

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

“ESTUDIO DE FATIGA Y FATIGA CORROSIÓN DEL ACERO AISI 4340 CON RECUBRIMIENTO DE TiCN EMPLEANDO LA TÉCNICA DE PVD”

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Bachilleres:
Mariana Emperatriz Moreno Castillo
Luis José Cabeza Hernández
Para optar al título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2004

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

“ESTUDIO DE FATIGA Y FATIGA CORROSIÓN DEL ACERO AISI 4340 CON RECUBRIMIENTO DE TiCN EMPLEANDO LA TÉCNICA DE PVD”

Tutor Académico: **Prof. Eli Saúl Puchi Cabrera**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Bachilleres:
Mariana Emperatriz Moreno Castillo
Luis José Cabeza Hernández
Para optar al título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2004

Caracas, 16 de junio 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 Mariana Moreno Castillo y Luis Cabeza Hernández, titulado:

**“ESTUDIO DE FATIGA Y FATIGA CORROSIÓN DEL ACERO AISI 4340
CON RECUBRIMIENTO DE TiCN EMPLEANDO LA TÉCNICA DE PVD”**

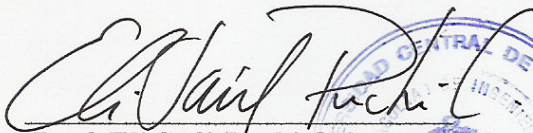
Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico.



Prof. Alfonso Quiroga
Jurado



Prof. Crisanto Villalobos
Jurado



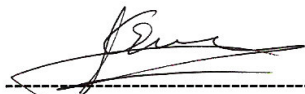
Prof. Eli Saúl Puchi Cabrera
Tutor Académico



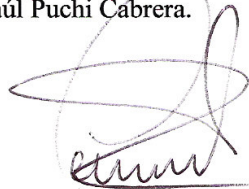
VEREDICTO

Los suscritos, Miembros del Jurado Examinador designado por el Consejo de la Escuela de Ingeniería mecánica de la Universidad Central de Venezuela para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Brs. **Mariana Emperatriz Moreno Castillo**, C. I. 11672680 y **Luis José Cabeza Hernández**, C. I. 12418023, el cual lleva por título “**Estudio de Fatiga y Fatiga Corrosión del Acero AISI 4340 con Recubrimiento de TiCN Empleando la Técnica de PVD**”, hemos acordado otorgarle una **Mención Honorífica** por la extraordinaria calidad de la investigación realizada la cual, en opinión de este Jurado, sobrepasa ampliamente el nivel normalmente exigido en este tipo de Trabajo.

En fe de lo anteriormente expuesto se levanta la presente Acta, en Caracas a los dieciséis días del mes de Junio del 2004, dejándose constancia que, de acuerdo a la Normativa vigente, actuó como Coordinador del Jurado Examinador el Profesor Eli Saúl Puchi Cabrera.



Prof. Alfonso Quiroga



Prof. Crisanto Villalobos G.



Prof. Eli Saúl Puchi C.

Dedicatoria

A mi madre Mireya de Moreno
y a mis hijos Ibrahim y Hassan
que amo con todo mi corazón.

MARIANA EMPERATRIZ MORENO CASTILLO

Dedicatoria

A mis padres Iraida y Luis, a
mi novia Mariana, a mi Tía
Cruzdelia
y a mis hermanos Gustavo,
David y Ronald,
a todos por su amor y comprensión.

LUIS JOSÉ CABEZA HERNÁNDEZ

AGRADECIMIENTOS

A mi madre por haberme ayudado en todo lo relacionado a mi carrera, por ayudarme a cuidar a mis hijos mientras yo realizaba el trabajo y por haberme apoyado en mis decisiones.

A Luis mi compañero y novio que amo tanto, por estar a mi lado apoyándome, brindándome su amor, paciencia y su colaboración en la realización de este trabajo y por ser un excelente compañero de tesis.

A la Universidad Central de Venezuela por brindarme la oportunidad de ser parte de ella y a la comisión por haberme concedido la beca ayudantía que me sirvió para cubrir algunos gastos relativos a mi carrera.

Al FONACIT por el financiamiento concedido para esta investigación a través del proyecto Subvención S1-2000000642.

Al Profesor Eli Saúl Puchi por habernos brindado la oportunidad de trabajar en esta investigación, por orientarnos en nuestro trabajo especial de grado y por su enseñanza respecto al tema.

Al Profesor Crisanto Villalobos por haberme ofrecido su orientación en el desarrollo de la investigación y de la parte experimental de la investigación.

A Engels, a Luis Miguel, a José Gregorio y a las personas que trabajan en el laboratorio por su gran colaboración y responsabilidad.

A los profesores y a mis compañeros de la Escuela de Ingeniería Mecánica a quienes agradezco todo aquello que hicieron por mí.

MARIANA EMPERATRIZ MORENO CASTILLO

AGRADECIMIENTOS

A mi mamá y a mi papá quienes han sido los pilares fundamentales de mi formación, los que siempre me han apoyado y protegido, por su amor, paciencia y respaldo incondicional, los quiero mucho.

A mi amorcito Mariana, quien ha sido el motorcito que ha dado impulso a este trabajo siempre pendiente de todos los detalles y dándome ánimo a continuar, por su amor y paciencia. Te amo.

A mi tía Cruzdelia por su cariño, quien tanto se preocupa por mí y siempre está presta a ayudarme y me desea todo lo mejor.

A mis hermanos Gustavo, David y Ronald quienes me apoyan y me ayudan en todo momento, por su cariño y amistad.

A mi tutor Eli Saúl Puchi, quién dio el mayor apoyo a la realización de este trabajo, por sus buenos consejos, su ayuda, interés y dedicación.

A Crisanto, Luis Miguel, Engels “Palla” y José Gregorio, por su gran ayuda, apoyo y guía que de manera muy importante nos permitió elaborar este trabajo.

A todo el personal de los Laboratorios de Aluminio, Ensayos Mecánicos, Nuevos Materiales y Tribología de la Escuela de Metalúrgica por su colaboración.

A mi Ilustre Universidad Central, donde transcurrí todos estos años en mi formación, por sus enseñanzas, doctrinas y oportunidades que me brindó.

Al FONACIT por el aporte financiero concedido para el desarrollo de esta investigación a través del proyecto Subvención S1-2000000642.

LUIS JOSÉ CABEZA HERNÁNDEZ

MORENO CASTILLO, MARIANA E. /Y/ CABEZA HERNANDEZ, LUIS J.

**ESTUDIO DE FATIGA Y FATIGA CORROSIÓN DEL ACERO AISI 4340
CON RECUBRIMIENTO DE TiCN EMPLEANDO LA TÉCNICA DE PVD**

Tesis. Caracas. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería.
Escuela de Ingeniería Mecánica. 2004.

Tutor Académico: **Prof. Eli Saúl Puchi Cabrera**

Palabras claves: Fatiga, Fatiga-Corrosión, Recubrimiento, PAPVD

En el presente trabajo se evaluó el comportamiento a la fatiga y fatiga-corrosión, a flexión rotativa, de un acero AISI 4340 templado y revenido, sin y con un recubrimiento de BALINIT[®] B (TiCN), depositado mediante la técnica PAPVD. Se mecanizaron 150 probetas según las normas ASTM A 370 y ASTM E 606 para ensayos de tracción y fatiga, respectivamente. Se realizaron los ensayos de Fatiga y Fatiga-Corrosión para el sustrato y el sustrato recubierto. Las propiedades de fatiga y corrosión-fatiga fueron evaluadas en el intervalo de esfuerzos alternantes de 539-696 MPa, dependiendo de la condición del material. A partir de los datos obtenidos se obtuvieron las curvas S-N del material en cada uno de los casos, obteniéndose de estas los parámetros de la ecuación de Basquin, según la norma ASTM E 739. Se evaluaron superficialmente muestras de pletina de acero de herramientas del tipo AISI D2 recubiertas, para determinar la dureza del recubrimiento, del sustrato sin recubrir y del sustrato recubierto (a la salida del reactor), mediante un microdurómetro Vickers, utilizando un barrido de cargas de 25-1000 g. De acuerdo a los resultados obtenidos de estas evaluaciones se determinó que el proceso de deposición no provoca ningún efecto sobre la microestructura del sustrato empleado. Los resultados de los ensayos de tracción muestran que para el material recubierto ocurrió un aumento de las propiedades mecánicas de alrededor de 10% en el esfuerzo de fluencia y una disminución del 12% en la resistencia a la tracción, en comparación con el material sin recubrir. En los ensayos de fatiga se determinó un aumento en la resistencia a la fatiga del acero recubierto en comparación con el acero sin recubrir con un incremento de 135-175 %, para esfuerzos entre 696-539 MPa. Para la vida infinita a fatiga se observó un incremento en el orden de 6%. En los ensayos de fatiga corrosión prácticamente la resistencia no tuvo mayor modificación observándose un incremento de vida a fatiga de 25-0 % cuando la variación de esfuerzos se mantuvo entre los 696-539 MPa. Del análisis fractográfico se mostraron las diferentes zonas características de la superficie de fractura, indicándose los orígenes de grieta, formación de múltiples inicios de grietas para la condición de fatiga corrosión, se observó la interfase sustrato-recubrimiento, el comportamiento del recubrimiento y la propiedad de adherencia del mismo. Se observó que la nucleación de las grietas se origina en la periferia del recubrimiento.

