

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**“DETERMINACIÓN DE LA ECUACIÓN
ELASTOPLÁSTICA DE UN ACERO TRATADO
TÉRMICAMENTE Y CON RECUBRIMIENTO
SUPERFICIAL”**

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

Por los bachilleres:

Mariano L., Fernando P.

Monsalve M., José F.

**Para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

Caracas, 2004

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**“DETERMINACIÓN DE LA ECUACIÓN
ELASTOPLÁSTICA DE UN ACERO TRATADO
TÉRMICAMENTE Y CON RECUBRIMIENTO
SUPERFICIAL”**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Fausto Carpentiero.

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

Por los bachilleres:

Mariano I., Fernando P.

Monsalve M., José F.

Para optar al título de

Ingeniero Mecánico

Caracas, 2004

Caracas, 18 de Noviembre de 2004

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de la Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Bachilleres Fernando P., Mariano L. y José F. Monsalve M., titulado:

**“DETERMINACIÓN DE LA ECUACIÓN ELASTOPLÁSTICA DE UN
ACERO TRATADO TÉRMICAMENTE Y CON RECUBRIMIENTO
SUPERFICIAL”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por los autores.

Prof. (Pedro Cadenas)
Jurado

Prof. (María Prato)
Jurado

Prof. (Fausto Carpentiero)
Tutor

A Dios y mi ángel por iluminarme el camino y permitir llevar a cavo todo esto.

A mis Padres: Francisco Monsalve y Leonarda Matos por la fe que tuvieron en mí y por mi existencia y superación.

A mis Abuelos: Pío, Mima, Ramona y Loreto por los principios y valores morales infundados.

A mis Hermanas: Francys, Erika y Katherine, por su comprensión y paciencia.

A mis sobrinos: Eudys, Kleyver y Leomary por darme una luz de alegría.

A todos mis Tíos por su apoyo y cariño dispensado.

A todos mis primos en general por la convivencia y fortaleza.

A mi adorada Edy por su amor.

A TODOS GRACIAS

JOSE FRANCISCO MONSALVE

A Dios todopoderoso, a mi Virgencita amada y a todos mis Ángeles guardianes por guiarme y darme la fortaleza que día a día necesito.

A mi Madre, por todo el apoyo, fe y amor que me das todos los días, por tu perseverancia, por creer en mí.

A mi Padre, por su apoyo, por enseñarme que trabajando es que se consiguen las cosas en esta vida.

A Wilmer La Grave (El Papi), por tus consejos y apoyo brindado en los momentos en que más los necesitaba, gracias por siempre estar a mi lado.

A mis Hermanos: Sonia, Génesis, Maribel, Marisol, Freddy, por su interés y ayuda, en lograr que yo sea un profesional digno.

A mi hija Tatiana, por ser la luz de mi vida.

A mi Amada Esposa Patry, por todo el amor, confianza, apoyo, comprensión, fortaleza que siempre he recibido de ti.

A mis Amigos: Mónica, Tarly, Musu, Fernandito, Eddie, Mirti, Marta, Marbel, Nilian, Malí, por su preocupación e interés en mí.

A mi Tía Arelis por todas sus bendiciones y amor brindado.

A mi Hermanita Génesis por llenarme de alegría y amor cuando más lo he necesitado, Te Adoro.

Gracias a todas las personas que han puesto su granito de arena en mi vida.

Gracias a todos.

FERNANDO PAULO MARIANO LAZARDE

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Central de Venezuela por habernos abierto sus puertas para formarnos profesionalmente.

A nuestro Tutor: Ingeniero Fausto Carpentiero, por todo el apoyo y colaboración dispensada en el desarrollo y término de ésta investigación.

A los ingenieros Liliana Rosal, Engels Ochoa, Luis M. Fernández, Gelin R. Mejias. C, a los profesores (as) Pedro Cadenas, María Prato y Tibisay Zambrano, al Dr. Elí Saúl Puchi, quienes en su momento nos otorgaron una valiosa ayuda, para la realización de esta obra.

Al personal de las Bibliotecas: Central, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y la Escuela de Ingeniería Mecánica.

A la Lic. Gregoria Vargas por su apoyo brindado.

Al personal Técnico del taller, personal de mantenimiento y secretariado de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la U.C.V por la asistencia que nos brindaron, y al señor Edgar Durán de la compañía FERRUM, así como a todas aquellas personas que en forma desinteresada contribuyeron en el desarrollo de esta investigación.

A nuestros amigos y amigas: Ing. Javier Machado, Ing. Arturo Finco, Ing. Jorge Quijada, Ing. Lisberht Sosa, Ing. Rafael López, Lic. Jully Ojeda, Lic. Henry Rodríguez, Luis Aliendre, Vicente Alejo, Evangelista Machado, Rocío Pinillo y Maria Elena Correa por su compañerismo y valiosa amistad.

A las señores Aída piñerua de Raigada y sus hijas: Georgina, Margarita y Aída, Sara de Maya e Ing. Ricardo Maya y sus hijos: Patricia y Ricardo.

RESUMEN

Fernando P., Mariano L, /y/ Monsalve M., José F.

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

Tutor Académico: Ing. Fausto Carpentiero

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

Escuela de Ingeniería Mecánica. 2004. 116 Páginas.

Palabras Clave: Elastoplástica, Termorociado.

El estudio realizado se basó en determinar un modelo matemático para predecir el comportamiento a fatiga del acero, en el planteado caso 1020, sometido a tratamiento térmico y a un recubrimiento superficial y una vez efectuado este primer paso 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, con la finalidad de determinar las propiedades monotónicas, ensayándose tres probetas por cada condición y luego se efectuaron ensayos con cincuenta probetas en fatiga a tracción – compresión, con la condición deformación controlada para obtener la ecuación elastoplástica a partir de las curvas de histéresis estabilizadas. Finalmente en esta obra se comparó la curva experimental obtenida con la curva teórica generada por la ecuación universal de los aceros al carbono nacionales, con la ecuación propuesta en esta investigación. Realizándose posteriormente la comparación para ambas condiciones. Entre las conclusiones determinadas, se pueden destacar que los autores, observaron que el recubrimiento utilizado influye poco en forma favorable en el comportamiento estático del acero 1020, además es necesario realizar más estudio en fatiga.

CONTENIDO

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
RESUMEN	iii
CONTENIDO	iv
INDICE DE FIGURAS	vii
INDICE DE TABLAS	ix
NOMENCLATURA	xi
INTRODUCCIÓN	1
I. CAPITULO	2
1. GENERALIDADES	2
1.1. ASPECTOS ESTRUCTURALES DE LA FATIGA	3
1.2. FALLA POR FATIGA	4
1.3. CONDICIONES PARA LA FALLA POR FATIGA	5
1.4. CONCEPTOS BÁSICOS DE FATIGA	6
1.5. CARACTERÍSTICAS DE LAS CARGAS DINAMICAS	7
1.6. DIAGRAMAS ESFUERZO – NUMERO DE CICLOS	9
1.7. RELACION ENTRE EL ESFUERZO Y LA DEFORMACIÓN DURANTE LA FATIGA	10
1.8. COMPORTAMIENTO DE LOS METALES CUANDO ESTAN SOMETIDOS A LA ACCION DE ESFUERZOS DE FATIGA SIMÉTRICOS	12
1.9. CICLOS DE CARGA DE FATIGA	14
1.10. FATIGA A DEFORMACIÓN CÍCLICA CONTROLADA	15
1.11. RELACIONES DE FATIGA (DEFORMACIÓN – VIDA)	16
1.12. ANTECEDENTES	19
II. CAPITULO	21
2. TERMOROCIADO	21

2.1. RECUBRIMIENTO POR TERMOROCIADO	21
2.2. APLICACIONES DEL TERMOROCIADO	22
2.3. ROCIADO A PRESION (PROCESO PREVIO AL TERMOROCIADO)	24
2.4. TIPOS DE PROCESOS	25
2.5. RECUBRIMIENTO POR COMBUSTIÓN - LLAMA	26
2.6. RECUBRIMIENTO POR ARCO ELECTRICO	26
2.7. HVOF(HIGH VELOCITY OXY FUEL)	27
2.8. PISTOLA DE DETONACIÓN (D-GUN)	29
2.9. PLASMA	30
2.10. CARACTERÍSTICAS DE LOS RECUBRIMIENTOS	30
III. CAPITULO.	32
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	32
3.1. MATERIALES	33
3.1.1. MATERIAL BASE	33
3.1.2. PROBETAS UTILIZADAS	33
3.2. TRATAMIENTO SUPERFICIAL	34
3.3. RECUBRIMIENTO	35
3.4. PROCESO DE TERMOROCIADO	35
3.5. PARÁMETROS DEL PROCESO DE TERMOROCIADO	35
3.6. EQUIPOS	36
3.7. ENSAYO DE TRACCIÓN	37
3.8. ENSAYO DE FATIGA	39
IV. CAPITULO.	41
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	41
4.1. ENSAYO DE TRACCIÓN	41
4.2. ENSAYO DE FATIGA	47
V. CAPITULO	59
5. ESTUDIO FRACTOGRAFICO	59

VI. CAPITULO	65
6.1. CONCLUSIONES	65
6.2. RECOMENDACIONES	67
7. BIBLIOGRAFÍA	68
8. ANEXOS	70
8.1 CURVA DE HISTERESIS	71
8.1.1. NIVEL DE ESFUERZO 194 MPa. Material con Recubrimiento	71
8.1.2. NIVEL DE ESFUERZO 199 MPa. Material con Recubrimiento	74
8.1.3. NIVEL DE ESFUERZO 204 MPa. Material con Recubrimiento	77
8.1.4. NIVEL DE ESFUERZO 207 MPa. Material con Recubrimiento	80
8.1.5. NIVEL DE ESFUERZO 209 MPa. Material con Recubrimiento	83
8.2.1. NIVEL DE ESFUERZO 194 MPa. Material Base	86
8.2.2. NIVEL DE ESFUERZO 199 MPa. Material Base	89
8.2.3. NIVEL DE ESFUERZO 204 MPa. Material Base	92
8.2.4. NIVEL DE ESFUERZO 207 MPa. Material Base	95
8.2.5. NIVEL DE ESFUERZO 209 MPa. Material Base	98
8.2. CERTIFICADO DE CALIDAD	101

INDICE DE FIGURAS

Figura	Pag. #
1.1 Ciclos de cargas dinámicas	9
1.2 Representación esquemática de un diagrama esfuerzo Vs. número de Ciclos	10
1.3 Representación esquemática de un ciclo de histéresis	11
1.4 Representación esquemática de una curva cíclica	13
1.5 Representación esquemática de un ciclo de histéresis, que involucra solo deformación elástica	16
1.6 Representación esquemática de un ciclo de histéresis, que involucra flujo elastoplástico	16
1.7 Curva amplitud de deformación total Vs. número de reversos	19
2.1 Dibujo esquemático del proceso de termorociado	21
2.2 Dibujo esquemático de una pistola de rociado por arco eléctrico alimentada por alambres	26
2.3 Ilustración esquemática de una pistola HVOF	27
3.1 Organigrama de la metodología experimental	30
3.2 Probetas de ensayo	32
3.3 Máquina de tracción Instron 8502	35
3.4 Método gráfico para la determinación de los valores de amplitud de deformación total, amplitud de deformación elástica y amplitud de deformación plástica	38
4.1 Curvas Esfuerzo real Vs. Deformación real, acero 1020 recocido (Tracción)	39
4.2 Curvas Esfuerzo real Vs. Deformación real, acero 1020 recocido y termorociado con Wc-Co (Tracción)	40
4.3 Curvas $\log(\sigma)$ Vs. $\log(\epsilon)$, correspondiente a la zona plástica, condición de recocido (Tracción prob. 01)	42

Figura	Descripción	Pag. #
4.4	Curvas $\log(\sigma)$ Vs. $\text{Log}(\epsilon)$, correspondiente a la zona plástica, condición de recocido (Tracción prob. 02)	42
4.5	Curvas $\log(\sigma)$ Vs. $\text{Log}(\epsilon)$, correspondiente a la zona plástica, condición de recocido (Tracción prob. 03)	43
4.6	Curvas $\log(\sigma)$ Vs. $\text{Log}(\epsilon)$, correspondiente a la zona plástica, condición de termorociado (Tracción prob. 04)	43
4.7	Curvas $\log(\sigma)$ Vs. $\text{Log}(\epsilon)$, correspondiente a la zona plástica, condición de termorociado (Tracción prob. 05)	44
4.8	Curvas $\log(\sigma)$ Vs. $\text{Log}(\epsilon)$, correspondiente a la zona plástica, condición de termorociado (Tracción prob. 06)	44
4.9	Comparación entre las curvas Amplitud de deformación total Vs. Número de reversos para recocido y termorociado	54
4.10	Comparación entre las curvas Amplitud de deformación total Vs. Número de reversos para recocido, experimental y teórica	55
5.1	Vista general zona de fractura de nivel de esfuerzo mas bajo	54
5.2	Ampliación de zona “A” de inicio de grieta	54
5.3	Ampliación de zona “B” de inicio de grieta	55
5.4	Zona de fractura	55
5.5	Acercamiento zona “C”	56
5.6	Acercamiento zona “D”	56
5.7	Vista general zona de fractura de nivel de esfuerzo mas bajo	57
5.8	Zona de inicio de grieta	57
5.9	Ampliación de zona “E”	58
5.10	Acercamiento interfases recubrimiento – sustrato	58
5.11	Ampliación zona “F”	59

INDICE DE TABLAS

Tabla		Pag. #
1	Composición en porcentaje en peso del acero 1020	31
2	Resultado de los ensayos de tracción del acero 1020 (recocido)	39
3	Resultado de los ensayos de tracción del acero 1020 (recocido y termorociado)	40
4	Resultados obtenidos en el ensayo de fatiga para el nivel de esfuerzo 194 MPa	46
5	Resultados obtenidos en el ensayo de fatiga para el nivel de esfuerzo 199 MPa	47
6	Resultados obtenidos en el ensayo de fatiga para el nivel de esfuerzo 204 MPa	47
7	Resultados obtenidos en el ensayo de fatiga para el nivel de esfuerzo 207 MPa	48
8	Resultados obtenidos en el ensayo de fatiga para el nivel de esfuerzo 209 MPa	48
9	Resultados obtenidos mediante ecuaciones y de forma experimental para el coeficiente exponencial del esfuerzo de fatiga	52
10	Resultados obtenidos mediante ecuaciones y de forma experimental para el coeficiente exponencial ductilidad de fatiga y el coeficiente exponencial de endurecimiento cíclico	52

NOMENCLATURA

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

σ_f	Esfuerzo real de fatiga.
P_f	Carga o fuerza para la fractura.
A_f	Área instantánea de fractura.
S_y	Limite de Fluencia.
S_u	Ultimo esfuerzo nominal.

