

**EVALUACION MICROESTRUCTURAL DE UN ACERO FERRÍTICO BAJO EN  
CARBONO SOMETIDO A ENSAYOS DE FATIGA OLIGOCÍCLICA**

**CARLOS EDUARDO TOLOZA VILLAMIZAR**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA METALURGICA  
BUCARAMANGA**

**2013**

**EVALUACION MICROESTRUCTURAL DE UN ACERO FERRÍTICO BAJO EN  
CARBONO SOMETIDO A ENSAYOS DE FATIGA OLIGOCÍCLICA**

**CARLOS EDUARDO TOLOZA VILLAMIZAR**

**DIRECTOR**

**JEAN-BERNARD VOGT**

**CO-DIRECTOR**

**AFRANIO A. CARDONA GRANADOS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA  
BUCARAMANGA**

**2013**

## DEDICATORIA

Con todo mi cariño y mi amor a mis padres que hicieron todo en la vida para que yo pudiera lograr mis sueños, por motivarme y darme la mano cuando sentía que el camino se terminaba, a ustedes por siempre mi corazón y mi agradecimiento.

Carlos Eduardo Toloza Villamizar

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por permitir que este sueño fuera una realidad, por brindarme las mejores oportunidades y tener dispuesto para mí las mejores oportunidades.

Al Ing. Arnaldo Alonso Vaquero y al Profesor Gilles Henri Gauthier quienes permitieron que este proyecto fuera una realidad y con quienes estoy infinitamente agradecido por hacer parte de este sueño.

A Jacky, mi amiga y compañera de viaje por su apoyo incondicional en momentos cruciales durante el desarrollo de este proyecto.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>15</b>
<b>1. OBJETIVOS.....</b>	<b>16</b>
1.1. GENERAL.....	16
1.2. ESPECÍFICOS.....	16
<b>2. MARCO TEORICO.....</b>	<b>17</b>
2.1. NUCLEACIÓN Y CRECIMIENTO DE GRIETAS EN FATIGA.....	17
<b>3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>18</b>
<b>3.1. CARACTERIZACION DEL MATERIAL.....</b>	<b>18</b>
3.1.1. Composición Química.....	18
3.1.2. Análisis del Tamaño de Grano.....	19
3.1.3. Ensayo de Dureza Vickers.....	19
3.1.4. Ensayo de Tracción.....	19
<b>3.2. PREPARACIÓN METALOGRÁFICA.....</b>	<b>20</b>
3.2.1. Esmerilado Grueso-Fino.....	20
3.2.2. Pulido Mecánico.....	20
<b>3.3. ENSAYOS DE FATIGA.....</b>	<b>22</b>
3.3.1. Montaje.....	22
3.3.2. Condiciones del Ensayo.....	24
<b>3.4. ANÁLISIS FRACTOGRÁFICO.....</b>	<b>25</b>
<b>3.5. MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO (SEM).....</b>	<b>26</b>
<b>4. RESULTADOS.....</b>	<b>27</b>
4.1. CARACTERIZACION DEL ACERO JIS G 3141.....	27
4.2. PROPIEDADES DEL ACERO JIS G 3141.....	27
4.2.1. Composición Química.....	27
4.2.2. Propiedades Mecánicas.....	28
4.2.3. Propiedades Metalúrgicas.....	28

4.2.4.	Análisis de Composición Química .....	28
4.3.	RESULTADOS ENSAYOS DE FATIGA .....	33
4.3.1.	EVOLUCIÓN DE LA MICROESTRUCTURA EN FATIGA .....	37
4.3.1.1.	Probeta SPCD-0.3S .....	37
4.3.1.2.	Probeta SPCD- 0.5S .....	40
4.3.1.3.	Probeta SPCC – 1.0S .....	43
4.3.2.	ANÁLISIS FRACTOGRÁFICO .....	46
4.3.2.1.	Superficie de fractura 0.3S .....	48
4.3.2.2.	Superficie de Fractura 0,5SV3 .....	51
4.3.2.3.	Superficie de Fractura 0.7SR .....	53
4.3.2.4.	Superficie de Fractura 1.0S .....	54
5.	ANALISIS DE RESULTADOS .....	56
5.1.	ANÁLISIS DE LA INICIACIÓN DE FISURAS .....	56
5.1.1.	Límites de Grano .....	57
5.1.2.	Bandas de deslizamiento .....	58
5.2.	ANÁLISIS DE LA PROPAGACIÓN DE LA FISURA .....	59
5.2.1.	Microfisura .....	60
5.2.2.	Macrofisura .....	60
5.3.	MECANISMOS DE ACOMODACIÓN DE LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA .....	62
5.4.	MECANISMOS DE CRECIMIENTO DE LAS FISURAS .....	64
6.	CONCLUSIONES.....	67
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	68
	ANEXOS .....	71

## LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Dimensiones de la Probeta de Fatiga- ASTM E-8. [6]</i> .....	23
<i>Tabla 2. Protocolo de Ensayos interrumpidos para cada rango de deformación 0,3%, 0,5% y 1,0%. .....</i>	24
<i>Tabla 3. Condiciones de los Ensayos de Fatiga Interrumpido.....</i>	25
<i>Tabla 4. Condiciones de los ensayos de fatiga sin interrupción. ....</i>	25
<i>Tabla 5. Composición química de los aceros calidad SPCC y SPCD.[12] .....</i>	27
<i>Tabla 6. Propiedades mecánicas del acero SPCD-SD. [12].....</i>	28
<i>Tabla 7. Composición Química (% en peso) del acero dado por el fabricante. ....</i>	29
<i>Tabla 8. Tamaños de grano de las secciones longitudinales y transversales de las probetas SPCD, SL: Sección Longitudinal, ST: Sección Transversal. ....</i>	30
<i>Tabla 9. Resultados de la Dureza Vickers del material SPCD. ....</i>	31
<i>Tabla 10. Propiedades en tracción monotónica del acero SPCD. ....</i>	31
<i>Tabla 11. Rango de Deformación en señal simétrica. ....</i>	33
<i>Tabla 12. Variación de la deformación total <math>\Delta\epsilon_t</math>, plástica <math>\Delta\epsilon_p</math> y elástica <math>\Delta\epsilon_e</math> de los ensayos simétricos. ....</i>	35
<i>Tabla 13. Características del comportamiento cíclico de los ensayos de fatiga simétricos 0,3S, 0,5S y 1,0S.....</i>	36
<i>Tabla 14. Porcentaje aproximado del área superficial deformada (Probeta 0,3S).39</i>	39
<i>Tabla 15. Porcentaje aproximado del área superficial deformada (Probeta 0,5S).42</i>	42
<i>Tabla 16. Porcentaje aproximado del área superficial deformada (Probeta 1,0S).45</i>	45
<i>Tabla 17. Condiciones de los ensayos de Fatiga para Fractografías. ....</i>	46
<i>Tabla 18. Protocolo de Pulido Automático .....</i>	71
<i>Tabla 19. Valores obtenidos en el ensayo de fatiga de la probeta 0,3S.....</i>	72
<i>Tabla 20. Valores obtenidos en el ensayo de fatiga de la probeta 0,5S.....</i>	74
<i>Tabla 21. Valores obtenidos en el ensayo de fatiga de la probeta 1,0S.....</i>	76
<i>Tabla 22. Valores obtenidos en el ensayo de fatiga de la probeta 1,0S.....</i>	78

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Esquema de la probeta utilizada en los ensayos. ....</i>	18
<i>Figura 2. Sección Longitudinal (SL) y Transversal (ST) de la probeta. ....</i>	19
<i>Figura 3. Máquina para esmerilado mecánico BUEHLER PHOENIX 4000. ....</i>	21
<i>Figura 4. Montaje de las probetas, estado:(a) Inicial, (b) Final. ....</i>	21
<i>Figura 5. Discos (a) Desbaste grano fino-grueso, (b) Pulido. ....</i>	21
<i>Figura 6. Esquema del montaje para evitar el pandeo. ....</i>	22
<i>Figura 7. Montaje experimental de los ensayos de fatiga de probetas planas ....</i>	22
<i>Figura 8. Esquema con las dimensiones de la Probeta para Ensayos de Fatiga. [6] .....</i>	23
<i>Figura 9. Zonas de Observación SEM en el sentido longitudinal y transversal. ....</i>	26
<i>Figura 10. Micrografías Ópticas de la probeta SPCD en la Sección Longitudinal (a) (SL) y (b) Sección Transversal (ST). ....</i>	29
<i>Figura 11. Distribución de tamaños de grano de una probeta SPCC. SL: Sección Longitudinal, ST: Sección Transversal. ....</i>	30
<i>Figura 12. Curva de Tracción Monotónica del acero SPCD. ....</i>	32
<i>Figura 13. Ejemplo de Señal Simétrica Triangular. ....</i>	33
<i>Figura 14. Grafica de amplitud del esfuerzo Vs. Número de ciclos, para los diferentes rangos de deformación- 0,3S, 0,5S y 1,0S. ....</i>	34
<i>Figura 15. Localización de <math>\sigma_{m\acute{a}x}</math> y <math>\sigma_{m\acute{i}n}</math> sobre las curvas de amplitud de esfuerzo sometidas a <math>\Delta\mathcal{E}_t = 0,3\%</math> y <math>1,0\%</math>. ....</i>	36
<i>Figura 16. Micrografía MEB de la Evolución de la Microestructura (Probeta 0,3S)</i>	37
<i>Figura 17. Curva de rango de esfuerzos vs. Número de ciclos - 0,3S. ....</i>	38
<i>Figura 18. Micrografías SEM Evolución de la Microestructura Probeta 0.5S ....</i>	40
<i>Figura 19. Curva de rango de esfuerzos vs. Número de ciclos - 0,5S. ....</i>	41
<i>Figura 20. Micrografías SEM Evolución de la Microestructura Probeta 1,0S ....</i>	43
<i>Figura 21. Curva de rango de esfuerzos vs. Número de ciclos – 1,0S. ....</i>	44
<i>Figura 22. Señal de carga (a) ensayo simétrico y (b) ensayo de relajación. ....</i>	46

<i>Figura 23. Grafica de amplitud del esfuerzo Vs. Número de ciclos, para los diferentes rangos de deformación- 0,3S, 0,5SV, 0,7SR y 1,0S.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 24. Vista de la superficie de fractura 0,3S.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 25. Micrografías SEM Zona I de la Figura 17 (a) Sitio de iniciación de la fisura principal y (b) estriaciones de fatiga a 3000X.- 0,3S.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 26. Zona I- Iniciación de la Fisura 0,3S.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 27. Micrografías SEM Zona II de la Figura 17 (a) estriaciones de propagación a 1500X y (b) 3000X – 0.3S .....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 28. Micrografía SEM- Zona III rotura final. ....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 29. Vista de la superficie de fractura 0,5SV3 .....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 30. Zona I de la Figura 23. Iniciación de la Fisura – 0,5SV3.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 31. Micrografías SEM Zona I de la Figura 22 (a) Sitio de iniciación de la fisura principal y (b) detalles de las estriaciones de fatiga. – 0,5SV3. ....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 32. Micrografías SEM Zona II de la Figura 22. Estriaciones de fatiga. ....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 33. Vista de la superficie de fractura 0,7SR. ....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 34. Micrografía SEM (a) propagación de estriaciones de fatiga próximas a la Zona I, (b) detalle de la Zona II- 0.7SR. ....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 35. Vista de la cara de ruptura 1,0S.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 36. Micrografía SEM (a) Zona I sitio de iniciación de la fisura y (b) Zona II sitio de propagación- 1.0S. ....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 37. Micrografías MEB (a) Iniciación de Fisura Intergranular -0,3S 100.000 ciclos y (b) Transgranular -0,3S 100.000 ciclos. ....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 38. Micrografías SEM - Microfisura (a) Intergranular a 50% de duración de vida, (b) Transgranular a 50% de la duración de vida. – 0,5S.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 39. Micrografía SEM Sitio de iniciación de una fisura intergranular al 50% de duración de vida – 0,5S, 1000X. ....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 40. Micrografía SEM Sitios de iniciación de fisuras transgranulares al 50% de duración de vida – 0,5S. ....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 41. Microfisura del ensayo 0.3S, al 54% de duración de vida. ....</i>	<i>60</i>

<i>Figura 42. Micrografía SEM - Macrofisura (a) Borde, (b) detalle cerca del borde, 0,3S – 54% Duración de vida. ....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 43. Micrografía SEM – Macrofisura (a) zona cercana a la punta de la fisura, (b) punta de la fisura. ....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 44. Mecanismo de formación de bandas de deslizamiento [9] .....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 45. Interacción de la fisura con el límite de grano.[25] .....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 46. Estados de Propagación de la Fisura [24].....</i>	<i>66</i>

**TÍTULO: EVALUACIÓN MICROESTRUCTURAL DE UN ACERO FERRÍTCOBAJO EN CARBONO SOMETIDO A ENSAYOS DE FATIGA OLIGOCÍCLICA.\***

**AUTOR:** TOLOZA VILLAMIZAR, Carlos Eduardo. \*\*

**PALABRAS CLAVES:** Fatiga oligocíclica, acero bajo carbono, superficies de ruptura.

**DESCRIPCIÓN:**

En el presente estudio se muestra el comportamiento microestructural a temperatura ambiente del acero JIS G3141 bajo fatiga plástica. Los ensayos se realizaron con control de deformación de manera interrumpida, con amplitudes de deformación total 0.3%, 0.5% y 1.0%; basados en la norma ASTM E-606, utilizando probetas planas a brillo espejo en ciclos de tensión-compresión con frecuencias de 1.67, 1.0 y 0.5 Hz respectivamente. Se utilizó el microscopio electrónico de barrido (SEM) para realizar el seguimiento microestructural de la superficie durante el avance del ensayo de fatiga; además estudiar las superficies de fractura y la correlación entre el comportamiento microestructural, la iniciación y propagación de grietas.

Los resultados mostraron un comportamiento de ablandamiento para el rango de deformación del 0,3% hasta la rotura, se encontró una fisura de 2,5 mm para el 54% de duración de vida. Un comportamiento de ablandamiento y posterior endurecimiento hasta rotura se encontró en las probetas con un rango de deformación total de 0,5% y 1,0%, las fisuras encontradas para estos rangos de deformación se encontraron en el estado I de propagación las cuales nuclearon en intrusiones/extrusiones de las bandas de deslizamiento y en los límites de grano. El estudio de las superficies de fractura mostró un comportamiento similar en los casos estudiados, en donde se encontró sitios de iniciación de las fisuras en bordes angulares de las probetas, y un aumento de la velocidad de avance de la fisura y con una propagación predominante intergranular.

---

\*Pasantía de Investigación.

\*\*Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica, Director: Jean-Bernard Vogt, Co-Director: Afranio A. Cardona Granados.

**TITLE: MICROSTRUCTURAL EVALUATION OF LOW CARBON FERRITIC STEEL UNDER OLIGO-CYCLIC FATIGUE.\***

**AUTHOR:** TOLOZA VILLAMIZAR, Carlos Eduardo. \*\*

**KEY WORDS:** Oligo-cyclic fatigue, Low carbon steel, fractures surfaces.

**DESCRIPTION**

Microstructural behavior at room temperature of JIS G3141 steel under plastic fatigue was studied. Test were carried out with uninterruptedly deformation control in total strain amplitudes of 0.3%, 0.5% and 1.0%, according to ASTM E-606, using a polished flat specimens in tension and compression reversal cycles and a triangular, relaxed and trapezoidal frequencies 1.67, 1.0 and 0.5 Hz. Scanning electron microscope (SEM) was used to follow up the surface microstructure during advancement of fatigue test; further studying the fracture surfaces and the correlation between the microstructural behavior, the initiation and propagation of cracks.

The results showed for total strain amplitude of 0,3% a cyclic softening behavior until failure, a crack of 2,5mm for 54% of lifetime was found. A cyclic softening/hardening behavior for total amplitudes of 0,5% and 1,0% was found; cracks nucleation and state I propagation in the intrusion/extrusions and grain boundaries. The study of the fracture surfaces showed a similar behavior, the sites of initiation of cracks in corner edges of the specimens were found, and an increase in the speed of crack advance and dominant intergranular propagation.

---

\* Research Internship

\*\*Physicochemical Engineering Faculty, School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Director Jean-Bernard Vogt. Codirector Afranio A. Cardona Granados.

## INTRODUCCIÓN

La lucha contra el cambio climático se ha convertido en una realidad reconocida por la humanidad, tal que se han realizado acuerdos en Río de Janeiro y Kyoto que han entrado en vigor a partir del 2005, donde se reconoce la existencia de un cambio climático debido al hombre y se fomenta en los países industrializados a invertir en la reducción de las emisiones de gases con efecto invernadero. La Unión Europea se encuentra a la cabeza de esta dinámica mundial, ha aprobado la regulación N°443/2009 en la que se prevé una disminución progresiva de las emisiones de 140g de CO<sub>2</sub>/km en 2008 a 95g en 2020.

Las empresas constructoras de automóviles están invitadas a participar de manera voluntaria para lograr estos objetivos, atendiendo a este llamado el proveedor automotriz VALEO se comprometió con esta dinámica de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, para esto ha desarrollado un proyecto al cual llamó MHYGALE, cuyo objetivo es desarrollar un nuevo sistema de hibridación basado en arranque-frenado, el cual se enfoca en alternadores de alta potencia la cual debe encontrarse entre 10-15kW que permiten asegurar el desarrollo de las nuevas funciones de Start-Stop, Frenado Regenerativo y Asistencia Eléctrica, con el cual se prevé reduzcan las emisiones de CO<sub>2</sub> entre un 15-20%.

En contraparte, estas nuevas características resultan en un cambio en las prestaciones mecánicas. En particular, se prevé que el sistema Start-Stop conducirá a un aumento del número de frenado-arranque del alternador reversible y por lo tanto de los esfuerzos mecánicos sufridos por las piezas rotativas tales como los ventiladores de refrigeración, los cuales conducirán más rápidamente a rupturas por fatiga y afectaran la integridad de los alternadores.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1. GENERAL**

Realizar un estudio de fatiga sobre un acero ferrítico bajo en carbono sometido a fatiga oligocíclica.

### **1.2. ESPECÍFICOS**

- Identificar sitios de iniciación de fisuras en un acero ferrítico bajo en carbono sometido a ensayos de fatiga.
- Analizar el crecimiento de las fisuras.
- Evaluar la repartición de granos deformados en la zona de fatiga oligocíclica.

## **2. MARCO TEORICO**

### **2.1. NUCLEACIÓN Y CRECIMIENTO DE GRIETAS EN FATIGA**

A medida que se somete un material a la acción repetida de una carga comienzan a producirse cambios aislados en la estructura; estos rápidamente desarrollan fisuras sub-microscópicas que crecen a medida que los ciclos continúan, hasta tener proporciones microscópicas y eventualmente llegan a ser visibles; finalmente, cuando la fisura llega a un tamaño tal que debilita la pieza, se produce su rotura, este proceso se puede dividir en tres etapas denominadas:

- 1) Nucleación: Se producen debido a los altos esfuerzos hasta que el metal se endurece lo suficiente generando zonas con altos concentradores de esfuerzos, tales como entallas, cantos vivos, rayas superficiales o bien en inclusiones y poros, esta etapa generalmente no es apreciable para la fatiga a bajo ciclo.
- 2) Crecimiento: Abarca la mayor parte de la duración del proceso fatiga y se da generalmente de forma transgranular, las fracturas generadas durante esta etapa normalmente generan marcas conocidas como estriaciones de fatiga, las cuales registran la posición del frente de la grieta durante el avance.
- 3) Ruptura: es la fase final de la propagación de la grieta de fatiga, en la cual predomina un modo de fractura estática como clivaje o formación de hoyuelos, según el tipo y características del material. [10]

### 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

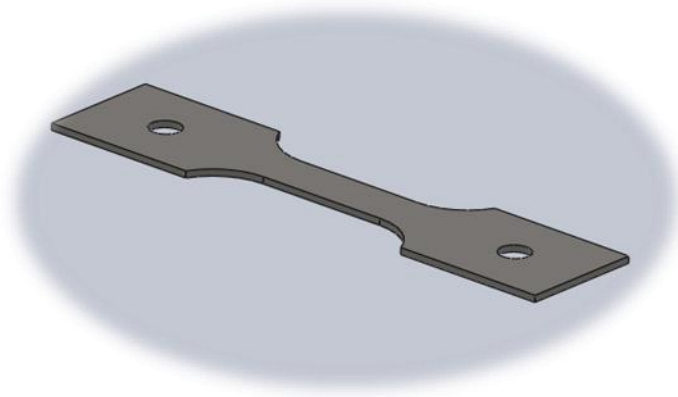
Esta parte comprende diferentes etapas necesarias para la preparación, desarrollo del ensayo de fatiga y análisis microscópico de las probetas del acero SPCD, en estado tal como se recibieron en el laboratorio.

#### 3.1. CARACTERIZACION DEL MATERIAL

Antes de realizar las pruebas de fatiga oligocíclica se realizaron ensayos para caracterizar las propiedades mecánicas y metalúrgicas iniciales del material. Durante la caracterización del material y los ensayos de fatiga las probetas utilizadas en los ensayos son de sección plana y una longitud constante lo suficiente para obtener un estado de esfuerzo homogéneo durante el ensayo. Las dimensiones de las probetas son basadas en la norma ASTM E8 [6].