ÍNDICE GENERAL

Introducción	1
OBJETIVOS	3
CAPITULO I	4
1. MARCO TEÓRICO.....	4
1.1. FATIGA DE LOS METALES.....	4
1.1.1. Fatiga de metales.....	4
1.1.2. Falla producida por fatiga	5
1.1.3. Tipos de esfuerzos de fatiga.....	6
1.1.4. Resistencia y límite de fatiga	8
1.1.5. La curva de Wöhler.....	9
1.1.6. Teorías sobre la fatiga.....	10
1.1.7. Factores que afectan la vida de fatiga	12
1.1.8. Inicio de la grieta de fatiga.....	19
1.1.9. Propagación de las grietas por Fatiga	20
1.1.10. Características de apariencia de la fatiga	23
1.2. CORROSIÓN	26
1.2.1. Concepto de corrosión	26
1.2.2. Fatiga Corrosión.....	26
1.2.3. Medidas preventivas de la fatiga con corrosión.....	27
1.2.4. Mecanismos de la fatiga con corrosión.....	28
1.3. ENSAYOS MECÁNICOS	29
1.3.1. Ensayo de Dureza	29
1.3.2. Ensayo de Tensión	30
1.3.3. Ensayo de Fatiga	33
1.3.4. Ensayo de Fatiga corrosión.....	34
1.4. TÉCNICAS DE DEPOSICIÓN	34
1.4.1. Introducción al concepto de Plasma	35
1.4.2. Procesamiento por Plasma	36
1.4.3. Ventajas del procesamiento de materiales por plasma	36
1.4.4. Técnicas de procesamiento por plasma.....	37
1.4.5. Deposición física en fase de vapor.....	39
1.4.6. Deposición química en fase de vapor	46
1.5. SUBSTRATO: ACERO AISI/SAE 4340	48
1.5.1. Aceros de baja aleación	48
1.5.2. Tratamientos Térmicos	51
1.6. RECUBRIMIENTO.....	52
1.6.1. Recubrimientos y aplicaciones	52
1.6.2. Tendencias en los recubrimientos.....	53
1.6.3. Descripción característica de la adherencia, dureza y espesor de los recubrimientos.....	56
1.6.4. Carbonitruro de Titanio (TiCN).....	60
1.7. REFERENCIAS DE OTRAS INVESTIGACIONES REALIZADAS	62

CAPITULO II	64
2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	64
2.1. MECANIZADO	65
2.2. PREPARACIÓN SUPERFICIAL	68
2.2.1. Preparación de probetas para ensayos de tracción y fatiga.....	68
2.2.2. Preparación de probetas para ensayos de dureza	69
2.3. DEPOSICIÓN DEL RECUBRIMIENTO	70
2.4. PERFILOMETRÍA	72
2.5. ENSAYO DE DUREZA DE LAS MUESTRAS RECUBIERTAS	74
2.6. ENSAYOS DE TRACCIÓN	75
2.7. CORRECCIÓN POR DEFORMACIÓN ELÁSTICA DE LOS ELEMENTOS DE MÁQUINAS	77
2.8. CURVAS DE ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN	78
2.9. ENSAYO DE FATIGA	79
2.10. ENSAYO DE FATIGA CORROSIÓN	81
2.11. CURVA DE WÖHLER	82
2.12. ECUACIÓN DE BASQUIN.....	84
2.13. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS PARA EL ESTUDIO FRACTOGRÁFICO	85
2.14. DETERMINACIÓN DEL ESPESOR DEL RECUBRIMIENTO.....	87
CAPITULO III.....	89
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	89
3.1. ANÁLISIS DE RUGOSIDAD	89
3.2. ENSAYOS DE DUREZA.....	91
3.2.1. Prueba de Calotest.....	91
3.2.2. Dureza del recubrimiento.....	92
3.3. ENSAYOS DE TRACCIÓN	97
3.4. ENSAYOS DE FATIGA	100
3.5. ENSAYOS DE FATIGA-CORROSIÓN.....	106
3.6. INCREMENTO EN LA VIDA A FATIGA	110
CAPITULO IV.....	112
4. ESTUDIO FRACTOGRÁFICO	112
4.1. CORTES TRANSVERSALES DE LAS PROBETAS DE FATIGA .	113
4.2. CORTES LONGITUDINALES DE LAS PROBETAS DE FATIGA	128
4.3. CORTE TRANSVERSAL PROBETA DE TRACCIÓN.....	137
4.4. VISTA DE HUELLA DE CALOTEST.....	139
CONCLUSIONES	140
RECOMENDACIONES.....	142
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	143

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I

- Figura 1.1 *Tipos de esfuerzos de fatiga.* **6**
- Figura 1.2 *Comportamiento S–N de algunos materiales tecnológicos (gráfica Log-Log).* **9**
- Figura 1.3 *Conceptos de W. A. Wood sobre la microdeformación que conduce a la formación de grietas de fatiga.* **12**
- Figura 1.4 a) *Microestructura de un acero forjado en prensa de aleación baja (30X); b) Bandas microestructurales en placa rolada de acero de bajo carbón, 225 X.* **17**
- Figura 1.5 *Comparación del comportamiento de la vida de fatiga en aleaciones tecnológicas típicas bajo diversas condiciones ambientales.* **18**
- Figura 1.6 *Esquemas de mecanismos que conducen al inicio de las grietas de fatiga.* **19**
- Figura 1.7 *Esquema de un proceso de despunte plástico durante la propagación de la grieta de fatiga (etapa II).* **20**
- Figura 1.8 *Comportamiento típico del crecimiento de las grietas de fatiga en los materiales de ingeniería.* **22**
- Figura 1.9 *Representaciones esquemáticas de la apariencia de las superficies de fractura por fatiga bajo distintas condiciones de esfuerzos y concentraciones de esfuerzos.* **24**
- Figura 1.10 *Rasgos y artificios que asemejan estriaciones.* **25**
- Figura 1.11 *Ilustración esquemática de los efectos de corrosión en la superficie de fractura por fatiga.* **27**
- Figura 1.12 *Esquema de máquina de ensayo de tensión aplicándose la fuerza unidireccional a la probeta.* **30**
- Figura 1.13 *Curva de esfuerzo-deformación.* **32**
- Figura 1.14 *Máquina de ensayo de fatiga de viga en voladizo a flexión rotativa.* **33**
- Figura 1.15 *Procesamiento por técnica PAPVD.* **38**
- Figura 1.16 *Técnicas de procesamiento por plasma.* **39**
- Figura 1.17 *Instalación para la deposición física de vapor por evaporación al vacío.* **41**
- Figura 1.18 *Proceso de evaporación reactivo asistido por un haz de electrones.* **41**
- Figura 1.19 *Instalación posible para el bombardeo de partículas atómicas en forma de deposición física de vapor.* **42**
- Figura 1.20 *Esquema de un proceso de “Magnetron Sputtering”.* **44**
- Figura 1.21 *Esquema de un proceso de “Ion Plating”.* **45**
- Figura 1.22 *Recubrimientos de varias fases o multicomponentes sobre un sustrato de carburo de tungsteno.* **55**
- Figura 1.23 *Comparación entre el número de piezas obtenidas por una herramienta recubierta con BALINIT® B, BALINIT® A y sin recubrir.* **55**
- Figura 1.24 *Distintos tipos de interfase.* **58**
- Figura 1.25 *Algunos recubrimientos BALINIT®.* **60**

CAPÍTULO II

- Figura 2.1 *Probeta para ensayo de fatiga según norma ASTM E-606.* **66**
- Figura 2.2 *Probeta para ensayo de tracción según norma ASTM A- 370.* **66**
- Figura 2.3 *Probeta para ensayo de dureza.* **66**
- Figura 2.4 *Probetas empleadas.* **67**
- Figura 2.5 *Conjunto de torno.* **68**
- Figura 2.6 *Máquina para pulido de plato giratorio.* **70**

- ✚ Figura 2.7 *Equipo de Balzers para deposición de recubrimientos BALINIT®.* **71**
- ✚ Figura 2.8 *Máquina para perfilometría.* **73**
- ✚ Figura 2.9 *Máquina para ensayo de dureza.* **74**
- ✚ Figura 2.10 *Máquina para ensayo de tracción.* **76**
- ✚ Figura 2.11 *Máquina de fatiga.* **79**
- ✚ Figura 2.12 *Máquina de fatiga con implemento para corrosión.* **81**
- ✚ Figura 2.13 *Cámara de corrosión.* **82**
- ✚ Figura 2.14 *Montaje para ensayo de fatiga corrosión.* **82**
- ✚ Figura 2.15 *Máquina de corte de disco abrasivo.* **85**
- ✚ Figura 2.16 *Equipo de limpieza por ultrasonido.* **86**
- ✚ Figura 2.17 *Máquina de corte de disco de diamante.* **86**
- ✚ Figura 2.18 *Microscopio electrónico de barrido.* **87**

CAPÍTULO III

- ✚ Figura 3.1 *Representación gráfica de un área de medición de rugosidad. del AISI 4340.* **90**
- ✚ Figura 3.2 *Representación gráfica de un área de medición de rugosidad del AISI 4340 recubierto con BALINIT B.* **90**
- ✚ Figura 3.3 *Imagen observada del espesor del recubrimiento BALINIT® B.* **91**
- ✚ Figura 3.4 *Curva de Dureza Vickers (HV) vs. Carga (gf) de acero AISI D2 recubierto con BALINIT B.* **93**
- ✚ Figura 3.5 *Curva de Dureza (GPa) vs. Profundidad relativa de indentación RID del recubrimiento.* **93**
- ✚ Figura 3.6 *Curva de Dureza Vickers (HV) vs. Carga (gf) del sustrato en la probeta recubierta.* **95**
- ✚ Figura 3.7 *Curva de Dureza Vickers (HV) vs. Carga (gf) de acero AISI D2 sin recubrimiento.* **96**
- ✚ Figura 3.8 *Comparación de dureza del recubrimiento con el material sustrato acero de herramientas AISI D2.* **97**
- ✚ Figura 3.9 *Curvas de esfuerzo real vs. Deformación real de un acero AISI 4340.* **98**
- ✚ Figura 3.10 *Curvas de esfuerzo real vs. Deformación real de un acero AISI 4340 recubierto con BALINIT® B.* **99**
- ✚ Figura 3.11 *Sucesión de ensayos en escalera para determinación del límite medio de fatiga del AISI 4340.* **102**
- ✚ Figura 3.12 *Sucesión de ensayos en escalera para determinación del límite medio de fatiga del AISI 4340 recubierto con BALINIT B.* **104**
- ✚ Figura 3.13 *Resistencia a la fatiga de los aceros AISI 4340 y AISI 4340 recubierto con BALINIT B ensayos de fatiga al aire.* **105**
- ✚ Figura 3.14 *Resistencia a la fatiga de los aceros AISI 4340 y AISI 4340 recubierto con BALINIT B ensayos de fatiga-corrosión.* **108**
- ✚ Figura 3.15 *Resistencia a la fatiga de los aceros AISI 4340 y AISI 4340 recubierto con BALINIT B ensayos de fatiga al aire y de fatiga-corrosión.* **109**
- ✚ Figura 3.16 *Cambio en el porcentaje de incremento de la vida a fatiga con esfuerzos alternantes para depósito de Carbonitrúro de Titanio.* **110**
- ✚ Figura 3.17 *Cambio en el porcentaje de incremento de la vida en ambiente corrosivo con esfuerzos alternantes para depósito de Carbonitrúro de Titanio.* **111**

