

**COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL ACERO 35NCD16 SOMETIDO A
ENSAYOS DE FATIGA A BAJO CICLO**

JACKELINE JAIMES ORTIZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-QUÍMICAS

ESCUELA DE INGENIERIA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES

BUCARAMANGA

2013

**COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL ACERO 35NCD16 SOMETIDO A
ENSAYOS DE FATIGA A BAJO CICLO**

JACKELINE JAIMES ORTIZ

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de
Ingeniero Metalúrgico**

Director

JEAN BERNARD VOGT

Codirector

AFRANIO A. CARDONA GRANADOS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUÍMICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES

BUCARAMANGA

2013

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios por darme fortaleza durante estos años de estudio y permitirme llevar a cabo esta meta trazada en mi proyecto de vida.

A mis padres por sus consejos, confianza y amor

A mi familia en especial a mis tíos Nestor y Carlos y a mis tías Maruja, Carmen y Gloria; a mis primas Genny, Marcela y Andrea, por la credibilidad en los proyectos que emprendo; porque con su alegría y optimismo me dan la fuerza necesaria para cumplir mis anhelos.

A Hernan Carreño por brindarme su amor, confianza y hacer de un lunes festivo un día genial aunque en el cielo haya nubes grises.

A mis grandes amigas Jenny y Yadiana por los consejos y vivencias compartidas, por las alegrías, risas, chistes, tristezas y apoyo brindado en estos años.

A mis amigos Harrison, Toloza, Quintero, Kusy y Freddy quienes han sido un respaldo ante situaciones de duda y me han brindado su ayuda en momentos difíciles.

A mis compañeros de la carrera de los cuales aprendí numerosas enseñanzas, Oscar Rueda, Laura Miranda, Daniel Lancheros, Jonathan Sánchez, Diego Sanmiguel, Fabio Rodríguez, Fabio Afanador, Mayerly Velasco, Laura Delgado, Liceth Rueda, Edinson Pico, Jhoanna Carvajal, Andres Gómez, Marly Blanco, Ana Moreno.

A los hermanos de la iglesia quienes han estado al tanto de mis proyectos y han orado para que estos se lleven a cabo, especialmente a Celmira, Abilio, Figueroa y Méndez.

AGRADECIMIENTOS

Como primera instancia, dar gracias a Dios, por estar conmigo en cada paso que di, por fortalecer mi corazón e iluminar mi espíritu, además por colocar en mi camino a cada una de las personas que me hicieron compañía durante todo el periodo de estudio.

A mi familia por su compañía, por su credibilidad en los proyectos que emprendo y en especial hoy y todos los días a mis padres Jacobo y Doris porque con su alegría y apoyo me dan la fuerza necesaria para seguir adelante sin desfallecer.

Al laboratorio UMET (Unité des Matériaux et Transformations) y particularmente a todo el equipo de Metalurgia Física y Ciencia de Materiales por brindarnos la oportunidad de realizar este proyecto en las mejores condiciones.

Al director Jean Bernard Vogt y al co-director Afranio Cardona Granados por los numerosos consejos prácticos, recomendaciones y disponibilidad.

A los técnicos Damien Creton y Jocelyn Golek por su ayuda durante la ejecución de los ensayos de fatiga, supervisión y consejos de manipulación de los equipos.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. OBJETIVOS	18
1.1 GENERAL.....	18
1.2 ESPECÍFICOS	18
2. MARCO TEÓRICO	19
2.1 ACERO 35NCD16	19
2.1.1 Efecto de los elementos aleantes	19
2.2 RECUBRIMIENTO.....	20
2.3 FATIGA	21
2.3.1 Definición	21
2.3.2 Proceso de fatiga.....	21
2.3.3 Fatiga controlada por deformación cíclica	24
2.4 PROCESO HVOF.....	25
2.4.1 Técnica	25
2.4.2 El material.....	26
2.4.3 Procedimiento	26
2.4.4 Propiedades del recubrimiento por HVOF	27
2.4.5 Limitaciones de la técnica	27
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	28
3.1 EL MATERIAL.....	28
3.1.1.1 Composición química del acero	28
3.1.1.2 Condiciones del acero de acuerdo a su estado.....	28
3.1.2 Descripción de la probeta.....	31
3.2 RECEPCIÓN Y MEDICIÓN DE LAS PROBETAS	32
3.3 LIMPIEZA SUPERFICIAL.....	32
3.4 REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS DE FATIGA	33
Procedimiento del ensayo de fatiga.....	34
3.5 PREPARACIÓN METALOGRAFICA	35
3.6 MICROSCOPIA ÓPTICA Y MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO.....	36

4. RESULTADOS	37
4.1 RECEPCIÓN Y MEDICIÓN DE LAS PROBETAS	37
4.2 ENSAYO DE FATIGA	38
4.2.1. Resultados del ensayo de fatiga	38
4.2.2 Amplitud del esfuerzo versus Número de ciclos	39
4.2.3 Amplitud del Esfuerzo versus Duración de Vida	42
4.2.4 Rango del Esfuerzo versus el Número de ciclos	45
4.2.5 Rango del Esfuerzo versus Duración de vida	46
4.3 TIPO DE FRACTURA	48
4.4 FORMA DE PROPAGACIÓN DE LAS FISURAS	49
4.5 METALOGRAFÍA.....	50
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	52
5.1 RECEPCIÓN Y MEDICIÓN DE LAS PROBETAS	52
5.2 ENSAYO DE FATIGA	52
5.2.1 Amplitud del Esfuerzo versus Número de ciclos y Duración de vida	52
5.2.2 Rango del Esfuerzo versus el Número de ciclos	53
5.2.3 Rango del Esfuerzo versus Duración de vida	53
5.3 TIPO DE FRACTURA	54
5.4 FORMA DE PROPAGACIÓN DE LAS FISURAS	54
5.5 METALOGRAFÍA.....	55
6. CONCLUSIONES	57
7. RECOMENDACIONES	58
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
ANEXOS	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Micrografía del recubrimiento [7]	20
Figura 2. Etapas de propagación de grietas en fatiga [7]	23
Figura 3. Curva de Wöhler [6]	24
Figura 4. Ciclo de histéresis [6]	25
Figura 5. Sistema de Proyección térmica [16]	26
Figura 6. Micrografía de referencia para el acero 35NCD16 sin recubrimiento atacado químicamente con Nital al 5% a una resolución de 200x	29
Figura 7. Micrografía de referencia para el acero 35NCD16 tratado térmicamente sin recubrimiento atacado químicamente con Nital al 5% a una resolución de 500x.....	30
Figura 8. Esquema de la metodología experimental utilizada para el proyecto	31
Figura 9. Montaje del pulido electrolítico	33
Figura 10. a) Máquina Universal de Ensayos MTS Schenck Hydropuls Sinus utilizada para ensayos de fatiga y en b) Detalle de la probeta de fatiga y extensómetro para medir la deformación lineal.....	34
Figura 11. Esquema del procedimiento para el ensayo de fatiga	35
Figura 12. Procedimiento realizado para cada probeta	36
Figura 13. Dimensiones de la probeta en mm	37

Figura 14. Amplitud del Esfuerzo versus Número de Ciclos para el acero sin recubrimiento para los valores de deformación unitaria total, en a) 0,61%, en b) en 0,76%, en c) 1% y en d)1,26%.....	39
Figura 15. Amplitud del Esfuerzo versus Número de ciclos para el acero recubierto por HVOF para los valores de deformación unitaria total, en a) 0,61%, en b) 0,76%, en c) 1% y en d) 1,26%.....	40
Figura 16. Amplitud del Esfuerzo versus Número de ciclos para el acero tratado térmicamente sin recubrimiento para los valores de deformación unitaria total, en a) 0,61%, en b) 0,76%, en c) 1% y en d) 1,26%.....	41
Figura 17. Amplitud del Esfuerzo versus Duración de vida para el acero sin recubrimiento para los valores de deformación unitaria total, en a) 0,61%, en b) 0,76%, en c) 1% y en d) 1,26%.....	42
Figura 18. Amplitud del Esfuerzo versus Duración de vida para el acero recubierto por HVOF para los valores de deformación unitaria total, en a) 0,60%, en b) 0,76%, en c) 1% y en d) 1,26%.....	43
Figura 19. Amplitud del Esfuerzo versus Duración de vida para el acero tratado térmicamente sin recubrimiento para los valores de deformación unitaria total, en a) 0,66, en b) 0,80%, en c) 0,97% y en d) 1,22%.....	44
Figura 20. Gráfica del Rango del Esfuerzo versus Numero de ciclos para el acero sin recubrimiento.....	45
Figura 21. Gráfica del Rango del Esfuerzo versus Número de ciclos para el acero recubierto.....	45
Figura 22. Gráfica del Rango del Esfuerzo versus Número de ciclos para el acero tratado térmicamente	46
Figura 23. Gráfica del Rango del Esfuerzo versus Duración de vida para el acero sin recubrimiento	46

Figura 24. Gráfica del Rango del Esfuerzo versus Duración de vida para el acero recubierto.....	47
Figura 25. Gráfica del Rango del Esfuerzo versus Duración de vida para el acero tratado térmicamente sin recubrimiento	47
Figura 26. Fractura dúctil con rotura a 45° del acero 35NCD16 a) Sin recubrimiento, b) Recubierto por HVOF	48
Figura 27. Detalle de las probetas que presentaron rotura del acero 35NCD16 a) Sin recubrimiento, b) Recubierto por HVOF.....	48
Figura 28. Propagación y ramificación de fisuras en el acero 35NCD16 en a) sin recubrimiento, b) recubierto y c) tratado térmicamente, atacado químicamente con Nital al 5%	49
Figura 29. Micrografía del acero 35NCD16 sin recubrimiento con deformación unitaria total de 1,26% y 973 ciclos en a) microscopía óptica a 500x y en b) microscopía electrónica de barrido a 1270x.....	50
Figura 30. Micrografía del acero 35NCD16 recubierto por HVOF con Ni-Al con deformación unitaria total de 1,22% y 3221 ciclos, atacado químicamente con Nital al 5% en a) microscopía óptica a 500x y en b) microscopía electrónica de barrido a 1300x.....	50
Figura 31. Micrografía del acero 35NCD16 tratado térmicamente sin recubrimiento con deformación total de 1,10% y 3032 ciclos, atacado químicamente con Nital al 5% en microscopía óptica a 500x.....	51

LISTA DE TABLAS

Tabla No. 1 Propiedades del recubrimiento obtenido por HVOF [7].....	20
Tabla No. 2 Composición química del acero 35NCD16 dada por el fabricante	28
Tabla No. 3 Propiedades físicas del acero dadas por el fabricante	28
Tabla No. 4 Propiedades mecánicas del acero templado al aire a 875°C, refrigerado a -75°C y revenido a 200°C.....	30
Tabla No. 5 Propiedades mecánicas del acero con temple al aire a 875°C y revenido a 650°C.....	30
Tabla No. 6 Dimensiones de la probeta en estudio	37
Tabla No. 7 Resultados para el Acero 35NCD16 sin recubrimiento	38
Tabla No. 8 Resultados para el acero recubierto por HVOF con Ni-Al	38
Tabla No. 9 Resultados para el acero 35NCD16 tratado térmicamente sin recubrimiento.....	38

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Composición química de los reactivos utilizados	62
ANEXO B. Protocolo de metalografía.....	62
ANEXO C. Morfología y dimensiones de la probeta según norma ASTM E-8 .	63
ANEXO D. Diagrama TTT del acero 35NCD16 dado por el fabricante	63
ANEXO E. Datos para la elaboración de gráficas de fatiga correspondientes al acero sin recubrimiento para la probeta con deformación unitaria total de 0,61%	64
ANEXO F. Datos para la elaboración de gráficas de fatiga correspondientes al acero sin recubrimiento para la probeta con deformación unitaria total de 0,76%	64
ANEXO G. Datos para la elaboración de gráficas de fatiga correspondientes al acero sin recubrimiento para la probeta con deformación unitaria total de 1% .	65
ANEXO H. Datos para la elaboración de gráficas de fatiga correspondientes al acero sin recubrimiento para la probeta con deformación unitaria total de 1,26%	65
ANEXO I. Datos para la elaboración de gráficas de fatiga correspondientes al acero recubierto por HVOF para la probeta con deformación unitaria total de 0,60%	66
ANEXO J. Datos para la elaboración de gráficas de fatiga correspondientes al acero recubierto por HVOF para la probeta con deformación unitaria total de 0,76%	66

ANEXO K. Datos para la elaboración de gráficas de fatiga correspondientes al acero recubierto por HVOF para la probeta con deformación unitaria total de 1%	67
ANEXO L. Datos para elaboración de gráficas de fatiga correspondientes al acero recubierto por HVOF para la probeta con deformación unitaria total de 1,26%	67
ANEXO M. Datos para elaboración de gráficas de fatiga correspondientes al acero tratado térmicamente sin recubrimiento para la probeta con deformación unitaria total de 0,66%	68
ANEXO N. Datos para elaboración de gráficas de fatiga correspondientes al acero tratado térmicamente sin recubrimiento para la probeta con deformación unitaria total de 0,80%	68
ANEXO O. Datos para elaboración de gráficas de fatiga correspondientes al acero tratado térmicamente sin recubrimiento para la probeta con deformación unitaria total de 0,97%	69
ANEXO P. Datos para elaboración de gráficas de fatiga correspondientes al acero tratado térmicamente sin recubrimiento para la probeta con deformación unitaria total de 1,22%	69

RESUMEN

TÍTULO: COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL ACERO 35NCD16
SOMETIDO A ENSAYOS DE FATIGA A BAJO CICLO

AUTOR: JAIMES ORTIZ, Jackeline

PALABRAS CLAVES: Ensayo de Fatiga, HVOF, Acero 35NCD16.

DESCRIPCIÓN

Se realizaron pruebas de Fatiga para determinar la influencia del recubrimiento por HVOF sobre el comportamiento mecánico del acero 35NCD16. Fue ensayado un número determinado de probetas, cada una con un valor particular de carga fluctuante hasta su rotura, para obtener la relación entre carga o esfuerzo y el número de ciclos para la fractura. Las pruebas de fatiga fueron realizadas en la máquina Schenck Hydropuls Sinus. Las condiciones para el ensayo de fatiga fueron: temperatura de 450°C (temperatura de servicio del acero), fatiga a bajo ciclo, señal triangular, velocidad de deformación de $4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ y atmósfera de aire en el horno. A su vez, las variables del ensayo fueron: frecuencia con valores de 0.166 – 0.333 [Hz] y deformación unitaria total de 0,60, 0,76, 1 y 1,26%. Se utilizaron probetas cilíndricas, elaboradas bajo la norma ASTM E8. Después de realizado el ensayo de fatiga sobre cada probeta, se prepararon metalográficamente desbastadas en papel de carburo de Silicio con granulometrías de 320 a 2400. Posteriormente, fueron eliminadas las rayaduras por medio del desbaste fino sobre el pulido sobre paños para llevar la muestra al estado espejo. Se realizó el ataque químico con el reactivo Nital a una concentración de 5% con tiempo de inmersión de 5 segundos. Finalmente se analizó la microestructura del material mediante las técnicas de microscopía óptica con ayuda del microscopio óptico ZEISS Axioplan y microscopía electrónica de barrido en el equipo FEI Quanta 400.

* Proyecto de grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director Jean Bernard Vogt. Codirector. Afranio Antonio Cardona G.

ABSTRACT

TITLE: 35NCD16 STEEL MECHANICAL BEHAVIOR TESTS UNDER LOW CYCLE FATIGUE

AUTHOR: JAIMES ORTIZ, Jackeline

KEY WORDS: Fatigue Testing, HVOF, 35NCD16 Steel.

DESCRIPTION

Fatigue tests were performed to determine the influence of coating by HVOF on the mechanical behavior steel 35NCD16. Was tested a number of specimens, each with a particular value of fluctuating load until failure to obtain the relationship between stress or strain and the number of cycles to fracture. Fatigue tests were performed on the machine Schenck Hydropuls Sinus. The conditions for the fatigue test were: temperature of 450 ° C (service temperature of steel), low-cycle fatigue, triangular signal, strain rate of $4 \times 10^{-3} \text{ [s}^{-1}\text{]}$ and air atmosphere in the furnace. In turn, the variables of the test were: frequency with values of 0.166- 0.333 [Hz], total unitary deformation values of 0.60, 0, 76, 1 and 1.26%, Cylindrical specimens were used, elaborated under ASTM E8. After performed the fatigue test on each test piece were prepared metallographically roughly shaped in Silicon carbide paper with grain sizes of 320-2400. Subsequently, were eliminated the scratches by means of the fine roughing on polished on cloth to bring the specimen to mirror state. Chemical attack was performed with Nital reagent at a concentration of 5% with immersion time of 5 seconds. Finally the microstructure of the material was analyzed by optical microscopy using Zeiss Axioplan optical microscope and scanning electron microscopy in team FEI Quanta 400.

*Research Work

**Physicochemical Engineering Faculty. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Director. Jean Bernard Vogt. Codirector. Afranio Antonio Cardona Granados.

INTRODUCCIÓN

La creciente tendencia al análisis e integridad de los equipos ha hecho del estudio de la fatiga de los metales un tema de gran importancia práctica, puesto que la mayor parte de los fallos en los componentes y estructuras utilizados en ingeniería son debidos a la fatiga. En componentes sometidos a esfuerzos fluctuantes hay peligro de fractura por fatiga y es necesaria su inspección si se quieren evitar los fallos [12].

El principal problema de la aplicación de cargas cíclicas por largo tiempo en un molde es la pérdida o degradación de las propiedades mecánicas del material; razón suficiente para realizar el estudio del comportamiento en fatiga, porque este permite predecir la forma de deterioro microestructural según el estado de cargas, su evolución, interacción e influencia sobre las propiedades del mismo. Además, permite preveer la duración de vida de un elemento para su aplicación específica en la industria .

La presencia de discontinuidades o defectos en el material, introducidos durante el proceso de producción, junto con las microcavidades, desalineaciones del fibrado mecánico pueden ser elementos que determinen el comportamiento en fatiga de un material determinado [12].

En este trabajo, se estudia el comportamiento en fatiga del acero 35NCD16 (Norma AFNOR) en tres estados: acero en estado de recepción, acero revestido por el método de HVOF (High Velocity Oxy-Fuel) y finalmente acero tratado térmicamente sin recubrimiento. El objetivo es conocer en cuál de los casos mencionados se tiene mejor respuesta al comportamiento en fatiga, después de aplicado el ensayo de fatiga a una temperatura constante de 450°C.