INTRODUCCIÓN

Este estudio se realizó con la finalidad de determinar una ecuación elastoplástica para predecir el comportamiento de un acero, en este caso el AISI 1020, al estar sometido a la acción de cargas dinámicas de tracción – compresión, de las cuales la mitad se considera en condiciones de recocido y el resto con un recubrimiento de Wc-Co (Carburo de Tungsteno), realizado por medio de la técnica de termorociado HVOF, para analizar y comparar ambas condiciones.

Para determinar dichas ecuaciones, fue necesario emplear la cantidad de cincuenta y seis probetas de las cuales se utilizaron un total de seis para efectuar los ensayos de tracción en las condiciones recocidas y recocidas con recubrimiento, a fin de obtener las propiedades mecánicas estáticas del material. Sometiéndose la restante al ensayo de fatiga, para cinco niveles de esfuerzos, aplicando el método de deformación controlada.

Los resultados de ambos ensayos fueron promediados y analizados, para finalmente obtener las ecuaciones requeridas y hacer las comparaciones pertinentes. Adicional para complementar esta investigación se efectuó un estudio Fractográfico de la muestra más representativa, ensayada en los niveles de esfuerzo mínimos y máximos.

Adicionalmente se propone una ecuación para el uso universal para los aceros.

I.- CAPITULO.

1.- GENERALIDADES.

Desde 1850, se tiene conocimiento que un metal sujeto a tensiones repetidas o fluctuantes fallará a una tensión mucho más baja que la necesaria para producir la fractura en una sola aplicación de la carga. Dándose a conocer como fatiga, aquella que se presentaba debido a la “cristalización” del metal, pero este concepto no pudo ser probado, debido a que el metal es cristalino desde el momento en que se solidifica en la mezcla de los metales que lo originan. El desarrollo creciente de nuevos equipos ha permitido un mayor interés por la fatiga, en los cuales el material está sometido a cargas repetidas y diversas vibraciones, como ocurre en los automóviles, aviones, bombas y turbinas, entre otras. La falla ocurrida en estas condiciones de carga dinámica, se denominó *falla de fatiga*. En la actualidad se ha afirmado que, al menos, el 90% de todas las roturas de los equipos en servicio se producen por esta.

Para que se produzca esta fractura por fatiga, es necesario que se presenten tres condiciones básicas, las cuales son: una tensión máxima de tracción de valor elevado, una variación o fluctuación suficientemente intensa de la tensión aplicada y un número suficiente de ciclos. Presentándose adicionalmente un gran número de otras variables, que deben ser considerados como por ejemplo tensiones, la corrosión, la temperatura, la sobrecarga, la estructura metalúrgica, las tensiones residuales y las tensiones combinadas, todas estas variables que modifican las condiciones necesarias para la fatiga.

Diversos 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, producidas por cargas y descargas sucesivas. Las primeras investigaciones sobre este fenómeno al parecer, fueron reportadas por el ingeniero alemán W. A. Albert [1], quien en 1.829 realizó algunos ensayos con cargas repetidas en materiales usados en la industria ferroviaria.

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.

Dando a conocer *La Curva de Wöhler* [1]. El método fundamental para presentar los datos de fatiga es la curva de Wöhler, también llamada simplemente curva de fatiga o curva S-N (stress- Number of cycles). La cual representa la duración de la probeta, expresada en número de ciclos “N” hasta la rotura, para la máxima tensión aplicada. Este número de ciclos que dura una probeta antes de fallar aumenta al disminuir la tensión. Al número de ciclos para que se inicie una grieta, a los que transcurre durante la propagación de la misma para la rotura total, no suele hacerse distinción alguna, aunque puede apreciarse que el número de ciclos que necesita la propagación de la grieta depende de las dimensiones de la probeta. Los ensayos de fatiga a tensión baja suelen realizarse a 10^7 ciclos y algunas veces, para materiales no ferrosos, se prolongan a 5×10^8 . En algunos materiales técnicos, como los aceros y el titanio, la curva de Wöhler presenta un tramo horizontal a una tensión límite determinada. Por debajo de esta tensión límite, que es la denominada *Límite de fatiga*.

1.1.- ASPECTOS ESTRUCTURALES DE LA FATIGA.

Estos aspectos se refieren a los cambios estructurales fundamentales que se producen en un metal cuando se le somete a tensiones cíclicas. La fatiga tiene ciertas cosas en común con el flujo plástico y la fractura bajo Deformación Estática o Monodireccional. Se ha comprobado que un metal se deforma en condiciones cíclicas por deslizamiento sobre los mismos planos atómicos y en las mismas direcciones cristalográficas que cuando la deformación es Monodireccional. Mientras el deslizamiento de la deformación Monodireccional suele extenderse a través de todos los granos, en la fatiga hay algunos granos que muestran línea de deslizamiento y otros en los que no puede comprobarse el deslizamiento. Las líneas de deslizamiento suelen formarse durante los primeros millares de ciclos de carga. Los ciclos sucesivos producen

bandas de deslizamiento adicionales, pero el número de bandas no es directamente proporcional al número de ciclos de tensión.

Se han observado bandas de deslizamiento a tensiones inferiores al límite de fatiga en los materiales férreos, por lo que la aparición de deslizamiento durante la fatiga no puede considerarse por sí misma como indicio de que se formará una grieta. Tales bandas de deslizamiento son observadas solamente después de transcurrido aproximadamente el 5 % de la duración de la probeta. Estas bandas persistentes son grietas en embrión, puesto que se abren en grieta anchas cuando se aplican pequeñas deformaciones de tracción. Las grietas de fatiga, una vez formadas, tienden a propagarse a lo largo de los planos de deslizamiento, aunque más tarde pueden tomar direcciones normales a la tensión de tracción máxima aplicada. La propagación de las grietas de fatiga suelen ser transgranular.

Un aspecto estructural importante, es la formación en la superficie de entrantes y salientes que se llaman: *extrusiones e intrusiones de bandas de deslizamiento*. Examen metalográfico muy cuidadoso de secciones oblicuas a través de la superficie, el cual mostró que las grietas de fatiga se inician en las *extrusiones* y en las *intrusiones*.

Al considerar las variaciones estructurales producidas por la fatiga, es conveniente distinguir entre ensayos realizados a tensión o amplitud de tensión grande, en los que las probetas rompen a menos de aproximadamente 10^5 ciclos y ensayos a tensiones pequeñas, en los que las probetas duran más de 10^6 ciclos.

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 la misma 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, tales 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 es forzada, disminuye de tamaño, y el esfuerzo aumenta en magnitud hasta que finalmente, el área restante, falla de repente.

El proceso de falla por fatiga involucra tres fases, las cuales son:

- 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 que deben existir para que se produzca la rotura por fatiga, se destacan las siguientes:

- 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

Diversas teorías propuestas sobre la fatiga, han sido calificadas más bien en forma cualitativas y han sido aceptadas simplemente por el hecho de que el análisis conduce a relaciones entre la tensión – $\log(N)$ análogas a las curvas de Wöhler [1]. Sin embargo, no es un criterio de aceptación satisfactorio, porque son muchos los mecanismos supuestos que pueden conducir a la predicción de la forma general de las curvas 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. Estas 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 de la siguiente manera:

$$\Delta\sigma = \sigma_{\text{máx.}} - \sigma_{\text{min.}} \quad \dots\dots\dots 1.1$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\text{máx.}} - \sigma_{\text{min.}}}{2} \quad \dots\dots\dots 1.2$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\text{máx.}} + \sigma_{\text{min.}}}{2} \quad \dots\dots\dots 1.3$$

$$R = \frac{\sigma_{\text{min.}}}{\sigma_{\text{máx.}}} \quad \dots\dots\dots 1.4$$

Donde:

$\Delta\sigma$: Rango de esfuerzo.

σ_a : Esfuerzo real aplicado.

$\sigma_{\text{máx.}}$: Esfuerzo real máximo.

$\sigma_{\text{min.}}$: 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.

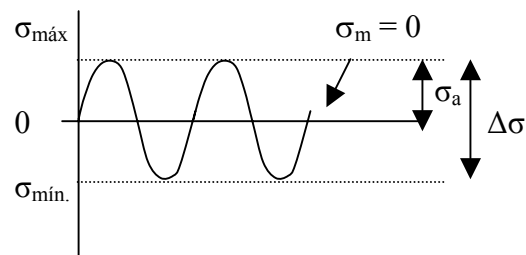
➤ En el caso donde los esfuerzos máximo ($\sigma_{\text{máx.}}$) y mínimo ($\sigma_{\text{min.}}$), oscilan alrededor de un esfuerzo medio (σ_m) cuyo valor es nulo se denomina *ciclo de carga alternativo puro* o *esfuerzos de fatiga simétricos*.

➤ Asimismo, cuando el esfuerzo mínimo ($\sigma_{\min.}$) 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*.

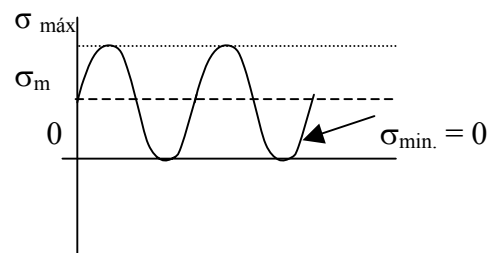
➤ Por otra parte, cuando el esfuerzo máximo ($\sigma_{\max.}$) y el esfuerzo mínimo ($\sigma_{\min.}$) oscilan alrededor de un esfuerzo medio (σ_m), diferente de cero se denomina al *ciclo de carga fluctuante* o de esfuerzos asimétricos.

A la relación entre el esfuerzo mínimo ($\sigma_{\min.}$) y el esfuerzo máximo ($\sigma_{\max.}$) se le ha denominada: *relación de esfuerzos R*.

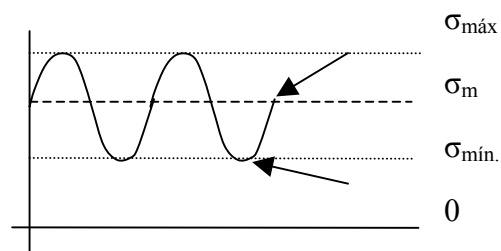
En la figura N° 1.1 se muestra en forma esquemática los ciclos de cargas dinámicas.



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



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



(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 – NÚMERO DE CICLOS.

Este diagrama se utiliza para determinar la resistencia de los materiales bajo la acción de carga de fatiga y debe emplearse un número de probetas similares del mismo material, para ser sometidas a la acción de fuerzas repetidas o variables de magnitudes especificadas, se debe contar el número de ciclos de alteraciones de carga que soporta el material hasta la falla o rotura. Este procedimiento debe repetirse para diferentes niveles de esfuerzo.

Al graficar los datos obtenidos en el ensayo ejecutado, se obtuvo 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.

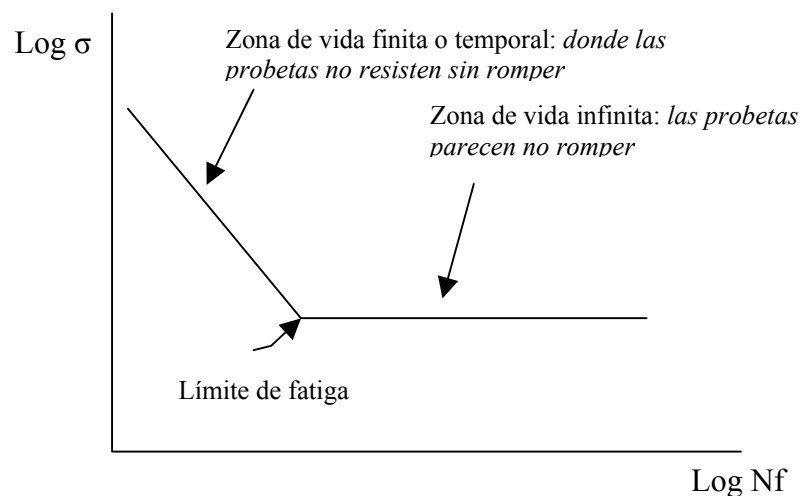


Figura 1.2 Representación esquemática de un diagrama Esfuerzo Vs. Número de ciclos.

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 féreos 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 realizarse. No tienen por lo 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.- RELACIÓN 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 puede observar en forma esquemática la representación de una curva de histéresis.

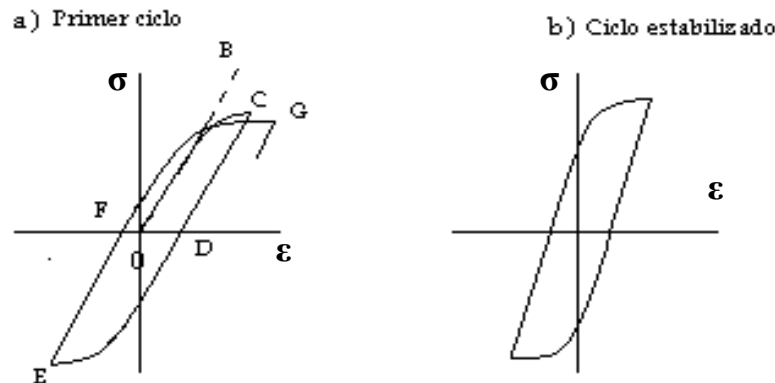


Figura 1.3 Representación esquemática de un ciclo de Histéresis.

Se puede observar que en la primera carga se obtiene una curva similar a una *curva de 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, el cual 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 ACCIÓN 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 estabilizada 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.

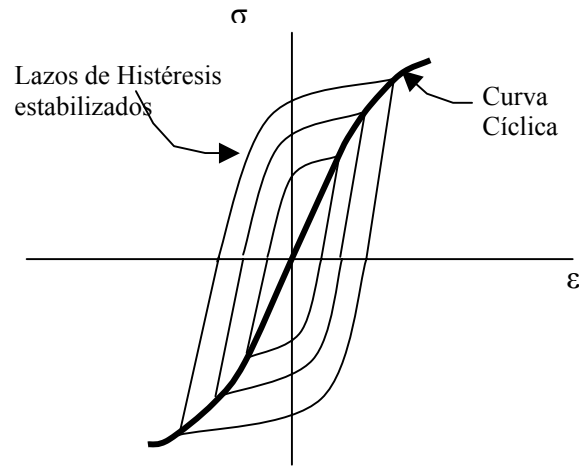


Figura 1.4. Representación esquemática de una curva cíclica.

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

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

Donde:

$\Delta\epsilon$: 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 varia 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 [23] 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.

$$\frac{\sigma_{ult}}{\sigma_{0.2\%y}} < 1.2 \quad (\text{ablandamiento}) \dots\dots\dots 1.6$$

$$\frac{\sigma_{ult}}{\sigma_{0.2\%y}} > 1.4 \quad (\text{endurecimiento}) \dots\dots\dots 1.7$$

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 [23] utiliza las propiedades monotónicas para determinar si ocurrirá endurecimiento o ablandamiento cíclico. Sin embargo, la magnitud de los cambios cíclicamente inducidos solo puede ser 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, las cuales son:

➤ 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 recientemente *fatiga a deformación cíclica controlada*.