CAPÍTULO IV

- ✚ Figura 4.1 a) Vista general de la superficie de fractura de una probeta no recubierta ensayada al aire a $S_f = 539 \text{ MPa}$ y $N_f = 581700$ ciclos. b) y c) ampliación y detalle de la zona de inicio de grieta. **113**
- ✚ Figura 4.2 a) Vista general de la superficie de fractura de una probeta no recubierta ensayada al aire a $S_f = 634 \text{ MPa}$ y $N_f = 91500$ ciclos. b) y c) ampliación y detalle de la zona de inicio de grieta. **114**
- ✚ Figura 4.3 a) Vista general de la superficie de fractura de una probeta recubierta ensayada al aire a $S_f = 603 \text{ MPa}$ y $N_f = 455500$ ciclos. b) y c) ampliación y detalle de la zona de inicio de grieta. **115**
- ✚ Figura 4.4 a) y b) Vista a 45° de la superficie de fractura de una probeta recubierta ensayada al aire a $S_f = 603 \text{ MPa}$ y $N_f = 455500$ ciclos. c) Detalle de inicio de grieta de "a". d) y e) Detalles de grietas circunferenciales en la superficie lateral ampliando la figura "b". **116**
- ✚ Figura 4.5 Vista general de la superficie de fractura de una probeta recubierta ensayada al aire a $S_f = 696 \text{ MPa}$ y $N_f = 82700$ ciclos. b) y d) ampliación y detalle de la zona de inicio de grieta. c) Mostrando detalle de zona de estriaciones de "b". **117**
- ✚ Figura 4.6 a) Vista general de la superficie de fractura de una probeta recubierta ensayada al aire a $S_f = 696 \text{ MPa}$ y $N_f = 82700$ ciclos. b) Vista de la superficie lateral y de fractura mostrando grietas circunferenciales. C) Detalle de inicio de grieta. **118**
- ✚ Figura 4.7 a) Figura 4.8 a) Vista general de la superficie de fractura de una probeta no recubierta ensayada en ambiente corrosivo a $S_f = 539 \text{ MPa}$ y $N_f = 144100$ ciclos. b), c) y d) Detalle de inicio de grieta en diferentes aumentos. **119**
- ✚ Figura 4.8 a) Vista general de la superficie de fractura de una probeta no recubierta ensayada en ambiente corrosivo a $S_f = 539 \text{ MPa}$ y $N_f = 144100$ ciclos. b), c) y d) Detalle de inicio de grieta en diferentes aumentos. **121**
- ✚ Figura 4.9 a) Vista general de la superficie de fractura de una probeta no recubierta ensayada en ambiente corrosivo a $S_f = 634 \text{ MPa}$ y $N_f = 60600$ ciclos. b) y c) detalle de inicio de grieta a diferentes aumentos. **122**
- ✚ Figura 4.10 a) Vista general de la superficie de fractura de una probeta recubierta ensayada en ambiente corrosivo a $S_f = 539 \text{ MPa}$ y $N_f = 137100$ ciclos. b) y c) detalle de inicio de grieta a diferentes aumentos. **123**
- ✚ Figura 4.11 a) Vista a 45° de una probeta recubierta ensayada en ambiente corrosivo a $S_f = 539 \text{ MPa}$ y $N_f = 137100$ ciclos. b) Detalle de escalonamiento. **124**
- ✚ Figura 4.12 a) Vista general de la superficie de fractura de una probeta recubierta ensayada en ambiente corrosivo a $S_f = 634 \text{ MPa}$ y $N_f = 69500$ ciclos. b) y c) Detalle de inicio de grieta a diferentes aumentos. d) Detalle de inicio de grieta a mayor aumento, se puede apreciar el espesor del recubrimiento. **125**
- ✚ Figura 4.13 a) Vista a 45° de una probeta recubierta ensayada en ambiente corrosivo a $S_f = 634 \text{ MPa}$ y $N_f = 69500$ ciclos. b) Detalle de grietas circunferenciales. **126**
- ✚ Figura 4.14 a) Vista a 45° de origen de grieta de una probeta recubierta ensayada en ambiente corrosivo a $S_f = 634 \text{ MPa}$ y $N_f = 69500$ ciclos. b) Detalle de inicio y grieta circunferencial. C) Detalle de grieta circunferencial. **127**
- ✚ Figura 4.15 Vista de sección longitudinal de una probeta no recubierta ensayada al aire a $S_f = 539 \text{ MPa}$ y $N_f = 581700$ ciclos. **128**
- ✚ Figura 4.16 Vista de sección longitudinal de una probeta no recubierta ensayada al aire a $S_f = 634 \text{ MPa}$ y $N_f = 91500$ ciclos. **128**
- ✚ Figura 4.17 Vista de sección longitudinal de una probeta no recubierta ensayada en ambiente corrosivo a $S_f = 539 \text{ MPa}$ y $N_f = 144100$ ciclos. **129**
- ✚ Figura 4.18 a) Vista de sección longitudinal de una probeta no recubierta ensayada en ambiente corrosivo a $S_f = 634 \text{ MPa}$ y $N_f = 60600$ ciclos. b) Detalle de grietas. **130**

- ✚ Figura 4.19 a) *Vista de sección longitudinal de una probeta recubierta ensayada al aire a $S_f = 603$ MPa y $N_f = 455500$ ciclos.* b) y c) *Detalle de intercara substrato-recubrimiento.* d) y e) *Análisis de composición en el recubrimiento.* **131**
- ✚ Figura 4.20 a) *Vista de sección longitudinal de una probeta recubierta ensayada al aire a $S_f = 696$ MPa y $N_f = 82700$ ciclos.* b) y c) *Detalle de intercara substrato-recubrimiento.* **134**
- ✚ Figura 4.21 a) *Vista de sección longitudinal de una probeta recubierta ensayada en ambiente corrosivo a $S_f = 539$ MPa y $N_f = 137100$ ciclos.* b) *Detalle de intercara substrato-recubrimiento.* **135**
- ✚ Figura 4.22 a) *Vista de sección longitudinal de una probeta recubierta ensayada en ambiente corrosivo a $S_f = 634$ MPa y $N_f = 69500$ ciclos.* b) *Detalle de inicio de grieta en el recubrimiento.* c) *Detalle de intercara substrato-recubrimiento.* **136**
- ✚ Figura 4.23 a) *Vista a 45° de probeta de tracción recubierta.* b) *Detalle de superficie lateral en modo de imagen SE.* c) *Detalle de superficie lateral en modo de imagen BSE.* **137**
- ✚ Figura 4.24 a) *Ampliación de una zona observada a 45° de la probeta de tracción recubierta en modo de imagen SE.* b) *Detalle de “a”.* c) *Ampliación de una zona observada a 45° de la probeta de tracción recubierta en modo de imagen BSE.* d) *Detalle de intercara substrato-recubrimiento cercano a la zona de rotura.* **138**
- ✚ Figura 4.25 a) *observación en SE de huella de calotest.* b) *observación en BSE de huella de calotest.* **139**

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO I

- ❖ Tabla 1.1 *Efectos del acabado de la superficie en la vida de fatiga para un acero SAE 3130; esfuerzo revertido = 655.5 MPa.* **14**
- ❖ Tabla 1.2 *Composición química del acero AISI 4340, expresada en % en peso.* **49**
- ❖ Tabla 1.3 *Propiedades mecánicas típicas del acero AISI 4340.* **50**
- ❖ Tabla 1.4 *Tabla comparativa de propiedades de recubrimientos mediante PVD.* **53**
- ❖ Tabla 1.5 *Características del recubrimiento BALINIT® B.* **61**

CAPÍTULO II

- ❖ Tabla 2.1 *Límites de composición del acero herramienta tipo D2.* **67**
- ❖ Tabla 2.2 *Características de procesamiento y servicio de aceros para herramientas tipo D2.* **68**

CAPÍTULO III

- ❖ Tabla 3.1 *Análisis de rugosidad de probetas AISI 4340 sin recubrir.* **89**
- ❖ Tabla 3.2 *Análisis de rugosidad de probetas AISI 4340 recubierto con BALINIT B.* **89**
- ❖ Tabla 3.3 *Resultado de medición de espesores del recubrimiento.* **91**
- ❖ Tabla 3.4 *Resultado del barrido de dureza de acero AISI D2 recubierto con BALINIT B.* **92**
- ❖ Tabla 3.5 *Resultado del barrido de dureza del sustrato en la probeta recubierta.* **94**
- ❖ Tabla 3.6 *Resultado del barrido de dureza de acero AISI D2 sin recubrimiento.* **95**
- ❖ Tabla 3.7 *Resultados de los ensayos de tracción de las probetas de acero AISI 4340.* **98**
- ❖ Tabla 3.8 *Resultados de los ensayos de tracción de las probetas recubiertas con BALINIT® B.* **100**
- ❖ Tabla 3.9 *Variación de las propiedades del esfuerzo real de fluencia y del esfuerzo real máximo del material con recubrimiento respecto al material base.* **100**
- ❖ Tabla 3.10 *Resultados de ensayos de fatiga al aire del acero AISI 4340.* **101**
- ❖ Tabla 3.11 *Resultados de ensayos de fatiga al aire del acero AISI 4340 recubierto con BALINIT B.* **101**
- ❖ Tabla 3.12 *Resultados de ensayos de límite de fatiga del acero AISI 4340.* **102**
- ❖ Tabla 3.13 *Determinación de parámetros para obtención del límite medio de fatiga del AISI 4340.* **103**
- ❖ Tabla 3.14 *Resultados de ensayos de límite de fatiga del acero AISI 4340 recubierto con BALINIT B.* **104**
- ❖ Tabla 3.15 *Determinación de parámetros para obtención del límite medio de fatiga del AISI 4340 recubierto con BALINIT B.* **105**
- ❖ Tabla 3.16 *Ecuación de Basquin para ensayo fatiga al aire del acero AISI 4340.* **106**
- ❖ Tabla 3.17 *Ecuación de Basquin para ensayo de fatiga al aire del acero AISI 4340 recubierto con BALINIT B.* **106**
- ❖ Tabla 3.18 *Resultados de ensayos de fatiga corrosión del acero AISI 4340.* **107**
- ❖ Tabla 3.19 *Resultados de ensayos de fatiga corrosión del acero AISI 4340 recubierto con BALINIT B.* **107**
- ❖ Tabla 3.20 *Ecuación de Basquin para ensayos de fatiga corrosión del acero AISI 4340.* **108**
- ❖ Tabla 3.21 *Ecuación de Basquin para ensayo de fatiga corrosión del acero AISI 4340 recubierto con BALINIT B.* **109**

INTRODUCCIÓN

Se puede observar como en la actualidad, a medida que la humanidad avanza cada vez a mayor velocidad, se crean nuevas máquinas que simplifican las tareas del hombre moderno y ayudan a crear equipos adicionales más complejos que exigen materiales cada vez más resistentes y duraderos.

