

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**DETERMINACIÓN DE LA ECUACIÓN
ELASTOPLASTICA DEL ACERO 1045 TRATADO
TÉRMICAMENTE Y CON RECUBRIMIENTO
SUPERFICIAL**

**Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela**

Por los bachilleres:

Rosal, Liliana T.

Zurita C., Santos R.

Para optar al título de

Ingeniero Mecánico

Caracas, 2001

A mi madre, mi guía, mi roble.

A Santiago y mis sobrinos, gracias por su apoyo.

Liliana

A mis padres, gracias por su fe en mi.

Santos

AGRADECIMIENTOS

Deseamos expresar el más profundo agradecimiento a nuestro tutor, Fausto Carpentiero, por todo el apoyo y colaboración en el desarrollo y término de éste trabajo.

También hacemos extensivo este agradecimiento al ingeniero Jonathan Berríos y a los profesores Jesús Bello, María Prato y Tibusay Zambrano, quienes en todo momento abrieron las puertas de sus conocimientos cuando los requerimos.

Al personal técnico del taller de la E.I.M.U.C.V., y al señor Edgar Durán de la compañía FERRUM, y a todos aquellos que contribuyeron en forma desinteresada en el desarrollo de este trabajo.

RESUMEN

Rosal, Liliana T, /y/ Zurita C., Santos R.

DETERMINACIÓN DE LA ECUACIÓN ELASTOPLÁSTICA DEL ACERO 1045 TRATADO TÉRMICAMENTE Y CON RECUBRIMIENTO SUPERFICIAL.

Tutor Académico: Ing. Fausto Carpentiero

Tesis. Caracas. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería.

Escuela de Ingeniería Mecánica. 2001. 129 Páginas.

Palabras Clave: Elastoplástica, Termorociado.

Se determinó un modelo matemático para predecir el comportamiento a fatiga del acero 1045, sometido a tratamiento térmico y con recubrimiento superficial, y posteriormente se estableció una comparación entre ambas condiciones.

El tratamiento térmico aplicado fue recocido. El recubrimiento superficial fue rociado térmico por el proceso de HVOF (High Velocity Oxy Fuel), teniendo como material depositante carburo de tungsteno en polvo.

En cada condición se realizaron ensayos de tracción a fin de determinar las propiedades monotónicas, y luego ensayos de fatiga de tracción – compresión, a deformación controlada para obtener la ecuación elastoplástica, a partir de las curvas de histéresis estabilizadas.

Finalmente se comparó la curva experimental obtenida en este trabajo con la curva teórica generada por la ecuación universal de los aceros al carbono nacionales. Esta comparación solo se hace para la condición de recocido.

Se observó que el recubrimiento utilizado influye de forma favorable en el comportamiento a fatiga del acero 1045.

CONTENIDO

<i>DEDICATORIA</i>	<i>I</i>
<i>AGRADECIMIENTOS</i>	<i>II</i>
<i>RESUMEN</i>	<i>III</i>
<i>CONTENIDO</i>	<i>IV</i>
<i>INDICE DE FIGURAS</i>	<i>VI</i>
<i>INDICE DE TABLAS</i>	<i>VIII</i>
<i>NOMENCLATURA</i>	<i>IX</i>
<i>INTRODUCCIÓN</i>	<i>001</i>
<i>FUNDAMENTO TEORICO</i>	<i>002</i>
<i>1. FATIGA</i>	<i>002</i>
<i> 1.1. GENERALIDADES</i>	<i>002</i>
<i> 1.2. FALLA POR FATIGA</i>	<i>002</i>
<i> 1.3. CONDICIONES PARA LA FALLA POR FATIGA.</i>	<i>003</i>
<i> 1.4. CONCEPTOS BÁSICOS DE FATIGA</i>	<i>004</i>
<i> 1.5. CARACTERÍSTICAS DE LAS CARGAS DINAMICAS</i>	<i>004</i>
<i> 1.6. DIAGRAMAS ESFUERZO – NUMERO DE CICLOS</i>	<i>006</i>
<i> 1.7. RELACION ENTRE EL ESFUERZO Y LA DEFORMACIÓN DURANTE LA FATIGA</i>	<i>008</i>
<i> 1.8. COMPORTAMIENTO DE LOS METALES CUANDO ESTAN SOMETIDOS A LA ACCION DE ESFUERZOS DE FATIGA SIMÉTRICOS</i>	<i>009</i>
<i> 1.9. CICLOS DE CARGA DE FATIGA</i>	<i>011</i>
<i> 1.10. FATIGA A DEFORMACIÓN CÍCLICA CONTROLADA</i>	<i>012</i>
<i> 1.11. RELACIONES DE FATIGA (DEFORMACION – VIDA)</i>	<i>013</i>
<i> 1.12. ANTECEDENTES</i>	<i>017</i>
<i>2. TERMOROCIADO</i>	<i>018</i>
<i> 2.1. RECUBRIMIENTO POR TERMOROCIADO</i>	<i>018</i>
<i> 2.2. APLICACIONES DEL TERMOROCIADO</i>	<i>019</i>

2.3. <i>ROCIADO A PRESION (PROCESO PREVIO AL TERMOROCIADO)</i>	021
2.4. <i>TIPOS DE PROCESOS</i>	022
2.5. <i>RECUBRIMIENTO POR COMBUSTIÓN -LLAMA</i>	022
2.6. <i>RECUBRIMIENTO POR ARCO ELECTRICO</i>	022
2.7. <i>HVOF(HIGH VELOCITY OXY FUEL)</i>	023
2.8. <i>PISTOLA DE DETONACIÓN (D-GUN)</i>	025
2.9. <i>PLASMA</i>	025
2.10. <i>CARACTERÍSTICA DE LOS RECUBRIMIENTOS</i>	026
3. <i>METODOLOGÍA EXPERIMENTAL</i>	027
3.1. <i>MATERIALES</i>	028
3.1.1. <i>MATERIAL BASE</i>	028
3.1.2. <i>RECUBRIMIENTO</i>	028
3.2. <i>TRATAMIENTO SUPERFICIAL</i>	029
3.3. <i>PROBETAS UTILIZADAS</i>	029
3.4. <i>PROCESO DE TERMOROCIADO</i>	030
3.5. <i>PARÁMETROS DEL PROCESO DE TERMOROCIADO</i>	030
3.6. <i>EQUIPOS</i>	031
3.7. <i>ENSAYO DE TRACCIÓN</i>	031
3.8. <i>ENSAYO DE FATIGA</i>	034
4. <i>RESULTADOS Y ANÁLISIS</i>	036
4.1. <i>ENSAYO DE TRACCIÓN</i>	036
4.2. <i>ENSAYO DE FATIGA</i>	043
5. <i>ESTUDIO FRACTOGRAFICO</i>	052
6. <i>CONCLUSIONES</i>	060
7. <i>BIBLIOGRAFÍA</i>	061
8. <i>ANEXOS</i>	063

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura</i>	<i>Descripción</i>	<i>Pag. #</i>
1.1	<i>Ciclos de cargas dinámicas</i>	006
1.2	<i>Representación esquemática de un diagrama esfuerzo Vs. número de Ciclos</i>	007
1.3	<i>Representación esquemática de un ciclo de histéresis</i>	008
1.4	<i>Representación esquemática de una curva cíclica.</i>	010
1.5	<i>Representación esquemática de un ciclo de histéresis, que involucra solo deformación elástica.</i>	013
1.6	<i>Representación esquemática de un ciclo de histéresis, que involucra flujo elastoplástico.</i>	013
1.7	<i>Curva amplitud de deformación total Vs. número de reversos</i>	016
2.1	<i>Dibujo esquemático del proceso de termorociado.</i>	018
2.2	<i>Dibujo esquemático de una pistola de rociado por arco eléctrico alimentada por alambres.</i>	023
2.3	<i>Ilustración esquemática de una pistola HVOF.</i>	024
3.1	<i>Organigrama de la metodología experimental.</i>	027
3.2	<i>Probetas de ensayo.</i>	029
3.3	<i>Máquina de tracción Instron 8502.</i>	032
3.4	<i>Método gráfico para la determinación de los valores de amplitud de deformación total, amplitud de deformación elástica y amplitud de deformación plástica .</i>	035
4.1	<i>Curvas Esfuerzo real Vs. Deformación real, acero 1045 recocido (Tracción).</i>	036
4.2	<i>Curvas Esfuerzo real Vs. Deformación real, acero 1045 recocido y termorociado con Wc-Co (Tracción).</i>	037
4.3	<i>Curvas $\log(\sigma)$ Vs. $\log(\epsilon)$, correspondiente a la zona plástica, condición de recocido (Tracción).</i>	039

<i>Figura</i>	<i>Descripción</i>	<i>Pag. #</i>
4.4	<i>Curvas $\log(\sigma)$ Vs. $\text{Log}(\varepsilon)$, correspondiente a la zona plástica, condición de recocido (Tracción).</i>	039
4.5	<i>Curvas $\log(\sigma)$ Vs. $\text{Log}(\varepsilon)$, correspondiente a la zona plástica, condición de recocido (Tracción).</i>	040
4.6	<i>Curvas $\log(\sigma)$ Vs. $\text{Log}(\varepsilon)$, correspondiente a la zona plástica, condición de termorociado (Tracción).</i>	040
4.7	<i>Curvas $\log(\sigma)$ Vs. $\text{Log}(\varepsilon)$, correspondiente a la zona plástica, condición de termorociado (Tracción).</i>	041
4.8	<i>Curvas $\log(\sigma)$ Vs. $\text{Log}(\varepsilon)$, correspondiente a la zona plástica, condición de termorociado (Tracción).</i>	041
4.9	<i>Comparación entre las curvas Amplitud de deformación total Vs. Número de reversos para recocido y termorociado</i>	049
4.10	<i>Comparación entre las curvas Amplitud de deformación total Vs. Número de reversos para recocido, experimental y teórica .</i>	051
5.1	<i>Vista general zona de fractura de nivel de esfuerzo mas bajo</i>	054
5.2	<i>Ampliación de zona “A” de inicio de grieta</i>	054
5.3	<i>Ampliación de zona “B” de inicio de grieta</i>	055
5.4	<i>Zona de fractura</i>	055
5.5	<i>Acercamiento zona “C”</i>	056
5.6	<i>Acercamiento zona “D”</i>	056
5.7	<i>Vista general zona de fractura de nivel de esfuerzo mas bajo</i>	057
5.8	<i>Zona de inicio de grieta</i>	057
5.9	<i>Ampliación de zona “E”</i>	058
5.10	<i>Acercamiento interfases recubrimiento – sustrato</i>	058
5.11	<i>Ampliación zona “F”</i>	059

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla</i>	<i>Descripción</i>	<i>Pag. #</i>
1	<i>Composición en porcentaje en peso del acero 1045.</i>	<i>028</i>
2	<i>Resultado de los ensayos de tracción del acero 1045 (recocido).</i>	<i>036</i>
3	<i>Resultado de los ensayos de tracción del acero 1045 (recocido y termorociado).</i>	<i>037</i>
4	<i>Resultados obtenidos en el ensayo de fatiga para el nivel de esfuerzo 189 MPa.</i>	<i>043</i>
5	<i>Resultados obtenidos en el ensayo de fatiga para el nivel de esfuerzo 256 MPa.</i>	<i>044</i>
6	<i>Resultados obtenidos en el ensayo de fatiga para el nivel de esfuerzo 310 MPa.</i>	<i>044</i>
7	<i>Resultados obtenidos en el ensayo de fatiga para el nivel de esfuerzo 335 MPa.</i>	<i>045</i>
8	<i>Resultados obtenidos en el ensayo de fatiga para el nivel de esfuerzo 355 MPa.</i>	<i>045</i>

NOMENCLATURA

<i>Símbolo</i>	<i>Descripción</i>
$\Delta\sigma$	<i>Rango de esfuerzo</i>
σ_a	<i>Esfuerzo real aplicado</i>
$\sigma_{\text{máx}}$	<i>Esfuerzo real máximo</i>
σ_{min}	<i>Esfuerzo real mínimo</i>
σ_m	<i>Esfuerzo medio</i>
R	<i>Relación de esfuerzos</i>
S_a	<i>Resistencia o esfuerzo nominal aplicado</i>
N	<i>Número de ciclos de aplicación de carga</i>
$\Delta\epsilon_t / 2$	<i>Amplitud de deformación total</i>
$\Delta\epsilon_e / 2$	<i>Amplitud de deformación elástica</i>
$\Delta\epsilon_p / 2$	<i>Amplitud de deformación plástica</i>
K	<i>Coefficiente de esfuerzo monotónica</i>
K'	<i>Coefficiente de esfuerzo cíclico</i>
n	<i>Exponente de endurecimiento por deformación monotónica(coeficiente exponencial)</i>
n'	<i>Exponente de endurecimiento por deformación cíclico(coeficiente exponencial)</i>
E	<i>Módulo de elasticidad</i>
σ_{ult}	<i>Último esfuerzo monotónico</i>
$\sigma_{0.2\%y}$	<i>Esfuerzo de cedencia determinado por el método de corrimiento paralelo offset correspondiente a un valor de deformación permanente de 0.2%</i>
$2N_f$	<i>Número de reversos</i>
σ_f'	<i>Coefficiente del esfuerzo de fatiga</i>
b	<i>Coefficiente exponencial del esfuerzo de fatiga</i>
ϵ_f'	<i>Coefficiente de ductilidad de fatiga</i>
c	<i>Coefficiente exponencial de ductilidad de fatiga</i>

σ_f	<i>Esfuerzo real de fatiga</i>
P_f	<i>Carga o fuerza para la fractura</i>
A_f	<i>Área instantánea de fractura</i>
S_u	<i>Ultimo esfuerzo nominal</i>

INTRODUCCIÓN.

Se denomina fatiga a la falla o fractura que se presenta en un material, de forma repentina y sin previo aviso, cuando el mismo es sometido, durante su funcionamiento, a la acción de cargas y descargas sucesivas en forma repetida. Este fenómeno es observado en piezas de maquinarias que funcionan bajo esas características y en algunos casos ha representado pérdidas materiales para la industria o más aún ha puesto en peligro la integridad física de los operarios o usuarios de dichos equipos. De allí, la importancia que involucra su estudio.

Con la realización de este trabajo se pretende determinar una ecuación elastoplástica que prediga el comportamiento del acero 1045 al estar sometido a la acción de cargas dinámicas de tracción – compresión, en condiciones de recocido y de recocido con un recubrimiento de Wc-Co (Carburo de Tungsteno) realizado por medio de la técnica de termorociado HVOF, para posteriormente establecer una comparación entre ambas condiciones.

Para determinar dichas ecuaciones, se efectuaron ensayos de tracción en especímenes de prueba con recubrimiento y sin el mismo, a fin de obtener las propiedades mecánicas estáticas del material. Luego se sometieron otras muestras a ensayos de fatiga para cinco niveles de esfuerzos, por el método de deformación controlada.

Los resultados de ambos ensayos se promediaron y analizaron para finalmente obtener las ecuaciones requeridas y hacer las comparaciones pertinentes. Como complemento del trabajo se realizó un estudio fractográfico de muestras ensayadas en los niveles de esfuerzo más bajo y más alto.

Finalmente, del análisis de los resultados obtenidos y de las comparaciones establecidas se presentaron las conclusiones y recomendaciones que se consideren necesarias para la realización de trabajos futuros relacionados con el tema.

1.- FATIGA.

1.1.- GENERALIDADES.

Muchos investigadores han estudiado, entre otros factores, el comportamiento de los materiales utilizados en la fabricación de piezas de máquinas tomando en cuenta que las mismas están sometidas a tensiones variables, repetidas, producidas por cargas y descargas sucesivas. Las primeras investigaciones sobre este fenómeno al parecer, fueron reportadas por el ingeniero alemán W. A. Albert, quien en 1.829 llevó a cabo algunos ensayos con cargas repetidas en materiales usados en la industria ferroviaria [1].

Un material al estar sometido a la acción de este tipo de sollicitaciones genera frecuentemente una falla denominada rotura por fatiga, la cual ocurre para un valor de tensión mucho menor que la necesaria para producir la fractura en una sola aplicación de la carga, y se produce en condición de carga dinámica. Durante cada ciclo de carga se supone que el material sufre un daño acumulativo produciéndose una fractura del material al alcanzar un valor crítico.

El término fatiga fue introducido por Poncelet [6] en Francia en un libro publicado en 1.839. Sin embargo, en la actualidad en algunas oportunidades se ha denominado más apropiadamente utilizando el término fractura progresiva.

Los primeros estudios sistemáticos sobre el comportamiento de los materiales metálicos bajo la acción de esfuerzos alternativos los realizó el ingeniero alemán August Wölher entre los años 1.852 y 1.870 [1]. En los últimos años se han realizado una serie de estudios sobre materiales que han sido sometidos a diferentes tratamientos térmicos y superficiales, con la intención de establecer comparaciones entre su comportamiento cuando se encuentran bajo la acción de distintos tipos de cargas cíclicas de flexión, torsión y tracción.

1.2 LA FALLA POR FATIGA.

La falla por fatiga comienza por una grieta tan diminuta que no se puede percibir a simple vista y que se desarrolla en un punto de discontinuidad en el material, tal como un cambio de sección transversal, una muesca o un orificio. Hay otros puntos menos

obvios donde es probable que se inicien fallas por fatiga como grietas internas o irregularidades causadas por el maquinado.

Una vez que se forma la grieta, el efecto de concentración de esfuerzos se hace mayor y se extiende más rápidamente y como el área esforzada disminuye de tamaño, el esfuerzo aumenta en magnitud hasta que finalmente, el área restante falla de repente.

El proceso de falla por fatiga involucra tres fases:

- Iniciación de la grieta.*
- Propagación de la grieta.*
- Rápido desarrollo de la grieta hasta la fractura completa.*

En consecuencia, la falla por fatiga se caracteriza en principio por dos zonas muy diferentes:

- Una zona oscura en la que ha habido un fuerte frotamiento de una cara contra otra, antes de producirse la rotura, y que corresponde a la zona donde comienza a fallar el material (zona de fatiga).*
- Otra zona de estructura más cristalina y limpia que corresponde a la parte donde rompe o falla el material (zona de ruptura).*

1.3.- CONDICIONES PARA LA FALLA POR FATIGA.