1. OBJETIVOS

1.1 GENERAL

Estudiar la influencia de un recubrimiento obtenido por HVOF sobre el comportamiento en fatiga del acero 35NCD16 de la norma AFNOR.

1.2 ESPECÍFICOS

- ✓ Realizar ensayos de fatiga a 450°C por medio de la máquina Schenck Hydropuls Sinus para establecer la diferencia entre el comportamiento mecánico del acero 35NCD16, así:
 1. Sin recubrimiento
 2. Recubierto por HVOF con Ni-Al
 3. Tratado térmicamente sin recubrimiento

- ✓ Analizar la microestructura presentada en el acero para cada caso (acero sin recubrimiento, recubierto y sometido a tratamiento térmico).

- ✓ Mostrar la forma de fractura que presenta el acero después de realizado el ensayo de fatiga.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 ACERO 35NCD16

El acero 35NCD16 posee gran templabilidad, se caracteriza por su alta resistencia mecánica a esfuerzos de carga. Debido a su templabilidad (que condiciona la alta resistencia mecánica y la gran tenacidad) es elegido para piezas fuertemente solicitadas o forjadas, sin importar cuál sea su tamaño. Es aplicado a piezas mecánicas o herramientas de formas gruesas y complejas expuestas a esfuerzos elevados, en este caso para moldes de fabricación [13].

2.1.1 Efecto de los elementos aleantes

Los elementos de aleación pueden ser divididos en varias categorías atendiendo a las fases en las que aparecen. Para el acero 35NCD16 cuyos elementos aleantes son el Ni, Cr y Mo se clasifican así: el Níquel en la categoría de elementos que aparecen disueltos en la ferrita y el Cr y Mo como elementos que aparecen disueltos y también forman carburos estables [14]. De manera general, el Cromo y el Molibdeno incrementan el nivel de templabilidad, dureza y resistencia mecánica. Estos elementos producen un efecto favorable sobre fatiga, además son modificadores de la microestructura. A su vez, el Níquel aumenta el nivel de templabilidad y el de tenacidad, efecto favorable sobre tenacidad y principalmente a fatiga a bajo ciclo [17].

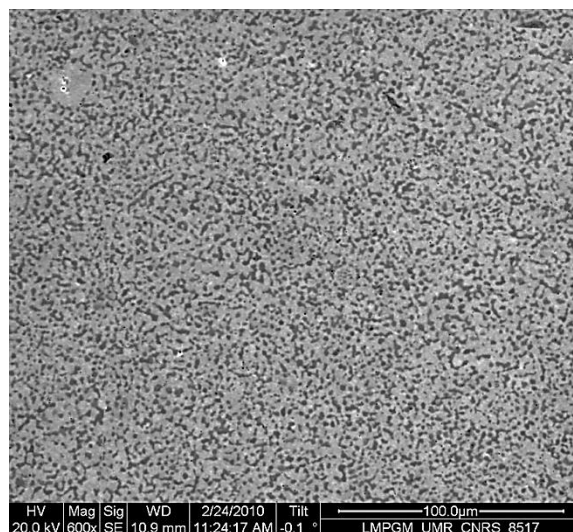
2.2 RECUBRIMIENTO

El Ni-Al es un material intermetálico utilizado por la industria aeroespacial, entre otras industrias avanzadas. Puede resistir la corrosión a altas temperaturas y la erosión, tiene alto punto de fusión, transferencia de calor elevada, elevado módulo de elasticidad, baja densidad y bajo costo en las materias primas. El compuesto Ni-Al obtenido en polvo, puede ser producido directamente por una aleación mecánica en la cual dos o más polvos elementales son mezclados para obtener una distribución atómica uniforme en fase estable o metaestable [20]

Tabla No. 1 Propiedades del recubrimiento obtenido por HVOF [7]

PROPIEDADES DEL RECUBRIMIENTO			
Clasificación	Modulo de Young (GPa)	Dureza Brinell	Tamaño de Grano (μm)
Compuesto intermetálico	250	277 HB	2

Figura 1. Micrografía del recubrimiento [7]



2.3 FATIGA

2.3.1 Definición

La norma ASTM E 1150 define la fatiga como el resultado de un cambio estructural permanente localizado y progresivo; ocurrido en materiales sujetos a esfuerzos y deformaciones cíclicas, este daño puede conllevar al agrietamiento o fracturas después de un número determinado de ciclos [30]

La fatiga generalmente se divide en dos tipos: fatiga de altos ciclos y fatiga de bajos ciclos. Cada uno tiene diferentes mecanismos de comportamiento al igual que diferentes modelos de diseño y análisis. La fatiga de bajos ciclos se caracteriza por la aplicación de altos esfuerzos y formación de grietas en un número de ciclos bajo, la razón para que se presente una falla en forma temprana es debido a que al material se le aplica un esfuerzo por encima del límite elástico en cada ciclo, lo que resulta generalmente en una vida a fatiga por debajo de los 10^4 [30].

2.3.2 Proceso de fatiga

El fallo por fatiga es consecuencia de la formación y posterior crecimiento de grietas en el material. El fallo final de la pieza se produce cuando una de estas grietas se hace dominante, o se produce la coalescencia de varias grietas pequeñas, alcanzándose un tamaño crítico de defecto por encima del cual el ligamento que queda sin fracturar en el elemento no es capaz de soportar la carga aplicada [8]

La formación de microgrietas por fatiga se produce invariablemente en defectos o discontinuidades del material, preferentemente en la superficie del componente. Tales defectos, como marcas superficiales, inclusiones, poros, puntos triples de intersección de bordes de grano, provocan una concentración local de tensiones que potencian la aparición de grietas [8]

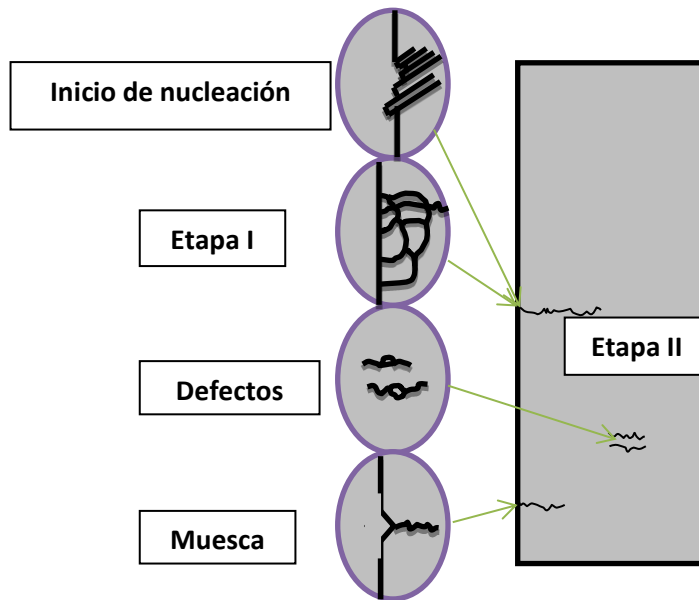
Existen numerosos mecanismos que pueden favorecer la nucleación de grietas en el material. Entre los más documentados se encuentran la formación de grietas en bandas de deslizamiento persistentes (bandas en las cuales se concentra la deformación plástica en materiales metálicos sometidos a carga cíclica), por fallo intergranular (ocurre generalmente debido a la rotura o degradación del material en los límites de grano) y a partir de partículas de segunda fase, inclusiones no metálicas u óxidos (debida a la incompatibilidad de deformaciones entre dicha partícula y la matriz metálica) [8]

Tradicionalmente se ha considerado que el proceso de rotura por fatiga consta de dos fases: nucleación de la grieta y propagación de esta hasta el fallo (28), de acuerdo con (15), la fase de propagación puede dividirse en dos etapas:

Etapa I: Denominada periodo de crecimiento cristalográfico. Corresponde con el estado inicial del crecimiento, en el que la grieta es del orden del tamaño microestructural característico (el tamaño de grano). En dicha etapa el crecimiento está altamente influenciado por la microestructura del material y se produce fundamentalmente en los planos de deslizamiento del material donde la tensión tangencial es máxima.

Etapa II: En esta fase el tamaño de la grieta es varias veces superior que el tamaño microestructural característico. El plano de propagación de la grieta se sitúa generalmente perpendicular a la dirección de la tensión principal máxima (Ver Fig. 2).

Figura 2. Etapas de propagación de grietas en fatiga [7]

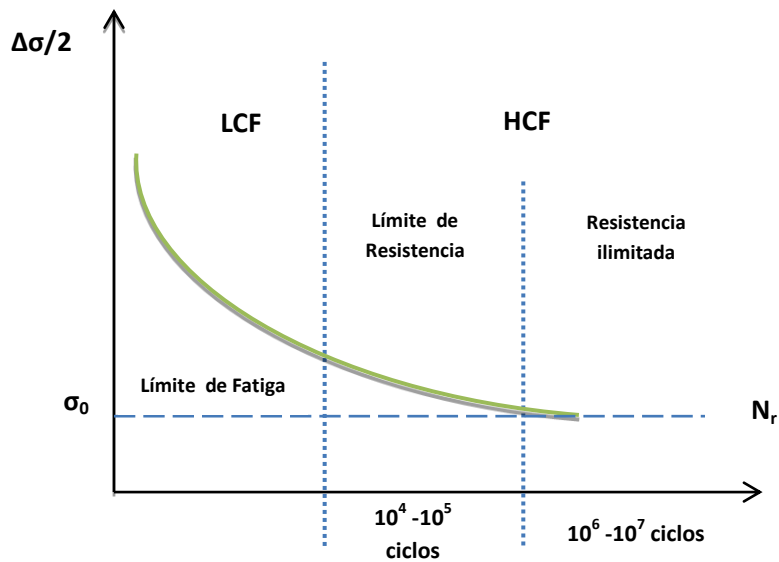


En términos generales, a mayor nivel de carga aplicada la duración relativa de la fase de nucleación es menor que la de propagación. Asimismo, a bajos niveles de carga (fatiga a alto número de ciclos), es la etapa I la que consume la mayor parte de la vida a fatiga del espécimen. Mientras que, por el contrario, en fatiga a bajo número de ciclos (a altas cargas), la etapa II predomina (8)

En cálculos actuales de vida a fatiga se tiende a considerar que el periodo de nucleación o no existe o tiene una duración muy corta, ya que las microgrietas son rápidamente iniciadas a partir de los defectos inherentes del material. Según (22) la grieta comienza a crecer casi desde el primer ciclo de carga y todo el proceso de fatiga es, en esencia, un proceso de propagación de grietas desde que éstas son nucleadas hasta que se produce el fallo final de la pieza.

Por otra parte, la representación de curvas de Wöhler es importante en el análisis de pruebas de fatiga. Estas curvas representan la relación entre la amplitud del esfuerzo y el número de ciclos para su rotura [6] (Ver Fig.3).

Figura 3. Curva de Wöhler [6]



Tres zonas deben distinguirse:

En la zona de la fatiga de bajo ciclo (LCF), debido a un número reducido de ciclos (10^5 ciclos o menos) son necesarios para romper la muestra, debido a la plasticidad macroscópica inducida por la carga.

En la zona de alta fatiga (HCF), la carga es baja y más de 10^6 - 10^7 ciclos es el límite por debajo del cual el material no fallará por fatiga.

En el área que se encuentra en el centro de la zona de fatiga de alto ciclo (HCF), la carga aplicada y la resistencia a la fatiga son proporcionales [7].

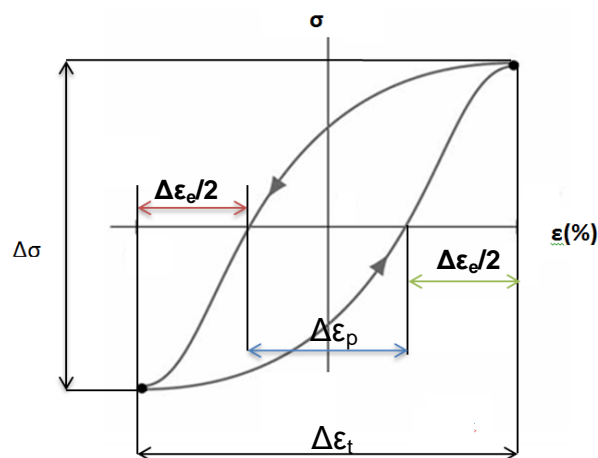
2.3.3 Fatiga controlada por deformación cíclica

La acción repetida de cargas cíclicas, presenta diversas manifestaciones de la relación esfuerzo-deformación en los metales. Este comportamiento se relaciona directamente con el tipo de material, tratamiento térmico o mecánico, etc.

Si se monitorea la deformación y el esfuerzo durante una prueba de carga cíclica, la respuesta del material puede ser identificada claramente, por ejemplo para un comportamiento de flujo elástico-plástico homogéneo, la variación completa de carga (positiva y negativa) producirá una curva similar a la de la Fig. 4, la cual refleja tanto deformación elástica como plástica [30]

El área contenida dentro del ciclo de histéresis representa una medida del trabajo de deformación plástica realizado sobre el material. En la Fig.4 está representado el esfuerzo contra la deformación unitaria durante un ciclo, en donde, $\Delta\epsilon_e$ es el rango de la deformación unitaria elástica, $\Delta\epsilon_p$ es el rango de la deformación unitaria plástica, σ es el esfuerzo y ϵ es la deformación unitaria.

Figura 4. Ciclo de histéresis [6]



2.4 PROCESO HVOF

2.4.1 Técnica

HVOF (High Velocity Oxy-Fuel) engloba un grupo de procesos donde un material es calentado y proyectado como partícula individual en forma de gotas sobre una superficie. Esta técnica utiliza el Oxígeno en combinación con diversos gases combustibles como el hidrógeno, propano, propileno y el kerosene [19].

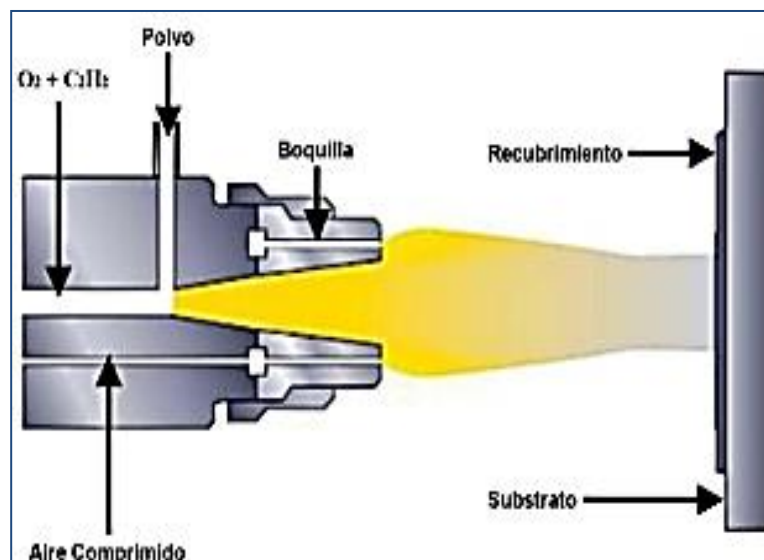
2.4.2 El material

Los materiales de alimentación pueden ser metálicos, cerámicos, polímeros o una combinación de ellos en forma de polvos, alambres o barras. Pueden aplicarse bajo condiciones atmosféricas normales o especiales [26].

2.4.3 Procedimiento

El material de recubrimiento es alimentado continuamente hacia el soplete o pistola donde es fundido en una llama de combustión realizada en el aire de una mezcla gas comburente (oxígeno O_2) y gas combustible (acetileno C_2H_2 , hidrógeno H_2 y propano C_3H_8), para producir una fuente de calor o llama, utilizándose el aire comprimido para proyectar y acelerar las partículas en forma de gotas fundidas sobre el sustrato, donde fluyen juntas y solidifican proporcionando una capa [26]. En el esquema a continuación se muestra la proyección por medio de HVOF. La boquilla de expansión, el sustrato, la entrada del material de recubrimiento.

Figura 5. Sistema de Proyección térmica [16]



2.4.4 Propiedades del recubrimiento por HVOF

Los recubrimientos hechos por este método proveen alta densidad (porosidad menor a 2%), fuerte adherencia al sustrato, excelente tolerancia a la corrosión y/o desgaste.

Además asigna mejores propiedades físicas y químicas, aumentando su resistencia a efectos ambientales y disminuyendo el precio de mantenimiento y reparación [19]. Las propiedades aplicadas al recubrimiento o capa dependen del material de alimentación, del proceso de proyección térmica, de los parámetros aplicados y del pos-tratamiento [26].

2.4.5 Limitaciones de la técnica

La proyección por llama se encuentra limitada para los materiales que se funden a temperaturas más altas que la proporcionada por la llama o para materiales que se descomponen durante el calentamiento. Debido a la temperatura relativamente baja de la llama y la velocidad de la partícula, las capas son generalmente de menor calidad, tienen alta porosidad y bajas fuerzas cohesivas y adhesivas, baja resistencia mecánica y espesor limitado [26].

En la siguiente sección, se encontrará la explicación detallada de las actividades llevadas a cabo para el cumplimiento de los objetivos propuestos en este trabajo. Algunos de los procedimientos serán pulido electrolítico, ensayo de fatiga, metalografía, entre otros.