El requerimiento de desarrollar mejores máquinas que realicen una diversidad de tareas con mayor rapidez y eficiencia ha impulsado a la ciencia y a la tecnología a investigar los materiales de los componentes de las maquinarias, sus propiedades y características. Mediante la investigación y estudio de estos materiales se han podido mejorar sus propiedades y como consecuencia de esto se han creado nuevos equipos más compactos, eficientes y resistentes, capaces de operar bajo condiciones adversas y ambientes severos.

Otras de las consecuencias de los estudios de materiales ha sido la implementación de los mismos en el diseño de equipos médico-quirúrgicos, de implantes y diseño de prótesis capaces de soportar las cargas a las que son sometidas, así como la corrosión provocada por los fluidos corporales, que permitan una durabilidad y confiabilidad de los mismos para que su vida útil sea lo mas prolongada posible.

Lo que nos ha motivado a realizar este trabajo de investigación es el interés de innovar y poder utilizar cada vez mejores materiales en los procesos productivos, además de formar parte de del proceso de investigación de las nuevas tecnologías de los materiales.

Los diversos materiales empleados en la fabricación de gran cantidad de objetos exigen que los mismos posean ciertas características de durabilidad,

resistencia a la corrosión y el desgaste así como también ciertas propiedades mecánicas específicas.

El presente trabajo consiste en realizar el estudio de la fatiga del acero AISI 4340 templado y revenido que cumplirá la función de sustrato, bajo condiciones de sollicitación cíclica al aire y bajo ambiente corrosivo (solución de NaCl al 3%). El estudio comparativo se realizará con el mismo acero pero recubierto con una película de TiCN (carbonitruro de titanio), bajo las mismas condiciones del material sin recubrir. Mediante la comparación se podrá determinar cuales serán los cambios producidos en el material recubierto y la influencia de las variables que afectan a los procesos.

El recubrimiento aplicado al sustrato recibe el nombre comercial de BALINIT[®] B, el cual será depositado a través de la técnica PAPVD (plasma-assisted physical vapor deposition), por la compañía Balzers (Troy, New York, USA).

Se realizará el ensayo de fatiga a las probetas bajo las cuatro condiciones anteriormente expuestas, para cuatro niveles de esfuerzos, seguidamente se determina el límite de fatiga mediante el método de la escalera y posteriormente se hace el análisis relacionado a ambas condiciones de probetas recubiertas y sin recubrir.

Finalmente se lleva a cabo un estudio fractográfico con microscopía electrónica de barrido, el cual nos permitirá realizar un análisis más detallado de las zonas de fractura, la microestructura, formación de las grietas y comportamiento del recubrimiento.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Determinar el efecto del recubrimiento de TiCN en el comportamiento a la fatiga, tanto al aire como en ambiente corrosivo, del acero SAE 4340 templado y revenido. Evaluar, a través de técnicas de microscopía electrónica de barrido (MEB) el efecto del recubrimiento en la modificación del mecanismo de fractura del sustrato sin recubrir.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar las técnicas de recubrimiento de metales
- Preparación de las probetas de acero AISI 4340
- Realizar los ensayos de fatiga de las probetas
- Determinar las curvas de Wöhler para cada caso (4340 sin recubrir ensayado al aire y en ambiente corrosivo; 4340 recubierto con TiCN; también ensayado al aire y en ambiente corrosivo).
- Realizar el estudio fractográfico de algunas de las probetas ensayadas.
- Realizar el análisis comparativo entre los diferentes grupos de los ensayos realizados.

CAPITULO I

1. MARCO TEÓRICO

1.1. FATIGA DE LOS METALES

1.1.1. Fatiga de metales

El fallo de los materiales metálicos debido a la fatiga tiene lugar por las cargas aplicadas en forma variable y repetida, que producen esfuerzos de igual forma llamados esfuerzos cíclicos. Sin embargo, se ha descubierto que en muchos de estos casos los esfuerzos máximos reales son inferiores a la resistencia última del material y muchas veces aún menores que la resistencia de fluencia. La característica más notable de estas fallas es que los esfuerzos se han repetido muchas veces. Dichos esfuerzos cíclicos pueden ocurrir como resultado de rotación, flexión o vibraciones.

Para que exista o se produzca una falla por fatiga deben estar presentes tres condiciones:

- a) Una tensión máxima de tracción de valor elevado.
- b) Una variación o fluctuación suficientemente intensa de la tensión aplicada.
- c) Un número suficiente de ciclos.

Existen otro tipo de variables que afectan la vida de la fatiga como las concentraciones de esfuerzo, temperatura, corrosión, microestructura, tensiones residuales y tensiones combinadas.

En el caso de una región libre de defectos o de buen acabado superficial las grietas se inician debido a diminutos concentradores de esfuerzos ocasionados por deformación plástica localizada en bandas específicas de deslizamiento. Después de

varios ciclos repetidos, se desarrolla una pequeña grieta en las intersecciones de estas bandas de deformación localizada con la superficie de la muestra.

La presencia de defectos internos también acorta el tiempo necesario para la iniciación de las grietas. Algunos de estos defectos pueden ser inclusiones no metálicas y en algunos casos poros de gases atrapados en la aleación.

1.1.2. Falla producida por fatiga

Las fallas por fatiga usualmente ocurren en tres etapas:

1.- Primero se inicia una grieta minúscula en la mayoría de los casos sobre la superficie o en alguna zona de tensión alta, generalmente después de haberse aplicado la carga. Alrededor de la región donde se origina la grieta, la superficie comúnmente, muestra un aspecto liso y aterciopelado con señales concoidales o curvaturas de rizaduras llamadas marcas de playa; esta zona es la que refleja el crecimiento de la grieta con relativa lentitud.

2.- A continuación la grieta se propaga gradualmente a medida que la carga sigue variando alternadamente. A veces puede distinguirse una segunda zona menos lisa en la cual la propagación de la grieta se ha efectuado con mayor velocidad, quizás en varios lugares a la vez, de modo que la superficie de fractura es irregular.

3.- Finalmente, cuando la sección transversal restante del material resulta demasiado pequeña para soportar la carga aplicada, éste falla súbitamente por fractura. Esto ocurre en una tercera zona en donde se produce la fractura final cuando se reduce la sección y el metal no puede soportar la aplicación última de la carga. Esta zona puede tener un aspecto cristalino indicando que la fractura final fue frágil o un aspecto fibroso indicando una fractura final dúctil.

1.1.3. Tipos de esfuerzos de fatiga

Existen ciertas diferencias entre los esfuerzos a los cuales está sometido el material. La figura 1.1 representa estos tipos de ciclos de esfuerzos.

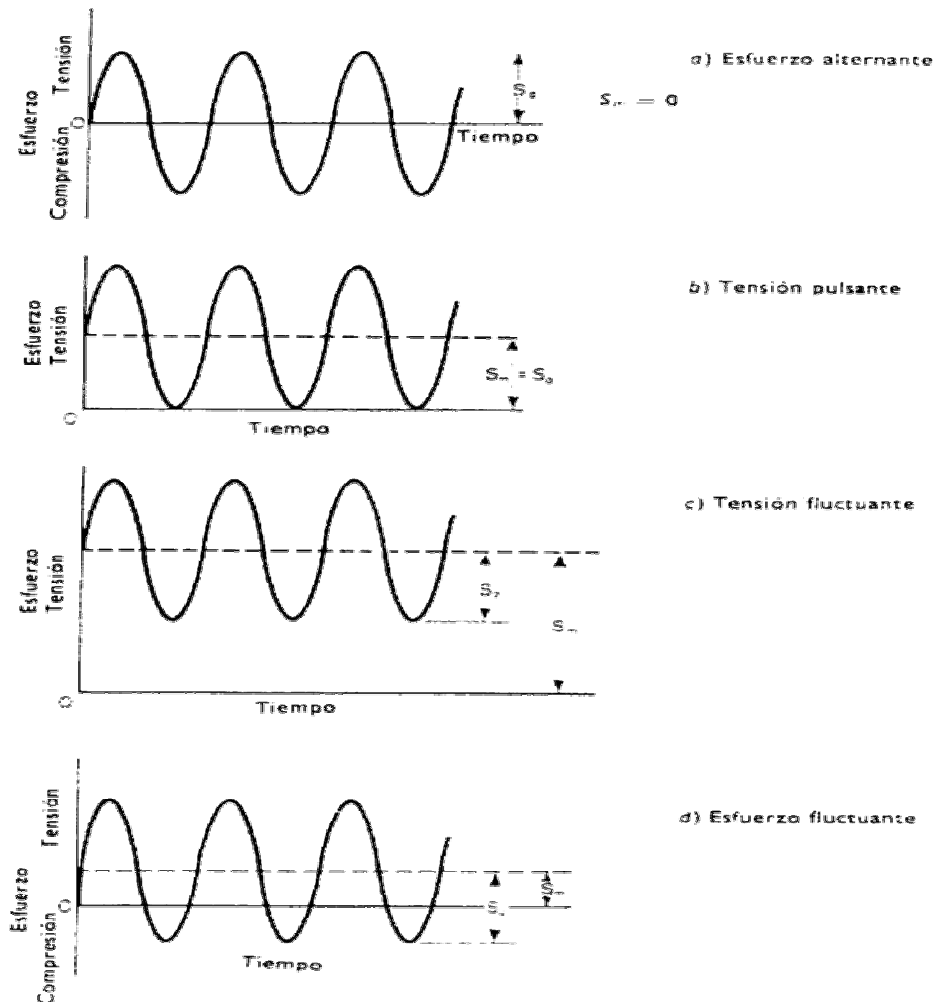


Figura 1.1 Tipos de esfuerzos de fatiga.^[1]

En la figura 1.1 se describieron los esfuerzos aplicados como $S_m \pm S_a$, donde S_m es el esfuerzo medio y S_a es el valor del esfuerzo alternante, pudiéndose observar que de acuerdo a la forma en la cual se aplique la carga, si esta última produce esfuerzos alternantes pasando por un valor nulo de esfuerzo medio, entonces se

obtiene la gráfica en la cual se ven reflejados solamente los esfuerzos alternantes de magnitud similar pero de signo contrario (Fig. 1.1.a). Cuando S_m es igual a S_a , el esfuerzo mínimo del ciclo es cero y se denomina esfuerzo de tracción (o compresión) repetido o pulsante (Fig. 1.1.b). Cualquier otra combinación se conoce como esfuerzo fluctuante que puede ser de tracción, compresión (Fig. 1.1.c), o puede fluctuar entre un valor de tracción a uno de compresión (Fig. 1.1.d).