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.

La fatiga a deformación cíclica controlada se presenta cuando se monitorean los valores de deformación y de esfuerzo durante un experimento de carga cíclica y 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.

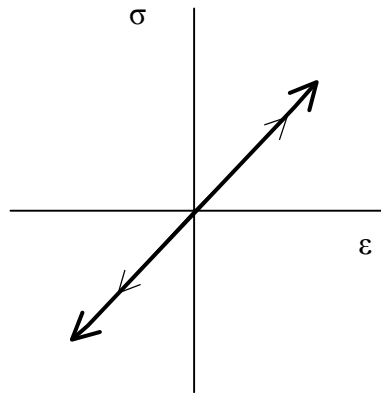


Figura 1.5 Representación esquemática de un ciclo de histéresis que involucra solo deformación elástica.

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.

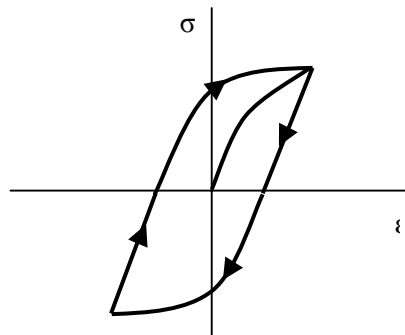


Figura 1.6 Representación de un ciclo de histéresis que involucra flujo elasto-plástico.

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:

$$\frac{\Delta \varepsilon_e}{2} = \frac{\sigma_a}{E} = \sigma_f^b (2Nf) \quad \dots\dots\dots 1.8$$

Donde:

σ_a : Amplitud del esfuerzo aplicado.

σ_f^b : Coeficiente del esfuerzo de fatiga, siendo el esfuerzo correspondiente a la ruptura en una inversión del esfuerzo.

$2Nf$: 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 $2Nf$ 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:

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

Donde:

$\Delta \varepsilon_p$: Amplitud de deformación plástica.

ε_f^c : 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 más 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.

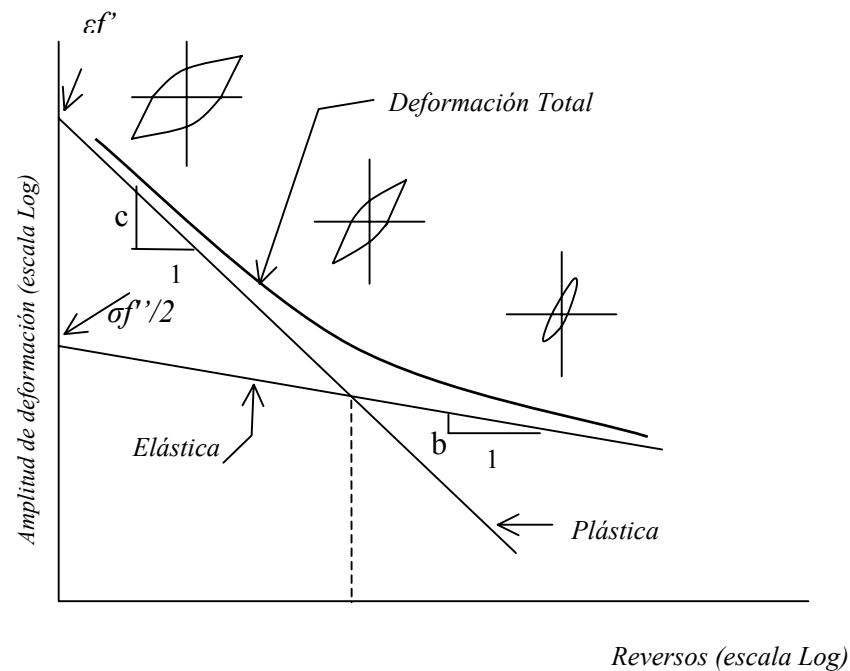


Figura 1.7 Curva amplitud de deformación total Vs. Número de reversos.

1.12.- ANTECEDENTES RELACIONADO CON LA INVESTIGACIÓN.

- **Rosal, Liliana T/ y / Zurita C, Santos R et al.** ^[14] Efectuaron una investigación para determinar la ecuación elastoplástica del acero AISI 1045 tratado térmicamente y con recubrimiento superficial, a partir de las curvas de histéresis estabilizadas obtenidas de los ensayos de fatiga, a cargas de tracción – compresión, manteniendo el intervalo de deformación total controlado. Observó que el recubrimiento utilizado influye de forma favorable en el comportamiento a fatiga del acero AISI 1045.
- **Madrid, et al.** ^[13] Efectuó un estudio, en el cual 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] Realizó una investigación en la cual determinó la ecuación universal de fatiga para aceros al carbono nacionales observando 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 estos aceros al carbono, la cual se puede escribir como:

$$\frac{\Delta \varepsilon t}{2} = \frac{1}{6} \left[7 \frac{\sigma f}{E} (2 Nf)^{-0.1275} + 8 \varepsilon f (2 Nf)^{-0.620} \right] \dots\dots\dots 1.12$$

II.- CAPITULO.

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 el proceso de aplicación del Termorociado se utiliza una pistola alimentada por un material para el recubrimiento en forma de polvo o de alambre; asimismo, se emplea 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.

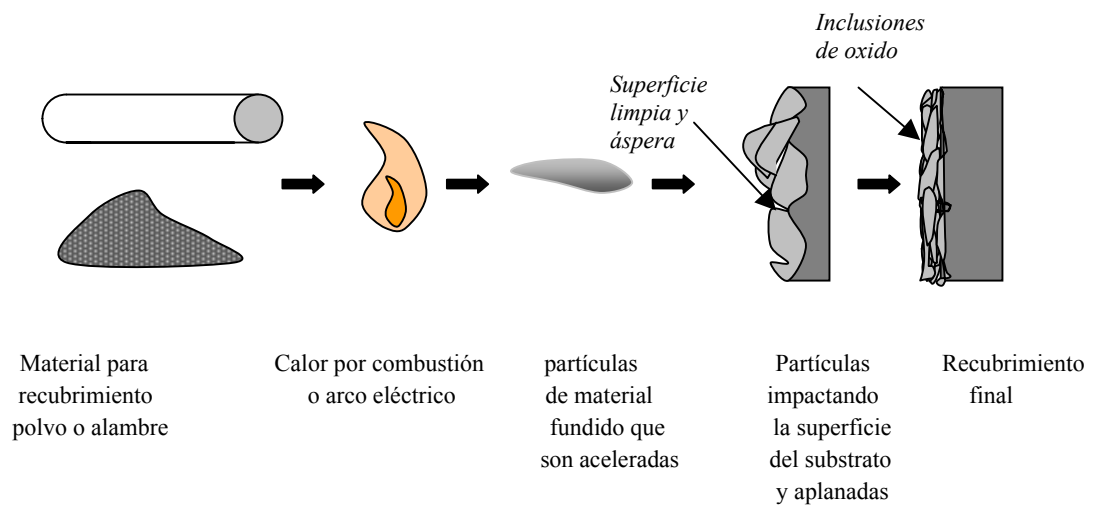


Figura 2.1 Dibujo esquemático del proceso de termorociado.

2.2.-APLICACIONES DEL TERMOROCIADO.

Los aspectos más relevantes de los revestimientos realizados por estas técnicas son, 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 (metálico, plástico y compuesto, entre otras). 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 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 inoxidable, bronce con aluminio y aleaciones con base níquel.

2.3.-ROCIADO A PRESIÓN (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 durezas menores a Rc 40 – 45, se utilizan aceros rápidos que se aplastan durante el impacto, en vez de fracturarse.

- Substratos 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 lo son:

- La presión del aire, la cual 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.

- Ángulo 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 otras supersónicas.

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 relativa baja velocidad de las partículas de aproximadamente 50 m/s y la baja temperatura lograda por debajo de 3.000 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.

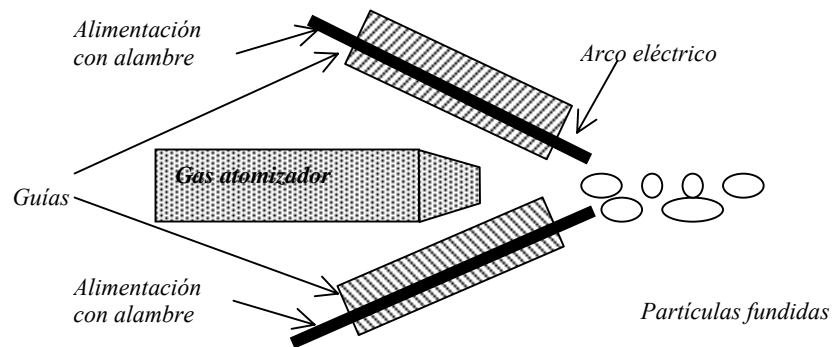


Figura 2.2 Dibujo esquemático de una pistola de rociado por arco eléctrico alimentada por alambres.

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 debido a 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, debido a 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*.

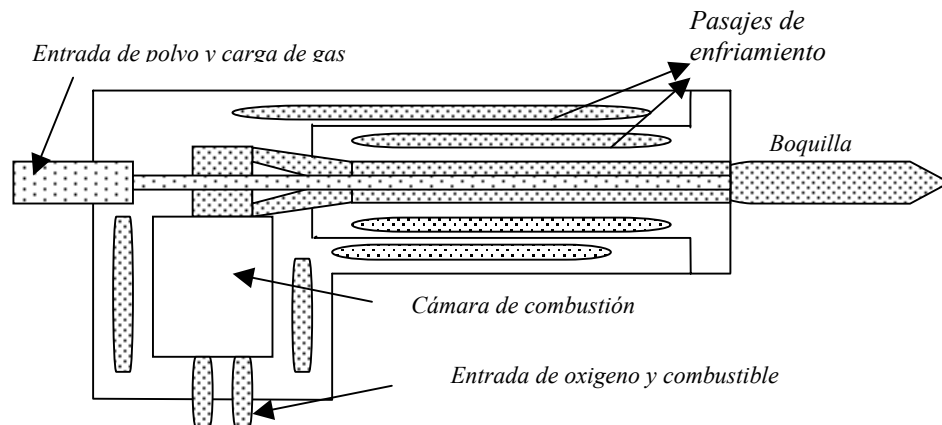


Figura 2.3 Ilustración esquemática de una pistola HVOF.

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.

El Plasma, es el más flexible de todos los procesos de Termorociado debido a 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 formar 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 sustrato.

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 sustrato 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.

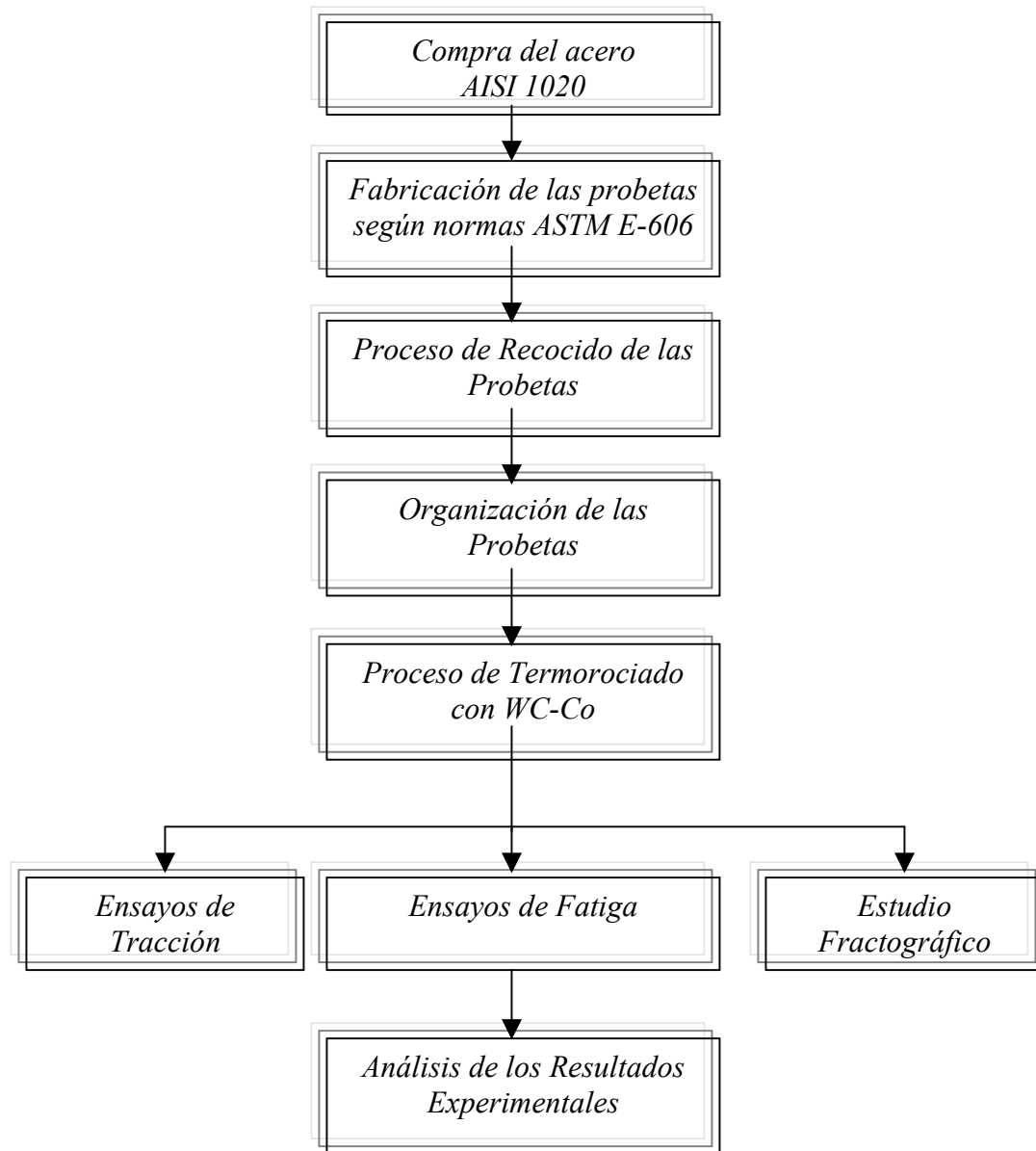
III.- CAPITULO.**3.- METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.**

Figura 3.1 Organigrama de la Metodología Experimental.

3.1.-MATERIALES.

3.1.1.- MATERIAL BASE.

El material utilizado para los ensayos fue Acero AISI-1020 suministrado por la empresa Ferrum C.A., en forma de barras cilíndricas de sección transversal circular con diámetro de $\varnothing = \frac{1}{2}$ ". Este material es un acero al carbono y se emplea en la industria metalmeccánica y en la construcción en general.