*Figura 1. Esquema de la probeta utilizada en los ensayos.*

Fuente: El Autor



##### 3.1.1. Composición Química

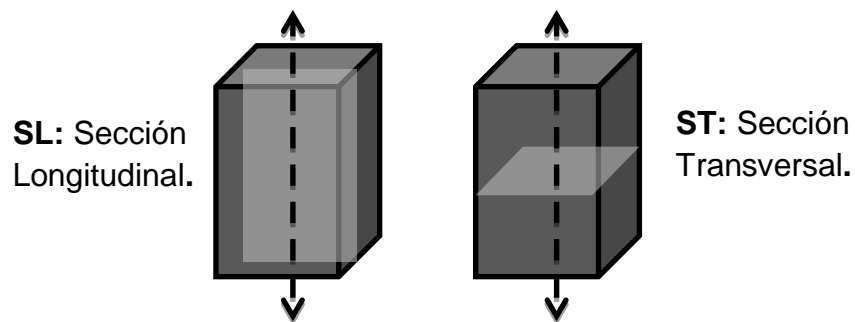
El análisis de composición química del material es dado por el fabricante, La Compañía Coreana POSCO por el método de análisis de composición química acorde a la norma JIS G 0320. [11]

### 3.1.2. Análisis del Tamaño de Grano

Realizando una preparación metalográfica según la norma ASTM E3 [3], de cortes longitudinal y transversal del material se analizó el tamaño de los granos.

**Figura 2.** Sección Longitudinal (SL) y Transversal (ST) de la probeta.

Fuente: El Autor.



### 3.1.3. Ensayo de Dureza Vickers

La probeta de acero SPCD se sometió al ensayo de Dureza Vickers con un indentador piramidal base cuadrada de diamante. El ángulo superior de la pirámide es de 136°; estos ensayos se realizaron con la ayuda de un durómetro marca Mitutoyo modelo AVK-C1; realizando 10 mediciones en la zona efectiva de la probeta y utilizando una carga de 5 kg con un tiempo de indentación de 10 s. El ensayo se realizó bajo la norma ASTM E92-82. [7]

### 3.1.4. Ensayo de Tracción

Para conocer las propiedades mecánicas de la probeta SPCD en su estado inicial, se realizó un ensayo de tracción bajo la norma ASTM E8 [6]; usando la Máquina Universal de Ensayos Mecánicos (MTS) con capacidad de 25 kN, en la etapa inicial del ensayo se utilizó un extensómetro el cual permite medir de manera precisa las deformaciones hasta 12%, posteriormente se elimina y el desplazamiento del cilindro se utiliza para calcular la deformación superior al 12%. La velocidad de deformación se mantuvo en  $2.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ .

## **3.2. PREPARACIÓN METALGRÁFICA**

El objetivo de la preparación de una muestra metalografía es la revelación de la estructura verdadera, la cual no posea deformaciones, rayas, arranques de material, elementos extraños, aplastamientos, relieves, bordes redondeados y daños térmicos. Esto se logró con la realización de un método automático de desbaste mecánico con ayuda de la maquina marca BUEHLER modelo PHOENIX 4000, Figura 4., la cual permite la aplicación de una fuerza controlante durante un tiempo establecido, el protocolo de desbaste se encuentra en el ANEXO A, el cual se efectuó en 2 etapas sucesivas:

### **3.2.1. Esmerilado Grueso-Fino**

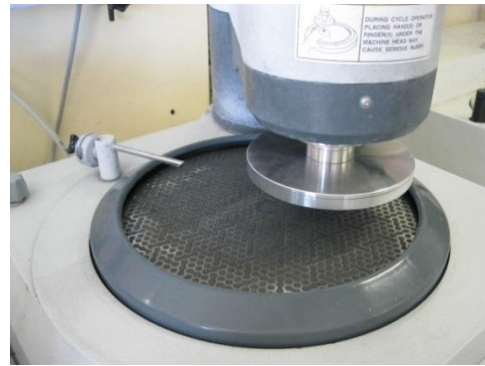
Su objetivo es eliminar la superficie de la muestra que fue deformada por el proceso anterior y lograr un solo plano de pulido para las etapas posteriores. Se utilizó discos magnéticos con aglomerantes abrasivos equivalentes a los tamaños de grano 220, 600 y 1200 al agua, Figura 6(a). El agua tiene por objeto refrigerar y barrer de la superficie las partículas de material tanto de la muestra como del abrasivo.

### **3.2.2. Pulido Mecánico**

**3.2.2.1. Diamante** Se utiliza para lograr una eliminación efectiva y rápida de material. Se obtienen los mejores resultados en acabados superficiales. Se realiza en paños especiales colocados en platos giratorios con las siguientes granulometrías de pastas de diamante: 9, 6, 3, 1, y  $\frac{1}{4}$   $\mu\text{m}$ , Figura 6 (b). Se debe utilizar lubricante (etilenglicol).

**3.2.2.2. Óxidos** Se usó una suspensión coloidal diluida al 50% en agua destilada de  $\text{SiO}_2$ , durante 3 minutos aproximadamente.

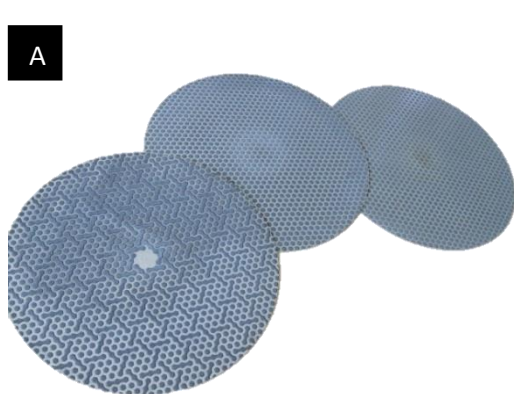
**Figura 3.** Máquina para esmerilado mecánico BUEHLER PHOENIX 4000.



**Figura 4.** Montaje de las probetas, estado:(a) Inicial, (b) Final.



**Figura 5.** Discos (a) Desbaste grano fino-grueso, (b) Pulido.



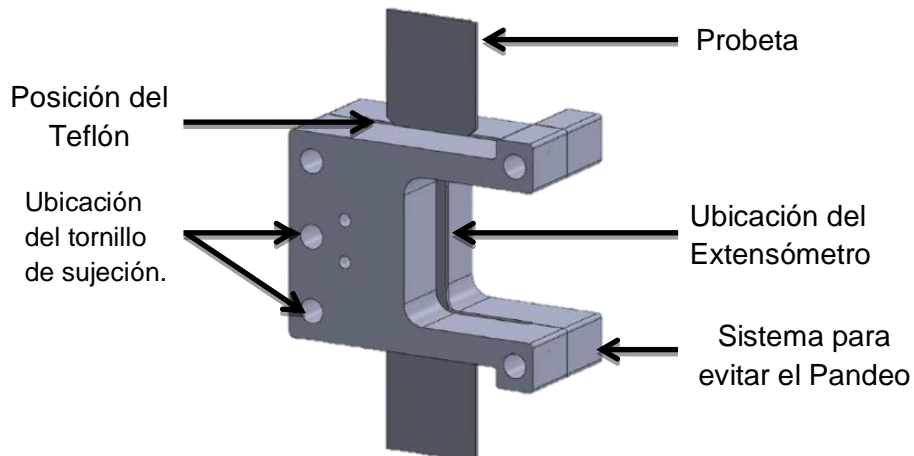
**Fuente:** El Autor

### 3.3. ENSAYOS DE FATIGA

#### 3.3.1. Montaje

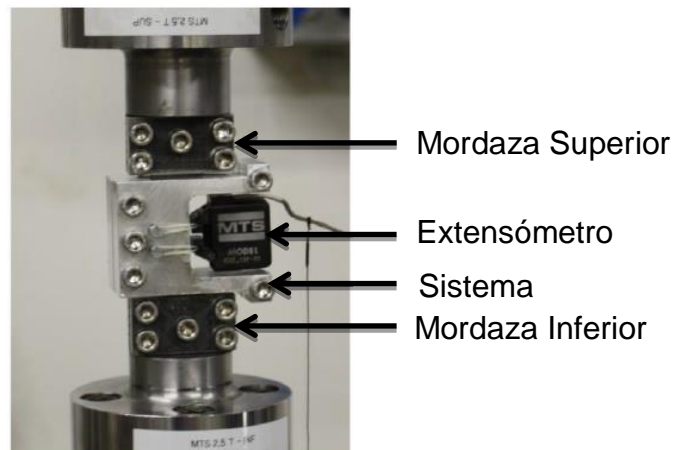
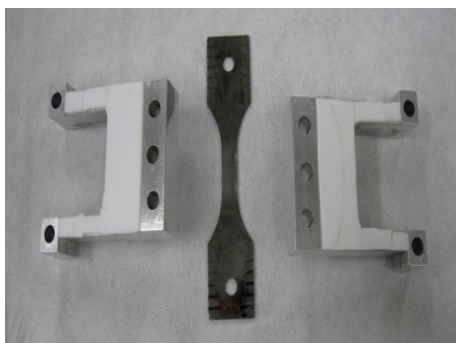
Todos los ensayos se realizaron con probetas planas de espesor 1,2 mm, las dimensiones completas de la probeta se muestran en la Figura 8 y la Tabla 3. Con el objetivo de evitar el pandeo de la probeta durante la fase de compresión, se instaló un montaje recubriendo casi la totalidad de la superficie de la probeta, Figura 6 y Figura 7. Una placa de teflón asegura una ausencia de fricción entre el sistema y la probeta, evitando de este modo el calentamiento de la probeta.

**Figura 6.** Esquema del montaje para evitar el pandeo.

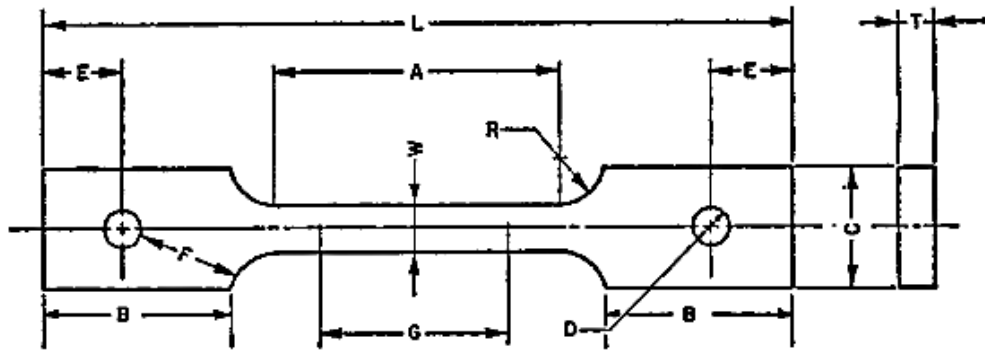


**Figura 7.** Montaje experimental de los ensayos de fatiga de probetas planas

Fuente: El Autor



**Figura 8.** Esquema con las dimensiones de la Probeta para Ensayos de Fatiga. [6]



**Tabla 1.** Dimensiones de la Probeta de Fatiga- ASTM E-8. [6]

Dimensiones de probeta plana para fatiga, mm.	
G – Longitud efectiva	50 ± 0.1
<b>W – Ancho</b>	<b>8.03 ± 0.2</b>
<b>T- Espesor</b>	<b>1.14 ± 0.02</b>
R – Radio del Filete	13
L – Longitud Total	200
A – Longitud de la sección reducida	57
B – Longitud de la sección de agarre	50
C – Ancho de la sección de agarre	50
D – Diámetro del agujero para pasador	13
E – Distancia desde el borde hasta pasador	40
F – Distancia desde el agujero hasta el filete	13

Además del sistema para evitar el pandeo, en la Figura 7, se observa el extensómetro, el cual permite medir la deformación longitudinal de la probeta en la sección del ensayo, debe tener capacidad de tomar medidas dinámicas durante largos períodos de tiempo.

### 3.3.2. Condiciones del Ensayo

El ensayo de fatiga utilizado en esta investigación está bajo la norma ASTM E606-92 [5], se realizó en la Máquina Universal de Ensayos Mecánicos MTS 25 kN junto con el programa “MTS cyclic fatigue test software” la cual produce cargas cíclicas de tensión y compresión de forma simultánea sobre una probeta durante un número de ciclos conocido en el cual se interrumpe el ensayo para realizar el estudio microestructural por medio del microscopio electrónico de barrido (SEM); La Tabla 4 muestra el rango de deformación para los ensayos, los cuales fueron de 0,3%, 0,5% y 1,0%; con las respectivas interrupciones, las cuales determinaron una fracción de duración de vida acumulada del material. La Tabla 5 muestra las condiciones de ensayo para cada rango de deformación.

**Tabla 2.** Protocolo de Ensayos interrumpidos para cada rango de deformación 0,3%, 0,5% y 1,0%.

$\Delta\varepsilon_t = 0,3\%$		$\Delta\varepsilon_t = 0,5\%$		$\Delta\varepsilon_t = 1,0\%$	
Ciclos	DDV (%)	Ciclos	DDV (%)	Ciclos	DDV (%)
100	0,05	100	0,25	50	1
10.000	5	1.000	2,5	100	2
50.000	27	2.000	5	300	6
100.000	54	20.000	50	1.000	20
				2.000	40

\*DDV, Duración de Vida.

Para realizar el seguimiento microestructural de cada rango de deformación se ensayó una probeta por cada una hasta completar el protocolo de la Tabla 4.

**Tabla 3.** Condiciones de los Ensayos de Fatiga Interrumpido.

Fuente: El Autor.

Condiciones	$\Delta\epsilon_t = 0,3\%$	$\Delta\epsilon_t = 0,5\%$	$\Delta\epsilon_t = 1,0\%$
Señal	Triangular	Triangular	Triangular
$R_\epsilon$	-1,0	-1,0	-1,0
$\dot{\epsilon}$ [ $s^{-1}$ ]	$1 \times 10^{-2}$	$1 \times 10^{-2}$	$1 \times 10^{-2}$
Frecuencia [Hz]	1,67	1,0	0,5
Temperatura	Ambiente	Ambiente	Ambiente

$R_\epsilon$ , Relación de deformación,  $\dot{\epsilon}$ , Velocidad de deformación.

### 3.4. ANÁLISIS FRACTOGRÁFICO

Las superficies de fractura son herramientas importantes para observar el comportamiento del material bajo ciclos de fatiga, además permite determinar la morfología, sitios de iniciación primarios y secundarios, además del avance de la fisura durante el desarrollo del ensayo.

Los ensayos se realizaron hasta la rotura del material siguiendo la metodología mostrada en el apartado 3.3 de la presente investigación, además se variaron las condiciones y el rango de deformación en los ensayos, Tabla 6, para evaluar las superficies de fractura y correlacionar los datos con los obtenidos en los ensayos de fatiga interrumpidos.

**Tabla 4.** Condiciones de los ensayos de fatiga sin interrupción.

Fuente: El Autor.

Condiciones	$\Delta\epsilon_t = 0.3\%$	$\Delta\epsilon_t = 0.5\%$	$\Delta\epsilon_t = 0.7\%$	$\Delta\epsilon_t = 1.0\%$
Señal	Triangular	Triangular	<b>Trapezoidal</b>	Triangular
$R_\epsilon$	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0
$\dot{\epsilon}$ [ $s^{-1}$ ]	$1 \times 10^{-2}$	<b><math>1 \times 10^{-3}</math></b>	$1 \times 10^{-2}$	$1 \times 10^{-2}$
Frecuencia [Hz]	1.67	1.67	1.67	1.67

$R_\epsilon$ , Relación de deformación,  $\dot{\epsilon}$ , Velocidad de deformación

### 3.5. MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO (SEM)

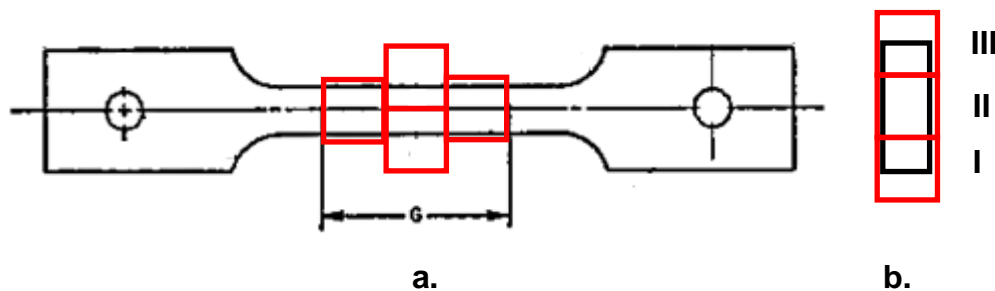
Se realizó un análisis de la superficie de la probeta durante el ensayo interrumpido y de la superficie de fractura en los diferentes rangos de deformación con el apoyo de un estudio de la topología de la superficie de fractura por microscopía electrónica de barrido (SEM).

Para los ensayos de fatiga interrumpidos, (parte 3.3 de la presente investigación), el análisis microscópico se concentró en las zonas mostradas en la Figura 9.a las cuales se encuentran en la longitud de prueba de la probeta y que permiten ver detalladamente el comportamiento microestructural durante el avance de los ensayos de fatiga.

Para los ensayos de las superficies de fractura, el análisis microscópico se muestra en la Figura 9.b una sección transversal de la probeta después de rotura, en la cual se muestran tres zonas de observación, la Zona I corresponde al lugar donde se presentan los sitios de iniciación de fisuras, la Zona II corresponde a la zona de propagación de la fisura durante el avance del ensayo de fatiga, y la Zona III corresponde a la rotura final.

**Figura 9.** Zonas de Observación SEM en el sentido longitudinal y transversal.

Fuente: El Autor.



## 4. RESULTADOS

### 4.1. CARACTERIZACION DEL ACERO JIS G 3141

### 4.2. PROPIEDADES DEL ACERO JIS G 3141

Los ventiladores de refrigeración usados en los alternadores reversibles se producen por embutido y doblado a partir de una chapa de acero de bajo carbono. El acero es producido por la Sociedad Coreana POSCO y están bajo la norma JIS G 3141-2005 <<Cold-reduced carbón Steel sheets and strips>> [12]. Esta norma japonesa define las propiedades mecánicas en tracción, dureza, flexibilidad, dimensiones, estado superficial, composiciones químicas máximas así como las diferentes calidades del acero. Según las especificaciones el acero de los ventiladores de este componente mecánico es de calidad SPCC según la norma JIS G 3141-2005. Este acero responde a un tratamiento térmico de recocido posterior al laminado, el cual le confiere propiedades para trabajos de embutido.

#### 4.2.1. Composición Química

La Tabla 1 muestra la composición química del acero bajo la norma JIS G 3141-2005 y su comparación entre los grados SPCC y el grado regular SPCC. El método de análisis de composición química está de acuerdo a la norma JIS G 0320 [11].

**Tabla 5.** Composición química de los aceros calidad SPCC y SPCCD.[12]

(% en peso)	C	Si	Mn	P	S
SPCC	≤ 0,15	-	≤ 0,6	≤ 0,1	≤ 0,05
SPCCD	≤ 0,12	-	≤ 0,5	≤ 0,04	≤ 0,04

*SPCC corresponde a calidad comercial, SPCCD corresponde a la calidad embutida.*

#### 4.2.2. Propiedades Mecánicas

La Tabla 2 muestra las propiedades mecánicas más importantes del acero SPCD refiriéndose al grado de templabilidad y al acabado superficial del material; que en el caso del acero estudiado corresponde a un grado de templabilidad estándar (S) y un acabado superficial mate (D), SPCD-SD; según la norma JIS G 3141-2005.

**Tabla 6.** Propiedades mecánicas del acero SPCD-SD. [12]

Limite Elástico $R_e$ (MPa)	Resistencia ultima a la Tracción, $R_m$ (Mpa)	Dureza Vickers, HV	Alargamiento a Rotura, A (%)
$\leq 240$	$270 \leq$	$115 \leq$	25

#### 4.2.3. Propiedades Metalúrgicas

El componente principal del acero SPCD es la estructura fe- $\alpha$  o ferrita, obtenida por el bajo porcentaje de carbono, su estructura cristalina es BCC (Cúbica centrada en el cuerpo) con una distancia interatómica de 2.86 Å. Prácticamente no disuelve carbono, la máxima solubilidad es 0,022% de C a 727°C y disuelve sólo 0,008% de C a temperatura ambiente. [26]

La microestructura del acero SPCD es determinada por dos microconstituyentes principales la ferrita y la perlita ubicada en los límites de grano en pequeñas cantidades, además la composición del acero se acerca al microconstituyente ferrita- $\alpha$ , que se observa como granos monofásicos más irregulares que la austenita, ya que proviene de una transformación en estado sólido.

#### 4.2.4. Análisis de Composición Química

La composición química del acero estudiado se describe en la Tabla 7 dada por la Compañía Coreana POSCO.