Las condiciones de los esfuerzos pueden definirse, alternativamente, en términos de los esfuerzos máximos y mínimos en el ciclo, $S_{máx}$ y $S_{mín}$. La relación de esfuerzos se define como: $R = S_{mín} / S_{máx}$.

Cuando las condiciones de las cargas son tales que los esfuerzos en la probeta no están uniformemente distribuidos, los resultados se presentan, usualmente, en términos del esfuerzo nominal S , que es la sollicitación calculada por la teoría, sin tener en cuenta sus variaciones en las condiciones producidas por las discontinuidades geométricas tales como agujeros, muesca y roscas.

Nomenclatura de esfuerzos cíclicos o alternantes presentes en la fatiga

Esfuerzo alterno: $S_a = S_r / 2$

Esfuerzo medio: $S_m = (S_{máx} + S_{mín}) / 2$

Esfuerzo máximo: $S_{máx} = (S_m + S_a)$

Esfuerzo mínimo: $S_{mín} = (S_m - S_a)$

Intervalos de esfuerzos: $\Delta S = (S_{máx} - S_{mín})$

1.1.4. Resistencia y límite de fatiga

Resistencia a la fatiga: se define como el valor máximo del esfuerzo alternante (o fluctuante) que resistirá sin fallos un material para un número dado de ciclos.

Vida a Fatiga ^[2]: es un parámetro que indica el número de ciclos (N_f), necesarios para ocasionar la falla de un material sometido a esfuerzo. Se puede dividir en tres etapas las cuales son la iniciación de grietas (N_i), la propagación de grietas (N_p) y la fractura súbita. La vida en condiciones de fatiga se puede establecer entonces en términos de la cantidad de ciclos, tal como:

$$N_f = N_i + N_p$$

En donde

N_i : Cantidad de ciclos que se requieren para iniciar una grieta discernible, lo que está influido principalmente por el nivel de esfuerzos, concentradores de esfuerzos, partículas de segunda fase, imperfecciones cristalinas y condiciones del medio ambiente.

N_p : Cantidad de ciclos que se requieren para propagar o hacer crecer la grieta en forma estable hasta un tamaño crítico, después del cual se presenta la fractura súbita; Dicho número es afectado principalmente por el nivel de esfuerzos, orientación microestructural y medio ambiente.

Límite de fatiga: ciertos materiales ferrosos poseen un nivel de esfuerzo al cual la vida a la fatiga tiende a infinito. Este nivel de esfuerzo es llamado límite de fatiga y se define como el esfuerzo límite abajo del cual el material resistirá una cantidad infinitamente grande de ciclos de esfuerzos sin fracturarse. Por lo impráctico de realizar pruebas infinitas de vida a fatiga, frecuentemente se toma como límite de fatiga de muchos materiales el esfuerzo que no produzca una falla por fatiga en 10^7 ciclos.^[3]

1.1.5. La curva de Wöhler

La curva de Wöhler, llamada también curva de resistencia a la fatiga o curva S-N representa la duración de la probeta, expresada en número de ciclos hasta la rotura (N), para la máxima tensión aplicada. Es un método fundamental para presentar los datos de fatiga, los cuales se obtienen mayormente en máquinas de viga rotativa, donde la tensión media (σ_m) es nula.

Al tener una representación de la curva se puede observar que el número de ciclos que dura una probeta antes de fallar aumenta al disminuir la tensión.

Tal como se señaló anteriormente, los ensayos de fatiga a tensión baja en los materiales ferrosos se suelen realizar hasta 10^7 ciclos y para materiales no ferrosos se prolongan a 5×10^8 .

La mayoría de los metales no férreos (aleaciones de aluminio, de magnesio y de cobre) tienen su curva de Wöhler con una pendiente que disminuye progresivamente al aumentar el número de ciclos aproximándose a una horizontal pero sin llegar a serlo nunca.

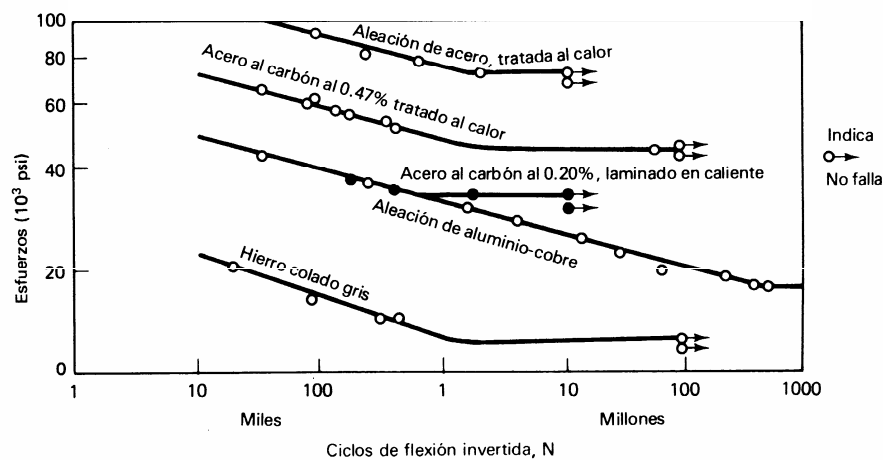


Figura 1.2 Comportamiento S-N de algunos materiales tecnológicos (gráfica Log-Log).^[4]

Ecuación de Basquin:

$$S_a = S'_f (2N)^b \quad (\text{Ecuac. 1.1})$$

Donde:

S_a es la resistencia a la fatiga del material; S'_f representa el coeficiente de resistencia a la fatiga, b representa el exponente de fatiga, $2N$ el número de reversos a falla o también puede ser representada por una ecuación potencial simple:

$$S_a = S_f (N)^b \quad (\text{Ecuac. 1.2})$$

Donde, S_a es la resistencia a la fatiga del material, S_f sería el coeficiente de resistencia a la fatiga, N el número de ciclos y b el exponente de fatiga.

1.1.6. Teorías sobre la fatiga

Teoría de Orowan ^[5]

Orowan propuso una de las primeras teorías que tuvo mayor aceptación para explicar el fenómeno de fatiga. Esta teoría predice la forma general de las curvas de Wöhler, pero no se basa en ningún mecanismo específico de deformación, sino en el concepto general que la deformación por fatiga es heterogénea. Supuso que en el metal existen pequeñas regiones débiles, las cuales podían ser favorables para el deslizamiento o zonas de elevada concentración de tensiones. A estas regiones las consideró como zonas plásticas en una matriz elástica.

Con su teoría demostró que para ciclos repetidos de amplitud a tensión constante las regiones plásticas experimentarían un aumento de tensión y una disminución de la deformación, producto del fenómeno de endurecimiento por deformación localizada. Además indicó que la suma de las deformaciones (negativas y positivas) tendía a un valor finito cuando el número de ciclos crecía

indefinidamente. Este valor límite de la deformación plástica total aumenta con el incremento de la tensión aplicada a la probeta. Entonces el límite de fatiga está basado en que por debajo de cierto nivel de esfuerzo, no se puede alcanzar un valor crítico de deformaciones plásticas que originen la fractura de la probeta y es por esto que la misma no llega a romperse. Por el contrario, si el nivel de tensión al cual está sometido el material se hace mayor, entonces la deformación plástica total excede el valor crítico y se forma una grieta. Esta grieta crea una concentración de tensiones y a su vez crea también una nueva región plástica localizada donde se repite el proceso y así sucesivamente. De esta forma la grieta se va abriendo paso haciéndose cada vez más grande hasta que se produce la rotura al alcanzarse la máxima tensión de tracción del ciclo. Esta teoría supone que el endurecimiento por deformación de ciertas regiones localizadas va disminuyendo las zonas plásticas del metal lo cual lo hace más frágil hasta que ocurre la rotura.

Teoría de Wood^[6]

Wood supone, a diferencia de *Orowan*, que no es necesaria la aparición de las zonas de deformación localizadas para producir fractura por fatiga. A cambio desarrolló una teoría en base a sus observaciones microscópicas en la que indica la aparición de los planos de deslizamiento en magnitudes de 10^{-7} cm, producto de una acumulación sistemática de movimientos de deslizamiento fino. Se cree que tal mecanismo permite la acomodación de deformaciones totales grandes que son la suma de microdeformaciones en cada ciclo, sin que ello produzca un endurecimiento por deformación apreciable. El deslizamiento producido en la deformación estática debe producir un perfil de la superficie del metal tal como se muestra en la parte a) de la figura siguiente, en cambio, los movimientos de vaivén del deslizamiento fino de fatiga pueden originar entallas o salientes en la superpie como se ve en la las partes b) y c) de la figura respectivamente. La entalla puede comportarse como un concentrador de tensiones con un radio en el fondo de dimensiones atómicas. Esto

explica el porque las grietas producto de la fatiga tienen en su mayoría su inicio en la superficie del material.

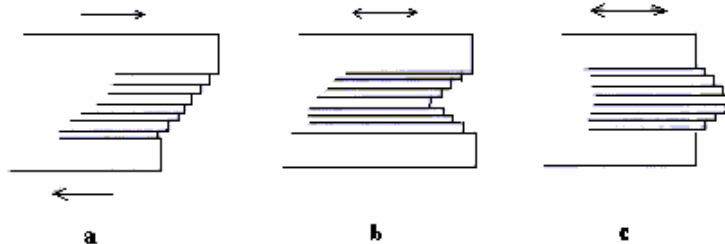


Figura 1.3 Conceptos de W. A. Wood sobre la microdeformación que conduce a la formación de grietas de fatiga. a) Deformación estática; b) deformación de fatiga que conduce a la formación de una entalla superficial (intrusión del material); c) deformación por fatiga que conduce a la extrusión de una banda de deslizamiento.