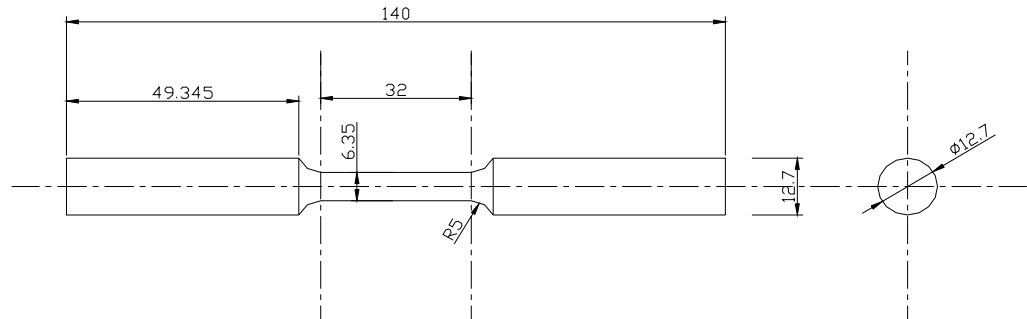
Tabla 1.- Composición en porcentaje en peso del acero AISI 1020 [8].

Composición	C	Mn	Smax	Pmax
Min.	0.17	0.25	0.05	0.04
Máx.	0.24	0.60	0.05	0.04

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 1000 °C, durante una hora y enfriado en el horno.

3.1.2.- 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 según normas ASTM A – 370 y E – 606

La fabricación de las mismas se llevó a cabo en los talleres del Politécnico Luis Caballero Mejias y la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la U.C.V. Se utilizó el torno de control numérico del politécnico en el maquinado de las dimensiones requeridas y con el torno manual de la U.C.V. se procedió a realizar el pulido final 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.

3.2.- 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.- 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 resistencia al desgaste por fricción, abrasión y erosión, generando revestimientos de alta dureza.

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 compañía. Previamente antes 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 sustrato 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 (1447,91 Kpa).
- Flujo de agua de enfriamiento: 30 lt/min.
- Presión de agua: 130 Psi (896,32 Kpa).
- Combustible: Queroseno.
- Presión de combustible: 150 Psi (1034,22 Kpa).
- Flujo de oxígeno: 1800 SCFH.
- Presión de la cámara de combustión: 110 Psi (758,43 Kpa).

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 Somua,” marca 600N, distancia entre centros 1600 mm, volteo 650 mm, potencia 15/21 C.V., mando numérico General Electric 550 LM.; IUP. LUIS CABALLERO MEJIAS.
- Maquina 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 Maquina 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 duro y luego fueron pasados a 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 $\Delta\epsilon$ 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.

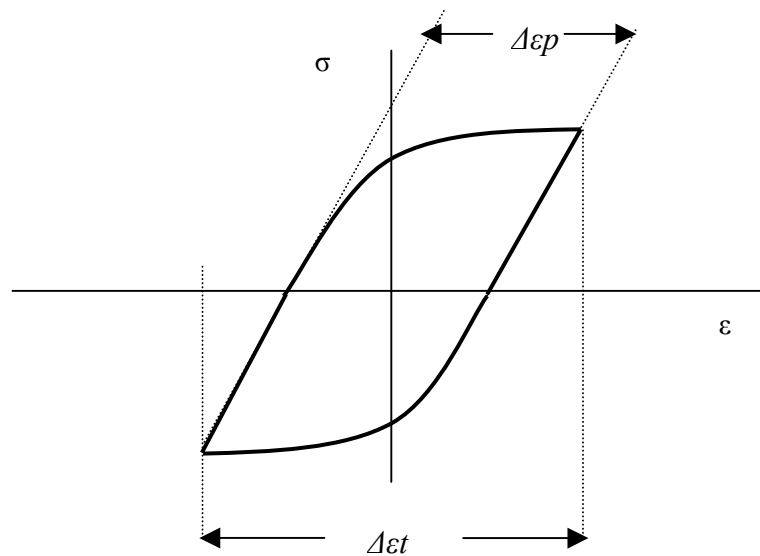


Figura 3.4 Método gráfico para la determinación de los valores de amplitud de deformación total $\Delta\epsilon_t$, amplitud de deformación elástica $\Delta\epsilon_e$ y amplitud de deformación plástica $\Delta\epsilon_p = \Delta\epsilon_t - \Delta\epsilon_e$.

IV.- CAPITULO.

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 AISI 1020 (Recocido).

Probetas #	Su (Mpa)	σ_u (Mpa)	ϵ_u (mm/mm)	σ_y (Mpa)	m	σ_o (Mpa)	σ_f (Mpa)	ϵ_f (mm/mm)
1	347,83	422,56	0,19463	203,68	0,2271	578,27	533,82	0,27688
2	347,40	413,67	0,17460	212,50	0,2355	590,32	542,51	0,25340
3	375,92	452,10	0,18452	214,40	0,2324	619,26	700,46	0,31252
Promedio	357,05	429,44	0,18459	210,19	0,2317	595,95	592,26	0,28113

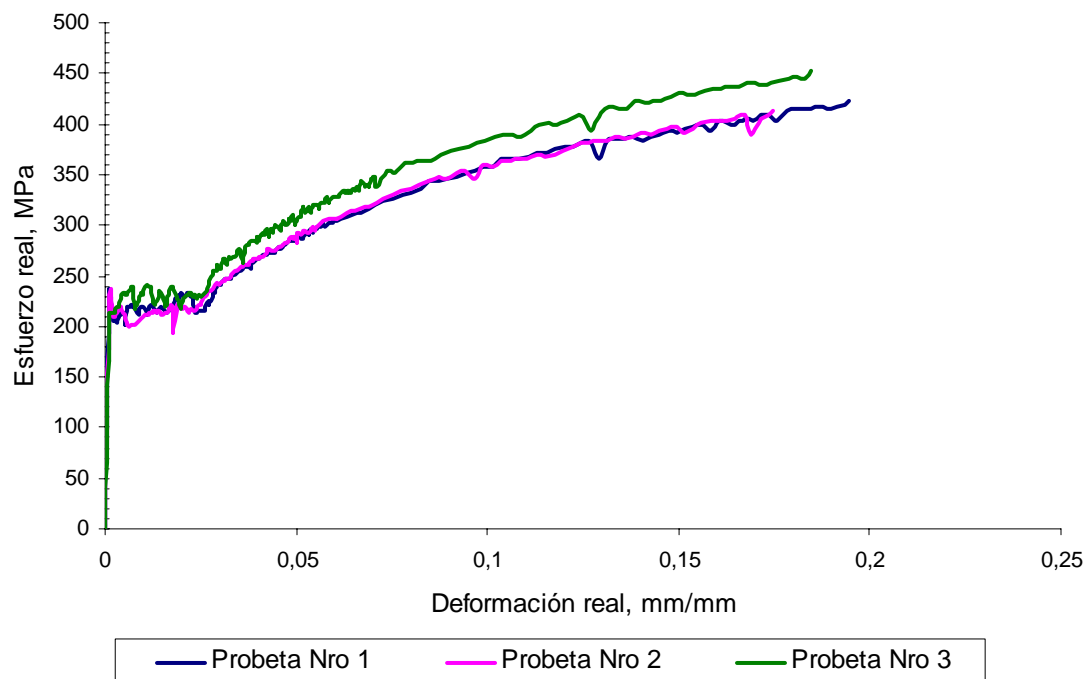


Figura 4.1 Curva Esfuerzo real (σ) Vs. Deformación real (ϵ), acero 1020 (recocido).

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 1020 (Recocido y Termorociado con Wc-Co).

Probetas #	Su (Mpa)	σ_u (Mpa)	ϵ_u (mm/mm)	σ_y (Mpa)	m	σ_o (Mpa)	σ_f (Mpa)	ϵ_f (mm/mm)
4	305,87	376,98	0,20903	301,00	0,2614	570,44	522,06	0,28587
5	327,42	396,21	0,19073	248,76	0,1937	512,97	792,20	0,31432
6	299,78	353,27	0,16417	273,62	0,2064	482,11	658,90	0,30047
Promedio	311,02	375,49	0,18798	274,46	0,2205	521,84	657,72	0,30022

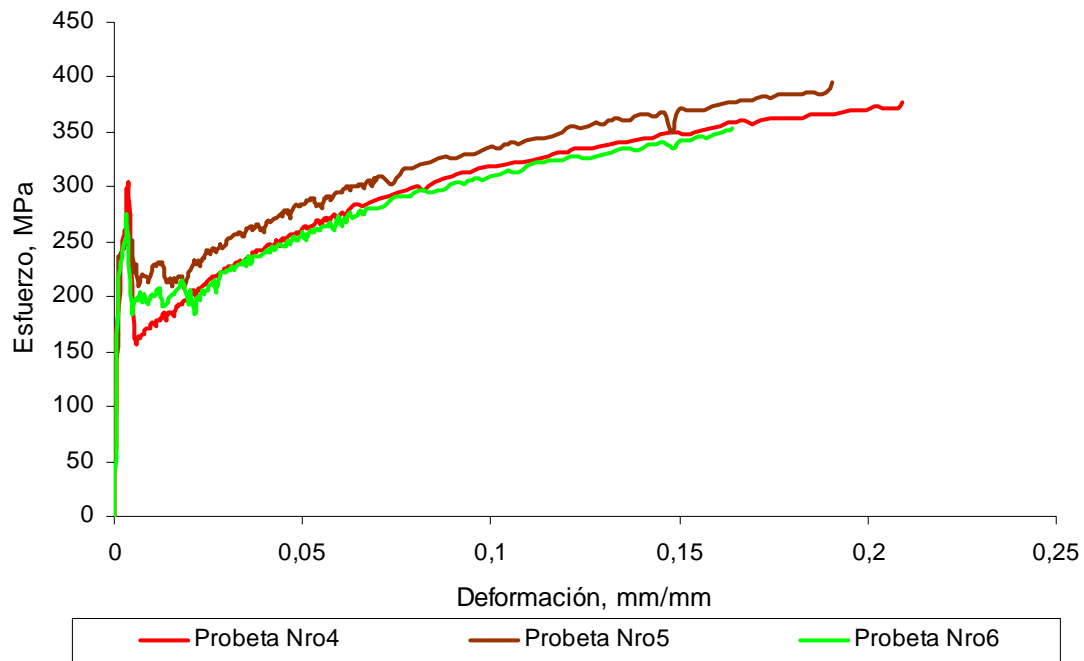


Figura 4.2 Curva Esfuerzo real (σ) Vs. Deformación real (ϵ), acero 1020 (Recocido y Termorociado).

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, la resistencia a la tracción (S_u) disminuye 13 %, el esfuerzo real a carga máxima (σ_u) disminuye 13 % y el esfuerzo de fluencia (σ_y) Aumenta 23 %. Asimismo, la deformación correspondiente al esfuerzo a carga máxima aumenta 2 %, la deformación correspondiente al esfuerzo de fractura aumenta 6 % y el esfuerzo real de fractura aumenta en 10 %.

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 y 4.5 se muestran las curvas $\text{Log}(\sigma)$ Vs. $\text{Log}(\epsilon)$, 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 y 4.8 para la condición de termorociado.

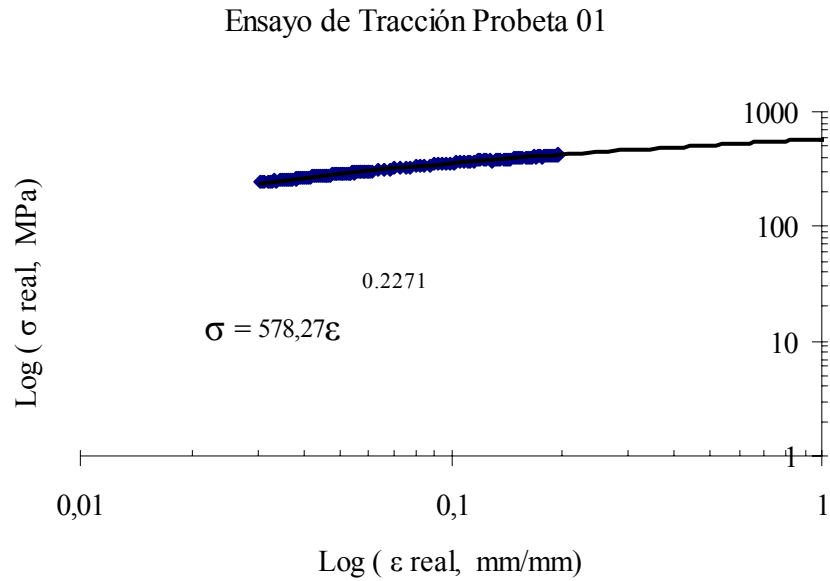


Figura 4.3 Curva Log (σ) Vs. Log (ε) correspondiente a la zona plástica, condición recocido.

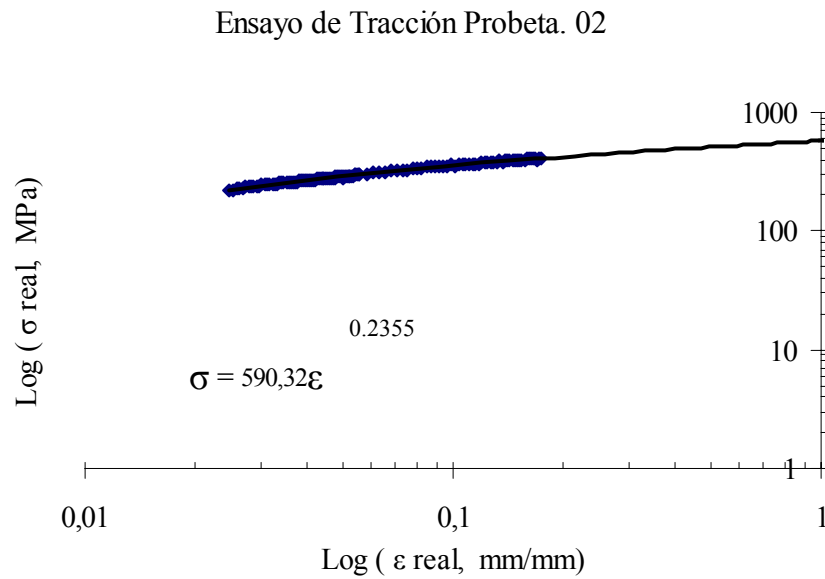


Figura 4.4 Curva Log (σ) Vs. Log (ε) correspondiente a la zona plástica, condición recocido.