Entre las principales condiciones para que se produzca la rotura por fatiga tenemos:

- Un valor elevado en los esfuerzos de tracción.*
- Una repetición cíclica en la aplicación de los esfuerzos.*
- Un número suficiente de ciclos.*

Otras condiciones que producen o modifican la fatiga son:

- Las concentraciones de esfuerzos.*
- La corrosión*
- La temperatura.*
- La sobrecarga.*
- La estructura metalúrgica.*
- Las tensiones residuales y las tensiones combinadas.*

1.4.- CONCEPTOS BÁSICOS DE FATIGA.

Algunos conceptos fundamentales y elementales que ayudan a entender el patrón de comportamiento observado en la fatiga son:

- La falla por fatiga la provoca la deformación plástica repetida. Sin cedencia plástica repetida no puede ocurrir falla por fatiga.
- Las fallas por fatiga se presentan en forma típica después de miles o aún millones de ciclos de cedencia diminuta que con frecuencia existen a un nivel microscópico. Pueden ocurrir a niveles de esfuerzos muy por debajo del punto convencional de cedencia determinado o límite elástico.
- Debido a que la cedencia plástica local puede ser el principio de una falla por fatiga es recomendable enfocar la atención en lugares potencialmente vulnerables, tales como orificios, raspaduras en la superficie, esquinas marcadas y corrosión, entre otros.
- La grieta inicial por fatiga provoca por lo general un aumento en la concentración local del esfuerzo. Conforme evoluciona la grieta, el material en el fondo de la misma en cualquier momento en particular esta sujeto a cedencia destructiva, inversa y local. En la medida que se hace más profunda la grieta, reduciendo por tanto la sección y ocasionando que aumenten los esfuerzos, la velocidad de propagación de la grieta aumenta hasta que el remanente ya no es capaz de soportar una sola aplicación de carga y ocurre la fractura final.

1.5.- CARACTERÍSTICAS DE LAS CARGAS DINAMICAS.

Las definiciones estándar referentes al ciclo de aplicación de la carga en un ensayo de fatiga pueden escribirse como sigue:

$$\Delta\sigma = \sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n} \dots\dots\dots 1.1$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \dots\dots\dots 1.2$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{m\acute{a}x.} + \sigma_{m\acute{i}n.}}{2} \dots\dots\dots 1.3$$

$$R = \frac{\sigma_{m\acute{i}n.}}{\sigma_{m\acute{a}x.}} \dots\dots\dots 1.4$$

Donde:

$\Delta\sigma$: rango de esfuerzo.

σ_a : esfuerzo real aplicado.

$\sigma_{m\acute{a}x.}$: esfuerzo real máximo.

$\sigma_{m\acute{i}n.}$: esfuerzo real mínimo.

σ_m : esfuerzo medio.

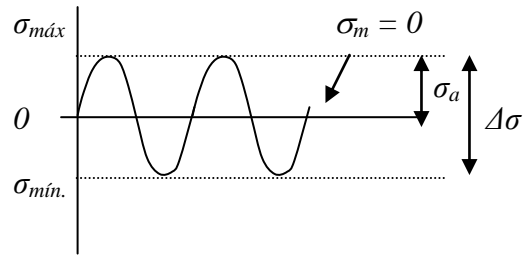
R : relación de esfuerzos.

Por convención se utiliza el signo positivo para expresar un esfuerzo de tracción y el signo negativo para uno de compresión.

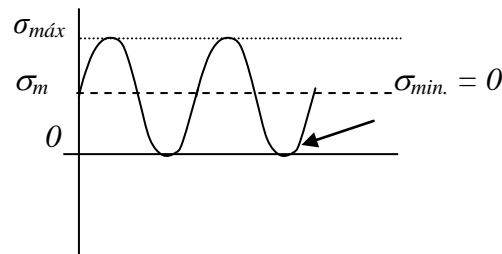
- En el caso donde los esfuerzos máximo ($\sigma_{m\acute{a}x.}$) y mínimo ($\sigma_{m\acute{i}n.}$), oscilan alrededor de un esfuerzo medio (σ_m) cuyo valor es nulo se denomina **ciclo de carga alternativo puro** o a esfuerzos de fatiga simétricos.
- Asimismo, cuando el esfuerzo mínimo ($\sigma_{m\acute{i}n.}$) es cero entonces el esfuerzo medio (σ_m) es igual al esfuerzo alternante aplicado (σ_a), y se denomina al **ciclo de carga como pulsante**.
- Por otra parte, cuando el esfuerzo máximo ($\sigma_{m\acute{a}x.}$) y el esfuerzo mínimo ($\sigma_{m\acute{i}n.}$) oscilan alrededor de un esfuerzo medio (σ_m), diferente de cero se denomina al **ciclo de carga fluctuante** o de esfuerzos asimétricos.

A la relación entre el esfuerzo mínimo ($\sigma_{m\acute{i}n.}$) y el esfuerzo máximo ($\sigma_{m\acute{a}x.}$) se le ha denominado relación de esfuerzos R .

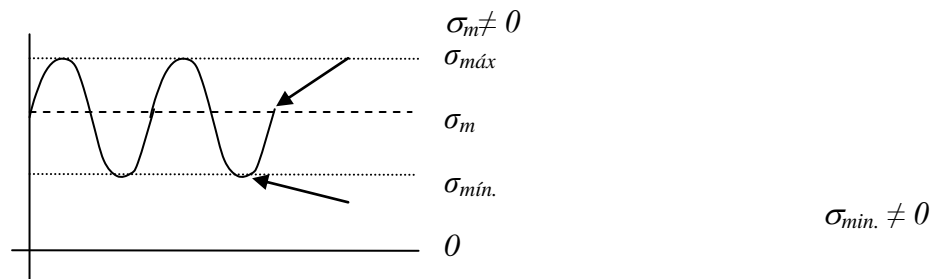
En la figura N 1.1 se muestra en forma esquemática los ciclos de cargas dinámicas.



(a) Ciclo de carga alternativo puro o de esfuerzos simétricos $\sigma_m = 0$.



(b) Ciclo de carga pulsante $\sigma_{min.} = 0$



(c) Ciclo de carga fluctuante o de esfuerzos asimétricos $\sigma_{min.} \neq 0$ y $\sigma_m \neq 0$

Figura 1.1 Ciclos de cargas dinámicas

1.6.- DIAGRAMA ESFUERZO – NUMERO DE CICLOS.

Para determinar la resistencia de los materiales bajo la acción de carga de fatiga, un número de probetas similares, del mismo material, se someten a la acción de fuerzas repetidas o variables de magnitudes especificadas y se cuenta el número de ciclos de alteraciones de carga que soporta el material hasta la falla o rotura. Este procedimiento se repite para diferentes niveles de esfuerzo.

Al graficar los datos obtenidos en el ensayo se tiene un diagrama que relaciona el esfuerzo aplicado y el número de ciclos o alteraciones de carga que soporta el material hasta la falla o rotura. Para el caso particular de los aceros el diagrama presenta dos regiones, tal como se muestra en la figura 1.2.

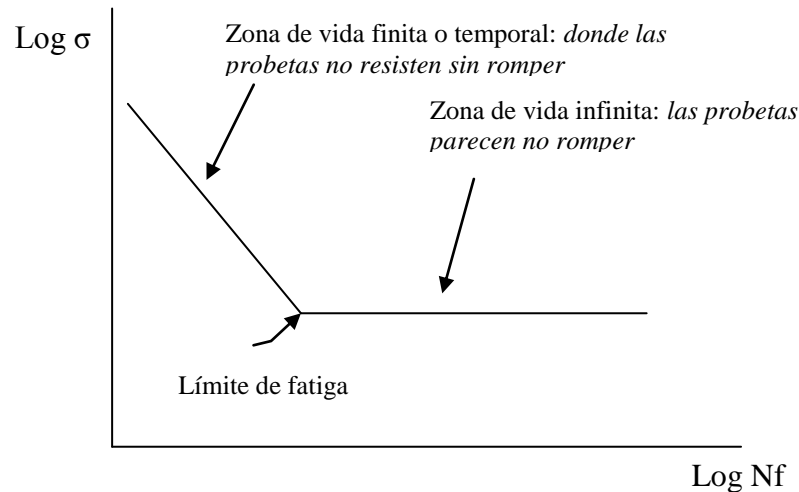


Figura 1.2 Representación esquemática de un diagrama Esfuerzo Vs. Número de ciclos

El límite de fatiga esta representado por el punto anguloso formado por el encuentro de las dos partes de la curva, y en general para los aceros se presenta entre uno y cinco millones de ciclos.

Algunos materiales como el hierro forjado, la fundición, aceros de baja y media resistencia, aceros inoxidable, aleaciones de aluminio - magnesio, y algunas aleaciones de titanio, presentan un límite de fatiga. Sin embargo, no todos los materiales lo presentan y la mayoría de los materiales no férricos no lo presentan y tienen una curva cuya pendiente disminuye progresivamente al aumentar el número de ciclos, aproximándose a una horizontal pero sin llegar a serlo nunca. No tienen por tanto, un verdadero límite de fatiga.

La mejor curva de ajuste de los resultados de los ensayos de fatiga se logra por métodos estadísticos y se conoce como curva de Wölher.

Al igual que en las pruebas de tracción, la fuerza dinámica se puede calcular como nominal, utilizando el área inicial de la probeta o como esfuerzo real, utilizando el área instantánea bajo la carga dinámica, denominándose al esfuerzo S_a y σ_a respectivamente.

1.7.- RELACION ENTRE EL ESFUERZO Y LA DEFORMACIÓN DURANTE LA FATIGA.

Cuando un material es sometido al efecto de esfuerzos cíclicos alternantes de magnitudes próximas al límite de fluencia, es posible obtener en un diagrama esfuerzo – deformación una representación denominada Curva de Histéresis. En la figura 1.3 se muestra en forma esquemática la representación de una curva de histéresis.

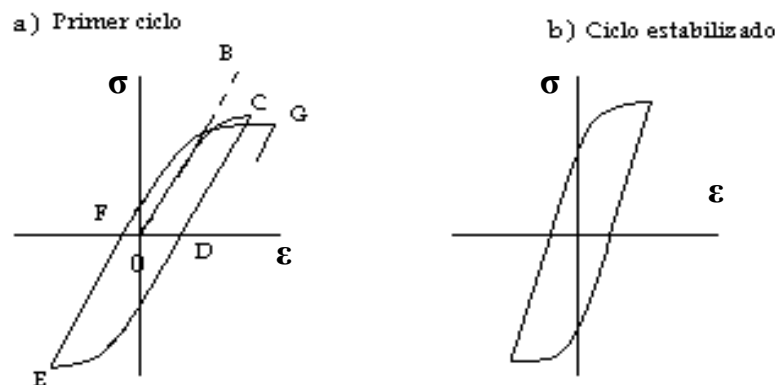


Figura 1.3 Representación esquemática de un ciclo de Histéresis

Se puede observar que en la primera carga se obtiene una curva similar a una curva esfuerzo deformación estática, donde a valores bajos del esfuerzo la deformación es totalmente elástica y la curva sigue una línea OB elástica; más allá del límite elástico aparece la deformación plástica que aumenta con el esfuerzo.

En la descarga, la deformación sigue la línea CD que para los metales a temperatura ambiente, es usualmente paralela a la línea OB elástica, En la etapa de compresión

comienza la deformación plástica en la dirección opuesta para un valor bajo de esfuerzo de compresión, curva DE.

En la descarga de compresión se obtiene la línea EF paralela a la línea elástica; y recargando ahora a tracción se obtiene la curva FG.

Si los esfuerzos alternantes son iguales a tensión y a compresión, la deformación por tracción será compensada por la de compresión y se obtendrá después de pocos ciclos de esfuerzos una figura cerrada o ciclo y se conoce como ciclo de Histéresis. [6].

El área de un ciclo de Histéresis representa el trabajo hecho en el material durante el ciclo de esfuerzo. Una pequeña porción de este trabajo puede almacenarse en el material como resultado de la distorsión permanente de la estructura, pero la mayor parte de él se disipa como calor.

1.8.- COMPORTAMIENTO DE LOS METALES CUANDO ESTAN SOMETIDOS A LA ACCION DE ESFUERZOS DE FATIGA SIMÉTRICOS.

Los metales son microscópicamente inestables bajo la aplicación de cargas y su respuesta esfuerzo – deformación puede ser drásticamente alterada. De aquí que, dependiendo de su condición inicial (templado, revenido, recocido, normalizado) y de las condiciones de prueba un metal puede:

- Endurecer cíclicamente.
- Ablandarse cíclicamente.
- Tener un comportamiento mixto.

Las curvas esfuerzo – deformación cíclicamente estabilizadas o ciclos de histéresis estabilizados son caracterizaciones importantes de la respuesta cíclica del material y a través de ellas se puede obtener una curva que describe el comportamiento cíclico de dicho material, denominada curva cíclica. Estas curvas pueden obtenerse de diferentes maneras.

- Por ejemplo, una serie de muestras o probetas similares, del mismo material, pueden ser sometidas a la acción de cargas cíclicas dentro de varios límites de deformación hasta que sus respectivos lazos de histéresis lleguen a estar estabilizados. La curva cíclica esfuerzo – deformación se determina ajustando una

curva a través de los extremos de varios lazos de histéresis superpuestos, como se muestra en la figura 1.4.

- Otro método para obtener curvas cíclicas esfuerzos – deformación es por ensayo por pasos múltiples, donde la misma muestra es sometida a una serie de deformaciones alternantes en bloques de aumento de magnitud.

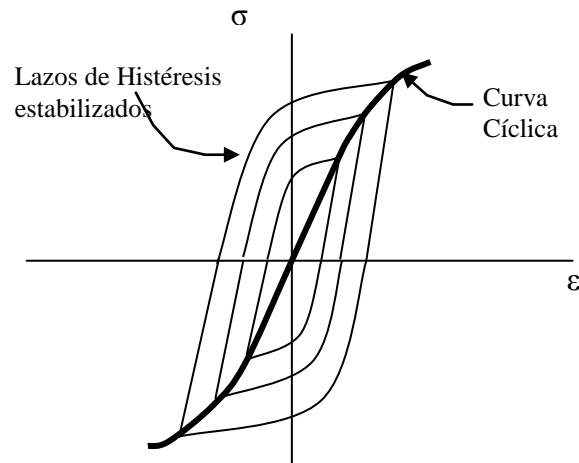


Figura 1.4. Representación esquemática de una curva cíclica.

La respuesta cíclica esfuerzo - deformación de un material, esta caracterizada por la siguiente relación

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K'} \right)^{1/n'} \dots\dots\dots 1.5$$

donde

$\Delta \varepsilon$: amplitud de deformación total real

σ_a : amplitud de esfuerzo real

K' : coeficiente de esfuerzo cíclico

n' : exponente de endurecimiento por deformación cíclico

Aunque ocurren muchos cambios en estas propiedades como resultado del endurecimiento o del ablandamiento cíclico, se toma para muchos metales un valor de “ n' ” que varía entre 0.1 y 0.2 con valor cercano a 0.15.

En general los metales con un valor alto del exponente de endurecimiento por deformación $n > 0.2$ probablemente endurecerán cíclicamente y aquellos cuyo exponente de endurecimiento por deformación es bajo $n < 0.10$ ablandarán cíclicamente. Manson observó que la predisposición para endurecimiento o ablandamiento cíclico depende de la relación del último esfuerzo monotónico con el esfuerzo de cedencia, de allí que la siguiente relación puede ser utilizada para determinar el comportamiento cíclico de un metal.

$$\frac{\sigma_{ult}}{\sigma_{0.2\%}} > 1.4 \quad (\text{endurecimiento}) \dots\dots\dots 1.6$$

$\sigma_{0.2\%}$ y

$$\frac{\sigma_{ult}}{\sigma_{0.2\%}} < 1.2 \quad (\text{ablandamiento}) \dots\dots\dots 1.7$$

$\sigma_{0.2\%}$ y

Para valores comprendidos entre 1.2 y 1.4 los pronósticos llegan a ser difíciles, aunque no se espera un gran cambio en las propiedades, por lo tanto el material generalmente es estable pero puede endurecerse o ablandarse.

La regla de Manson utiliza las propiedades monotónicas para determinar si ocurrirá endurecimiento o ablandamiento cíclico. Sin embargo, la magnitud de los cambios cíclicamente inducidos puede ser solo determinada por comparación de las curvas esfuerzo – deformación monotónica y cíclica.

1.9.- CICLOS DE CARGA DE FATIGA.

Durante la aplicación de cargas cíclicas se pueden identificar dos campos de acción

- *Aquel para el cual las cargas cíclicas son relativamente bajas, los ciclos de deformación están limitados al rango elástico y se exhiben largas vidas o altos números de ciclos para la falla. Este comportamiento ha sido tradicionalmente llamado fatiga a ciclo alto.*
- *Aquel para el cual las cargas cíclicas son relativamente altas, se inducen cantidades significativas de deformación durante cada ciclo, y se exhiben vidas cortas o un bajo número de ciclos para la falla si estas cargas son aplicadas repetidamente. Este comportamiento comúnmente es denominado fatiga a ciclo bajo, o más recientemente fatiga a deformación cíclica controlada [1].*

La transición del comportamiento de fatiga a ciclo bajo al comportamiento de fatiga a ciclo alto generalmente ocurre en un rango cercano de 10^4 a 10^5 ciclos, y muchos investigadores definen el rango de fatiga a ciclo bajo para la falla en 50.000 ciclos o menos.

Aún si las cargas en una máquina o estructura son nominalmente bajas, el material en el fondo de cualquier punto crítico sufrirá una plasticidad local que es deformación cíclica controlada por la coacción impuesta por la masa circundante de material plástico.

1.10.- FATIGA A DEFORMACIÓN CÍCLICA CONTROLADA.

Cuando se monitorean los valores de deformación y de esfuerzo durante un experimento de carga cíclica, la respuesta del material puede identificarse claramente. Por ejemplo, un material que exhiba un comportamiento esfuerzo – deformación que involucra solo deformación elástica bajo la acción de las cargas aplicadas, produce una curva de histéresis como la mostrada en la figura 1.5.

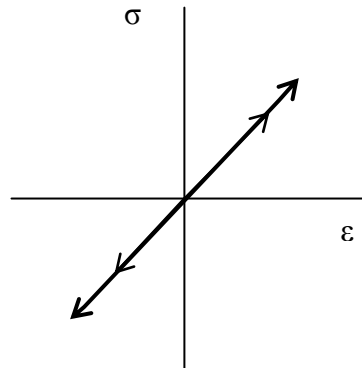


Figura 1.5 Representación esquemática de un ciclo de histéresis que involucra solo deformación elástica

Se puede observar que la respuesta esfuerzo – deformación es repasada completamente, esto es, las deformaciones elásticas son completamente reversibles.