**Tabla 7.** Composición Química (% en peso) del acero dado por el fabricante.

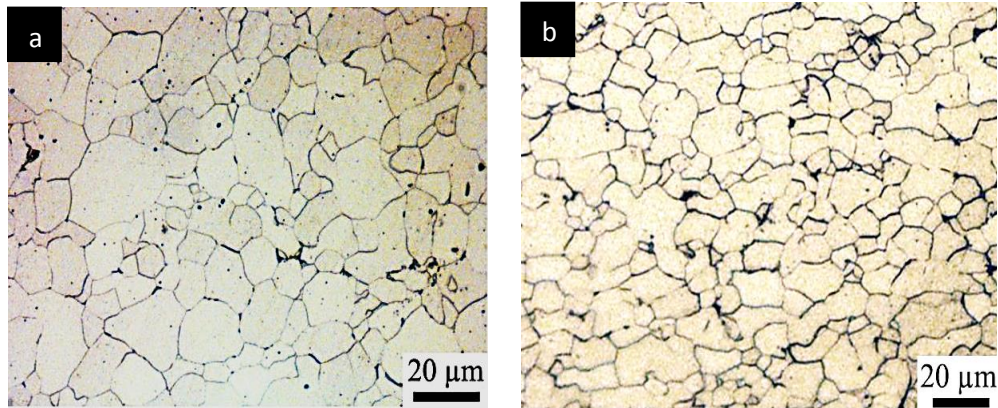
(% en peso)	C	Si	Mn	P	S
B4	0,0346	0,002	0,228	0,0063	0,0041

#### 4.2.5. Análisis del Tamaño de Grano

El análisis metalográfico, Figura 10 ha permitido observar la microestructura inicial del acero SPCD, la cual es claramente ferrítica y se aprecian pequeñas zonas de perlita precipitada en los límites de grano. En la Figura 11 y en la Tabla 8 se muestran las distribuciones granulométricas del material y la información del tamaño de grano promedio respectivamente.

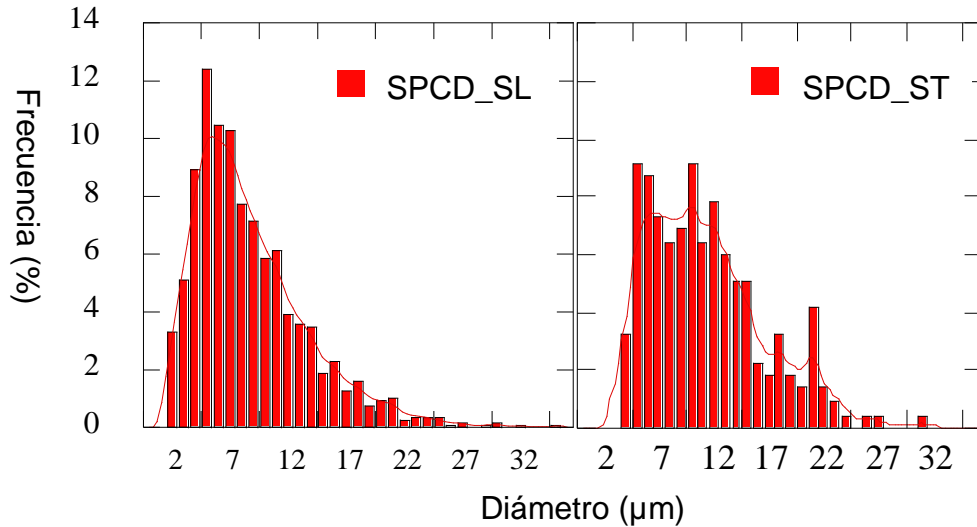
**Figura 10.** Micrografías Ópticas de la probeta SPCD en la Sección Longitudinal (**a**) (SL) y (**b**) Sección Transversal (ST).

Fuente: El Autor.



**Figura 11.** Distribución de tamaños de grano de una probeta SPCC. **SL:** Sección Longitudinal, **ST:** Sección Transversal.

Fuente: El Autor



En el caso de la sección de la probeta SPCD\_SL la distribución está concentrada cerca de 7µm con respecto al tamaño de grano longitudinal, la sección SPCD\_ST muestra una distribución menos concentrada de granos, la Tabla 3 muestra los resultados del análisis.

**Tabla 8.** Tamaños de grano de las secciones longitudinales y transversales de las probetas SPCC, **SL:** Sección Longitudinal, **ST:** Sección Transversal.

Fuente: El Autor.

	<b>SL</b>	<b>ST</b>
Numero de Granos Evaluados	218	219
Tamaño máx. (µm)	30	29
Tamaño min. (µm)	3	2
<b>Tamaño medio (µm)</b>	<b>11</b>	<b>10</b>
Desviación Estándar	5	5

A continuación, se muestran algunas de las propiedades mecánicas más importantes del material en su estado inicial.

#### 4.2.6. Dureza Vickers

La Tabla 9 muestra los resultados obtenidos en las tomas de dureza Vickers

**Tabla 9.** Resultados de la Dureza Vickers del material SPCD.

Fuente: El Autor

<b>Numero de Medidas</b>	10
<b>Dureza máx.</b>	115 Hv
<b>Dureza min.</b>	105 Hv
<b>Dureza Media</b>	<b>111 Hv</b>
<b>Desviación Estándar</b>	3

#### 4.2.7. Propiedades en Tracción

Los resultados del comportamiento en tracción, se muestran la Tabla 10:

**Tabla 10.** Propiedades en tracción monotónica del acero SPCD.

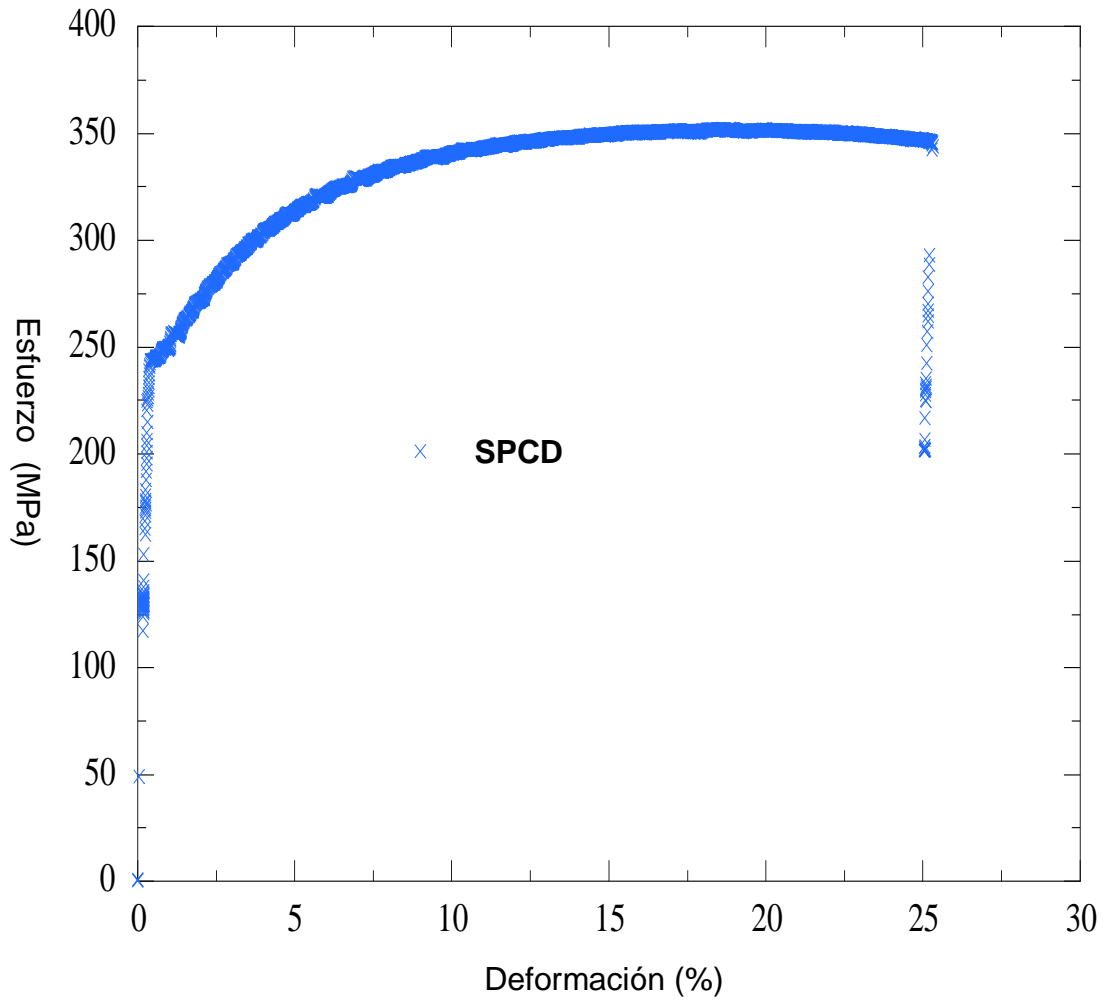
Fuente: El Autor

Módulo de Young E (GPa)	212
Límite Elástico $R_e$ (MPa)	242
Resistencia a la fluencia en 0,2%, $R_{p0,2\%}$ (MPa)	246
Resistencia Última a la Tracción, $R_m$ (MPa)	352
Elongación Uniforme, $A_u$ (%)	18
Alargamiento a Rotura, A (%)	25

La Figura 12 corresponde a la curva de tracción monotónica del acero SPCD

**Figura 12.** Curva de Tracción Monotónica del acero SPCD.

Fuente: El Autor.



### 4.3. RESULTADOS ENSAYOS DE FATIGA

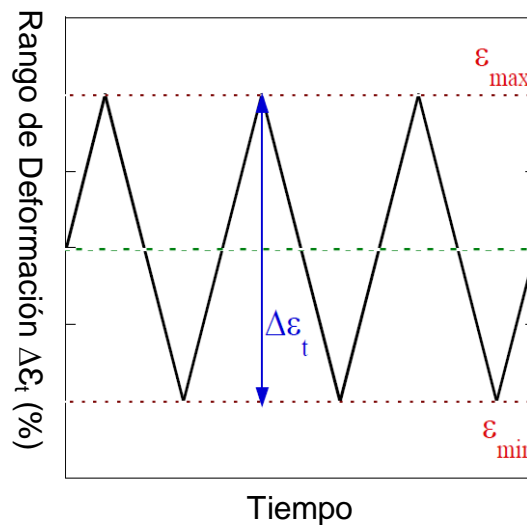
La Figura 10.a muestra la microestructura inicial con granos bien definidos, estos granos están compuestos principalmente de ferrita y se observa una muy baja cantidad de perlita ubicada en la zona de los límites de grano, los granos poseen forma irregular debido a los cambios producidos en la reacción en estado sólido.

Para los resultados de evolución microestructural las probetas fueron identificadas según los rangos de deformación junto con la señal estudiada como se muestra en la Tabla 11 que muestra la deformación máxima y mínima en cada caso, y en la Figura 13 se observa un ejemplo de la señal presentada.

**Tipo de Señal:** *Simétrica Triangular*

**Figura 13.** *Ejemplo de Señal Simétrica Triangular.*

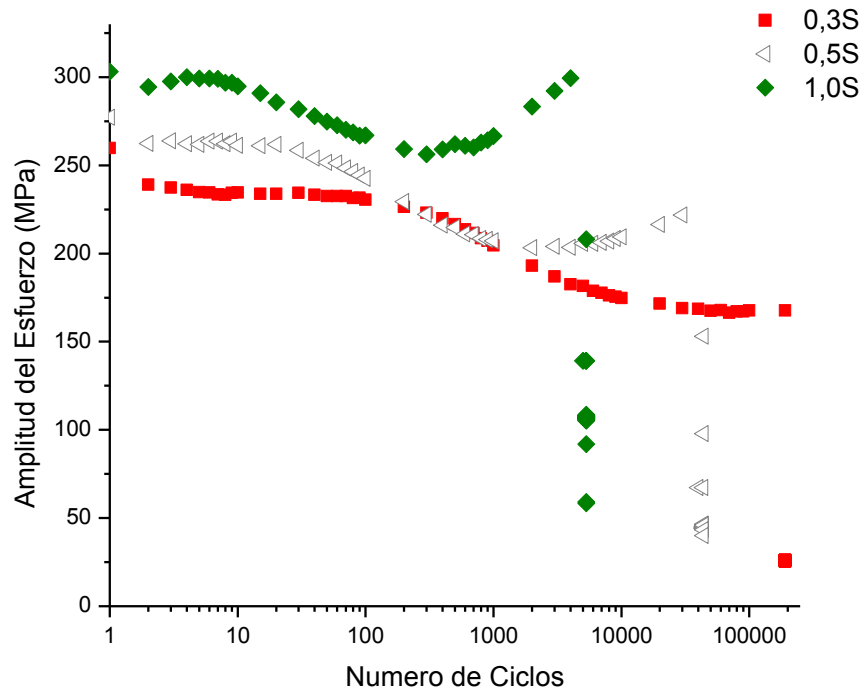
Fuente: El Autor



**Tabla 11.** *Rango de Deformación en señal simétrica.*

Nombre	$\Delta\epsilon_t$ (%)	$\epsilon_{min}$ (%)	$\epsilon_{max}$ (%)
0,3S	0,3	-0,15	0,15
0,5S	0,5	-0,25	0,25
1,0S	1,0	-0,5	0,5

**Figura 14.** Grafica de amplitud del esfuerzo Vs. Número de ciclos, para los diferentes rangos de deformación- 0,3S, 0,5S y 1,0S.



La Figura 14 muestra dos comportamientos distintos en función de la variación de la deformación impuesta:

Para una deformación elevada ( $\Delta\varepsilon_t = 0,5\%$  y  $1,0\%$ ) el material presenta, después de algunos pocos ciclos un ligero endurecimiento, ablandamiento y un endurecimiento secundario que llevan a la rotura. El ciclo de transición entre ablandamiento y el endurecimiento secundario, llamado  $N_T$ , aumenta a medida que  $\Delta\varepsilon_t$  disminuye (Tabla 13). Sin embargo, en términos de duración de vida, la transición se presenta en todos los casos aproximadamente a 6% de duración de vida del material. El endurecimiento secundario representa la mayor parte de la duración de vida.

Por el contrario, a baja variación de deformación ( $\Delta\epsilon_t = 0,3\%$ ), el material presenta inicialmente un comportamiento estable en el esfuerzo hasta ~100 ciclos y luego un ablandamiento continuo hasta la rotura.

El ablandamiento se presenta para los casos donde la deformación elástica fue superior a la deformación plástica. Por el contrario, a medida que la deformación plástica aumenta, se observó un comportamiento de endurecimiento/ablandamiento y endurecimiento secundario hasta la rotura. (Tabla 12)

**Tabla 12.** Variación de la deformación total  $\Delta\epsilon_t$ , plástica  $\Delta\epsilon_p$  y elástica  $\Delta\epsilon_e$  de los ensayos simétricos.

Fuente: El Autor

Nombre	$\Delta\epsilon_t$ (%)	$\Delta\epsilon_p$ (%)	$\Delta\epsilon_e$ (%)
<b>0,3S</b>	0,3	0,13	0,17
<b>0,5S</b>	0,5	0,27	0,23
<b>1,0S</b>	1,0	0,7	0,3

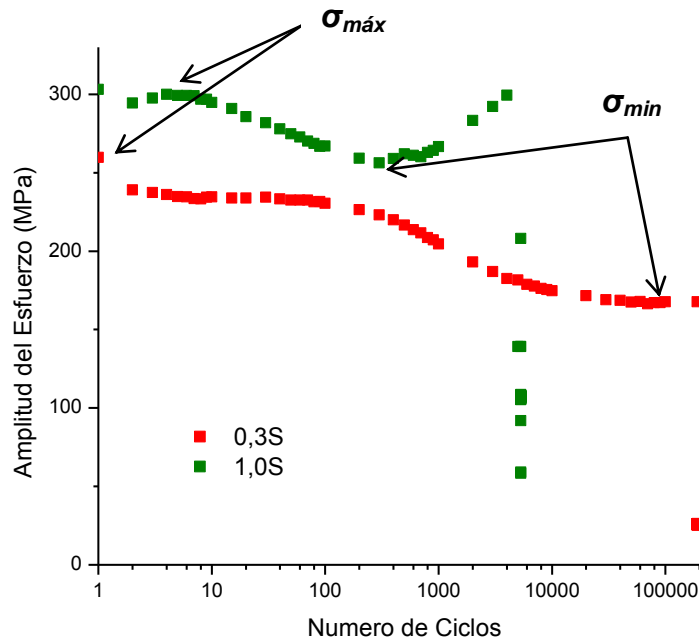
Con el fin de cuantificar el ablandamiento, se definió el parámetro  $\rho$ , cuyo cálculo se muestra en la siguiente ecuación.

$$\rho = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{\sigma_{min}}$$

$\rho$  representa la disminución de la amplitud máxima del esfuerzo antes del ablandamiento  $\sigma_{m\acute{a}x}$  con respecto a la amplitud mínima del esfuerzo  $\sigma_{m\acute{i}n}$ . Para el ensayo de 0,3S que representa un ablandamiento hasta la rotura,  $\sigma_{m\acute{a}x}$  es alto en el primer ciclo. Cuando el comportamiento muestra un ligero endurecimiento al comienzo del ensayo ( $\Delta\epsilon_t = 0,5\%$  y  $1,0\%$ ),  $\sigma_{m\acute{a}x}$  se eleva al máximo después de alguno ciclos. La Figura 15 define las posiciones del  $\sigma_{m\acute{a}x}$  y  $\sigma_{m\acute{i}n}$ . Los resultados

presentados en la Tabla 13 muestran que la relación de ablandamiento  $\rho$  disminuye a medida que el rango de deformación aumenta.

**Figura 15.** Localización de  $\sigma_{m\acute{a}x}$  y  $\sigma_{min}$  sobre las curvas de amplitud de esfuerzo sometidas a  $\Delta\epsilon_t = 0,3\%$  y  $1,0\%$ .



Nombre	$\Delta\epsilon_t$ (%)	$N_T$	$N_T$ (%DDV)	$\rho$ (%)
<b>0,3S</b>	0,3	/	/	49
<b>0,5S</b>	0,5	3000	7,5	29
<b>1,0S</b>	1,0	300	6,7	16

**Tabla 13.**

*Características del comportamiento cíclico de los ensayos de fatiga simétricos 0,3S, 0,5S y 1,0S.*

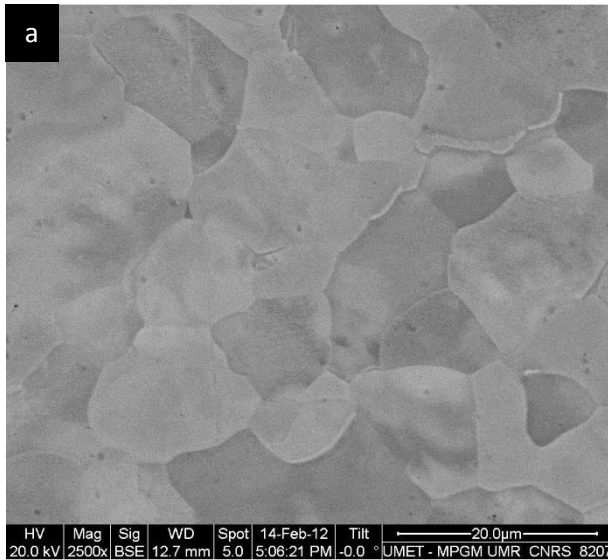
### 4.3.1. EVOLUCIÓN DE LA MICROESTRUCTURA EN FATIGA

#### 4.3.1.1. Probeta SPCD-0.3S

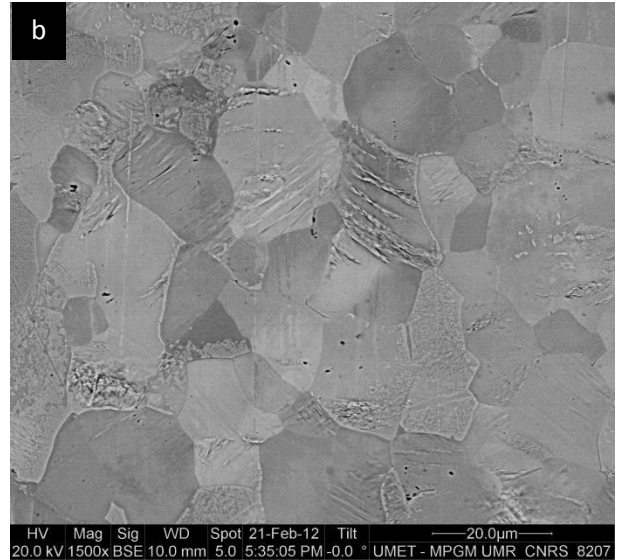
**Figura 16.** Micrografía MEB de la Evolución de la Microestructura (Probeta 0,3S)