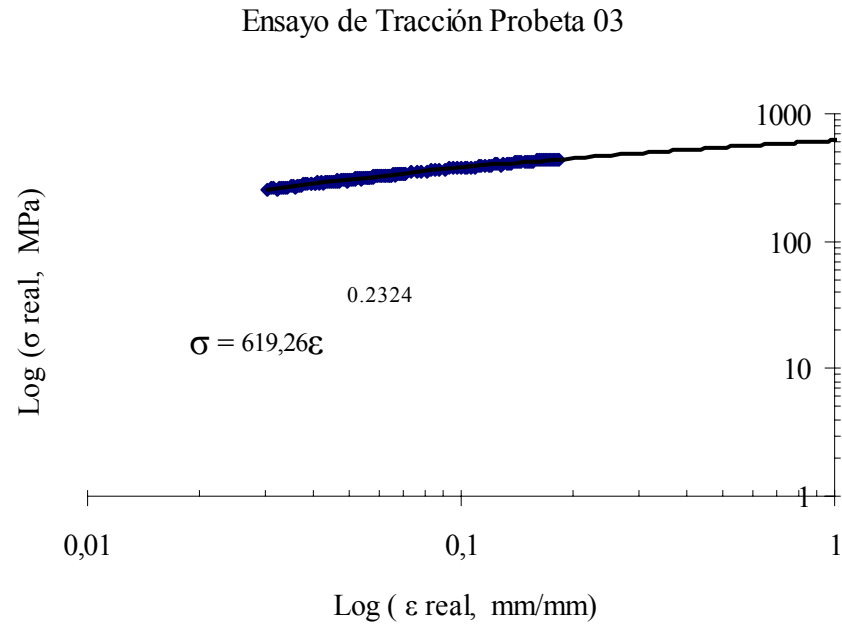


Figura 4.5 Curva Log (σ) Vs. Log (ε) correspondiente a la zona plástica, condición recocido.

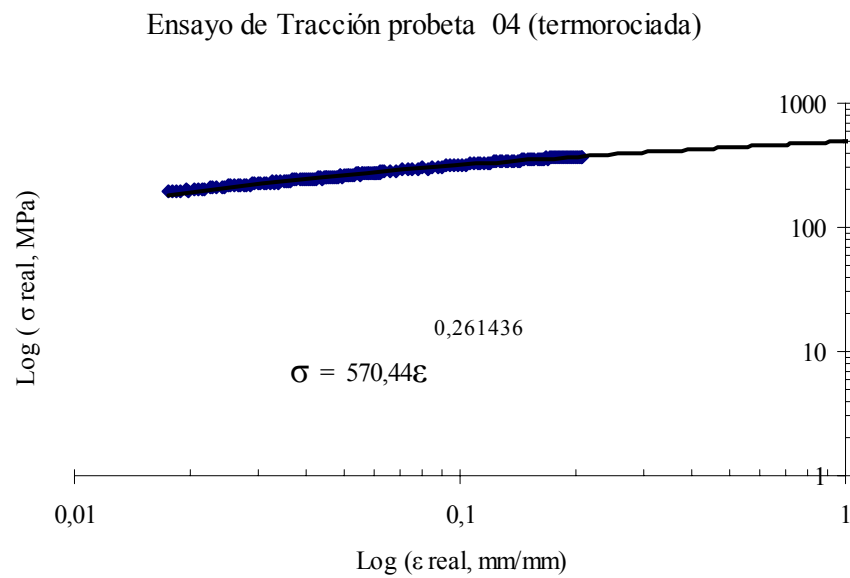


Figura 4.6 Curva Log (σ) Vs. Log (ε) correspondiente a la zona plástica, condición termorociado.

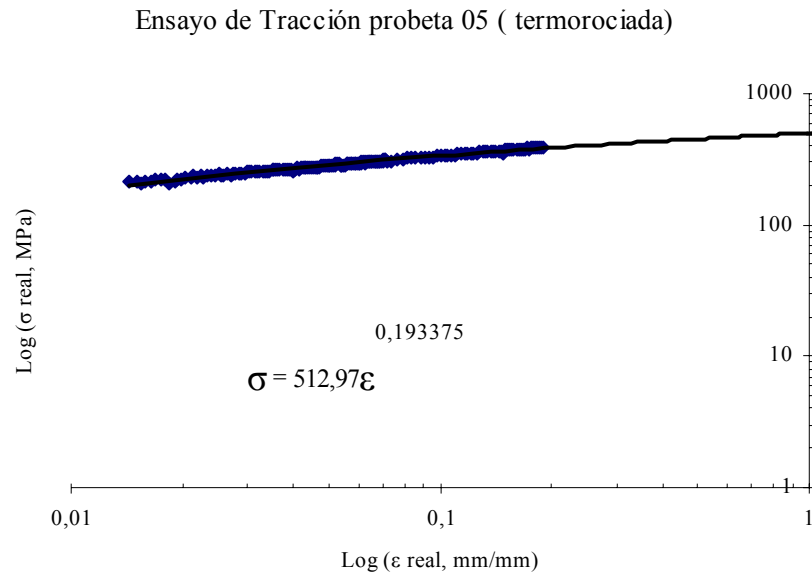


Figura 4.7 Curva Log (σ) Vs. Log (ϵ) correspondiente a la zona plástica, condición termorociado.

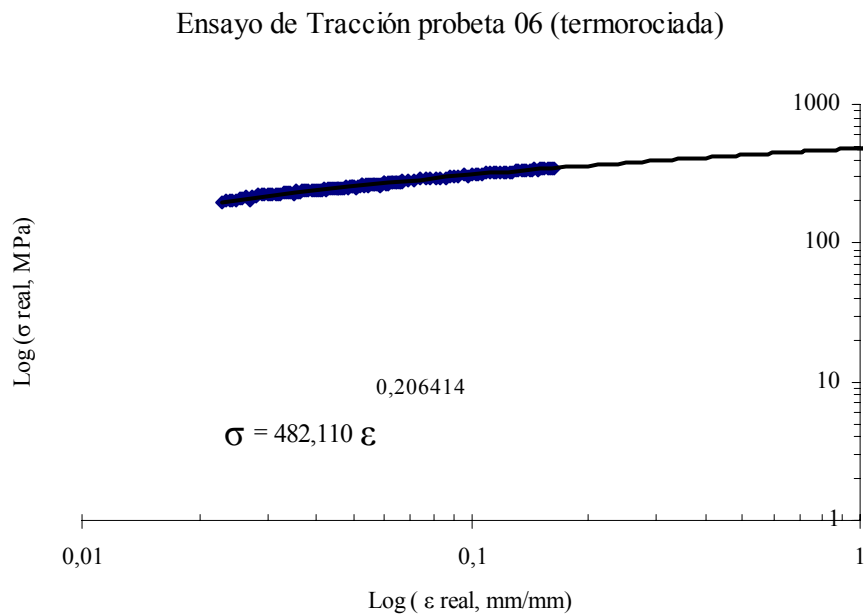


Figura 4.8 Curva Log (σ) Vs. Log (ϵ) correspondiente a la zona plástica, condición termorociado.

Las ecuaciones de endurecimiento plástico determinadas fueron las siguientes:

Condición del acero	Ecuación
Recocido	$\sigma = 595.95 (\epsilon)^{0.2317}$ MPa1.13
Termorociado con Wc-Co	$\sigma = 521.84 (\epsilon)^{0.2204}$ MPa.....1.14

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 de los 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 194 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	0,00574	0,00097	194,35	1888493	6	0,000782	0,00096	194,95	1022179
2	0,00732	0,00099	197,34	1203277	7	0,002989	0,00096	194,88	1040811
3	0,00413	0,00097	193,63	2109557	8	0,003395	0,00096	194,85	1048934
4	0,00052	0,00097	194,61	1817497	9	0,000781	0,00096	194,17	1251169
5	0,00559	0,00096	192,49	2513364	10	0,020457	0,00096	193,43	1517973
Promedio	0,00466	0,00097	194,48	1906493	Promedio	0,005681	0,00096	194,46	1176213

Tabla 4.- Resultados obtenidos en el ensayo de fatiga para el nivel de esfuerzo de 194 Mpa.

Nivel de Esfuerzo 199 Mpa									
Condición de recocido					Condición de termorociado				
Probeta #	$\Delta\epsilon/2$ mm/mm	$\Delta\epsilon\epsilon/2$ mm/mm	σ_a Mpa	2Nf reversos	Probeta #	$\Delta\epsilon/2$ mm/mm	$\Delta\epsilon\epsilon/2$ mm/mm	σ_a Mpa	2Nf reversos
11	0,00417	0,0010	199,66	850496	16	0,004554	0,00098	198,81	380610
12	0,00726	0,0010	199,99	810604	17	0,002210	0,00098	198,47	414494
13	0,00881	0,0010	198,05	1081832	18	0,003097	0,00098	200,55	245056
14	0,01178	0,0010	200,94	704847	19	0,000651	0,00098	200,20	279779
15	0,00457	0,0010	199,39	885592	20	0,003902	0,00098	198,50	411000
Promedio	0,00732	0,0010	199,61	866674	Promedio	0,00288	0,00096	199,31	346188

Tabla 5.- Resultados obtenidos en el ensayo de fatiga para el nivel de esfuerzo de 199 Mpa.

Nivel de Esfuerzo 204 Mpa									
Condición de recocido					Condición de termorociado				
Probeta #	$\Delta\epsilon/2$ mm/mm	$\Delta\epsilon\epsilon/2$ mm/mm	σ_a Mpa	2Nf reversos	Probeta #	$\Delta\epsilon/2$ mm/mm	$\Delta\epsilon\epsilon/2$ mm/mm	σ_a Mpa	2Nf reversos
21	0,00117	0,00102	204,26	433560	26	0,008136	0,00100	201,50	193040
22	0,00626	0,00102	203,73	468445	27	0,01431	0,00102	201,04	81773
23	0,00156	0,00102	206,58	310408	28	0,001028	0,00102	204,86	83753
24	0,00171	0,00102	203,84	461305	29	0,001285	0,00105	210,04	23719
25	0,00941	0,00102	203,82	461301	30	0,002600	0,00101	204,24	97493
Promedio	0,00402	0,00102	204,45	427004	Promedio	0,00290	0,00102	204,34	95956

Tabla 6.- Resultados obtenidos en el ensayo de fatiga para el nivel de esfuerzo de 204 Mpa.

Nivel de Esfuerzo 207 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	0,00392	0,00104	206,82	299932	36	0,01495	0,00103	207,08	48648
32	0,00078	0,00101	204,12	658110	37	0,00078	0,00103	207,78	40982
33	0,00797	0,00104	206,90	296550	38	0,00250	0,00103	206,28	59034
34	0,00535	0,00104	206,83	299477	39	0,00020	0,00103	206,20	60285
35	0,00209	0,00104	206,82	299880	40	0,00182	0,00103	206,18	60503
Promedio	0,00402	0,00103	206,30	370790	Promedio	0,00405	0,00103	206,70	53890

Tabla 7.- Resultados obtenidos en el ensayo de fatiga para el nivel de esfuerzo de 207 Mpa.

Nivel de Esfuerzo 209 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	0,00195	0,00104	207,99	253757	46	0,00081	0,00104	208,80	31947
42	0,00774	0,00106	211,29	159273	47	0,000262	0,00103	214,70	41000
43	0,00341	0,00104	208,57	233658	48	0,00601	0,00102	204,80	84901
44	0,00906	0,00105	208,70	229621	49	0,00195	0,00104	208,13	37642
45	0,00416	0,00104	206,65	307238	50	0,00262	0,00103	207,53	43539
Promedio	0,00527	0,00105	208,64	236709	Promedio	0,00233	0,00103	208,79	47806

Tabla 8.- Resultados obtenidos en el ensayo de fatiga para el nivel de esfuerzo de 209MPa.

Utilizando las ecuaciones para la amplitud de deformación elástica:

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

y para la amplitud de deformación plástica

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

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 quedando de la siguiente manera:

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

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

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*:

$$\frac{\Delta \varepsilon e}{2} = 0.0016 (2 N_f)^{-0.0343} ; R^2 = 0.9961$$

$$\frac{\Delta \varepsilon p}{2} = 0.3561 (2 N_f)^{-0.4910} ; R^2 = 0.9761$$

$$\frac{\Delta \varepsilon t}{2} = 0.0016 (2 N_f)^{-0.0343} + 0.3561 (2 N_f)^{-0.4910}$$

Condición de *termorociado*:

$$\frac{\Delta \varepsilon e}{2} = 0.00130 (2 N_f)^{-0.0218} ; R^2 = 0.9892$$

$$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = 0.3597 (2 N_f)^{-0.5817} ; R^2 = 1.000$$

$$\frac{\Delta \varepsilon_t}{2} = 0.00130 (2 N_f)^{-0.0218} + 0.3597 (2 N_f)^{-0.5817}$$

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 se muestra a continuación:

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

$$\frac{\Delta \varepsilon_t}{2} = \frac{\sigma 'f}{E} (2 N_f)^b + \varepsilon 'f (2 N_f)^c$$

Se obtiene finalmente:

Recocido	$\frac{\Delta \varepsilon_t}{2} = 0.0016 (2 N_f)^{-0.0343} + 0.3561 (2 N_f)^{-0.4910} \dots 1.15$
Termorociado	$\frac{\Delta \varepsilon_t}{2} = 0.0013 (2 N_f)^{-0.0218} + 0.3597 (2 N_f)^{-0.5817} \dots 1.16$

Las cuales corresponden a las ecuaciones Elastoplásticas para cada condición de ensayo, en este estudio.

Al comparar las ecuaciones correspondientes a la amplitud de deformación total obtenidas en este trabajo para las condiciones de Recocido y Termorociado se observo que:

➤ Para la amplitud de deformación elástica se presenta una disminución de los coeficientes de esfuerzo de fatiga (σ_f^2/E) y del coeficiente exponencial del esfuerzo de fatiga (b) en la condición de Termorociado con Wc-Co con respecto a los obtenidos para la condición de Recocido.

➤ Para la amplitud de deformación plástica se presenta un aumento del coeficiente de ductilidad de fatiga (ϵ_f^2) y del coeficiente exponencial de ductilidad de fatiga (c) en la condición de Termorociado con Wc-Co con respecto a la de Recocido.

En las tablas 9 y 10 se reflejan los resultados obtenidos usando los modelos matemáticos propuestos por Morrow [18], el modelo encontrado en la Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Central de Venezuela [16], el propuesto por los autores de este estudio y los valores obtenidos de manera experimental. Para de esta forma demostrar la correlación existente entre el coeficiente exponencial de endurecimiento cíclico (n) con el coeficiente exponencial del esfuerzo de fatiga (b) y el coeficiente exponencial de ductibilidad de fatiga (c) para el acero elegido en este estudio y otros aceros nacionales se obtuvieron los siguientes resultados:

ACEROS	b (teo) (Morrow)	b (teo) (E.I.M.U.C.V)	b (teo) (Este Trabajo)	b (exp.)
1010	-0,090	-0,139	-0,079	-0,138 (*)
1020	-0,072	-0,124	-0,064	-0,125 (*)
1020	-0,045	-0,108	-0,048	-0,034 (***)
1045	-0,064	-0,119	-0,059	-0,118 (*)
A36	-0,109	-0,162	-0,102	-0,155 (*)
A42	-0,077	-0,128	-0,068	-0,102 (*)
A36	-0,110	-0,163	-0,103	-0,110 (**)
A42	-0,078	-0,128	-0,068	-0,078 (**)
A622	-0,087	-0,136	-0,076	-0,087 (**)
Promedios	-0,081	-0,134	-0,074	-0,091

Tabla 9.- Resultados obtenidos mediante ecuaciones y de forma experimental para el coeficiente exponencial del esfuerzo de fatiga.