Cuando un comportamiento involucra un flujo elástico - plástico homogéneo, la incursión de la carga (positiva o negativa) produce una curva similar a la mostrada en la figura 1.6, que refleja deformaciones tanto elástica como plástica.

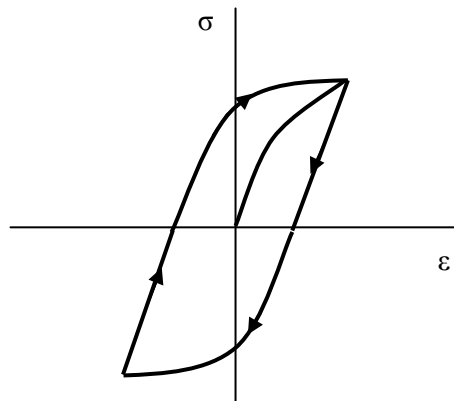


Figura 1.6 Representación de un ciclo de histéresis que involucra flujo elasto-plástico

1.11.- RELACIONES DE FATIGA (DEFORMACIÓN – VIDA).

Al considerar como las propiedades de un material cíclicamente estabilizado afectan la vida de un componente ingenieril o un espécimen sometido a cargas de deformación controlada, es conveniente considerar las componentes de la deformación elástica y de la deformación plástica por separado.

La componente de la deformación elástica es a menudo descrita en términos de la relación entre la amplitud del esfuerzo verdadero y el número de reversos de carga, esto es:

$$\frac{\Delta \varepsilon E}{2} = \sigma_a = \sigma_f' (2N_f)^b \quad \dots\dots\dots 1.8$$

donde

σ_a : amplitud del esfuerzo aplicado.

σ_f' : coeficiente del esfuerzo de fatiga, siendo el esfuerzo correspondiente a la ruptura en una inversión del esfuerzo.

$2N_f$: número de reversos.

b : coeficiente exponencial del esfuerzo de fatiga, siendo la pendiente de la recta de deformación elástica y el exponente al que debe ser elevado la duración $2N_f$ para que sea proporcional a la amplitud del esfuerzo real.

Esta relación es similar en forma a la propuesta por Basquin en 1.910 [2].

La relación propuesta por Manson y Coffin [2] para la deformación plástica puede ser expresada como:

$$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \varepsilon_f' (2N_f)^c \quad \dots\dots\dots 1.9$$

donde

$\Delta \varepsilon_p$: amplitud de deformación plástica

ϵ_f' : coeficiente de ductilidad de fatiga, siendo la deformación real correspondiente a la ruptura en una inversión del esfuerzo. La línea de deformación plástica comienza en ese punto.

c : exponente de ductilidad de fatiga, siendo la pendiente de la recta de la deformación plástica y el exponente al que debe elevarse la duración $2N_f$ a fin de que sea proporcional a la amplitud de la deformación plástica real.

La amplitud de la deformación total es la suma de la componente elástica mas la plástica, esto ha sido modelado matemáticamente como:

$$\Delta \epsilon_t = \Delta \epsilon_e + \Delta \epsilon_p \quad \dots\dots\dots 1.10$$

$$\frac{\Delta \epsilon_t}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \epsilon_f' (2N_f)^c \quad \dots\dots\dots 1.11$$

Esta es la relación de Manson – Coffin [2] entre la deformación total y la duración a la fatiga.

Los parámetros σ_f' , ϵ_f' , b , c son propiedades características de fatiga.

La amplitud de la deformación elástica y la amplitud de deformación plástica pueden ser representadas como rectas en un grafico log – log de amplitud de deformación versus vida.

De aquí que la curva deformación total – vida se aproximará a la curva deformación plástica – vida en amplitudes de deformación altas y se aproximará a la curva deformación elástica – vida en amplitudes de deformación total baja. Esto se muestra esquemáticamente en la figura 1.7

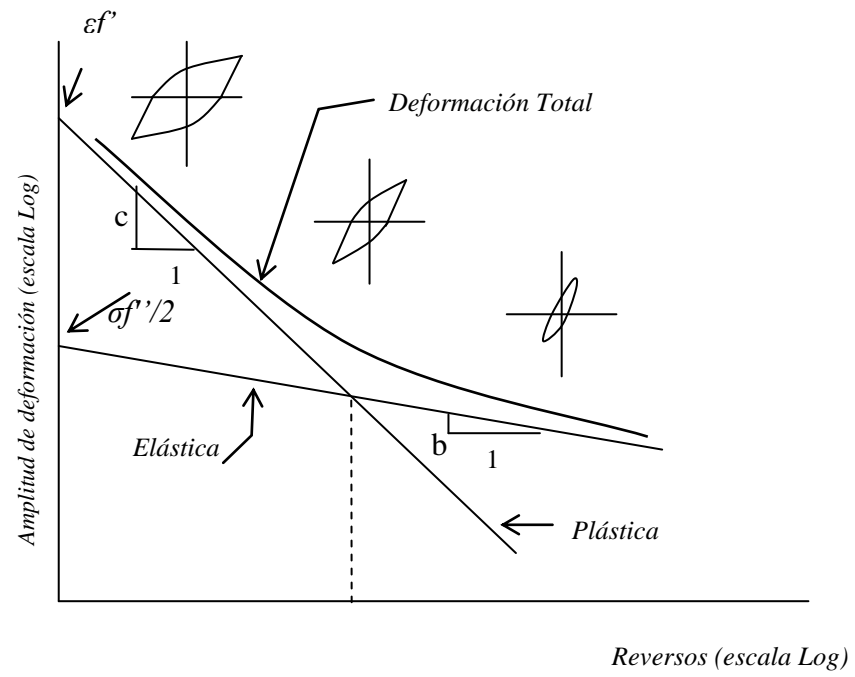


Figura 1.7 Curva amplitud de deformación total Vs. Número de reversos

1.12.- ANTECEDENTES.

Madrid, et al. ^[14] determinó la ecuación elastoplástica para los aceros A-42, A-36, A-622 mediante formulas de cálculo a partir de las curvas de histéresis estabilizadas obtenidas de ensayos de fatiga a cargas de tracción -compresión, manteniendo controlado el intervalo de deformación total y observó que el valor del esfuerzo real de fractura calculado en los ensayos monotónicos se aproximaba al valor del coeficiente de resistencia a la fatiga para los aceros A-42 y A-622, sin embargo para el acero A-36 presentó una gran diferencia.

Carpentiero, et al. ^[12] estudió el comportamiento a fatiga para los aceros AISI 1010, AISI 1020, AISI 1045, A-36, A-42 en condición de recocido y obtuvo la ecuación universal para los aceros al carbono de fabricación nacional, la cual se puede escribir como:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{1}{6} \left[7 \frac{\sigma_f}{E} (2N_f)^{-0.1275} + 8 \varepsilon_f (2N_f)^{-0.620} \right] \dots\dots\dots 1.12$$

2.-TERMOROCIADO.

2.1.- RECUBRIMIENTO POR TERMOROCIADO.

El proceso por termorociado consiste en la proyección de partículas metálicas o no metálicas, en condición fundida o semifundida sobre un material base (substrato), de manera que al impactar sobre su superficie se forman capas que constituyen un recubrimiento sólido.

En la aplicación del termorociado se utiliza una pistola que es alimentada por un material para el recubrimiento en forma de polvo o de alambre; asimismo, se utiliza una reacción química (combustión) o un arco eléctrico para fundir el recubrimiento.

Las partículas fundidas son aceleradas por gas comprimido impactando sobre la superficie del substrato, aplanándose y formando delgadas placas que se adhieren a las irregularidades de la superficie y entre sí. De ese modo, cuando las partículas chocan contra el substrato, se enfrían y se va constituyendo, partícula a partícula, una estructura laminar formándose el revestimiento. La adherencia depende de factores tales como: limpieza y rugosidad de la superficie del substrato, del material usado para el recubrimiento y de la velocidad de las partículas. La figura 2.1 muestra un dibujo esquemático del proceso de termorociado.

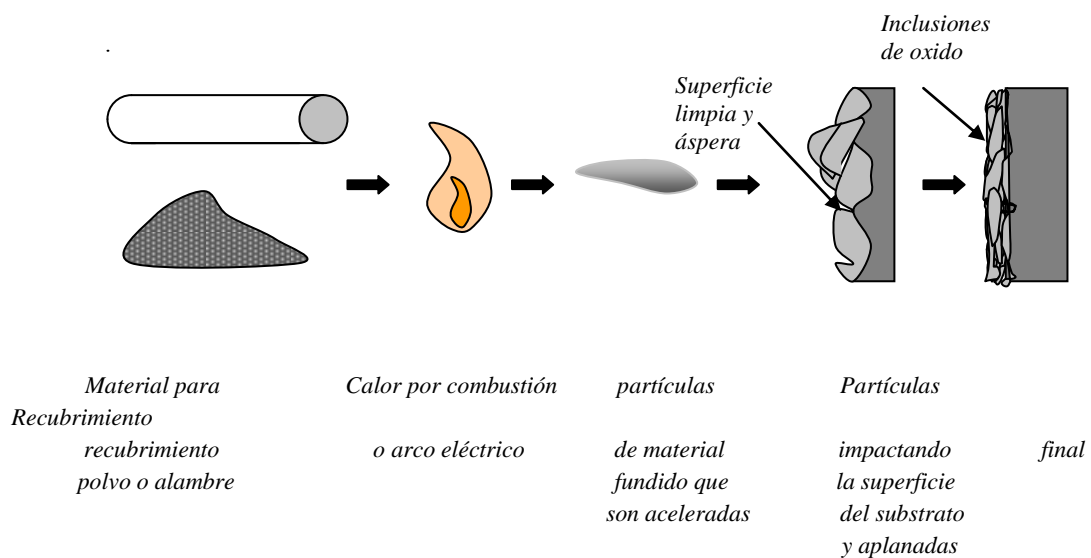


Figura 2.1 Dibujo esquemático del proceso de termorociado.

2.2.-APLICACIONES DEL TERMOROCIADO.

Uno de los aspectos más relevantes de los revestimientos hechos por medio de técnicas de termorociado es probablemente su diversidad de aplicaciones, en parte debido a dos razones principales:

- La primera se refiere al amplio rango disponible para la selección de materiales (más de 200 materiales de revestimiento con diferentes propiedades de dureza, coeficiente de fricción, resistencia y otras tantas propiedades), pudiéndose agrupar estos en: metales puros, aleaciones metálicas, cerámicas, carburos, polímeros, materiales de compuestos generales tales como compuestos Al-Ni y Ni-grafito.
- La segunda se refiere a las distintas propiedades que pueden ser controladas y a la vez de la baja temperatura que se logra alcanzar en el sustrato (de 100 a 260 °C, de 200 a 500 °F); lo cual hace posible que se eviten cambios metalúrgicos, distorsión y oxidación.

Todo esto permite que los revestimientos hechos por la técnica de termorociado sean aplicados prácticamente a cualquier sustrato (metálicos, plásticos, compuestos, etc.). A su vez, estos revestimientos pueden ser en cierta forma aplicados a partes o elementos con: maquinado final, tratamiento térmico, o en donde se han practicado soldaduras y otros procesos a alta temperatura.

Los recubrimientos por termorociado de metales, carburos, cerámicas o plásticos son ampliamente utilizados en distintas aplicaciones de ingeniería, en las áreas de mantenimiento y producción; la superficie obtenida con dicho proceso puede ser tan blanda como la aleación estaño-cobre (Babbitt) o tan dura como el carburo de tungsteno, siendo el primero utilizado exitosamente en superficies antifricción (cojinetes de cigüeñales) y el segundo en superficies antidesgaste (esferas de válvulas de bola en la industria petrolera).

Asimismo, se emplean los recubrimientos por termorociado para reparar o redimensionar partes corroídas o desgastadas, reparar elementos con errores dimensionales, imperfecciones o para renovar superficies semi-desgastadas durante su operación.

Los recubrimientos por termorociado ofrecen propiedades en los materiales que no pueden ser encontradas en las piezas mecánicas forjadas. Estos revestimientos pueden ser aplicados en áreas seleccionadas, en vez de aplicarse a la pieza entera, lo cual permite que los costos disminuyan en vista de la eliminación de procesos innecesarios.

Las aplicaciones de las técnicas de termorociado se han incrementado a través de los años, básicamente la mayoría de las mismas están orientadas hacia el campo de piezas que necesitan tener resistencia al desgaste y a la corrosión.

Algunos de los materiales empleados como recubrimientos incluyen:

- Aleaciones basadas en metales refractarios, especialmente compuestos basados en molibdeno (Mo) los cuales se han utilizado en numerosos ambientes de desgaste por fricción. El molibdeno y pseudoaleaciones de molibdeno, son usados en la industria automotriz, en la de pulpa y papel, así como en la aeroespacial. Ejemplo: anillos de pistón en automóviles han sido recubiertos con compuestos basados de molibdeno para dar resistencia al roce y reducir el desgaste por fricción de deslizamiento. El comportamiento benéfico de reducida fricción de este recubrimiento se atribuye a la formación de una película superficial de molibdeno sobre la pieza.*
- Compuestos de carburo de tungsteno (WC-Co) y Cr₃C₂-NiCr son extensamente utilizados como revestimientos por termorociado para protección en ambientes de desgaste por abrasión, fricción y erosión. Los mayores usuarios de tales recubrimientos son la industria de motores para aeronaves, donde compresores, turbinas y otros componentes son recubiertos para reducir el desgaste e incrementar la vida de los mismos.*
- Aleaciones con base de aluminio y zinc son ampliamente empleadas para realizar recubrimientos anticorrosivos por medio de la técnica del termorociado. Estas son utilizadas para proteger piezas y grandes estructuras, como barcos y puentes de hierro y acero que se encuentren en medios muy favorables para la corrosión. En general en la industria marina es donde se consigue el mayor rango de aplicación. Otros materiales usados como revestimientos para estas técnicas incluyen: aceros inoxidables, bronce con aluminio, aleaciones con base níquel.*

2.3.-ROCIADO A PRESION (PROCESO PREVIO AL TERMOROCIADO)

Antes de realizar el termorociado, la superficie del sustrato es sometida a un tratamiento superficial para lograr cierto grado de rugosidad que permita una buena adhesión del recubrimiento. Para tal fin, frecuentemente se utilizan materiales como el óxido de aluminio o alumina, acero rápido y acero granular. La selección depende del tipo de sustrato, así tenemos:

- Sustratos blandos; se utilizan óxidos refractarios, ya que este tipo de arenillas posee bordes cortantes y afilados ideales para este tipo de superficies.*
- Sustratos con dureza menores a Rc 40 – 45, se utilizan aceros rápidos que se aplastan durante el impacto, en vez de fracturarse.*
- Sustratos de alta resistencia, se utiliza alumina.*

Para controlar el grado de aspereza de la superficie los abrasivos poseen una serie de graduaciones. Las partículas pequeñas permitirán la preparación de áreas mayores por hora. Las partículas de mayor tamaño producen una remoción más rápida del material del sustrato generando acabados más ásperos.

Además del tipo y tamaño de arenilla existen otras variables de este proceso que tienen igual grado de importancia como son:

- La presión del aire, esta depende del tipo de sustrato, del tipo de acabado de la superficie, del peso y tamaño de las partículas abrasivas, del tipo de máquinas y toberas utilizadas. Por lo general se emplean presiones de valores comprendidos entre 30 y 100 Psi. Se emplean presiones bajas en el caso de sustratos como el aluminio, aleaciones de cobre, bronce y plástico donde deben ser usadas arenillas suaves y finas.*
- Angulo de soplado, el chorro abrasivo debe ser dirigido con un ángulo de rociado de 75 a 90 grados y debe moverse de lado a lado en forma continua.*
- La distancia entre la pistola y el sustrato varía de 100 a 300 mm, dependiendo del tamaño del abrasivo, de la apertura de la tobera y de la capacidad del equipo de soplado.*

2.4.-TIPOS DE PROCESOS.

Las características básicas que diferencian los distintos métodos de termorociado son:

- La alimentación del material para el recubrimiento, el cual puede ser polvo o alambre.*
- La generación de calor para la fusión ya sea por combustión o por arco eléctrico.*
- La velocidad de las partículas que en algunos casos puede ser subsónica y en otros supersónica.*

2.5.- RECUBRIMIENTO POR COMBUSTIÓN – LLAMA.

Este proceso emplea la combinación de oxígeno con algún combustible como acetileno, propano, hidrógeno o gas natural para generar una llama que se usa para fundir el material de recubrimiento. Así mismo, se utiliza aire comprimido para atomizar e impulsar las partículas fundidas hacia la superficie del sustrato. Generalmente, este proceso genera recubrimientos de bajo rendimiento y no se emplea cuando se requiere de recubrimientos de alta densidad y con buena adherencia.

Las causas de estas deficiencias tienen que ver con la relativamente baja velocidad de las partículas de aproximadamente 50 m/s y la baja temperatura lograda por debajo de 3000 grados centígrados. El material puede administrarse al dispositivo en forma de polvo o alambre.

2.6.- RECUBRIMIENTO POR ARCO ELECTRICO.

En este proceso se utilizan dos electrodos de alambre consumibles, los cuales en principio están aislados uno del otro, que avanzan automáticamente hasta un punto donde se les aplica una diferencia de potencial para formar un arco eléctrico que funde las puntas de los alambres donde un gas comprimido, generalmente aire, dirige las partículas fundidas hacia la superficie del sustrato para formar el rociado.

Este proceso produce pocos gases contaminantes, es fácil de trasladar y logra buena adherencia. La figura 2.2 muestra un dibujo esquemático de una pistola de rociado por arco eléctrico alimentada por alambre.