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1 EL MATERIAL

3.1.1.1 Composición química del acero

El acero estudiado es un acero aleado con Ni-Cr-Mo, correspondiente al acero 35NCD16 según la norma AFNOR. La composición química contiene los siguientes elementos mostrados en la Tabla No. 1 a continuación:

Tabla No. 2 Composición química del acero 35NCD16 dada por el fabricante

	C	Mn	Cr	Mo	Ni	Si	P	S
Wt(%)	0.36	0.45	1.80	0.35	3.85	0.1-0.4	<0.030	<0.020

3.1.1.2 Condiciones del acero de acuerdo a su estado

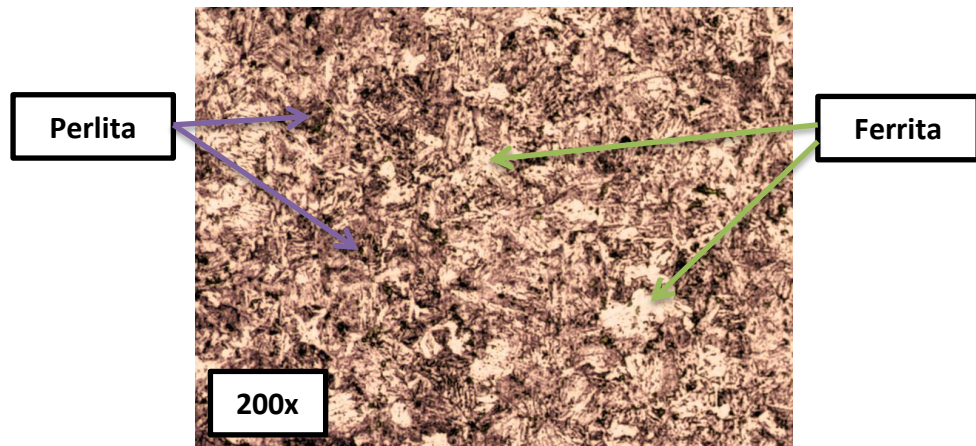
- En estado de recepción:

El acero en estado de recepción se lleva a calentamiento a una temperatura de 680°C seguido de un enfriamiento lento, es decir su condición es de recocido subcrítico, la dureza que presenta es 269 Brinell [13]. Las propiedades físicas son mostradas en la Tabla No. 3 a continuación:

Tabla No. 3 Propiedades físicas del acero dadas por el fabricante

Densidad:	7,8 g/cm ³
Coeficiente medio de dilatación en m/m. °C	
20 °C - 200 °C :	11,5 x 10 ⁻⁶
20 °C - 400 °C :	12,4 x 10 ⁻⁶
20 °C - 600 °C :	12,8 x 10 ⁻⁶
Puntos de transformación:	Ac ₁ : 660 °C Ac ₃ : 780 °C

Figura 6. Micrografía de referencia para el acero 35NCD16 sin recubrimiento atacado químicamente con Nital al 5% a una resolución de 200x



En la Fig. 6 se presenta la micrografía para el acero 35NCD16 con tratamiento térmico de recocido a 680°C, en donde su microestructura está constituida por dos fases, una correspondiente a la ferrita (regiones blancas), esta fase es blanda, maleable y dúctil, su dureza se encuentra entre 60-90 BHN (dureza Brinell) y cristaliza en la estructura cristalina BCC. La segunda fase corresponde a la perlita (regiones oscuras), la dureza de este constituyente es aproximadamente 200 BHN.

- Recubierto por HVOF

El acero recubierto por HVOF presenta las mismas características mecánicas del acero en estado de recepción.

- Tratado térmicamente

El acero tratado térmicamente sin recubrimiento es templado al aire a una temperatura de 875°C, refrigerado a -75°C y revenido a 200°C posteriormente es templado a 875°C al aire y revenido a 650°C [13]. En las tablas No. 4 y 5 se encuentran las propiedades mecánicas en cada fase del ciclo de tratamiento térmico.

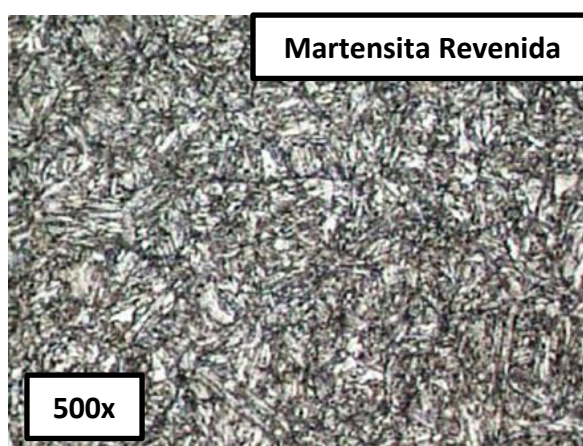
Tabla No. 4 Propiedades mecánicas del acero templado al aire a 875°C, refrigerado a -75°C y revenido a 200°C

Resistencia última a la tracción:	1900 (MPa)
Resistencia a la fluencia a 0,2%:	1500 (MPa)
Alargamiento en 5d :	10 %
Resistencia al impacto KCU :	50 J/cm ²

Tabla No. 5 Propiedades mecánicas del acero con temple al aire a 875°C y revenido a 650°C

Resistencia última a la tracción:	1050 (MPa)
Resistencia a la fluencia a 0,2%:	900 (MPa)
Alargamiento en 5d:	18%
Resistencia al impacto KCU:	110 J/cm ²

Figura 7. Micrografía de referencia para el acero 35NCD16 tratado térmicamente sin recubrimiento atacado químicamente con Nital al 5% a una resolución de 500x

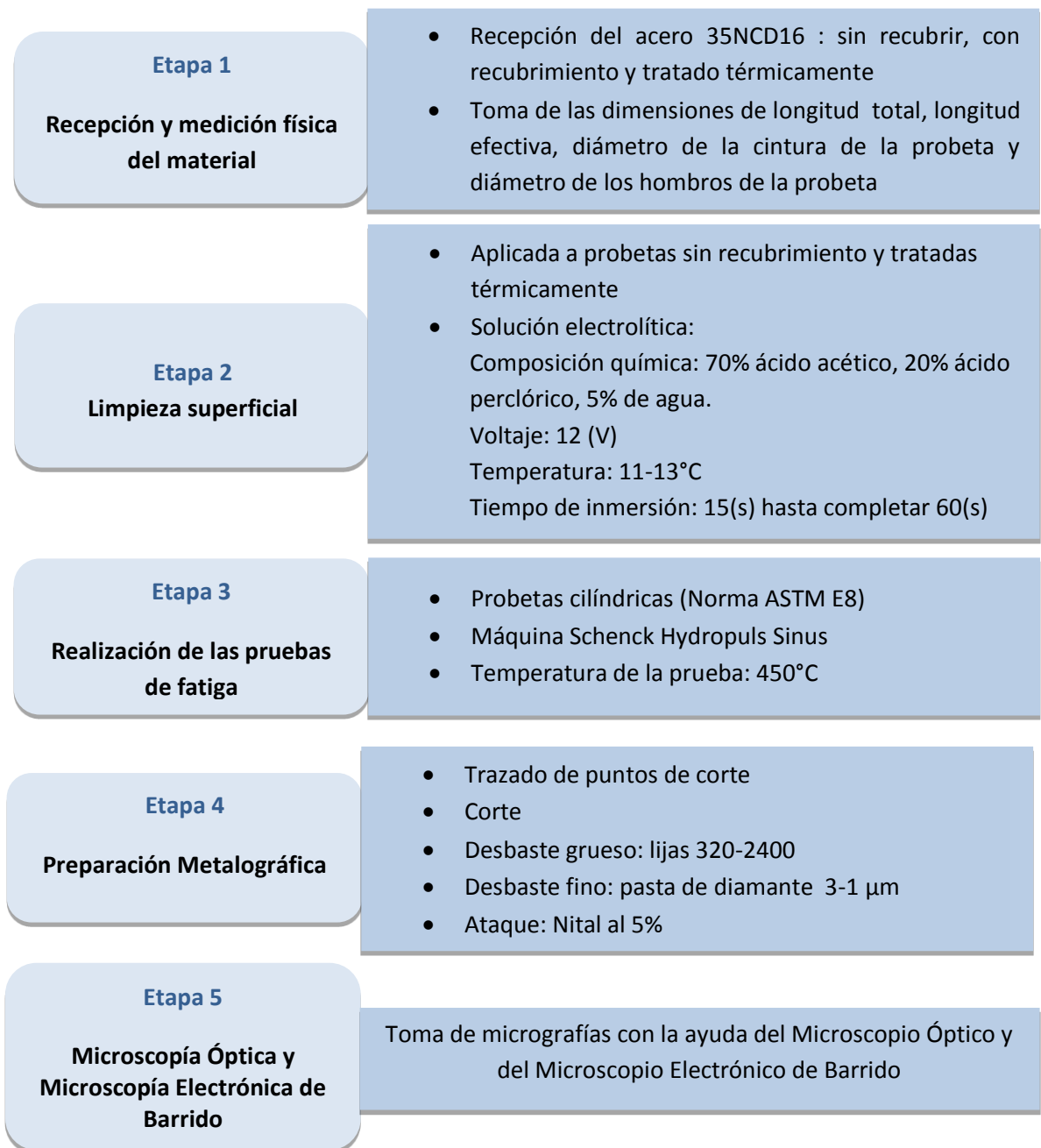


En la Figura 7 se presenta la microestructura para el acero 35NCD16, con tratamiento térmico de temple al aire a 875°C y con revenido a 650°C. En donde se observa la aparición del microconstituyente martensita revenida.

3.1.2 Descripción de la probeta

El material utilizado es el acero 35NCD16 suministrado por la empresa Arc International (Francia) y fabricado por la empresa Aubert y Duval (Francia). El suministro se realizó en forma de probetas cilíndricas estandarizadas por la norma ASTM E8 (Ver anexos).

Figura 8. Esquema de la metodología experimental utilizada para el proyecto



Para el cumplimiento de los objetivos propuestos se llevaron a cabo las siguientes actividades:

3.2 RECEPCIÓN Y MEDICIÓN DE LAS PROBETAS

La empresa Arc International hizo entrega de las probetas del acero 35NCD16 (Norma AFNOR), sin ningún recubrimiento ni tratamiento térmico aplicado. Al momento de la recepción, se caracterizaron físicamente las muestras por medio de la toma de sus dimensiones; ancho, largo y diámetro de la cintura de la probeta.

3.3 LIMPIEZA SUPERFICIAL

Se aplicó pulido electrolítico a las probetas con recubrimiento por HVOF, con el fin de eliminar de la cintura de la probeta cualquier rugosidad presente. Este procedimiento consistió en sumergir la probeta en estudio en la solución electrolítica, en un intervalo de tiempo determinado en cada caso.

La aplicación de corriente eléctrica provocó la disolución del metal, por lo cual fueron eliminadas aristas y protuberancias de la probeta.

Las condiciones empleadas para realizar el pulido electrolítico fueron las siguientes:

1. Composición química de la solución electrolítica: 75% de ácido acético, 20% de ácido perclórico, 5% de agua.
2. Voltaje suministrado: 12 Voltios.
3. Temperatura de la solución electrolítica: 11-13°C
4. El tiempo de inmersión de cada probeta inicialmente fue de 15 segundos y se incrementó en la misma proporción hasta completar 60 segundos.

Figura 9. Montaje del pulido electrofítico



3.4 REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS DE FATIGA

Esta investigación se basa en el ensayo de fatiga plástica, el cual está estandarizado por la norma ASTM E-606 [4] y las probetas utilizadas para los ensayos de fatiga fueron cilíndricas con las dimensiones establecidas según la norma ASTM E8 [5].

El procedimiento para determinar la resistencia a la fatiga consistió en ensayar las probetas de estudio a un valor particular de carga hasta su rotura; para así obtener una relación entre la carga fluctuante o esfuerzo fluctuante y el número de ciclos para la fractura. La temperatura fue elevada gradualmente hasta alcanzar 450°C que es la temperatura de ejecución de la prueba.

El montaje se llevó a cabo en la máquina de fatiga Schenck Hydropuls Sinus, equipo con una capacidad de carga máxima de 45 kN. Es utilizado para ensayos de tensión, compresión y fatiga provisto de hornos para ensayos a diferentes temperaturas y controlador electrónico en microsonda para control de rata y perfil de carga, se cuenta con accesorios para diferentes tipos de probetas y controlador de deformación lineal [31] (Ver Fig. 9)

Figura 10. a) Máquina Universal de Ensayos MTS Schenck Hydropuls Sinus utilizada para ensayos de fatiga y en b) Detalle de la probeta de fatiga y extensómetro para medir la deformación lineal



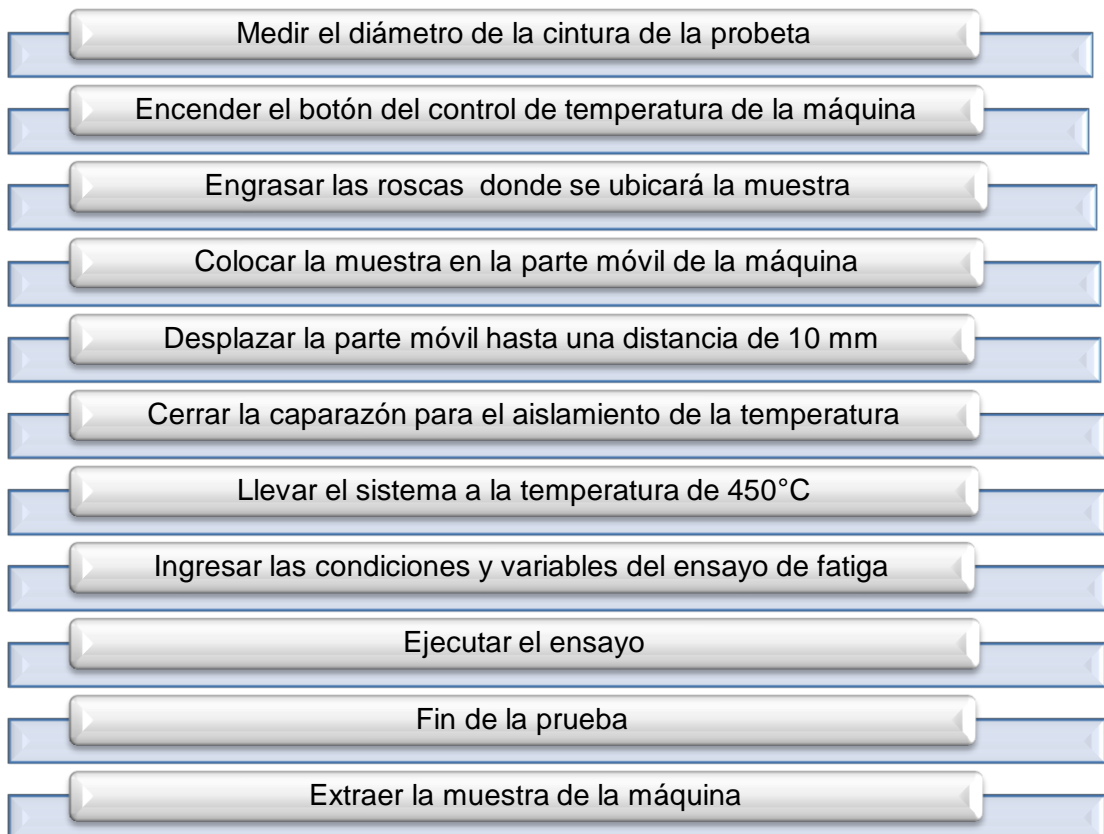
Las condiciones de ejecución del ensayo de fatiga fueron:

Tipo de ensayo	Fatiga oligocíclica (bajo ciclo)
Deformación total	$\Delta\epsilon_t = 0,60\%; 0,76\%; 1\%; 1,26\%$
Tipo de señal	Triangular
Relación de esfuerzos	$R = -1 (S_{\min}/S_{\max})$
Velocidad de deformación	$4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$
Frecuencia	0,166; 0,200; 0,222; 0,250; 0,333 [Hz]
Temperatura	450°C
Atmósfera en el horno	Aire

Procedimiento del ensayo de fatiga

De manera general, la ejecución del ensayo de fatiga se realizó como se muestra en el diagrama:

Figura 11. Esquema del procedimiento para el ensayo de fatiga

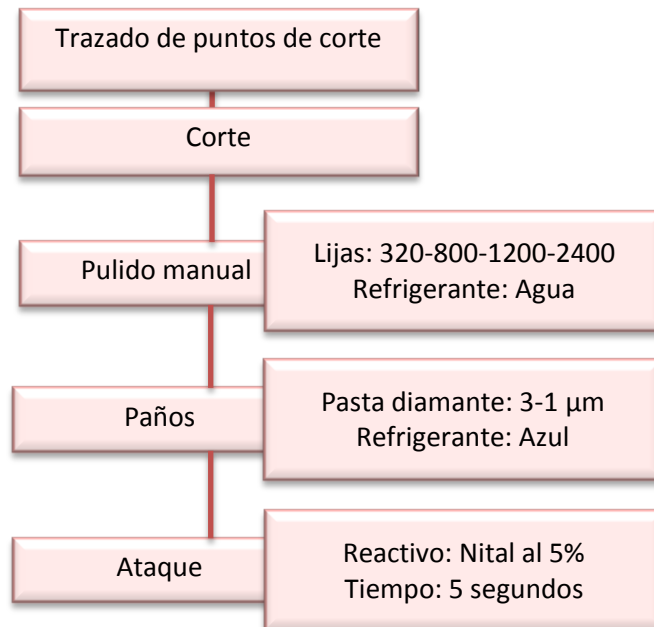


3.5 PREPARACIÓN METALGRÁFICA

Después de realizado el ensayo de fatiga sobre cada probeta, fueron trazados puntos sobre la misma para facilitar el corte y así tener dos muestras por cada probeta para la respectiva preparación superficial. Luego, se realizó el corte de las probetas en la zona correspondiente a la cintura de cada muestra. Las probetas fueron cortadas longitudinal y transversalmente para su respectivo pulido manual. El corte fue hecho según lo estipulado por la norma ASTM E3-01 [3]. Luego de cortadas las secciones de estudio fueron desbastadas en papel de carburo de silicio con granulometrías de: 320 a 2400 utilizando como refrigerante agua. Posteriormente, fueron eliminadas las rayas dejadas al realizar el desbaste grueso para realizar el desbaste fino por medio del pulido sobre paños con pasta de diamante de 3-1 μm y lubricante azul para llevar la muestra al estado espejo.

Finalmente se realizó el ataque químico con el reactivo Nital a una concentración de 5% de ácido nítrico y 95% de etanol, durante un periodo de 5 segundos de inmersión, para revelar la microestructura en cada caso.

Figura 12. Procedimiento realizado para cada probeta



3.6 MICROSCOPIA ÓPTICA Y MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

Con la ayuda del Microscopio Óptico (MO) ZEISS Axioplan y del Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) quanta FEI 400, correspondientes al laboratorio UMET (Unité Matériaux et Transformations) en Lille (Francia), se tomaron las micrografías correspondientes al acero en cada uno de sus estados, a diferentes aumentos del lente de objetivo.

En el siguiente capítulo serán mostrados los resultados de los procedimientos y actividades realizadas en esta sección, tales como ensayo de fatiga y metalografía para el acero en estudio.

4. RESULTADOS

4.1 RECEPCIÓN Y MEDICIÓN DE LAS PROBETAS

La empresa Arc International hizo entrega de las probetas del acero 35NCD16 (Norma AFNOR), en tres estados así: sin recubrimiento, recubierto por HVOF con Ni-Al y finalmente tratado térmicamente sin recubrimiento.

