parámetros bajo los cuales se desarrollan las pruebas de fatiga axial con base en las teorías de fallas por fatiga planteadas por los autores Norton [5], Shigley [6] y Juvinall [17]. Los cálculos desarrollados para la determinación de dichos parámetros, se relacionan en el Capítulo 4.

Una vez determinados los parámetros de la prueba, se procede con la realización de pruebas preliminares de fatiga axial en algunas probetas con el objeto de ajustar los valores de carga y frecuencia a aplicar en los ensayos. Los resultados de las pruebas preliminares se encuentran en el Anexo 3.

Posteriormente, se desarrollan pruebas piloto para estimar el crecimiento de la grieta de fatiga con relación al número de ciclos que desarrolla la probeta sin haber aplicado ningún método de reparación; es decir, para la evaluación de la vida a fatiga de las probetas de ensayo de acero 1045.

Es importante destacar que mediante el desarrollo de éstas pruebas es posible estimar realmente la longitud de crecimiento de la grieta en el intervalo de ciclos de vida a fatiga soportados, y de acuerdo con ello estimar la longitud hasta la cual se deja crecer la grieta, con el fin de proceder a aplicar el método de reparación correspondiente. Para este caso esta longitud a la cual debe realizarse la reparación es $a_0 \approx 22\text{mm}$.

3.5.3 Métodos de Reparación a Evaluar

Los métodos de reparación a evaluar en el desarrollo de esta investigación se ilustran en la Figura 3.11. El primero método consiste en la elaboración de un orificio en el flanco de crecimiento de la grieta para luego proceder con la inserción del pin en dicho agujero, con el fin de deformar plásticamente la zona, disminuyendo con esto la intensidad de la concentración de esfuerzos debido al cambio en la geometría del concentrador, y aprovechar el aumento de la resistencia local que se presenta para detener el rápido avance de la grieta. El segundo consiste en la aplicación de parches de fibra de carbono reforzada (CFRP) a ambos lados de la probeta, cubriendo totalmente la sección de prueba de la probeta para conseguir con ello la redistribución de los esfuerzos en la zona de crecimiento, debido al incremento en el área transversal de la probeta.

Para efectos de su identificación se tiene:

Método 1: Reparación utilizando pines de acero (MR1).

Método 2: Reparación mediante la aplicación de parches de fibra de carbono a lado y lado de la probeta (MR2).

Recuérdese, que estos métodos se aplican cuando la grieta alcance la longitud de reparación, aproximadamente de 22mm, de acuerdo con lo planteado en el [ítem 3.6.2](#).

3.5.4 Planteamiento Experimental para las Pruebas de Fatiga Axial

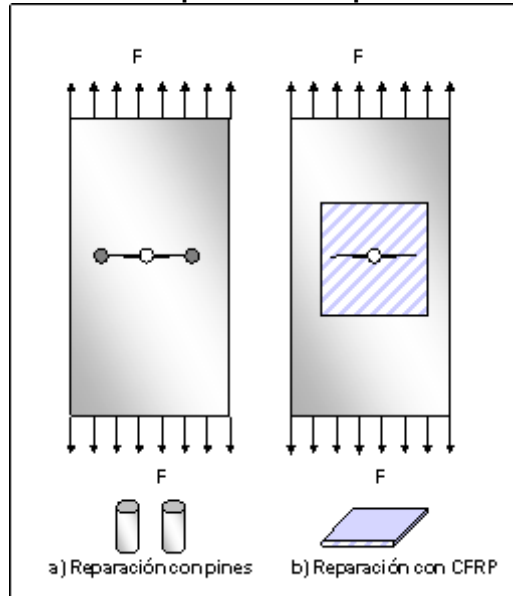
Objetivo:

Determinar la efectividad de dos métodos de reparación, en el retardo del crecimiento de una grieta de fatiga en el acero 1045.

Variable de Respuesta:

La variable de respuesta para la experimentación se encuentra orientada en la determinación del *Número de Ciclos* de vida a fatiga que puede soportar la probeta hasta llegar a la rotura.

Figura 3.11. Métodos de reparación a implementar en las probetas.



Factores:

Los factores implicados en el desarrollo experimental de las pruebas de fatiga axial se registran en la [Tabla 3.3](#), en donde se tienen presentes las condiciones ambientales, las condiciones de prueba de las cuales el factor de diseño son los métodos de reparación, y finalmente, se muestran también algunos aspectos dimensionales de las probetas de ensayo de donde se derivan dos factores de ruido como lo son el espesor de las probetas y la longitud inicial de la muesca. Estos factores fueron difíciles de controlar durante el proceso de fabricación, por lo que es indispensable considerarlos como ruido y realizar el tratamiento de la información correspondiente para aislar su efecto en el estudio de la variable de respuesta, la que al final permite comparar los métodos de reparación empleados en aras de seleccionar el más eficaz.

Procedimiento:

Una vez realizadas las pruebas preliminares y determinados los parámetros de las pruebas, se procede entonces con la realización de ensayos de fatiga axial, tanto para las pruebas piloto como con cada uno de los métodos de reparación planteados. Los registros de los datos tomados durante los ensayos se tabulan en los formatos de recolección de datos, siguiendo la nomenclatura ([Anexo 4](#)).

Tabla 3.3. Factores Implicados en la experimentación

VARIABLE	FACTOR DE DISEÑO	FACTOR DE RUIDO	FACTOR CONSTANTE	RANGO
Condiciones Ambientales				
Temperatura (°C)			X	18
Humedad relativa (%)			X	70
Probetas				
Material			X	AISI 1045 (Est. Suministro)
Tipo			X	Estándar CCT (ASTM E386), sección transversal rectangular
Ancho (mm)			X	50
Espesor (mm)		X		2.8 – 3.4
Longitud inicial de la muesca (mm)		X		7.79 – 8.34
Tipo de concentrador			X	Ojo Cerradura
Condiciones de la Prueba				
Métodos de reparación	X			- Pin de Acero - Parche CFRP
Longitud de la grieta para reparación (mm)			X	22
Dirección de crecimiento de la grieta			X	Inducido LEFM
Frecuencia de la prueba de fatiga (Hz)			X	5
Tipo de onda de Esfuerzo			X	Fluctuante ($\sigma_m \neq \sigma_a$)
Fuerza Máxima (N)			X	35000
Fuerza Mínima (N)			X	5000
Esfuerzo Máximo (Mpa)			X	277.78
Esfuerzo Mínimo (Mpa)			X	39.68

El desarrollo de las pruebas se lleva a cabo en tres fases: En la primera, se llevan a cabo las pruebas piloto; en la segunda, se realizan las pruebas aplicando el método de reparación con pines (MR1); y la tercera, donde se realizan las pruebas aplicando parches de CFRP (MR2).

Finalmente, durante las pruebas se realizan las inspecciones pertinentes cada cierto número de ciclos con el fin de tabular la longitud de crecimiento de la grieta y el número de ciclos requerido para lograrla. Esta labor se realiza hasta llegar a la fractura final del componente, para el caso de la prueba piloto; y, para el caso de la prueba con los métodos de reparación, se tabula la longitud de crecimiento de la grieta y el número de ciclos soportados a dicha longitud hasta que se alcanza la longitud de reparación y se aplica el método de reparación, después de ello no es posible tabular datos de crecimiento con las herramientas disponibles, por ello después de la reparación se tabula un valor final correspondiente al número de ciclos totales soportados por la probeta después de la reparación.

Tratamiento de la Información

Cuando se finalizan las pruebas de fatiga, luego de obtener los datos producto de los ensayos, se procede al análisis de los resultados obtenidos elaborando las gráficas de crecimiento de grieta y observando el comportamiento a fatiga de las probetas de ensayo reparadas.

Las partes fracturadas de las probetas se someten a análisis macroscópico y microscópico, pruebas de metalografía y barridos de microdureza para la caracterización de la fractura.

Finalmente se realizan los respectivos tratamientos estadísticos de acuerdo con las características de las pruebas, con el fin de determinar el mejor método de reparación.

Capítulo 4

DETERMINACIÓN DE LOS NIVELES DE CARGA PARA LOS ENSAYOS DE FATIGA

En este capítulo se presentan los cálculos desarrollados para determinar las condiciones de carga bajo los cuales se llevan a cabo los ensayos de Fatiga Axial.

Inicialmente, se estima el valor de la resistencia a la fatiga aplicando los correspondientes factores de corrección para el análisis de falla por fatiga, y luego se elaboran los diagramas S-N y de Goodman para determinar el rango de esfuerzo bajo el cual se llevaran a cabo dichos ensayos.

4.1 RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN EN EL ACERO 1045

Los diagramas de esfuerzo – deformación, obtenidos del ensayo estático de tracción para las probetas se relacionan en el [Anexo 5](#). A continuación se tabulan los datos de interés obtenidos de éste diagrama y se promedian para adquirir un valor representativo de los mismos.

4.1.1 Datos Iniciales del Ensayo de Tracción

La probeta para el ensayo de tracción, de acuerdo con lo planteado en el capítulo anterior, consta de las siguientes características:

Longitud calibrada (L_c): 50mm

Espesor de la probeta (t): 6mm

Ancho de la probeta (w): 50mm

Longitud de la muesca (a_m): 8mm (Para la probeta con muesca)

Área de sección transversal de la probeta sin muesca: 300mm^2

Área de sección transversal de la probeta con muesca: 252mm^2

4.1.2 Propiedades obtenidas del Ensayo de Tracción

La **tabla 4.1** registra los valores obtenidos de la prueba de tracción para la resistencia máxima a la tracción y la resistencia a la fluencia. En la **figura 4.1** se muestra una fotografía de la probeta de ensayo después de la prueba realizada.

Tabla 4.1. Resultados del ensayo de Tracción

Muestra	Probeta sin Muesca		Probeta con Muesca	
	Sy (Mpa)	Sut (Mpa)	Sy (Mpa)	Sut (Mpa)
1	409,22	655,34	405,97	529,52
2	409,22	652,37	423,62	529,52
3	415,15	658,30	413,03	522,46
Promedio	411,19	655,34	414,21	527,17

Figura 4.1. Fotografía de la probeta sin muesca después del ensayo de tracción. Nótese el área de sección reducida en la parte central de la probeta.



4.2 ESTIMACIÓN DE LOS FACTORES DE CORRECCIÓN PARA EL ANÁLISIS DE LA FALLA POR FATIGA EN EL AISI 1045

La estimación de los factores de corrección aplicables a la resistencia a la fatiga teórica se lleva a cabo de acuerdo con las especificaciones de la teoría sobre falla por fatiga expuesta en los textos de **Norton [4.1]**, **Juvinall [4.2]** y **Shigley [4.3]**.

Resistencia teórica a la fatiga:

La relación del límite de resistencia a la fatiga $\phi = \frac{Se'}{Sut}$ (**Shigley**), para un acero al carbono con contenido de perlita entre 0.38 – 0.41 es en promedio $\phi = 0.40$, por

consiguiente la **Ec. 4.1** relaciona la resistencia teórica a la fatiga en función de la microestructura del material y la resistencia máxima a la tracción del mismo.

$$S_e' = \phi * S_{ut} = 26214 \text{MPa} \quad \text{Ec. 4.1}$$

Factores de corrección:

Los factores de corrección (FC) que se deben aplicar al valor de resistencia teórica a la fatiga de la **Ec. 4.1**, están directamente relacionados con efectos de carga, tamaño, características superficiales y efectos de temperatura entre otros (**Ec. 4.2**).

$$S_e = S_e' * FC \quad \text{Ec. 4.2}$$

Donde:

$$FC = C_{\text{carga}} * C_{\text{tamaño}} * C_{\text{superficial}} * C_{\text{temperatura}} * C_{\text{confiabilidad}} \quad \text{Ec. 4.3}$$

a) Efectos de la carga: Para carga axial pura en partes de componentes mecánicos (**Norton pg 376**), se tiene que el efecto de la carga es: $C_{\text{carga}}=0,7$

b) Efectos Dimensionales: Para secciones cargadas axialmente se sugiere un $C_{\text{tamaño}}=1$, debido a que las fallas de los especímenes de prueba cargados axialmente no evidencian sensibilidad al tamaño de su sección transversal (**Norton, pág. 376**). Sin embargo, de acuerdo con las teorías de **Kuguel**, se sugiere la evaluación del factor de tamaño teniendo presente el diámetro equivalente (**Ec 4.4**) y para ello es necesario determinar el A_{95} para el área de sección transversal rectangular (**Ec 4.5**).

$$A_{95} = 0,05 * \text{Ancho} * \text{Espesor} = 7.5 \text{mm}^2 \quad \text{Ec.4.4}$$

$$d_{\text{eq}} = \sqrt{\frac{A_{95}}{0,0766}} = 9,8 \quad \text{Ec. 4.5}$$

Finalmente, el factor de tamaño se determina como se expresa en la **Ec 4.6**.

$$C_{\text{tamaño}} = 1,189 * d_{\text{eq}}^{-0,097} = 0,95 \quad \text{Ec. 4.6}$$

c) Efectos Superficiales: Para determinar el factor de corrección superficial se emplea la ecuación de **Shigley y Mischke (Ec 4.7)**. De la **tabla 6.3 del texto de Norton** para un acabado superficial maquinado, las constantes del factor de corrección son $A=4,51$ y $b=0,265$.

$$C_{\text{superficial}} = A(S_{ut})^b = 0,81 \quad \text{Ec.4. 7}$$

d) Efectos de la Temperatura: Teniendo en cuenta que los ensayos de fatiga axial se realizan a temperatura ambiente, se tiene que para $T \leq 450^{\circ}\text{C}$ (840°F) el factor de temperatura es $C_{\text{temperatura}} = 1$

e) Confiabilidad: Gran parte de los datos de resistencia reportados o informados son valores medios. Se considera que existe una considerable dispersión para cuando se realizan múltiples ensayos (de la tabla 6.4 Norton). De acuerdo con Haugen y Wirsching, para una desviación estándar del 8% y una confiabilidad del 50%, el factor de confiabilidad es $C_{\text{confiabilidad}} = 1$.

Ahora el factor de corrección para la resistencia a la fatiga se determina con base en los factores previamente determinado de acuerdo con la Ec 4.3 es $FC=0,54$. Finalmente, la resistencia a la fatiga corregida es:

$$Se = 141 \text{ MPa @ } 10^6 \text{ Ciclos}$$

4.3 OBTENCIÓN DEL DIAGRAMA S-N

La ecuación anterior para Se proporciona información sobre la resistencia del material en la región de alto ciclaje del diagrama de esfuerzo – vida. Con información similar para la región de bajo ciclaje, se puede construir un diagrama S – N para el acero AISI 1045.

El ancho de banda de interés es el régimen de fatiga de alto ciclaje (de $10^3 - 10^6$ ciclos). Con base en ello, la resistencia del material a 10^3 ciclos (S_m) es:

$$S_m = 0,75 * S_{ut} = 491,5 \text{ Mpa} \quad \text{Ec. 4.8}$$

El valor obtenido para S_m se grafica en 10^3 ciclos en el diagrama S – N como se muestra en la figura 4.2. Ahora, como los aceros exhiben un codo entonces se grafica el valor de Se en 10^6 ciclos. Se sabe también que más allá del límite de resistencia a la fatiga sigue una línea horizontal. Este diagrama permite conocer, de acuerdo con el número de ciclos deseados de vida para el material, la resistencia a la fatiga deseada (S_n).

La frecuencia de aplicación de carga de la máquina de fatiga MTS es de 7Hz, sin embargo es un valor alto y las vibraciones producidas pueden afectar el equipo. Se considera entonces una frecuencia de 5Hz y una duración aproximada de 3 horas (10800s) para llevar a cabo cada una de las pruebas; De acuerdo con lo anterior, de la Ec. 4.9 para la frecuencia, el número de ciclos estimado o deseado es de aproximadamente 50000.

$$f = \frac{\text{N}^{\circ} \text{ de Ciclos}}{\text{Tiempo}}; \quad \text{N}^{\circ} \text{ de Ciclos} = 50.000 \quad \text{Ec. 4.9}$$

La Ec 4.10 corresponde a la ecuación de la línea $S_m - S_e$, con base en ello se puede estimar el esfuerzo requerido en el Diagrama S-N para el número de ciclos deseado.

$$S_n = a N^b \quad \text{Ec. 4.10}$$

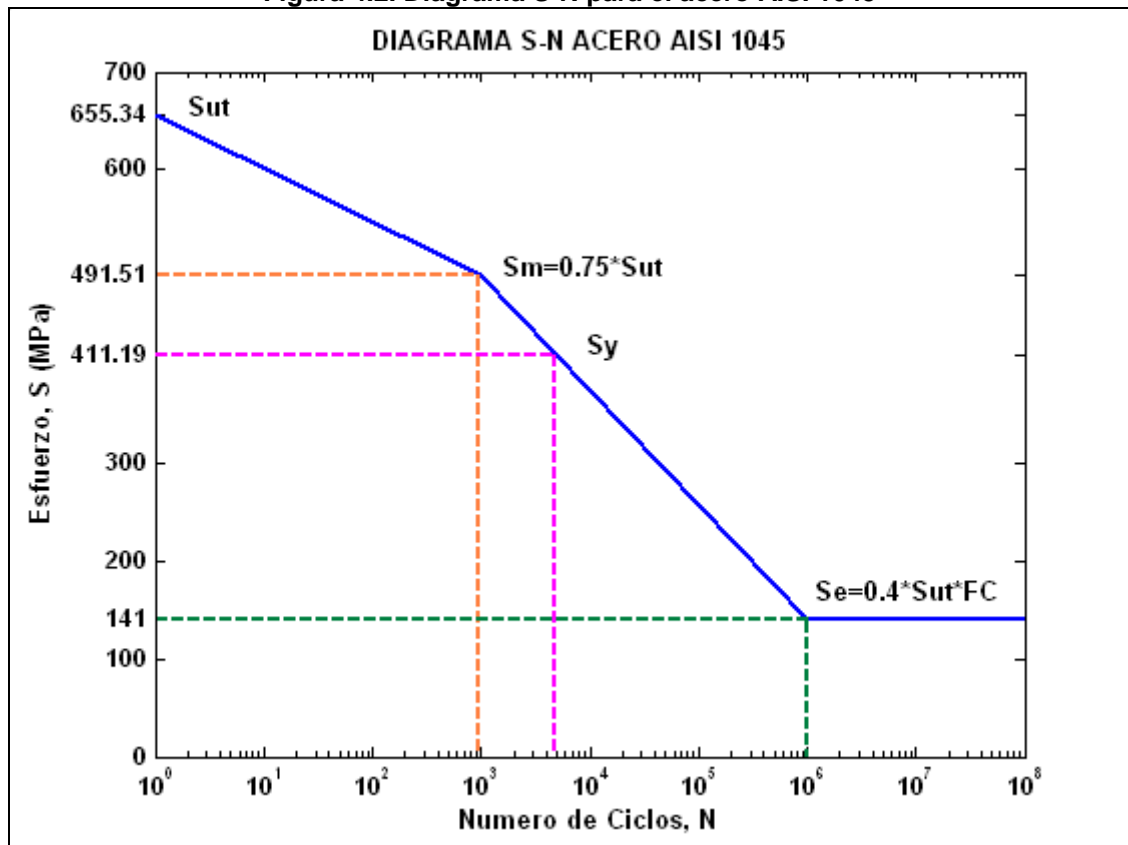
Los valores de z , a y b , se determinan como se expresa en las Ec 4.11, 4.12, 4.13, donde N_1 y N_2 corresponden a 10^3 y 10^6 ciclos respectivamente.