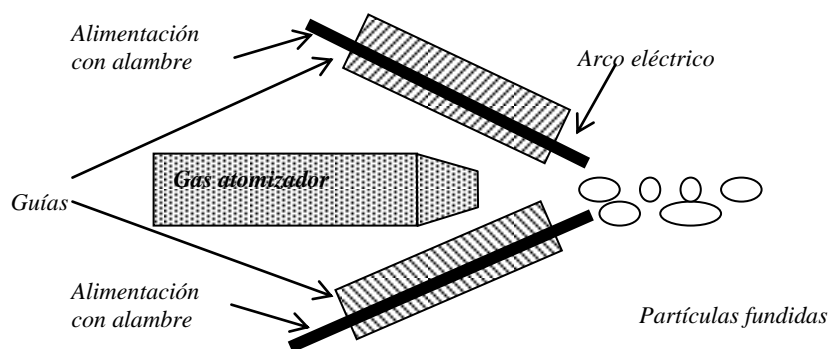


Figura 2.2 Dibujo esquemático de una pistola de rociado por arco eléctrico alimentada por alambres

2.7.- HVOF (HIGH VELOCITY OXY FUEL)

Este proceso es un sistema de rociado por combustión modificado que utiliza una tobera convergente – divergente para imprimirle a las partículas velocidades superiores de hasta tres veces la velocidad del sonido. Como resultado de esta gran velocidad, existe una gran energía cinética para rociar óxidos y carburos que normalmente no podrían ser rociados por un método de llama convencional. Las temperaturas de rociado son inferiores debido a la caída de presión entre la boquilla y el ambiente, pero las altas velocidades contribuyen a que las partículas tengan una mejor adherencia ya que el impacto las deforma con mayor facilidad, produciendo un buen recubrimiento.

Este proceso en comparación con otros procesos de recubrimiento por termorociado, que producen cualidades similares, ha mostrado ciertas ventajas considerándose como el más exitoso entre los procesos de recubrimiento por combustión.

Algunas características de los recubrimientos hechos por el método HVOF son la baja porosidad, la buena adhesión, la resistencia mecánica y la mayor dureza.

Los revestimientos con carburos son parte del campo del HVOF, cuyas aplicaciones se enfocan en la industria aeroespacial, árboles o rodets de bombas y compresores, válvulas, rollos de impresión para la industria papelera, molinos para la preparación de pulpa y para disminuir el desgaste corrosivo en la industria química.

En la mayoría de los casos, los recubrimientos por HVOF ofrecen mejoras en la calidad, por encima de las ofrecidas por otros métodos de termorociado. La calidad del recubrimiento es superior principalmente como resultado de las altas velocidades alcanzadas por las partículas, lo cual se traduce en alta energía cinética.

La velocidad de las partículas es un parámetro crítico en un proceso de termorociado HVOF, ya que la misma es considerablemente más alta que en los demás procesos. La velocidad de los gases es de 1370 y hasta 2930 m/s alcanzándose velocidades de partícula que oscilan entre 610 a 1060 m/s. Las temperaturas de los gases en las recamaras de reacción del HVOF están entre 1650 y 2760 °C, dependiendo del tipo de combustible usado y de la relación estequiometrica de la combustión. Las aceleraciones y velocidades de la partícula han sido significativamente más altas en sistemas de este tipo que en el resto de los procesos de termorociado, junto con las altas presiones y un efectivo y homogéneo calentamiento del material antes de su proyección. Sin embargo, la longitud de la boquilla debe ajustarse para cada material debido a las pérdidas de calor producto del refrigerante, el cual reduce su eficiencia calórica.

La fundición excesiva de la partícula dentro de la boquilla puede llevar a la deposición indeseable de las mismas en las paredes de la boquilla, este fenómeno es conocido como “plugging”, el cual produce un funcionamiento inestable debido al flujo de gases restringido por las deposiciones.

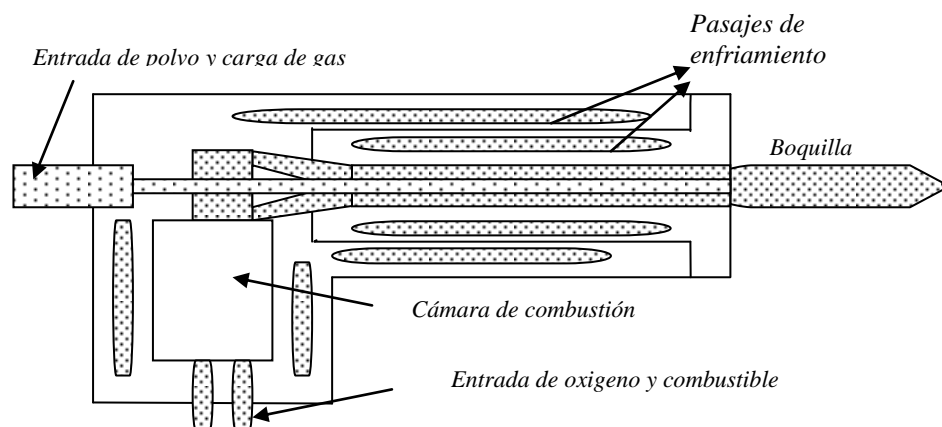


Figura 2.3 Ilustración esquemática de una pistola HVOF

2.8.- PISTOLA DE DETONACIÓN (D-GUN)

El método de deposición por pistola de detonación (D-gun) difiere de otros métodos que utilizan la combustión como generadora de calor. Este emplea la energía de explosiones de mezclas de oxígeno – acetileno, más bien que una llama estable, para empujar el material pulverizado hacia la superficie del sustrato; el depósito resultante es extremadamente duro, denso y fuertemente unido. La pistola de detonación consiste en un cañón largo dentro del cual se introduce una mezcla de oxígeno, gas combustible y material para el revestimiento pulverizado; cuando la mezcla de gases es encendida, una onda de detonación o frente de llama controlada, acelera y calienta las partículas de polvo a medida que se mueven dentro del cañón. La velocidad de salida de las partículas es de aproximadamente 950 m/s dependiendo del material. Este proceso que emplea D-gun es cíclico y luego de cada detonación la cámara es purgada utilizando nitrógeno.

Este proceso de recubrimiento ha sido desarrollado para la deposición de revestimientos duros y resistentes al desgaste tales como carburos y óxidos.

2.9.- PLASMA.

Quizás es el más flexible de todos los procesos de termorociado ya que puede desarrollar suficiente energía para fundir cualquier material.

La pistola plasma incorpora un cátodo (electrodo) y un ánodo (boquilla) separados por una pequeña abertura formando una cámara entre los dos. Se aplica corriente directa DC al cátodo y el arco eléctrico cruza hasta el ánodo. Al mismo tiempo, se pasan los gases a través de la cámara. El poderoso arco es suficiente para arrancar a los gases sus electrones y se forma un estado de la materia que se denomina plasma. Cuando el plasma inestable se reacomoda a su estado gaseoso se libera energía térmica. Inyectando el material para el recubrimiento en el gas, este es fundido e impulsado hacia su destino. Gases plasmas típicos son el hidrógeno, el nitrógeno, el argón y el helio. En este proceso puede regularse el flujo de gas, la corriente aplicada, el ángulo con que el material es inyectado, así como también la distancia de la pistola a la superficie por recubrir. Esto suministra un alto grado de flexibilidad para desarrollar

parámetros apropiados de rociado para materiales con temperaturas de fusión en un amplio rango.

2.10.- CARACTERISTICAS DE LOS RECUBRIMIENTOS

En todo recubrimiento hay algo de porosidad y sus niveles varían con los materiales y los procesos utilizados desde 0.01 a 15%. Los recubrimientos porosos pueden ser ventajosos algunas veces para elementos de máquinas, ya que retienen aceite, lo que permite la lubricación para partes móviles.

Los recubrimientos hechos por el método de llama generalmente son más porosos que los realizados por arco eléctrico, mientras que los recubrimientos hechos por el método de plasma y HVOF contienen la mínima porosidad.

En los recubrimientos por termorociado existe una cierta cantidad de óxidos. La oxidación puede originarse con la fusión del material durante el vuelo de las partículas de metal fundido y en la superficie después de que el material choque con el substrato.

El contenido de óxidos en los revestimientos realizados empleando el método de arco eléctrico oscila entre 0.3 y 0.5 %. La cantidad de óxido se puede disminuir reduciendo la distancia entre la pistola y la superficie del substrato y/o también controlando los parámetros del proceso. La cantidad de óxidos se incrementa al aumentar la distancia de rociado y con superficies sobrecalentadas. En el caso de arco eléctrico la calidad del recubrimiento no es tan buena como la que se logra obtener utilizando HVOF o plasma.

3.- METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.

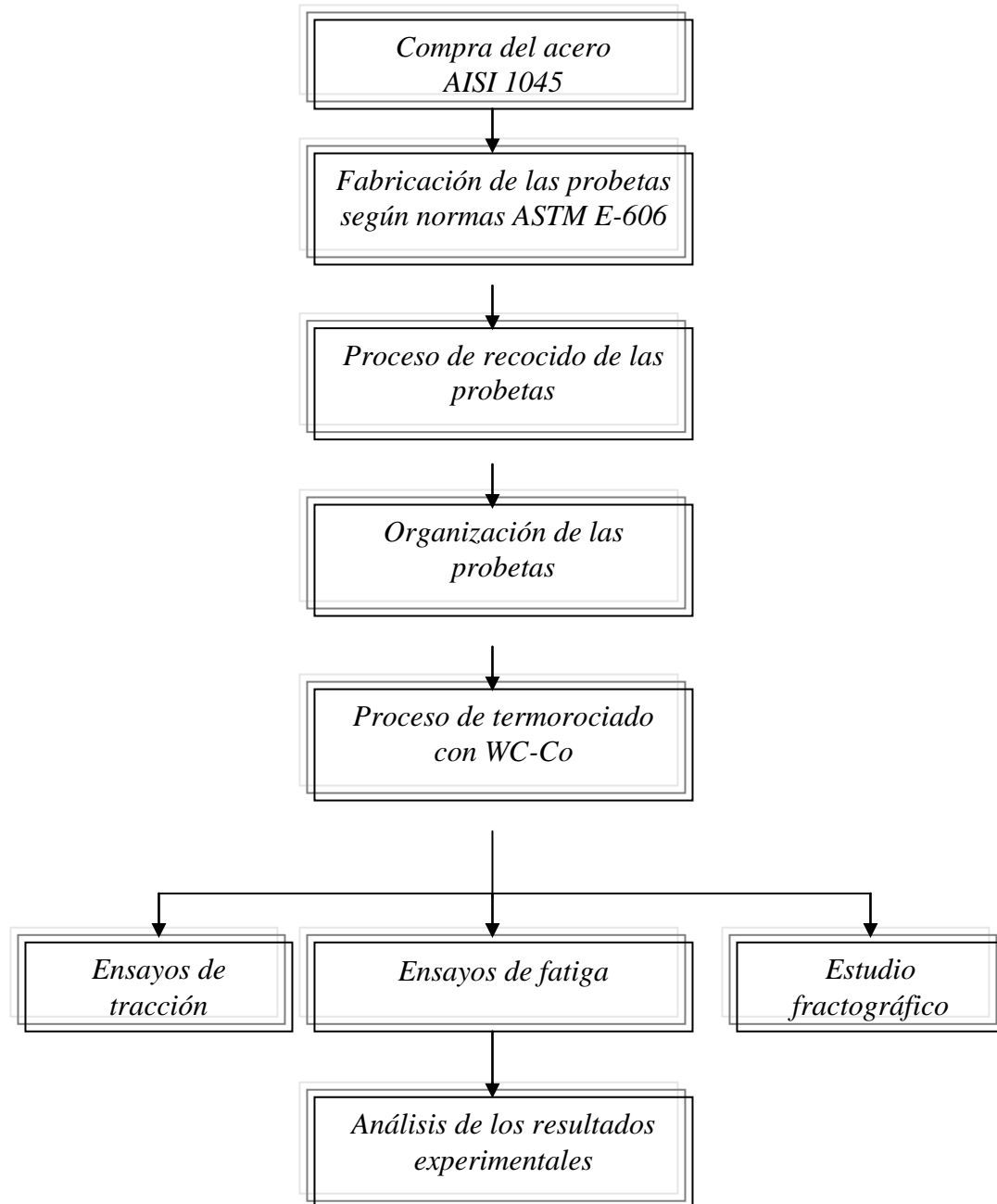


Figura 3.1 Organigrama de la metodología experimental

3.-MATERIALES.

3.1.1.- MATERIAL BASE.

El material utilizado para los ensayos fue Acero AISI-1045 suministrado por la empresa Ferrum C.A., en forma de barras cilíndricas de sección transversal circular con diámetro de $\varnothing = 1/2"$

Este material es un acero medio al carbono que se emplea en la industria metalmecánica y en la de construcción de maquinarias en general, para elaborar partes y piezas de vehículos y bicicletas expuestas a exigencias medianas tales como: ejes, árboles de leva, piezas pretensadas o estampadas, tornillería, chavetas y partes expuestas al desgaste por fricción.

Tabla 1.- Composición en porcentaje en peso del acero 1045

<i>Composición</i>	<i>C</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>
<i>Min.</i>	<i>0.430</i>	<i>...</i>	<i>...</i>	<i>0.600</i>	<i>0.150</i>
<i>Máx.</i>	<i>0.500</i>	<i>0.040</i>	<i>0.050</i>	<i>0.900</i>	<i>0.350</i>

Una vez elaboradas las probetas de ensayos, las mismas fueron sometidas a un tratamiento de recocido para eliminar las tensiones producidas por el maquinado, siendo este proceso realizado por la empresa Ferrum C.A., bajo las siguientes condiciones: Atmósfera inerte, a una temperatura de 850 °C, durante una hora y enfriado en el horno.

3.1.2.- RECUBRIMIENTO

El material usado para el recubrimiento fue Wc-Co(Carburo de tungsteno) al 12%. Este recubrimiento lo realizó la empresa Plasmatec, especialista en ésta área, quien reportó los siguientes datos:

Tecnología de deposición: termorociado hipersónico HVOF/ polvo.

Microporosidad: menor al 1% por volumen.

Adherencia: mayor a 10000PSI.

Acabado: como rociado.

Dureza: 1300Hv.(DPH 300°)

Espesor: 0.15 mm.

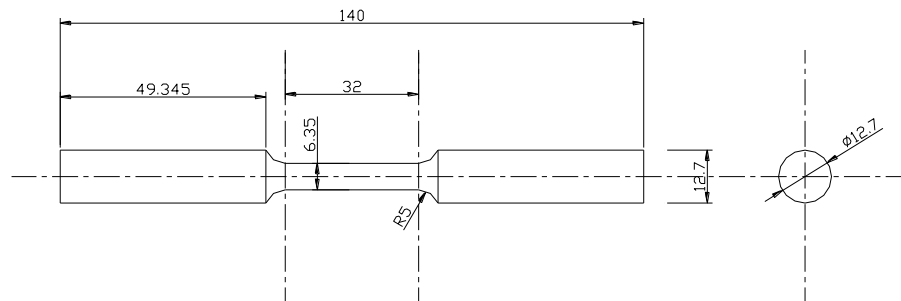
El recubrimiento es utilizado para proveer al material de resistencia al desgaste por fricción, abrasión y erosión, generando revestimientos de alta dureza.

3.2.- TRATAMIENTO SUPERFICIAL.

Antes de efectuar el proceso de termorociado se les aplicó a las probetas un chorro abrasivo con partículas de oxido de aluminio blanco # 20, suministradas por la empresa Tolva Carboven. Se empleó una pistola de aire a una presión de 50 PSI y una distancia de aproximadamente 200 mm.

3.3.- PROBETAS UTILIZADAS.

Las probetas utilizadas para los ensayos fueron elaboradas según las especificaciones recomendadas por la norma ASTM A – 370 y E – 606, tanto para los ensayos de tracción como para los de fatiga.



DIMENSIONES DE LA PROBETA PARA ENSAYOS DE TRACCION Y FATIGA.
MEDIDAS EN mm.

3.2.- Probetas de ensayo

La fabricación de las mismas se llevó a cabo en los talleres de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la U.C.V.. Se utilizó el torno de control numérico para un primer maquinado y el torno manual para lograr las dimensiones requeridas. Finalmente se procedió a realizar el pulido de las probetas comenzando con papel abrasivo basto y terminando con uno fino, todo esto con la finalidad de lograr una superficie libre de rayas. Cada probeta terminada fue introducida en aceite para evitar la oxidación.

3.4.- PROCESO DE TERMOROCIADO.

Este proceso fue realizado por la empresa PLASMATEC C.A., especializada en dicho proceso, siguiendo los procedimientos normales utilizados por la empresa.

Previo a realizar el revestimiento la superficie de las probetas fue limpiada con Thinner con la intención de eliminar la grasa existente o agentes contaminantes que pudiesen impedir la buena adhesión del recubrimiento con el sustrato.

Seguidamente se realizó un proceso de precalentamiento a 600 °C con el objeto de eliminar la humedad producida por el Thinner. Todo esto para garantizar la correcta

adhesión del recubrimiento sobre el substrato y eliminar cualquier agente contaminante.

3.5.- PARÁMETROS DEL PROCESO DE TERMOROCIADO.

Tipo de pistola utilizada: JP 5000

Distancia de rociado: 16 “ (40.64 cms)

Temperatura del proceso: 100 – 120 °C

Tasa de alimentación: 90 gr/min.

Presión de oxígeno: 210 Psi

Flujo de agua de enfriamiento: 30 lt/min

Presión de agua: 130 Psi

Combustible: Queroseno

Presión de combustible: 150 Psi

Flujo de oxígeno: 1800 SCFH.

Presión de la cámara de combustión: 110PSI

3.6.- EQUIPOS.

- Sierra de vaivén: fabricante “Scortegagna snc”, marca Ercole 320, largo de hoja 18”, capacidad de corte 250 mm de diámetro, potencia 1.5 HP. Ubicación E.I.M.U.C.V.*
- Torno manual: fabricante “The Colchester Lathe Co. L.T.D.”, marca Student, distancia entre centros 24”, volteo 12”, potencia del motor 3HP, potencia de la bomba 0.05 HP.; ubicación E.I.M.U.C.V.*
- Torno de control numérico: fabricante “H Ernault Somva “, marca 600N, distancia entre centros 1600 mm, potencia 15/21 C.V., mando numérico General Electric 550 CM*
- Máquina de ensayos de tracción y fatiga: fabricante “Instron”, marca Instron, fuerza máxima 20 toneladas, desplazamiento máximo 100 cm.; ubicación: E.I.M.C.M. - U.C.V.*
- Cortadora de precisión: fabricante “Buehler”, modelo Isonet 2000”; ubicación: E.I.M.C.M. – U.C.V.*

- *Equipo de lavado por ultrasonido: fabricante “Buehler”, modelo Ultramet II Sonic Cleaner; ubicación: E.I.M.C.M. – U.C.V.*
- *Microscopio electrónico de barrido, marca Philips, modelo 30, serie XL, EDAX; ubicación: I.U.TEC. Región Capital, carretera Panamericana, kilometro 12.*

3.7.- ENSAYO DE TRACCIÓN.