ACEROS	c (teo) Morrow	c (exp.)	n' (teo) Morrow	n' (exp.)
1010	-0,550	-0,640 (*)	0,216	0,164 (*)
1020	-0,640	-0,556 (*)	0,225	0,112 (*)
1020	-0,773	-0,491 (***)	0,069	0,059 (***)
1045	-0,678	-0,535 (*)	0,221	0,095 (*)
A36	-0,456	-0,613 (*)	0,252	0,239 (*)
A42	-0,613	-0,753 (*)	0,136	0,126(*)
A36	-0,451	-0,451 (**)	0,243	0,243 (**)
A42	-0,611	-0,611 (**)	0,127	0,127 (**)
A622	-0,567	-0,567 (**)	0,153	0,153 (**)
Promedio	- 0,0593	-0,580	0,182	0,146

Tabla 10.- Resultados obtenidos mediante ecuaciones y de forma experimental el coeficiente exponencial ductilidad de fatiga y el coeficiente exponencial de endurecimiento cíclico.

Según datos de las tesis y trabajo de ascenso

(*) Fausto Carpentiero [12], (**) Madrid Ismael [14], (***) Este trabajo.

Ecuaciones de Morrow [17]

$$b = - \frac{n'}{1 + 5 n'} \dots\dots\dots 1.17$$

$$c = - \frac{1}{1 + 5 n'} \dots\dots\dots 1.18$$

$$n' = \frac{b}{c} \dots\dots\dots 1.19$$

Ecuación de la Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Central de Venezuela [12]

$$b = - \frac{3 n' + 0.9}{10} \dots\dots\dots 1.20 \quad \text{y}$$

Ecuación propuesta en este estudio:

$$b = - \frac{3 n' + 0.3}{10} \dots\dots\dots 1.21$$

En el análisis de los valores obtenidos se destacan los siguientes resultados: en cuanto a las ecuaciones propuestas en esta investigación, la ecuación propuesta por la Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Central de Venezuela con la ecuación de Morrow [17] para el coeficiente de exponencial de fatiga (b) para el acero AISI 1020, que fue el usado por los autores de este estudio, el porcentaje de error cometido con nuestra ecuación es 5% y el cometido usando la ecuación 1.20, es del 58% con respecto al valor obtenido por Morrow, de igual manera al utilizar ambas ecuaciones en el acero AISI 1020 de los ensayos realizados por el profesor Fausto Carpertiero [12], se nota que el error cometido al utilizar la ecuación es del 11% y que al emplear la ecuación 1.20, donde el mismo es del 42%. Al analizar los valores obtenidos en este estudio como los alcanzados por el profesor Fausto Carpertiero para el coeficiente exponencial de ductibilidad de fatiga (c) y coeficiente exponencial de endurecimiento (n'), en el acero AISI 1020, se aprecia que en cuanto al valor exponencial de ductibilidad de fatiga logrado por el profesor Fausto Carpertiero, el porcentaje de error fue del 13% en comparación al de los autores de este estudio, que fue del 37% y en relación con el coeficiente exponencial de endurecimiento el porcentaje de error de este trabajo fue del 15% en comparación con el 50% obtenido por el profesor Fausto Carpertiero, en relación al valor teórico arrojado por la ecuación de Morrow.

ACEROS	σ_f/E	σ'_f/E	$\sigma_f/E / \sigma'_f/E$	ε_f	ε'_f	$\varepsilon'_f / \varepsilon_f$
1010	0,00454	0,00524	1,1544	0,0631	0,1424	2,2600
1020	0,00462	0,00514	1,1128	0,1630	0,1452	0,8920
1020	0,00296	0,00160	1,8508	0,2811	0,3561	1,2667
1045	0,00468	0,00407	0,8700	0,1600	0,2043	0,2150
A36	0,00380	0,00629	1,6570	0,3690	0,2897	0,7850
A42	0,00492	0,00529	1,0750	0,2800	0,6838	2,4400
Promedio	0,00425	0,00461	1,2867	0,2194	0,3036	1,3098

Tabla 11.- Relación de esfuerzo y deformaciones estáticos y dinámicos obtenidos para la ecuación universal.

Usando los promedios sacado de la tabla anterior para $\sigma_f/E / \sigma'_f/E$ y $\varepsilon'_f / \varepsilon_f$, se obtienen los valores restantes para la ecuación universal a proponer en esta investigación, promediando los valores de las columnas N° 3 y N° 6 de la misma son los siguientes:

$$\sigma_f/E / \sigma'_f/E = 1,2867 \approx 9 / 7$$

$$\varepsilon'_f / \varepsilon_f = 1,3098 \approx 4 / 3$$

Con estos valores experimentales y los valores promedios experimentales del exponente del esfuerzo de fatiga (b) y del exponente de ductibilidad de fatiga (c) de las tablas N° 10 y 11 respectivamente, se obtiene una ecuación Universal para los aceros nacionales, es la siguiente:

$$\frac{\Delta \varepsilon t}{2} = \frac{9}{7} \frac{\sigma f}{E} (2 N f)^{-0.091} + \frac{4}{3} \varepsilon f (2 N f)^{-0.580} \dots\dots\dots 1.22$$

En la figura N° 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 puede apreciar que para valores del Número de Reversos ($2Nf$) menores a $2 \cdot 10^6$ ($1 \cdot 10^6$ ciclos), el valor correspondiente a la Amplitud de Deformación total para la condición de Recocido aumenta en forma progresiva con respecto a la condición de Termorociado. Asimismo para el caso donde los valores del Número de Reversos ($2Nf$) son mayores a $2 \cdot 10^6$ ($1 \cdot 10^6$ ciclos), se presenta una situación inversa, tal que el valor de la Amplitud de Deformación Total para la condición de Recocido, disminuye con respecto a la condición de Termorociado, originado por las pendientes de ambas curvas.

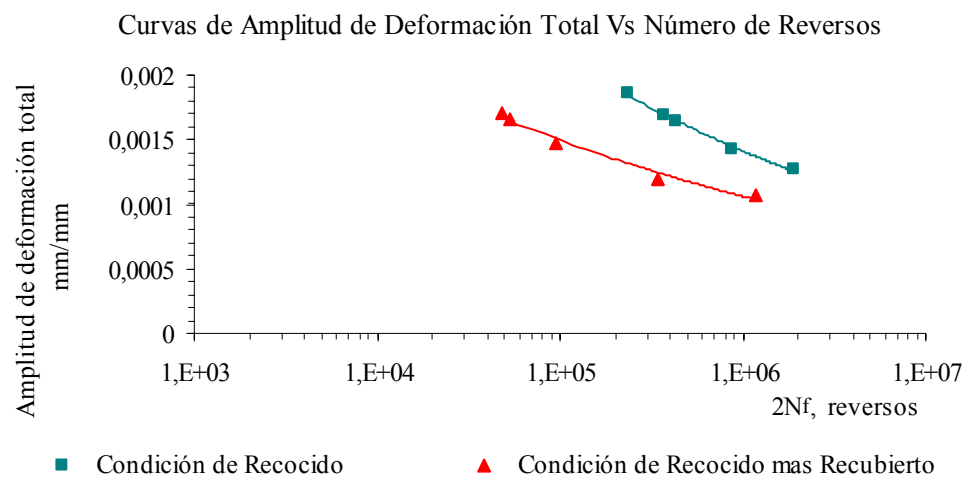


Figura 4.9.- Comparación entre las curvas de Amplitud de Deformación total ($\Delta \epsilon t/2$) Vs. Número de Reversos ($2Nf$) para las condiciones de Recocido y Termorociado

Utilizando los resultados experimentales de este trabajo, se establece un estudio comparativo, para la predicción del comportamiento del material en fatiga, en ambas condiciones estudiadas con la ecuación universal para los aceros obtenida propuesta por Manson [23] y [24], propuesta Carpentiero [12] y la propuesta en este trabajo:

Ecuación propuesta por MANSÓN:

$$\frac{\Delta \epsilon t}{2} = \frac{7}{2} \frac{Su}{E} (Nf)^{-0.125} + \epsilon f^{-0.6} (Nf)^{-0.6} \dots\dots\dots 1.22$$

Ecuación propuesta por CARPENTIERO:

$$\frac{\Delta \varepsilon t}{2} = \frac{1}{6} \left[7 \frac{\sigma f}{E} (2 Nf)^{-0.1275} + 8 \varepsilon f (2 Nf)^{-0.620} \right] \dots\dots\dots 1.12$$

Ecuación propuesta en esta INVESTIGACIÓN:

$$\frac{\Delta \varepsilon t}{2} = \frac{9}{7} \frac{\sigma f}{E} (2 Nf)^{-0.091} + \frac{4}{3} \varepsilon f (2 Nf)^{-0.580} \dots\dots\dots 1.23$$

Al evaluar los valores de 2Nf reversos, obtenidos de manera experimental para las condiciones estudiadas en esta investigación, de las ecuaciones 1.22, 1.12 y 1.23 para predecir el comportamiento del acero, lo que se obtuvo se puede, representar en las figuras N° 4.10, y 4.11. Para las condiciones de recocido y recocido con recubrimiento respectivamente.

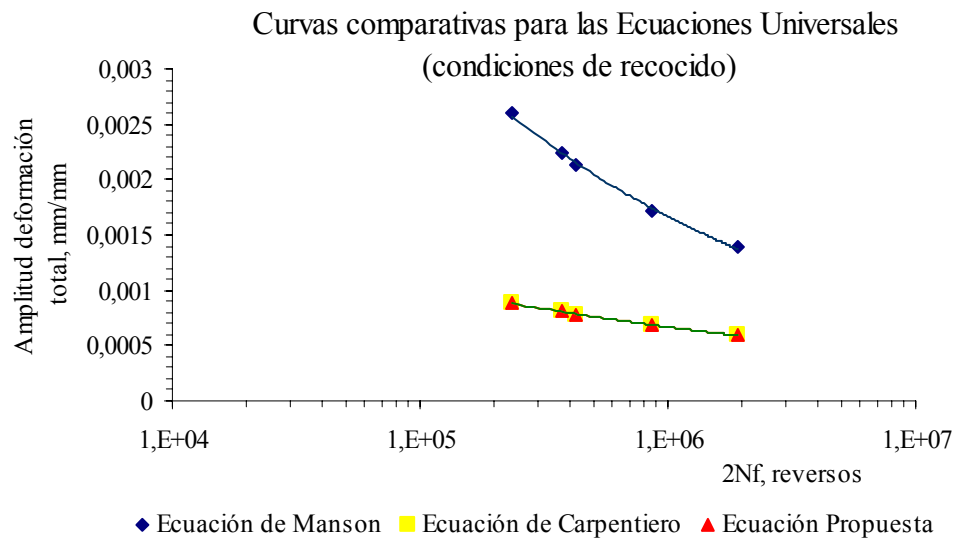


Figura 4.10.- Comparación entre las curvas obtenidas usando las ecuaciones de uso universal para los aceros y la propuesta en este trabajo para la condición de recocido.

Al analizar los resultados obtenidos mediante las ecuaciones 1.22, 1.12 y 1.23 con los valores experimentales de los ensayos de Recocido, se puede observar que la representación gráfica de los valores obtenidos al emplear las ecuaciones 1.12 y 1.23 son

muy similares y los mismos presentan una buenas aproximación para la condición estudiada, mientras que los valores obtenidos la ecuación 1.22, se visualiza una discrepancia en su tendencia, ya que está tiende a valores mayores, que los obtenidos por las ecuaciones anteriores para un valor de reversos determinados.

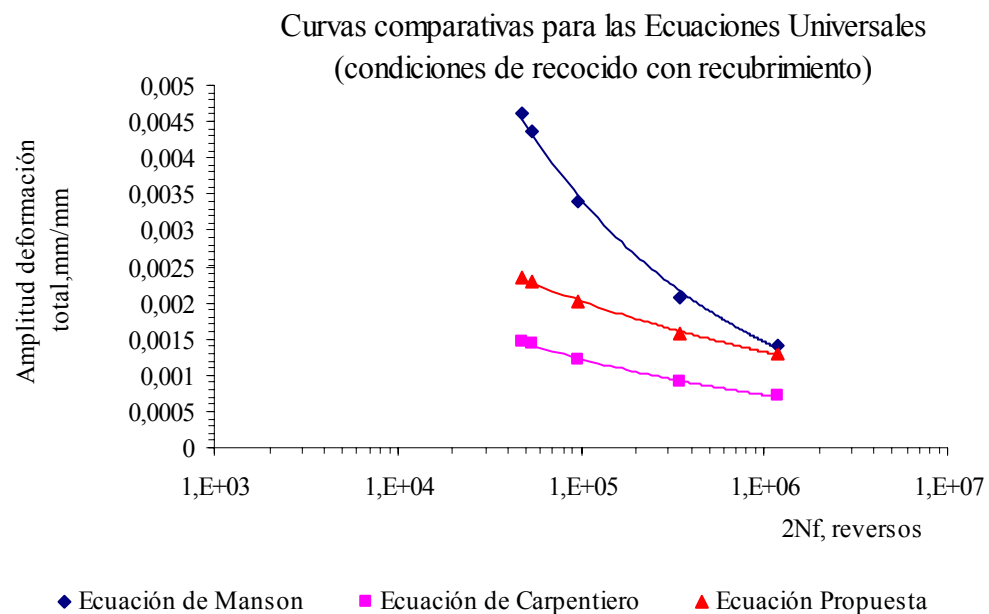


Figura 4.11.- Comparación entre las curvas obtenidas usando las ecuaciones de uso universal para los aceros y la propuesta en este trabajo para la condición de recocido con recubrimiento.

Al analizar los resultado obtenido en este trabajo, de los valores de recocido mas recubrimiento, se observa que la semejanza que existía entre las ecuaciones N° 1.12 y 1.23 en el grafico N° 4.10 donde se uso la condición de recocido, no se refleja en éste grafico, pero sí hay un paralelismo entre ambas lo que indica una relación entre sus pendientes. Siendo la tendencia de la curva originada al usar la ecuación N° 1.22 la de mayor pendiente. Haciendo la salvedad que dichas curvas no fueron obtenidas para materiales con recubrimiento.