$$z = \text{Log}(N_1) - \text{Log}(N_2) = -3 \quad \text{Ec. 4.11}$$

$$b = \frac{1}{z} \text{Log}\left(\frac{S_m}{S_e}\right) = -0,1807 \quad \text{Ec. 4.12}$$

$$\begin{aligned} \text{Log}(a) &= \text{Log}(S_m) - b * \text{Log}(N_1) \\ a &= 1713,54 \end{aligned} \quad \text{Ec. 4.13}$$

Figura 4.2. Diagrama S-N para el acero AISI 1045



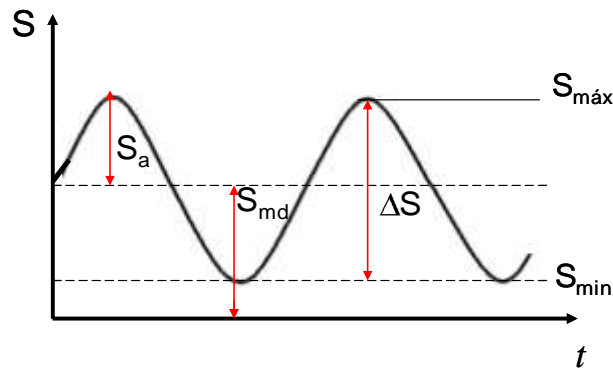
Así pues, para **50000ciclos**, se requiere aplicar un esfuerzo **$S_n = 242,31 \text{MPa}$** , de acuerdo con el Diagrama S-N del material. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el diagrama esfuerzo – vida se construye para esfuerzos totalmente alternantes; y debido a que el tipo de onda de esfuerzos que se sigue en ésta experiencia es de tipo fluctuante

entre 5 – 3,5 KN (requerimientos de la máquina de ensayo), se debe proceder entonces con la elaboración del correspondiente diagrama de Goodman.

4.4 DIAGRAMA DE GOODMAN MODIFICADO

La onda de trabajo es de tipo Fluctuante (Figura 4.3), y las condiciones de carga a aplicar dependen en gran medida de la capacidad de la máquina de ensayos que se va a utilizar. Se selecciona como cargas de trabajo para las pruebas una Carga Máxima (Fmax) de 35KN y una Carga Mínima (Fmin) de 5KN, que se encuentra dentro del rango de trabajo de dicha máquina de fatiga. Con base en estos valores se determinan la Media y Amplitud de la onda como se muestra en las Ec 4.14 y 4.15.

Figura 4.3. Onda de Esfuerzo Fluctuante para Cargas de Fatiga.



$$\text{Media} = \left(\frac{F_{\max} + F_{\min}}{2} \right) = 20\text{KN} \quad \text{Ec. 4.14}$$

$$\text{Amplitud} = \left(\frac{F_{\max} - F_{\min}}{2} \right) = 15\text{KN} \quad \text{Ec. 4.15}$$

Con los valores de carga estimados, se determinan los valores nominales de esfuerzo máximo (Ec 4.16) y mínimo (Ec 4.17), también los componentes de esfuerzo nominal medio (Ec 4.18) y alternante (Ec 4.19) sus valores o la relación entre estos valores experimentales (Ec 4.20, 4.21 y 4.22). El área neta de la probeta considerada es de 126mm².

$$S_{\max\text{NE}} = \frac{F_{\max}}{A_{\text{neta}})_{\text{probeta}}} = 277,7 \text{ MPa} \quad \text{Ec. 4.16}$$

$$S_{\min\text{NE}} = \frac{F_{\min}}{A_{\text{neta}})_{\text{probeta}}} = 39,7 \text{ MPa} \quad \text{Ec. 4.17}$$

$$S_{mdNE} = \frac{S_{maxNE} + S_{minNE}}{2} = 158,7 \text{ MPa} \quad \text{Ec. 4.18}$$

$$S_{aNE} = \frac{S_{maxNE} - S_{minNE}}{2} = 119 \text{ MPa} \quad \text{Ec. 4.19}$$

$$\text{Rango de Esfuerzo: } \Delta S_{NE} = S_{maxNE} - S_{minNE} = 238 \text{ MPa} \quad \text{Ec. 4.20}$$

$$\text{Relación de Esfuerzo: } R_E = \frac{S_{minNE}}{S_{maxNE}} = 0,14 \quad \text{Ec. 4.21}$$

$$\text{Relación de Amplitud: } A_E = \frac{S_{aNE}}{S_{mdNE}} = 0,75 \quad \text{Ec. 4.22}$$

Con base en la relación de amplitud experimental de $\frac{S_{aNE}}{S_{mdNE}} = 0,75$, el valor del esfuerzo máximo a la tracción obtenido del ensayo de tracción de 655,34MPa y un $S_n' = 242,31\text{MPa}$ deseado para 50.000 ciclos se elabora el Diagrama de Goodman para determinar los componentes alternante y medio reales.

La **figura 4.4** muestra el diagrama de Goodman Modificado para los valores antes mencionados, de donde se obtiene la **Ec. 4.23** mediante relaciones de triángulos; y despejando de ésta se obtiene una expresión que sirve para determinar el componente alternante real (**Ec.4.24**) y con base en éste se determina el componente medio real (**Ec. 4.25**).

$$\frac{S_n'}{S_{ut}} = \frac{S_{ar}}{S_{ut} - S_{mdr}} \quad \text{Ec. 4.23}$$

$$S_{ar} = \left[\frac{S_n'}{1 + \frac{S_n'}{0,75 S_{ut}}} \right] = 162,3\text{MPa} \quad \text{Ec. 4.24}$$

$$S_{mdr} = \frac{S_{ar}}{0,75} = 216,4\text{MPa} \quad \text{Ec.4.25}$$

La presencia de la muesca inducida en el centro de la probeta crea una concentración de esfuerzo que eleva los esfuerzos localmente e incluso puede causar fluencia plástica local. Por consiguiente, para el caso de esfuerzos fluctuantes, los componentes

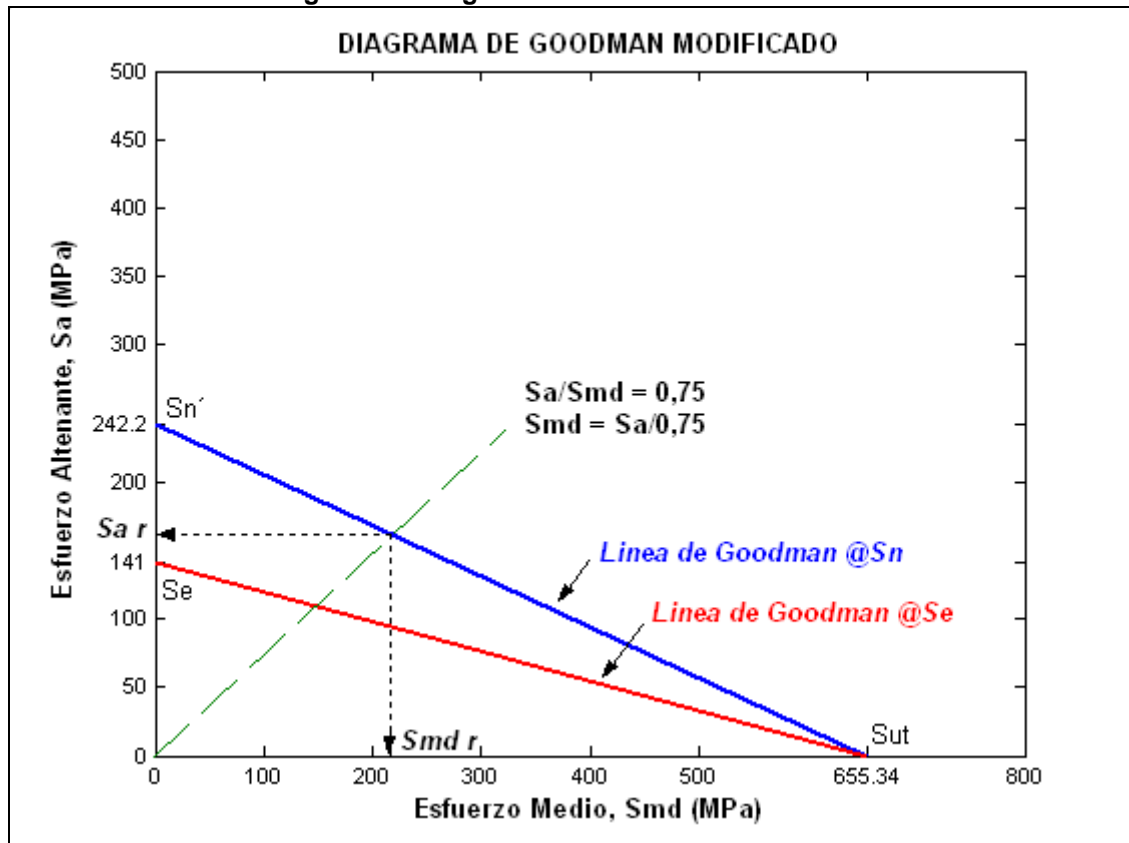
alternante y medio se encuentran afectados por el Factor de Concentración de Esfuerzos a la Fatiga (Kf) como se expresa en la Ec. 4.26, donde se obtiene es el Esfuerzo Dinámico Nominal Alternante (S_{aN}) y el Medio (S_{mdN}).

$$S_{a r} = K_f * S_{a N} \rightarrow S_{a N} = \frac{S_{a r}}{K_f}$$

$$S_{m d r} = K_f * S_{m d N} \rightarrow S_{m d N} = \frac{S_{m d r}}{K_f}$$

Ec. 4.26

Figura 4.4. Diagrama de Goodman Modificado



El factor de concentración de esfuerzo se determina con base en la Ec. 4.27, de donde se observa que es función de Factor Teórico de Concentración de Esfuerzos (Kt) y la Sensibilidad a la Muesca (q).

$$K_f = 1 + q(K_t - 1)$$

Ec. 4.27

Un estimativo del valor de Kt se puede obtener elaborando ensayos de tracción en probetas con y sin muesca. La relación entre los valores obtenidos de Sut para los dos

casos nos predice algún valor de cómo afecta la resistencia mecánica del material dicha muestra (Ec. 4.28).

$$K_t = \frac{\text{Carga a rotura nominal}}{\text{Carga a rotura con entalla}} = 1,48 \quad \text{Ec. 4.28}$$

La sensibilidad a la muesca (q), depende principalmente de la geometría de la muesca y el material, y se determina mediante la expresión de la Ec. 4.29, donde “a” es la constante de Neuber obtenida de la tabla 6.6 (pg. 390 Norton), con base en el valor de Sut del material, y “r” es el radio de la muesca, expresado en pulgadas.

$$q = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{r}}} = 0,85 \quad ; \quad \sqrt{a} = 0,066 \text{ in}^{0,5} \quad \text{Ec. 4.29}$$

Por consiguiente, $K_f=1,41$ y $S_{a N}=115,10$ MPa de acuerdo con la Ec. 4.27 y 4.26 respectivamente.

El componente medio ($S_{md r}$), es dependiente de la ductilidad del material y por consiguiente de la cantidad de fluencia posible en la muesca. De acuerdo con las teorías de la Mecánica de Fractura para materiales dúctiles, Dowling basado en Juvinal sugiere emplear la condición que se plantea en la Ec. 4.30.

$$\text{Si } K_f |S_{\max}| > S_y, \text{ entonces } K_{f_m} = \frac{S_y - K_f * S_{a N}}{|S_{md r}|} = 1,15 \quad \text{Ec. 4.30}$$

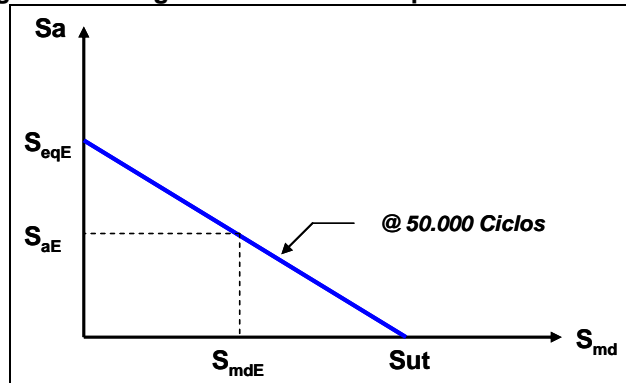
Por consiguiente, $S_{md N} = 188,15$ MPa aplicando la Ec. 4.27.

Con base en los esfuerzos nominales alternante y medio, se determinan ahora los esfuerzos nominales máximos y mínimos (Ec. 4.31).

$$\begin{aligned} S_{\max N} &= S_{a N} + S_{md N} = 303,25 \text{ MPa} \\ S_{\min N} &= S_{md N} - S_{a N} = 73,04 \text{ MPa} \end{aligned} \quad \text{Ec. 4.31}$$

Como se desea conocer si es aconsejable utilizar las cargas experimentales que se han estimado, entonces se determina el valor del Esfuerzo Alternante Equivalente Experimental (S_{eqE}) para los valores experimentales considerados. Para tal efecto se plantea nuevamente el Diagrama de Goodman pero ahora, para determinar dicho valor en cuestión como se muestra en la figura 4.5 y aplicando relaciones de triángulos, se obtiene la Ec. 4.32.

Figura 4.5. Diagrama de Goodman para determinar S'_{eqE}



$$\frac{S_{eqE}}{S_{ut}} = \frac{S_{eqE} - S_{aE}}{S_{mdE}} \quad \rightarrow \quad S_{eqE} = \left(\frac{1}{S_{ut}} - \frac{1}{S_{mdE}} \right)^{-1} * \left(\frac{-S_{aE}}{S_{mdE}} \right) \quad \text{Ec. 4.32}$$

Donde S_{aE} y S_{mdE} son los valores experimentales para el componente medio y alternante respectivamente, y deben ser afectados por los factores de concentración de esfuerzos correspondientes. Finalmente, $S_{aE} = 167,79$ MPa, $S_{mdE} = 182,56$ MPa, y el esfuerzo equivalente es $S_{eqE} = 232,58$ MPa, que es un valor aproximado al estimado inicialmente para la prueba, por consiguiente las cargas máximas y mínimas experimentales consideradas para aplicar en los ensayos de fatiga axial son adecuadas para obtener los resultados esperados.

Capítulo 5

RESULTADOS DE LA INVESTIGACION

El objetivo de los ensayos de fatiga axial propuestos para esta investigación, es el de contabilizar el número de ciclos que puede soportar la probeta hasta llegar a la fractura. En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de las pruebas de fatiga axial realizadas aplicando los métodos de reparación considerados, así como algunas imágenes capturadas durante el desarrollo de estas pruebas. Y finalmente, la caracterización macroscópica, microscópica, metalográfica y mecánica de la superficie de fractura.

5.1 ENSAYOS DE FATIGA AXIAL

Inicialmente, se realizan pruebas piloto de fatiga axial a las probetas con muesca central para determinar la vida a fatiga del acero 1045, para poder obtener un patrón de referencia del ciclaje soportado por el componente hasta llegar a la rotura; posteriormente se llevan a cabo las pruebas experimentales aplicando cada uno de los métodos de reparación, registrando también el número de ciclos, pero esta vez teniendo presente el detener la prueba al llegar a la longitud de reparación (22mm de crecimiento), entonces se aplica el método de reparación correspondiente y se continua con la prueba hasta producir la rotura del componente, de donde se obtiene nuevamente la vida a fatiga de la probeta pero ahora reparada.

A continuación se presentan los resultados obtenidos para las pruebas antes mencionadas, teniendo presente que se registra la longitud de crecimiento de la grieta de fatiga cada cierto intervalo de ciclaje con el fin de obtener el número total de ciclos, para el caso de la prueba piloto, y detener la prueba y aplicar el método de reparación a la longitud previamente establecida.

5.1.1 Datos Iniciales del Ensayo de Fatiga Axial

La **tabla 5.1** muestra los valores de los parámetros de ensayo aplicados para realizar las pruebas de fatiga.

Tabla 5.1. Parámetros de ensayo para las Pruebas de Fatiga Axial

Parámetro	Valor	Unidades
Fuerza máxima	35	kN
Fuerza mínima	5	kN
Frecuencia	5	Hz
Media	20	kN
Amplitud	15	kN
Diámetro del agujero de la muesca	3	mm
Ancho de la probeta	3	mm

5.1.2 Crecimiento de la Grieta de Fatiga Axial

Inicialmente se seleccionan de manera aleatoria las probetas que se van a emplear tanto para la realización de las pruebas piloto como para el desarrollo de las pruebas con cada uno de los métodos de reparación considerados, seguidamente se procede a llevar a cabo los ensayos correspondientes comenzando con las pruebas piloto y posteriormente desarrollando los ensayos de fatiga aplicando los métodos de reparación.

Algunas imágenes fueron capturadas durante la etapa del crecimiento de la grieta y en la fractura para cada caso.

Es importante comentar que en el caso de la prueba piloto se registran datos de crecimiento de grieta para toda la etapa de crecimiento que desarrolla la grieta desde su inicio hasta llegar a la fractura final, en el caso del método de reparación que emplea parches de CFRP no fue posible obtener un registro del crecimiento después de la reparación, debido a que la superficie de la probeta se encuentra cubierta por el parche, lo cual dificulta su observación; por tal motivo, para las probetas reparadas solo se registra el crecimiento parcial de la grieta hasta llegar a la longitud a la cual se aplica el método de reparación, después de ello no se registran datos de crecimiento sólo se tabula el número restante de ciclos que soporta la probeta después de la reparación hasta la falla, y no se realiza el seguimiento del crecimiento.