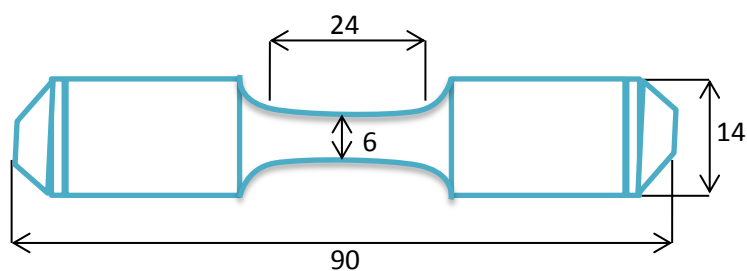
Al momento de la recepción, se midieron físicamente las muestras. Sus dimensiones son: longitud total de la probeta, longitud del ensayo, diámetro en la cintura de la probeta y el diámetro de los hombros de la probeta y cumplieron con las dimensiones dadas por la norma ASTM E8 para probetas cilíndricas sometidas a ensayos de fatiga (Ver Tabla No. 6)

Tabla No. 6 Dimensiones de la probeta en estudio

Condición del acero	Longitud total de la probeta (mm)	Longitud de Ensayo (mm)	Diámetro en la cintura de la probeta (mm)	Diámetro de los hombros de la probeta (mm)
Sin recubrimiento	90	24	5,9	14
Recubierto			6,5	
Tratado térmicamente sin recubrimiento			5,9	

De manera general, en la Fig. 13 Son mostradas las dimensiones de la probeta utilizada para los ensayos de fatiga

Figura 13. Dimensiones de la probeta en mm



4.2 ENSAYO DE FATIGA

4.2.1. Resultados del ensayo de fatiga

En las tablas No. 7, 8 y 9 se presenta el valor de la deformación unitaria total ($\Delta\mathcal{E}_{ta}$), la deformación unitaria plástica ($\Delta\mathcal{E}_p$) y la deformación unitaria elástica ($\Delta\mathcal{E}_e$), el número de ciclos de trabajo, la amplitud del esfuerzo (σ_a), el esfuerzo máximo ($\sigma_{M\acute{a}x.}$), el esfuerzo mínimo ($\sigma_{M\acute{i}n.}$) y el rango del esfuerzo (σ_r) en cada caso. La condición de las probetas antes de realizar la prueba de fatiga fue en su estado en bruto tal y como fueron elaboradas.

Tabla No. 7 Resultados para el Acero 35NCD16 sin recubrimiento

No. de Ensayo	Número de ciclos	$\Delta\mathcal{E}_{ta}$ [%]	$\Delta\mathcal{E}_p$ [%]	$\Delta\mathcal{E}_e$ [%]	σ_a [MPa]	$\sigma_{M\acute{a}x.}$ [MPa]	$\sigma_{M\acute{i}n.}$ [MPa]	σ_r [MPa]
S12_01	9544	0,76	0,11	0,55	528	539	-517	1056
S12_03	117757	0,61	0,10	0,51	494	497	-491	988
S12_05	2062	1	0,41	0,59	568	616	-520	1136
S12_07	973	1,26	0,72	0,54	566	642	-590	1132

Tabla No. 8 Resultados para el acero recubierto por HVOF con Ni-Al

No. de Ensayo	Número de ciclos	$\Delta\mathcal{E}_{ta}$ [%]	$\Delta\mathcal{E}_{pa}$ [%]	$\Delta\mathcal{E}_{ea}$ [%]	σ_a [MPa]	$\sigma_{Max.}$ [MPa]	$\sigma_{M\acute{i}n.}$ [MPa]	σ_r [MPa]
S12_08	1245	1,26	1,04	0,22	308	316	-300	616
S12_10	8379	0,76	0,28	0,48	458	468	-448	916
S12_13	3221	1,02	0,52	0,50	480	507	-453	960
S12_16	115518	0,60	0,17	0,43	417	417	-417	834

Tabla No. 9 Resultados para el acero 35NCD16 tratado térmicamente sin recubrimiento

No. de Ensayo	Número de ciclos	$\Delta\mathcal{E}_{ta}$ [%]	$\Delta\mathcal{E}_{pa}$ [%]	$\Delta\mathcal{E}_{ea}$ [%]	σ_a [MPa]	$\sigma_{Max.}$ [MPa]	$\sigma_{M\acute{i}n.}$ [MPa]	σ_r [MPa]
S12_19	106876	0,66	0,12	0,54	515	527	-503	1030
S12_20	11981	0,80	0,22	0,58	562	580	-544	1124
S12_21	1306	1,22	0,56	0,66	638	720	-596	1276
S12_23	2503	0,97	0,46	0,51	622	695	-649	1244

4.2.2 Amplitud del esfuerzo versus Número de ciclos

Los datos procedentes de los ensayos de fatiga se presentan en un diagrama S-N, que es un gráfico del número de ciclos necesarios para provocar una falla en una probeta contra la amplitud del esfuerzo cíclico desarrollado. El comportamiento de la amplitud del esfuerzo versus el número de ciclos puede observarse a continuación en las Fig. 14, 15 y 16.

Figura 14. Amplitud del Esfuerzo versus Número de Ciclos para el acero sin recubrimiento para los valores de deformación unitaria total, en a) 0,61%, en b) en 0,76%, en c) 1% y en d) 1,26%

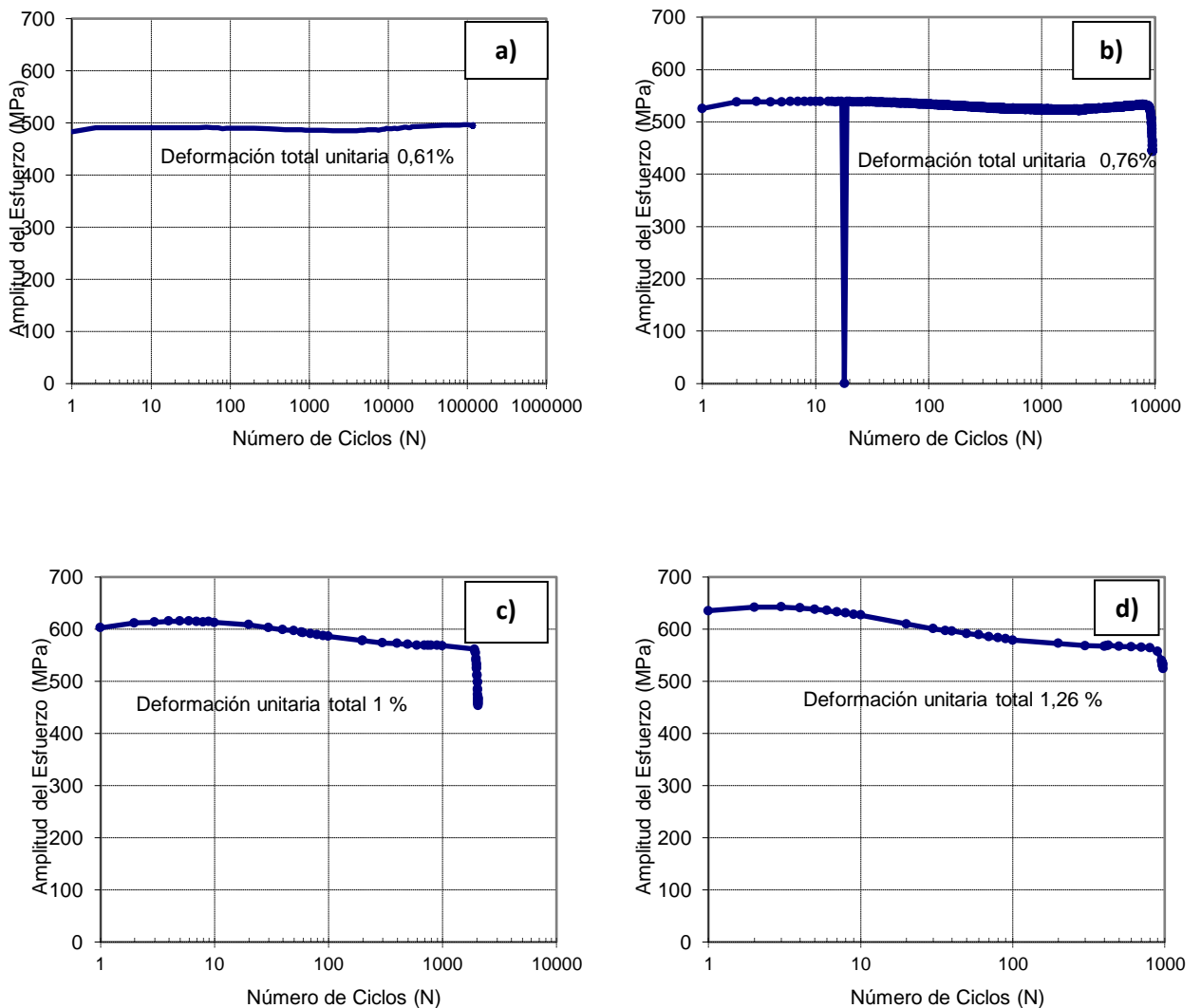


Figura 15. Amplitud del Esfuerzo versus Número de ciclos para el acero recubierto por HVOF para los valores de deformación unitaria total, en a) 0,61%, en b) 0,76%, en c) 1% y en d) 1,26%

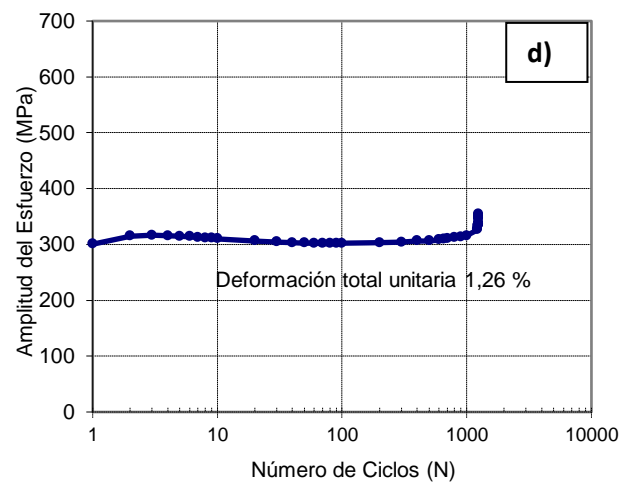
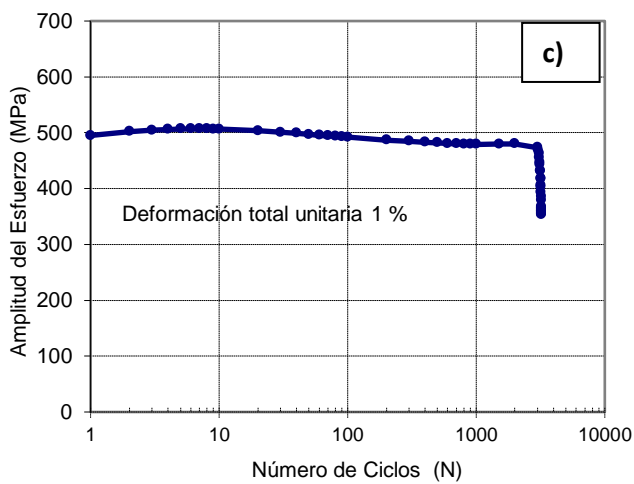
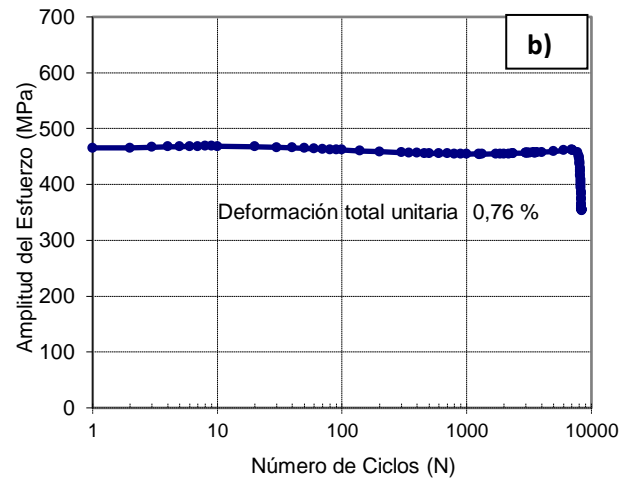
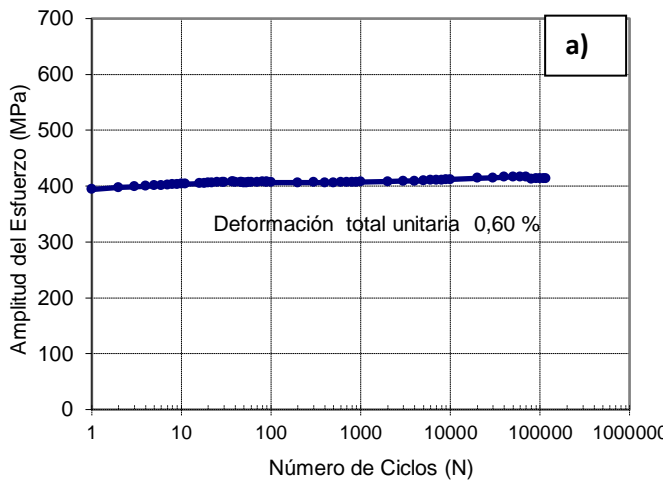
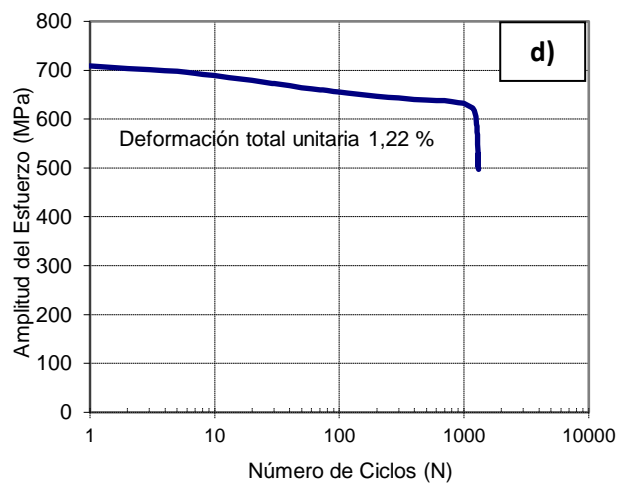
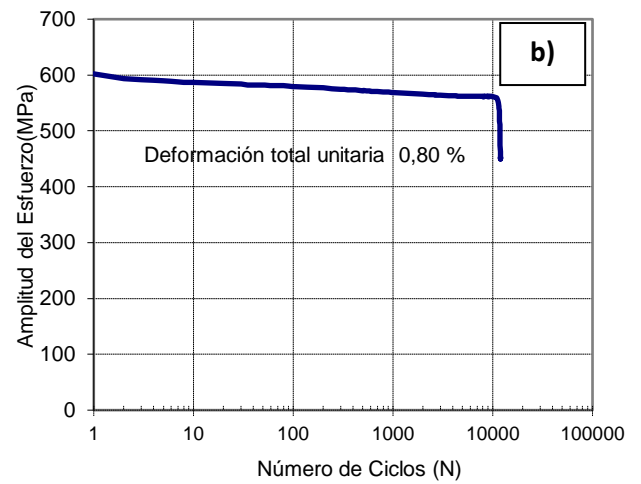
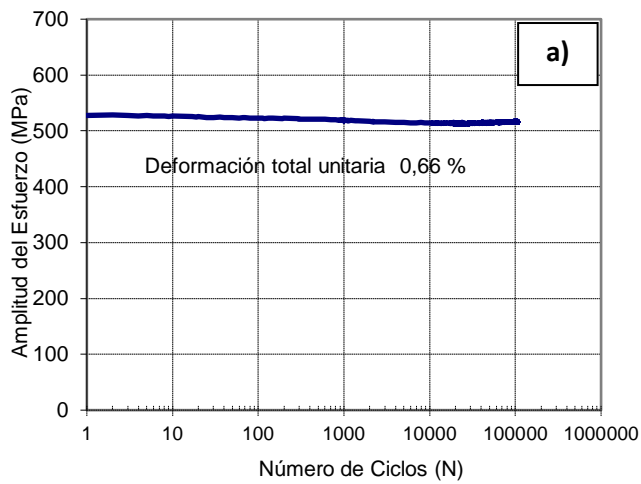


Figura 16. Amplitud del Esfuerzo versus Número de ciclos para el acero tratado térmicamente sin recubrimiento para los valores de deformación unitaria total, en a) 0,61%, en b) 0,76%, en c) 1% y en d) 1,26%.



4.2.3 Amplitud del Esfuerzo versus Duración de Vida

A continuación en las Fig. 17, 18 y 19 se observa el comportamiento de la duración de vida para cada condición del acero en estudio en donde la duración de vida es explicada como el número de ciclos de trabajo en determinado tiempo sobre el número de ciclos totales y esta relación es multiplicada por el 100% para obtener el porcentaje correspondiente.