Este ensayo se realizó en una maquina de tracción marca Instron, modelo 8502, la cual esta ubicada en el laboratorio de ensayos destructivos, de la E.I.M.C.M., U.C.V. Se ensayaron tres (3) probetas con tratamiento de recocido y tres (3) probetas con tratamiento de recocido y termorociadas con Wc-Co, todo esto con la intención de conocer las propiedades mecánicas del material para cada condición.



Figura 3.3 Máquina de tracción Instron 8502

Los valores registrados para cada uno de los ensayos de tracción corresponden al alargamiento de la probeta sin corrección por deformación elástica (Δl_i) y a la carga aplicada (F_i). Una vez obtenidos estos valores se calculan la rigidez experimental del conjunto (K_{exp}) mediante la siguiente ecuación.

$$K_{exp.} = \frac{\sum F_i}{\sum \Delta l_i} \dots\dots\dots 3.1$$

La rigidez teórica ($K_{teó.}$) de la probeta se calculó mediante la siguiente ecuación

$$K_{teó.} = \frac{A_o * E}{l_o} \dots\dots\dots 3.2$$

Donde E es el módulo de elasticidad del acero, l_o es la longitud inicial de la sección de ensayo y A_o es el área inicial.

La corrección por deformación elástica está dada por:

$$(\Delta l_i)_{correg.} = \Delta l_i - F_i * \frac{(K_{teó.} - K_{exp.})}{(K_{teó.} * K_{exp.})} \dots\dots\dots 3.3$$

Los valores del esfuerzo nominal (S_i) y de deformación nominal (e_i) se calculan las siguientes relaciones:

$$e_i = \frac{\Delta l_i}{l_o} \dots\dots\dots 3.4$$

$$S_i = \frac{F_i}{A_0} \dots\dots\dots 3.5$$

Los valores del esfuerzo real (σ_i) y de la deformación real (ϵ_i) son:

$$\sigma_i = S_i (1 + e_i) \dots\dots\dots 3.6$$

$$\epsilon_i = \ln (1 + e_i) \dots\dots\dots 3.7$$

Estas dos últimas relaciones son válidas hasta el valor del esfuerzo nominal máximo.

Para el cálculo de los coeficientes (σ_0 , m) de la ecuación de endurecimiento plástico se emplea el método estadístico de los mínimos cuadrados.

3.8.-ENSAYO DE FATIGA.

Los ensayos de fatiga se realizaron en una maquina para ensayos dinámicos ubicada en el laboratorio de ensayos destructivos de la E.I.M.C.M., marca Instron modelo 8502, conectada a una consola de control marca Instron 8500, mediante la cual se suministran parámetros requeridos para el ensayo tales como: amplitud de deformación (valor correspondiente al esfuerzo aplicado), tipo de control (deformación controlada), parada automática(condición de parada cuando la probeta falle).

Se ensayaron un total de 50 probetas distribuidas de la siguiente manera: 25 probetas en condición de recocido y 25 probetas para la condición de termorociado para 5 niveles de esfuerzo (5 probetas por nivel),iguales en cada condición para poder realizar las posteriores comparaciones.

Los resultados obtenidos para cada uno de los ensayos (alargamiento, carga, ciclos) se almacenaron en discos flexibles de 3¼”para la posterior construcción de las curvas de histéresis.

Una vez graficadas las curvas de histéresis y por medición directa se obtuvieron los valores de $\Delta\epsilon_e$ y $\Delta\epsilon_p$. Luego, a través del método de regresión logarítmica y utilizando las ecuaciones (1.9) y (1.10), se determinaron los coeficientes de fatiga ϵ_f' , σ_f'/E , b , c .

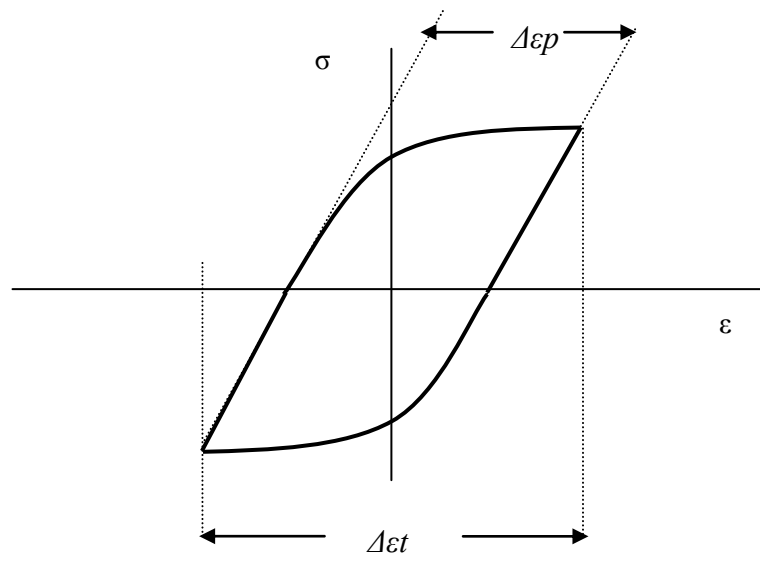


Figura 3.4 Método gráfico para la determinación de los valores de amplitud de deformación total $\Delta\varepsilon_t$, amplitud de deformación elástica $\Delta\varepsilon_e$ y amplitud de deformación plástica $\Delta\varepsilon_p = \Delta\varepsilon_t - \Delta\varepsilon_e$

4.- RESULTADOS Y ANÁLISIS.

4.1.- Ensayo de Tracción.

En la tabla 2 se muestran los resultados obtenidos para las probetas en condición de recocido y en la figura 4.1 las curvas Esfuerzo real (σ) Vs. Deformación real (ϵ).

Tabla 2 .- Resultados de los ensayos de tracción del acero 1045 (recocido).

Ensayo #	Su (MPa)	σ_u (MPa)	ϵ_u (mm/mm)	σ_y (MPa)	m	σ_o (MPa)	σ_f (MPa)	ϵ_f (mm/mm)
1-----	549,37	639,64	0,1521	382,02	0,2279	1.021,50	862,49	0,2139
2-----	554,29	663,24	0,1795	402,59	0,2358	1.031,20	1.199,01	0,2458
3-----	558,58	667,53	0,1782	367,81	0,2348	1.030,30	932,39	0,2507
Promedio	554,08	656,81	0,1699	384,14	0,2328	1.027,67	997,96	0,2368

Ensayo Tracción (Recocido)

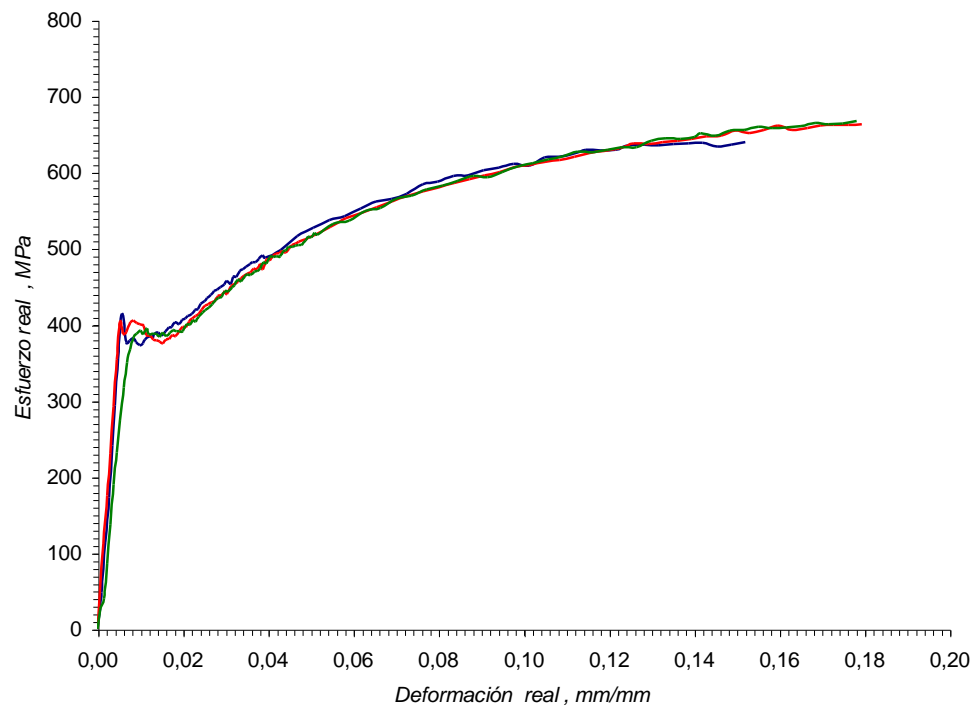


Figura 4.1 Curva Esfuerzo real (σ) Vs. Deformación real (ϵ), acero 1045 (recocido)

En la tabla 3 se muestran los resultados obtenidos para las probetas en condición de recocido y con recubrimiento de Termorociado con Wc-Co y en la figura 4.2 las curvas Esfuerzo real (σ) Vs. Deformación real (ϵ).

Tabla 3.- Resultados de los ensayos de tracción del acero 1045 (recocido y termorociado con Wc-Co)

Ensayo #	Su (MPa)	σ_u (MPa)	ϵ_u (mm/mm)	σ_y (MPa)	m	σ_o (MPa)	σ_f (MPa)	ϵ_f (mm/mm)
4-----	464,07	544,67	0,1601	340,67	0,2016	808,90	858,49	0,2244
5-----	487,17	566,59	0,1510	351,76	0,2022	847,71	936,96	0,2254
6-----	520,32	615,10	0,1673	393,21	0,2056	905,18	1.264,26	0,2312
Promedio	490,52	575,45	0,1595	361,88	0,2031	853,93	1.019,90	0,2270

Ensayo Tracción (Recocido y Termorociado)

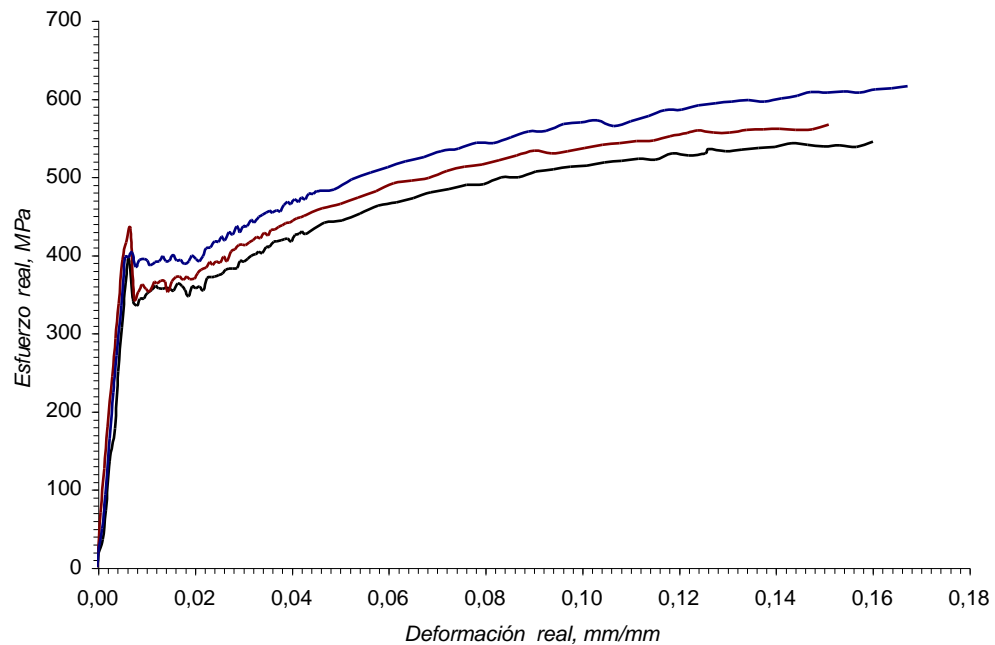


Figura 4.2 Curva Esfuerzo real(σ)Vs. Deformación real(ϵ), acero 1045(recocido y Termorociado Wc-Co)

De los resultados obtenidos y mostrados en las tablas 2 y 3 se puede observar que este tratamiento de Termorociado con $W_c - C_o$ ocasiona una disminución en las propiedades monotónicas promedios del material recubierto con respecto a la condición de recocido, particularmente en el esfuerzo de fluencia (σ_y), resistencia a la tracción (S_u) y el esfuerzo real a carga máxima (σ_u).

Para el material recubierto el esfuerzo de fluencia (σ_y) disminuye 6%, la resistencia a la tracción (S_u) disminuye 11 % y el esfuerzo real a carga máxima (σ_u) disminuye 12 %. Asimismo, la deformación correspondiente a el esfuerzo a carga máxima disminuye 6%, la deformación correspondiente al esfuerzo de fractura disminuye 4% y el esfuerzo real de fractura aumenta en 2%.

Estas variaciones en las propiedades no son significativas, por lo que se puede decir que en este caso el recubrimiento no afecta las propiedades estáticas del material. Una vez concluido el ensayo de tracción se observó un desprendimiento total del recubrimiento, esto evidencia la fragilidad del mismo.

En las figuras 4.3, 4.4, 4.5 se muestran las curvas $\log(\sigma)$ Vs. $\log(\epsilon)$ correspondientes a la zona plástica utilizadas para determinar los coeficientes de las ecuaciones de endurecimiento plástico para la condición de recocido y en las figuras 4.6, 4.7, 4.8 para la condición de termorociado.

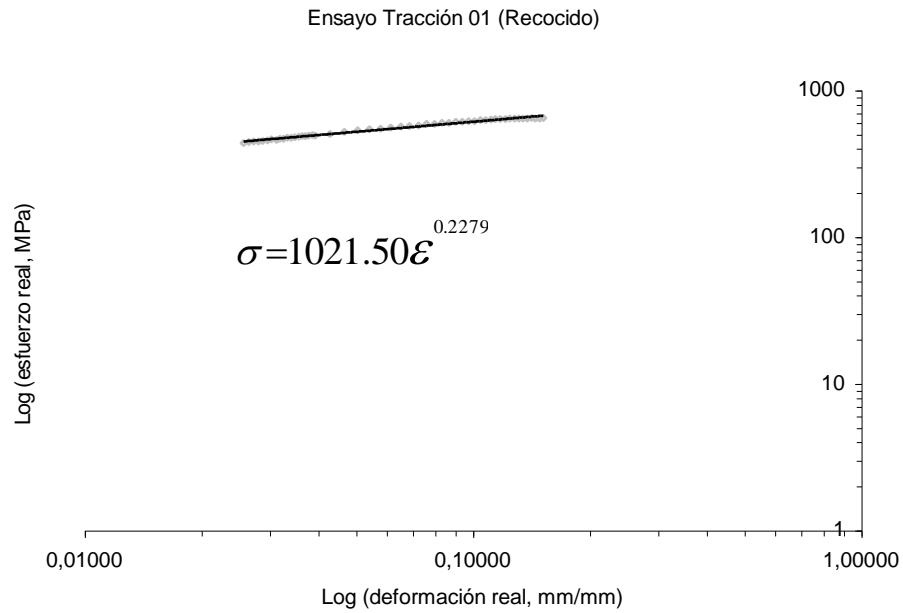


Figura 4.3 Curva $\log(\sigma)$ Vs. $\log(\varepsilon)$ correspondiente a la zona plástica, condición recocido

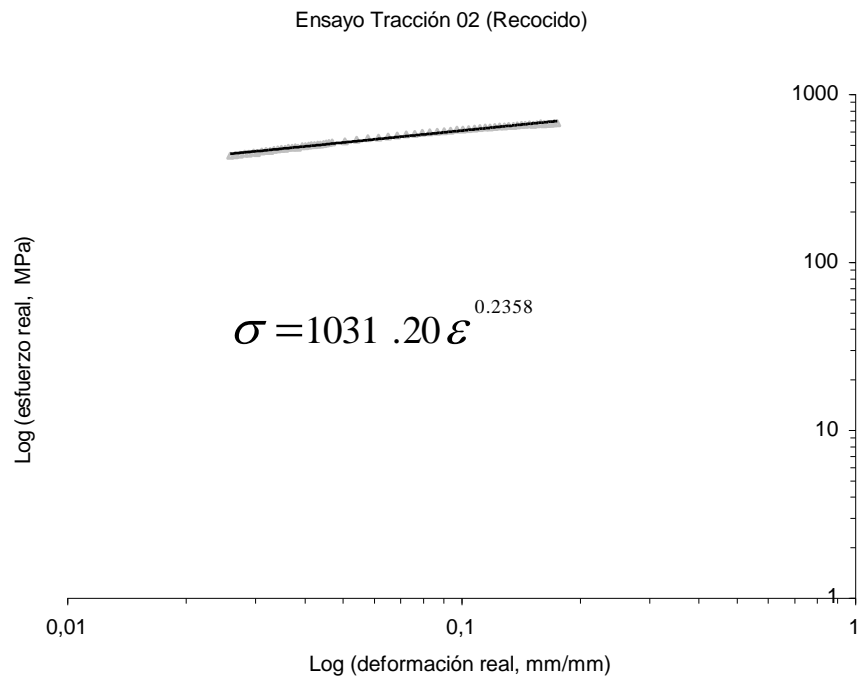


Figura 4.4 Curva $\log(\sigma)$ Vs. $\log(\varepsilon)$ correspondiente a la zona plástica, condición recocido

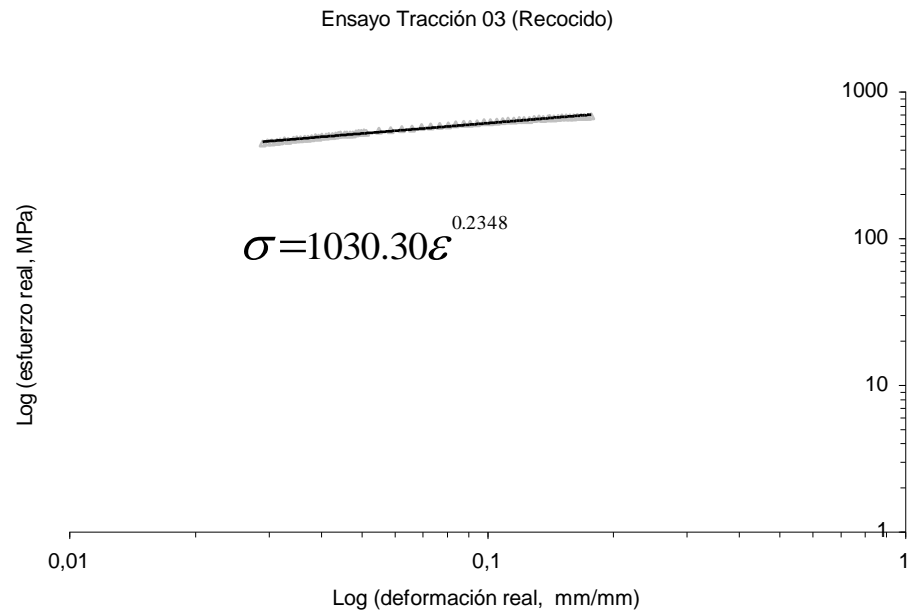


Figura 4.5 Curva $\log(\sigma)$ Vs. $\log(\varepsilon)$ correspondiente a la zona plástica, condición recocido