Prueba piloto

Las pruebas piloto realizadas permiten obtener un registro del crecimiento de la grieta de fatiga y el número total de ciclos totales hasta la falla. En la **figura 5.1** se muestran algunas imágenes del crecimiento de la grieta de fatiga para esta prueba.

Método de reparación con pines de acero

Las probetas seleccionadas para evaluar éste método de reparación fueron previamente sometidas al ensayo de fatiga axial hasta llegar a la longitud de reparación (aproximadamente de 22mm), luego las probetas se desmontan de la máquina, se aplica el método de reparación insertando los pines en el flanco de crecimiento de la grieta; y

posteriormente vuelven a montarse dichas probetas en la máquina de ensayo para continuar bajo las mismas condiciones de prueba con el ensayo. Al final de la prueba, se registra el número total de ciclos que soporta cada probeta después de la reparación. Algunas imágenes capturadas del crecimiento de la grieta durante ésta prueba se muestran en la **figura 5.2**.

Figura 5.1. Imágenes capturadas durante el crecimiento de la grieta de fatiga para la prueba piloto en el acero AISI 1045. a) A los 10000 ciclos de la prueba, no se observa crecimiento; b) A los 22000 ciclos de la prueba, grieta con 11,24mm de longitud; c) A los 31000 ciclos de la prueba, grieta con 18,46mm de longitud; d) A los 39000 ciclos de la prueba, grieta con 27,65mm de longitud; y e) Fractura de la probeta a los 40738 ciclos.

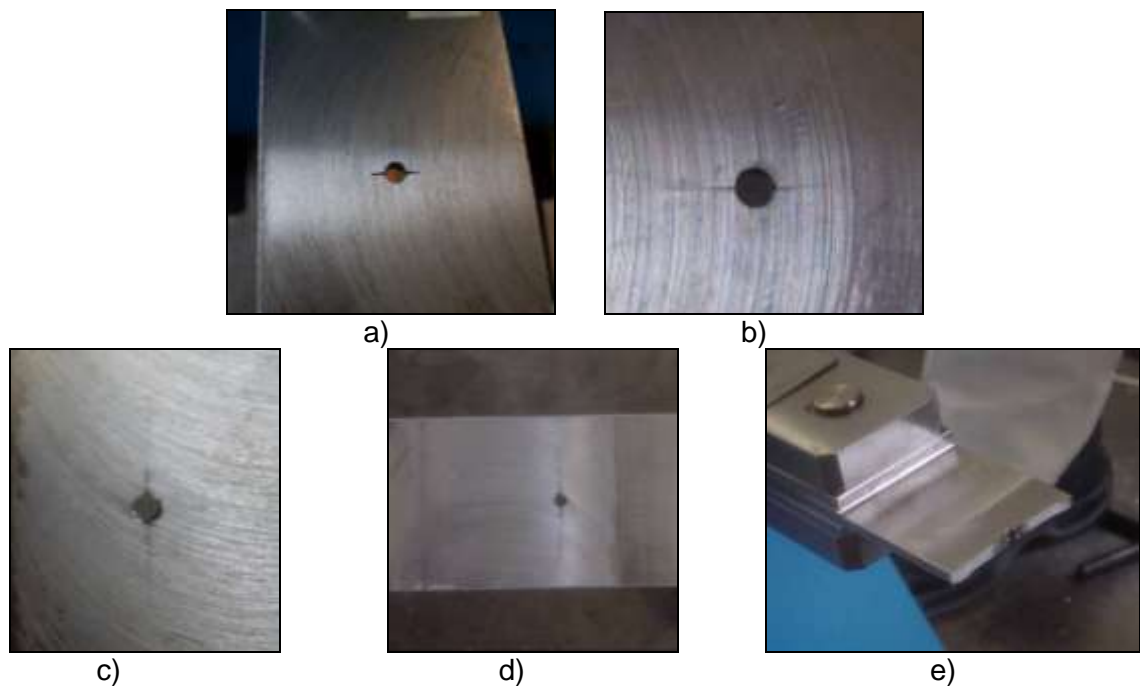
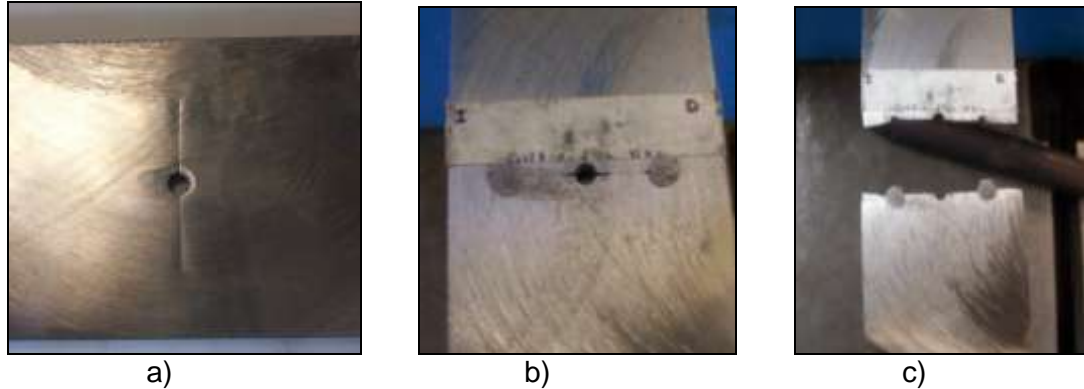


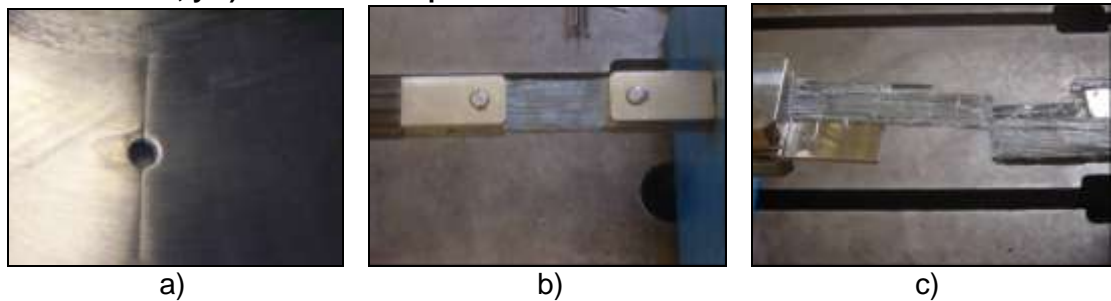
Figura 5.2. Crecimiento y fractura de la probeta de acero AISI 1045 reparada con pines, a) Crecimiento de la grieta hasta la longitud de reparación (22mm) con 31000 ciclos; b) Reparación de la probeta insertando los pines en el flanco de crecimiento; y c) Fractura de la probeta a los 43020 ciclos.



Método de reparación con parche de CFRP

Las probetas seleccionadas para evaluar éste método de reparación, reciben el mismo tratamiento que se le aplicó a las probetas reparadas con pines: al crecer la grieta hasta la longitud de reparación se procede a la aplicación del parche y posteriormente se continúa la prueba bajo las mismas condiciones iniciales para finalmente registrar el número total de ciclos que soporta la probeta después de la reparación. Algunas imágenes capturadas del crecimiento de la grieta durante ésta prueba se muestran en la [figura 5.3](#).

Figura 5.3. Crecimiento y fractura de la probeta de acero AISI 1045 reparada con parches de CFRP, a) Crecimiento de la grieta hasta la longitud de reparación (22mm), con 31000 ciclos; b) Aplicación del método de reparación cubriendo la sección de prueba de la probeta con el parche de CFRP; y c) Fractura de la probeta a los 44452 ciclos.



5.1.3 Resultados de los Ensayos de Fatiga Axial

Los resultados obtenidos para cada una de las pruebas de fatiga axial desarrolladas se encuentran en el [anexo 6](#).

En la [tabla 5.2](#) se muestran los resultados obtenidos del crecimiento de grieta para la prueba piloto, nótese que los valores de crecimiento corresponden a la relación entre longitud de crecimiento de la grieta (a_o) y la longitud de la muesca (a_m); por otra parte, la

figura 5.4 muestra curvas que relacionan gráficamente los valores tabulados en la tabla 5.2. Cada una de éstas curvas corresponde a una prueba piloto específica y se asocia en función de la relación entre el espesor y el ancho de la probeta.

En la tabla 5.3 se muestra un consolidado de las pruebas realizadas, en ella se comparan los resultados obtenidos con relación al número de ciclos tanto para las pruebas piloto como para las pruebas con los métodos de reparación. Obsérvese que se indica la relación espesor / ancho (t/w) y la longitud inicial de la muesca para la probeta en prueba (a₀); y, en particular, para el caso de los métodos de reparación, se relaciona también el número de ciclos en los cuales se detuvo la prueba para realizar la reparación correspondiente. En la figura 5.5 se grafican los valores obtenidos para las pruebas.

Tabla 5.2. Registros de Crecimiento de la Grieta de Fatiga obtenidos para la Prueba Piloto

N (ciclos)	a ₀ /a _m		
	PP-1	PP-2	PP-3
5000	1,000	1,000	1,000
10000	1,000	1,000	1,000
13000	1,082	1,069	1,159
16000	1,195	1,194	1,189
19000	1,288	1,280	1,285
22000	1,348	1,376	1,363
25000	1,568	1,566	1,581
28000	1,866	1,995	2,093
31000	2,213	2,179	2,229
34000	2,586	2,516	2,597
37000	2,928	3,036	2,941
39000	3,315	-	3,410
40000	3,662	3,497	3,748
Falla Súbita	40738	4,197	-
	40924	-	4,218
	41230	-	4,170

* PP: Prueba Piloto

Figura 5.4. Grafica de Crecimiento de la Grieta de Fatiga Axial para la Prueba Piloto

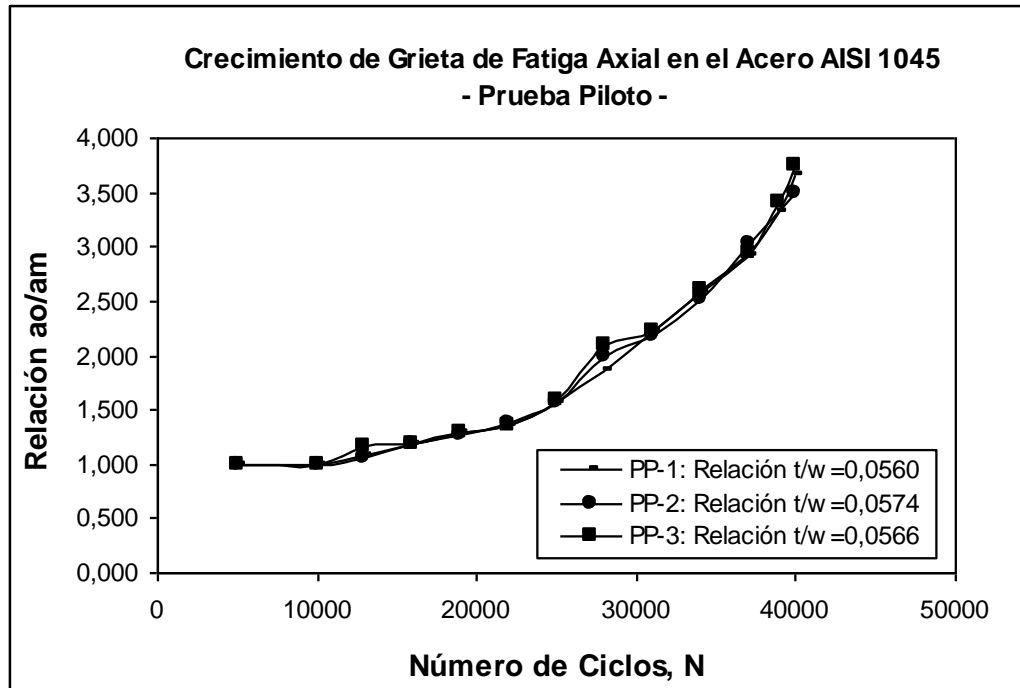
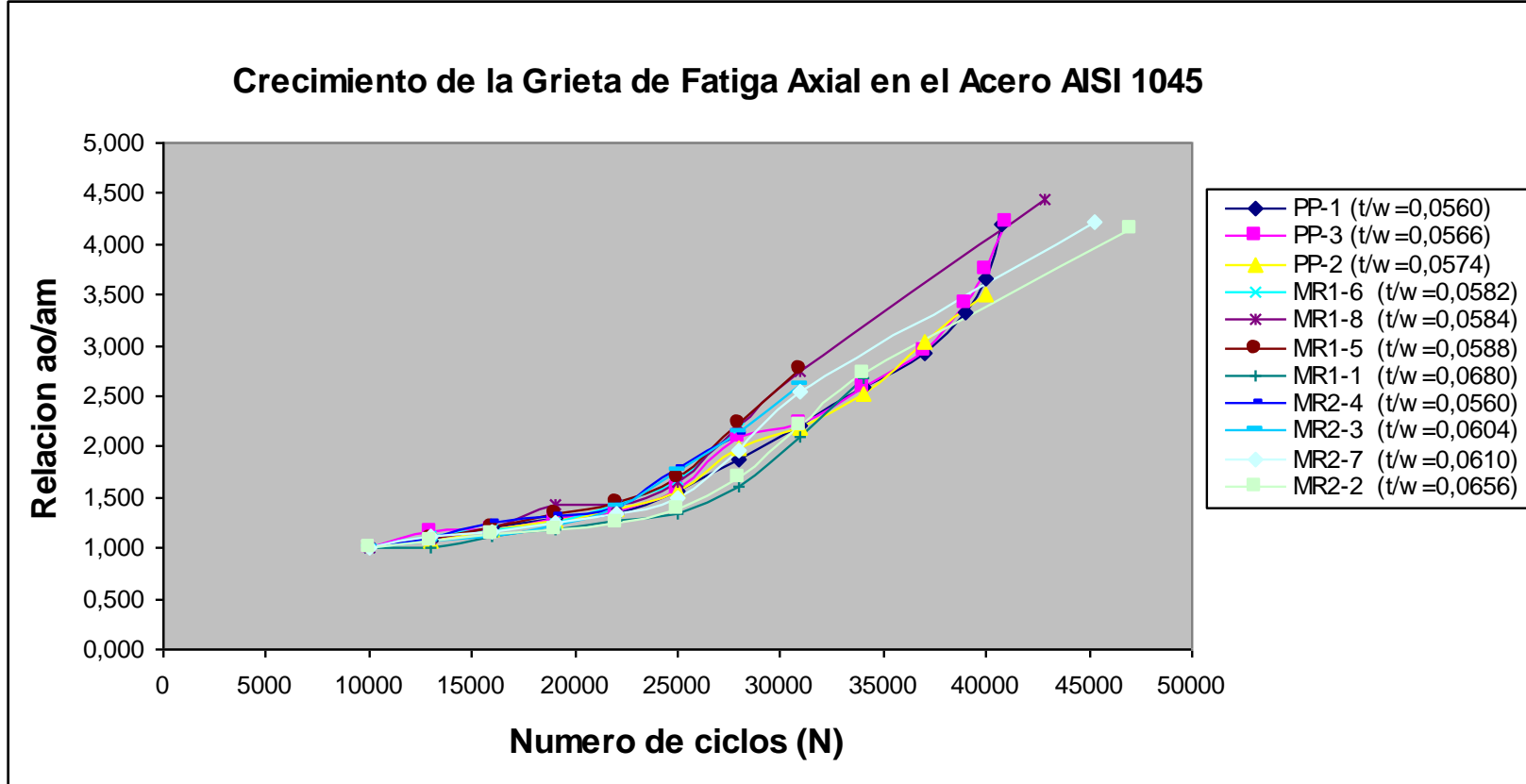


Tabla 5.3. Registros de Crecimiento de la Grieta de Fatiga para las Pruebas de Fatiga Axial.

Probeta	Ciclos antes de reparación	Ciclos después de reparación	CICLOS TOTALES	am (mm)	t/w
<i>PRUEBA PILOTO</i>					
PP-1	-	-	40738	8,34	0,056
PP-2	-	-	41230	8,01	0,0574
PP-3	-	-	40924	8,18	0,0566
<i>REPARACION CON PINES</i>					
MR1-1	34000	17128	51128	8,35	0,068
MR1-5	31000	12376	43376	7,79	0,0588
MR1-6	31000	12020	43020	8,1	0,0582
MR1-8	31000	11802	42802	7,98	0,0584
<i>REPARACION CON PARCHES</i>					
MR2-2	34000	13056	47056	8,10	0,0656
MR2-3	31000	14358	45358	7,94	0,0604
MR2-4	31000	13452	44452	8	0,056
MR2-7	31000	14286	45286	8,04	0,061

* En la columna – Probeta - se especifica el tratamiento realizado a la probeta: PP para la prueba piloto, MR1 para el método de reparación con pines y MR2 para el método de reparación con parches. El número después del guión que sigue a esta nomenclatura es solo una rotulación que se utilizó durante la práctica para identificar la probeta que se estaba ensayando.

Figura 5.5. Crecimiento de Grietas obtenidos para las pruebas de Fatiga Axial desarrolladas.



5.2 CARACTERIZACIÓN MACROSCÓPICA Y MICROSCOPIA DE LA SUPERFICIE DE FRACTURA

La caracterización de la superficie de fractura para las probetas sometidas a los ensayos de fatiga se lleva a cabo desde dos puntos de vista: el punto de vista macroscópico donde se realiza una inspección visual de la superficie de fractura para observar el crecimiento de la grieta desde sus inicios hasta la falla final con el fin de captar características como la topografía de la superficie y, el modo de avance y crecimiento de la grieta entre otras; y el punto de vista microscópico utilizando microscopia SEM para identificar las estriaciones de fatiga.

5.2.1 Caracterización Macroscópica de la Superficie de Fractura

Las Figuras 5.6, 5.7 y 5.8 muestran algunas características de la superficie de fractura de las diferentes probetas después de realizado los ensayos de fatiga correspondientes.

Figura 5.6. Fotografía de la superficie de fractura de la probeta de acero 1045 sometida a fatiga axial de alto ciclaje empleada en la prueba piloto, aquí se puede apreciar la muesca tipo ojo de cerradura en la zona central de la probeta, la zona de crecimiento de grieta se aprecia con un color gris claro entre la muesca y los extremos de la probeta, y en los extremos de la probeta la zona con apariencia más oscura muestra la falla súbita del material.