V. – CAPITULO.

5.- ESTUDIO FRACTOGRAFICO.

Para realizar los estudios fractográficos, se utilizaron las probetas más representativas del nivel de esfuerzo más alto y más 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 I.U.TEC, región capital 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.

La figura 5.1 ilustra la Fotomicrografía obtenida por microcopio electrónico de barrido (Sem) de la probeta representativa del acero 1020 recubierta con carburo de tungsteno (Wc-Co) la cual ha sido ensayada a fatiga a un nivel de esfuerzo de 194 MPa. Donde se indica claramente las posibles zonas de inicio de grietas, así como la zona de final de fractura.

La figura 5.2 ilustra la vista general de una zona de inicio de grieta donde se observa las *Mesetas de Fatigas* y a continuación un detalle de la misma en la cual se visualiza la distribución uniforme de estas, así como también propagación de grietas de fatiga. Además se ilustra una zona “A”.

La figura 5.3 ilustra el detalla de la zona “A” de la figura 5.2, donde se observa los inicios de grieta en el sustrato, así como la ausencia de adherencia entre el sustrato y el recubrimiento, es de notar que esté ultimo no presenta inicio de grietas.

La figura 5.4 ilustra la Fotomicrografía de la zona de fractura debido a la presencia del *Labio de Corte*, donde se produce la fractura. Observándose la presencia de los *Microhoyuelos* característicos de este tipo de *fractura dúctil*.

La figura 5.5 ilustra la Fotomicrografía obtenida por microcopio electrónico de barrido (Sem) de la probeta representativa del acero 1020 recubierta con carburo de tungsteno (Wc-Co) la cual ha sido ensayada a fatiga a un nivel de esfuerzo de 209 MPa. Donde se indica claramente las posibles zonas de inicio de grietas, así como la zona de final de fractura. Observándose zona de desprendimiento del material de recubrimiento.

La figura 5.6 ilustra la Fotomicrografía de una posible zona de inicio de grietas, observándose la buena adherencia entre el sustrato y el recubrimiento, visualizándose los *Patrones de Ríos* y las grietas al observar el detalle.

La figura 5.7 ilustra la Fotomicrografía de una posible zona de fractura donde se observa las *Meseta de Fatigas*, además la presencia de *Microhoyuelos* y una grieta la que se propaga entre la intercara (sustrato-recubrimiento) ilustrándose una zona “B”.

La figuras 5.8 ilustra el detalle de la zona “B” de la figura 5.7, donde se observa con claridad los *Microhoyuelos*, *Meseta de Fatiga* y la grieta en mayor profundidad entre el sustrato y el recubrimiento.

- *Meseta de Fatiga*: Son estriaciones dúctiles, que se propagan a lo largo de las zonas de facetas planas.
- *Microhoyuelos*: Estructuras característica de los materiales dúctiles.
- *Labios de Cortes*: Se le denomina a la fractura creada por cualquier mecanismo en materiales dúctiles.
- *Patrones de Ríos*: Se definen al resultado de un arreglo sobre la superficie de fractura en forma de riachuelos, causado por la convergencia de plano paralelos a medida que la grieta se propaga.
- *Inicio de Grieta*: Son la que se forman en punto ó puntos de máximo esfuerzo y mínima resistencia local.
- *Fractura Dúctil*:

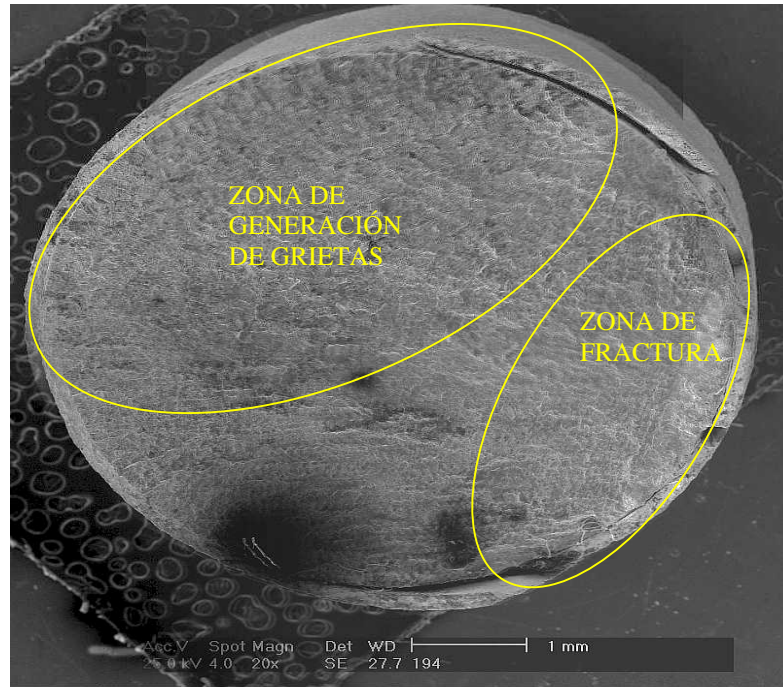


Figura 5.1.- Fotomicrografía obtenidas por Sem de una probeta de acero 1020 recubierta con Wc-Co ensayada a fatiga en el nivel de esfuerzo 194 MPa.

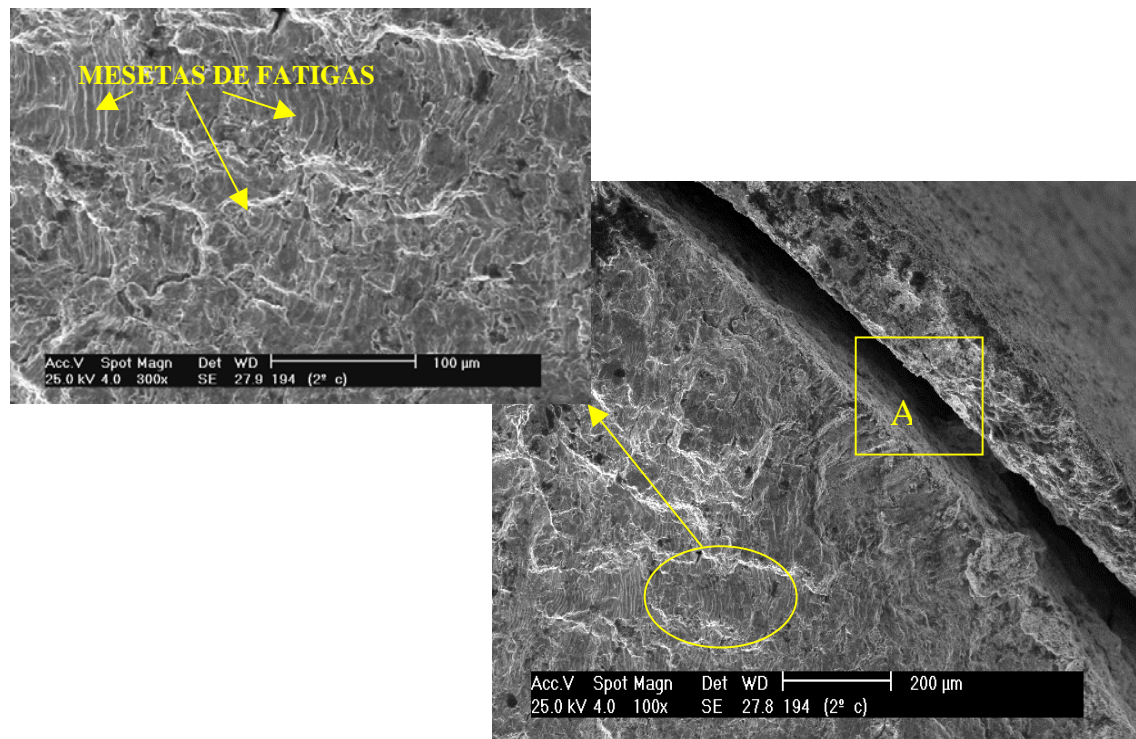


Figura 5.2.- Fotomicrografía de la zona correspondiente al inicio de Grieta de fatiga.

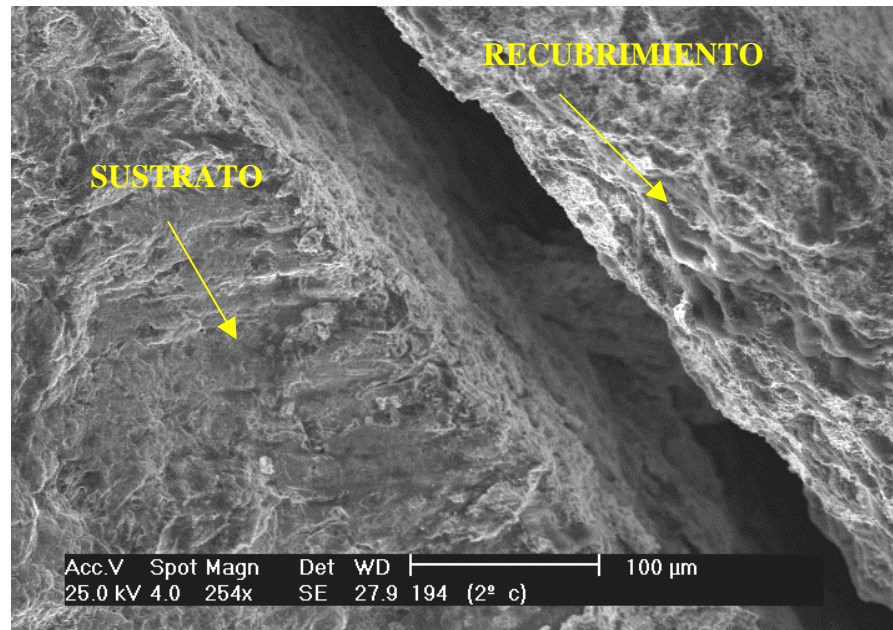


Figura 5.3.- Fotomicrografía del detalle de la zona “A” intercara, sustrato-recubrimiento.

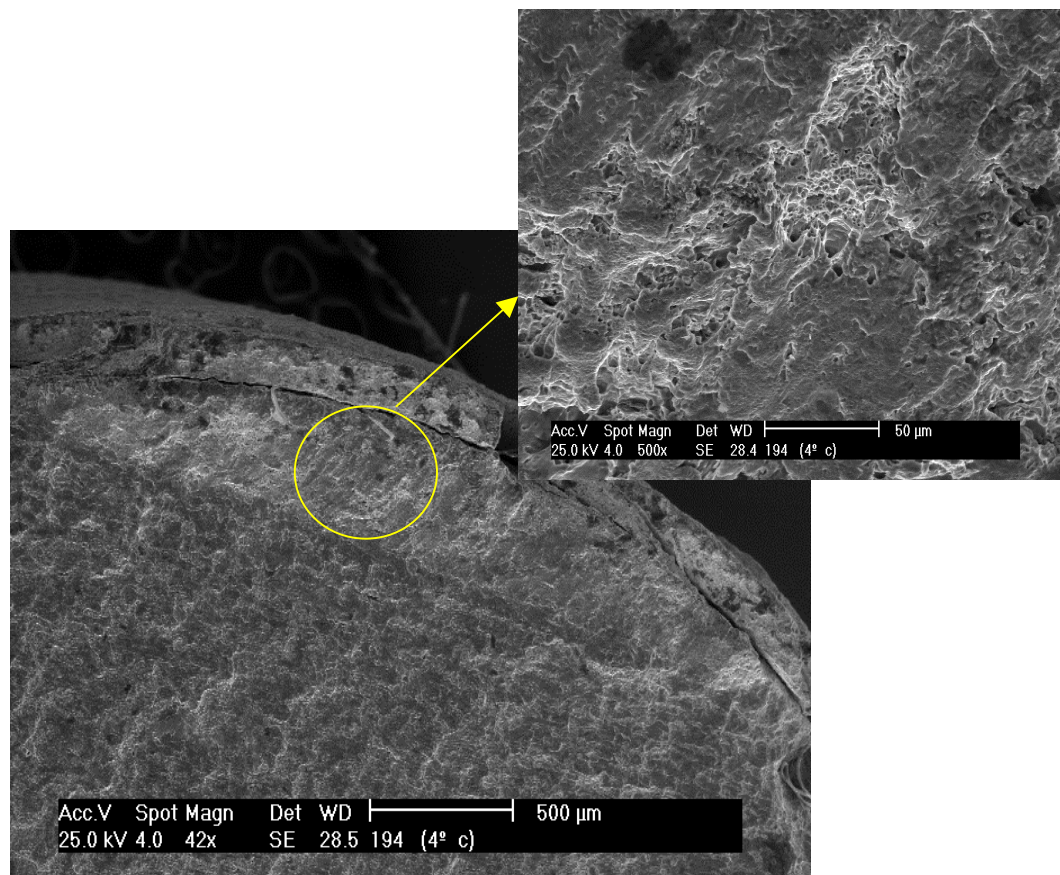


Figura 5.4.- Fotomicrografía de la zona de Fractura.

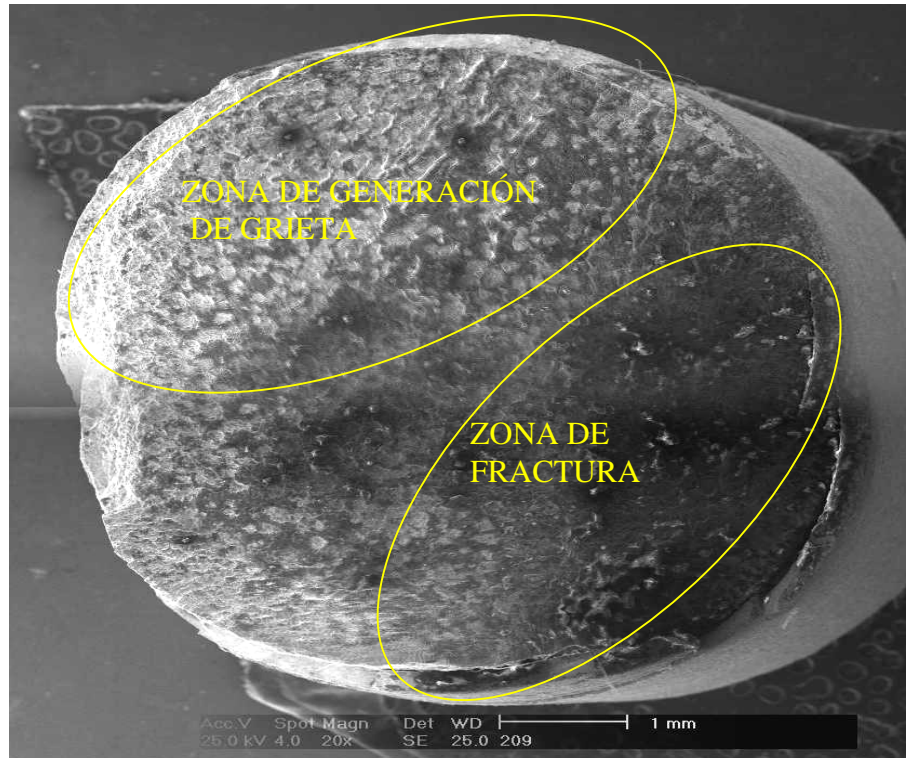


Figura 5.5.- Fotomicrografía obtenidas por Sem de una probeta de acero 1020 recubierta con Wc-Co ensayada a fatiga en el nivel de esfuerzo 209 MPa.