Figura 17. Amplitud del Esfuerzo versus Duración de vida para el acero sin recubrimiento para los valores de deformación unitaria total, en a) 0,61%, en b) 0,76%, en c) 1% y en d) 1,26%

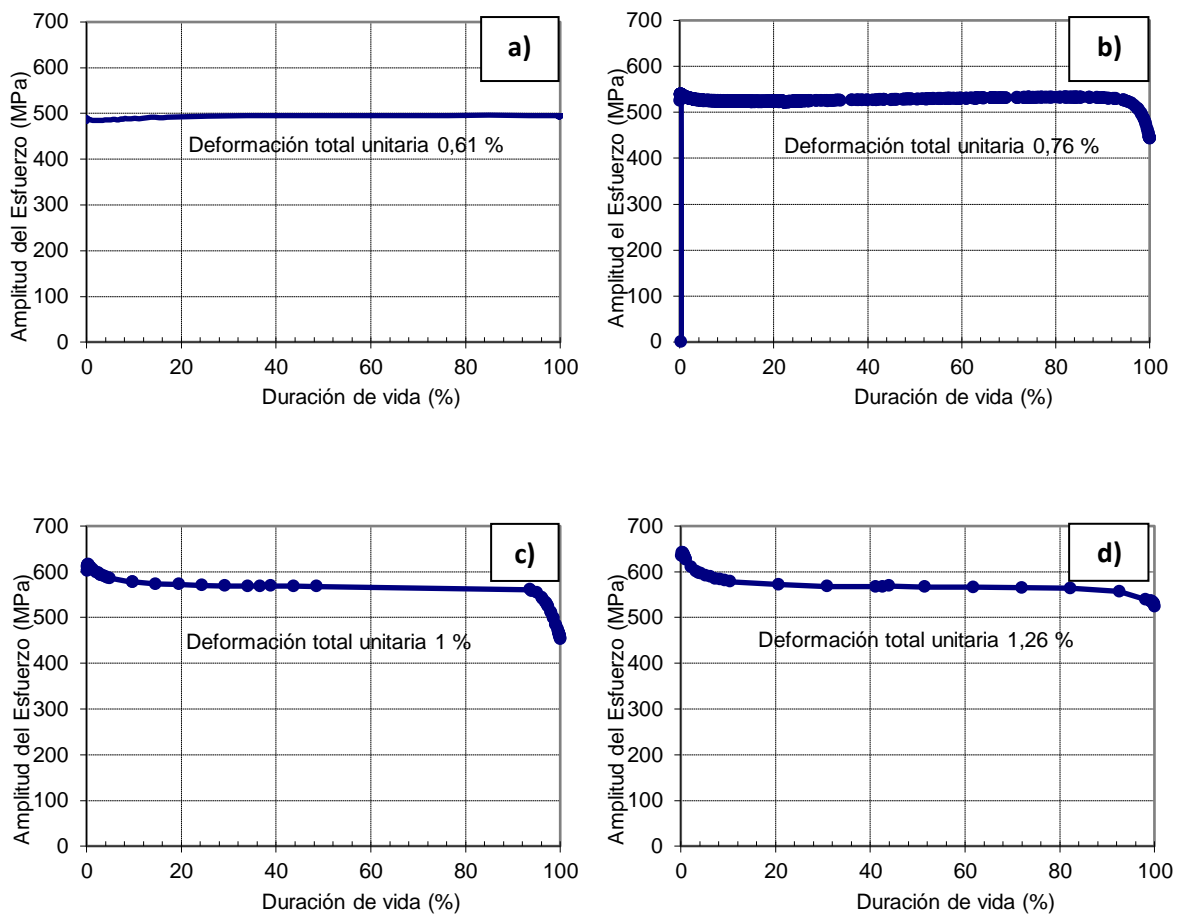


Figura 18 Amplitud del Esfuerzo versus Duración de vida para el acero recubierto por HVOF para los valores de deformación unitaria total, en a) 0,60%, en b) 0,76%, en c) 1% y en d) 1,26%.

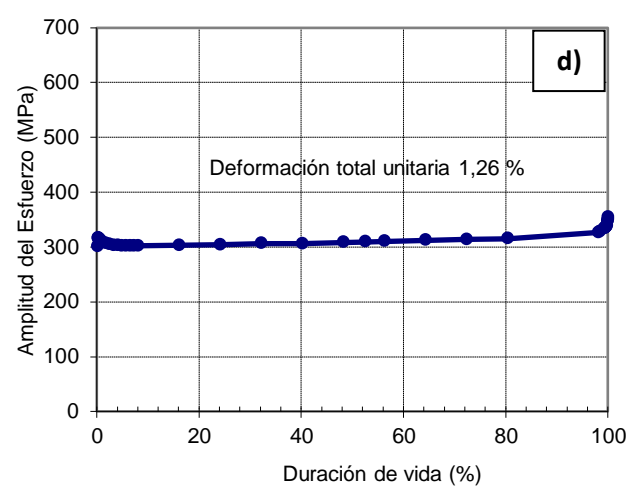
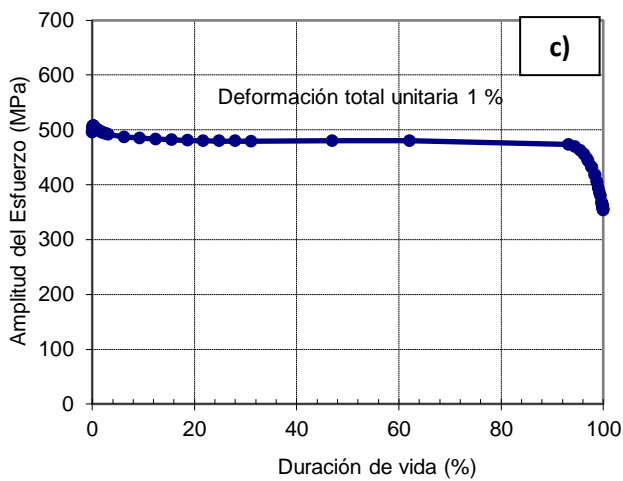
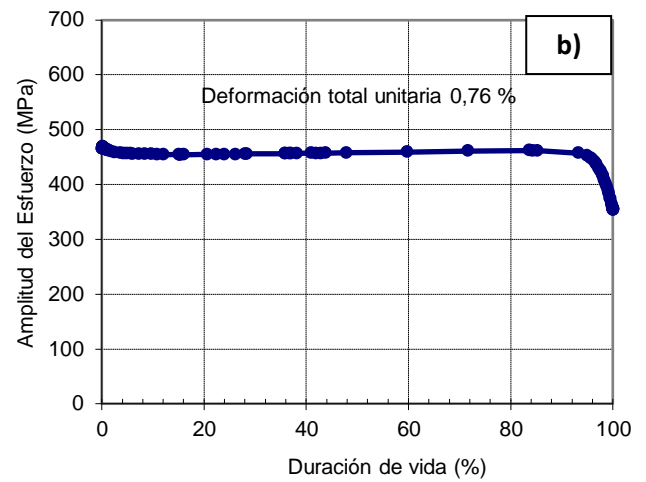
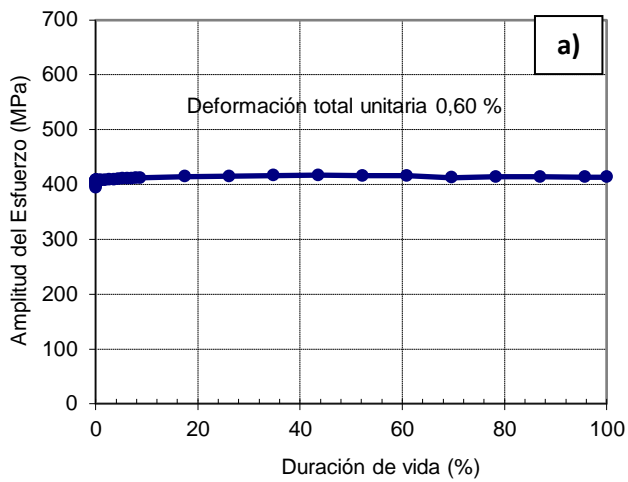
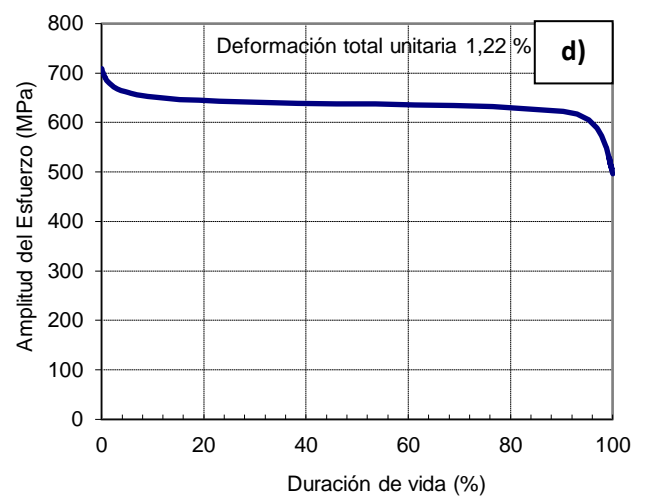
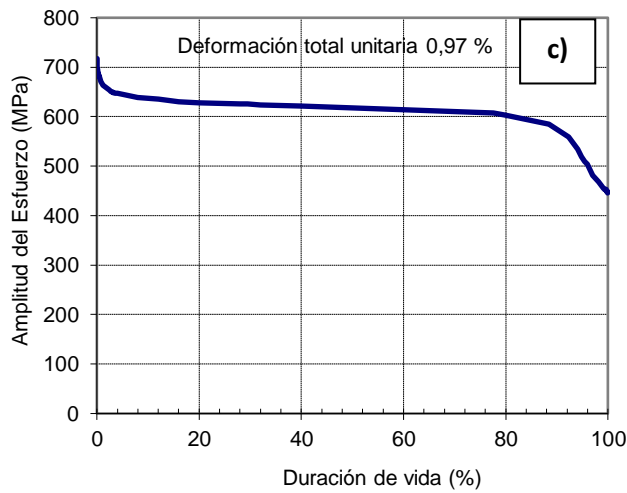
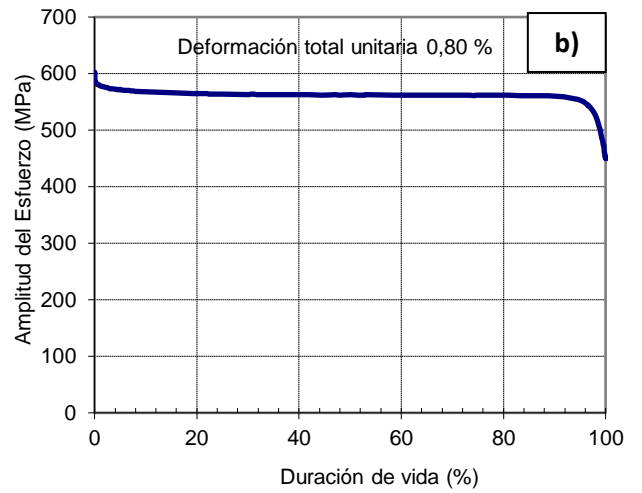
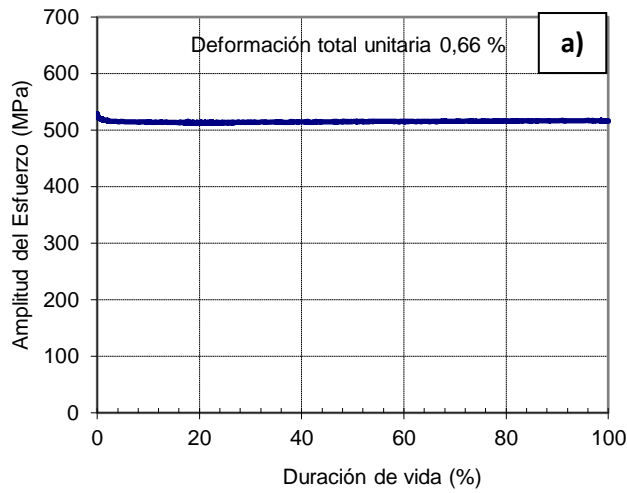


Figura 19. Amplitud del Esfuerzo versus Duración de vida para el acero tratado térmicamente sin recubrimiento para los valores de deformación unitaria total, en a) 0,66, en b) 0,80%, en c) 0,97% y en d) 1,22%.



4.2.4 Rango del Esfuerzo versus el Número de ciclos

Figura 20. Gráfica del Rango del Esfuerzo versus Número de ciclos para el acero sin recubrimiento

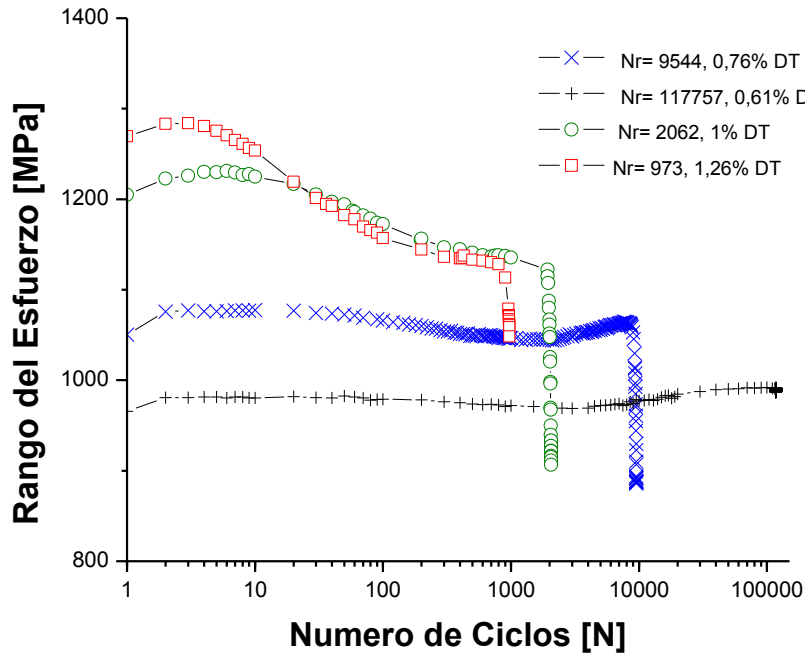


Figura 21. Gráfica del Rango del Esfuerzo versus Número de ciclos para el acero recubierto

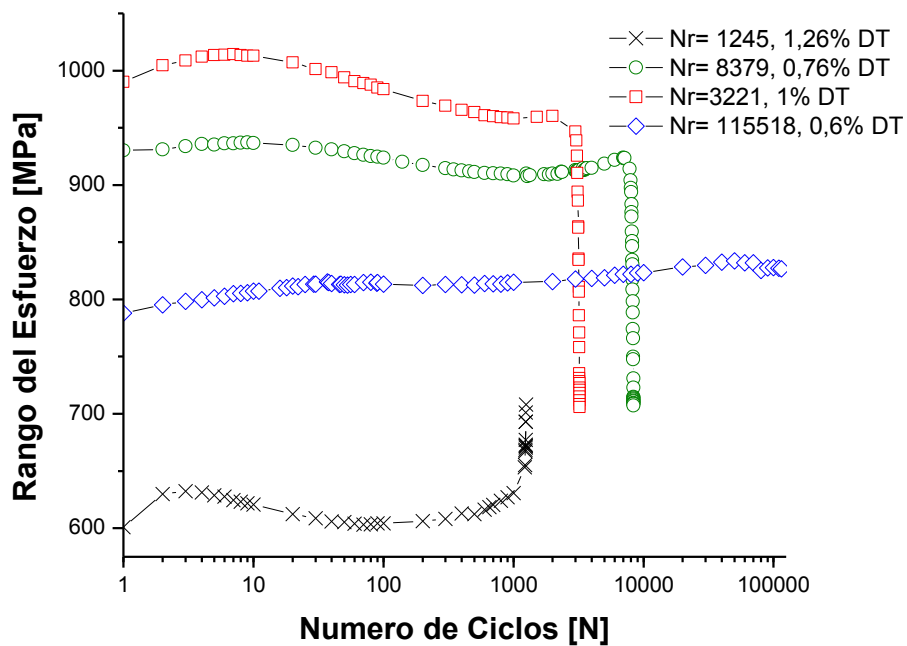
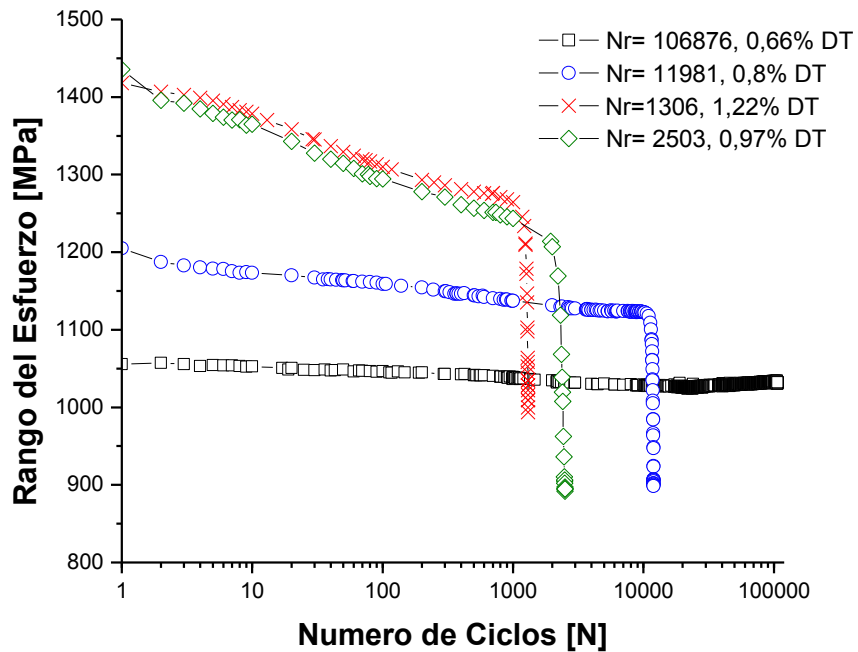


Figura 22. Gráfica del Rango del Esfuerzo versus Número de ciclos para el acero tratado térmicamente



4.2.5 Rango del Esfuerzo versus Duración de vida

Figura 23. Gráfica del Rango del Esfuerzo versus Duración de vida para el acero sin recubrimiento

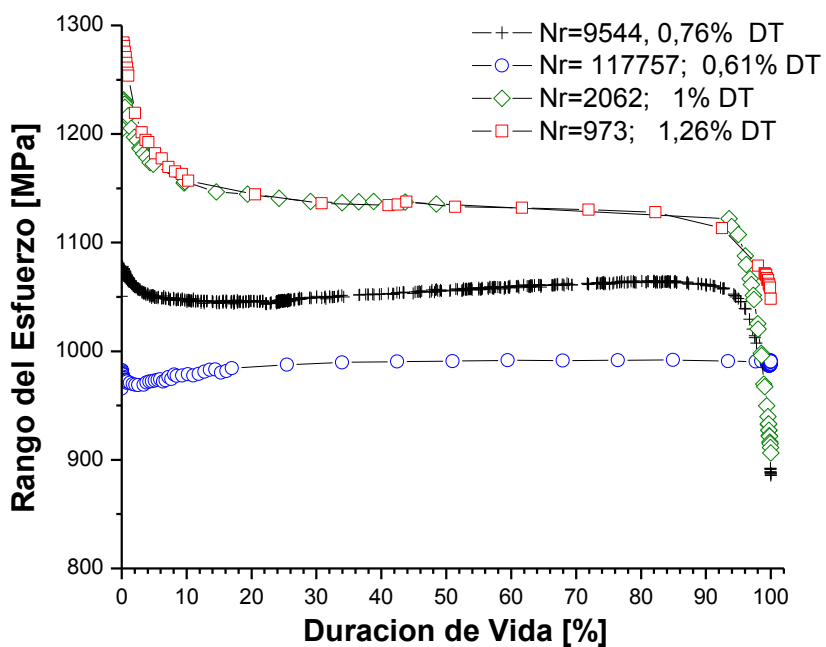


Figura 24. Gráfica del Rango del Esfuerzo versus Duración de vida para el acero recubierto