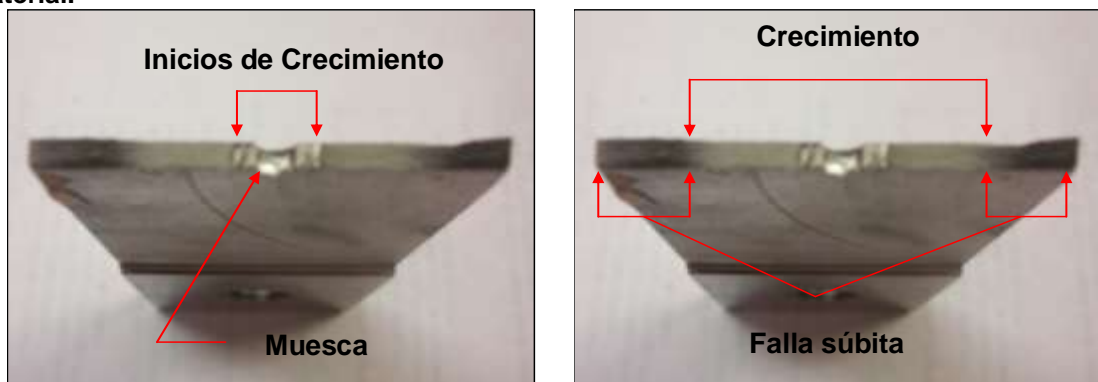


Figura 5.7. Fotografía de la superficie de fractura de la probeta de acero 1045 sometida a fatiga axial de alto ciclaje y reparada con pines de acero. a) Agujeros taladrados para introducir los pines, b) Pines anclados a la probeta después de la falla.

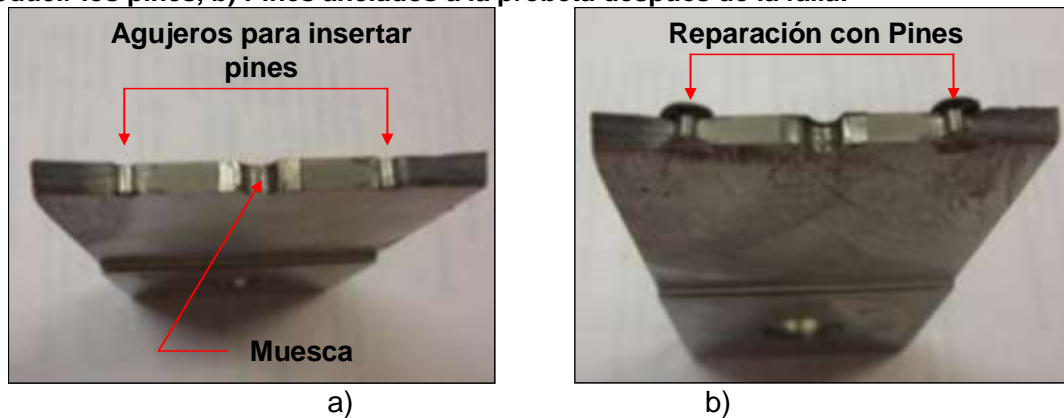
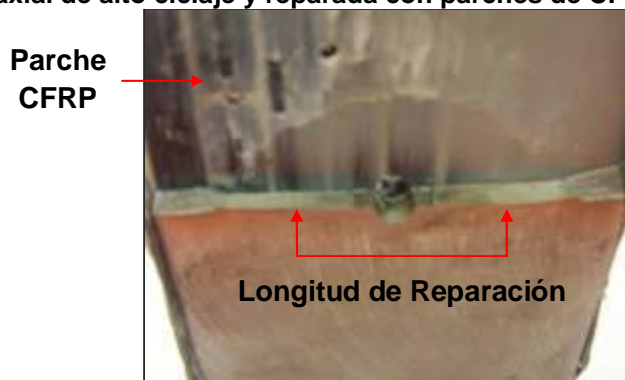


Figura 5.8. Fotografía de la superficie de fractura de la probeta de acero 1045 sometida a fatiga axial de alto ciclaje y reparada con parches de CFRP.



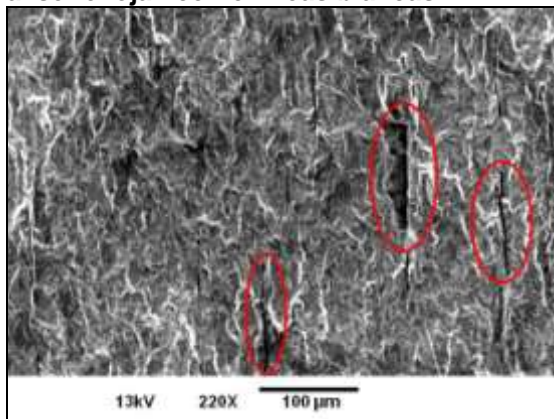
5.2.2 Caracterización Microscópica de la Superficie de Fractura

La caracterización microscópica se realiza sobre una muestra extraída de la superficie de fractura de las probetas falladas por fatiga, luego con la ayuda del Microscopio Electrónico de Barrido SEM se han capturado algunas imágenes que permiten realizar una observación más detallada sobre la sección de muestra seleccionada para análisis.

Generalidades encontradas en las superficies de fractura de las probetas ensayadas:

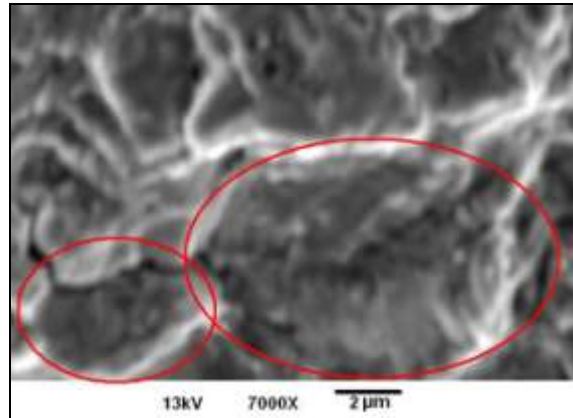
Un barrido general sobre la superficie de fractura de las probetas falladas por fatiga permite apreciar algunas inclusiones, (Figura 5.9). Estas se observan como líneas oscuras verticales que se encuentran dispersas en la totalidad de la superficie de fractura.

Figura 5.9. Fotomicrografía SEM de la superficie de fractura de una de las probetas de acero 1045 ensayadas a fatiga axial de alto ciclaje, 220X. Se observan las inclusiones producto del laminado del material como líneas oscuras verticales, el desprendimiento de material y la fractura dúctil del material se reflejan como líneas blancas.



Otro detalle que se observa en la superficie de fractura es la presencia de hoyuelos (Boids) como se muestra en la [figura 5.10](#), , lo que a su vez permite corroborar que la fractura de éste material fue de tipo copa y cono (dúctil).

Figura 5.10. Fotomicrografía SEM de la superficie de fractura de una de las probetas de acero 1045 ensayadas a fatiga axial de alto ciclaje, 7000X. Se observa una inclusión tipo hoyuelo.



El inicio del crecimiento de la grieta de fatiga parte desde el ojo de cerradura inducido ([Figura 5.11a](#)), las líneas laterales que parten desde el agujero central para formar este tipo de muesca, debido a sus dimensiones, fueron elaborados manualmente con el uso de segueta de relojería, por lo cual se aprecia un acabado superficial irregular y poco uniforme ([Figura 5.11b](#)). Por otra parte, realizando un aumento en magnificación sobre los extremos de los inicios es claramente observable acumulación de material ([Figura 5.11c](#)), lo cual es también producto de la fabricación de la muesca.

Otro detalle capturado de la superficie de fractura se muestra en la [Figura 5.12](#), en ella se observa la zona de transición entre la etapa final de crecimiento de la grieta y la falla súbita. Nótese la diferencia en la topografía de estas dos superficies, mientras la zona de crecimiento tiene una superficie plana, la falla súbita propicia un cambio de plano que da origen al labio de corte que se observa al final de la fractura, en esta zona se observa un desgarramiento del material producto del alto nivel de esfuerzo que se presenta en la zona.

Una característica observada en las probetas reparadas con parches de CFRP, es la visualización de las zonas de fractura antes y después de la reparación ([Figura 5.13](#)). La superficie se visualiza con una diferencia en tonos grisáceos que delimita como la zona más oscura la etapa anterior a la reparación y la etapa más clara como la etapa posterior a la reparación.

Figura 5.11. Fotomicrografías SEM de la superficie de fractura de una de las probetas de acero 1045 ensayadas a fatiga axial de alto ciclaje. a) Acabado superficial de la muesca, 40X; b) Morfología de los inicios del crecimiento de la grieta, 45X; c) Acumulación de material en un extremo de los inicios, 300X.

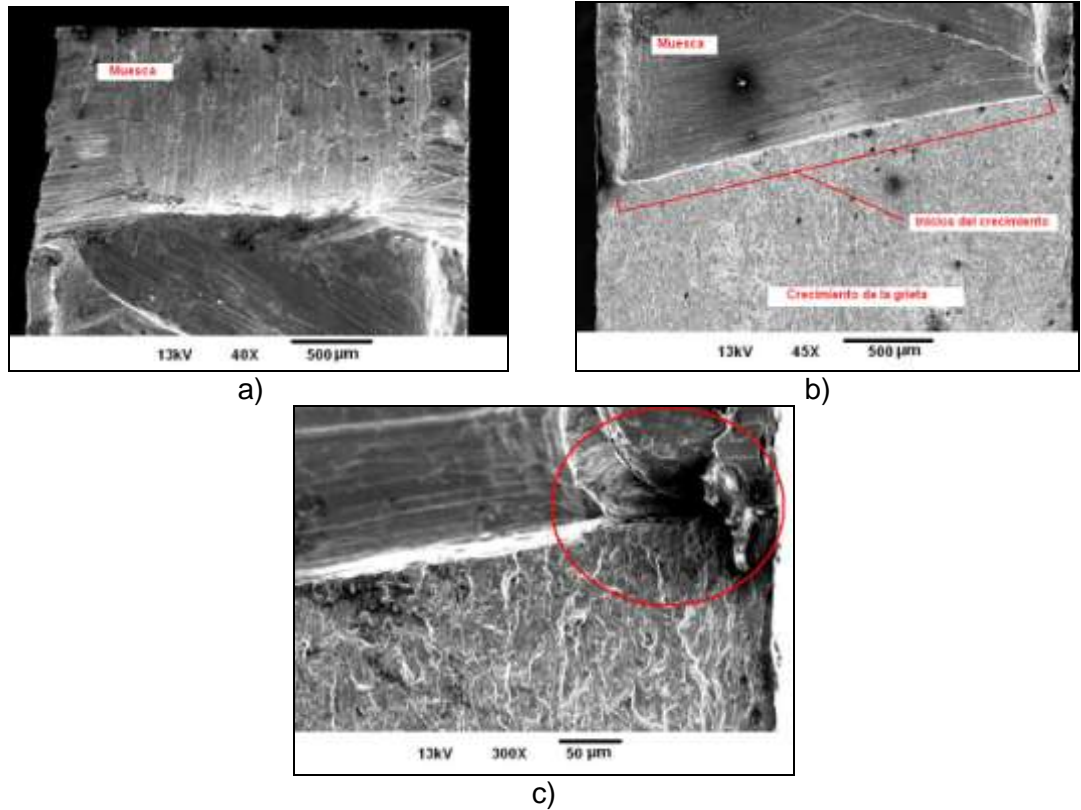


Figura 5.12. Fotomicrografía SEM de la superficie de fractura de una de las probetas de acero 1045 ensayadas a fatiga axial de alto ciclaje, 35X. Nótese la zona de transición entre la etapa final del crecimiento de la grieta de fatiga y la falla súbita.

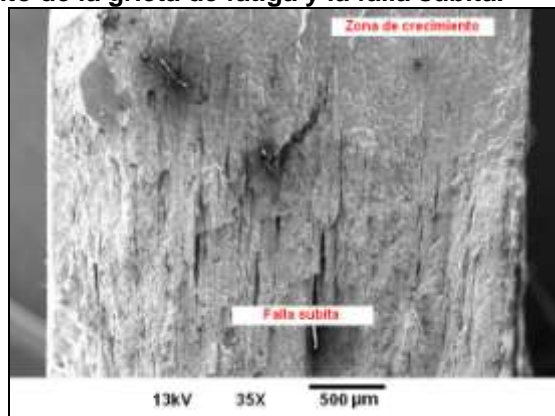
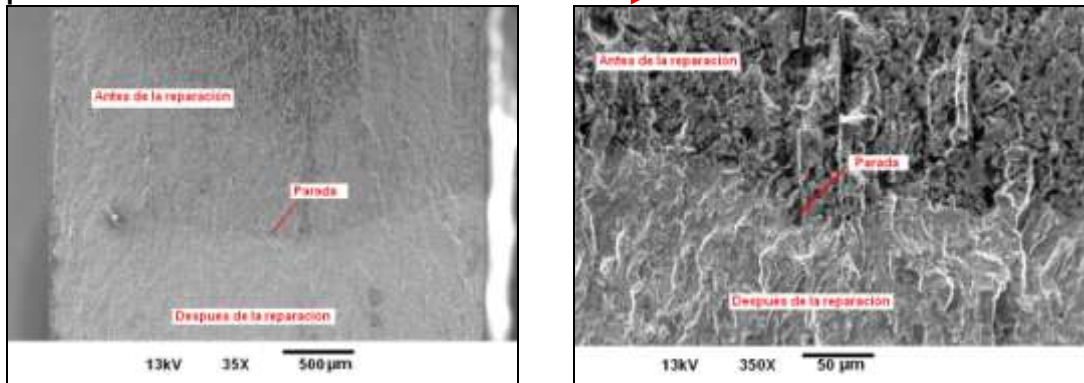


Figura 5.13. Fotomicrografías SEM de la superficie de fractura de una de las probetas de acero 1045 ensayadas a fatiga axial de alto ciclaje y a la cual se le ha aplicado parches de CFRP como método de reparación, 35X y 350X respectivamente. Se observa la zona de transición entre la etapa de crecimiento previa a la aplicación del método de reparación y posterior a la misma.



Estriaciones de fatiga en las probetas ensayadas:

Las Figuras 5.14, 5.15 y 5.16 muestran las estriaciones típicas de la falla por fatiga en las probetas ensayadas tanto para la prueba piloto como con cada uno de los métodos de reparación.

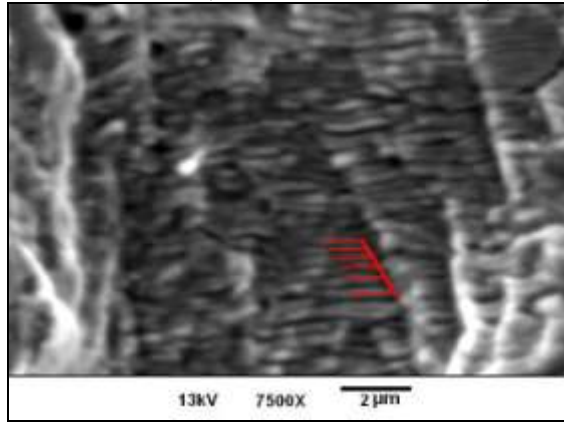
5.3 CARACTERIZACIÓN METALOGRAFICA

La caracterización metalográfica del acero AISI 1045 utilizado para las probetas de ensayo, se realiza sobre la muestra extraída para estudios microscópicos. Las muestras de cada método se preparan para el estudio metalográfico con el fin de observar su microestructura. La Figura 5.17 muestra la microestructura del acero tanto en estado de suministro como después de haber sido ensayado a fatiga.

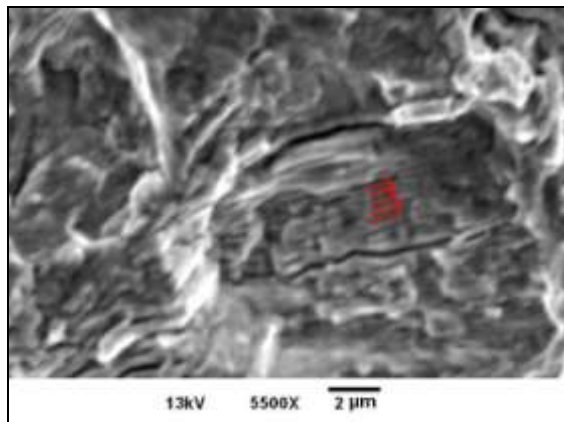
5.4 MICRODUREZA

Los valores de microdureza se toman sobre la sección de muestra seleccionada para metalografía. Las Figuras 5.18, 5.19 y 5.20 muestran cada una un barrido de microdureza realizado tanto para la prueba piloto como para las pruebas con los métodos de reparación

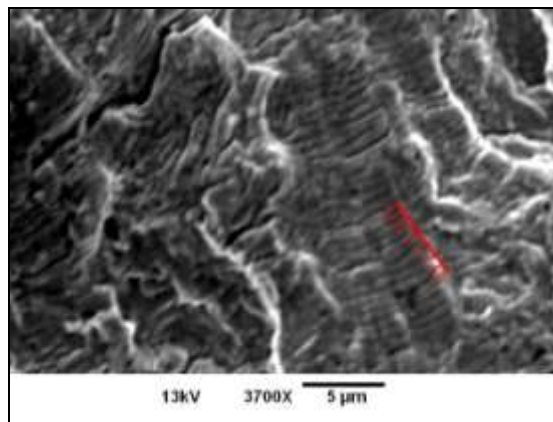
Figura 5.14. Fotomicrografías SEM de la superficie de fractura de una de las probetas de acero 1045 ensayadas a fatiga axial de alto ciclaje, empleada como prueba piloto, 40738 ciclos totales de falla con un crecimiento aproximado de 3133 ciclos/mm. Se observan las estrías de fatiga: a) Inicios de crecimiento de la grieta de fatiga, 6 estrías en 2 micras, 7500X, b) En una zona intermedia entre los inicios y la falla súbita, 5 estrías en 2 micras, 5500X, y c) En cercanías a la falla súbita, 9 estrías en 5 micras, 3700X.



a)

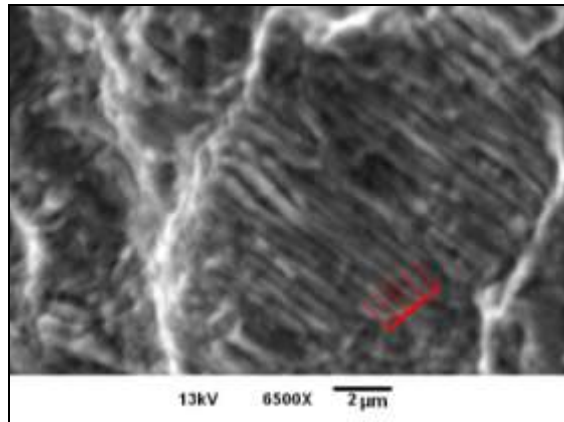


b)