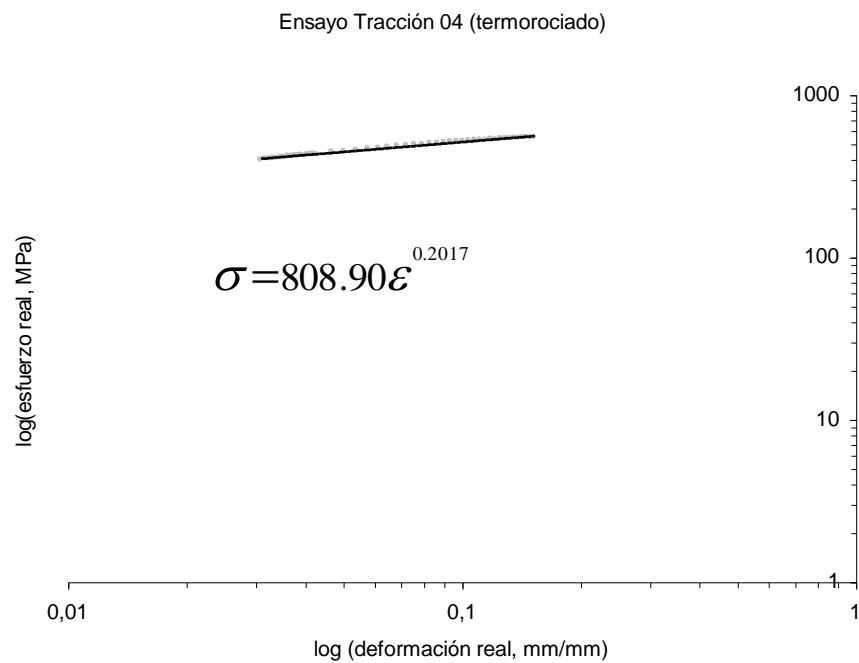


Figura 4.6 Curva $\log(\sigma)$ Vs. $\log(\varepsilon)$ correspondiente a la zona plástica, condición termorociado

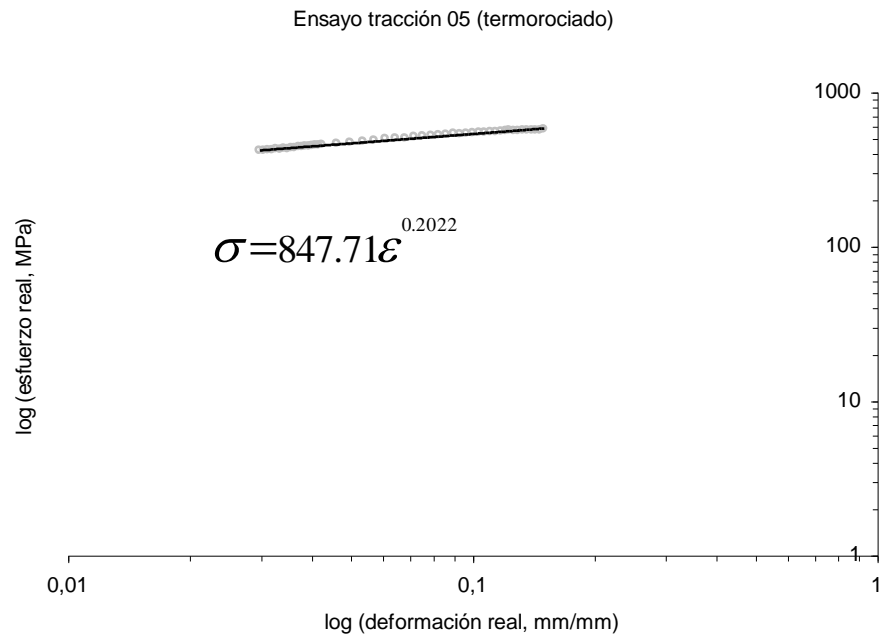


Figura 4.7 Curva $\log(\sigma)$ Vs. $\log(\epsilon)$ correspondiente a la zona plástica, condición termorociado

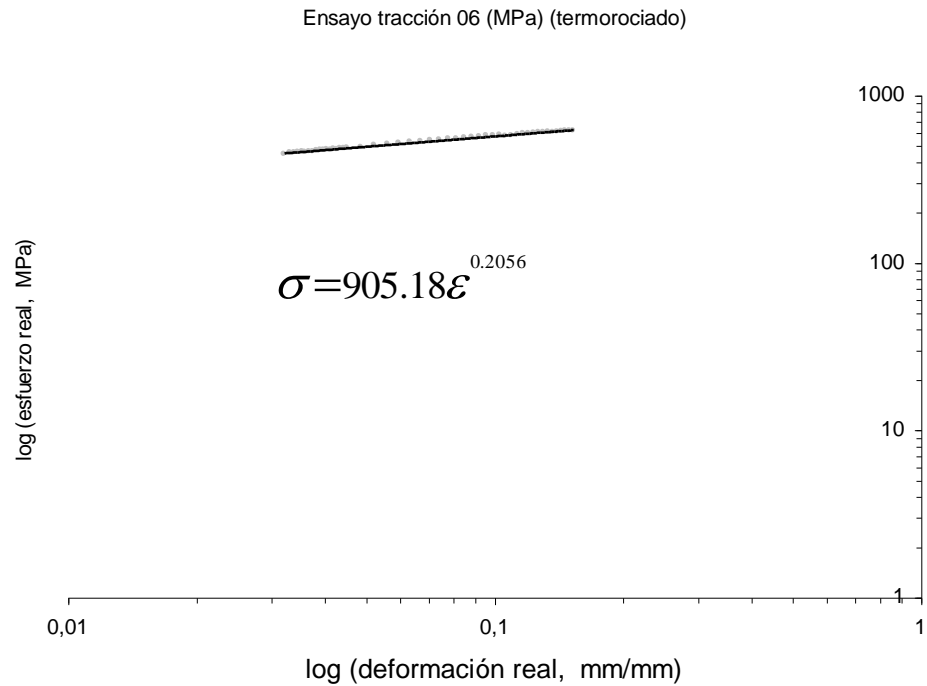


Figura 4.8 Curva $\log(\sigma)$ Vs. $\log(\epsilon)$ correspondiente a la zona plástica, condición termorociado

Las ecuaciones de endurecimiento plástico resultaron ser:

<i>Condición del acero</i>	<i>Ecuación</i>
<i>Recocido</i>	$\sigma = 1027.67 (\epsilon)^{0.2328} \text{ MPa}$
<i>Termorociado con Wc-Co</i>	$\sigma = 853.93 (\epsilon)^{0.2031} \text{ MPa}$

4.2.- Ensayos de fatiga.

De los gráficos de histéresis estabilizados, resultantes de los ensayos de fatiga, se obtuvieron los valores correspondientes a: $\Delta\epsilon_p/2$, $\Delta\epsilon_e/2$, σ_a .

Los valores del números de reversos para la falla ($2N_f$), fueron suministrados por la máquina.

Los resultados obtenidos en los ensayos de fatiga se muestran en las tablas 4, 5, 6, 7, y 8.

Nivel de esfuerzo 189 Mpa									
Condición de recocido					Condición de termorociado				
Probeta #	$\Delta\epsilon_p/2$ (mm/mm)	$\Delta\epsilon_e/2$ (mm/mm)	σ_a (Mpa)	$2N_f$ (reversos)	Probeta #	$\Delta\epsilon_p/2$ (mm/mm)	$\Delta\epsilon_e/2$ (mm/mm)	σ_a (Mpa)	$2N_f$ (reversos)
1	0.000117	0.003460	314.02	244638	6	0.000052	0.002655	271.96	523517
2	0.000122	0.003429	299.77	234611	7	0.000078	0.002633	187.58	361325
3	0.000120	0.003458	310.14	242564	8	0.000043	0.002646	330.60	637325
4	0.000148	0.003418	247.98	193396	9	0.000050	0.002657	282.97	542907
5	0.000086	0.003497	407.91	318029	10	0.000067	0.002653	219.62	431132
Promedio	0.000119	0.003452	315.96	246648	Promedio	0.000058	0.002649	258.55	499364

Tabla 4.- Resultados obtenidos en el ensayo de fatiga para el nivel de esfuerzo de 189 Mpa.

Nivel de esfuerzo 256 Mpa									
Condición de recocido					Condición de termorociado				
Probeta #	$\Delta\epsilon_p/2$ (mm/mm)	$\Delta\epsilon_e/2$ (mm/mm)	σ_a (Mpa)	$2N_f$ (reversos)	Probeta #	$\Delta\epsilon_p/2$ (mm/mm)	$\Delta\epsilon_e/2$ (mm/mm)	σ_a (Mpa)	$2N_f$ (reversos)
11	0.000188	0.003717	367.56	115156	16	0.000117	0.003621	292.31	210845
12	0.000208	0.003696	335.50	104787	17	0.000130	0.003608	260.24	188113
13	0.000169	0.003898	411.99	128547	18	0.000111	0.003625	290.35	209743
14	0.000206	0.0033699	341.65	106812	19	0.000115	0.003623	297.45	214986
15	0.000234	0.003691	316.08	99148	20	0.000128	0.003610	263.66	191099
Promedio	0.000201	0.003740	354.56	110890	Promedio	0.000120	0.003617	280.80	202957

Tabla 5.- Resultados obtenidos en el ensayo de fatiga para el nivel de esfuerzo de 256 Mpa.

Nivel de esfuerzo 310 Mpa									
Condición de recocido					Condición de termorociado				
Probeta #	$\Delta\epsilon_p/2$ (mm/mm)	$\Delta\epsilon_e/2$ (mm/mm)	σ_a (Mpa)	$2N_f$ (reversos)	Probeta #	$\Delta\epsilon_p/2$ (mm/mm)	$\Delta\epsilon_e/2$ (mm/mm)	σ_a (Mpa)	$2N_f$ (reversos)
21	0.000556	0.004060	415.44	73311	26	0.000247	0.004396	411.91	138386
22	0.000753	0.003816	310.77	54761	27	0.000389	0.004255	265.62	89293
23	0.000691	0.003851	337.01	59398	28	0.000253	0.004382	402.59	135155
24	0.000757	0.003792	320.80	57065	29	0.000226	0.004424	452.83	151680
25	0.000559	0.004016	412.53	72786	30	0.000372	0.004272	280.81	94132
Promedio	0.000663	0.003907	359.31	63464	Promedio	0.000297	0.004346	362.75	121729

Tabla 6.- Resultados obtenidos en el ensayo de fatiga para el nivel de esfuerzo de 310 Mpa.

Nivel de esfuerzo 335 Mpa									
Condición de recocido					Condición de termorociado				
Probeta #	$\Delta\epsilon_p/2$ (mm/mm)	$\Delta\epsilon_e/2$ (mm/mm)	σ_a (Mpa)	2Nf (reversos)	Probeta #	$\Delta\epsilon_p/2$ (mm/mm)	$\Delta\epsilon_e/2$ (mm/mm)	σ_a (Mpa)	2Nf (reversos)
31	0.000747	0.004452	536.01	22297	36	0.000451	0.004946	399.95	31586
32	0.001214	0.003985	331.40	13750	37	0.000576	0.004807	311.43	24597
33	0.001405	0.003656	285.63	11871	38	0.000434	0.004964	413.20	32815
34	0.001180	0.004027	338.53	14091	39	0.000372	0.004997	492.88	38967
35	0.001006	0.004452	396.58	16500	40	0.000552	0.004791	330.78	26168
Promedio	0.001110	0.004114	377.63	15702	Promedio	0.000477	0.004901	389.65	30827

Tabla 7.- Resultados obtenidos en el ensayo de fatiga para el nivel de esfuerzo de 335 Mpa.

Nivel de esfuerzo 355 MPa									
Condición de recocido					Condición de termorociado				
Probeta #	$\Delta\epsilon_p/2$ (mm/mm)	$\Delta\epsilon_e/2$ (mm/mm)	σ_a (Mpa)	2Nf (reversos)	Probeta #	$\Delta\epsilon_p/2$ (mm/mm)	$\Delta\epsilon_e/2$ (mm/mm)	σ_a (Mpa)	2Nf (reversos)
41	0.001007	0.004539	490.13	8450	46	0.000469	0.005351	414.35	14332
42	0.001412	0.004133	353.90	6070	47	0.000608	0.005212	327.02	11225
43	0.001318	0.004227	375.95	6475	48	0.000448	0.005371	429.56	14875
44	0.001509	0.004037	329.88	5652	99	0.000378	0.005433	509.78	17576
45	0.001325	0.004220	376.60	6450	50	0.000573	0.005309	346.18	11926
Promedio	0.001314	0.004231	385.29	6619	Promedio	0.000495	0.005335	405.38	13987

Tabla 8.- Resultados obtenidos en el ensayo de fatiga para el nivel de esfuerzo de 355 Mpa.

Utilizando las ecuaciones para la amplitud de deformación elástica

$$\frac{\Delta \varepsilon e}{2} = \frac{\sigma f'}{E} (2Nf)^b$$

y para la amplitud de deformación plástica

$$\frac{\Delta \varepsilon p}{2} = \varepsilon f' (2Nf)^c$$

la ecuación resultante en función de la amplitud de deformación total, se puede escribir en términos de la amplitud de deformación elástica y de la amplitud de deformación plástica como sigue:

$$\frac{\Delta \varepsilon t}{2} = \frac{\Delta \varepsilon e}{2} + \frac{\Delta \varepsilon p}{2}$$

$$\frac{\Delta \varepsilon t}{2} = \frac{\sigma f'}{E} (2Nf)^b + \varepsilon f' (2Nf)^c$$

Se obtuvieron los coeficientes $\sigma f'/E$, $\varepsilon f'$, b , c por medio del método de regresión logarítmica, generando los siguientes resultados:

Condición de **recocido**:

$$\frac{\Delta \varepsilon e}{2} = 0.0069 (2Nf)^{-0.0531}; R^2 = 0.9346$$

$$\frac{\Delta \varepsilon p}{2} = 0.6905 (2Nf)^{-0.6808}; R^2 = 0.8821$$

$$\frac{\Delta \varepsilon_t}{2} = 0.0069 (2Nf)^{-0.0531} + 0.6905 (2Nf)^{-0.6808}$$

Condición de *termorociado*:

$$\frac{\Delta \varepsilon_e}{2} = 0.0324 (2Nf)^{-0.1826}; R^2 = 0.8917$$

$$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = 0.2151 (2Nf)^{-0.6056}; R^2 = 0.8721$$

$$\frac{\Delta \varepsilon_t}{2} = 0.0324 (2Nf)^{-0.1826} + 0.2151 (2Nf)^{-0.6056}$$

Presentando la ecuación resultante en función de la amplitud de deformación total, la cual se puede escribir en términos de la amplitud de deformación elástica y de la amplitud de deformación plástica como sigue

$$\frac{\Delta \varepsilon_t}{2} = \frac{\Delta \varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_p}{2}$$

$$\frac{\Delta \varepsilon_t}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2Nf)^b + \varepsilon_f' (2Nf)^c$$

tenemos finalmente

Recocido	$\frac{\Delta \varepsilon t}{2} = 0.0069 (2Nf)^{-0.0531} + 0.6905 (2Nf)^{-0.6808}$
Termorociado	$\frac{\Delta \varepsilon t}{2} = 0.0324 (2Nf)^{-0.1826} + 0.2151 (2Nf)^{-0.6056}$

las cuales corresponden a las ecuaciones elastoplásticas para cada condición de ensayo, en este trabajo.

Al comparar las ecuaciones correspondientes a la amplitud de deformación total obtenidas en este trabajo para las condiciones de recocido y termorociado podemos observar que:

- Para la amplitud de deformación elástica se presenta una disminución de los coeficientes de esfuerzo de fatiga (σ_f/E) y del coeficiente exponencial del esfuerzo de fatiga (b) en la condición de recocido con respecto a los obtenidos para la condición de termorociado con Wc-Co.
- Para la amplitud de deformación plástica se presenta un aumento del coeficiente de ductilidad de fatiga (ε_f') y del coeficiente exponencial de ductilidad de fatiga (c) en la condición de recocido con respecto a la de termorociado.

En la figura 4.9 se muestra una comparación entre las curvas de Amplitud de Deformación total ($\Delta \varepsilon t/2$) Vs. Número de Reversos ($2Nf$) para las condiciones de recocido y termorociado, donde se aprecia que para valores del número de reversos $2Nf$ menores a 107078 (53539 ciclos), el valor correspondiente a la amplitud de

deformación total para la condición de termorociado aumenta en forma progresiva con respecto a la condición de recocido. Asimismo, en el caso donde los valores del número de reversos $2Nf$ son mayores a 107078 (53539 ciclos) sucede una situación inversa, tal que el valor de la amplitud de deformación total para la condición de termorociado disminuye con respecto a la condición de recocido.