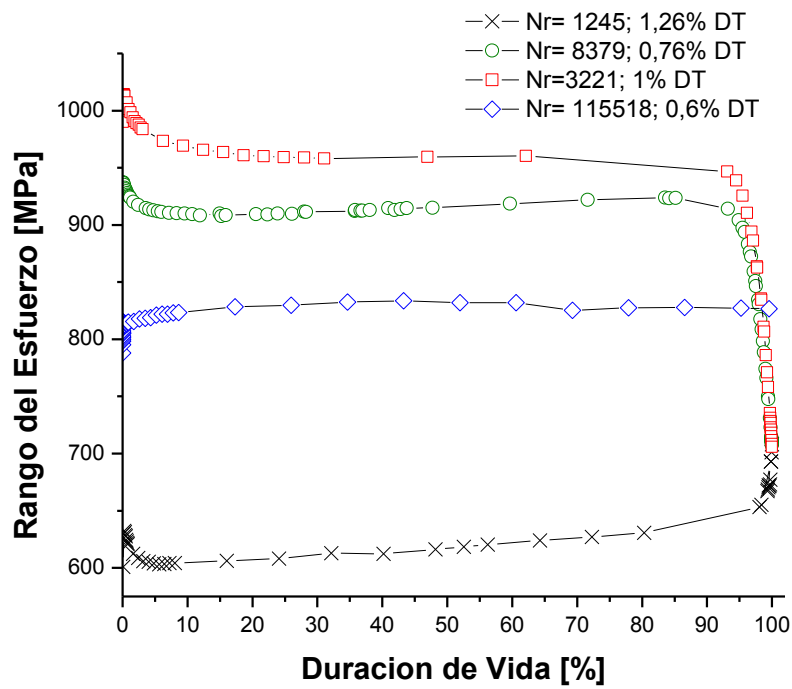
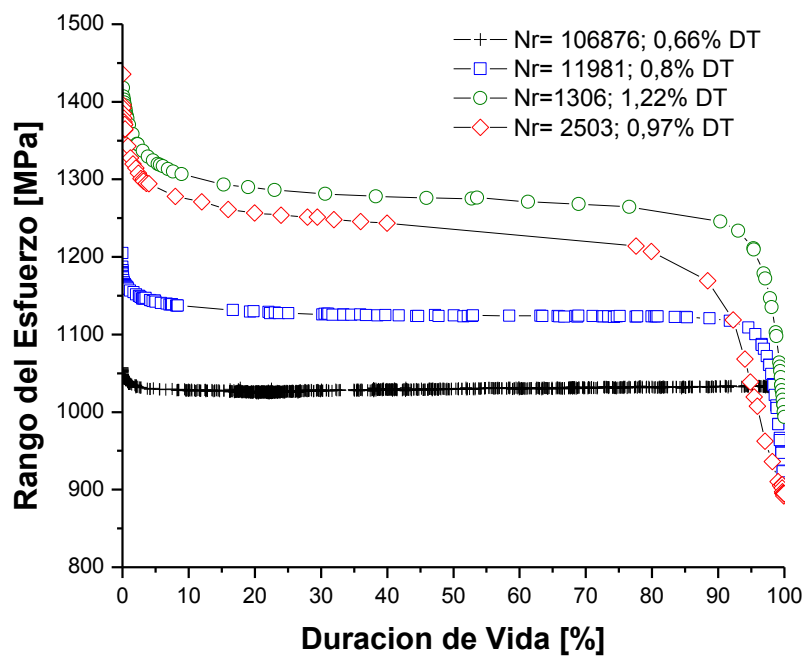


Figura 25. Gráfica del Rango del Esfuerzo versus Duración de vida para el acero tratado térmicamente sin recubrimiento



4.3 TIPO DE FRACTURA

Figura 26. Fractura dúctil con rotura a 45° del acero 35NCD16 a) Sin recubrimiento, b) Recubierto por HVOF

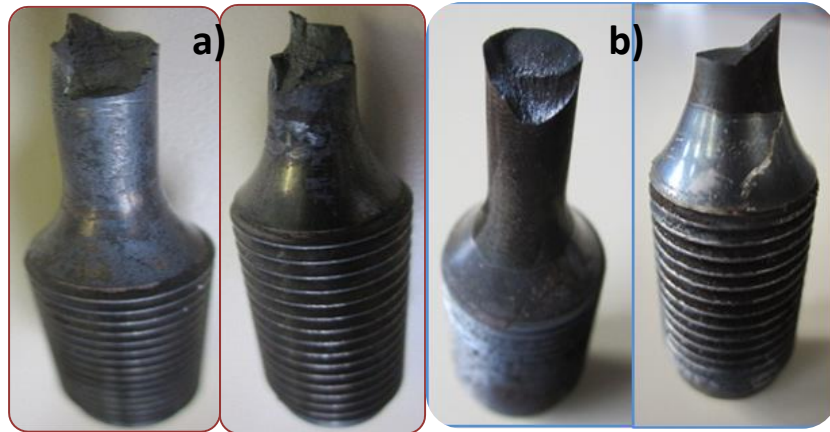
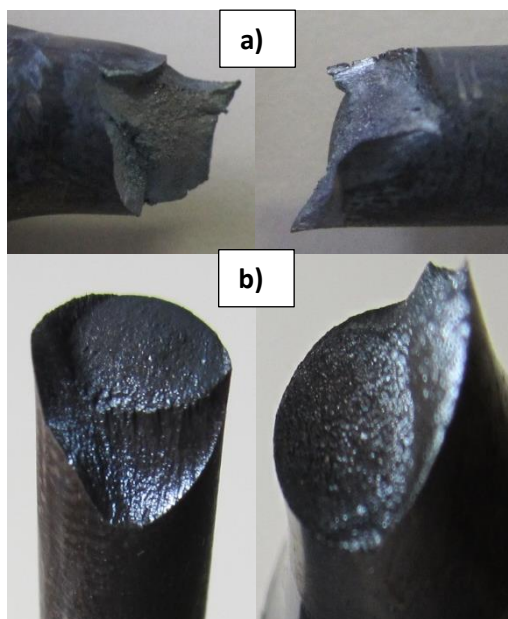
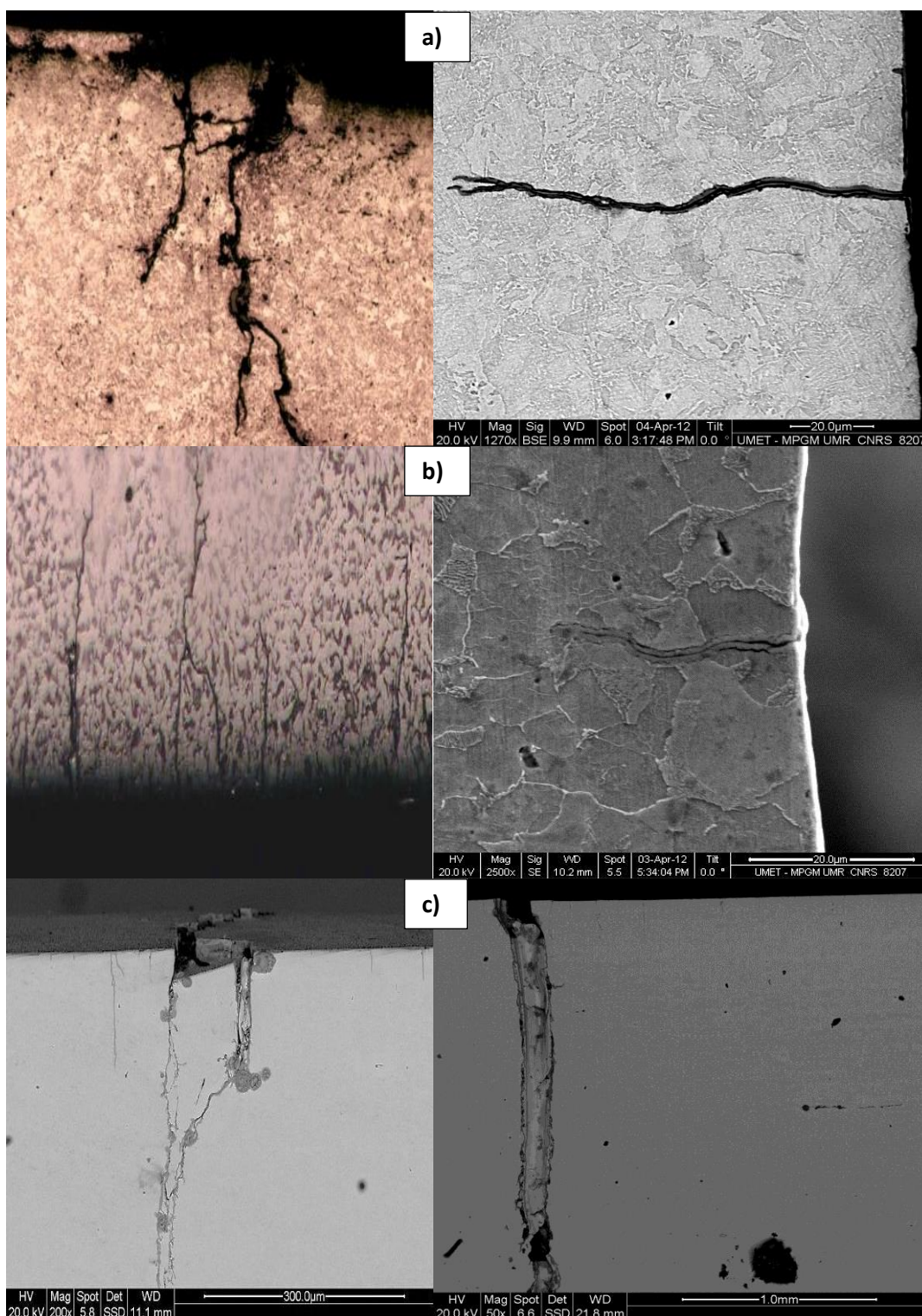


Figura 27. Detalle de las probetas que presentaron rotura del acero 35NCD16 a) Sin recubrimiento, b) Recubierto por HVOF



4.4 FORMA DE PROPAGACIÓN DE LAS FISURAS

Figura 28. Propagación y ramificación de fisuras en el acero 35NCD16 en a) sin recubrimiento, b) recubierto y c) tratado térmicamente, atacado químicamente con Nital al 5%



4.5 METALOGRAFÍA

Figura 29. Micrografía del acero 35NCD16 sin recubrimiento con deformación unitaria total de 1,26% y 973 ciclos en a) microscopía óptica a 500x y en b) microscopía electrónica de barrido a 1270x

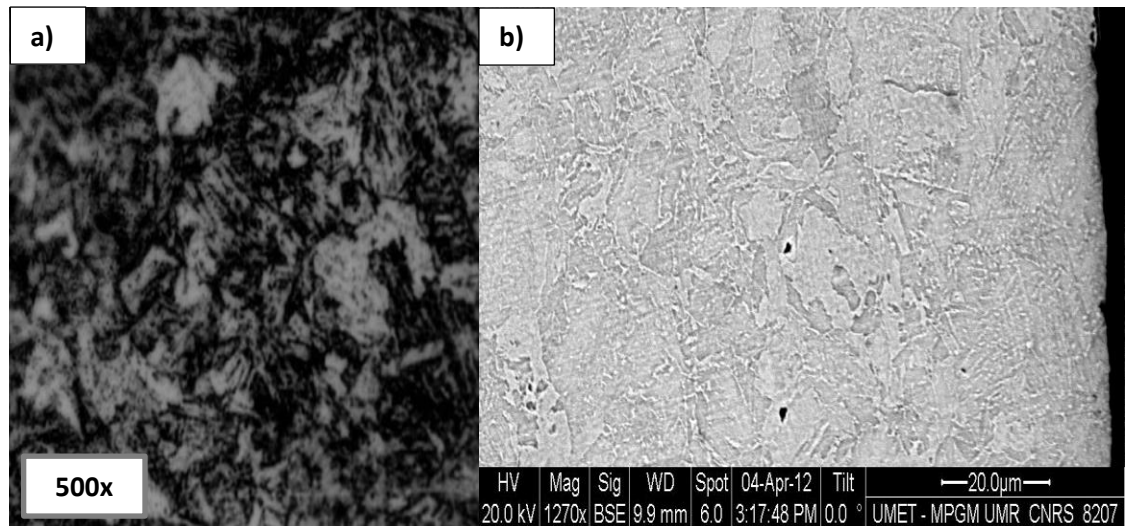


Figura 30. Micrografía del acero 35NCD16 recubierto por HVOF con Ni-Al con deformación unitaria total de 1,22% y 3221 ciclos, atacado químicamente con Nital al 5% en a) microscopía óptica a 500x y en b) microscopía electrónica de barrido a 1300x

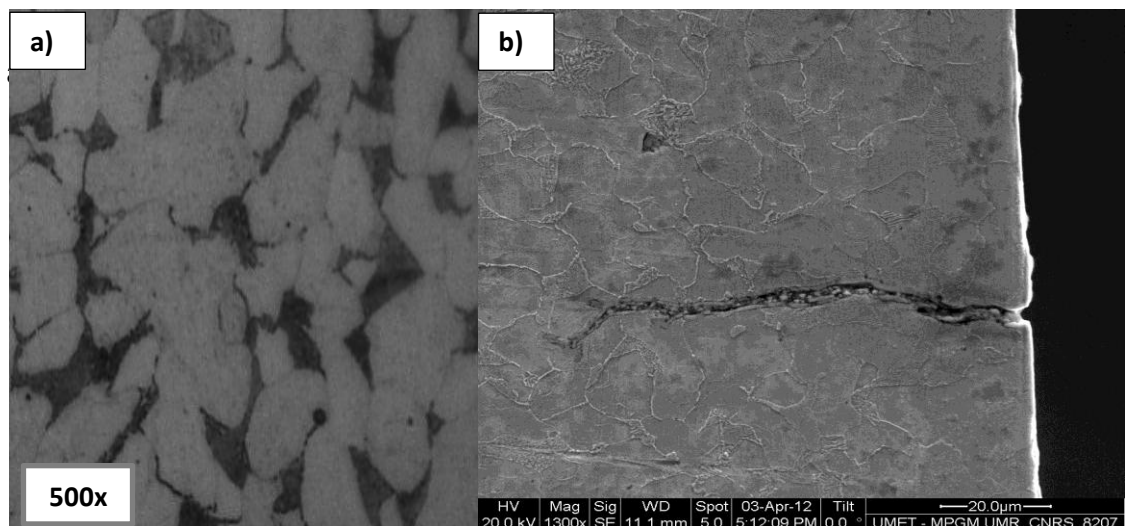
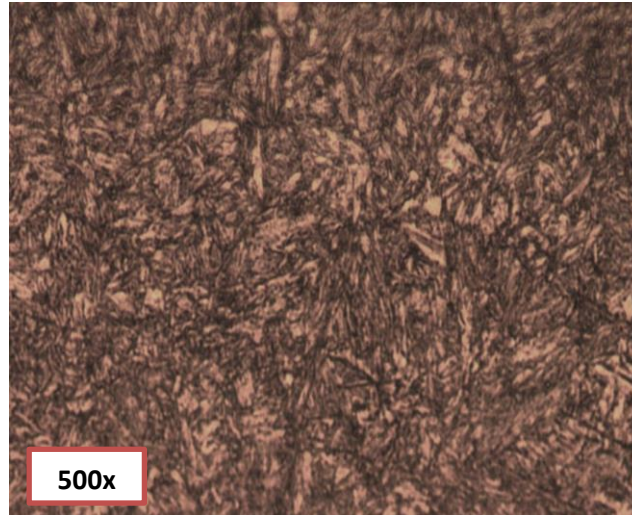


Figura 31. Micrografía del acero 35NCD16 tratado térmicamente sin recubrimiento con deformación total de 1,10% y 3032 ciclos, atacado químicamente con Nital al 5% en microscopía óptica a 500x



5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 RECEPCIÓN Y MEDICIÓN DE LAS PROBETAS

Las dimensiones registradas de longitud total, longitud efectiva y diámetro de la probeta para cada condición del acero, cumplieron con las especificaciones dadas por la norma ASTM E-8 para realizar el ensayo de fatiga.

5.2 ENSAYO DE FATIGA

El módulo de elasticidad es de 193500 [MPa] es igual en los tres casos, debido a que la composición del material es la misma para todas las probetas, razón por la cual no se especifica para cada uno de ellos por aparte.

De acuerdo a las tablas No. 7, 8 y 9, el comportamiento presentado para los porcentajes límites de deformación unitaria total de 0,60%, 0,76%, 1% y 1,26%, evidencia un mayor valor en el esfuerzo máximo para el acero tratado térmicamente, seguido del acero sin recubrimiento y en última posición el acero recubierto por HVOF. Por otra parte, el número de ciclos más bajo fue presentado en el acero sin recubrimiento con 973 ciclos para una deformación total unitaria de 1,26%, seguido del acero recubierto por HVOF con 1245 ciclos para una deformación de 1,26% y finalmente el acero tratado térmicamente con 1306 ciclos para una deformación total unitaria de 1,22%.

5.2.1 Amplitud del Esfuerzo versus Número de ciclos y Duración de vida

En las Fig. 14, 15, 16, 17, 18 y 19 se observó el comportamiento de cada condición del acero para la amplitud del esfuerzo versus el número de ciclos y la amplitud del esfuerzo versus su duración de vida. Estas curvas permiten obtener una idea general del comportamiento del material cuando es sometido a la aplicación de carga de manera cíclica.

La disminución de la amplitud del esfuerzo, es decir la iniciación temprana de la grieta, apenas en el comienzo de la vida total, puede ser explicada por concentradores de esfuerzo o defectos en la superficie del material que aceleran la iniciación de grietas en este caso por fatiga, esto no ocurre en materiales libres de defectos, en donde el tiempo de iniciación puede llegar al 80% de su vida útil [11].