**Interrupción 1.** 0,05 % Duración de Vida

**Interrupción 2.** 5% Duración de Vida



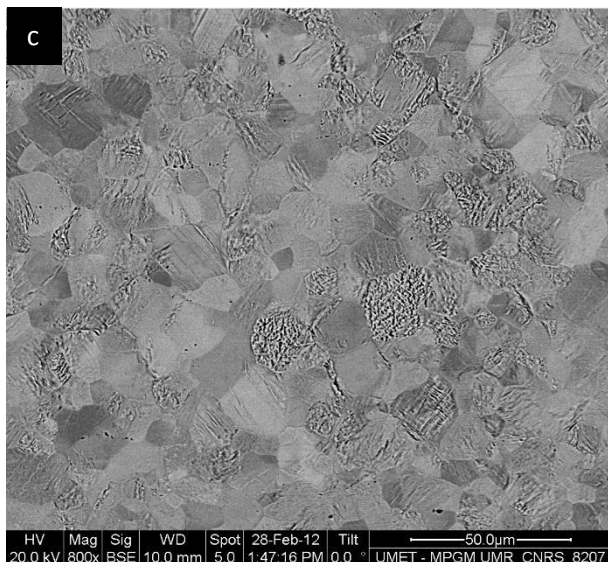
**100 ciclos (2500X) – 0,3S**



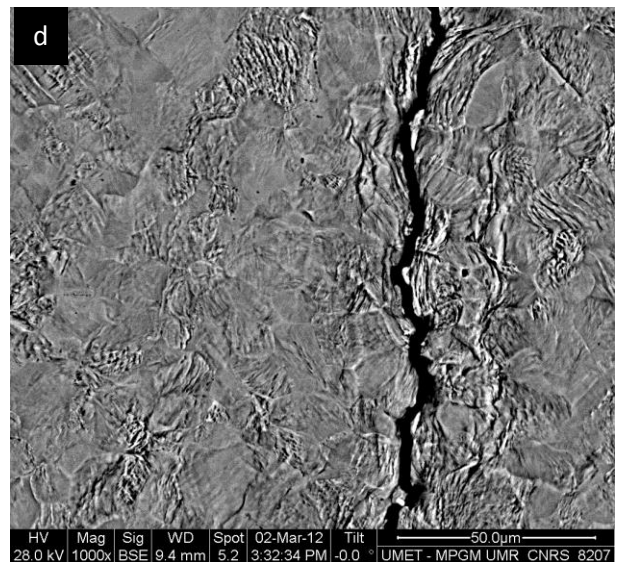
**10.000 ciclos (1500X) - 0,3S**

**Interrupción 3.** 27% Duración de Vida

**Interrupción 4.** 54% Duración de Vida

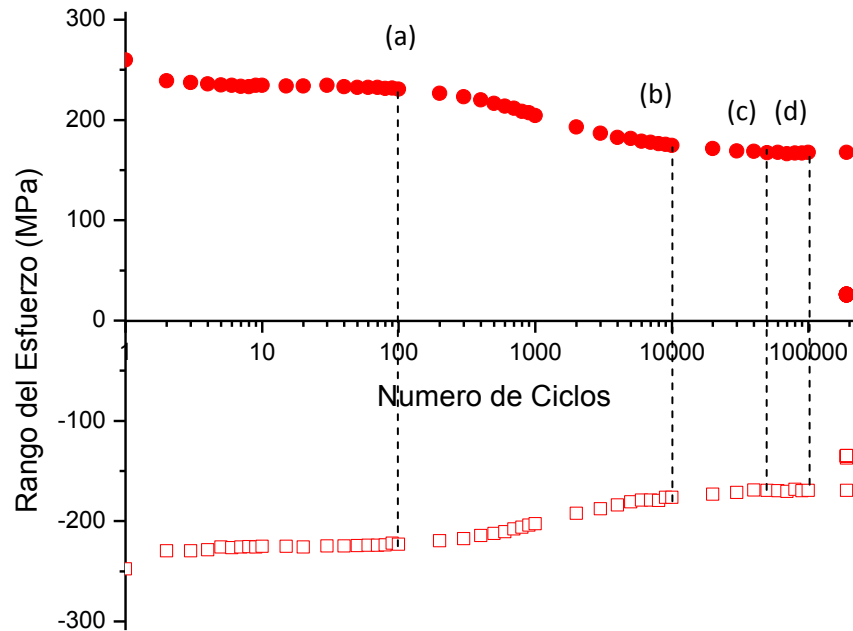


**50.000 ciclos (800X) – 0,3S**



**100.000 ciclos (1000X) - 0,3S**

**Figura 17.** Curva de rango de esfuerzos vs. Número de ciclos - 0,3S.



La Figura 17 muestra el rango del esfuerzo ( $\Delta\sigma$ ) para  $\Delta\epsilon_t = 0,3\%$ , que cómo se observó anteriormente corresponde a un comportamiento de ablandamiento hasta rotura. Las interrupciones se muestran desde la letra (a) hasta la (d) según el protocolo de la Tabla 4, y corresponden a descensos en el rango del esfuerzo producidos por el ablandamiento del material.

La Figura 16 muestra los resultados microestructurales encontrados en cada una de las interrupciones, los cuales corresponden a las líneas (a) a (d).

La micrografía mostrada en la Figura 16.a corresponde a un ensayo de fatiga para el 0,05% de la duración de vida del material, en ella no se aprecian bandas de deslizamiento claramente en la superficie. Estas aparecen a partir de un número de ciclos equivalente al 5% de la duración de la vida como lo muestra la Figura 16.b, en la cual se notan bandas de deslizamiento dependiendo de la orientación del grano.

La micrografía de la Figura 16.c muestra la microestructura de la probeta al final del 27% de duración de vida. Se observan más zonas con presencia de bandas de deslizamiento, análogo a ese comportamiento se evidencia activación de sistemas de deslizamiento complejos en algunas zonas.

En la fisura mostrada en la Figura 16.d, se observa que la mayor parte de la superficie está deformada lo que se traduce en más sistemas de deslizamiento activos.

La Tabla 14 muestra información porcentual aproximada de la deformación de la microestructura producida por planos de deslizamiento con sistemas simples y complejos activos en función del número de ciclos.

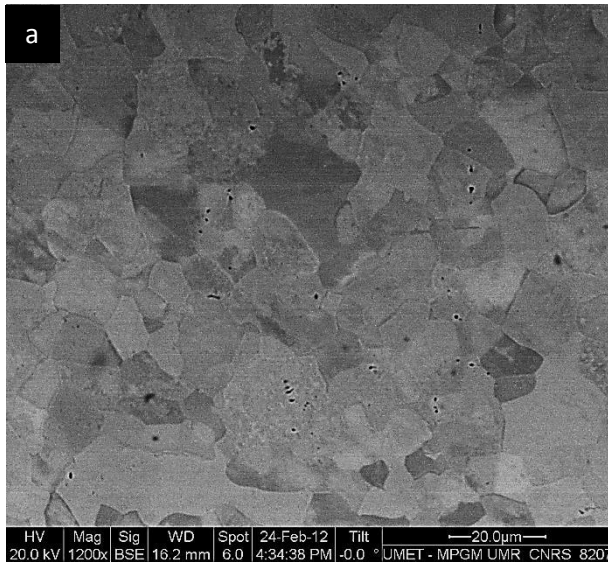
**Tabla 14.** Porcentaje aproximado del área superficial deformada (Probeta 0,3S)

$\Delta\epsilon_t = 0,3\% ; N_R = 191000$ ciclos				
Interrupciones	Ciclos	Duración de Vida (%)	Superficie Deformada (%)	
			Activación Unidireccional	Activación Multidireccional
1	100	0,05	0	0
2	10000	5,0	30	10
3	50000	27,0	30	21
4	100000	54,0	60	40

### 4.3.1.2. Probeta SPCD- 0.5S

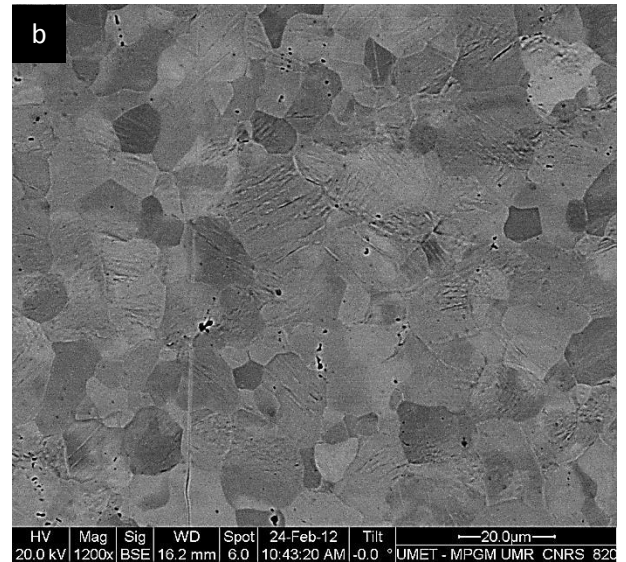
**Figura 18.** Micrografías SEM Evolución de la Microestructura Probeta 0.5S

**Interrupción 1.** 0.25 % Duración de Vida



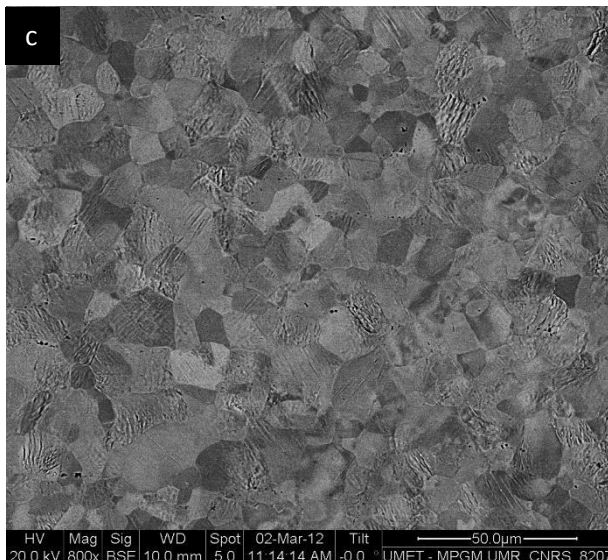
**100 ciclos (1200X) – 0,5S**

**Interrupción 2.** 2,5% Duración de Vida



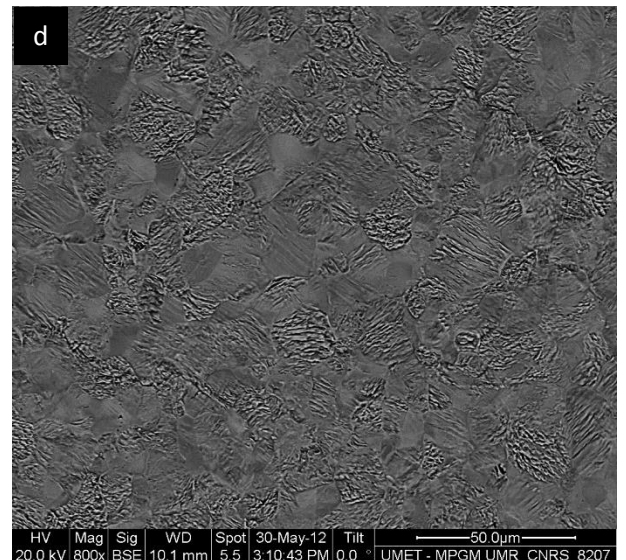
**1000 ciclos (1200X) - 0,5S**

**Interrupción 3.** 5% Duración de Vida



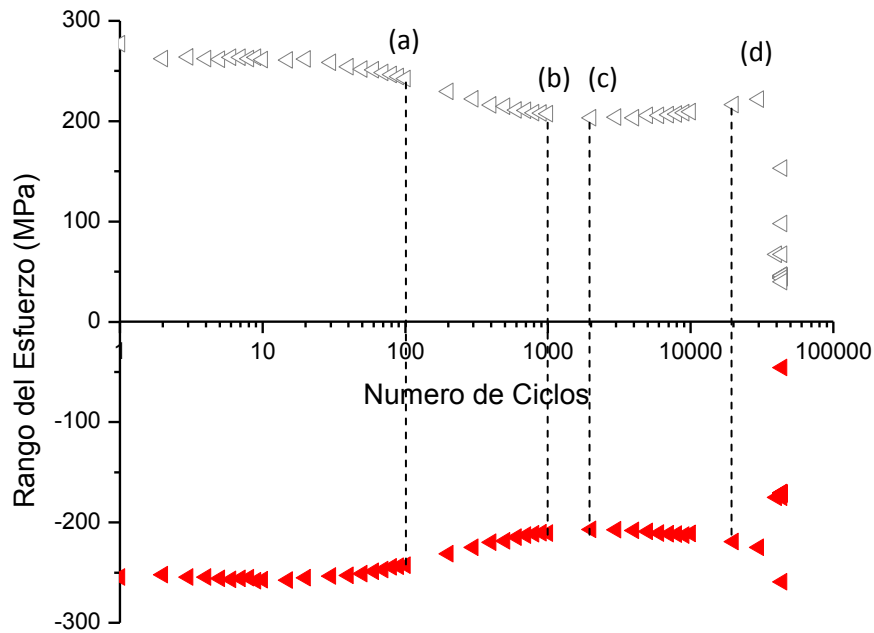
**2000 ciclos (800X) – 0,5S**

**Interrupción 4.** 50% Duración de Vida



**20000 ciclos (800X) – 0,5S**

**Figura 19.** Curva de rango de esfuerzos vs. Número de ciclos - 0,5S.



La Figura 19 muestra el rango del esfuerzo ( $\Delta\sigma$ ) para el ensayo con  $\Delta\varepsilon_t = 0,5\%$ , que corresponde a un comportamiento de endurecimiento/ablandamiento y posterior endurecimiento secundario que conduce a la rotura. Las interrupciones (a) y (b) corresponden al ablandamiento, (c) pertenece a la zona completamente ablandada  $\sigma_{min.}$ , (d) se localiza en la zona de endurecimiento secundario antes de la rotura.

La Figura 18 muestra los resultados microestructurales encontrados en cada una de las interrupciones, los cuales corresponden a las líneas (a) a (d).

Para la probeta 0,5S se observó en la Figura 18.a que después de un número de ciclos equivalente al 0,25% de la duración de vida. La probeta no presentó alteraciones evidentes en su microestructura superficial.

En la Figura 18.b se aprecian bandas de deslizamiento sobre algunos granos, las cuales aparecen a un 2.5% de la duración de vida.

Durante el ensayo, las bandas de deslizamiento en los granos se hacen más evidentes del mismo modo que la cantidad de sistemas de deslizamiento activos. Si comparamos la formación de las bandas de deslizamiento para los rangos de deformación 0.5S y 0.3S se observan cambios importantes en la microestructura para un bajo porcentaje de duración de vida. También existe la posibilidad de encontrar de encontrar sistemas de deslizamiento activos en varias orientaciones, que son más evidentes a 0.3S.

En la Figura 18.d corresponde al final del ensayo, al 50% de duración de vida donde se encuentra una zona completamente deformada y numerosos sistemas de deslizamiento activos.

La Tabla 13 muestra la evolución cuantitativa de la deformación en la microestructura producida por la activación de sistemas simples y complejos en función del número de ciclos.

**Tabla 15.** Porcentaje aproximado del área superficial deformada (Probeta 0,5S)

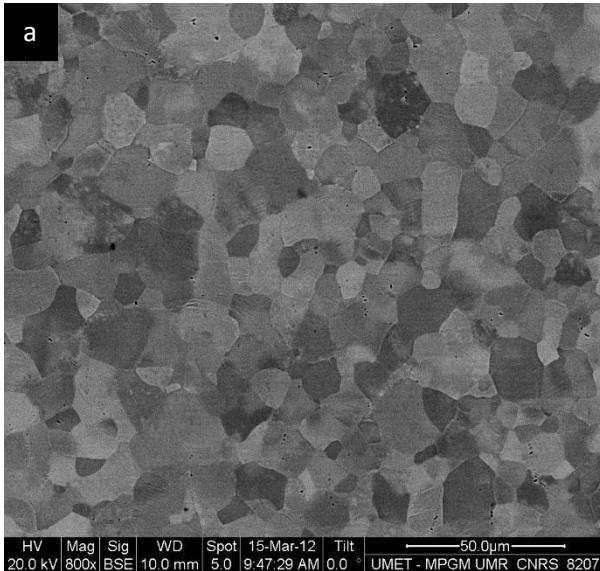
**$\Delta\epsilon_t = 0,5\%$ ;  $N_R = 40000$  ciclos**

Interrupciones	Ciclos	Duración de Vida (%)	Superficie Deformada (%)	
			Activación Unidireccional	Activación Multidireccional
1	100	0,25	0	0
2	1.000	2,5	41	2
3	2.000	5,0	50	16
4	20.000	50,0	5	90

### 4.3.1.3. Probeta SPCC – 1.0S

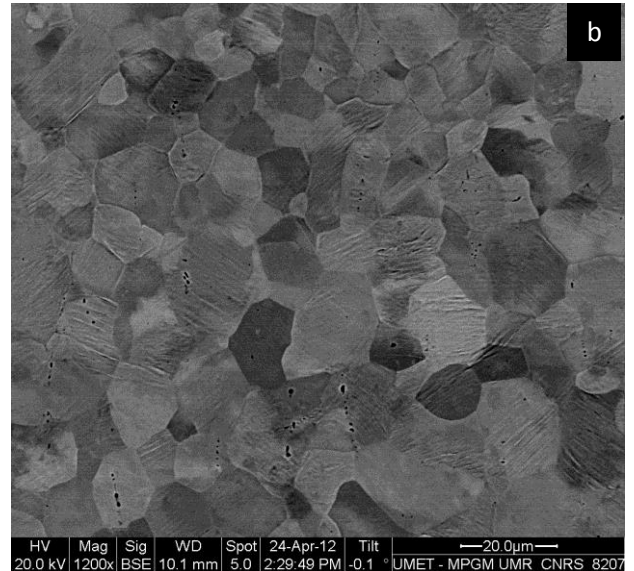
**Figura 20.** Micrografías SEM Evolución de la Microestructura Probeta 1,0S

**Interrupción 1.** 1% Duración de Vida



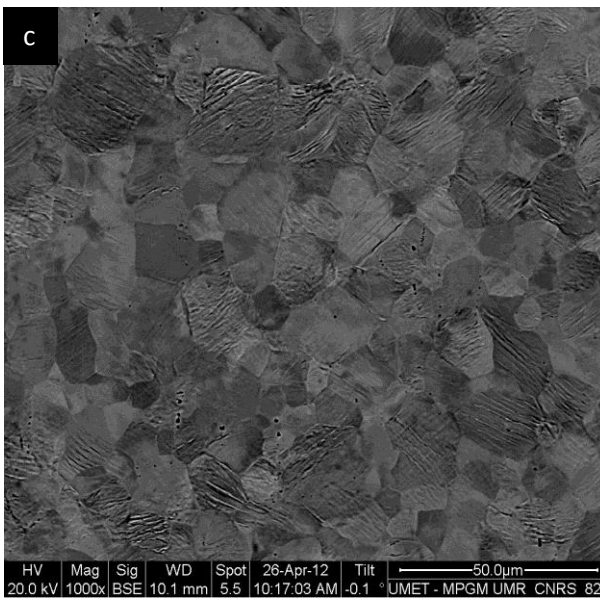
**50 ciclos – 1,0S**

**Interrupción 2.** 2% Duración de Vida



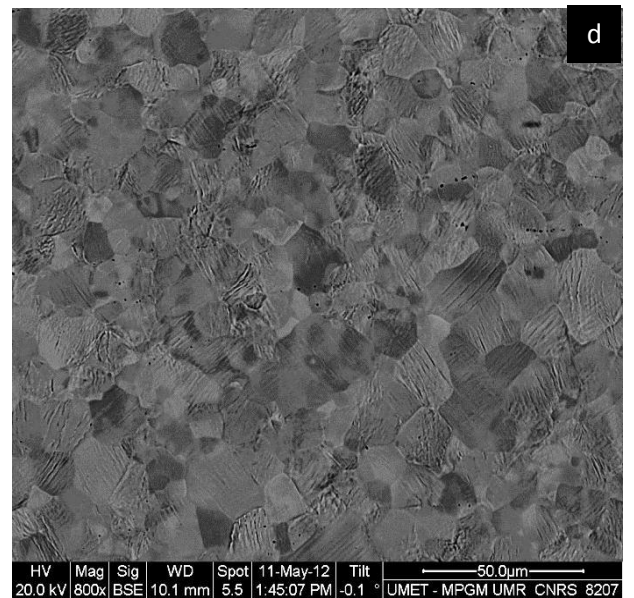
**100 ciclos - 1,0S**

**Interrupción 3.** 6% Duración de Vida



**300 ciclos (800X) – 1.0S**

**Interrupción 4.** 20% Duración de Vida



**1.000 ciclos (800X) – 1.0S**



La Figura 21 muestra el rango del esfuerzo ( $\Delta\sigma$ ) para el ensayo con  $\Delta\varepsilon_t = 1,0\%$ , que corresponde a un comportamiento de endurecimiento/ablandamiento y endurecimiento secundario que conduce a la rotura. La interrupción (a) y (b) se encuentran en la zona de ablandamiento, (c) se localiza en el esfuerzo mínimo, (d) y (e) en la zona de endurecimiento secundario antes de la rotura.

La Figura 20 muestra los resultados microestructurales encontrados en cada una de las interrupciones, los cuales corresponden a las líneas (a) a (e).

La Figura 20.a muestra la microestructura de la probeta después de 1% de su duración de vida, muestra bandas de deslizamiento que comienzan a desarrollarse en los granos, en la Figura 20.b los sistemas de deslizamiento se aprecian claramente en los granos después de pasar el 2% de su duración de vida.

Comparando del nivel de deformación entre 0,3S y 1,0S notamos que la activación de sistemas de deslizamientos simples y complejos se observan rápidamente para un rango de deformación mayor, mientras que a un rango menor las bandas de deslizamiento son menos definidas y el número de ciclos a ruptura es mayor.

La Tabla 16 muestra la evolución cuantitativa de la deformación en la microestructura producida por la activación de sistemas simples y complejos en función del número de ciclos.