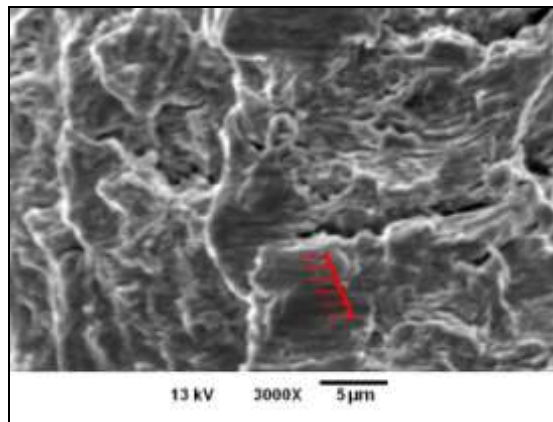


c)

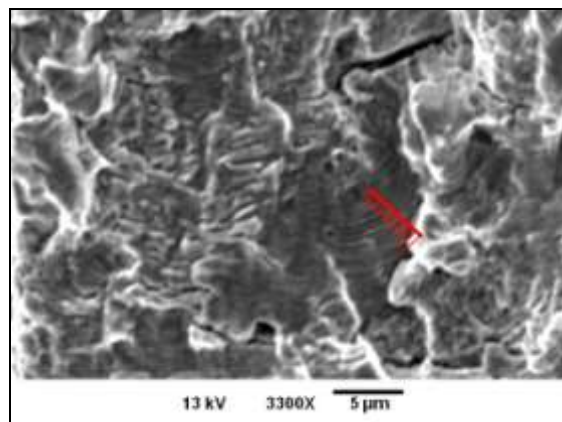
Figura 5.15. Fotomicrografías SEM de la superficie de fractura de una de las probetas de acero 1045 ensayadas a fatiga axial de alto ciclaje, reparadas con pines, 43020 ciclos totales de falla con un crecimiento aproximado de 3309 ciclos/mm. Se observan las estriaciones de fatiga: a) Inicios de crecimiento de la grieta de fatiga, 6 estrías en 2 micras, 6500X, b) Antes de reparar, 6 estrías en 5 micras, 3000X, y c) Después de la reparación, 11 estrías en 5 micras, 3300X.



a)

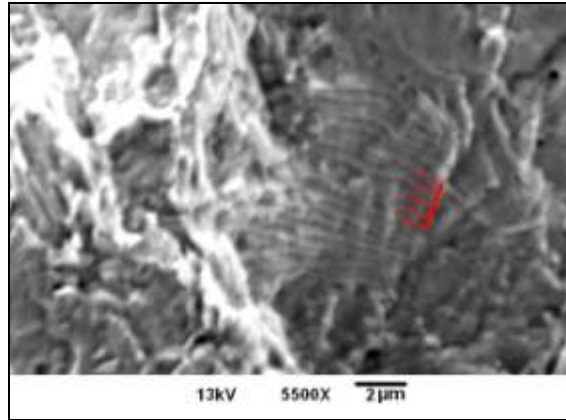


b)

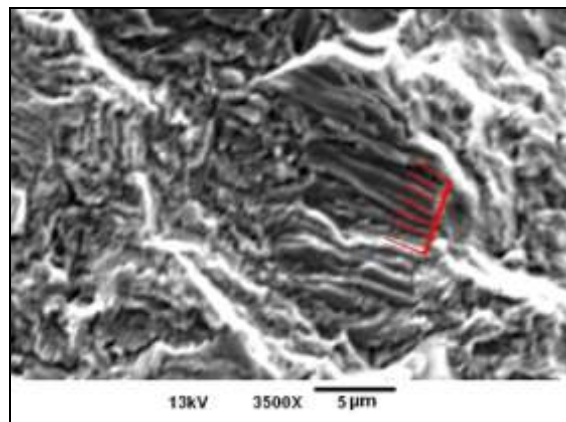


c)

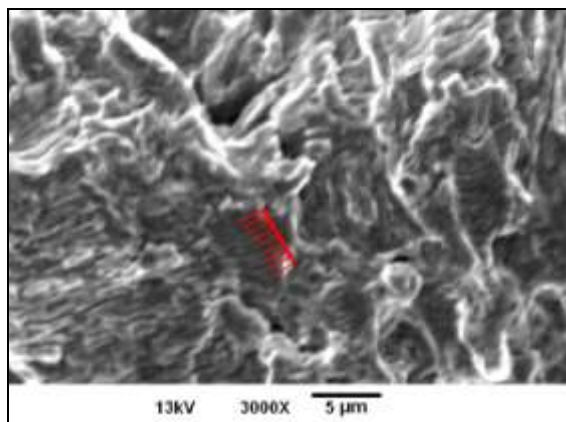
Figura 5.16. Fotomicrografías SEM de la superficie de fractura de una de las probetas de acero 1045 ensayadas a fatiga axial de alto ciclaje, reparadas con parches de CFRP, 45358 ciclos totales de falla con un crecimiento aproximado de 3489 ciclos/mm. Se observan las estriaciones de fatiga: a) Inicios de crecimiento de la grieta de fatiga, 5 estrías en 2 micras, 5500X, b) Después de la reparación, 7 estrías en 5 micras, 3500X d) Antes de la falla súbita, 9 estrías en 5 micras, 3000X.



a)

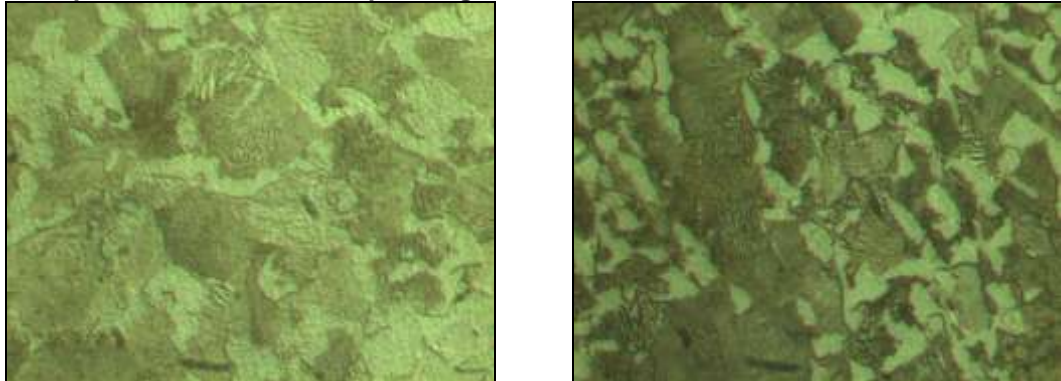


b)



c)

Figura 5.17. Metalografía realizada en cercanías a la superficie de fractura en la prueba piloto: Se observa la microestructura del acero AISI 1045, ferrita (áreas claras: 40%) y perlita (áreas oscuras: 60%), 100X, atacada con nital al 3%: a) Acero en estado de suministro, y b) Acero después de ser fracturado por fatiga.



a)

b)

Figura 5.18. Barrido de microdureza para la probeta utilizada en la prueba piloto.

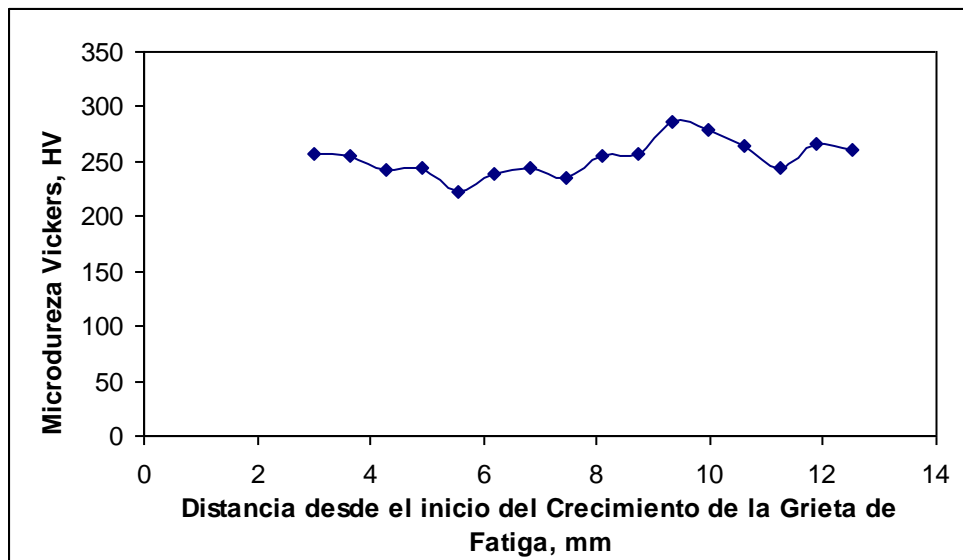


Figura 5.19. Barrido de microdureza para la probeta reparada con pines de acero.

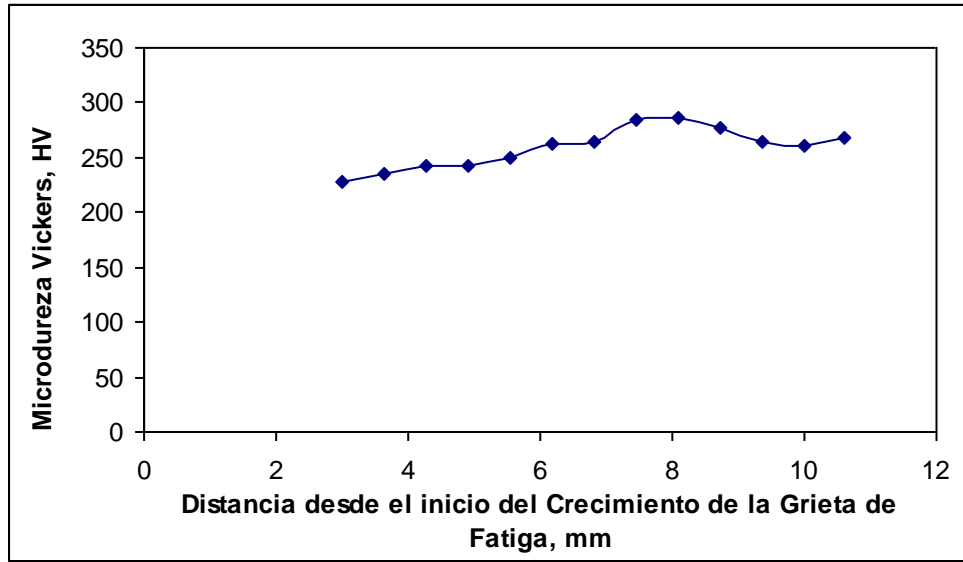
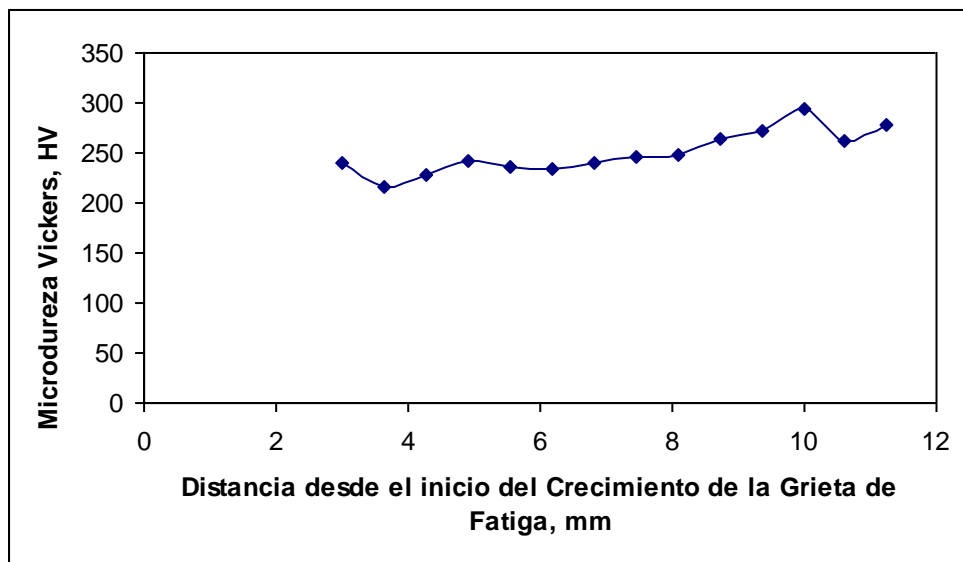


Figura 5.20. Barrido de microdureza para la probeta reparada con parches de CFRP.



Capítulo 6

ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis de los resultados obtenidos a partir de los ensayos de fatiga se realiza desde dos enfoques: El primero se basa en el tratamiento de los datos desde el punto de vista estadístico y de las teorías de mecánica de la fractura, y el segundo busca caracterizar la superficie de fractura resultante después de las pruebas de fatiga.

El tratamiento de los datos desde el punto de vista de las teorías de la mecánica de la fractura y la aplicación de los conceptos de diseño mecánico busca establecer correlaciones entre el número de ciclos, el crecimiento de la grieta y el factor de intensidad de esfuerzos, para establecer comparaciones con el Modelo de Crecimiento de Grieta de Paris – Erdogan.

El tratamiento estadístico de los datos se encamina principalmente a determinar el método más eficaz de crecimiento de grieta, sin embargo se debe tener presente la presencia de los factores de ruido en las pruebas, para ello se propone realizar un Análisis de Covarianza que permita aislar el efecto de dichos factores sobre la variable de respuesta.

Posteriormente, una inspección visual sobre la superficie de fractura permite realizar la caracterización de la misma a nivel macroscópico, seguido se realiza la caracterización a nivel microscópico empleando como herramienta de apoyo la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), con el fin de observar con más detalle dicha superficie y encontrar así las estriaciones típicas de la falla por fatiga. Finalmente, se realizan las pruebas de laboratorio pertinentes como metalografía y microdureza, para observar las características microestructurales del acero y obtener su valor de dureza respectivamente.

6.1 ANÁLISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS A PARTIR DE LOS ENSAYOS DE FATIGA AXIAL

Los resultados obtenidos de los ensayos de fatiga axial desarrollados se analizan estadísticamente para determinar correlaciones entre el crecimiento de la grieta y los

valores de ciclaje registrados para cada intervalo establecido. Con base en ello, se desarrolla un Análisis de Covarianza para los datos de crecimiento de grieta obtenidos de los ensayos de fatiga axial para determinar el método más eficaz de reparación.

Algunos conceptos de Diseño Mecánico con relación al crecimiento de grietas de fatiga se aplican para determinar el nivel de esfuerzo aplicado y el factor de concentración de esfuerzo para cada nivel de ciclaje alcanzado durante el crecimiento de la grieta hasta la fractura final; estos cálculos se emplean para determinar una ecuación de regresión que relacione estos parámetros, con el fin de realizar comparaciones con el modelo propuesto de Paris – Erdogan para el crecimiento de grietas dentro de las teorías de la Mecánica de la Fractura Lineal Elástica.

6.1.1 Análisis de Covarianza para los Datos de Fatiga Axial

El objetivo principal de esta investigación se centra en la determinación del método de reparación más eficaz en el retardo del avance del crecimiento de una grieta de fatiga una vez que se ha detectado dicho defecto en algún componente que se encuentra en servicio.

Las pruebas de fatiga realizadas en esta investigación permiten establecer la vida a fatiga axial que puede tener un componente de acero AISI 1045 una vez se advierte la presencia de una grieta; lo anterior gracias a la tabulación de los ciclos de vida cada cierto intervalo de tiempo establecido como se muestran en el [capítulo 5](#). Sin embargo, es importante destacar que de acuerdo con la experimentación planteada en el [apartado 3.6.4 del capítulo 3](#), el espesor de la probeta y la longitud inicial de la muesca son factores que varían su dimensión para cada una de las probetas utilizadas en la experimentación, debido a que no fue fácil su control durante la preparación de los ensayos de fatiga axial.

El espesor de la probeta y la longitud inicial de la muesca son factores que dependen de la precisión del proceso de fabricación empleado para su generación y sus valores varían dentro del rango de valores establecido en la [tabla 3.3](#), de acuerdo con ello éstos se consideran variables perturbadoras para la experimentación y desde el punto de vista estadístico es conveniente desarrollar un Análisis de Covarianza, que es una técnica para análisis de experimentos que se utiliza para mejorar la precisión del mismo,. Algunos aspectos teóricos sobre ésta técnica se comentan en el marco teórico relacionado en el [capítulo 1](#).

En el análisis de covarianza para los datos obtenidos experimentalmente de los ensayos de fatiga, la variable de respuesta observada es el número de ciclos hasta la falla (y) y las covariables son: el espesor de la probeta (x_1) y la longitud de la muesca (x_2), para cada una de ellas se desarrolla un análisis de covarianza con el objeto de determinar su efecto en la variable de respuesta y posteriormente determinar si son influyentes o no en el sistema a fin de establecer el método más eficaz de reparación. Es importante recordar que “el análisis de covarianza implica ajustar la variable de respuesta observada para el efecto de la covariable; si no se hace éste ajuste, la covariable podría inflar el cuadrado medio de error y hacer que sean más difíciles de detectar las verdaderas diferencias en la respuesta debidas a los tratamientos” [9]

Análisis de covarianza para el espesor de la probeta:

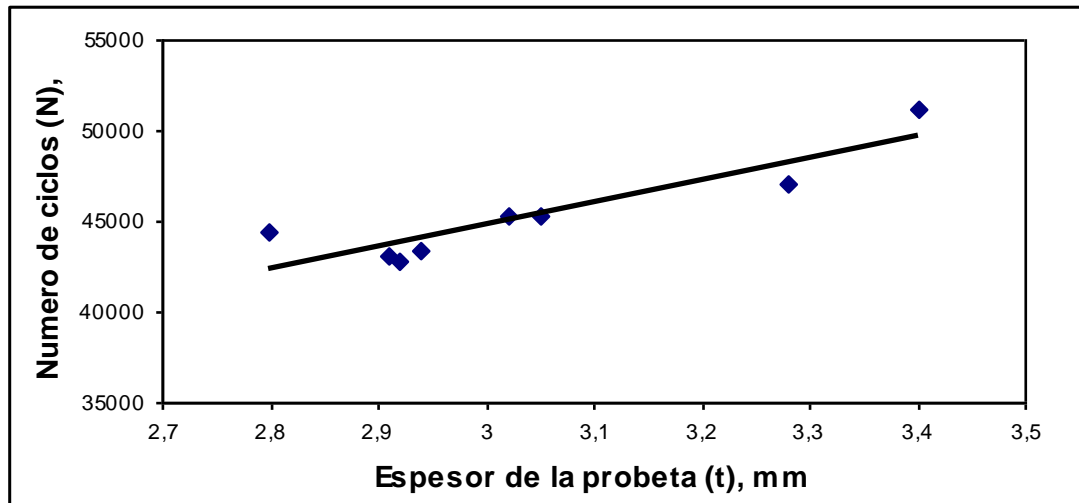
Inicialmente se infiere que el número total de ciclos va a depender del espesor de la probeta debido a que con un mayor espesor el área transversal de la probeta es mayor por tanto el crecimiento de la grieta se vería afectado por la cantidad de material que hay que fracturar y todo ello se refleja en un incremento en la vida a fatiga; por ello el interés se encuentra en determinar si existe influencia significativa de los espesores utilizados en las probetas en la vida a fatiga de las mismas

El juicio anterior se somete a evaluación elaborando un diagrama de dispersión como el que se muestra en la **figura 6.1** de acuerdo con los datos tabulados en la **tabla 6.1**, de allí se observa una clara tendencia a una relación lineal entre estas dos variables, por lo cual parece apropiado eliminar el efecto del espesor sobre el número de ciclos de vida de la probeta mediante el desarrollo de un análisis de varianza.