Modelos de dislocaciones

De acuerdo con las variaciones en los mecanismos de dislocaciones para formación de intrusiones y extrusiones de bandas de deslizamiento se han propuesto varios modelos.

El modelo propuesto por Cottrell y Hull^[7] se basa en la interacción de dislocaciones de arista en dos sistemas de deslizamiento, mientras Mott^[8] sugiere la intervención de deslizamiento cruzado de dislocaciones de tornillo.

Se realizaron experimentos en cristales iónicos donde se confirma la teoría de Mott y se rechaza la de Cottrell.

1.1.7. Factores que afectan la vida de fatiga

Se puede agrupar los factores que afectan la fatiga de los materiales de ingeniería en tres categorías diferentes las cuales son:

- Factores mecánicos
- Factores microestructurales

- Factores del medio ambiente.

Los factores mecánicos

En esta categoría los factores se refieren a las características mecánicas y geométricas del material. En especial se estudiarán los esfuerzos medios, la concentración de esfuerzos y los efectos de superficie, puesto que los mismos pueden tener una notable influencia en la vida a fatiga del material.

a) Esfuerzos medios: la amplitud de esfuerzos S_a ejerce la influencia más grande en la vida de fatiga, sin embargo el esfuerzo medio S_m también afecta en forma importante la vida a fatiga.

En resumen, el efecto de incrementar el esfuerzo medio (pasando de compresión a tensión), implica una reducción en la vida a fatiga.

b) Concentración de esfuerzos: el efecto neto de los concentradores de esfuerzos es el de reducir la vida de fatiga. Los concentradores de esfuerzo pueden consistir en huecos, listones, surcos, perforaciones o regiones roscadas. Prácticamente cualquier muesca o discontinuidad puede producir efectos de concentración de esfuerzos, aunque por lo general mientras más agudo sea el cambio geométrico (el radio más pequeño en la raíz de la muesca), será mayor el efecto.

c) Efectos de superficie: en la mayor parte de las pruebas de fatiga y las aplicaciones de servicio, los esfuerzos máximos tienden a presentarse en la superficie del material. Por lo cual, además de los concentradores de esfuerzos, la vida de fatiga es sensible en especial a las condiciones de superficie. Estas condiciones de superficie son acabado de la superficie (rugosidad), las propiedades de la superficie y los esfuerzos residuales.

- Acabado de la superficie: El acabado superficial puede estar determinado por el maquinado que produce surcos pequeños o muescas pequeñas causados por el corte realizado por la herramienta. A medida que el acabado de la superficie se hace más áspero, aumenta la profundidad de esas muescas y en forma correspondiente, disminuye la vida de fatiga representada por el total de ciclos hasta la falla.

Véase a continuación la influencia del acabado superficial en la vida de fatiga de cierto material en la siguiente tabla:

Tabla 1.1 Efectos del acabado de la superficie en la vida de fatiga para un acero SAE 3130; esfuerzo revertido = 655.5 MPa.^[2]

Operación	Acabado de μm	la superficie μin	Vida de fatiga (Ciclos)
Torneado	2.67	105	24000
Pulido a mano (parcialmente)	0.15	6	91000
Pulido a mano	0.13	5	137000
Lijado	0.18	7	217000
Lijado y pulido	0.05	2	234000

- Propiedades de la superficie: Debido a los procesos de fabricación y acabado final, muchas de las propiedades de los materiales son alteradas. Si estos cambios se producen exclusivamente en la superficie del material, su vida de fatiga se puede afectar de manera importante. Se puede clasificar a estos efectos en aquellos que disminuyen la vida de fatiga y aquellos que la incrementan. Básicamente cualquier proceso que permita o facilite el agrietamiento de la superficie de un material contribuye a disminuir la vida de fatiga. Por el contrario, algunos procesos que afectan las propiedades de la superficie pueden tener un efecto benéfico al retardar el inicio de las grietas en las capas superficiales.

- Esfuerzos residuales: Con frecuencia quedan esfuerzos residuales producidos por el endurecimiento por deformación en un material que ha tenido deformación plástica durante su procesamiento. Si esos esfuerzos son de tensión, pueden promover el agrietamiento de fatiga y reducir la vida de fatiga, dependiendo de su magnitud y orientación. Por lo tanto, en cualquier material o componente que esté sujeto a condiciones de fatiga se deben evitar esfuerzos residuales de tensión. Por otro lado, están los esfuerzos residuales de compresión en la superficie de un material que pueden compensar el efecto de los esfuerzos de tensión aplicados por la condición de fatiga. Esto ocasiona que la influencia de los esfuerzos de compresión ayuden a aumentar la vida total de fatiga.

Los factores microestructurales

Se pueden obtener mejoras importantes en la vida de fatiga mediante un diseño apropiado y la atención cuidadosa a los factores mecánicos que intervienen en una situación particular de fatiga. Es posible que no sean tan importantes los incrementos de la vida de fatiga que se pueden obtener con cambios en la microestructura, pero de todos modos estos juegan un papel importante en el comportamiento de los materiales de ingeniería. Algunos de estos factores son lo que describiremos a continuación.

- *Tamaño de grano*: La influencia del tamaño de grano en la vida de fatiga puede hacer que esta aumente o disminuya de acuerdo al diámetro promedio de los granos. Un tamaño pequeño de grano parece disminuir las etapas de inicio de la fatiga porque en este momento la grieta crece a una escala cristalográfica.

- *Partículas de segunda fase*: Tienen una influencia grande en el inicio de las grietas de fatiga, debido a que pueden actuar como concentradores de esfuerzos y facilitar su inicio en la primera etapa de la formación de grieta. En la segunda etapa,

las partículas de segunda fase pueden ocasionar que se acelere la propagación de una grieta ya existente o disminuir la propagación de la misma, dependiendo si su interacción con la matriz es fuerte o débil.

- *Orientación microestructural*: La vida de fatiga es sensible a la orientación microestructural; en general es menor en un espécimen transversal a la orientación de la fibrización. Un factor importante es la orientación preferente de los granos introducida por tratamiento mecánico. Cuando se aplica un trabajo mecánico en frío en un material, se busca con ello dar una mejor orientación de los granos para que los mismos otorguen mayor resistencia en una dirección en la cual los esfuerzos serán mayores. De igual manera ocurre en la fatiga. Si se tiene cierta dirección de granos, el crecimiento de la grieta producto de la fatiga, puede verse afectado acelerándose o disminuyéndose, si la dirección del plano de crecimiento de la grieta es transversal a la dirección de los granos en el espécimen o probeta.

Las inclusiones son una de las principales causas de la anisotropía de la vida de fatiga. Los materiales de ingeniería contienen comúnmente inclusiones no metálicas disueltas y combinadas, así como variaciones en la composición química a las que se conocen como segregaciones. Estas imperfecciones, en particular las segregaciones y las inclusiones, junto con el proceso de conformado, tal como laminación o forja, se combinan y producen variabilidad de las propiedades mecánicas. Por otra parte, estas variaciones de las propiedades dependen de la dirección del trabajo mecánico. Un comportamiento variable como este se denomina anisotrópico.

Las propiedades mecánicas que tienen propensión especial a los efectos de la anisotropía son la ductilidad, la tenacidad y la resistencia a la fatiga.

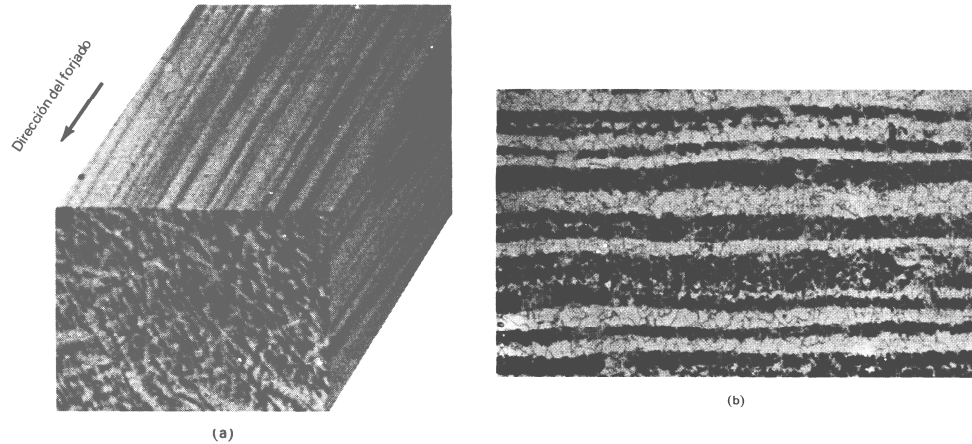


Figura 1.4 *Microestructura de un acero forjado en prensa de aleación baja (30X); b) Bandas microestructurales en placa laminada de acero de bajo carbón, 225 X.^[2]*

Los factores del medio ambiente

Dentro de los factores del medio ambiente se pueden considerar los efectos térmicos, la fatiga de contacto y los efectos de corrosión.

a) *Efectos térmicos*: Considerando el efecto de la temperatura en el comportamiento a la fatiga desde dos puntos de vista diferentes se tiene que:

- Temperatura constante: el efecto de la temperatura en la fatiga es consistente con su efecto en la resistencia a la tensión, esto es a medida que disminuye la temperatura, la resistencia aumenta pero si el material tiene alguna muesca se hace más sensible al disminuir la temperatura (esto es, disminuye su tamaño crítico de grieta). En consecuencia, disminuye la resistencia a la fatiga de los especímenes con muescas.
- Ciclos térmicos: existe un problema de fatiga en los componentes que se encuentran sujetos a condiciones operativas en los que ocurren cambios térmicos cíclicos. Esas partes pueden o no estar sujetas a esfuerzos mecánicos importantes además de los esfuerzos térmicos e incluyen las aplicaciones

siguientes: motores de combustión interna, componentes de turbinas, hornos, etc.

b) *Fatiga de contacto*: La falla que se produce por la fatiga de contacto se presenta cuando las superficies se tocan repetidamente. Los esfuerzos que se producen son un poco más complejos que los de la flexión estándar o la fatiga axial. En la mayoría de los casos el área de contacto tiende a ser pequeña lo cual ocasiona que los esfuerzos sean elevados. Comúnmente este tipo de fatiga por contacto produce tres tipos de daño: picaduras de superficie, picaduras bajo la superficie, y escamaduras.

c) *Fatiga por corrosión*: Se puede considerar la fatiga por corrosión como un caso especial de la fatiga general, en la que hay algunos efectos modificantes que resultan del medio ambiente. Pero, si además combinamos los agentes del medio corrosivo con esfuerzos cíclicos, puede ser mucho más perjudicial que si ambos actuaran de manera separada.