**Tabla 16.** Porcentaje aproximado del área superficial deformada (Probeta 1,0S)

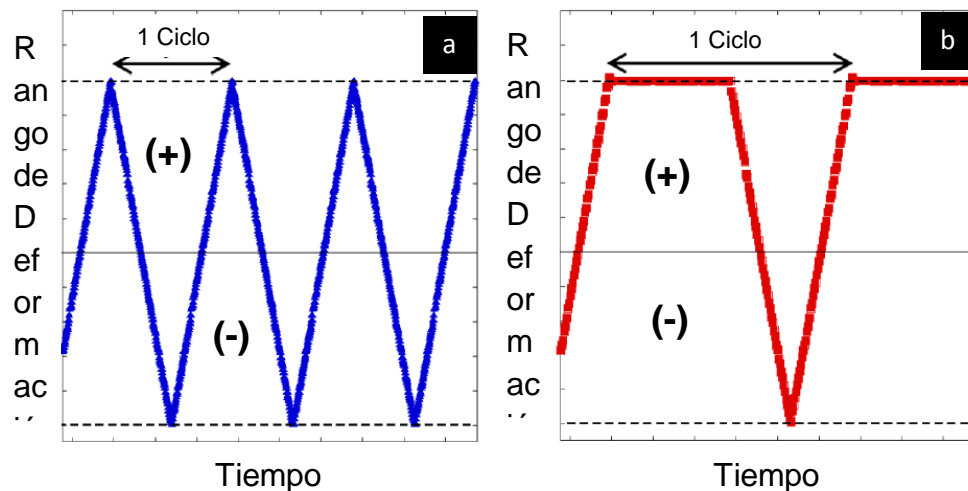
Interrupciones	Ciclos	Duración de Vida (%)	Superficie Deformada (%)	
			Activación Unidireccional	Activación Multidireccional
			1	50
2	100	2,0	45	7
3	300	6,0	65	14
4	1.000	20,0	60	20
5	2.000	40,0	50	45

### 4.3.2. ANÁLISIS FRACTOGRÁFICO

Para los resultados del estudio fractografico las probetas fueron llamados según los rangos de deformación junto con la señal estudiada como se muestra en la Tabla 17, en la Figura 22 se observa un ejemplo de las señales presentadas.

En los ensayos de fatiga las probetas se llevan hasta la rotura, y en todas se presentó fractura plana (Zona I) al inicio perpendicular al eje principal de la probeta, el cual es la dirección de aplicación de la carga durante el ensayo de fatiga; y la zona monotónica (Zona III) se encuentra estriccionada y la grieta se encuentra a 45°.

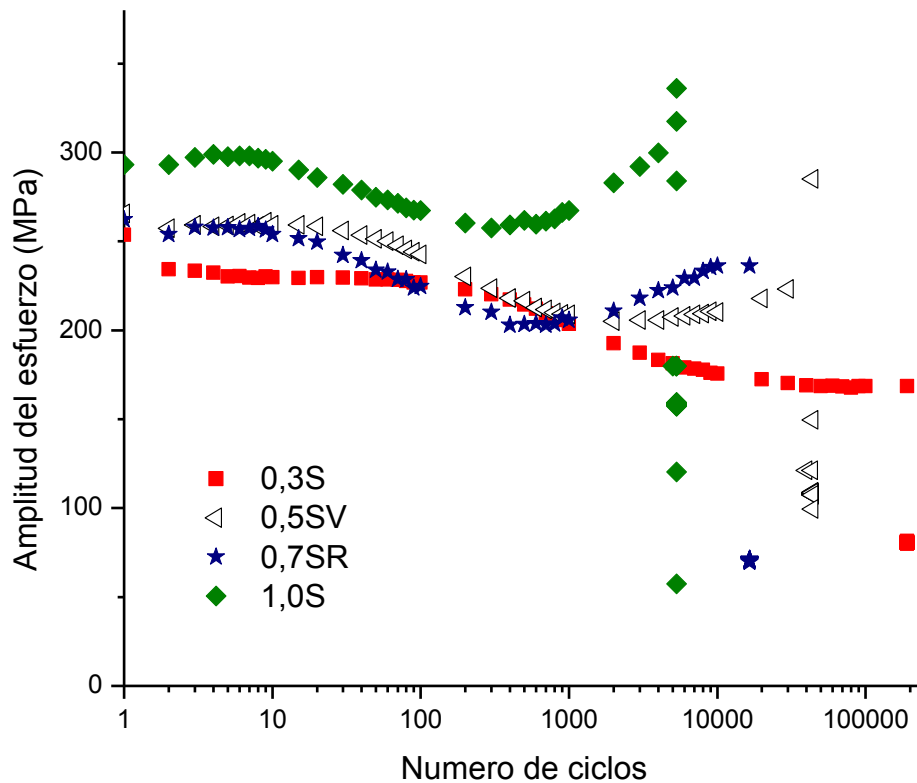
**Figura 22.** Señal de carga (a) ensayo simétrico y (b) ensayo de relajación.



**Tabla 17.** Condiciones de los ensayos de Fatiga para Fractografías.

Nombre	Particularidad	$\Delta \epsilon_t$ (%)	$\epsilon_{\min}$ (%)	$\epsilon_{\max}$ (%)	$R_\epsilon$
0,3S	Simétrico	0,3	-0,15	0,15	-1
0,5SV	Velocidad $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$	0,5	-0,25	0,25	-1
0,7SR	Relajación, Tiempo mantenido en tracción (2 segundos)	0,7	-0,35	0,35	-1
1,0S	Simétrico	1,0	-0,5	0,5	-1

**Figura 23.** Grafica de amplitud del esfuerzo Vs. Número de ciclos, para los diferentes rangos de deformación- 0,3S, 0,5SV, 0,7SR y 1,0S.



La Figura 23 muestra el comportamiento del acero sometido a los ensayos de fatiga de la Tabla 17; se confirmó el comportamiento encontrado en los ensayos anteriores, en los cuales se observó que para un rango de deformación elevado ( $\Delta\epsilon_t = 0,5\%$ ,  $0,7\%$ ,  $1,0\%$ ) después de algunos ciclos un ligero endurecimiento seguido de un ablandamiento y un endurecimiento secundario que conduce rápidamente a rotura.

#### 4.3.2.1. Superficie de fractura 0.3S

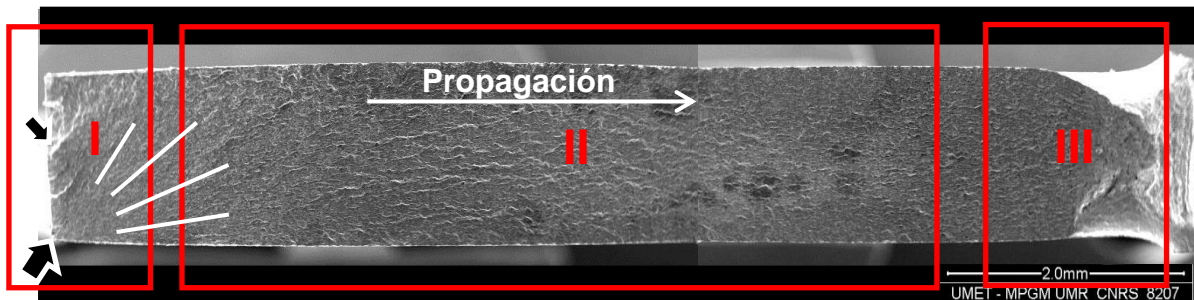
La Figura 24 muestra la micrografía a bajos aumentos de la superficie de fractura de la probeta 0,3S, en la que se observan 3 zonas importantes:

Zona I, Zona de iniciación de la fisura.

Zona II, Zona de propagación de la fisura.

Zona III, Zona de rotura última.

**Figura 24.** Vista de la superficie de fractura 0,3S.

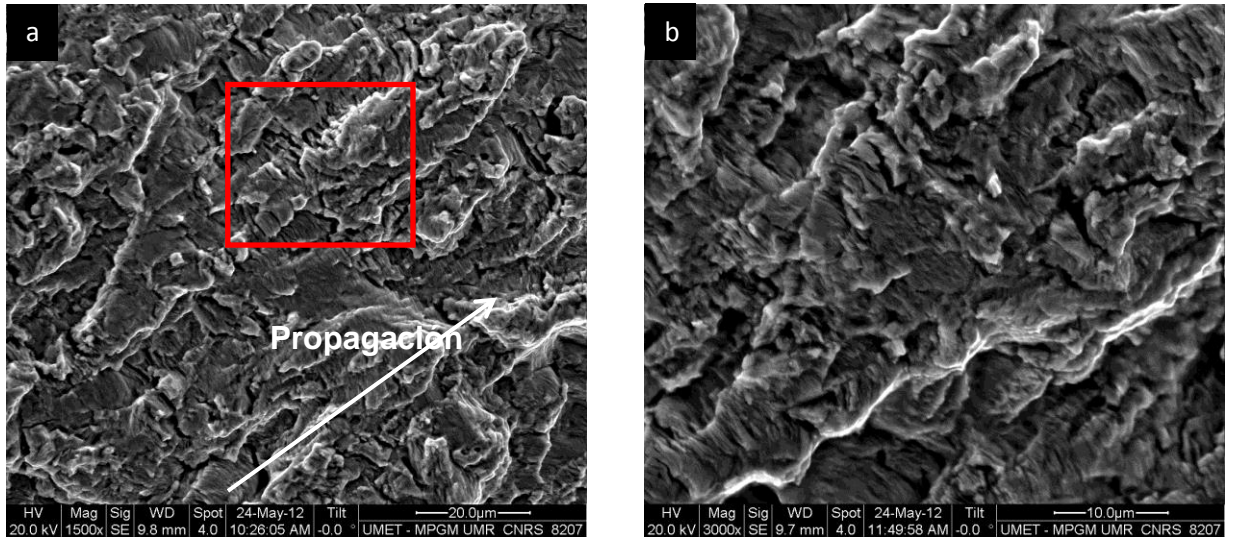


La Figura 24 muestra una vista microscópica a bajos aumentos de la superficie de fractura de la probeta 0.3S. La zona de la izquierda (Zona I) se trata de una zona de fisuración por fatiga donde la fisura avanza durante la aplicación de los ciclos. Además muestra marcas propagación de la grieta principal en diferentes direcciones apuntando hacia atrás donde se encuentra su origen.

No se encontraron sitios de iniciación de fisuras secundarias, el sitio secundario más importante se ubicó en la Figura 24 con una flecha pequeña.

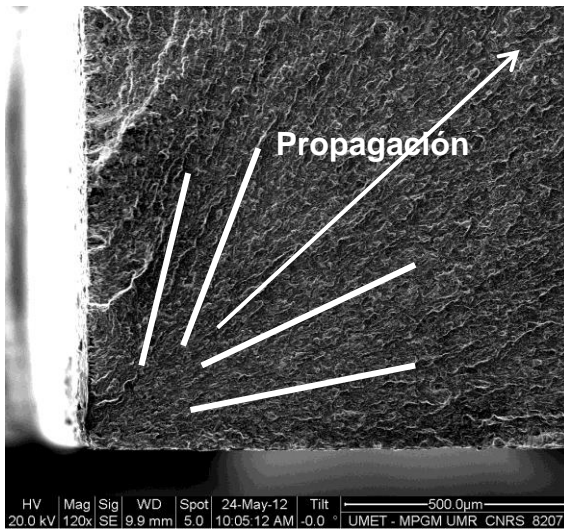
La parte derecha de la Figura 24 (Zona III) muestra una zona estriccionada que corresponde a la ruptura monotónica, que muestra una morfología característica, debida a la presencia de hoyuelos lo que indica un comportamiento dúctil.

**Figura 25.** Micrográficas SEM Zona I de la Figura 17 (a) Sitio de iniciación de la fisura principal y (b) estriaciones de fatiga a 3000X.- 0,3S



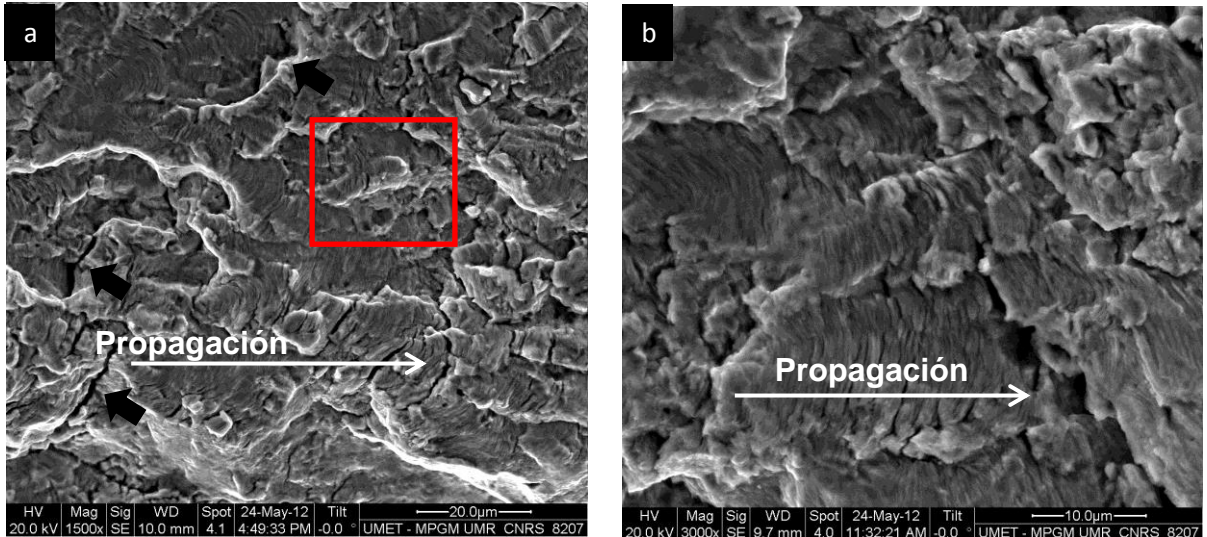
La Figura 25.a en la Zona I de la superficie de fractura muestra estriaciones de fatiga que confirman la propagación de la fisura por fatiga. La estructura presenta una distancia muy pequeña entre estriaciones indicando que la propagación inicial de la fisura fue lenta. La rugosidad presente en la micrografía muestra una propagación intergranular con presencia de microvacíos.

**Figura 26.** Zona I- Iniciación de la Fisura 0,3S.



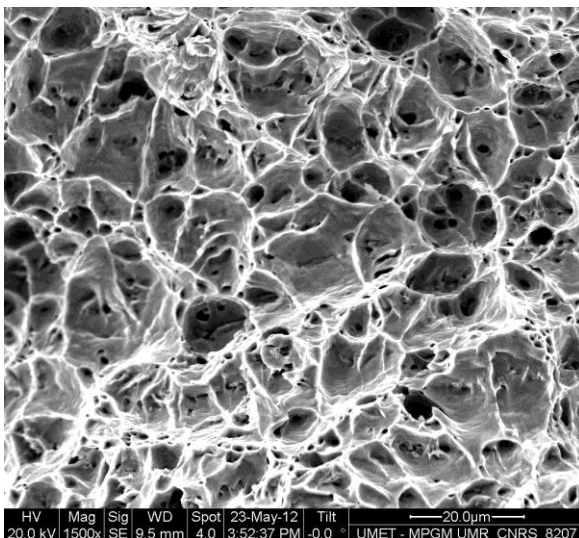
La Figura 26 muestra claramente las marcas de propagación de la grieta, cuyo vértice indica el sitio de iniciación de la fisura principal.

**Figura 27.** Micrográficas SEM **Zona II** de la Figura 17 (a) estriaciones de propagación a 1500X y (b) 3000X – 0.3S



La Figura 27.a muestra la zona de propagación de la fisura, esta zona es la más extensa en la superficie de fractura y se caracteriza por tener bandas de deslizamiento más espaciadas que la zona I, Figura 27.b, mostrando un avance más rápido de la fisura en esta zona. Hay descohesión en los granos, las flechas en la Figura 27.a muestran pequeñas fisuras que aparecen en las bandas de deslizamiento; de modo general la superficie muestra relieve característico de una propagación intergranular.

**Figura 28.** Micrografía SEM- **Zona III** rotura final.

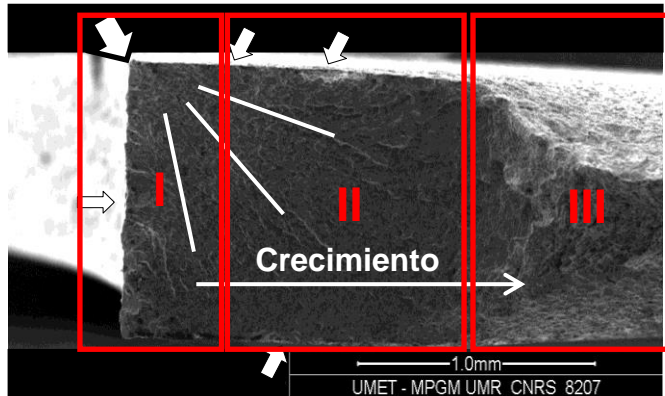


La Figura 28 muestra la zona de rotura final, su característica más clara es la presencia de hoyuelos las cuales se originan en un comportamiento de ruptura dúctil. Se observó una longitud de la zona de rotura final de aproximadamente 1 mm.

#### 4.3.2.2. Superficie de Fractura 0,5SV3

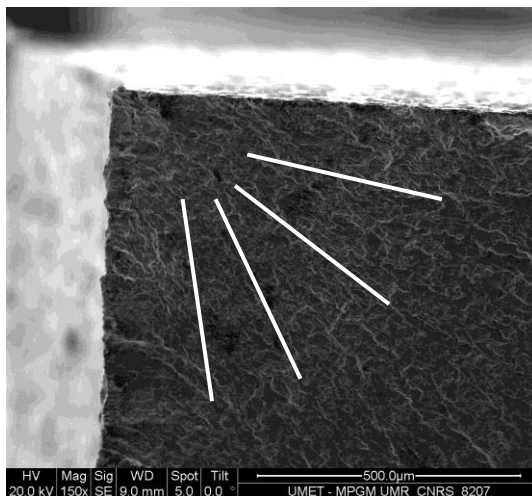
La Figura 29 muestra una micrografía a bajos aumentos de la superficie de fractura de la probeta 0,5SV3 ensayada en servicio de deformación simétrica, con una velocidad 10 veces más lenta y con una deformación total  $\Delta\epsilon_t = 0,5\%$ .

**Figura 29.** Vista de la superficie de fractura 0,5SV3



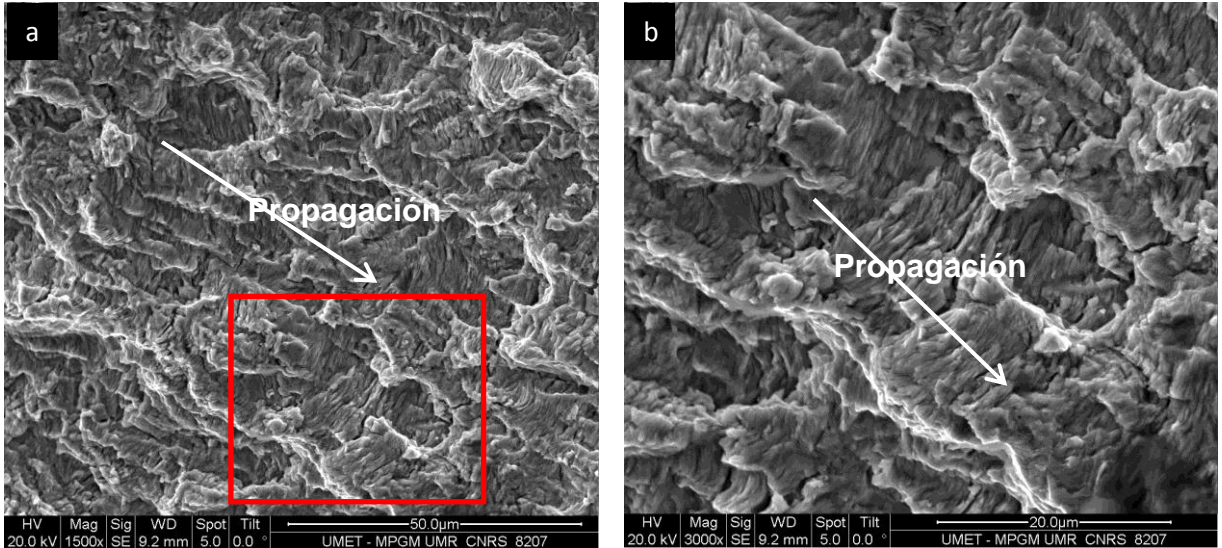
Se observa de manera general que la zona I y II en este ensayo tienen una longitud de alrededor de 1,5 mm.

**Figura 30.** Zona I de la Figura 23. Iniciación de la Fisura – 0,5SV3



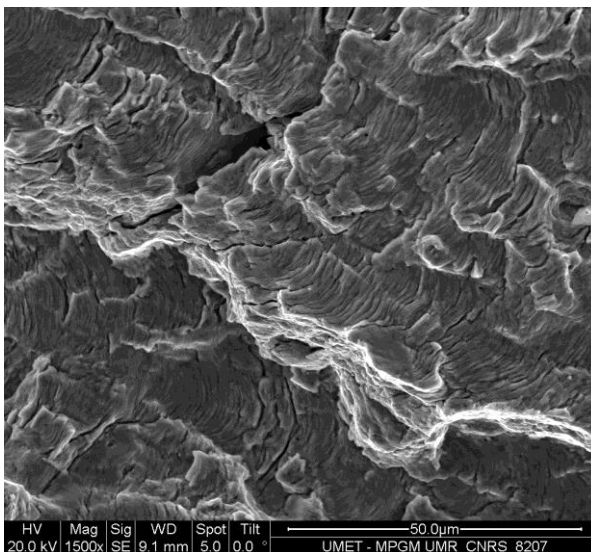
La Figura 30 muestra la zona de iniciación de la fisura la cual es indicada por el vértice de las marcas de propagación en diferentes direcciones.