Tabla 6.1. Datos para el Análisis de Covarianza para el Espesor de la Probeta

Réplica	MR1		MR2	
	y	x1	y	x1
1	51128	3,4	47056	3,28
2	43376	2,94	45358	3,02
3	43020	2,91	44452	2,8
4	42802	2,92	45286	3,05
Sumatoria	180326	12,17	182152	12,15
Promedio	45081,5	3,0425	45538	3,0375

Figura 6.1. Diagrama de dispersión para el Número de Ciclos de Vida a Fatiga – Vs – el Espesor de la probeta.



Es importante destacar que para efectos de cálculos se decidió dividir cada uno de los valores de la **tabla 6.1** por un factor de 100.

De acuerdo con lo establecido en la teoría del capítulo 1: Suponiendo que la relación lineal entre el número de ciclos y el espesor es apropiada, el modelo de regresión que se ajusta se expresa en la Ec.6.1

$y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta (x_{ij} - \bar{x}_{..}) + \varepsilon_{ij}$	$\begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, n \end{cases}$	Ec.6.1
----------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------	--------

El análisis de covarianza muestra los resultados que se presentan tabla 6.2, donde se observa las sumas de cuadrados y los productos cruzados para las variables (x,y), los ajustes para la regresión incluyendo los grados de libertad y el cuadrado medio del error, y los valores para los estadísticos de prueba.

Tabla 6.2. Análisis de Covarianza de los datos del Número de ciclos de Vida a Fatiga para el espesor de la probeta

Fuente de variación	GDL	Suma de cuadrados			Ajustados para la regresión			Fo	P
		x	xy	y	y	GDL	MSE		
Método de reparación	1,00	5,00E-09	-0,00046	41,68					
Error	6,00	2,866E-05	0,3515	5249,44	938,06	5,00	187,61		
Total	7,00	2,866E-05	0,3510	5291,12	991,68	6,00			
Método de Reparación ajustados					53,62	1,00	53,62	0,29	0,6158

Para probar la hipótesis nula de que los métodos de reparación intervienen en la vida a fatiga de las probetas, se calcula el estadístico de prueba $F_o=0.29$ (tabla 6.2) y $F_{\alpha, a-1, a(n-1)-1}=4,06$, para $\alpha = 0.1$, $a=2$ y $n=4$. Con el valor de $P=0,6158$, y como $F_o < F_{\alpha, a-1, a(n-1)-1}$, no puede rechazarse la hipótesis nula; por lo tanto, existe una evidencia sólida de que el método de reparación empleado influye en el número de ciclos de vida de la probeta.

De acuerdo con los datos de la tabla 6.2, el coeficiente de regresión $\beta = 12266,15$. Ahora debe probarse la hipótesis de que $H_o:\beta=0$, calculando el estadístico de prueba (F_o) de acuerdo con la ecuación 1.10 se tiene que $F_o=22,98$, y $F_{\alpha, 1, a(n-1)-1}=16,26$, como $F_o > F_{\alpha, 1, a(n-1)-1}$, se rechaza la hipótesis nula; por consiguiente, existe una relación lineal entre el número de ciclos y el espesor. En consecuencia, el ajuste proporcionado por el análisis de covarianza fue necesario.

La comparación entre las medias se muestra en la tabla 6.3, de allí se obtienen

Tabla 6.3. Comparación entre medias para los Métodos de Reparación.

Medias	Sin ajustar	Ajustados
\bar{y}_{1i}	45081,5	45051
\bar{y}_{2i}	45538	45569

Finalmente se procede con la verificación del diagnóstico del modelo de covarianza el cual se basa en el análisis residual, para ello se realizan gráficas de residuales contra los valores ajustados de la variable de respuesta (Figura 6.2), residuales contra la covariable (Figura 6.3), y residuales contra los métodos de reparación (Figura 6.4). Estas gráficas no revelan ninguna desviación importante de los supuestos, por lo que se concluye que el modelo de covarianza es apropiado para los datos de Número de Ciclos.

Figura 6.2. Gráfica de Residuales contra valores ajustados para el número de ciclos.

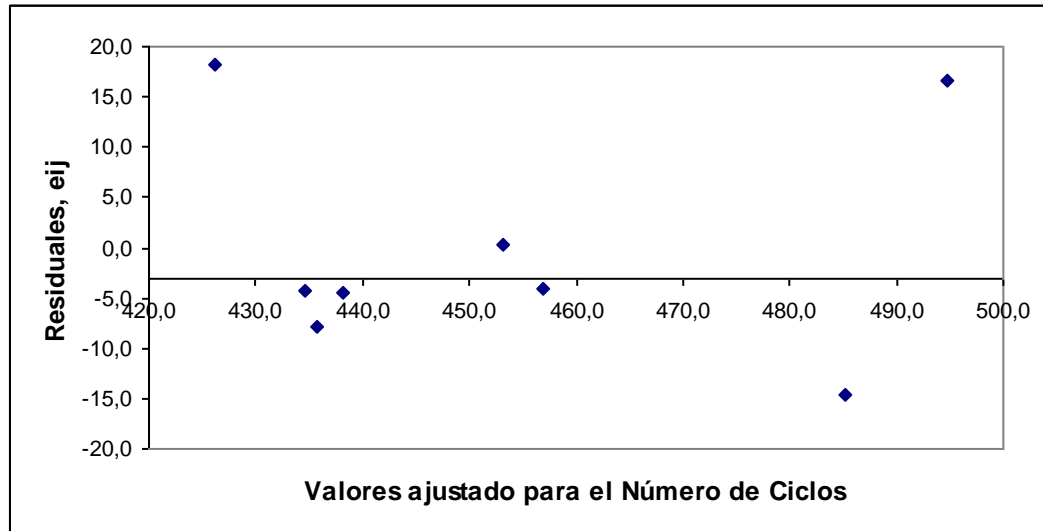


Figura 6.3. Gráfica de Residuales contra el Espesor de la Probeta.

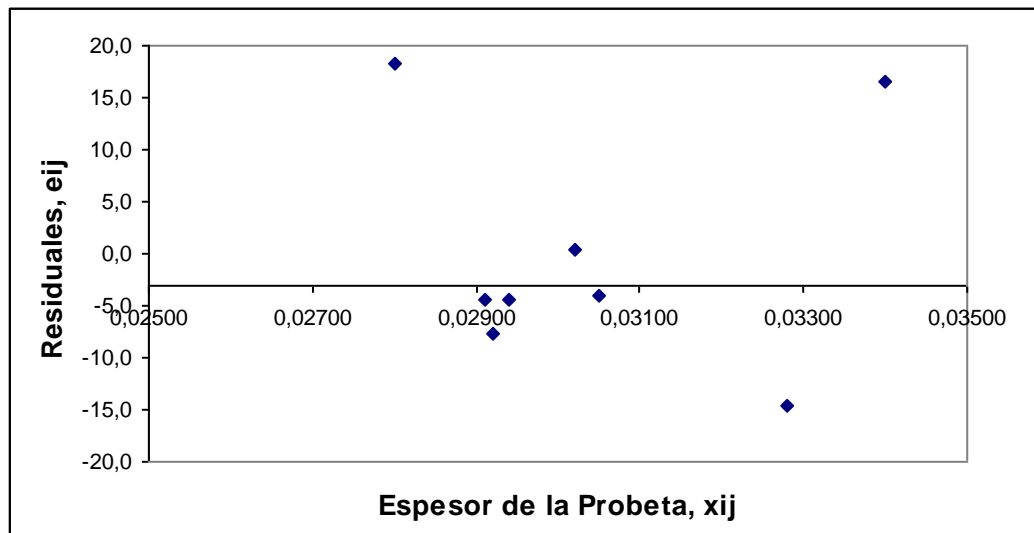
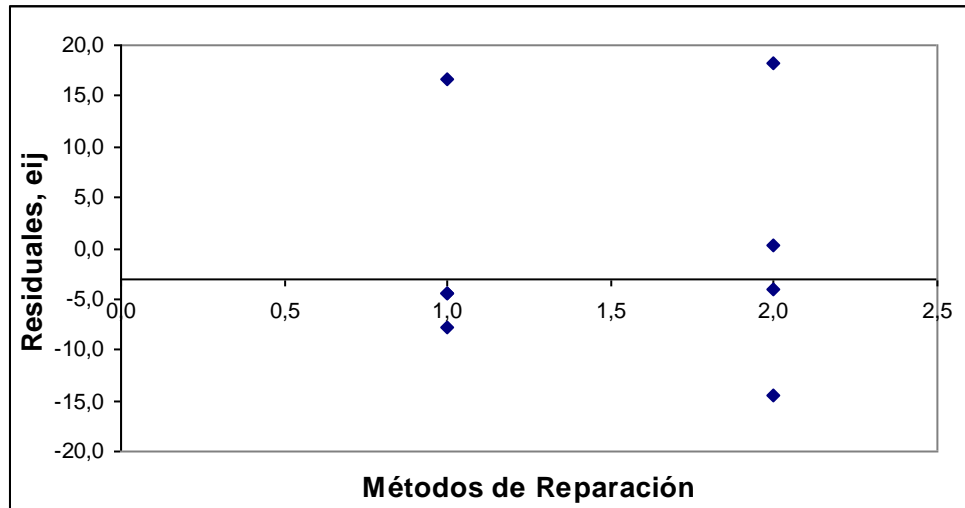


Figura 6.4. Gráfica de Residuales contra Métodos de Reparación.



Análisis de covarianza para la longitud inicial de la muesca

De la misma manera que se evalúa la conveniencia de realizar el análisis de covarianza para la variación del espesor, se plantea ahora dicha conveniencia para la longitud inicial de la muesca, para ello se elabora el diagrama de dispersión (figura 6.5), para los datos de la tabla 6.4. De donde se obtiene que se evidencia una clara tendencia a una relación lineal entre estas dos variables; sin embargo, se desarrolla el análisis suponiendo que existe una relación lineal y con base en ello los resultados se muestran en la tabla 6.5.

Tabla 6.4. Datos para el Análisis de Covarianza para la Longitud inicial de la Muesca.

Réplica	MR1		MR2	
	y	x	y	x
1	51128	8,35	47056	8,1
2	43376	7,79	45358	7,94
3	43020	8,1	44452	8
4	42802	7,98	45286	8,04
Sumatoria	180326	32,22	182152	32,08
Promedio	45081,5	8,055	45538	8,02

Aquí también, es importante destacar que para efectos de cálculos se decidió dividir cada uno de los valores de la tabla 6.1 entre un factor de 100.

Figura 6.5. Diagrama de dispersión para el Número de Ciclos de Vida a Fatiga – Vs – La longitud inicial de la muesca.

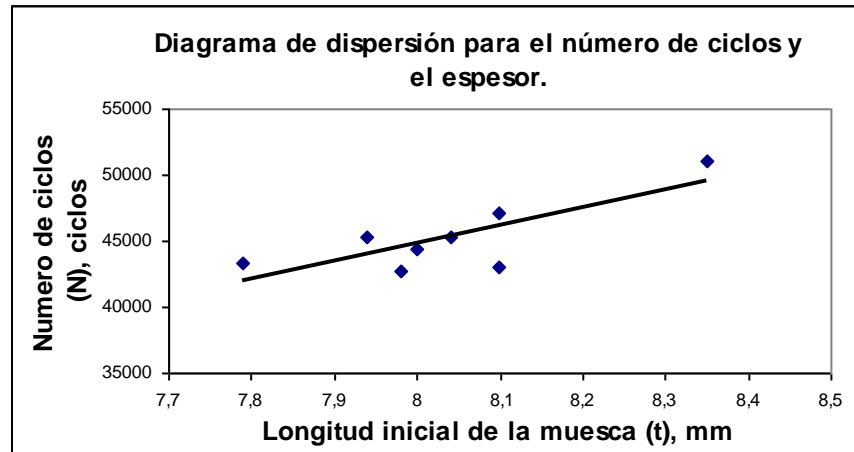


Tabla 6.5. Análisis de Covarianza de los datos del Número de ciclos de Vida a Fatiga para la longitud inicial de la muesca.

Fuente de variación	GDL	Suma de cuadrados			Ajustados para la regresión			Fo	P
		x	xy	y	y	GDL	Cuad medio		
Método de reparación	1,00	2,45E-07	-0,00320	41,68					
Error	6,00	1,785E-05	0,2466	5249,44	1841,55	5,00	368,31		
Total	7,00	1,809E-05	0,2434	5291,12	2015,92	6,00			
Método de Reparación Ajustados					174,37	1,00	174,37	0,47	0,5220

Para probar la hipótesis nula de que los métodos de reparación intervienen en la vida a fatiga de las probetas, se calcula el estadístico de prueba $F_o=0,47$ (tabla 6.5) y $F_{\alpha,a-1,a(n-1)-1}=4,06$, para $\alpha = 0.1$, $a=2$ y $n=4$. Con el valor de $P=0,5220$, y como $F_o < F_{\alpha,a-1,a(n-1)-1}$, no puede rechazarse la hipótesis nula; por lo tanto, existe una evidencia sólida de que el método de reparación empleado influye en el número de ciclos de vida de la probeta.

De acuerdo con los datos de la tabla 6.5, el coeficiente de regresión $\beta = 13817,31$. Ahora debe probarse la hipótesis de que $H_o:\beta=0$, calculando el estadístico de prueba (F_o) de acuerdo con la ecuación 1.10 se tiene que $F_o=9,25$, y $F_{\alpha,1,a(n-1)-1}=16,26$, como $F_o < F_{\alpha,1,a(n-1)-1}$ no puede rechazarse la hipótesis nula; por consiguiente, no existe evidencia de alguna relación lineal entre el número de ciclos y el espesor de la probeta para esta experimentación, en consecuencia el ajuste proporcionado por el análisis de covarianza no fue necesario.

Finalmente, se observa que el número total de ciclos de vida a fatiga para la probeta se encuentra fuertemente afectado por el espesor de la misma y de manera muy débil por la longitud de la muesca; por consiguiente, fue pertinente el ajuste realizado por el análisis de covarianza para el caso del espesor, de donde se obtiene a su vez que de acuerdo con los datos ajustados y aislando el efecto de la covariable, el método de reparación que proporciona un mejor comportamiento, desde el punto de vista estadístico, ante la detención del crecimiento de la grieta es el que emplea parches de CFRP.

6.1.2 Análisis a partir de la Aplicación de las Teorías de Diseño y Mecánica de la Fractura Lineal Elástica

Con base en el número de ciclos tabulados a partir de los ensayos de fatiga axial para la prueba piloto, se pueden establecer relaciones entre el crecimiento de la grieta de fatiga, el factor de intensidad de esfuerzo y el número de ciclos de vida para la probeta ensayada.

Se toma como referencia para éste análisis los valores de la prueba piloto, debido a que es precisamente de ésta prueba de donde se obtienen valores registrados cada cierto intervalo de ciclos transcurridos de acuerdo con la longitud de crecimiento de la grieta, desde sus inicios hasta la falla súbita; por consiguiente, al contar con la mayor cantidad de datos registrados con relación al crecimiento de la grieta de fatiga se puede establecer una mejor correlación entre los parámetros antes mencionados

En la **tabla 6.6** se muestran los valores obtenidos para la variación de los esfuerzos y el factor de intensidad de esfuerzo en función del crecimiento de la grieta de fatiga para cada ciclo de carga para una de las pruebas piloto realizadas, donde a_0/a_m es la relación entre la longitud de crecimiento alcanzada por la grieta y la longitud de la muesca, S_{max} y S_{min} son el esfuerzo máximo y el esfuerzo mínimo respectivamente, ΔS es el rango de esfuerzo y se determina como la diferencia entre S_{max} y S_{min} , β es un factor geométrico que depende de la geometría de la pieza, el tipo de carga y la razón de crecimiento de la grieta, K_{max} y K_{min} son el factor de intensidad de esfuerzo máximo y mínimo respectivamente, Δk es el rango del factor de intensidad de esfuerzo y R es la relación de esfuerzo de fatiga.

Las relaciones $\Delta K/\Delta K^*$ y N/N^* se grafican versus el crecimiento de la grieta, donde ΔK^* y N^* son entonces valores de referencia tomados como $53.8\text{Mpa}(m)^{0.5}$ y 10000ciclos respectivamente.

Nótese que el rango de esfuerzo aumenta significativamente con el incremento en el ciclo de carga y el crecimiento de la grieta, hasta llegar a doblarse su valor al final del crecimiento de la grieta, es decir, a principios de la falla súbita; para el caso del factor de intensidad de esfuerzo, éste valor aumenta en cinco veces su valor inicial al finalizar el crecimiento lo cual lleva a determinar la importancia de éstos parámetros cuando existe una grieta que puede crecer deliberadamente con el incremento en la carga del sistema.

Tabla 6.6. Resultados obtenidos para la variación del rango de esfuerzos y el factor de intensidad de esfuerzo, de acuerdo con el ciclaje y el crecimiento de grieta tabulados. Los datos de esta tabla corresponden a los obtenidos para la prueba piloto 1.