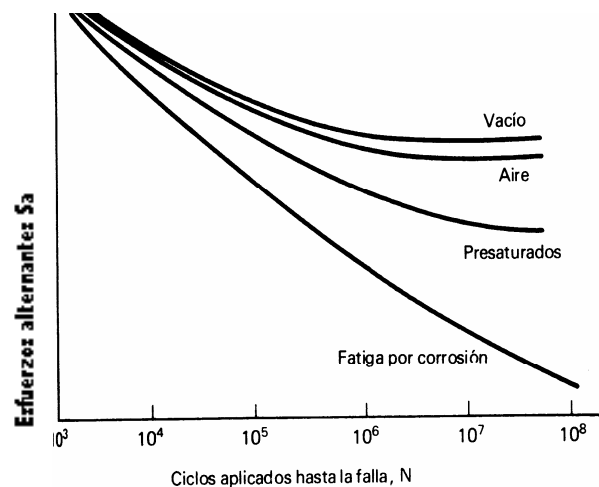


Figura 1.5 Comparación del comportamiento de la vida de fatiga en aleaciones de ingeniería típicas bajo diversas condiciones ambientales. Presaturados se refiere a especímenes saturados en líquido corrosivo antes de probárseles al aire.

1.1.8. Inicio de la grieta de fatiga

Las grietas pueden iniciarse debido a imperfecciones microestructurales como lo son los defectos de solidificación. Algunos de estos defectos son comunes en los productos colados. Algunos de los más importantes son: la segregación química, donde ocurre la creación de regiones en el producto solidificado que difieren de la composición química nominal de la aleación, produciendo rechazo del soluto; las inclusiones no metálicas que se producen en el metal durante la solidificación; las contracciones que resultan de una red de vacancias en el interior de un colado produciendo contracción del metal al enfriarse desde el estado líquido hasta solidificarse; los huecos de gas y porosidad que se presentan como resultado de la disminución de solubilidad de los gases en función de la temperatura del líquido.

Por otra parte, cuando se somete un material de ingeniería cristalino a cargas cíclicas, este puede desarrollar en su superficie regiones muy localizadas de deslizamiento a escala atómica, las cuales ocurren en planos adyacentes paralelos en el cristal. El mecanismo de deslizamiento cuando se inicia una grieta por fatiga se basa en una serie de intrusiones y extrusiones que se desarrollan en la superficie durante los ciclos de esfuerzo.

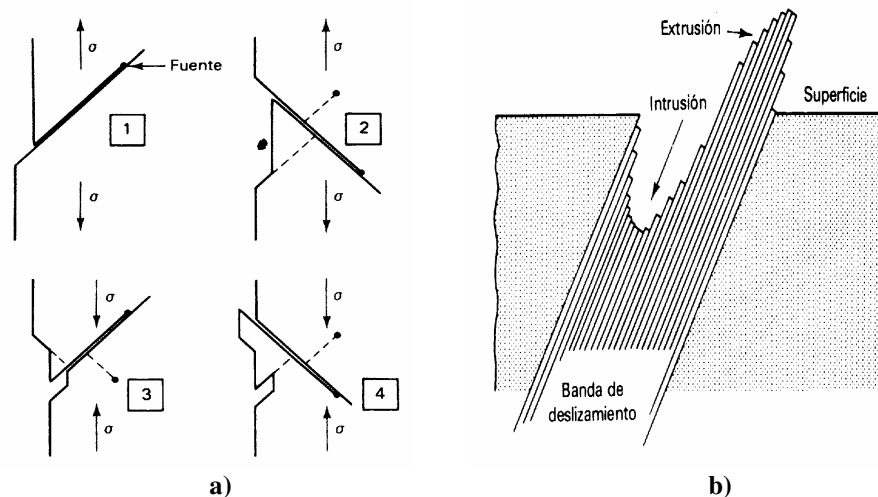


Figura 1.6 Esquemas de mecanismos que conducen al inicio de las grietas de fatiga: a) extrusiones e intrusiones en regiones de deslizamiento producidas por esfuerzos cíclicos. b) intrusiones y extrusiones de la banda de deslizamiento previas al inicio de la grieta (obsérvense los concentradores de esfuerzos que este proceso forma en la superficie).

1.1.9. Propagación de las grietas por Fatiga

Representa la etapa II del crecimiento de grietas. La proporción del crecimiento de las grietas de fatiga es una función de ciertas propiedades del material, de la longitud de las grietas y del nivel de esfuerzos aplicados.

Mecanismos de propagación de las grietas

En la etapa II se puede encontrar un crecimiento de grietas por el orden de 25 μm por ciclos. Esto proporciona facilidad de observación de las grietas y la zona de fractura mediante ensayos de laboratorio con microscopio electrónico.

Durante esta misma etapa, la grieta de fatiga se propaga en forma incremental con cada ciclo de esfuerzos. En esta etapa la raíz que avanza de la grieta de fatiga se engrosa durante la parte de tensión del ciclo de esfuerzos y durante la parte de compresión la raíz de la grieta se vuelve aguda.

En la figura 1.7 se puede observar la propagación de la grieta mediante el proceso de despunte plástico. En ese proceso la grieta de fatiga pasa por un ciclo de esfuerzo y avanza en forma incremental, formándose unos surcos alrededor de la superficie de la grieta de fatiga. Estas son unas marcas que indican el proceso de crecimiento en forma de incrementos por cada ciclo.

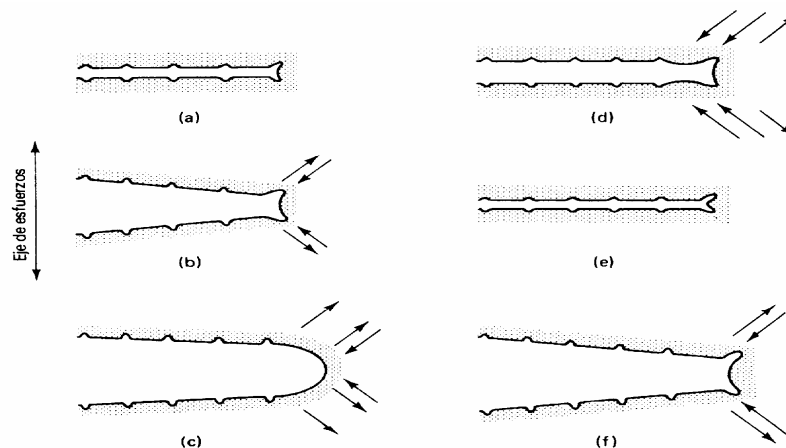


Figura 1.7 Esquema de un proceso de despunte plástico durante la propagación de la grieta de fatiga (etapa II): (a) carga cero; (b) carga pequeña de tensión; (c) carga máxima de tensión; (d) carga de compresión pequeña; (e) carga máxima de compresión; (f) carga pequeña de tensión. Las flechas dobles en (c) y (d) simbolizan el ancho más grande de las bandas de deslizamiento en la grieta, en estas etapas del proceso.^[2]

Proporción de crecimiento de las grietas

En la etapa II, las grietas puede crecer desde un tamaño mínimo hasta un tamaño apreciable de longitud crítica con la que se produce fractura rápida del material.

Según datos registrados a partir de mediciones de crecimiento de grietas obtenidos a través de ensayos no destructivos, la relación entre el tamaño de la grieta y la magnitud de los esfuerzos aplicados es de tipo no lineal, es decir a medida que aumenta la longitud de la grieta, disminuye la cantidad de ciclos necesarios para propagar la grieta una distancia específica. Si se tienen dos pruebas iniciadas cada una con la misma profundidad de grieta o muesca pero con niveles de esfuerzos distintos, la propagación de grietas es mayor en aquella que tiene mayores niveles de esfuerzos para una misma cantidad de ciclos (N).

La proporción de crecimiento de grieta se puede describir como la pendiente (da/dN) de la curva “a” contra “N” en cualquier punto de la curva, y se puede decir que esta pendiente aumenta a medida que se incrementa la longitud de la grieta.

El nivel de esfuerzos aplicados tiene un efecto importante en la propagación de las grietas de fatiga, es decir, acorta la vida en la etapa II.

Relación de la intensidad de esfuerzos

La proporción del crecimiento de grietas (da/dN) se relaciona con el nivel de esfuerzo aplicado (S), la longitud de la grieta (a) y algunas propiedades del materia en la mayor parte de su etapa de propagación, como se observa en la siguiente ecuación:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (\text{Ecuac. 1.3})$$

Donde:

ΔK : rango del factor de intensidad de esfuerzos ($K_{\text{máx}} - K_{\text{mín}}$)⁹

C, m: constantes, que dependen del material, medio ambiente, temperatura, frecuencia, etc.

Esta expresión es conocida como ecuación de Paris-Edrogon^[9], y relaciona la proporción del crecimiento de grietas con el factor de intensidad de esfuerzos.

Evaluando el comportamiento a la fatiga de materiales de ingeniería bajo condiciones adecuadas de fatiga se puede graficar el crecimiento de grietas como se ilustra en la figura 1.8, donde se observa que en la región I dicho crecimiento es muy pequeño, mientras que en la región II el log de la velocidad de crecimiento puede variar linealmente respecto al log del parámetro de intensidad de esfuerzos (ΔK), mientras que en la región III se observa el incremento de las grietas y la aproximación a la etapa de fractura rápida.