**Figura 31.** Micrografías SEM **Zona I** de la Figura 22 **(a)** Sitio de iniciación de la fisura principal y **(b)** detalles de las estriaciones de fatiga. – 0,5SV3.



La Figura 31.a muestra con detalle la Zona I del ensayo 0,5SV3, con una superficie muy rugosa, lo que indica que se trate de una propagación de un fisura transgranular; la Figura 31.b muestra en detalle las bandas de deslizamiento las cuales muestran un avance de la fisura como lo muestra la flecha.

**Figura 32.** Micrografías SEM **Zona II** de la Figura 22. Estriaciones de fatiga.

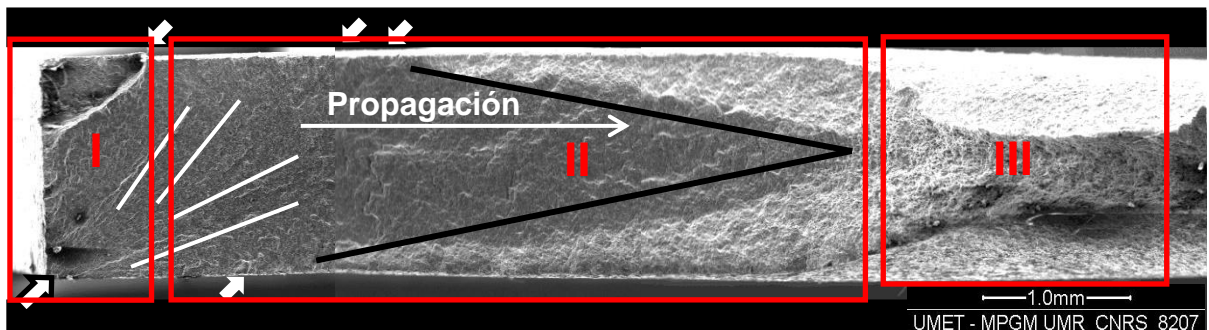


La Zona II muestra un relieve más plano indicando que la fisura se propagó de manera transgranular y con una velocidad mayor que en la Zona I, debido a un mayor espaciamiento entre las bandas de deslizamiento. (Figura 32).

#### 4.3.2.3. Superficie de Fractura 0.7SR

La Figura 33 muestra una micrografía a bajos aumentos de la superficie de fractura de la probeta ensayada en deformación servo simétrica ( $R_\varepsilon = -1$ ), una zona de relajación de 2 segundos a tracción y con una deformación total  $\Delta\varepsilon_t = 0,7\%$ .

**Figura 33.** Vista de la superficie de fractura 0,7SR.

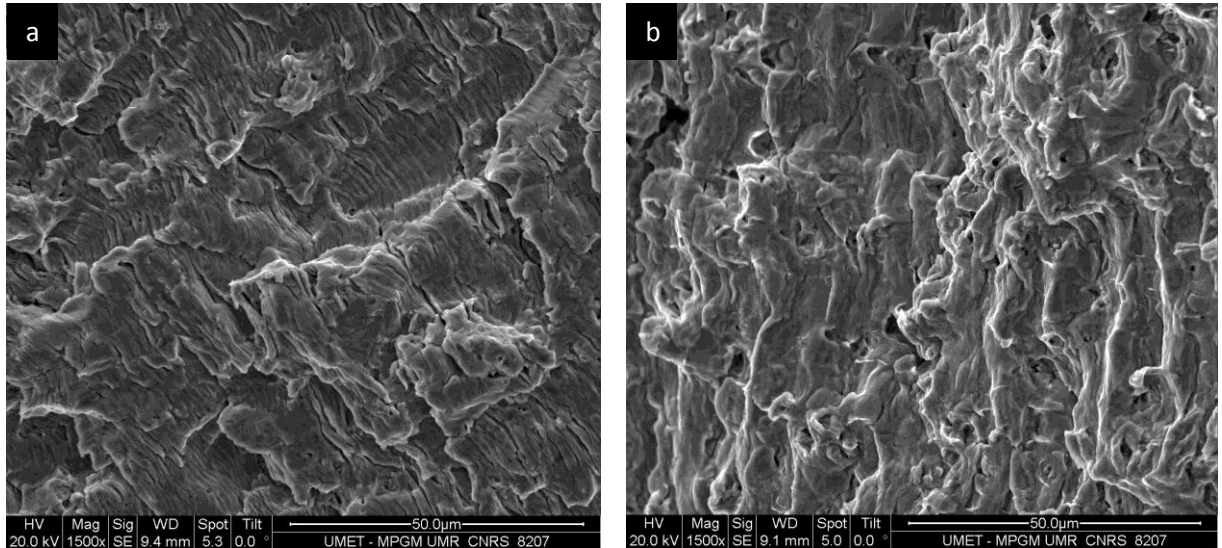


La Figura 33 muestra la orientación bien definida de las marcas de propagación en todas las direcciones que indica el avance de la fisura. A comparación de los demás ensayos se observa que la superficie se encuentra más brillante que las demás y la zona monótonica se extiende hacia la zona de propagación mostrando una zona fibrosa limitada por las líneas negras.

La Figura 34.a muestra una superficie más plana en comparación con la Zona II Figura 34.b, afirmando que se trata de una propagación transgranular para el inicio de la fisura, que posteriormente en la zona de propagación Figura 34.b, muestra un cambio en la morfología que puede ser atribuido a una transición frágil-dúctil de la fisura.

Comparando con los ensayos realizados sobre las probetas 0.3S y 1.0S, observamos claramente la diferencia entre el espaciamiento de las bandas de deslizamiento. La zona de rotura última tiene un comportamiento semejante en todas las superficies de fractura analizadas.

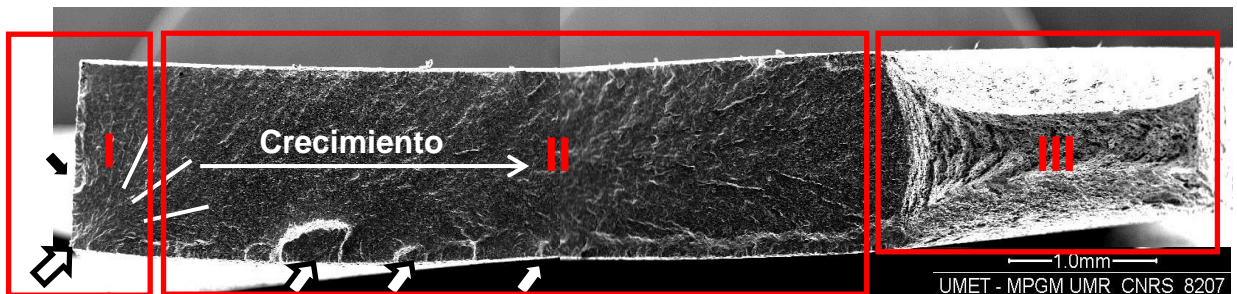
**Figura 34.** Micrografía SEM (a) propagación de estriaciones de fatiga próximas a la Zona I, (b) detalle de la Zona II- 0.7SR.



#### 4.3.2.4. Superficie de Fractura 1.0S

La Figura 35 muestra una micrografía a bajos aumentos de la superficie de fractura de la probeta ensayada en deformación servo simétrica ( $R_\epsilon = -1$ ), con una deformación total  $\Delta\epsilon_t = 1,0\%$ .

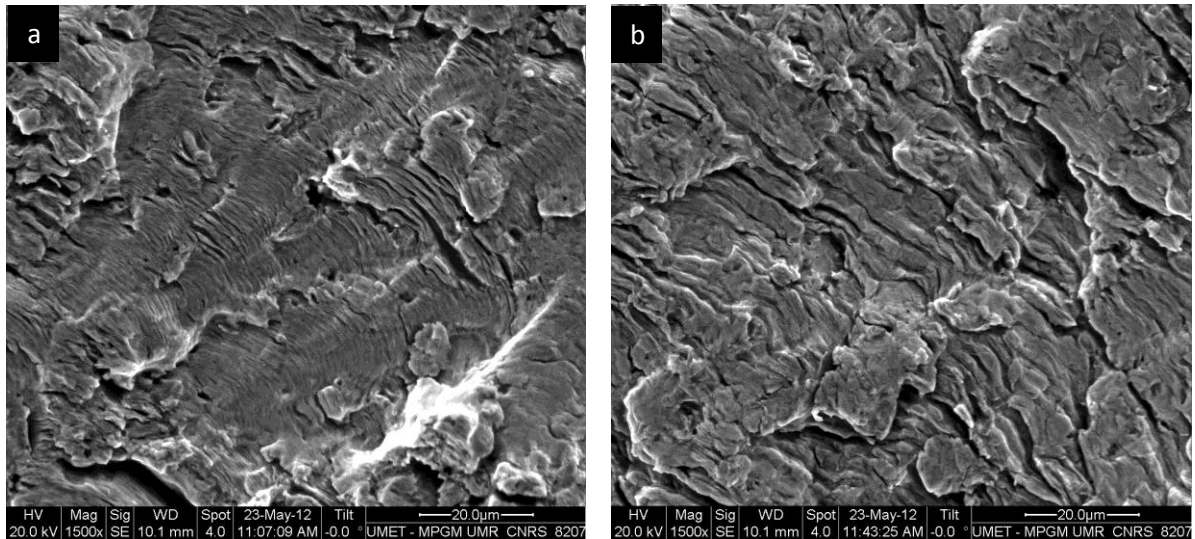
**Figura 35.** Vista de la cara de ruptura 1,0S



La Figura 35 muestra una vista de la superficie de fractura 1,0S. A nivel microscópico, se observan las Zonas I y II donde la fisura se propaga, se encontró también estriaciones de fatiga, el sitio de iniciación principal se indicó con la flecha grande.

En la zona II de la superficie se observan algunos sitios de ramificación de la fisura principal, indicados por las flechas pequeñas, las longitudes de propagación son de al menos 200  $\mu\text{m}$ .

**Figura 36.** Micrografía SEM (a) Zona I sitio de iniciación de la fisura y (b) Zona II sitio de propagación- 1.0S.

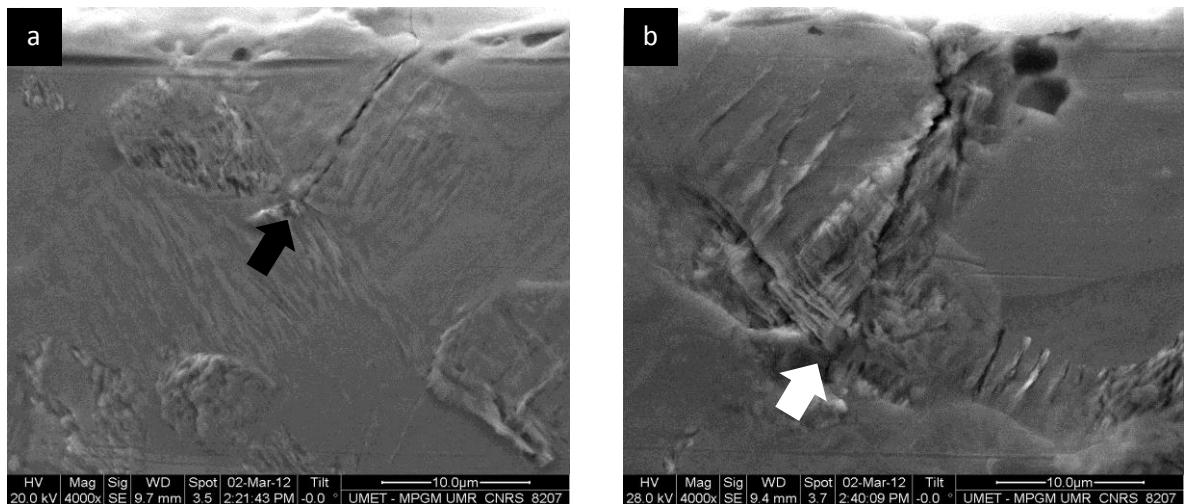


La Figura 36.a muestra una superficie más plana con algunos relieves indicando una propagación mixta del frente de la fisura, es decir transgranular e intergranular. En la Figura 36.b se observan las estriaciones de fractura por fatiga donde hay un aumento de la velocidad del frente de la grieta durante su paso por la zona II.

## 5. ANALISIS DE RESULTADOS

### 5.1. ANÁLISIS DE LA INICIACIÓN DE FISURAS

**Figura 37.** Micrográficas MEB (a) Iniciación de Fisura Intergranular -0,3S 100.000 ciclos y (b) Transgranular -0,3S 100.000 ciclos.



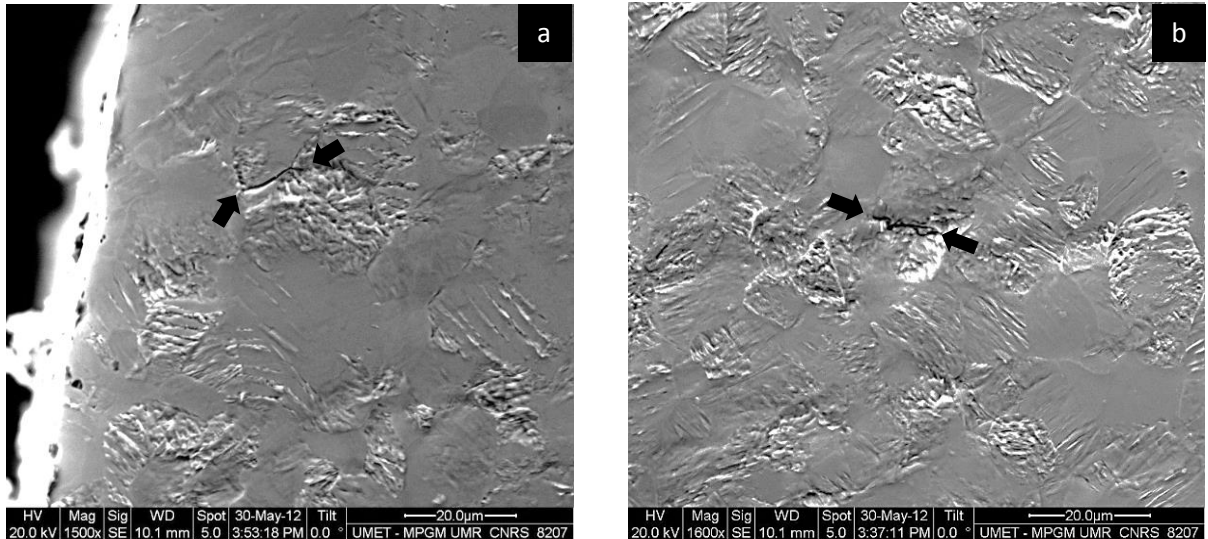
Para determinar la naturaleza de la iniciación de la fisura se han observado las fisuras cortas (dimensiones de un grano aproximadamente) y se han distinguido dos tipos de iniciación.

Transgranular, La Figura 37.a muestra una fisura iniciada en una banda de deslizamiento, propagándose paralela a esta y atravesando el grano. Esta fisura es bloqueada por un límite de grano. Intergranular, La Figura 37.b muestra una fisura iniciada en un límite de grano, y se propaga sobre éste hasta ser bloqueada.

Se observó que también se forman fisuras en zonas alejadas de la superficie. La Figura 38.a muestra una pequeña fisura intergranular bloqueada por un grano que contiene varios sistemas de deslizamiento activos.

La Figura 38.b muestra una fisura pequeña que se ha iniciado en las bandas de deslizamiento y es bloqueada por un límite de grano. Se observó que la dirección de propagación es paralela a las bandas de deslizamiento.

**Figura 38.** Micrografías SEM - Microfisura **(a)** Intergranular a 50% de duración de vida, **(b)** Transgranular a 50% de la duración de vida. – 0,5S



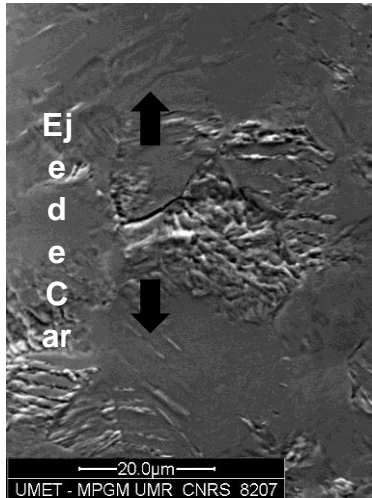
Para un rango mayor de deformación se observó la aparición temprana de sitios de iniciación de fisuras con preferencia intergranular en la superficie del material ubicados de manera aislada.

La nucleación de las fisuras se produce en las bandas de deslizamiento, superficies rugosas y límites de grano.

### 5.1.1. Límites de Grano

Las fisuras se forman preferentemente en los límites de grano, debido a la orientación del grano en la dirección del eje de aplicación de la carga; ya que la mayoría de las fisuras que nuclearon en los límites de grano tiene un ángulo con el eje de carga entre 45 – 90°. [17]

**Figura 39.** Micrografía SEM Sitio de iniciación de una fisura intergranular al 50% de duración de vida – 0,5S, 1000X.



La Figura 39 muestra una fisura intergranular, y vemos que se trata según los estudios de Liu W. y Bayerlein M., y también la mayor parte de las fisuras que se encuentran en el límite de grano muestran una orientación perpendicular con el eje de carga [25], en nuestro caso estudiado la orientación no es paralela, esto hace que la propagación de la fisura se produzca en los granos adyacentes de manera transgranular.

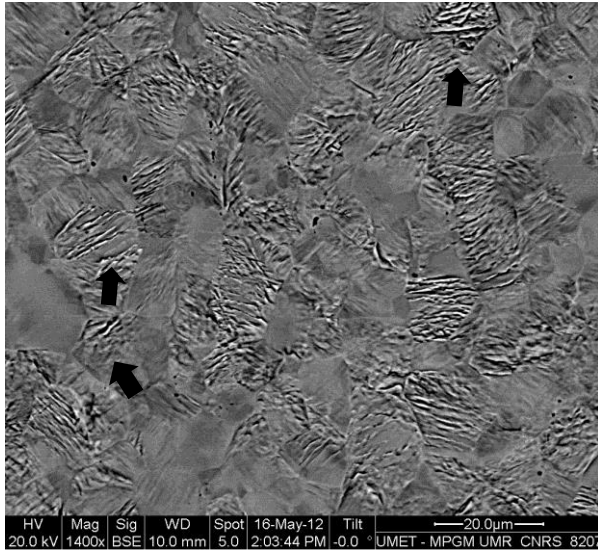
Por el contrario, un sitio de iniciación de una fisura transgranular con una orientación casi paralela al eje de carga y según los estudios realizados en [5], se espera que la propagación de la fisura sea algo difícil porque no se encuentra sobre el plano del máximo esfuerzo.

### **5.1.2. Bandas de deslizamiento**

Las bandas de deslizamiento tienen un rol importante en la formación de las fisuras por fatiga, y se deben a la repetición de los ciclos y a la formación de zonas de concentración de esfuerzos en las extrusiones e intrusiones, entonces las microfisuras aparecen y se propagan a lo largo de las bandas de deslizamiento persistentes.

Según Zhang M, Yang P. y Tan Y., la nucleación de las fisuras se produce fácilmente en los sistemas de deslizamiento simples que en los sistemas con bandas de deslizamiento intersectadas, ya que existe una relación entre la configuración de la red de dislocaciones y los sistemas de deslizamiento múltiple evitando la nucleación de fisuras.

**Figura 40.** Micrografía SEM Sitios de iniciación de fisuras transgranulares al 50% de duración de vida – 0,5S.



En la Figura 40, se observó nucleación de las fisuras en las bandas de deslizamiento, casi todas las fisuras se propagan justo hasta el límite de grano; por el contrario los granos con sistemas múltiples de deslizamiento muestran según la literatura una ausencia de nucleación de las fisuras en el interior del grano.

En esta parte se ha encontrado que estas fisuras se clasifican en el Estado I de propagación, debido a que la longitud de la fisura no es mayor a la del tamaño de grano; del mismo modo se denota también que la mayor parte de las fisuras encontradas durante la evolución microestructural a cada nivel de deformación son intergranulares y que se desarrollan en el Estado II de propagación de la grieta.

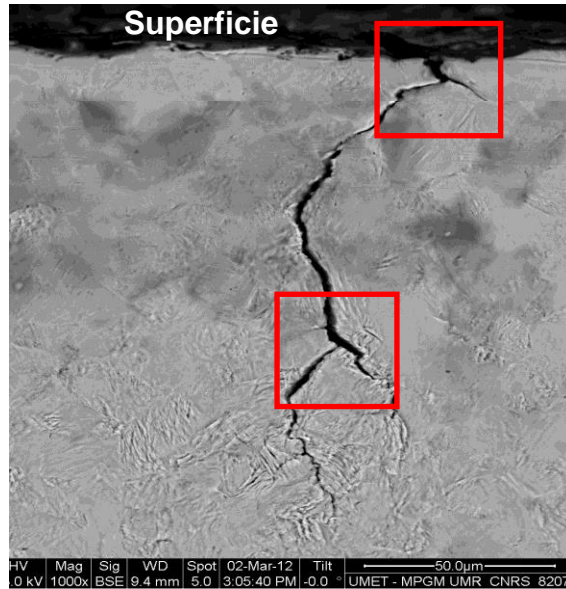
## 5.2. ANÁLISIS DE LA PROPAGACIÓN DE LA FISURA

El análisis de la propagación de la fisura se realizó sobre una probeta que experimentó un número de ciclos correspondiente a la mitad de la duración de vida en un rango de deformación  $\Delta\varepsilon_t = 0,3\%$ .