5.2.2 Rango del Esfuerzo versus el Número de ciclos

La falla por fatiga resulta de la aplicación y remoción continua de una carga y puede suceder bajo elevado o reducido número de ciclos. Cuando el número de carga necesario para causar daño por fatiga es menor que 10^4 ciclos, la fatiga es denominada de bajo ciclo, en esta condición el material puede soportar elevadas deformaciones, en general superiores a aquellas asociadas al régimen elástico [11].

Las Fig. 20, 21 y 22, muestran que a mayor porcentaje de deformación total unitaria, el número de ciclos (N) es menor para cada probeta. A su vez se observó que para el valor de deformación total unitaria más bajo (0,60%), la probeta puede resistir mayor cantidad de ciclos sin llegar a la rotura, con lo cual es posible ubicar a esta probeta en fatiga de alto ciclo, debido a que supera notoriamente el valor límite de 10^4 ciclos.

5.2.3 Rango del Esfuerzo versus Duración de vida

La vida en fatiga es el número de ciclos de esfuerzo y deformación fluctuante que puede soportar un material antes de que se produzca un fallo, es función de la magnitud del esfuerzo fluctuante, de la geometría de la probeta y de las condiciones del ensayo.

En las Fig. 23, 24 y 25 predomina una disminución del rango del esfuerzo al comienzo, cuando el porcentaje de duración de vida es inferior a un cuarto de la duración de vida total; después las curvas se muestran constantes hasta el 75% de su vida en donde finalmente decrecen hasta completar su duración de vida.

5.3 TIPO DE FRACTURA

La fractura dúctil que es la etapa final del proceso de fatiga ocurre después de una intensa deformación plástica y se caracteriza por una lenta propagación de la grieta y ocurre cuando la grieta alcanza suficiente longitud, de manera que la sección transversal remanente no puede soportar la carga aplicada [9]

Todas las muestras fallaron en el área de ensayo (24 mm), es decir en la zona central de la probeta, como se observa en las Fig. 26 y 27 para el acero sin recubrimiento y el acero recubierto por HVOF.

En algunos ensayos de fatiga la grieta no alcanzó a propagarse hasta la rotura de la probeta debido a que el equipo controla el esfuerzo aplicado y una vez se alcanza un nivel de esfuerzo muy bajo o alto, la prueba se detiene.

Para las tres condiciones del acero en estudio, se encontró que el acero tratado térmicamente sin recubrimiento, no presentó rotura en ninguna de las probetas, a pesar de ser sometidas a las mismas condiciones del ensayo de fatiga, es decir, a temperatura constante de 450°C y valores de deformación unitaria total de 0,60%; 0,76%; 1% y 1,26%.

5.4 FORMA DE PROPAGACIÓN DE LAS FISURAS

Para ciertas composiciones bimaterial, la falta de adherencia cerca de la interface acero-recubrimiento, podría ser de interés sobre el comportamiento que puede presentar la grieta [1,24]. Investigaciones Analíticas de Fractura en [27,30], muestran que mediante una elección adecuada de los materiales, la propagación de grietas de fatiga podría ser inhibida o incluso impedida.

En el caso de aceros con recubrimientos de acuerdo con [6] se espera que las grietas nucleen en el material más duro, el recubrimiento y, a continuación, crezcan a través del acero, como lo presentado para las tres condiciones del acero el estudio.

En el presente estudio, las micrografías muestran que hubo propagación de grietas por fatiga para el acero en los tres estados analizados, se observa un camino de crecimiento transgranular, es decir las grietas se propagan a través de los granos (Ver Fig. 28). Además, todas las grietas se iniciaron en la superficie externa y su nucleación dependió del nivel del esfuerzo aplicado en cada caso. Por otra parte, las ramificaciones (Ver Fig. 28) son más gruesas en el acero sin recubrimiento (la fisura tiene una tendencia a la ramificación por lo que se divide en otras fisuras de menor tamaño y a diferente orientación de la fisura principal) que en los otros casos y también la longitud de las fisuras es mayor para este acero, seguido del acero con tratamiento térmico y finalmente el acero recubierto por HVOF.

5.5 METALOGRAFÍA

De manera general, se observaron los microconstituyentes ferrita y perlita (en el acero sin recubrimiento y el acero recubierto por HVOF), y martensita revenida en el acero con tratamiento térmico sin recubrimiento.

En la Fig. 29 es posible observar una matriz con presencia de ferrita y perlita como microconstituyentes, los cuales poseen bajas propiedades mecánicas en fatiga de acuerdo a los datos obtenidos por el ensayo de fatiga en donde claramente se puede observar que una matriz compuesta por estos microconstituyentes soportan menor carga. En la micrografía son distinguidos por su diferencia de tonalidad, la ferrita se observa en las zonas más claras de la matriz y la perlita en las zonas oscuras.

En la Fig. 30 es posible observar una matriz con unión en los bordes de grano entre las zonas blancas de la matriz correspondientes al microconstituyente ferrita cuyos granos son más definidos y se encuentran en mayor cantidad que los observados en el acero sin recubrimiento. Por otra parte, las regiones oscuras corresponden a la perlita y este microconstituyente muestra estructura laminar típica de un enfriamiento lento y está presente en menor proporción que en el acero sin recubrimiento, proporcionando una matriz con propiedades mecánicas correspondientes a la ferrita que está en mayor cantidad.

En la Fig. 31 es posible observar martensita revenida obtenida por el tratamiento térmico aplicado al acero. Con el temple y revenido alto se obtiene la mejor combinación de resistencia mecánica y ductilidad; por lo tanto esta matriz tiene una alta tenacidad (energía total que absorbe un material antes de alcanzar la rotura) y las mejores propiedades en fatiga verificado de acuerdo a los resultados obtenidos por el ensayo de fatiga en donde esta condición del acero soporta mayores esfuerzos en comparación con el acero sin recubrimiento y el acero recubierto por HVOF.

6. CONCLUSIONES

- Los tres estados analizados del acero 35NCD16 presentaron una condición microestructural característica y por lo tanto propiedades mecánicas diferentes, lo que produjo un comportamiento específico cuando fueron sometidos a ensayos de fatiga.
- Las grietas por fatiga de bajos ciclos se inician en la superficie externa y su nucleación se da en zonas de altos esfuerzos, las cuales pueden ser debidas al proceso de fabricación. El número de ciclos fue inversamente proporcional a la deformación aplicada, es decir a un valor menor en la deformación unitaria total, mayor cantidad de ciclos se invierten en la nucleación de la grieta.
- De acuerdo a los resultados obtenidos por el ensayo de fatiga, se determina que el acero recubierto por HVOF con Ni-Al soporta menos amplitud de esfuerzo y presenta menor número de ciclos comparado con el acero sin recubrimiento recocido a 680°C y el acero templado y revenido a 650°C ; la condición que presentó mejores propiedades en fatiga fue el acero tratado térmicamente sin recubrimiento.

7. RECOMENDACIONES

- Se recomienda utilizar un número de muestras mayor al estudiado para cada condición del acero (sin recubrimiento, recubierto por HVOF con Ni-Al y tratado térmicamente sin recubrimiento) para el ensayo de fatiga con el fin de tener mayores datos para los ensayos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Romeo and R. Ballarini, Int. J. Fract., vol. 65, pp. 183-196, 1994
- [2] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM Definitions of Terms Relating to Fatigue ASTM E1150
- [3] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM. Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens ASTM E3-01- 2010.
- [4] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM. Standard Recommended Practice for Constant-Amplitud Low Cycle Fatigue Testing ASTM E606
- [5] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials1 ASTM E8-2012
- [6] Bathias Claude, Bailon Jean Paul. La fatigue des matériaux et des structures. Collection Université de Compiègne. Maloine S.A. Editeur Paris. Pag. 70-74, 109-114, (1980).
- [7] BULTEL H., VOGT J.-B. Fatigue damage of a steel-nickel bimaterial. Unité Matériaux et Transformations, Université des Sciences et Technologies de Lille. (2011)
- [8] CARPOFORO V. MARTIN. Tesis: "Crecimiento de grietas pequeñas por fatiga en componentes con concentradores de tensión" Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad de Sevilla. (1998)
- [9] Dieter, George E. Mechanical Metallurgy. McGraw Hill Book Company. SI metric edition 1988, pp. 211- 212, 296-301,
- [10] ESTRADA J. Tipos de Fracturas Mecánicas en los Materiales. Universidad de san Carlos. Facultad de Ingeniería metalurgia y metalografía. (2007) Recurso en línea en: <http://www.monografias.com/trabajos46/fracturas-mecanicas/fracturas-mecanicas.shtml>

- [11] Estudio Constitutivo de Materiales compuestos laminados sometidos a cargas cíclicas. Fatiga en Materiales compuestos: comportamiento y mecanismos de degradación. Recurso disponible en línea en : <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6860/02CAPITULO.pdf?sequence=3>
- [12] Fatiga de materiales. Curva de Wöhler (S-N). Recurso disponible en línea en: <http://fisica.laguia2000.com/complementos-matematicos/fatiga-de-materiales-curva-de-wohler-s-n>
- [13] Fatiga en materiales compuestos: comportamiento y mecanismos de degradación. Recurso disponible en línea en: <http://www.monografias.com/trabajos46/fracturas-mecanicas/fracturas-mecanicas.shtml>
- [14] Ficha técnica del acero 35NCD16. Aubert y Duval. Recurso en línea en http://www.aubertduval.com/uploads/tx_obladygestionproduit/fr_819AW.pdf
- [15] F.J.BELZUNCE. Aceros y Fundiciones: Estructuras, transformaciones, tratamientos térmicos y aplicaciones. Universidad de Oviedo, (2001)
- [16] Forsyth P.J.E (1969), The Physical Basis of Metal Fatigue, American Elsevier Publishing Co. Inc., New York
- [17] GOMEZ GARCIA J. Tesis: "Análisis de la degradación de recubrimientos de barrera térmica mediante espectroscopia de impedancia electroquímica".2009
- [18] JAIMES SUAREZ A. Tesis: "Correlación impacto-fatiga: optimización de criterios de selección de materiales para varillas de pozo" Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia De Materiales, 2005.
- [19] Jiménez R, José. Diagrama Hierro-Carbono. Departamento de Tecnología I.E.S Sierra Mágina. Recurso disponible en línea en: http://www.juntadeandalucia.es/averroes/~23005153/d_tecnologia/bajables/2%20bachillerato/fec%20II.pdf

- [20] Marin Villar, Camilo. Thermal Spray. Protection d'haut impacte, 2010. Pag 40-45
- [21] Mehrshad Moshref Javadi¹⁾, Hossein Edris²⁾ and Mahdi Salehi²⁾. Plasma Sprayed NiAl Intermetallic Coating Produced with Mechanically Alloyed Powder J. Mater. Sci. Technol., 2011, 27(9), 816-820.
- [22] Metalurgia Mecánica. Jorge Luis González V. Editorial LIMUSA S.A. Grupo Noriega Editores, pp. 186-200, 2003
- [23] Miller, K.J. (1993), The Two Threshold of Fatigue Behaviour, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. 16, No. 9, pp. 931-933
- [24] O. Culhaa, E. Celika, N.F. AkAzema, I. Birlik , M. Toparlia, A. Turk. Microstructural, thermal and mechanical properties of HVOF sprayed Ni–Al-based bond coatings on stainless steel substrate, (2007).
- [25] P. Delfin, J. Gunnars and P. Ståhle, Fatigue Fract. Engng.Mater.Struct., vol. 18, pp. 1201-1212, 1995
- [26] PROYECCIÓN TÉRMICA PARA MATRICES (06/10/2013) Informe del AIMME- Instituto Tecnológico Metalmecánico. Disponible en internet: http://observatorio.aimme.es/otea_document.asp?id=4987&n=1
- [27] S. Suresh, Y. Sugimura and E.K. Tschegg, Scripta Metal.Mater., vol. 27, pp. 1189-1194, 1992.
- [28] S. Suresh, Y. Sugimura and T. Ogawa. Fatigue cracking in materials with brittle surface coatings.
- [29] Vogt J. B, O. Boussac and J. Foct: Prediction of fatigue resistance of a hit-dip galvanized steel, Fatigue Fract Engng Mater Struct, 23 (2001), 33-39
- [30] Y.Sugimura, L. Grondin and S. Suresh, Scripta Metal. Mater., vol. 33, pp. 2007- 2012, 1995
- [31] ZABALA C, LUIS E. Tesis: “Comportamiento en fatiga plástica del acero AISI 304H envejecido a 800°C” Universidad Industrial de Santander (2003)

ANEXOS

ANEXO A. Composición química de los reactivos utilizados

Nombre del producto : POLYFAST

Uso: utilizado para encapsular las muestras

El producto contiene: resina y materiales de empaque

Composición química:

%	Nombre químico
<1	Fénol
30-60	Resina
30-60	Material de relleno

Nombre del producto: DP- Lubricante azul

Uso: refrigerante y lubricante a utilizar para afinar el pulido de muestras metalográficas.

Composición química:

%	Nombre químico
70-85	Etanol
5-15	2-Propanol
5-15	Etil-englicol
<0,1	Material colorante azul

ANEXO B. Protocolo de metalografía

Matériaux : 35NCD16, Investigador: JB.VOGT, Método: pulido manual

	Tipo de paño	Granulometría	Velocidad t/min	Tiempo	Lubricante
1	SiC	500	150	1 min	Agua
2		800	150	1min	
3		1200	150	1min	
4		2400	150	1min	
5	Paño	Pasta diamante 3 μ	150	1min	Azul
6	Paño	Pasta diamante 1 μ	150	1min	

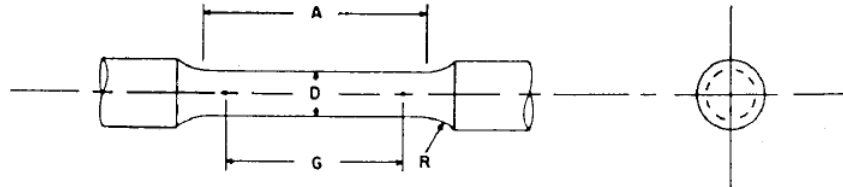
Objetivo :Ataque químico para revelar la microestructura

Material	Solución	Tiempo	Temperatura
Acero 35NCD16	Nital 5% (HNO ₃ 5% y Etanol 95%)	5s	Ambiente

ANEXO C. Morfología y dimensiones de la probeta según norma ASTM E-8

La morfología y dimensiones de las probetas según la norma ASTM E-8 para ensayo a fatiga se muestran a continuación:

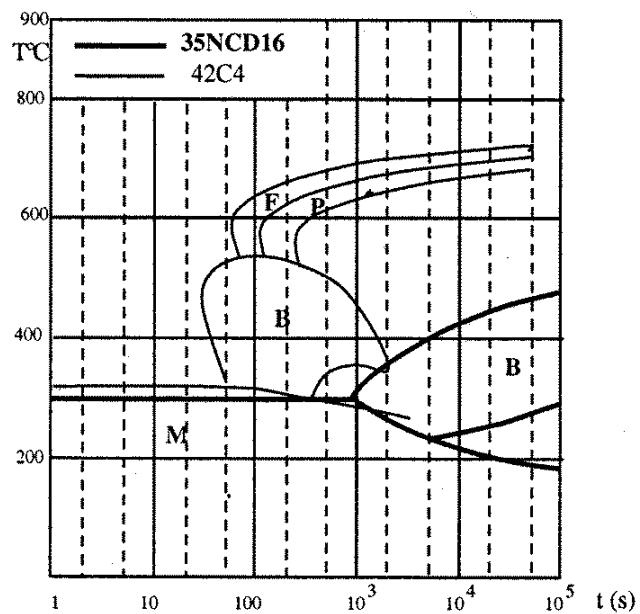
Morfología de probeta cilíndrica según la norma ASTM E8



Dimensiones para probeta cilíndrica según norma ASTM E8

	Descripción	Dimensiones [mm]
G	Longitud de referencia	24.0 ± 0.1
D	Diámetro	6.0 ± 0.1
R	Radio del Filete	6.0
A	Longitud de la Sección reducida	30.0

ANEXO D. Diagrama TTT del acero 35NCD16 dado por el fabricante



ANEXO E. Datos para la elaboración de gráficas de fatiga correspondientes al acero sin recubrimiento para la probeta con deformación unitaria total de 0,61%

No. de ciclos	Esfuerzo max (MPa)	Esfuerzo min (MPa)	Rango del Esfuerzo (MPa)	Amplitud del Esfuerzo (MPa)	Deformación total %
1	487,607	-477,888	965,495	482,7	0,6040
2	502,815	-478,066	980,882	490,4	0,6045
3	503,098	-477,567	980,665	490,3	0,6105
4	503,924	-477,578	981,502	490,8	0,6120
5	503,940	-477,458	981,398	490,7	0,6120
6	501,840	-478,707	980,547	490,3	0,6135
7	503,584	-477,801	981,385	490,7	0,6095
8	502,104	-479,205	981,309	490,7	0,6085
9	501,330	-479,061	980,391	490,2	0,6035
10	503,042	-477,443	980,485	490,2	0,6010
20	501,811	-479,848	981,659	490,8	0,6020
30	499,383	-481,226	980,609	490,3	0,6020
40	497,626	-482,710	980,336	490,2	0,6105
50	497,726	-484,753	982,479	491,2	0,5995
60	499,515	-481,984	981,499	490,7	0,6105
70	503,322	-477,044	980,366	490,2	0,6090
80	504,729	-473,102	977,831	488,9	0,6095
90	508,023	-470,500	978,523	489,3	0,6060
100	509,716	-469,373	979,088	489,5	0,6100
200	503,375	-475,019	978,394	489,2	0,6115
300	508,867	-467,472	976,339	488,2	0,6035
400	499,107	-476,086	975,194	487,6	0,6100
500	508,101	-465,813	973,914	487,0	0,6105
600	515,237	-457,966	973,203	486,6	0,6040

ANEXO F. Datos para la elaboración de gráficas de fatiga correspondientes al acero sin recubrimiento para la probeta con deformación unitaria total de 0,76%