N	a_0 medido	a_0/a_m	Smax	Smin	ΔS	β	Kmax	Kmin	ΔK	$\Delta K/\Delta K^*$	N/N*
(ciclos)	(mm)		Mpa	Mpa	Mpa		Mpa(m) ^{0,5}	Mpa(m) ^{0,5}	Mpa(m) ^{0,5}		
5000	8,34	1,000	300,05	42,86	257,18	1,29	62,77	8,97	53,80	1,000	0,500
10000	8,34	1,000	300,05	42,86	257,18	1,29	62,77	8,97	53,80	1,000	1,000
13000	9,02	1,082	305,03	43,58	261,45	1,26	64,84	9,26	55,58	1,033	1,300
16000	9,97	1,195	312,27	44,61	267,66	1,23	68,06	9,72	58,34	1,084	1,600
19000	10,74	1,288	318,39	45,48	272,91	1,21	70,91	10,13	60,78	1,130	1,900
22000	11,24	1,348	322,50	46,07	276,43	1,20	72,86	10,41	62,46	1,161	2,200
25000	13,08	1,568	338,57	48,37	290,20	1,18	80,77	11,54	69,23	1,287	2,500
28000	15,56	1,866	362,95	51,85	311,10	1,16	93,28	13,33	79,96	1,486	2,800
31000	18,46	2,213	396,32	56,62	339,70	1,16	111,15	15,88	95,27	1,771	3,100
34000	21,57	2,586	439,68	62,81	376,87	1,18	135,52	19,36	116,16	2,159	3,400
37000	24,42	2,928	488,66	69,81	418,85	1,22	164,57	23,51	141,06	2,622	3,700
39000	27,65	3,315	559,28	79,90	479,39	1,27	209,22	29,89	179,33	3,333	3,900
40000	30,54	3,662	642,34	91,76	550,58	1,34	265,74	37,96	227,78	4,234	4,000
40738	35	4,197	833,33	119,05	714,29	1,49	410,98	58,71	352,27	6,548	4,074

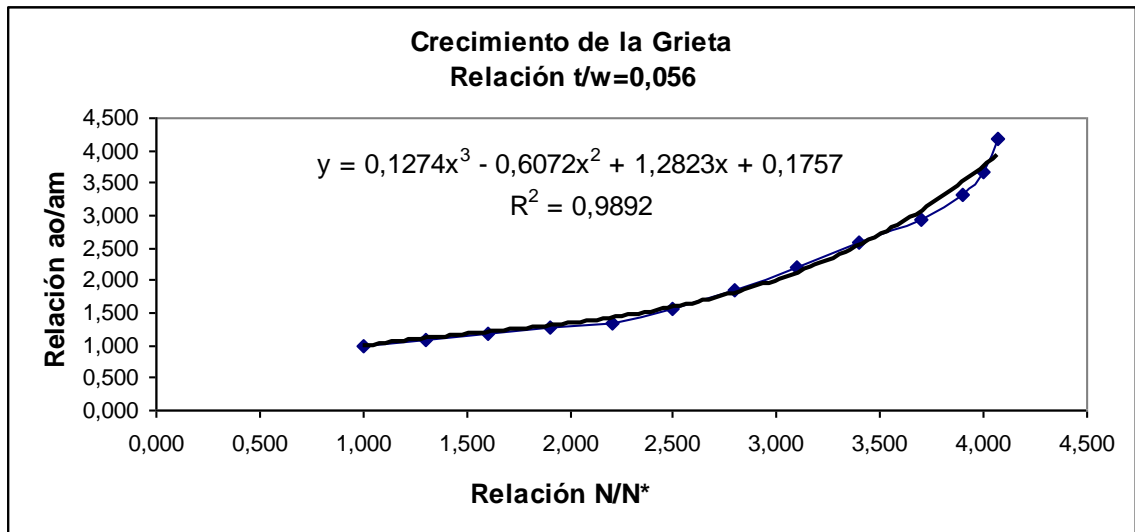
La **figura 6.6** muestra un par de gráficas donde se relaciona el crecimiento de la grieta de fatiga con el número de ciclos y el factor de intensidad de esfuerzo respectivamente, para la prueba piloto. La línea de tendencia que mejor se ajusta al comportamiento de los datos, sugiere un modelo de regresión de tipo polinomial de tercer orden, con base en ello se plantea una ecuación de regresión que relacione las variables de interés.

Las variables de regresión para el modelo son: el número de ciclos y el factor de intensidad del esfuerzo, y la variable de respuesta es el crecimiento de la grieta de fatiga; a partir de ellas se estima un modelo de regresión para el crecimiento de la grieta con base en los resultados experimentales obtenidos para la prueba piloto, y posteriormente dicho modelo puede ser comparado con el modelo teórico de crecimiento de grieta de Paris-Erdogan.

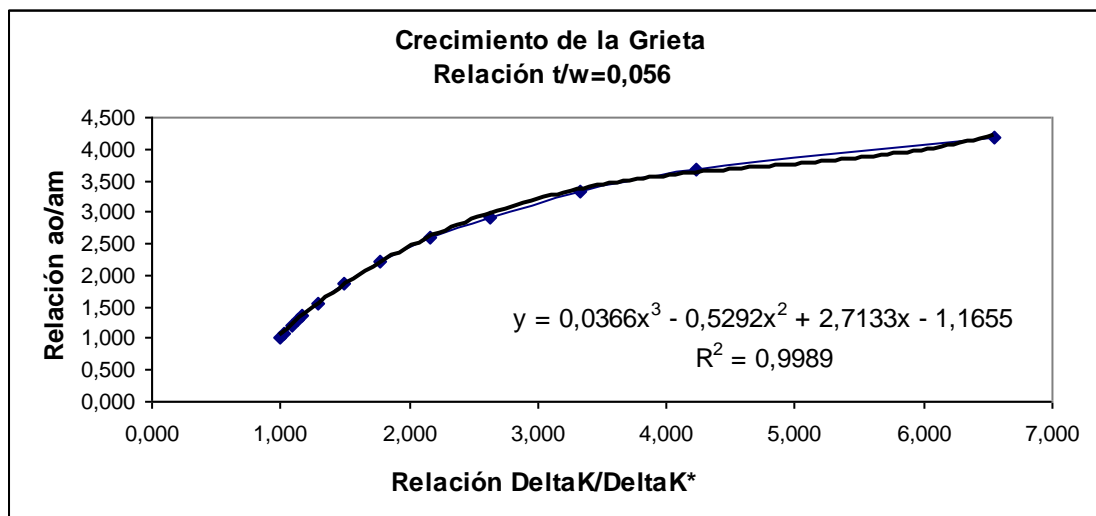
Por otra parte, la **figura 6.7**, muestra gráficamente la relación entre el número de ciclos de vida a fatiga, el factor de intensidad del esfuerzo y el crecimiento de la grieta para una de las pruebas evaluadas con cada método en esta investigación. De esta gráfica se puede observar que el mayor crecimiento de la grieta se presenta para la probeta reparada con pines, lo cual podría sugerir una mayor vida a fatiga para esta probeta, lo cual no es necesariamente así; pues la razón por la cual se presenta este incremento se debe a que la relación entre el espesor y el ancho de esta probeta es mayor que para la de los otros dos casos. Por consiguiente la mayor vida a fatiga se obtiene para la probeta reparada con parches de CFRP, aun cuando su relación t/w sea menor que la de la probeta reparada con pines, de lo cual se puede inferir que éste método retarda mayormente la propagación de la grieta de fatiga.

Figura 6.6. Para la prueba piloto: a) Gráfica que relaciona el número de ciclos de vida de la probeta con el crecimiento de la grieta de fatiga, b) Gráfica que relaciona el número de

ciclos de vida de la probeta con el Factor de Intensidad de esfuerzo. Se muestra la línea de tendencia de los datos y la ecuación de regresión que mejor se ajusta a la distribución de los datos.

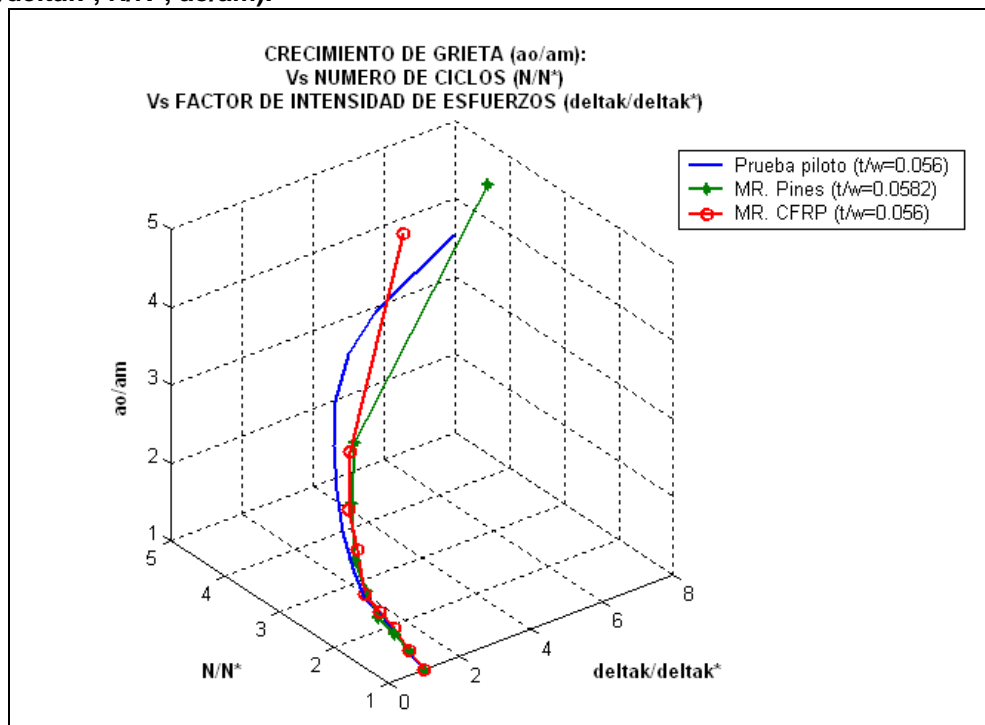


a)



b)

Figura 6.7. Grafica que ilustra la relación entre el número de ciclos de vida de la probeta de fatiga, el factor de intensidad de esfuerzo en la misma y el crecimiento de la grieta (deltak/deltak*, N/N*, ao/am).



6.1.3 Modelo de Regresión para el Crecimiento de la Grieta de Fatiga

Una vez identificadas las variables del modelo y el mejor ajuste para el mismo, se define una ecuación que describa de manera adecuada los datos, esta labor es más bien iterativa, pero sabiendo que el mejor ajuste es polinomial de tercer orden de acuerdo con los resultados de la [figura 6.6](#), se concentra la iteración en una ecuación de tercer orden; y empleando Matlab como herramienta informática de análisis, se procede a desarrollar el tratamiento estadístico de los datos con miras en la obtención del modelo de regresión para el crecimiento de la grieta de fatiga.

De todas las iteraciones posibles se elige aquella cuyo R^2 sea el más cercano a 1 y que la diferencia entre el valor de R^2 y el de $R^2_{ajustado}$ sea menor.

El modelo de regresión que mejor se ajusta a los datos se encuentra dado por la [ecuación 6.2](#).

$$y = \beta_1 + \beta_2 X_1^3 X_2 + \beta_3 X_1 X_2^3 + \beta_4 X_1 X_2 \tag{Ec.6.2}$$

Donde:

β : Coeficientes de Regresión

X: Variables de regresión – X_1 : Relación $deltak/deltak^*$, X_2 : Relación N/N^* -

Y: Variable de respuesta – Relación de crecimiento de la grieta (ao/am) -

La evaluación estadística del modelo de regresión planteado en matlab para el crecimiento de la grieta se encuentra en el **anexo 7**. Los valores para el coeficiente de regresión y el coeficiente de determinación múltiple (R^2) del modelo se tabulan en las **tablas 6.7 y 6.8** respectivamente. La **tabla 6.9**, muestra la comparación entre los valores de respuesta observados y los predichos.

Tabla 6.7. Coeficientes de regresión para el modelo de regresión que se ajusta con los datos de la prueba.

Coeficientes de Regresión			
β_1	β_2	β_3	β_4
0.4903	-0.0018	-0.0137	0.4441

Tabla 6.8. Coeficientes de Determinación Múltiple (R^2) para el modelo de regresión.

R^2	R^2_{Ajustado}	Diferencia
0.9970	0.9960	0.0010

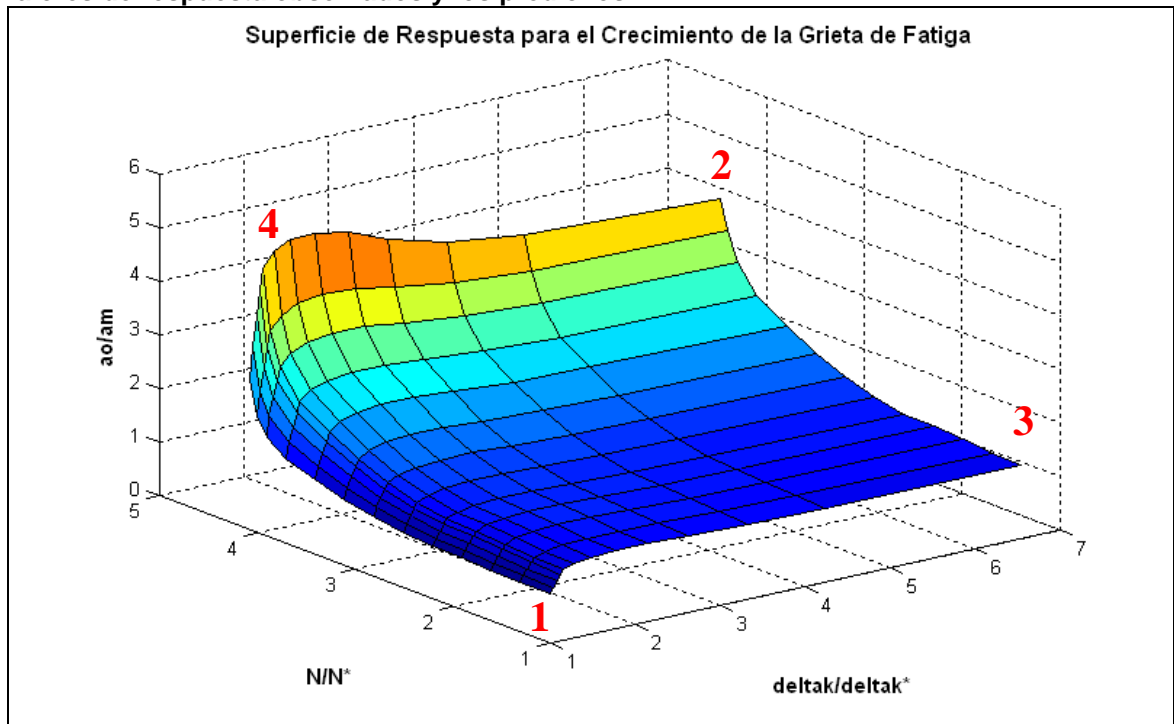
Tabla 6.9. Comparación entre los valores de crecimiento de grieta observados y los predichos.

$ao/am_{\text{observado}}$	ao/am_{predicho}
1,000	0.9189
1,082	1.0530
1,195	1.1961
1,288	1.3328
1,348	1.4493
1,568	1.6345
1,866	1.8752
2,213	2.1754
2,586	2.5272
2,928	2.8602
3,315	3.2945
3,662	3.7488
4,197	4.1821

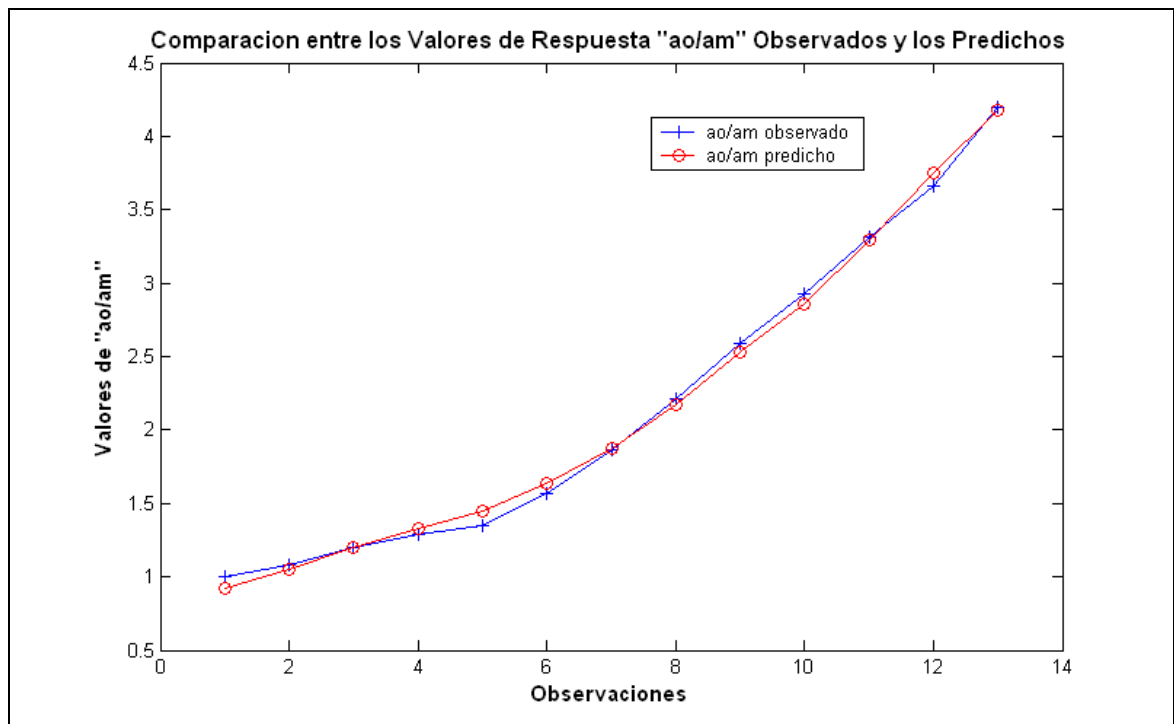
La **figura 6.8a** muestra la curva de superficie de respuesta para el crecimiento de la grieta de fatiga; de aquí se puede establecer que los valores de predicción más ajustados con el fenómeno real de crecimiento de grieta se establecen hacia la región central de la curva, partiendo desde la intersección entre el eje de $\Delta K/\Delta K^*$ y N/N^* en el punto 1 y avanzando en diagonal hacia el interior de la curva hacia el punto 2. Por el contrario, las regiones cercanas a los puntos 3 y 4, estiman valores que no son ajustables con la realidad; por ejemplo, tomando el punto 3 se observa que para un valor máximo de $\Delta K/\Delta K^*$ el valor de N/N^* es pequeño y por ende la grieta no crece, y esto no es necesariamente cierto.