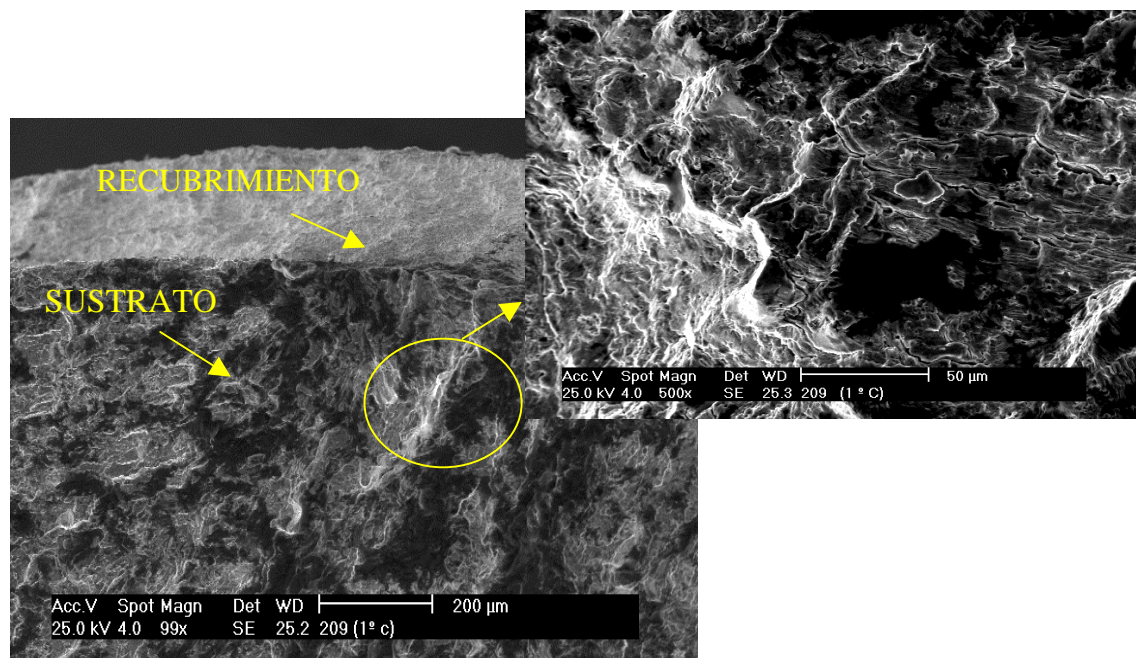


Figura 5.6.- Fotomicrografía de una posible zona de inicio de Grieta.

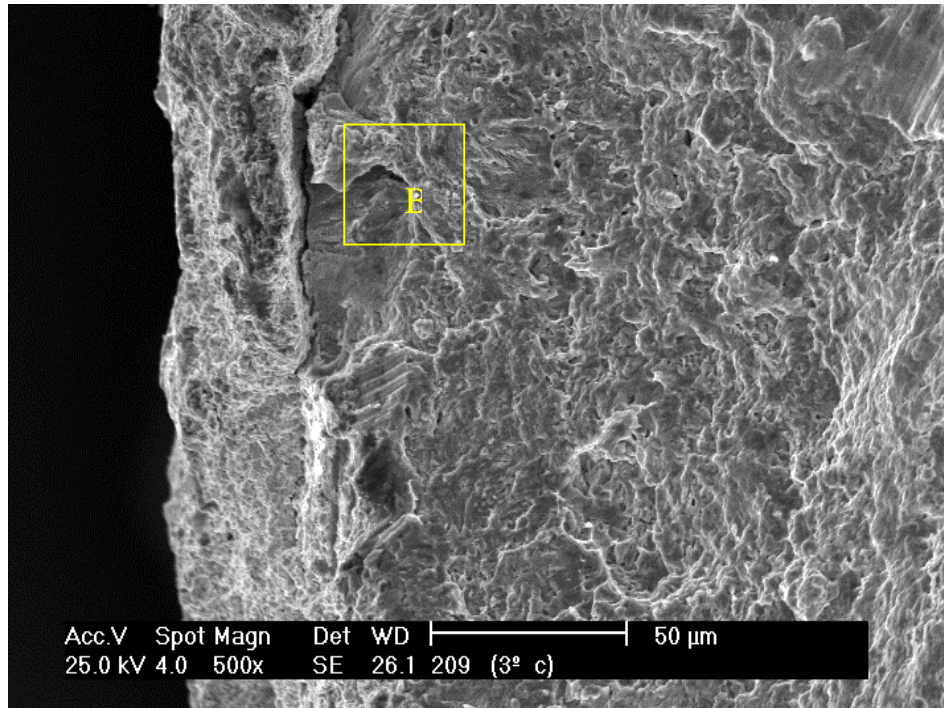


Figura 5.7.- Fotomicrografía de la zona de Fractura.

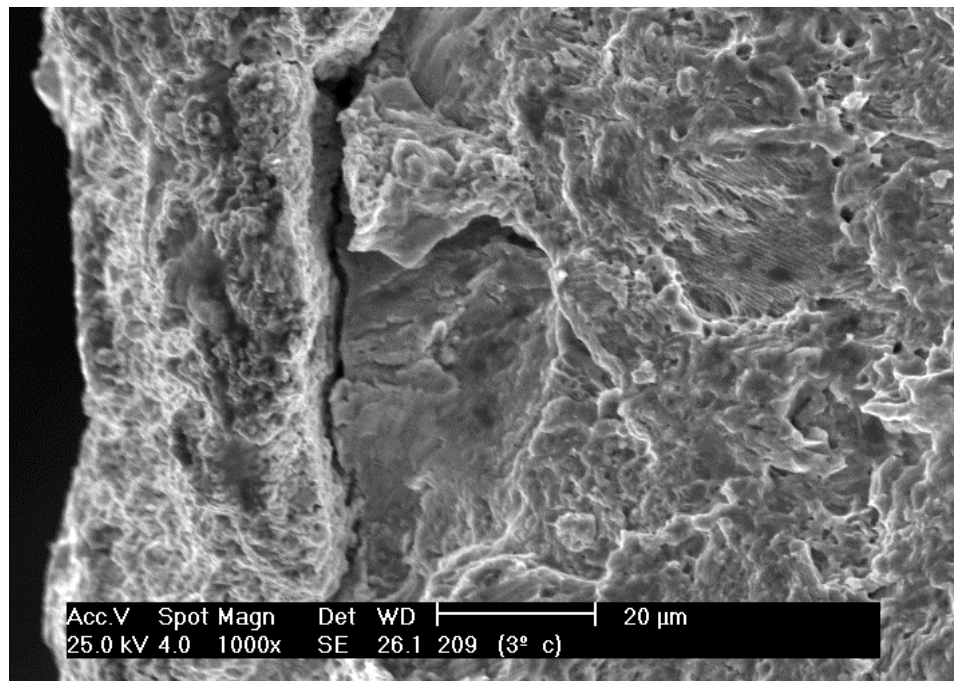


Figura 5.8.- Fotomicrografía del detalle de la zona "B".

VI.- CAPITULO.

6.1.- CONCLUSIONES.

- Se concluye que el recubrimiento utilizado presente, una pequeña variación en las propiedades monotónicas del material, la cual se observa al comparar los resultados para las condiciones dadas, pero las variaciones que se presentan no son significativas con respecto al comportamiento mecánico del material, ya que en este caso, no se presentan variaciones en las propiedades estáticas del material.
- En cuanto a las curvas de histéresis estabilizadas resultantes de los ensayos de fatiga se observó que en tres de los niveles de esfuerzo, la Deformación Plástica media es menor considerablemente en la condición de Recubrimiento que en la condición de Recocido, prediciendo que el recubrimiento empleado no influye favorablemente en la resistencia a la fatiga del material.
- En lo referente a las ecuaciones usadas por Morrow [17] ecuación Teórica, la usada por Carpentiero [12] y la propuesta en este trabajo, para determinar la correlación entre los coeficientes exponenciales de endurecimiento (n') y de fatiga (b), se concluye que la propuesta en esta investigación tiene más precisión con respecto a los valores obtenidos por las ecuaciones de Morrow.
- Al comparar las curvas de Amplitud de Deformación Total vs. Número de Reverso en las condiciones experimentales de Recocido y Recocido con Recubrimiento independientemente que posean pendientes similares, el esfuerzo a realizar para obtener una Deformación con un Número de Reverso cualquiera, siempre será mayor en el material Recocido que en el material Recubierto.
- En referencia a la comparación de las curvas para las ecuaciones universales en la condición de Recocido, la ecuación universal de los aceros nacionales encontrada por Carpentiero [12] y la obtenida en este estudio, se concluye, que hay buena aproximación.

- La comparación de las curvas para las ecuaciones universales en la condición de Recocido con Recubrimiento, la ecuación de Carpentiero, presenta la menor curva, lo que implica un menor esfuerzo para obtener una Deformación unitaria para un valor de Número de Reverso determinado. Aun cuando este investigador no realizo estudio con materiales con recubrimiento su curva es la mejor al momento de obtener los menores esfuerzos.

- Se puede observar que la ecuación de Carpentiero garantiza mejor aproximación cuando se utiliza en aceros con recocido, mientras que cuando se utilizan aceros con recubrimiento no se puede concluir nada ya que se requeriría de estudios mas exhaustivos para determinar con mayor precisión, esto nos permite realizar una analogía con el siguiente, ya que en este trabajo se uso como base la ecuación de Carpentiero.

- Debemos hacer énfasis en que el recubrimiento utilizado en este estudio, no mejora en ningún momento las propiedades mecánicas del acero, solo y únicamente se comporta como un recubrimiento mas.

6.2.- RECOMENDACIONES.

- Se recomienda que se debe realizar un análisis mas exhaustivo usando la ecuación de este trabajo, aplicada a la amplia gama de aceros existente en el mercado, usando la condición de recubrimiento.

- Se recomienda que en otro trabajo se debería estudiar esta ecuación universal variando los tipos de recubrimiento.

- Se recomienda que mediante el uso de métodos numéricos o simuladores computacionales estudiar los parámetros que conforman las ecuaciones universales, de forma tal que el nivel error en aproximación sea mínimo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Avner Sidney, “Introducción a la metalurgia física”.México. Ed. Mc Graw Hill, 1979, 2da edición, cap 4 y 17.
2. Hertzberg Richard, “Deformation and Fracture of Engineering Material”, New York. John Wiley and Sons.1976, cap. 12.
3. Cazaud Roger, “La Fatiga de los Metales”, Madrid, Ed. Aguiar, 1957.
4. Shigley Joseph, “Diseño en Ingeniería Mecánica”, México, Ed. Mc Graw Hill, 5ta edición, 1990, cap. 4.
5. Forrest P.G., “Fatiga de los Metales”, Bilbao, ediciones Urmo, 1972, cap. 2.
6. Juvinall R., “Fundamento de diseño en ingeniería mecánica”, México, editorial Limusa, 1991, 819 pag.
7. Spiegel Murray, “Estadística”, México, Ediciones Mc. Graw-Hill, 1976, cap 13, cap15.
8. ASM Metals Handbook, “Properties and Selection: Iron, Steel, And High-Performance Alloys”,New York, 1990, vol. 1, pag 150.
9. ASM Handbook, “Friction, Lubrication and Wear Technology”,New York, 1992,vol. 18, pag 640-700.
10. ASM Handbook, “Welding, Brazing and Soldering”, New York, 1992 vol. 6, pag 403 –420.
11. ASM Handbook, “Fracture and Fatigue”, New York, 1992, vol. 11, pag 618-625
12. Carpentiero Fausto, “Ecuación Universal de Fatiga para Aceros al Carbono Nacionales”, E.I.M.U.C.V., 1988, Trabajo de ascenso.
13. Lozada Rafael y Paolillo Fabio, “Evaluación de la Capacidad de Carga en Ejes que han sido Termorociados por Medio de la Técnica de Deposición de Arco Eléctrico y HVOF”, E.I.M.U.C.V., T.E.G. 1998.
14. Madrid Ismael, “Determinación de la Ecuación Elastoplástica de los Aceros A-212, A-36, A-622”, E.I.M.U.C.V., T.E.G. 1995.
15. Rosal Liliana T. y Zurita Santos R, “Determinación de la Ecuación Elastoplástica del Acero Tratado Térmicamente y con Recubrimiento Superficial”, E.I.M.U.C.V., T.E.G. 2001.

16. Carpentiero Fausto y Sánchez Luis “Resistencia a la Fatiga de Aceros SIDOR AISI 1055”, E.I.M.U.C.V., T.E.G. 1977,
17. Morrow Jo Dean, “In Internal friction, Camping and Cyclic Plasticity”, 1965, ASTM STP 378, pag. 11-13.
18. Cova Fernando A. y Nieto T. Alex A., “Determinación del Coeficiente Exponencial del Esfuerzo de Fatiga para los Aceros AISI. 110,1020, 1045”, E.I.M.U.C.V., T.E.G. 1982.
19. Sallent Pedro, “Estudio y Diseño de un Mecanismo Automático para Termorociado Hipersónico HVOF de Cuerpos Esféricos”, E.I.M.U.C.V., T.E.G. 1999.
20. Hernández Leris y Oliveira Francisco “Evaluación de las Propiedades de Fatiga del Acero AISI 4340 recubierto por Termorociado”. E.I.M.U.C.V., T.E.G. 1999.
21. Dieter, “Metalurgia Mecánica”, New York, Mc Graw Hill, 3ra edición, 1986, cap. 12.
22. Manual del Ingeniero Mecánico, New York, Mc Graw Hill, 8va edición, 1992, volumen 1, 783 pag.
23. Mason S. S, “Fatigue: A Complex Subject Some Simple Approximations”, Julio 1965, Exp. Mech. Vol. 5, 7, pag 8-9.
24. Mason S. S, “A Simple Procedure for estimating high-temperature low-cycle fatigue”, SOCIETY EXPERIMENTAL STRESS ANALYSIS, 1968, pag. 20-21.
25. Handbook of Fatigue Testing, octubre 1979 STP 566, ASTM.
26. Rally F .C. y Sinclair G. M, “ Influence of Strain Aging on the Shape of the S-N Diagram”, Departamento de Mecánica Teórica y Aplicada de la Universidad de Illinois, Urbana, Ill., 1955.
27. Tecnocrom.com.
28. Acantin.com.
29. Sidelpa.com.