Se observó en la superficie de la probeta la presencia de una macrofisura de alrededor 2,5 mm y de dos microfisuras de aproximadamente 150  $\mu\text{m}$  ubicadas al costado de la fisura macroscópica. A continuación vamos a observar detalladamente el comportamiento de estas fisuras.

### 5.2.1. Microfisura

**Figura 41.** Microfisura del ensayo 0.3S, al 54% de duración de vida.



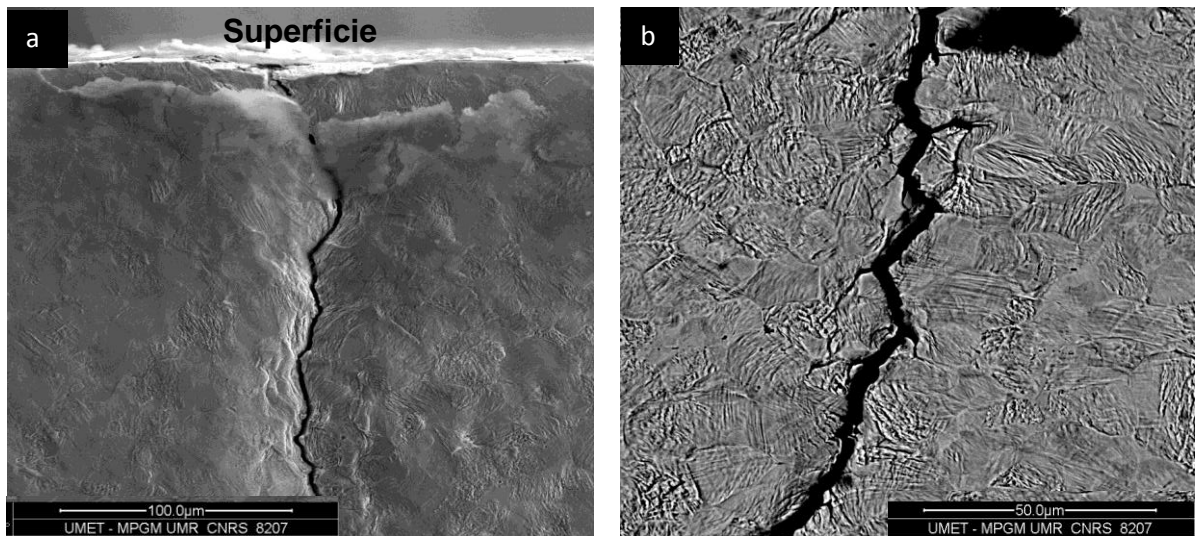
La Figura 41 muestra una microfisura superficial de 150  $\mu\text{m}$  de longitud y propagándose de manera transgranular. Las zonas señaladas presentaron mayor concentración de esfuerzos cortantes que generó ramificaciones de la fisura.

### 5.2.2. Macrofisura

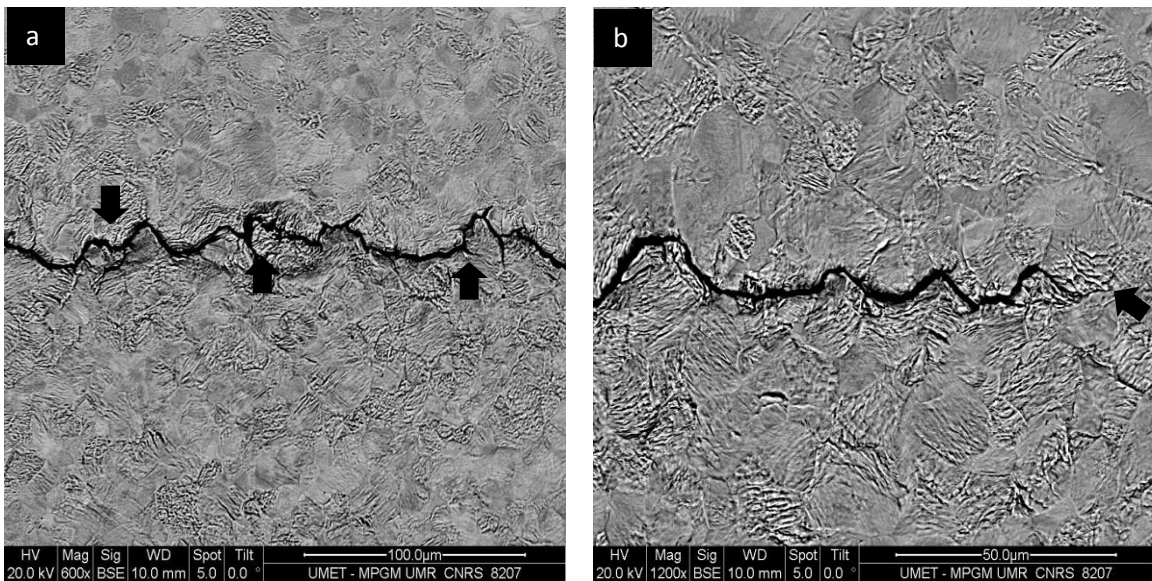
La Figura 42.a muestra la zona de la macrofisura cerca del borde de la probeta, se observó una propagación inicialmente transgranular en la fisura, con algunos comportamiento intergranulares de la misma, La Figura 42.b muestra la densidad de bandas de deslizamiento presentes sobre el camino de la grieta.

Se encontró cerca de la macrofisura zonas de iniciación de pequeñas fisuras presentes tanto en límites de grano como en bandas de deslizamiento persistentes.

**Figura 42.** Micrografía SEM - Macrofisura (a) Borde, (b) detalle cerca del borde, 0,3S – 54% Duración de vida.



**Figura 43.** Micrografía SEM – Macrofisura (a) zona cercana a la punta de la fisura, (b) punta de la fisura.



La Figura 43.a muestra la zona cercana a la punta de la fisura, la propagación en esta zona de la macrofisura se comporta de manera intergranular, indicadas por las flechas negras; esta zona mostró también pequeñas ramificaciones que se extendieron hasta la punta de la macrofisura.

En la punta de la fisura, Figura 43.b se observó una propagación igualmente intergranular así como zonas de iniciación de fisuras bien marcadas en las bandas de deslizamiento presentes en los granos adyacentes.

Durante el desarrollo de los ensayos se observó que algunas fisuras comienzan a aparecer en las bandas de deslizamiento. Estas estructuras son asociadas a la evolución de una subestructura de dislocación y también a la formación de marcas de deslizamiento (extrusión/intrusión) en la superficie [25]. Esta formación de marcas permite generar fisuras debajo de estas extrusiones e intrusiones. La intensidad del relieve depende del nivel del esfuerzo aplicado, y su distribución de concentración de esfuerzos. El número de ciclos es importante para la formación de fisuras.

En los tres rangos de deformaciones simétricas estudiadas, se encontró formación de sistemas activos correspondientes a bandas de deslizamiento persistentes. Las superficies se hacen rugosas favoreciendo la nucleación y de esta manera la propagación de las fisuras. Los mecanismos de formación de las fisuras serán estudiados a continuación con el fin de comprender cómo aparecen en el material.

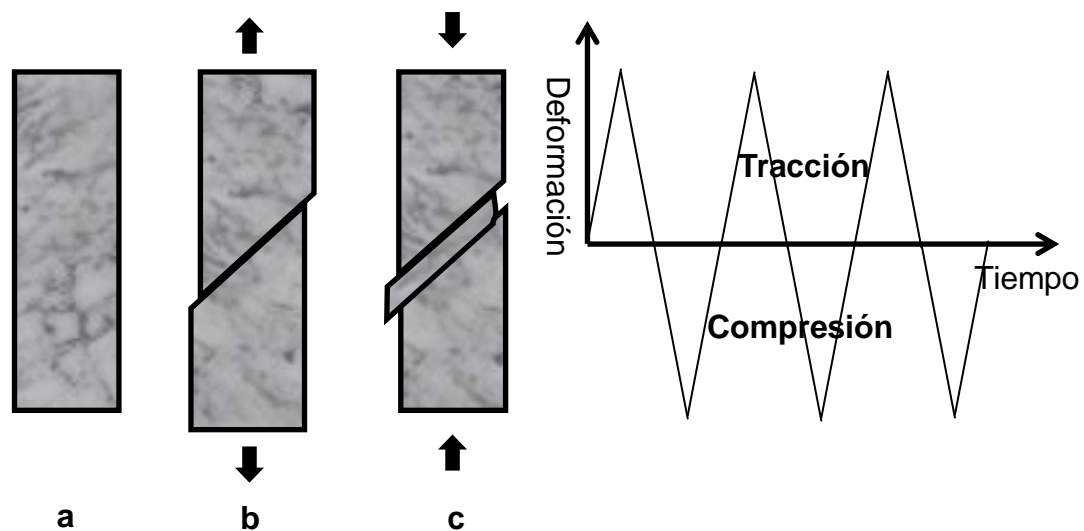
### **5.3. MECANISMOS DE ACOMODACIÓN DE LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA**

Existe una relación directa entre la deformación plástica cíclica y la formación de las fisuras. Según lo estudiado anteriormente, se supone que la concentración de los esfuerzos conduce a la deformación plástica. Este mecanismo está fuertemente ligado a la microestructura y específicamente a la estructura de

dislocaciones durante el endurecimiento del material luego del ensayo de fatiga. [23]

Un modo de cuantificar los daños acumulados por la fatiga es la densidad de líneas de deslizamiento en la superficie del material, en el mismo sentido que las bandas de deslizamiento persistentes que se forman después de miles de ciclos. [25] La presencia de las bandas en la superficie de la probeta se manifiesta por la formación de pequeñas rayas y rebabas irregulares. La Figura 38 muestra el efecto de la repetición de los ciclos sobre una probeta, y de los movimientos de deslizamiento producidos por las extrusiones/intrusiones. La parte (a) describe la probeta antes del ensayo, a continuación en (b) se encuentra sometida a tracción.

**Figura 44.** Mecanismo de formación de bandas de deslizamiento [9]



En este estado hay presencia de deslizamiento de dislocaciones sobre un plano que tiene una orientación preferente a la dirección de la aplicación de la carga, este deslizamiento es irreversible y también muestra en la superficie una marca característica, continuando con el ensayo (c) la deformación en compresión produce un deslizamiento inverso que genera una zona con una extrusión/intrusión como indica la flecha. La cantidad de deformación impuesta indicará el

nivel de extrusión/intrusión presente en el material e inducirá también concentradores de esfuerzo locales en el material; a medida que los ciclos aumentan las bandas se acumularán y formarán bandas de deslizamiento persistentes; según los ensayos realizados, se observó que estas bandas comienzan a aparecer a bajos niveles de fracción de duración de vida como lo muestra la probeta 1.0S (1%) en la cual se distingue la aparición de las primeras zonas deformadas en los granos (aproximadamente 15%). Por el contrario para las probetas con 0.3S y 0.5S se observó que para la segunda interrupción se mostraban ya gran cantidad de granos deformados (30-40%) y se ha desarrollado también un fenómeno de activación secundaria en los granos.

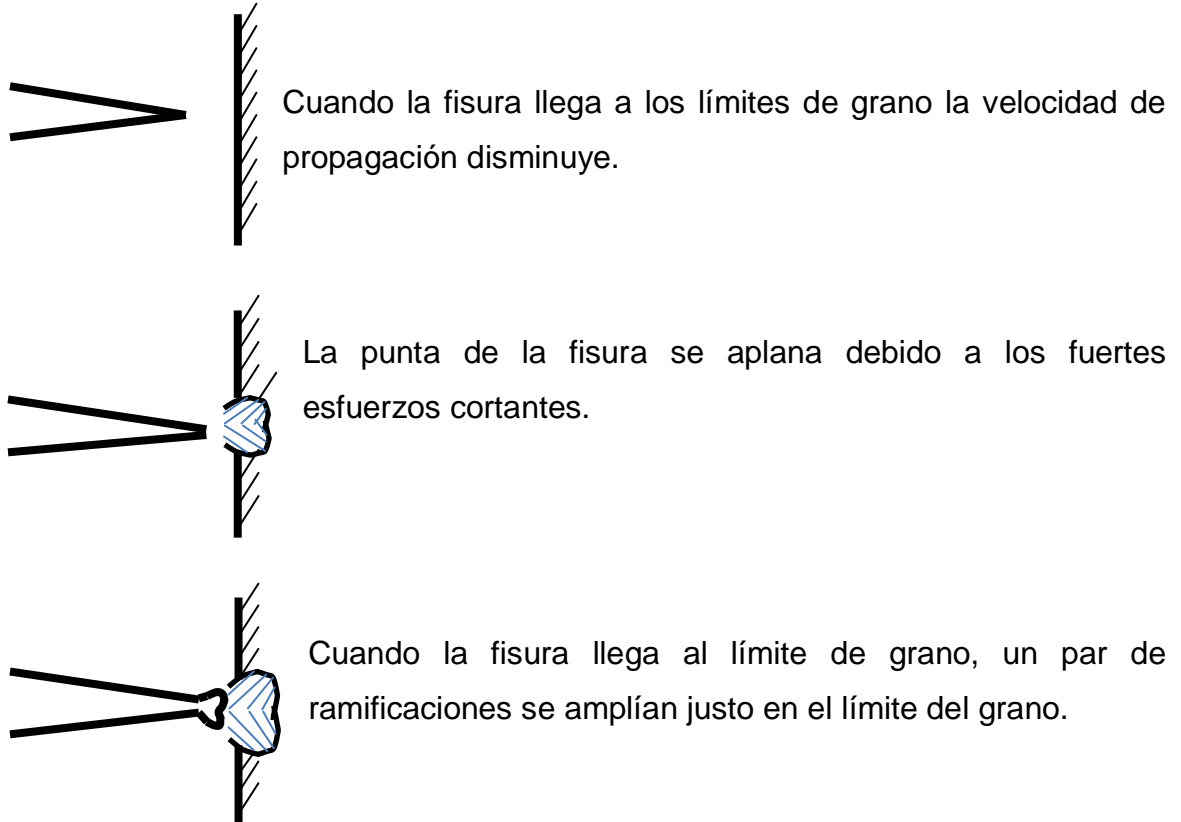
#### **5.4. MECANISMOS DE CRECIMIENTO DE LAS FISURAS**

La iniciación de la fisura se produce por los mecanismos descritos anteriormente, y posteriormente es seguido por una propagación transgranular [9] en una dirección cristalográfica definida, este estado ha sido definido por Forsyht [24] como el Estado I de fisuración, normalmente la microfisura tiene dificultad para atravesar el límite de grano, y se propaga en este y se detiene; solamente puede continuar propagándose si existe una carga más alta o un número de ciclos suficiente en los granos adyacentes.

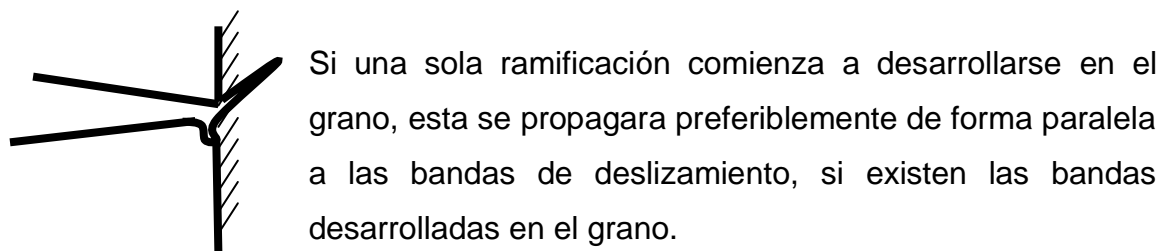
Se observa que durante el desarrollo del análisis, los límites de grano juegan un papel importante en el crecimiento de las fisuras en el material, ya que permiten la reorientación de la fisura durante su propagación, se considera que el estudio de este fenómeno permite comprender claramente cómo se propagan las fisuras en el material.

## Modelo de Interacción de una fisura con el límite de Grano

**Figura 45.** Interacción de la fisura con el límite de grano.[25]



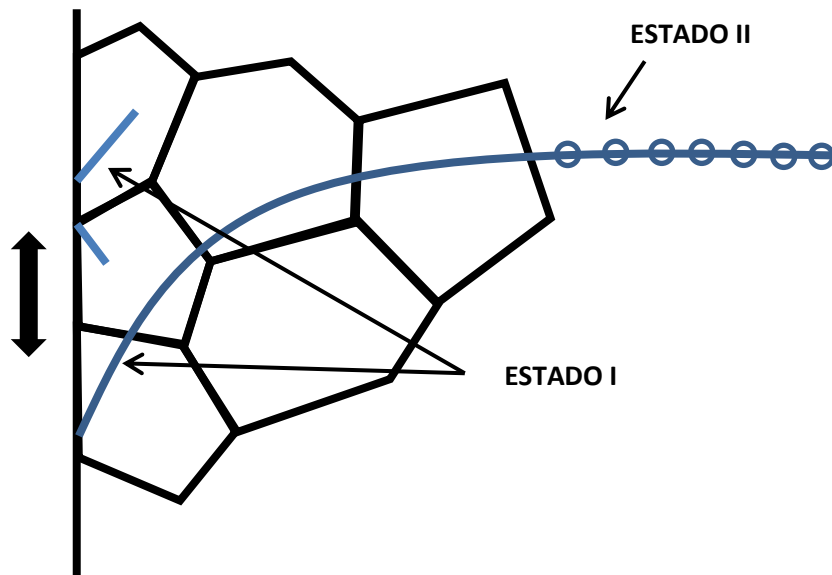
La extrusión en el límite de grano, induce dos zonas plásticas en forma de ramificaciones que comienzan a propagarse en el grano adyacente.



De manera general se observó que la zona plástica de la punta de la fisura es bloqueada por barreras estructurales a la propagación de las fisuras [20], que en nuestro caso son los límites de grano.

El estado II de la propagación de la fisura ocupa casi toda la duración de vida del material, sin embargo, contrario a la aparición de las bandas de deslizamiento es notablemente precoz y la aparición de las primeras fisuras en la superficie es lenta. En el ensayo de fatiga, el Estado I no siempre es marcado y se distingue por la presencia de inclusiones de clivaje que conducen a la formación de estriaciones agudas. [16]

**Figura 46.** Estados de Propagación de la Fisura [24]



Durante el desarrollo del ensayo de fatiga, se encontró un Estado III de propagación ya que la fisura atravesó varios granos para un rango de deformación de  $\Delta\varepsilon_t = 0,3\%$ . Esta fisura de talla macroscópica apareció después de 50% de la duración de vida. Para los otros rangos de deformaciones estudiadas, se encontraron fisuras en el estado I y II principalmente.

## 6. CONCLUSIONES

El comportamiento cualitativo y cuantitativo de propagación en las fisuras bajo fatiga plástica puede predecirse en base a sus propiedades mecánicas, ya que propagación de las fisuras se encuentra controlado por la condición superficial del material y la microestructura del material; la orientación inicial de los granos favorece la formación de bandas de deslizamiento que conllevan a grietas.

Las grietas por fatiga a bajo ciclo se inician en la superficie y su nucleación se da en zonas de alta energía o esfuerzos residuales, como son las inclusiones debidas a procesos de fabricación o formadas durante el desarrollo del ensayo de fatiga como son las bandas de deslizamiento. Se encontró que el número de ciclos es inversamente proporcional a la deformación aplicada, es decir a un menor rango de deformación mayor será la cantidad de ciclos que soporte, y de esta manera un mayor número de ciclos favorece zonas de iniciación de fisuras.

La propagación de la grieta por fatiga se dió de manera perpendicular al eje del esfuerzo aplicado con una morfología similar en la superficie de fractura las cuales tuvieron una propagación predominante intergranular con presencia de estriaciones de fatiga, las cuales se formaron perpendiculares al avance de la fisura.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] **AMERICAN SOCIETY FOR METALS**. Metals Handbook 9<sup>th</sup> Edition Vol. 1 USA (1980).
- [2] **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM**, Standard Test Methods for Determining Average Grain Size E112-12.
- [3] **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM**, Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens E3-11.
- [4] **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM**, Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials E466-07.
- [5] **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM**, Standard Practice for Strain Controlled Fatigue Testing, ASTM E-606-92, USA 1992.
- [6] **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM**, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials E8-13a.
- [7] **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM**, Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials (Withdrawn 2010), ASTM E92-82(2003) E2.
- [8] **ASKELAND, Donald R. & PHULÉ PRADEEP P.** Ciencia e Ingeniería de los Materiales. México: International Thomson Editores. S.A. 2004
- [9] **BATHIAS C., BAÏLON J. P.**, La Fatigue des matériaux et des structures, Maloine S.A. Éditeur, 1980, p. 71-99.
- [10] **HERTZBERG R.W.** Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials, Chapter 12: Cyclic Stress and Strain Fatigue. Jhon Wiley Publication. 1976, PP 556-578.
- [11] **JAPANESE STANDARD JIS G-0320**, Standard test methods for heat analysis of steel products.