La **figura 6.8b** ilustra gráficamente los datos de la **tabla 6.9** para los valores observados y los valores predichos, de donde se observa una variación mínima entre estos valores, por ende el modelo de regresión se ajusta con los resultados experimentales obtenidos.

Figura 6.8. Para la prueba piloto PP1: a) Superficie de respuesta, y b) Comparación entre los valores de respuesta observados y los predichos



a)



b)

Finalmente, la **ecuación 6.3** muestra el modelo de regresión correspondiente a los datos experimentales para los ensayos de fatiga.

$$y = 0.4903 - 0.0018 \left(\frac{\Delta K}{\Delta K^*} \right)^3 - 0.0137 \left(\frac{\Delta K}{\Delta K^*} \right) \left(\frac{N}{N^*} \right)^3 + 0.4441 \left(\frac{\Delta K}{\Delta K^*} \right) \left(\frac{N}{N^*} \right) \quad \text{Ec.6.3}$$

La **ecuación 6.3** se puede reescribir de acuerdo como se muestra en la **ecuación 6.4**,

$$a = 0.4903 - 0.0018 \Delta K^3 N - 0.0137 \Delta K N^3 + 0.4441 \Delta K N \quad \text{Ec.6.4}$$

En consecuencia el modelo de regresión para el crecimiento de grieta, de acuerdo con los resultados de esta investigación se encuentra dado por la **ecuación 6.5**.

$$\frac{da}{dN} = 0.0018 \Delta K^3 - \Delta K \cdot 0.0411 N^2 + 0.4441 \quad \text{Ec.6.5}$$

Los resultados obtenidos para el modelo de regresión, concuerdan con la teoría planteada por Paris-Erdogan. En esta teoría se establece que para aceros ferrítico-perlíticos los coeficientes de la **ecuación 6.6** son equivalentes a: $C = 6.9 \times 10^{-9}$ para $n = 3$. Donde C y n son constantes experimentales que dependen del material, relación de esfuerzo, medio ambiente, temperatura y frecuencia de aplicación de carga. [4].

$$\frac{da}{dN} = 6.9 \times 10^{-9} \Delta K^3 \quad \text{Ec.6.6}$$

Por consiguiente el modelo de regresión planteado se ajusta con los resultados experimentales obtenidos y satisface la teoría para crecimiento de grieta planteada por Paris- Erdogan.

6.2 CARACTERIZACIÓN MACROSCÓPICA Y MICROSCOPIA DE LA SUPERFICIE DE FRACTURA

A continuación se desarrolla el análisis correspondiente a los resultados obtenidos de la caracterización a nivel macroscópico y microscópico de la superficie de fractura de las probetas, después de haber realizado los ensayos de fatiga aplicando los métodos de reparación sugeridos.

6.2.1 Caracterización Macroscópica de la Superficie de Fractura

La inspección visual de la superficie de fractura de las probetas utilizadas como prueba piloto refleja una superficie plana, con un crecimiento de grieta de tipo lineal sobre el área transversal de la probeta partiendo desde los extremos concentradores de la muesca inducida hasta atravesar por completo el ancho de la probeta como se observa en la **Figura 5.6**, de lo cual se puede inferir que el concentrador empleado tipo ojo de cerradura es un buen inductor de esfuerzos y permite un crecimiento lineal de la grieta.

La longitud de la zona disponible para el crecimiento de la grieta en todas las probetas sometidas a la prueba de fatiga en esta investigación es de aproximadamente 42mm a

partir de los extremos de la muesca y en dirección normal al eje longitudinal de la probeta. En el caso de la prueba piloto 36mm aproximadamente son empleados en el crecimiento de la grieta mientras los 14mm restantes se consumen en una falla súbita del material dividida a lado y lado de la probeta cuando el esfuerzo aplicado en la práctica ha excedido por completo el esfuerzo de fluencia en la vecindad de la punta de la grieta que crece (Figura 5.6).

La inspección visual de la superficie de fractura de la probeta reparada con pines también muestra una superficie de fractura plana en la zona de crecimiento de la grieta antes y después de la reparación. En dicha superficie también se puede apreciar la muesca inducida, el crecimiento de la grieta antes y después de la reparación, la reparación con los pines y la falla súbita. La Figura 5.7 muestra las partes resultantes de la fractura de la probeta reparada con pines, en la Figura 5.7a se pueden apreciar los agujeros que fueron taladrados en la punta de la fisura para introducir los pines de reparación, es importante recordar que se aplicó esta reparación cuando la grieta alcanzó una longitud aproximada de 22mm. La Figura 5.7b muestra la contraparte de la fractura, donde los pines quedaron anclados en los agujeros, lo cual indica que el método de reparación estuvo bien aplicado y que con los remaches realizados se logró inducir deformación plástica disminuyendo con ello la intensidad de la concentración de esfuerzos en el flanco de crecimiento de la grieta.

Finalmente, la inspección visual de la superficie de fractura de la probeta reparada con parches de CFRP muestra también una superficie de fractura plana como se ilustra en la Figura 5.8, y el aspecto de dicha superficie es similar a la de la probeta de la prueba piloto, en ella se logra apreciar la muesca tipo ojo de cerradura, el crecimiento de la grieta hasta los 22mm que queda demarcado por una diferencia muy suave entre tonos grisáceos, se observa además que el parche de CFRP quedó anclado a un lado de la probeta y es también apreciable que para la aplicación de éste método de reparación es aconsejable conseguir la mayor rugosidad posible de la superficie de anclaje para garantizar una mayor adherencia del epóxico y por consiguiente el éxito en la aplicación del parche.

6.2.2 Caracterización Microscópica de la Superficie de Fractura

El análisis microscópico con la ayuda del Microscopio Electrónico de Barrido SEM permite ubicar las estriaciones típicas de fatiga para contabilizarlas y establecer correlaciones de éstos datos con los resultados de vida a fatiga obtenidos experimentalmente para las probetas.

Estriaciones de fatiga en las probetas ensayadas como prueba piloto:

La Figura 5.14 muestra una imagen donde se observan dichas estriaciones de fatiga en tres sitios distintos en la superficie de fractura: inicio del crecimiento, zona central y en cercanías a la falla súbita.

Es apreciable cómo en los inicios del crecimiento de la grieta de fatiga el número de estrías por unidad de longitud es mayor y luego disminuye hasta poco antes de llegar a la fractura súbita.

Estriaciones de fatiga en las probetas ensayada aplicando el método de reparación con pines de acero:

La **Figura 5.15** muestra las estriaciones de fatiga, en diferentes sitios de la superficie de fractura, presentadas en las probetas reparadas con pines de acero. Al igual que para la prueba piloto, se observa cómo en los inicios del crecimiento de la grieta de fatiga el número de estrías por unidad de longitud es mayor y luego disminuye hasta poco antes de aplicar la reparación, de manera similar sucede cuando se vuelve a retomar el ensayo después de la reparación.

Estriaciones de fatiga en las probetas ensayada aplicando el método de reparación con parches de CFRP:

La **Figura 5.16** muestra las estriaciones de fatiga, en diferentes sitios de la superficie de fractura, presentadas en las probetas reparadas con parches de CFRP. También se observa una mayor densidad de estriaciones al inicio crecimiento que luego disminuye hasta poco antes de aplicar la reparación, se incrementa nuevamente al retomar el ensayo y disminuye antes de la falla súbita.

6.3 CARACTERIZACIÓN METALOGRAFICA

La **Figura 5.17** muestra que en éste acero no existe variación significativa con relación a la microestructura antes ni después de haber sido ensayado a fatiga.

6.4 MICRODUREZA

Las **Figuras 5.18, 5.19 y 5.20** no muestran variaciones significativas en la resistencia mecánica del material con relación al crecimiento de la grieta de fatiga. En los tres casos, la dureza varía entre 200HV y 300HV a lo largo de la longitud de crecimiento incluyendo la sección de falla súbita.

Capítulo 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La aplicación de métodos para retardar el crecimiento de grietas producidas por fatiga axial en componentes de acero AISI 1045, son alternativas de reparación mecánica a tener en cuenta durante las acciones de mantenimiento en las industrias, ya que sin ser una solución definitiva nos proporcionan un incremento considerable en la vida útil del material.

7.1 CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en esta investigación, sobre la aplicación de dos métodos de retardo del crecimiento de la grieta de fatiga en probetas de acero AISI 1045 se pueden formular las siguientes conclusiones:

- El método más eficaz de retardo del crecimiento de la grieta en las probetas de acero AISI 1045 sometidas a fatiga axial fue la aplicación de parches de CFRP en ambas caras del área de agrietamiento, en la cual se obtuvo un incremento en la vida de la probeta del 11.34% con relación a la de la prueba piloto.
- El método de retardo por inserción de un pin por deformación plástica en la punta de la grieta obtuvo un incremento en vida a fatiga de la probeta de 5.6%, con relación a la de la prueba piloto.
- Las dos conclusiones anteriores son un resultado importante, dado que una mejora en vida en un componente diseñado para vida típica de 900.000 ciclos, equivale a 100×10^3 ciclos con CFRP, lo que de acuerdo con las velocidades de giro típicas en maquinaria de minería por ejemplo, podría ser algo más de seis meses, y tres meses en el caso del segundo método.
- El método de retardo en el cual se adhieren parches de CFRP a la superficie del material requiere un tiempo adicional para lograr el curado del composite y una

preparación especial de la superficie garantizando un buen perfil de anclaje para obtener la buena adhesión del mismo. El método de aplicación de parches es más fácil de aplicar que el de inserción de pines, sin embargo en nuestro medio los materiales necesarios para elaborar el composite son de elevado costo.

- El método de inserción del pin, requiere una perforación precisa del agujero en la punta de la grieta para suavizar la concentración de esfuerzos, y posteriormente la aplicación de un trabajo mecánico para remachar el pin en el agujero taladrado, el éxito de esta reparación se consigue con un buen remache en la punta de la grieta.
- El modelo de regresión que se ajusta de mejor forma con los datos de vida a fatiga (resultados experimentales), para predecir el avance en el agrietamiento en el acero AISI 1045 es una expresión polinomial de tercer orden que se encuentra en función del factor de concentración de esfuerzos y el número de ciclos de vida del componente. Este resultado es acorde con el modelo de crecimiento de grieta de Paris-Erdogan planteado en las teorías de la mecánica de fractura.
- La caracterización macroscópica sobre la superficie de fractura de las probetas de acero AISI 1045 reflejan una superficie plana, predominantemente rugosa y con un crecimiento de grieta de tipo lineal sobre el área transversal de la probeta, partiendo desde los extremos de la muesca inducida hasta atravesar por completo el ancho de la probeta. De acuerdo con lo anterior, el concentrador empleado tipo ojo de cerradura es un buen inductor de esfuerzos y permite un crecimiento lineal de la grieta.
- La caracterización microscópica utilizando SEM sobre la superficie de fractura de las probetas de acero AISI 1045, permite observar las estriaciones que son típicas de la falla por fatiga, mediante la contabilización de las mismas en un área específica se puede establecer el número de ciclos soportados por la probeta hasta llegar a la falla, los resultados obtenidos de éste análisis son correspondientes con los experimentales desde el punto de vista de la vida a fatiga del componente.
- Los resultados obtenidos solo son válidos para las condiciones bajo las cuales se desarrollaron las pruebas en esta investigación.

7.2 RECOMENDACIONES

- Para complementar los resultados obtenidos de esta investigación es necesario desarrollar algunos estudios tales como: monitoreo en tiempo real del crecimiento de la grieta después de haber aplicado el método de reparación, para obtener un modelo experimental del factor de intensidad de esfuerzos ΔK y la tasa de crecimiento de la grieta; desarrollar modelos numéricos y paramétricos a partir de los resultados experimentales que permitan obtener predicciones y futuros comportamientos para soluciones de ingeniería.

- Es recomendable realizar estudios adicionales empleando una variedad de composites como parches y utilizando distintas configuraciones en la orientación de las fibras, con el fin de determinar un material adhesivo de más fácil aplicación y evaluar el efecto de temperaturas moderadamente altas sobre el desempeño del parche, por ejemplo 30°C, 50°C, 70°C, entre otras.
- Es recomendable plantear nuevas investigaciones empleando otros métodos para el control del crecimiento de la grieta de fatiga, como aplicación de soldadura, elaboración de un sándwich con placas soldadas a uno y otro lado de la zona de agrietamiento, entre otros.
- Es recomendable utilizar pines con diferentes estados microestructurales: Bonificados, normalizados, templados. Y de composición química igual al de las probetas de referencia.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] METALS HANDBOOK. Fatigue and Fracture. USA: ASM International, 1990. p.3, 980-985.
- [2] DE VEDIA, Luis A. Mecánica de Fractura. Argentina: Monografía tecnológica No. 1, 1986. p. 25 – 26.
- [3] GARCÍA, Jaime Marco. Fundamentos para el cálculo y diseño de estructuras metálicas de acero laminado. Madrid - España: Editorial Mc. Graw Hill. Volumen 1, 1998.
- [4] HERNANDEZ, Hector y ESPEJO, Edgar. Mecánica de Fractura y Análisis de Falla. Bogotá - Colombia: Colección sede Universidad Nacional.
- [5] NORTON, Robert. Machine Desing: An Integrated Approach. Prentice Hall, 1996.
- [6] SHIGLEY, Joseph Edward. Diseño en Ingeniería Mecánica. 5ª edición. México: Mc Graw Hill. 1990.
- [7] OLLER, Sergio. Fractura Mecánica: Un enfoque global. Barcelona, España: CIMNE. Enero 2000.
- [8] FROST, N. Metal Fatigue. Dover Publications. New York: Mineola, 1999.
- [9] MONTGOMERY, Douglas. Diseño y Análisis de Experimentos. Grupo Noriega, John Wiley y Sons. Mexico: 2004.
- [10] SHACKELFORD, James. Introduction to Materials Science for Engineers. Prentice Hall. Cuarta edición. New Jersey: 1996.
- [11] MANGONON, Pat. Ciencia de Materiales: Selección y Diseño. Pearson Education. Mexico: 2001.

- [12] ANDERSON, J.C. Ciencia de los Materiales. Editorial Limusa. Mexico: 2002.
- [13] ASKELAND, Donald. Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Editorial Thomson. Mexico: 2004.
- [14] SMITH, William. Foundations of materials science and engineering. Editorial Mc Graw-Hill. Boston: 2004.
- [15] NORTON, Robert. Machine Design: An Integrated Approach. Prentice Hall, 1996.
- [16] SHIGLEY, Joseph Edward. Diseño en Ingeniería Mecánica. 5ª edición. México: Mc Graw Hill. 1990.
- [17] JUVINALL, Robert. Fundamentos de Diseño para Ingeniería Mecánica. México: Noriega. Limusa, 1999
- [18] FROST, N. Metal Fatigue. Dover Publications. New York: Mineola, 1999.
- [19] P.G. FORREST. Fatiga de los Metales. Bilbao: Editora Urmo, 1982.
- [20] HERNANDEZ, Hector y ESPEJO, Edgar. Mecánica de Fractura y Análisis de Falla. Bogotá - Colombia: Colección sede Universidad Nacional.
- [21] GARCÍA, Jaime Marco. Fundamentos para el cálculo y diseño de estructuras metálicas de acero laminado. Volumen 1. Madrid - España: Editorial Mc. Graw Hill, 1998.
- [22] ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS, Metals test methods and analytical procedures: ASTM E647-00 y ASTM E-8. Volume 03.01. USA, 2004.
- [23] METALS HANDBOOK. Fatigue and Fracture. USA: ASM International, 1990.
- [24] DOWLING, Norman. Mechanical behavior of materials: Engineering methods for deformation, fracture, and fatigue. Prentice Hall. New Jersey: 1999.
- [25] COLLINS, Jack A. Failure of materials in mechanical design: analysis, prediction, prevention. Wiley. New York : 1993.
- [26] PETERSON, Rudolph. Stress Concentration Factors. John Wiley & Sons. New York: 1974.
- [27] BROOKS. Charlie R. y CHOUDHURY. Ashok, Metallurgical Failure Analysis. Mc Graw Hill. United States of America: 1993. 409p.
- [28] DOMAZET, Zeljko. Comparison of Fatigue Crack Retardation Methods. Engineering Failure Analysis. Vol. 3. pg 137-147. 1995. Pergamon.
- [29] DUONG, C.N. and Wang, C.H. (2004) *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME*, v 126. n 2, p.192.

- [30] SEKINE, H. (2005) *Engineering Fracture Mechanics*, v 72, n 16, p 2549, Yan, Bo and Yasuho, T. Elsevier Ltd.
- [31] JONES, R. (2005) *Composite Structures*, v 67, n 2 SPEC. ISS., p 229, Barter, S; Molent, L. and Pitt, S. Elsevier Ltd.
- [32] SCHUBBE, J. and Mall, S. (1997) *International SAMPE Symposium and Exhibition (Proceedings)*, v 42, n 1, p 197. SAMPE.
- [33] WANG, Q.Y. (2001) *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering: 3th Conference on Experimental Mechanics*, v 4537, p 221, Li, T. and Ning, J.X.
- [34] ZHONG, W.H. (2005) *Journal of Adhesion Science and Technology*, v 19, n 12, p 1113, Zhamu, A.; Aglan, H.; Stone, J. and Gan, Y.X.
- [35] WITHROW, M. (2002) C130 Durable Repair Patch (Reference document VA-04-02): <http://www.afrl.af.mil/techconn/index.htm>..
- [36] NABOULSI, S. and Mall, S. (1997) *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, v 28, n 1, p 13. Elsevier Sci B.V.
- [37] SHIN, C.S. (1998) *Fatigue and Fracture of Engineering Materials & Structures*, v 21, n 7, p 835, Huang, K.C. and Li, R.Z. Blackwell Sci Ltd.
- [38] FTI (Fatigue Technology Inc.). 2006: http://www.fatiguetech.com/coldEX_stop_crack.html.
- [39] BEASY SOFTWARE: <http://www.beasy.com/>
- [40] UNIVERSITY OF DUBLIN SOFTWARE: <http://www.universityofdublin/fatigueanalysis.com>
- [41] MSC FATIGUE FAMILY SOFTWARE: <http://www.mscsoftware.com.au/index.htm>