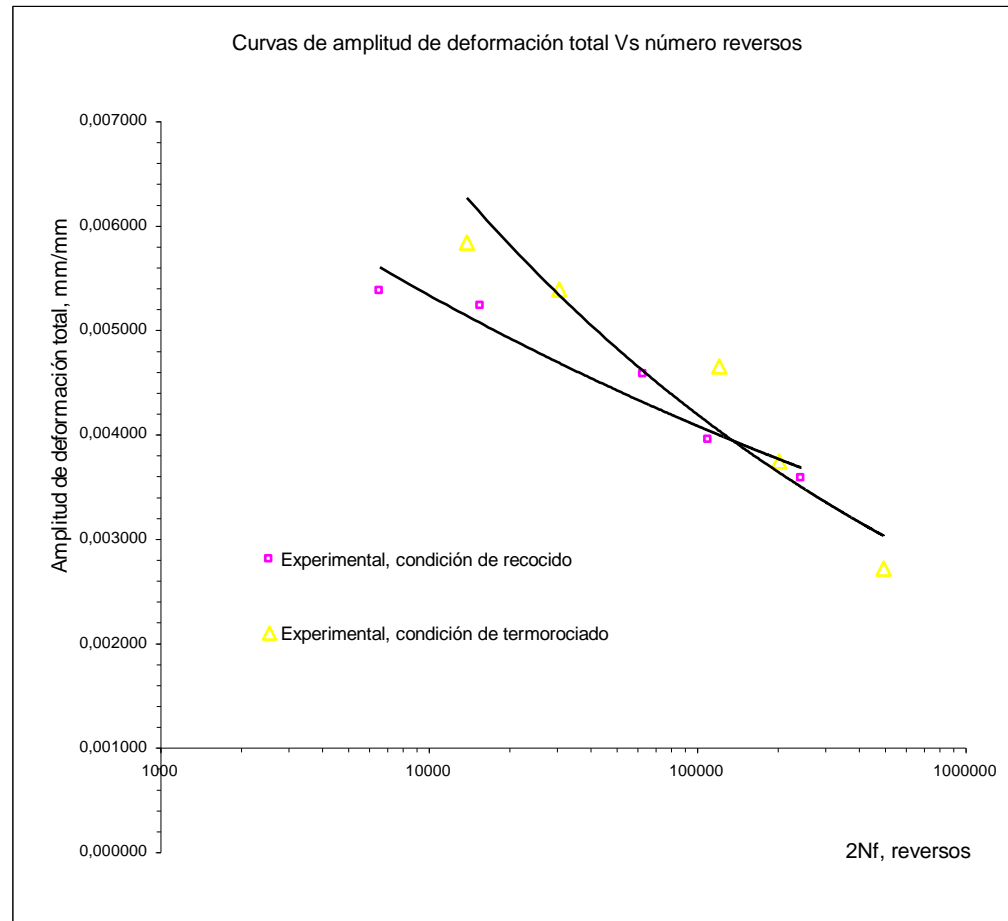


Figura 4.9.- Comparación entre las curvas de Amplitud de Deformación total ($\Delta\epsilon/2$) Vs. Número de Reversos ($2Nf$) para las condiciones de recocido y termorociado

Utilizando los resultados experimentales de este trabajo, se establece un estudio comparativo, en cuanto a la predicción del comportamiento del material en fatiga, con la ecuación universal para los aceros obtenida por Carpentiero, la cual se puede escribir como:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{1}{6} \left[7 \frac{\sigma_f}{E} (2N_f)^{-0.1275} + 8 \varepsilon_f (2N_f)^{-0.620} \right] \dots\dots\dots 1.3$$

Al comparar las curvas de amplitud de deformación total generadas por esta expresión y por la experimental se observa que existe semejanza en cuanto a forma entre las mismas, sin embargo la experimental se encuentra por encima de la universal. Esto se muestra en la figura 4.10. Esta comparación solo se hace para el material en la condición de recocido.

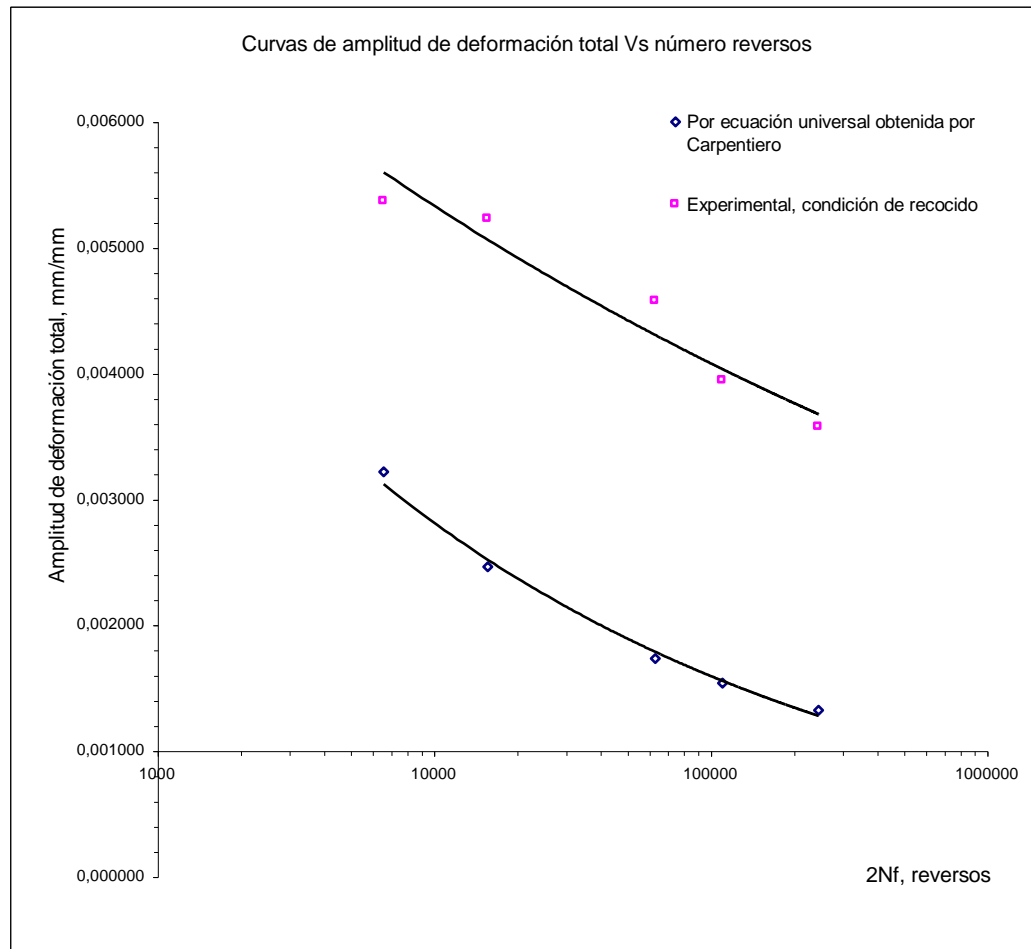


Figura 4.10.- Comparación entre las curvas experimental y teórica por ecuación universal de Amplitud de Deformación total ($\Delta\epsilon/2$) Vs. Número de Reversos ($2Nf$), para las condición de recocido.

5.- ESTUDIO FRACTOGRAFICO.

Para realizar los estudios fractográficos, se utilizaron las probetas mas representativas del nivel de esfuerzo mas alto y mas bajo para la condición del material con recubrimiento. Estas fueron examinadas en el microscopio electrónico de barrido antes mencionado. Se estudio en las muestras la sección de ruptura.

Las muestras se limpiaron en el equipo de lavado por ultrasonido ubicado en la E.I.M.C.M., de la forma siguiente: se mantienen la muestra dentro de un vaso vicker totalmente sumergida en acetona industrial durante un periodo de 45 minutos aproximadamente, con la finalidad de realizar una limpieza superficial para eliminar restos de grasa u óxidos depositados en la superficie de fractura, para una mejor observación en el microscopio del inicio de la grieta, propagación y fractura de las muestras.

En la figura 5.1 se muestra una vista general de la zona de fractura de una probeta ensayada al nivel más alto de esfuerzo (355 MPa) y en el recuadro indicativo “A”, se señala la zona de inicio de la grieta.

Asimismo, se pueden observar las zonas de propagación de la grieta y la zona de fractura o falla. Nótese que la zona de fractura es mayor que la zona de propagación de la grieta, esto es motivado al alto esfuerzo aplicado.

En la figura 5.2 se muestra la zona “A” ampliada correspondiente al inicio de la grieta. En ella se puede observar la forma como se desplaza a través del sustrato y se indica la dirección de propagación.

La figura 5.3 es una ampliación de la zona” B”. Se puede apreciar que en esta zona de inicio de falla hubo un desprendimiento total del recubrimiento.

En la figura 5.4 se puede ver la zona de fractura del sustrato y en las figuras 5.5 y 5.6 se muestran las zonas “C” y “D” correspondientes a acercamientos de la misma. Allí se puede apreciar el desprendimiento parcial del recubrimiento.

En la figura 5.7 se muestra una vista general de la zona de fractura de una probeta ensayada en el nivel de esfuerzo mas bajo (189 MPa). Se puede observar en ella como el recubrimiento se desprende del sustrato debido a la acción de una grieta secundaria localizada en la intercara recubrimiento - sustrato.

En las figuras 5.8 se muestra un acercamiento de la zona de inicio de grieta, en la cual hay un total desprendimiento del recubrimiento y se indica la dirección de propagación de la misma.

En la figura 5.9, se muestra una ampliación de la zona “E” donde se observa un aplastamiento de la superficie motivado al rozamiento entre las caras de la probeta durante el ensayo.

En las figuras 5.10 y 5.11 se muestran acercamientos de las intercaras, recubrimiento – sustrato, donde se observa el agrietamiento producido en el revestimiento.

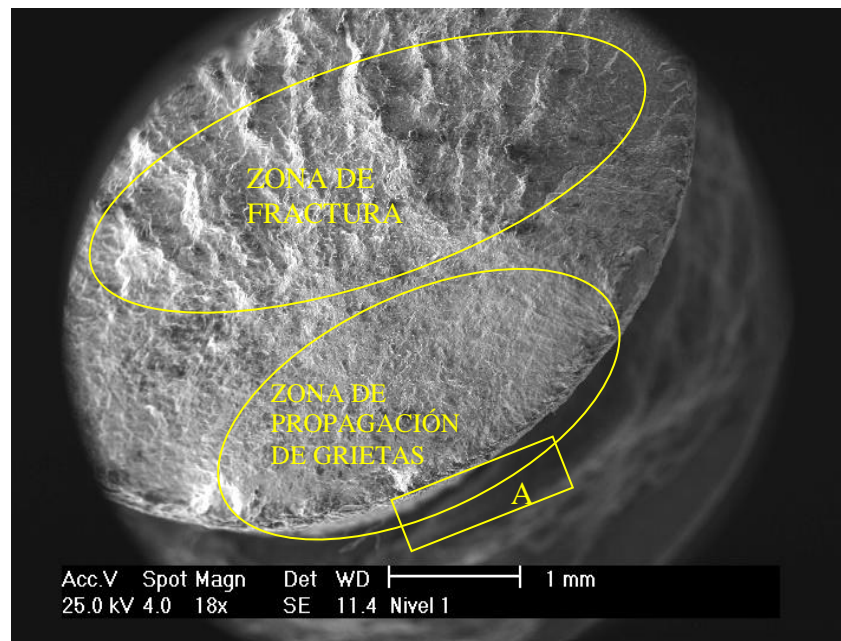


Figura 5.1.- Vista general zona de fractura, nivel de esfuerzo más alto

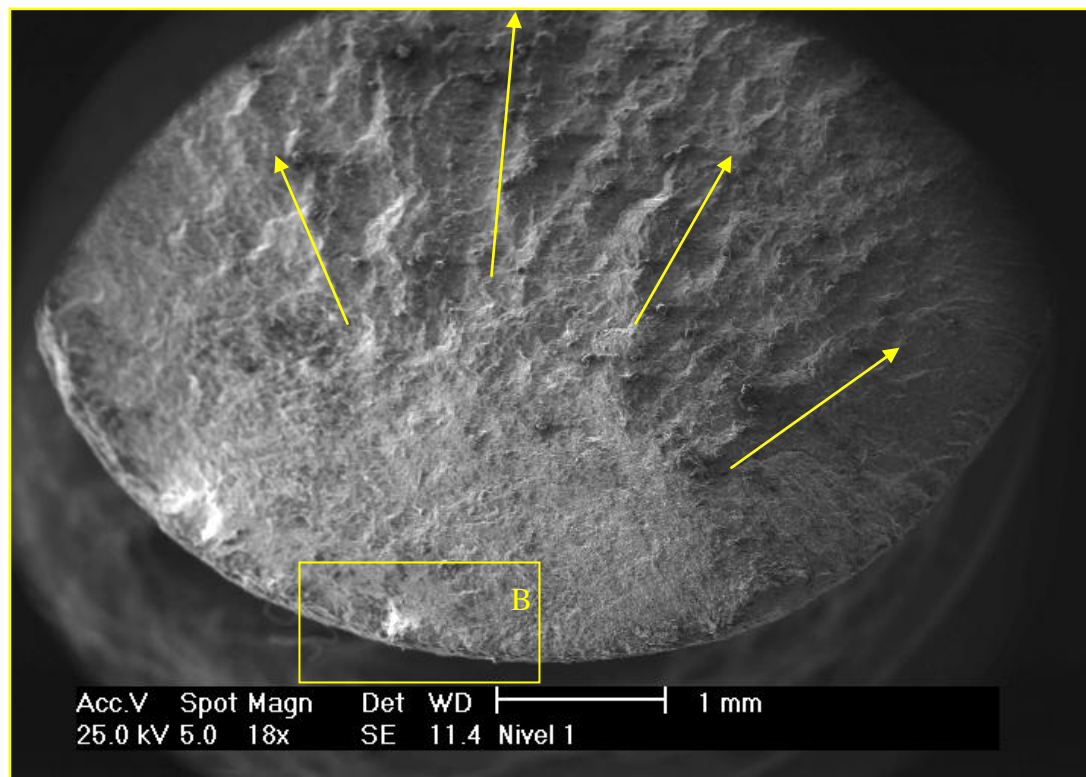


Figura 5.2 Ampliación de zona "A", de inicio de grieta.

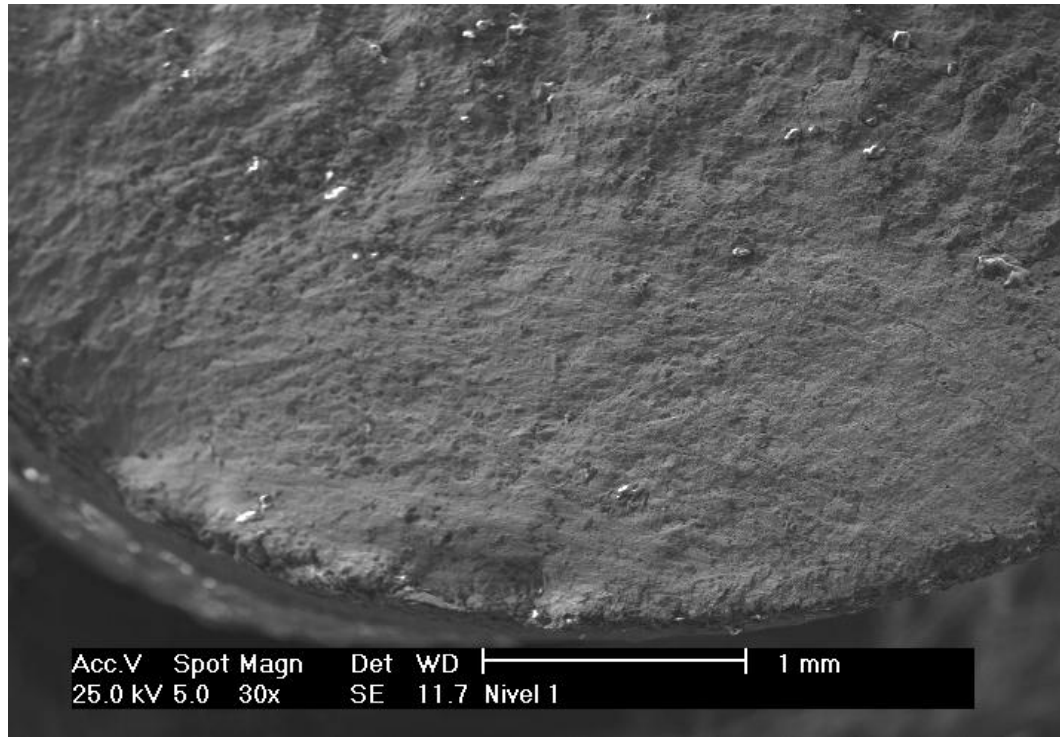


Figura 5.3 Ampliación zona "B", inicio de falla.

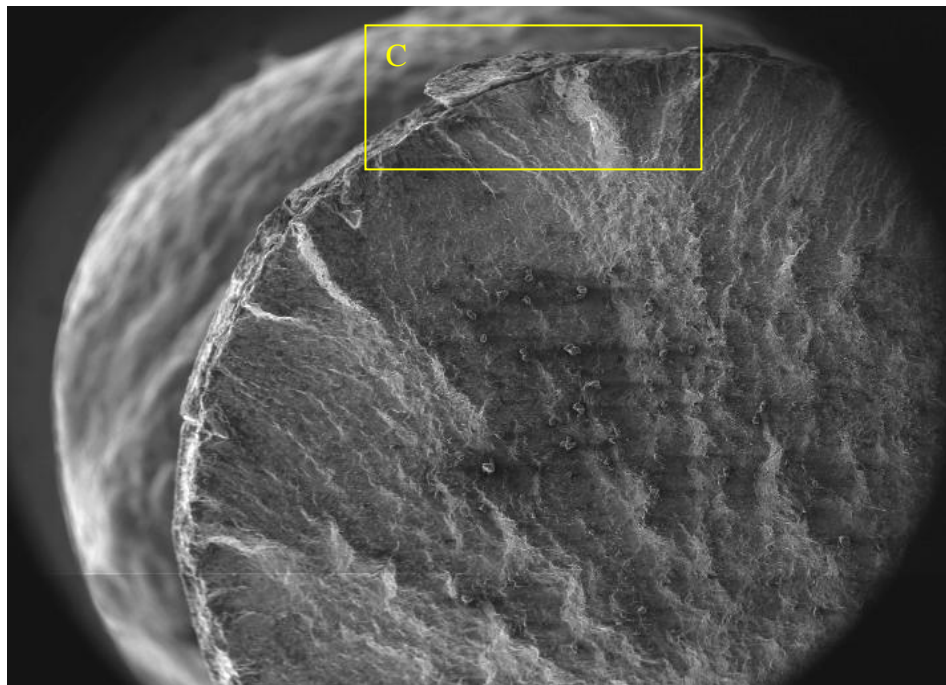


Figura 5.4.- Zona de fractura.