No. de Ciclos	Esfuerzo max (MPa)	Esfuerzo min (MPa)	Rango del Esfuerzo (MPa)	Amplitud del Esfuerzo (MPa)	Deformación total %
1	531,813	-518,761	1050,574	525,3	0,755
2	557,827	-517,851	1075,678	537,8	0,760
3	559,227	-517,945	1077,172	538,6	0,756
4	559,764	-516,32	1076,084	538,0	0,759
5	561,445	-514,676	1076,121	538,1	0,757
6	561,73	-514,792	1076,522	538,3	0,754
7	561,649	-515,614	1077,263	538,6	0,758
8	561,388	-515,92	1077,307	538,7	0,752
9	561,696	-514,97	1076,666	538,3	0,758
10	562,915	-514,708	1077,622	538,8	0,758
11	564,259	-512,85	1077,108	538,6	0,760
13	563,839	-513,9	1077,739	538,9	0,755
14	564,371	-513,779	1078,150	539,1	0,757
15	563,658	-512,132	1075,790	537,9	0,755
16	565,591	-512,479	1078,000	539,0	0,755
17	564,858	-511,82	1076,678	538,3	0,760
18	565,128	-510,638	1075,766	537,8	0,756
19	565,978	-510,951	1076,929	538,5	0,755
20	564,566	-512,299	1076,865	538,4	0,759
21	564,639	-511,523	1076,162	538,1	0,754
22	565,205	-510,887	1076,092	538,0	0,754
23	565,411	-510,282	1075,693	537,8	0,758
24	565,166	-510,727	1075,892	537,9	0,754
25	564,391	-511,435	1075,826	537,9	0,757

ANEXO G. Datos para la elaboración de gráficas de fatiga correspondientes al acero sin recubrimiento para la probeta con deformación unitaria total de 1%

No. de ciclos	Esfuerzo max (MPa)	Esfuerzo min (MPa)	Rango del Esfuerzo (MPa)	Amplitud del Esfuerzo (MPa)	Deformación total %
1	593,050	-611,644	1204,694	602,3	1,049
2	612,758	-610,089	1222,847	611,4	1,040
3	616,425	-609,492	1225,917	613,0	1,035
4	618,605	-611,542	1230,147	615,1	1,050
5	618,560	-611,141	1229,700	614,9	1,042
6	619,680	-611,624	1231,304	615,7	1,045
7	620,040	-609,502	1229,542	614,8	1,060
8	619,704	-607,025	1226,730	613,4	1,035
9	619,167	-608,547	1227,713	613,9	1,056
10	617,287	-607,501	1224,788	612,4	1,036
20	616,025	-600,597	1216,622	608,3	1,040
30	612,843	-592,478	1205,322	602,7	1,042
40	609,861	-587,370	1197,231	598,6	1,038
50	608,702	-585,465	1194,167	597,1	1,030
58	605,934	-581,171	1187,105	593,6	1,038
60	604,761	-581,099	1185,860	592,9	1,054
70	604,777	-577,224	1182,001	591,0	1,050
80	605,208	-573,119	1178,327	589,2	1,029
90	602,868	-570,905	1173,773	586,9	1,041
100	601,061	-571,256	1172,316	586,2	1,043
198	595,325	-559,620	1154,945	577,5	1,055
200	594,639	-561,499	1156,138	578,1	1,047
300	588,996	-557,621	1146,617	573,3	1,039
400	587,890	-556,832	1144,722	572,4	1,038

ANEXO H. Datos para la elaboración de gráficas de fatiga correspondientes al acero sin recubrimiento para la probeta con deformación unitaria total de 1,26%

No. de ciclos	Esfuerzo max (MPa)	Esfuerzo min (MPa)	Rango del Esfuerzo (MPa)	Amplitud del Esfuerzo (MPa)	Deformación total %
1	640,074	-629,400	1269,473	634,7	1,276
2	650,212	-632,940	1283,152	641,6	1,251
3	651,242	-632,863	1284,106	642,1	1,268
4	649,466	-631,421	1280,887	640,4	1,261
5	648,029	-627,531	1275,560	637,8	1,254
6	645,218	-625,488	1270,706	635,4	1,279
7	642,901	-622,563	1265,464	632,7	1,251
8	641,116	-619,932	1261,048	630,5	1,277
9	640,598	-615,755	1256,353	628,2	1,274
10	637,148	-616,490	1253,638	626,8	1,262
20	619,045	-600,212	1219,256	609,6	1,274
30	613,649	-587,753	1201,403	600,7	1,244
36	606,482	-588,029	1194,511	597,3	1,285
40	606,414	-586,160	1192,574	596,3	1,279
50	603,672	-578,491	1182,163	591,1	1,274
60	599,310	-578,296	1177,606	588,8	1,273
70	597,460	-572,248	1169,708	584,9	1,247
80	594,706	-570,897	1165,603	582,8	1,268
90	593,598	-569,412	1163,010	581,5	1,273
100	589,718	-567,316	1157,034	578,5	1,258
200	585,473	-558,968	1144,441	572,2	1,273
300	581,978	-554,234	1136,211	568,1	1,269
400	580,733	-553,586	1134,319	567,2	1,254
414	576,105	-559,027	1135,132	567,6	1,268

ANEXO I. Datos para la elaboración de gráficas de fatiga correspondientes al acero recubierto por HVOF para la probeta con deformación unitaria total de 0,60%

No. de ciclos	Esfuerzo max (MPa)	Esfuerzo min (MPa)	Rango del Esfuerzo (MPa)	Amplitud del Esfuerzo (MPa)	Deformación total %
1	396,541	-391,520	788,061	394,0	0,605
2	403,161	-391,956	795,118	397,6	0,608
3	406,703	-391,626	798,329	399,2	0,617
4	408,112	-391,502	799,615	399,8	0,604
5	409,477	-391,875	801,352	400,7	0,617
6	410,675	-392,179	802,854	401,4	0,613
7	411,912	-392,979	804,891	402,4	0,599
8	411,933	-393,453	805,386	402,7	0,616
9	412,360	-393,389	805,749	402,9	0,608
10	413,205	-393,996	807,201	403,6	0,606
11	414,023	-393,313	807,336	403,7	0,618
16	417,170	-392,560	809,730	404,9	0,615
18	419,596	-390,760	810,356	405,2	0,608
20	420,810	-390,738	811,548	405,8	0,615
22	420,464	-390,586	811,050	405,5	0,609
25	422,331	-390,818	813,150	406,6	0,616
29	424,154	-389,056	813,209	406,6	0,614
30	424,438	-388,921	813,359	406,7	0,612
37	421,702	-393,567	815,269	407,6	0,603
38	418,891	-395,942	814,834	407,4	0,608
40	416,698	-397,299	813,997	407,0	0,599
46	419,665	-393,433	813,098	406,5	0,615
47	419,850	-393,503	813,352	406,7	0,597
50	418,768	-393,945	812,713	406,4	0,616

ANEXO J. Datos para la elaboración de gráficas de fatiga correspondientes al acero recubierto por HVOF para la probeta con deformación unitaria total de 0,76%

No. de ciclos	Esfuerzo max (MPa)	Esfuerzo min (MPa)	Rango del Esfuerzo (MPa)	Amplitud del Esfuerzo (MPa)	Deformación total %
1	457,478	-472,742	930,220	465,1	0,7615
2	462,285	-468,778	931,063	465,5	0,7660
3	465,772	-468,165	933,937	467,0	0,7575
4	467,245	-468,464	935,709	467,9	0,7625
5	468,153	-467,265	935,418	467,7	0,7660
6	469,326	-466,947	936,273	468,1	0,7565
7	469,870	-466,577	936,447	468,2	0,7625
8	470,220	-466,700	936,920	468,5	0,7595
9	470,440	-466,746	937,186	468,6	0,7620
10	470,875	-465,764	936,639	468,3	0,7595
20	470,073	-465,073	935,147	467,6	0,7625
30	463,666	-468,700	932,365	466,2	0,7635
40	466,163	-465,058	931,221	465,6	0,7565
50	467,572	-461,881	929,453	464,7	0,7650
60	468,178	-459,710	927,887	463,9	0,7645
70	468,817	-457,586	926,403	463,2	0,7640
80	468,775	-456,395	925,170	462,6	0,7635
90	470,157	-454,531	924,688	462,3	0,7555
100	470,814	-453,089	923,903	462,0	0,7635
140	464,747	-455,586	920,333	460,2	0,7650
200	466,472	-451,016	917,488	458,7	0,7650
300	468,122	-446,457	914,579	457,3	0,7645
346	470,923	-442,618	913,540	456,8	0,7580
400	469,517	-443,083	912,600	456,3	0,7610

ANEXO K. Datos para la elaboración de gráficas de fatiga correspondientes al acero recubierto por HVOF para la probeta con deformación unitaria total de 1%

No. de ciclos	Esfuerzo max (MPa)	Esfuerzo min (MPa)	Rango del Esfuerzo (MPa)	Amplitud del Esfuerzo (MPa)	Deformación total %
1	487,974	-502,295	990,269	495,1	1,008
2	494,434	-510,148	1004,581	502,3	0,998
3	496,978	-511,774	1008,751	504,4	0,999
4	499,079	-513,127	1012,206	506,1	1,007
5	500,607	-512,785	1013,392	506,7	0,999
6	500,949	-512,949	1013,898	506,9	1,004
7	501,683	-512,545	1014,228	507,1	0,998
8	501,038	-512,374	1013,412	506,7	0,998
9	501,480	-511,391	1012,871	506,4	1,004
10	502,010	-510,910	1012,920	506,5	1,000
20	502,250	-504,830	1007,079	503,5	1,001
30	501,159	-500,073	1001,231	500,6	1,002
40	500,331	-498,062	998,392	499,2	1,003
50	498,705	-495,240	993,945	497,0	0,998
60	498,041	-492,700	990,741	495,4	0,997
70	498,859	-490,290	989,149	494,6	1,002
80	497,479	-490,247	987,726	493,9	1,004
90	496,622	-488,482	985,104	492,6	1,002
100	496,260	-487,448	983,709	491,9	0,997
200	493,874	-479,666	973,540	486,8	1,004
300	492,967	-476,409	969,377	484,7	1,001
400	490,528	-475,104	965,632	482,8	1,000
500	490,403	-473,267	963,670	481,8	0,997
600	489,603	-471,319	960,922	480,5	1,003

ANEXO L. Datos para elaboración de gráficas de fatiga correspondientes al acero recubierto por HVOF para la probeta con deformación unitaria total de 1,26%

No. de ciclos	Esfuerzo max (MPa)	Esfuerzo min (MPa)	Rango del Esfuerzo (MPa)	Amplitud del Esfuerzo (MPa)	Deformación total %
1	305,159	-295,596	600,755	300,4	1,276
2	328,011	-301,874	629,884	314,9	1,256
3	330,577	-301,762	632,339	316,2	1,268
4	330,163	-300,996	631,159	315,6	1,260
5	328,876	-299,815	628,691	314,3	1,268
6	328,356	-299,150	627,506	313,8	1,266
7	327,840	-296,760	624,600	312,3	1,264
8	325,978	-297,252	623,231	311,6	1,246
9	325,555	-296,206	621,761	310,9	1,270
10	324,996	-295,704	620,700	310,4	1,272
20	321,809	-290,608	612,417	306,2	1,256
30	318,763	-289,85	608,613	304,3	1,252
40	317,920	-288,009	605,928	303,0	1,250
50	317,156	-288,190	605,346	302,7	1,268
60	316,451	-287,406	603,857	301,9	1,258
70	316,290	-286,727	603,017	301,5	1,254
80	316,474	-286,959	603,433	301,7	1,256
90	316,841	-287,293	604,134	302,1	1,260
100	318,032	-286,247	604,279	302,1	1,268
200	317,212	-288,857	606,070	303,0	1,254
300	318,861	-289,374	608,234	304,1	1,250
400	321,620	-291,113	612,734	306,4	1,262
500	321,147	-291,058	612,206	306,1	1,252
600	323,667	-292,632	616,299	308,1	1,270

ANEXO M. Datos para elaboración de gráficas de fatiga correspondientes al acero tratado térmicamente sin recubrimiento para la probeta con deformación unitaria total de 0,66%

No. de ciclos	Esfuerzo max (MPa)	Esfuerzo min (MPa)	Rango del Esfuerzo (MPa)	Amplitud del Esfuerzo (MPa)	Deformación total %
1	511,052	-544,523	1055,575	527,8	0,6610
2	510,402	-546,723	1057,124	528,6	0,6585
3	508,943	-546,526	1055,469	527,7	0,6585
4	509,798	-543,386	1053,184	526,6	0,6630
5	511,607	-542,824	1054,431	527,2	0,6635
6	510,520	-543,577	1054,098	527,0	0,6635
7	508,141	-545,986	1054,127	527,1	0,6610
8	506,856	-546,129	1052,985	526,5	0,6580
9	504,584	-547,836	1052,420	526,2	0,6580
10	504,050	-548,589	1052,639	526,3	0,6570
17	499,977	-550,594	1050,571	525,3	0,6540
19	502,339	-546,366	1048,704	524,4	0,6595
20	503,469	-547,112	1050,581	525,3	0,6575
25	506,223	-542,192	1048,414	524,2	0,6600
30	506,725	-540,909	1047,634	523,8	0,6560
36	503,176	-545,510	1048,686	524,3	0,6600
40	501,324	-546,087	1047,411	523,7	0,6615
43	499,093	-548,794	1047,887	523,9	0,6580
50	498,948	-549,534	1048,482	524,2	0,6520
60	497,582	-548,740	1046,322	523,2	0,6560
66	495,034	-552,462	1047,496	523,7	0,6530
70	492,028	-554,852	1046,879	523,4	0,6565
80	489,597	-557,046	1046,643	523,3	0,6565
90	492,129	-553,596	1045,725	522,9	0,6605

ANEXO N. Datos para elaboración de gráficas de fatiga correspondientes al acero tratado térmicamente sin recubrimiento para la probeta con deformación unitaria total de 0,80%

No. de ciclos	Esfuerzo max (MPa)	Esfuerzo min (MPa)	Rango del Esfuerzo (MPa)	Amplitud del Esfuerzo (MPa)	Deformación total %
1	579,974	-625,030	1205,005	602,5	0,799
2	565,329	-621,952	1187,281	593,6	0,808
3	563,524	-619,122	1182,646	591,3	0,805
4	562,698	-617,807	1180,505	590,3	0,798
5	562,216	-616,504	1178,719	589,4	0,802
6	562,208	-616,021	1178,230	589,1	0,797
7	560,369	-614,920	1175,289	587,6	0,805
8	560,965	-612,302	1173,267	586,6	0,805
9	562,202	-612,041	1174,243	587,1	0,796
10	562,106	-611,177	1173,282	586,6	0,805
20	561,099	-609,143	1170,242	585,1	0,800
30	557,157	-610,044	1167,201	583,6	0,797
35	551,409	-613,527	1164,936	582,5	0,801
38	556,495	-608,626	1165,121	582,6	0,796
40	558,829	-605,960	1164,789	582,4	0,804
44	562,738	-601,674	1164,412	582,2	0,802
49	567,003	-596,789	1163,792	581,9	0,792
50	566,678	-596,903	1163,581	581,8	0,795
52	564,488	-598,880	1163,369	581,7	0,795
59	559,773	-602,939	1162,712	581,4	0,789
60	559,342	-603,233	1162,576	581,3	0,795
70	555,465	-606,555	1162,021	581,0	0,795
80	554,957	-606,629	1161,586	580,8	0,802
90	553,579	-606,951	1160,530	580,3	0,794

ANEXO O. Datos para elaboración de gráficas de fatiga correspondientes al acero tratado térmicamente sin recubrimiento para la probeta con deformación unitaria total de 0,97%

No. de ciclos	Esfuerzo max (MPa)	Esfuerzo min (MPa)	Rango del Esfuerzo (MPa)	Amplitud del Esfuerzo (MPa)	Deformación total %
1	695,412	-740,171	1435,583	717,8	0,978
2	681,672	-714,043	1395,715	697,9	0,970
3	682,862	-709,037	1391,900	696,0	0,972
4	680,896	-703,662	1384,557	692,3	0,978
5	679,778	-699,068	1378,846	689,4	0,968
6	680,121	-693,938	1374,058	687,0	0,970
7	680,818	-689,348	1370,167	685,1	0,968
8	680,288	-690,328	1370,616	685,3	0,962
9	678,174	-685,535	1363,709	681,9	0,968
10	678,976	-685,909	1364,885	682,4	0,964
20	670,607	-672,052	1342,660	671,3	0,960
30	666,723	-661,130	1327,853	663,9	0,964
40	664,904	-654,904	1319,808	659,9	0,960
50	664,409	-650,010	1314,419	657,2	0,962
60	666,081	-641,993	1308,074	654,0	0,962
70	661,493	-639,575	1301,069	650,5	0,960
78	660,031	-640,216	1300,248	650,1	0,960
80	659,774	-637,940	1297,714	648,9	0,960
90	660,948	-633,993	1294,941	647,5	0,964
100	660,071	-634,195	1294,266	647,1	0,962
200	659,427	-618,725	1278,152	639,1	0,960
300	656,436	-614,499	1270,936	635,5	0,964
400	650,082	-611,294	1261,375	630,7	0,958
500	650,849	-605,652	1256,501	628,3	0,952

ANEXO P. Datos para elaboración de gráficas de fatiga correspondientes al acero tratado térmicamente sin recubrimiento para la probeta con deformación unitaria total de 1,22%

No. de ciclos	Esfuerzo max (MPa)	Esfuerzo min (MPa)	Rango del Esfuerzo (MPa)	Amplitud del Esfuerzo (MPa)	Deformación total %
1	705,540	-712,212	1417,752	708,9	1,228
2	713,932	-692,837	1406,769	703,4	1,241
3	719,464	-683,411	1402,875	701,4	1,229
4	720,733	-678,423	1399,156	699,6	1,226
5	719,066	-676,497	1395,563	697,8	1,246
6	715,331	-675,553	1390,884	695,4	1,233
7	713,608	-673,591	1387,199	693,6	1,239
8	712,124	-670,899	1383,023	691,5	1,225
9	711,244	-669,738	1380,982	690,5	1,224
10	709,877	-668,679	1378,556	689,3	1,233
13	701,873	-668,652	1370,526	685,3	1,216
20	695,375	-663,210	1358,585	679,3	1,244
29	689,395	-656,342	1345,737	672,9	1,238
30	687,825	-657,535	1345,360	672,7	1,224
40	682,872	-653,838	1336,710	668,4	1,237
50	679,915	-649,431	1329,347	664,7	1,217
60	678,158	-646,241	1324,399	662,2	1,236
70	677,187	-642,863	1320,050	660,0	1,236
74	675,580	-643,139	1318,719	659,4	1,218
80	674,455	-642,347	1316,802	658,4	1,221
90	675,545	-637,557	1313,102	656,6	1,223
100	673,769	-636,314	1310,083	655,0	1,228
117	669,857	-636,718	1306,575	653,3	1,234
200	664,988	-628,407	1293,395	646,7	1,234