- [12] **JAPANESE STANDARD JIS G-3141**, Cold-reduced carbon steel sheets and strips, 2005.
- [13] **J. SCHIJVE**, Fatigue Of Structures And Materials In The 20th Century And The State Of The Art, *Materials Science, Vol. 39, No. 3, 2003*.
- [14] **K.J. MILLER, E.R. DE LOS RIOS (Eds.)**, The Behavior of Short Fatigue Cracks, EGF1, Mechanical Engineering Publications, London, 1986.
- [15] **K. MERCKE, C. BLOCHWITZ, U. KREMLING**, Crystal Res. & Technol, 1982, pp. 1557-1570.
- [16] **L. EDWARDS, Y. H. ZHANG**, A plasticity based model of small fatigue crack growth, *Acta Metallurgica. Mater*, 42, 1994, pp. 1413-1431.
- [17] **LIU W., BAYERLEIN M., MUGHRABI H., DAY A.**, Quested PN. *Acta Metall. Mater* 1992, 40: 1763.
- [18] **MAO S., Lo W., HUANG H.**, Dislocation Substructures of Interstitial-free Steel subjected to low cycle fatigue at various Strain Amplitude, *Journal of Marine Science and Technology*, 2011, vol.19, n°2, pp.115-119.
- [19] **MENG ZHANG, PINGSHENG YANG, YUXU TAN**. Micromechanisms of fatigue crack nucleation and short crack growth in a low carbon steel under low cycle impact fatigue loading. *International Journal of Fatigue* 1999, 21: 823-830.
- [20] **M. KARUSKEVICH, O. KARUSKEVICH, T. MASLAK\*, S. SCHEPAK**. Extrusion/intrusion structures as quantitative indicators of accumulated fatigue damage. *International Journal of Fatigue* 2011, 39: 116-121.
- [21] **MUGHRABI H. & Her, K.**, Cyclic deformation and fatigue behavior of  $\alpha$ -iron mono- and polycrystals, *International Journal of Fracture*, 1981, vol. 17, n°2, pp 193-220.
- [22] **N. NARASIAH, K.K. RAY**, Small crack formation in a low carbon steel with banded ferrite-pearlite structure. Department of Metallurgical and Materials Engineering, Indian Institute of Technology, Kharagpur 721302, India. 2004

- [23] **O. E. ANDREIKIV, R. M. LESIV, AND N. M. LEVYTS'KA**, Crack Growth In Structural Materials Under The Combined Action Of Fatigue And Creep (Review), *Materials Science*, Vol. 45, No. 1, 2009.
- [24] **P. J. E. FORSYTH**, Fatigue behavior and its dependence on microstructure, 15<sup>e</sup> Colloque de métallurgie de Saclay, juin 1972.
- [25] **R. AKID, I. M. DMYTRAKH, AND J. GONZALEZ-SANCHEZ**, Fatigue Damage Accumulation: Aspects Of Environmental Interaction, *Materials Science*, Vol. 42, No. 1, 2006.
- [26] **SMITH William F.**, Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales, Tercera Edición.
- [27] **ZABALA C. Luis E.** Comportamiento en Fatiga del Acero AISI 304H envejecido a 800°C.

## ANEXOS

### ANEXO A - PREPARACION METALOGRAFICA

*Tabla 18. Protocolo de Pulido Automático*

<b>Material Abrasivo</b>	<b>Lubricante</b>	<b>Tamaño de Grano</b>	<b>Duración</b>
<b>SiC</b>	Agua	180	Aprox. 10 s
<b>SiC</b>	Agua	320	Aprox. 10 s
<b>SiC</b>	Agua	500	Aprox. 10 s
<b>SiC</b>	Agua	800	Aprox. 10 s
<b>SiC</b>	Agua	1200	Aprox. 10 s
<b>SiC</b>	Agua	2400	Aprox. 10 s
<b>SiC</b>	Agua	4000	Aprox. 10 s
<b>Floc</b>	Lubricante Azul	6 $\mu\text{m}$	4 min
<b>Nap</b>	Lubricante Azul	3 $\mu\text{m}$	4 min
<b>Nap</b>	Lubricante Azul	1 $\mu\text{m}$	5 min
<b>Nap</b>	Lubricante Azul	1/4 $\mu\text{m}$	5 min

## ANEXO B – RESULTADOS ENSAYOS DE FATIGA INTERRUMPIDOS

*Tabla 19. Valores obtenidos en el ensayo de fatiga de la probeta 0,3S*

Número de Ciclos	0,3S máx. [MPa]	0,3S mín. [MPa]	Rango de Deformación [Mpa]	Amplitud del Esfuerzo [Mpa]
1	259,73	-247,537	507,27	253,63
2	239,05	-229,532	468,58	234,29
3	237,44	-229,532	466,97	233,49
4	236,10	-228,566	464,67	232,34
5	234,77	-225,843	460,61	230,31
6	234,59	-226,459	461,05	230,52
7	233,43	-225,843	459,27	229,64
8	233,25	-225,405	458,66	229,33
9	234,41	-225,931	460,34	230,17
10	234,50	-225,229	459,73	229,86
15	233,79	-225,141	458,93	229,46
20	233,88	-225,843	459,72	229,86
30	234,41	-224,701	459,11	229,56
40	233,25	-224,965	458,22	229,11
50	232,63	-224,438	457,07	228,53
60	232,63	-224,263	456,89	228,45
70	232,45	-224,087	456,54	228,27
80	231,47	-223,736	455,20	227,60
90	231,65	-222,154	453,80	226,90
100	230,58	-223,209	453,78	226,89
200	226,47	-219,52	445,99	223,00
300	223,00	-217,587	440,58	220,29
400	219,97	-214,426	434,39	217,20
500	216,58	-212,406	428,98	214,49
600	213,64	-210,473	424,11	212,05
700	211,58	-207,663	419,25	209,62
800	208,64	-206,258	414,90	207,45
900	207,22	-204,15	411,37	205,68
1000	204,54	-202,745	407,29	203,64
2000	193,04	-192,118	385,16	192,58
3000	186,89	-187,814	374,70	187,35
4000	182,52	-183,95	366,47	183,23
5000	181,63	-180,963	362,59	181,29
6000	178,77	-179,119	357,89	178,95
7000	177,61	-178,943	356,56	178,28
8000	176,28	-179,382	355,66	177,83

Número de Ciclos	0,3S máx. [MPa]	0,3S min. [MPa]	Rango de Deformación [Mpa]	Amplitud del Esfuerzo [Mpa]
9000	175,56	-176,308	351,87	175,94
10000	174,76	-176,396	351,16	175,58
20000	171,64	-173,059	344,70	172,35
30000	168,96	-171,39	340,35	170,18
40000	168,70	-169,194	337,89	168,95
50000	167,45	-169,458	336,91	168,45
60000	167,81	-169,896	337,70	168,85
70000	166,47	-170,248	336,72	168,36
80000	167,09	-168,492	335,58	167,79
90000	167,09	-169,896	336,99	168,49
100000	167,63	-169,546	337,17	168,59
191169	167,63	-169,546	337,17	168,59
191170	167,63	-169,546	337,17	168,59
191171	167,63	-169,546	337,17	168,59
191172	167,63	-169,546	337,17	168,59
191173	167,63	-169,546	337,17	168,59
191174	167,63	-169,546	337,17	168,59
191175	167,63	-169,546	337,17	168,59
191176	167,63	-169,546	337,17	168,59
191177	167,63	-169,546	337,17	168,59
191178	167,63	-169,546	337,17	168,59
191179	167,63	-169,546	337,17	168,59
191180	167,63	-169,546	337,17	168,59
191181	167,63	-169,546	337,17	168,59
191182	167,63	-169,546	337,17	168,59
191183	167,63	-169,546	337,17	168,59
191184	167,63	-169,546	337,17	168,59
191185	167,63	-169,546	337,17	168,59
191186	167,63	-169,546	337,17	168,59
191187	167,63	-169,546	337,17	168,59
191188	167,63	-169,546	337,17	168,59
191189	25,77	-135,381	161,15	80,57
191190	25,68	-134,678	160,36	80,18
191191	25,95	-134,766	160,71	80,36
191192	25,77	-134,678	160,45	80,22
191193	26,21	-135,556	161,77	80,89
191194	25,41	-135,381	160,79	80,40
191195	25,41	-134,941	160,35	80,18
191196	25,77	-135,205	160,97	80,49

Número de Ciclos	0,3S máx. [MPa]	0,3S mín. [MPa]	Rango de Deformación [Mpa]	Amplitud del Esfuerzo [Mpa]
191197	25,86	-135,381	161,24	80,62
191198	25,77	-135,469	161,24	80,62
191199	25,77	-135,293	161,06	80,53
191200	26,12	-135,205	161,33	80,66
191201	26,04	-135,819	161,85	80,93
191202	25,50	-134,854	160,35	80,18
191203	25,50	-135,644	161,14	80,57
191204	25,77	-136,611	162,38	81,19
191205	25,77	-135,469	161,24	80,62
191206	25,95	-135,205	161,15	80,58
191207	25,14	-135,381	160,52	80,26
191208	25,86	-137,137	162,99	81,50
191209	26,12	-135,469	161,59	80,80
191210	26,04	-135,469	161,50	80,75
191211	25,59	-135,205	160,79	80,40
191212	25,86	-135,205	161,06	80,53
191213	25,86	-134,59	160,45	80,22
191214	25,59	-135,556	161,15	80,57
191215	25,86	-134,678	160,54	80,27
191216	26,39	-134,59	160,98	80,49
191217	26,04	-135,205	161,24	80,62
191218	25,95	-134,941	160,89	80,44
191219	26,04	-134,59	160,63	80,31
191220	25,86	-134,59	160,45	80,22

**Tabla 20.** Valores obtenidos en el ensayo de fatiga de la probeta 0,5S.

Número de Ciclos	0,5S máx. [MPa]	0,5S mín. [MPa]	Rango de Deformación [Mpa]	Amplitud del Esfuerzo [Mpa]
1	277,11	-254,357	531,47	265,7325
2	262,38	-252,158	514,54	257,2675
3	263,90	-254,445	518,34	259,17
4	262,20	-254,533	516,73	258,3655
5	261,75	-255,852	517,60	258,802
6	263,72	-256,995	520,71	260,3555
7	263,72	-255,852	519,57	259,784
8	262,20	-255,149	517,35	258,6735
9	263,72	-258,314	522,03	261,015
10	261,22	-257,083	518,30	259,15

Número de Ciclos	0,5S máx. [MPa]	0,5S mín. [MPa]	Rango de Deformación [Mpa]	Amplitud del Esfuerzo [Mpa]
15	261,04	-257,523	518,56	259,2805
20	261,84	-255,061	516,90	258,451
30	258,45	-253,654	512,10	256,0515
40	254,08	-252,863	506,94	253,469
50	251,66	-251,103	502,77	251,3835
60	251,22	-248,817	500,03	250,017
70	248,54	-247,058	495,60	247,7985
80	246,49	-244,42	490,91	245,4535
90	244,43	-243,628	488,06	244,0305
100	242,47	-242,837	485,31	242,6525
200	229,44	-231,142	460,58	230,2885
300	222,20	-224,81	447,01	223,507
400	216,04	-219,973	436,02	218,0085
500	214,79	-218,479	433,27	216,6365
600	210,96	-214,609	425,56	212,782
700	210,69	-212,587	423,28	211,6375
800	208,37	-211,443	419,81	209,9045
900	207,92	-210,476	418,40	209,1975
1000	207,21	-210,652	417,86	208,929
2000	203,19	-207,046	410,23	205,117
3000	204,08	-207,222	411,30	205,6515
4000	203,46	-208,014	411,47	205,735
5000	205,69	-209,157	414,84	207,422
6000	205,60	-210,564	416,16	208,081
7000	206,22	-211,531	417,76	208,8775
8000	207,03	-211,795	418,82	209,411
9000	208,46	-212,587	421,04	210,5215
10000	209,44	-211,092	420,53	210,265
20000	216,40	-219,094	435,50	217,7475
30000	221,85	-224,722	446,57	223,2845
40000	67,22	-174,949	242,17	121,08625
43729	67,22	-174,949	242,17	121,08625
43730	67,22	-174,949	242,17	121,08625
43731	45,17	-171,608	216,78	108,3904
43732	44,28	-171,784	216,06	108,032
43733	44,19	-171,432	215,62	107,8114
43734	43,92	-171,168	215,09	107,5455
43735	44,91	-171,608	216,51	108,2565
43736	44,73	-171,608	216,33	108,1672

Número de Ciclos	0,5S máx. [MPa]	0,5S min. [MPa]	Rango de Deformación [Mpa]	Amplitud del Esfuerzo [Mpa]
43737	44,73	-171,96	216,69	108,3432
43738	45,53	-171,784	217,31	108,65695
43739	44,55	-171,344	215,89	107,94595
43740	44,64	-170,641	215,28	107,63905
43741	45,89	-170,905	216,79	108,396
43742	44,19	-170,289	214,48	107,2399
43743	44,37	-170,993	215,36	107,68115
43744	45,35	-170,641	215,99	107,99615
43745	44,64	-170,817	215,45	107,72705
43746	44,46	-171,52	215,98	107,9893
43747	44,46	-171,256	215,71	107,8573
43748	45,26	-171,08	216,34	108,17105
43749	44,37	-171,256	215,63	107,81265
43750	44,10	-170,993	215,09	107,54725
43751	46,07	-171,168	217,23	108,61675
43752	46,24	-171,696	217,94	108,97
43753	46,42	-171,256	217,68	108,8393
43754	45,98	-171,168	217,14	108,5721
43755	43,39	-171,08	214,47	107,23365
43756	39,99	-259,193	299,19	149,59395
43757	97,76	-472,355	570,11	285,05515
43758	153,02	-45,6812	198,70	99,3491

**Tabla 21.** Valores obtenidos en el ensayo de fatiga de la probeta 1,0S

Número de Ciclos	1,0S máx. [MPa]	1,0S min. [MPa]	Rango de Deformación [Mpa]	Amplitud del Esfuerzo [Mpa]
1	303,19	-283,21	586,40	293,199
2	294,39	-292,14	586,53	293,2655
3	297,62	-296,83	594,45	297,2265
4	300,04	-297,63	597,67	298,836
5	299,24	-296,04	595,27	297,637
6	299,24	-297,10	596,34	298,1675
7	298,97	-297,10	596,07	298,0325
8	296,81	-296,66	593,47	296,734
9	296,90	-295,42	592,32	296,159
10	294,84	-295,24	590,08	295,038

Número de Ciclos	1,0S máx. [MPa]	1,0S min. [MPa]	Rango de Deformación [Mpa]	Amplitud del Esfuerzo [Mpa]
15	290,89	-289,67	580,55	290,276
20	285,68	-286,31	571,98	285,9905
30	281,81	-282,33	564,14	282,0695
40	277,95	-279,94	557,89	278,944
50	274,72	-275,07	549,79	274,8955
60	272,74	-273,83	546,58	273,2875
70	270,23	-272,42	542,65	271,323
80	268,70	-268,88	537,58	268,79
90	266,73	-268,35	535,08	267,5375
100	267,00	-267,82	534,81	267,4065
200	259,27	-261,36	520,63	260,316
300	256,31	-258,62	514,93	257,463
400	259,00	-259,59	518,59	259,2965
500	261,97	-261,45	523,42	261,7075
600	260,98	-258,26	519,24	259,621
700	260,17	-262,78	522,95	261,473
800	262,87	-262,33	525,20	262,5985
900	264,21	-268,26	532,47	266,2355
1000	266,64	-268,08	534,72	267,359
2000	283,34	-282,50	565,84	282,9215
3000	292,14	-291,97	584,11	292,0545
4000	299,42	-300,11	599,52	299,7605
5000	139,20	-220,40	359,60	179,8005
5296	139,20	-220,40	359,60	179,8005
5297	139,20	-220,40	359,60	179,8005
5298	139,20	-220,40	359,60	179,8005
5299	139,20	-220,40	359,60	179,8005
5300	107,86	-210,49	318,35	159,1755
5301	107,95	-209,87	317,82	158,911
5302	108,49	-209,61	318,10	159,048
5303	107,50	-209,87	317,37	158,6865
5304	106,51	-209,26	315,77	157,883
5305	107,95	-210,76	318,71	159,3535
5306	107,41	-210,85	318,26	159,128
5307	106,51	-209,70	316,21	158,104
5308	107,32	-209,96	317,28	158,641
5309	107,77	-210,67	318,44	159,219
5310	106,06	-209,79	315,85	157,924
5311	107,86	-209,34	317,20	158,6005

Número de Ciclos	1,0S máx. [MPa]	1,0S min. [MPa]	Rango de Deformación [Mpa]	Amplitud del Esfuerzo [Mpa]
5312	107,14	-208,81	315,95	157,976
5313	107,23	-208,99	316,22	158,11
5314	107,23	-209,87	317,10	158,552
5315	107,05	-208,99	316,04	158,0195
5316	106,06	-209,70	315,76	157,8795
5317	106,78	-208,81	315,59	157,797
5318	106,96	-209,61	316,57	158,2845
5319	105,16	-209,79	314,95	157,475
5320	106,33	-208,72	315,06	157,528
5321	106,42	-208,72	315,15	157,5725
5322	105,88	-208,72	314,61	157,3035
5323	105,34	-135,30	240,64	120,322
5324	91,96	-475,97	567,93	283,9656
5325	208,08	-426,96	635,04	317,5215
5326	59,09	-612,82	671,91	335,95595
5327	58,37	-56,30	114,68	57,3391

## ANEXO C – RESULTADOS ENSAYOS DE FATIGA – SUPERFICIES DE RUPTURA

*Tabla 22. Valores obtenidos en el ensayo de fatiga de la probeta 1,0S.*

Número de Ciclos	0,7SR máx. [MPa]	0,7SR min. [MPa]	Rango de Deformación [Mpa]	Amplitud del Esfuerzo [Mpa]
1	276,70175	-244,1637	520,86545	260,432725
2	268,0387	-246,8322	514,8709	257,43545
3	272,32795	-249,579	521,90695	260,953475
4	271,8235	-249,9714	521,7949	260,89745
5	272,07525	-249,8148	521,89005	260,945025
6	270,9818	-251,6193	522,6011	261,30055
7	271,5708	-241,4169	512,9877	256,49385
8	272,6652	-248,8725	521,5377	260,76885
9	270,8146	-248,8725	519,6871	259,84355
10	268,0387	-246,4398	514,4785	257,23925
15	265,5155	-243,8505	509,366	254,683
20	263,4977	-243,3789	506,8766	253,4383
30	255,5918	-239,6115	495,2033	247,60165
40	252,396	-234,7452	487,1412	243,5706

Número de Ciclos	0,7SR máx. [MPa]	0,7SR mín. [MPa]	Rango de Deformación [Mpa]	Amplitud del Esfuerzo [Mpa]
50	246,84515	-230,7429	477,58805	238,794025
60	245,7517	-226,6614	472,4131	236,20655
70	241,37885	-226,5048	467,88365	233,941825
80	241,20975	-223,4439	464,65365	232,326825
90	236,16335	-223,2081	459,37145	229,685725
100	237,17225	-219,5973	456,76955	228,384775
200	224,5572	-206,4123	430,9695	215,48475
300	221,78225	-204,6861	426,46835	213,234175
400	214,2117	-204,9993	419,211	209,6055
500	214,54895	-203,4306	417,97955	208,989775
600	215,0534	-203,6664	418,7198	209,3599
700	214,2117	-203,9013	418,113	209,0565
800	214,80165	-203,4306	418,23225	209,116125
900	218,41735	-206,0199	424,43725	212,218625
1000	217,0712	-205,0785	422,1497	211,07485
2000	222,623	-209,0808	431,7038	215,8519
3000	230,1926	-214,3395	444,5321	222,26605
4000	234,64905	-217,008	451,65705	225,828525
5000	236,24695	-223,9929	460,23985	230,119925
6000	241,9669	-225,3276	467,2945	233,64725
7000	242,1341	-229,4082	471,5423	235,77115
8000	246,088	-230,2713	476,3593	238,17965
9000	248,4421	-231,1353	479,5774	239,7887
10000	249,28285	-234,0396	483,32245	241,661225
16543	249,28285	-234,0396	483,32245	241,661225
16544	249,28285	-234,0396	483,32245	241,661225
16545	249,28285	-234,0396	483,32245	241,661225
16546	249,28285	-234,0396	483,32245	241,661225
16547	74,34776	-165,6	239,94776	119,97388
16548	75,188795	-165,366	240,554795	120,277398
16549	74,60008	-164,7369	239,33698	119,66849
16550	74,263685	-165,051	239,314685	119,657343
16551	74,684155	-164,6586	239,342755	119,671378
16552	74,684155	-163,8738	238,557955	119,278978
16553	74,60008	-164,2671	238,86718	119,43359
16554	75,27287	-164,8161	240,08897	120,044485
16555	74,011365	-164,2671	238,278465	119,139233
16556	75,02055	-164,6586	239,67915	119,839575

Número de Ciclos	0,7SR máx. [MPa]	0,7SR mín. [MPa]	Rango de Deformación [Mpa]	Amplitud del Esfuerzo [Mpa]
16557	74,8524	-164,5803	239,4327	119,71635
16558	74,011365	-164,8944	238,905765	119,452883
16559	74,011365	-164,5803	238,591665	119,295833
16560	74,8524	-164,7369	239,5893	119,79465
16561	74,34776	-164,8161	239,16386	119,58193
16562	74,431835	-164,8944	239,326235	119,663118
16563	74,34776	-164,7369	239,08466	119,54233
16564	74,8524	-164,8944	239,7468	119,8734
16565	73,42265	-164,8944	238,31705	119,158525
16566	74,684155	-165,6	240,284155	120,142078
16567	74,179515	-164,3454	238,524915	119,262458
16568	74,8524	-164,9727	239,8251	119,91255
16569	74,8524	-165,4443	240,2967	120,14835
16570	74,76823	-165,7575	240,52573	120,262865