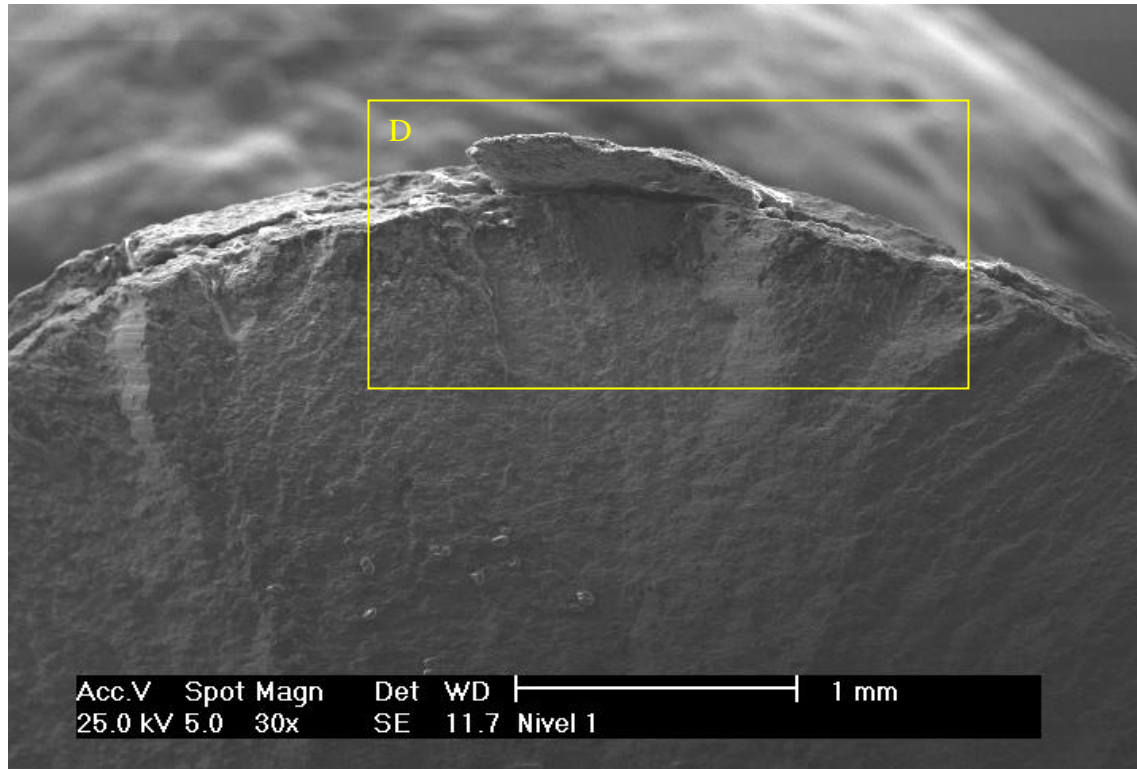


Figura 5.5.- Acercamiento a zona "C"

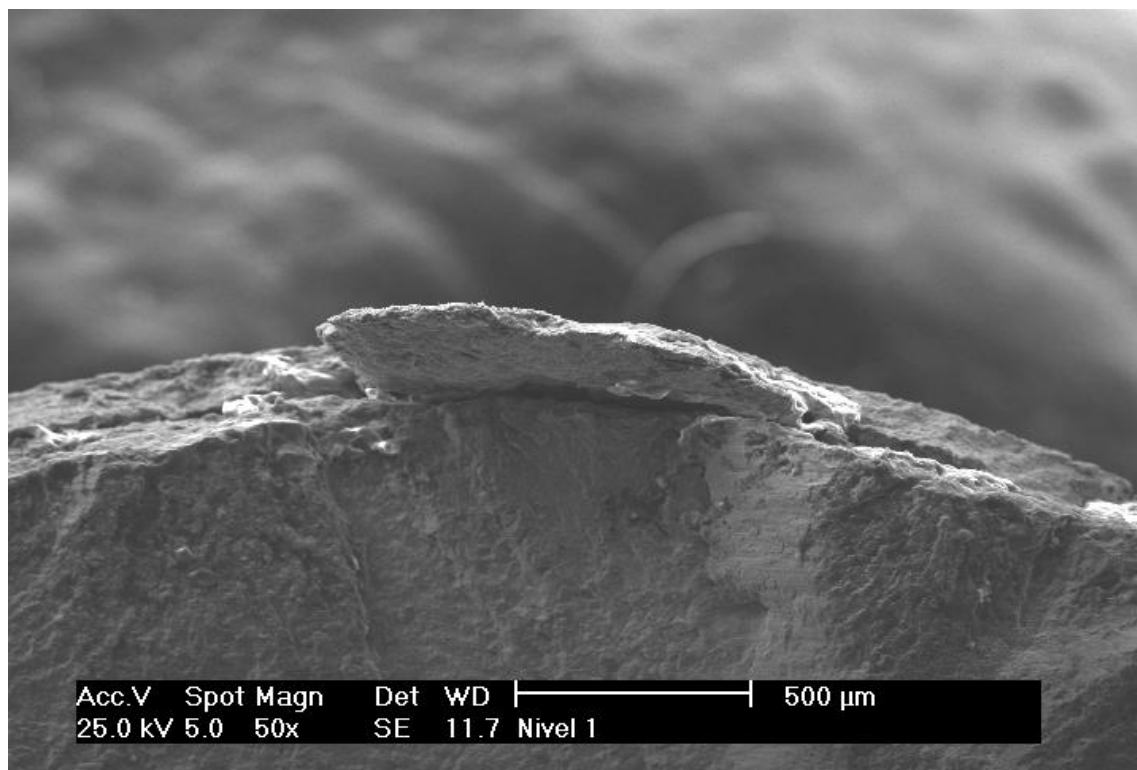


Figura 5.6.- Acercamiento zona "D"

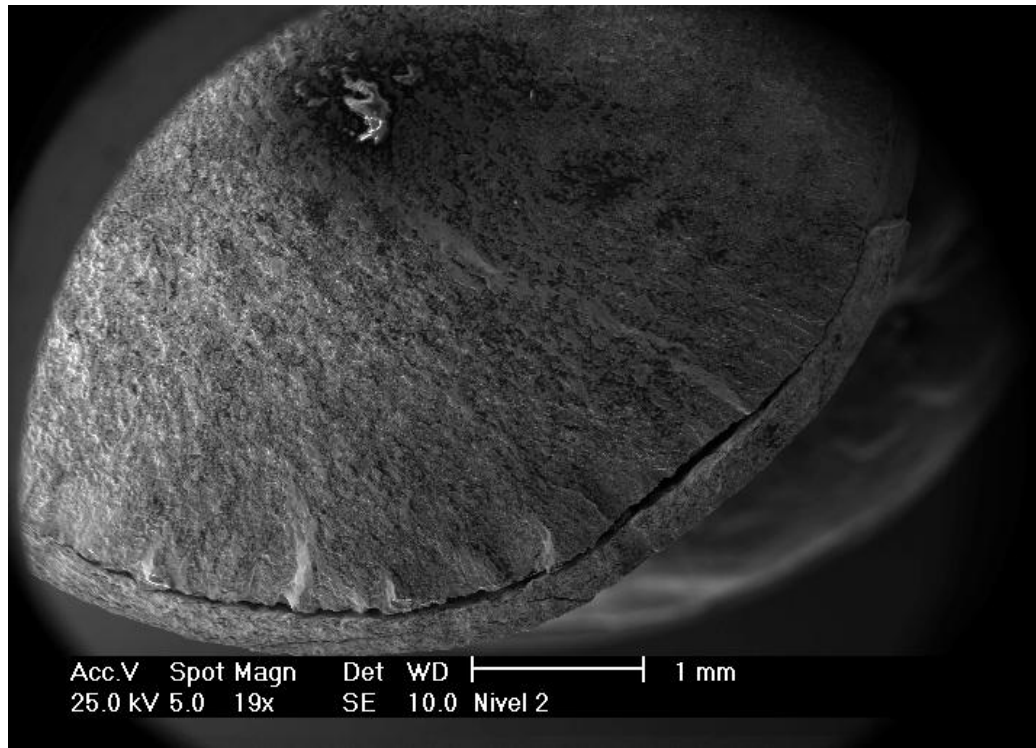


Figura 5.7.- Vista general, nivel de esfuerzo mas bajo

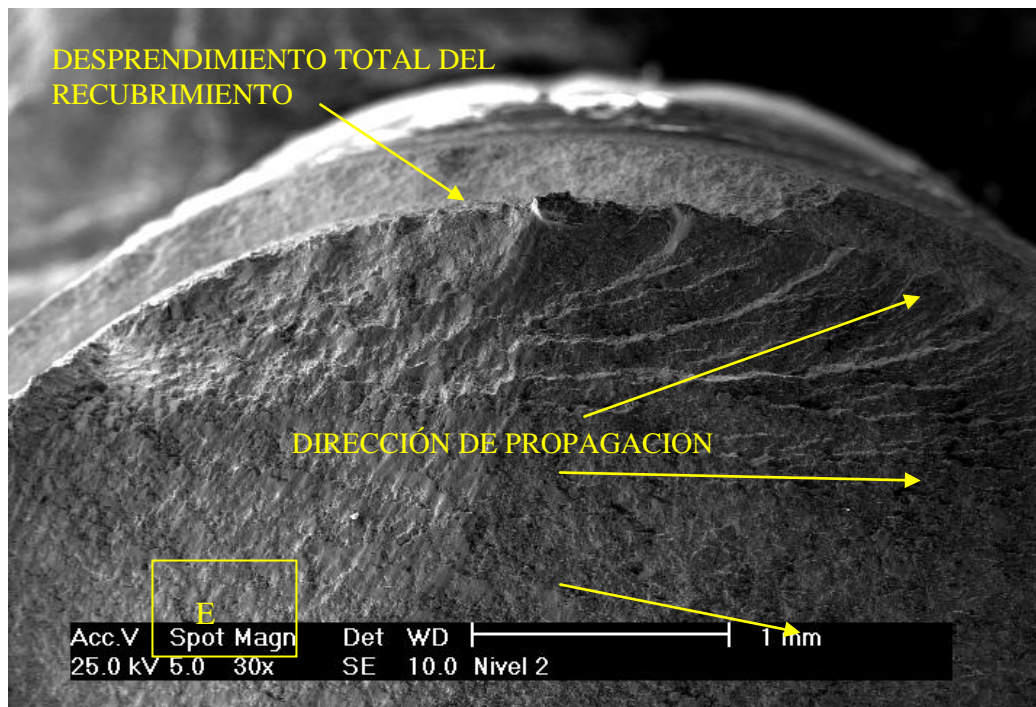


Figura 5.8.- Zona de inicio de grieta

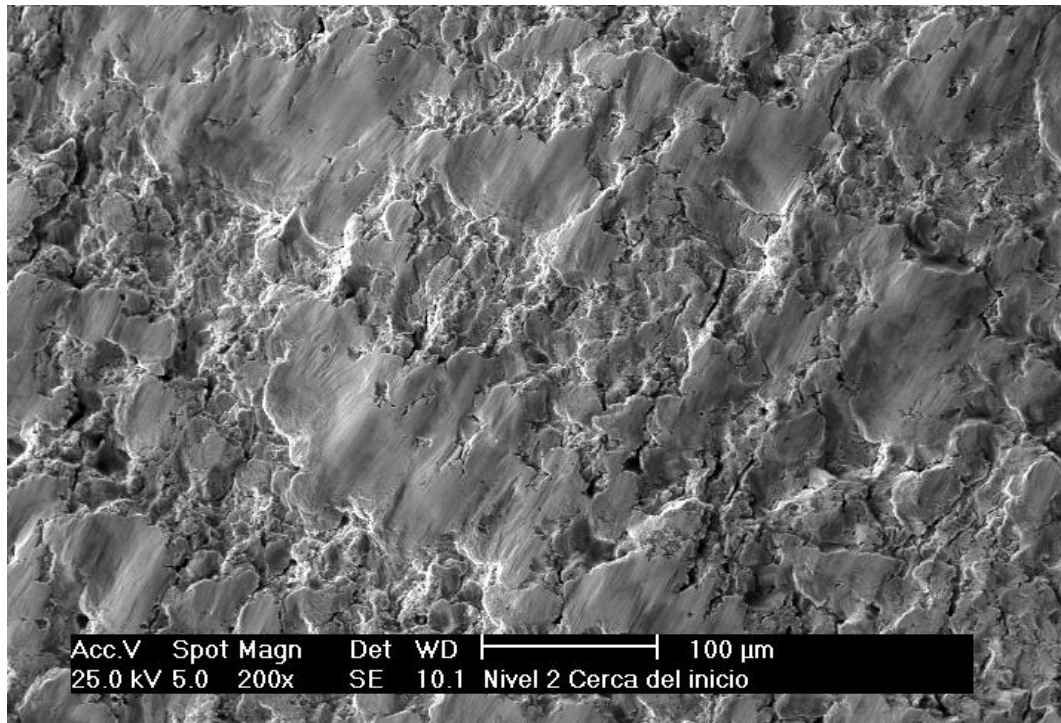


Figura 5.9.- Ampliación zona E

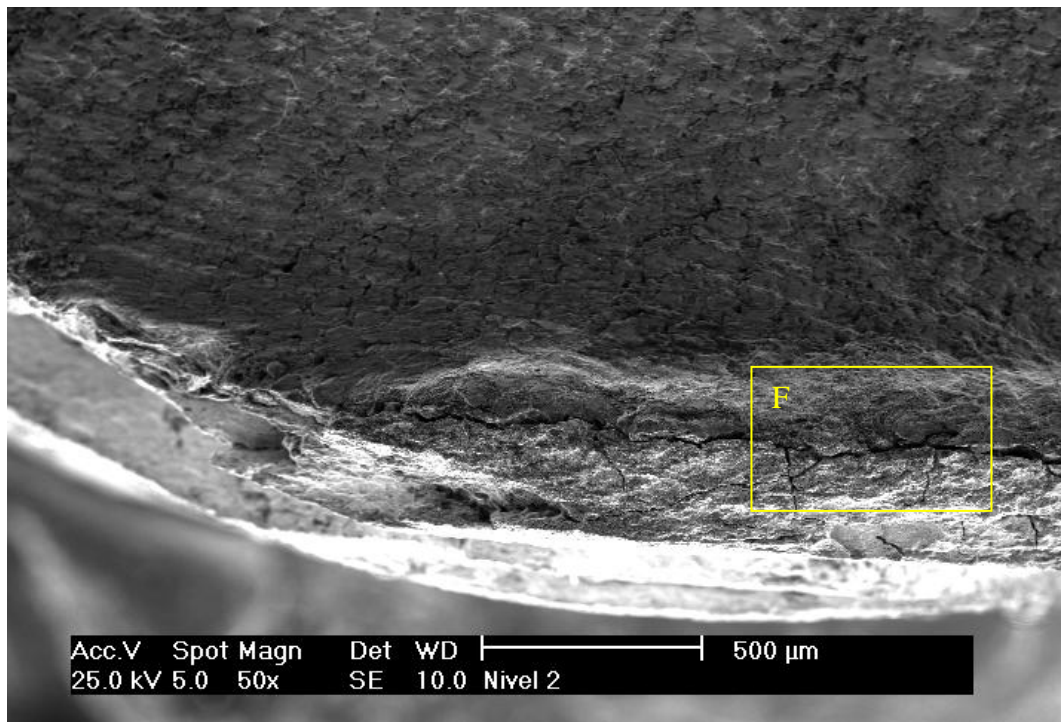


Figura 5.10.- Acercamiento interfase recubrimiento - sustrato

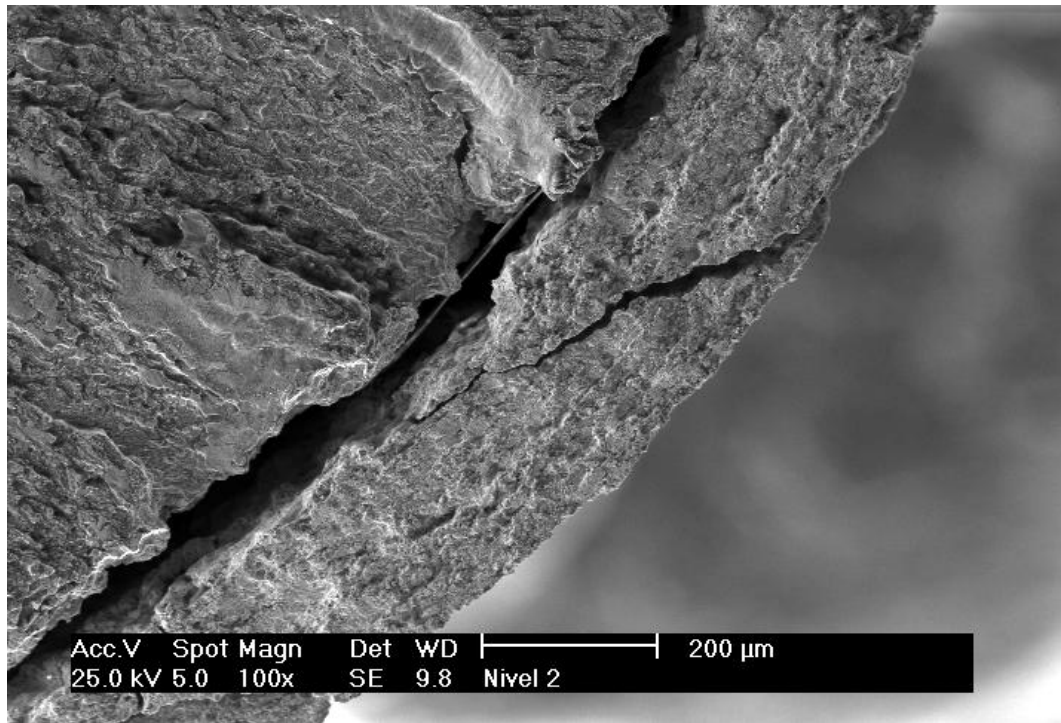


Figura 5.11.- Ampliación zona F.

CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos en este trabajo se puede concluir que:

- *El recubrimiento utilizado produjo una pequeña variación en las propiedades monotónicas del material, que se observa al comparar los resultados para las condiciones estudiadas, pero la misma no es significativa en el comportamiento mecánico del material. Por lo que podemos concluir que el recubrimiento, en este caso, no afecta las propiedades estáticas del material.*
- *De las curvas de histéresis estabilizadas resultantes de los ensayos de fatiga se pudo observar que la deformación plástica es menor en el material recubierto que en el material en condición de recocido, para un mismo nivel de esfuerzo, concluyéndose que el recubrimiento empleado influye de forma favorable en la resistencia a la fatiga del material.*
- *De la comparación de las curvas de Amplitud de deformación total vs. Número de reversos generadas por la ecuación obtenida en este trabajo y por la ecuación universal de los aceros nacionales encontrada por Carpentiero[12], podemos observar que ambas son similares en cuanto a forma, pero sin embargo presenta diferencia. Esta diferencia posiblemente sea motivada a que los ensayos se hicieron en equipos de diferentes tecnologías.*