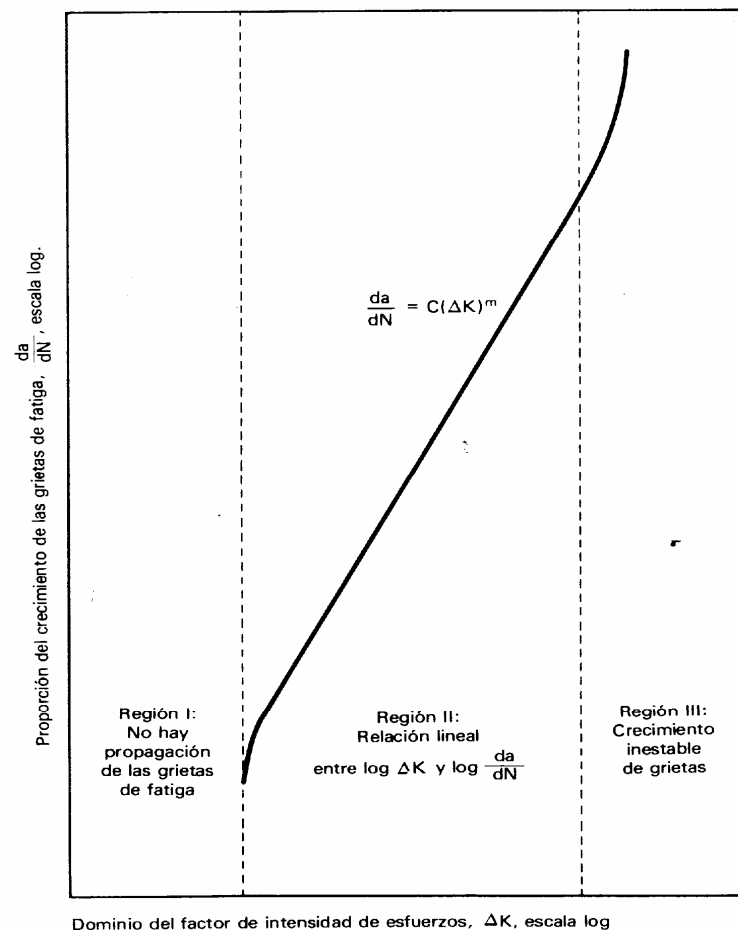


Figura 1.8 Comportamiento típico del crecimiento de las grietas de fatiga en los materiales de ingeniería, se ilustran las tres regiones principales de la fatiga.

A continuación se presenta la ecuación de Forman^[9] que se emplea para la representación de la variación de da/dN con el coeficiente de carga R y el valor crítico de K y K_c cuando la fractura de la muestra ocurre violentamente.

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K)^m}{(1-R)(K_c - \Delta K)} \quad (\text{Ecuac. 1.4})$$

Esta ecuación puede describir el comportamiento acelerado de da/dN observado para altos valores de ΔK , Además, describe el incremento de da/dN asociado con el incremento de R , desde 0 hasta 1.

Por lo tanto se puede decir que cuando es necesario describir el efecto de K cercano a K_c , o el efecto de R en da/dN , la ec. de Forman puede ser utilizada para representar el comportamiento de da/dN . Cuando solo se involucra ΔK en la Región II, puede ser utilizada la ecuación de Paris.

1.1.10. Características de apariencia de la fatiga

Una vez que ocurre una fractura por fatiga y se realiza la inspección de las superficies de fractura se pueden identificar aspectos importantes que denotan la forma en que se produjo el inicio de la grieta, la dirección de su crecimiento, propagación y otros datos adicionales que se relacionan con las condiciones intrínsecas del material y externas a este. Analizando estos diversos factores se puede modificar la fabricación de elementos de máquinas así como el diseño de los mismos y el tipo de material a usar, es aquí la importancia de los ensayos donde se observan las características de apariencia de fatiga.

Características Macroscópicas

Comúnmente las fallas por fatiga se presentan con poca deformación plástica a una escala macroscópica. Pero a medida que el material tiene mayor tenacidad, la grieta aumentará de tamaño y también la cantidad de superficie del borde cortante en

la zona de la fractura final. A simple vista la falla de fatiga presenta frecuentemente las llamadas marcas de playa que identifican los ciclos de progresión de la grieta de fatiga. Estas marcas dependen de la geometría del material, y cantidad y forma en que es aplicado el esfuerzo.

Generalmente la grieta de fatiga se propaga en un plano normal al eje de tensión principal, lo que permite determinar el origen de la grieta y su propagación, identificando también las zonas de máximo esfuerzo.

Además, macroscópicamente se puede observar con un ligero aumento como el que obtendríamos con una lupa, las tres zonas características de las fallas por fatiga y la diferencia de tamaños de estas zonas de acuerdo con el tipo de carga, así como conocer si el componente es liso o con muescas.

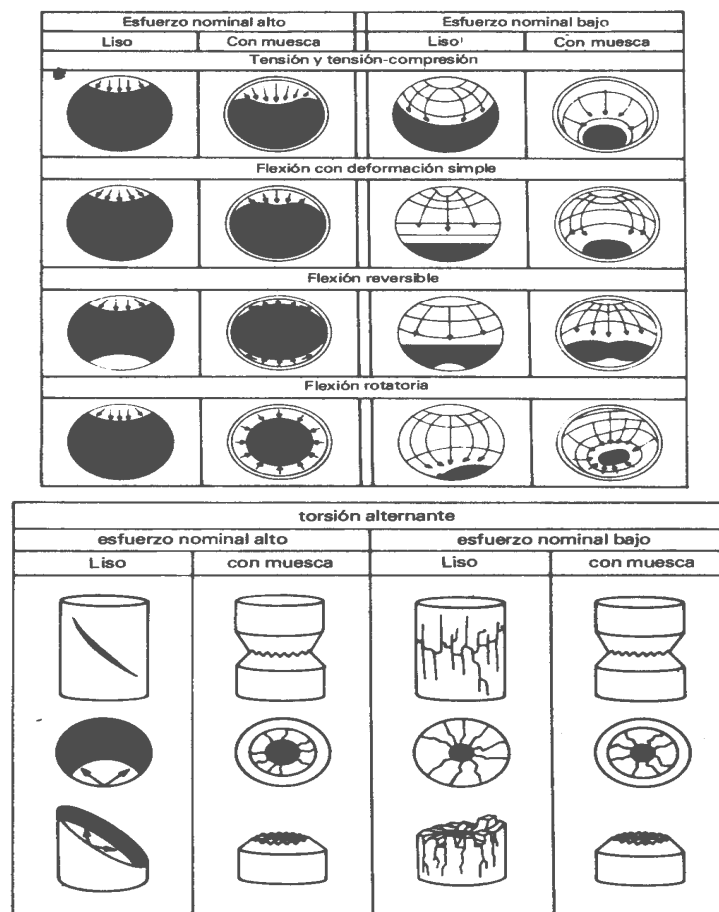


Figura 1.9 Representaciones esquemáticas de la apariencia de las superficies de fractura por fatiga bajo distintas condiciones de esfuerzos y concentraciones de esfuerzos.^[2]

Características microscópicas

Para determinar las propiedades de la falla por fatiga a nivel microscópico se requiere el empleo de un microscopio electrónico, el cual es un aparato que nos permite observar las características de apariencia de la superficie de fractura en la mayoría de los materiales de ingeniería.

Con la observación de las grietas a nivel microscópico se puede estudiar más a fondo el mecanismo de propagación y crecimiento de estas, así como también las *estriaciones de fatiga* que representan el avance de las grietas de fatiga durante un ciclo de esfuerzos. Estas estriaciones son marcas características de un crecimiento de grieta por fatiga progresivo y por lo general, solo pueden observarse a aumentos muy elevados. También se forman muchas mesetas paralelas separadas por canales longitudinales; estas mesetas son generalmente perpendiculares a la dirección de los máximos esfuerzos principales actuantes y están conformadas por un grupo de estriaciones que tienen direcciones semejantes.

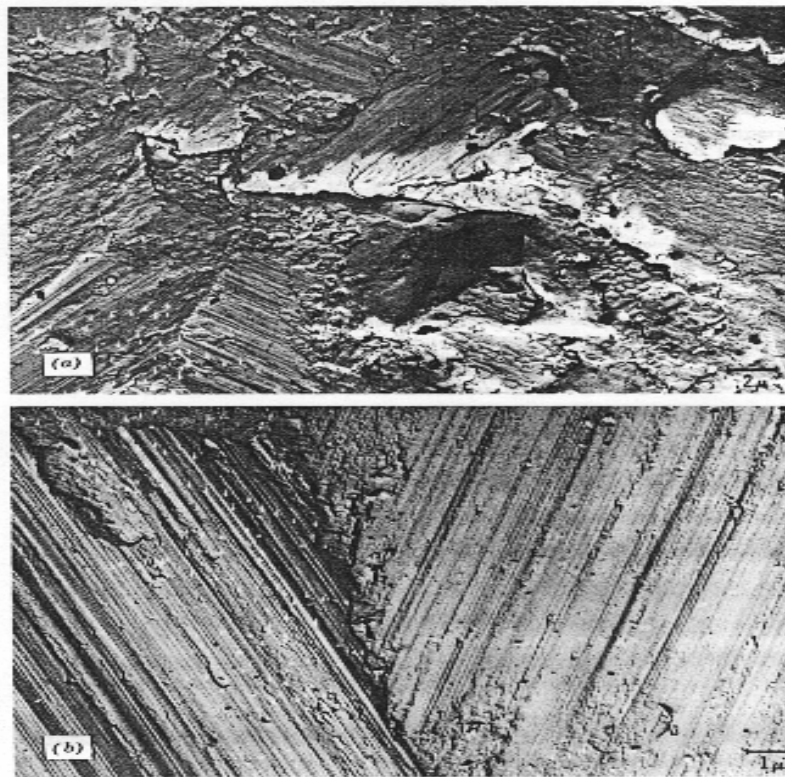


Figura 1.10 Rasgos y artificios que asemejan estriaciones^[10]

1.2. CORROSIÓN

1.2.1. Concepto de corrosión

Es la degradación de un material, generalmente un metal, por causa de una reacción química o electroquímica con su medio. Mayormente es producida por la acción electroquímica o galvánica. Los líquidos corrosivos atacan a los materiales provocando fallas prematuras. Para evitarlo se deben seleccionar materiales y recubrimientos que impidan estas reacciones y que permitan la operación en ambientes extremos.

1.2.2. Fatiga Corrosión

En un ambiente corrosivo se producen daños a la superficie de los materiales y por lo general el fallo para un nivel de carga ocurre en un número mucho menor de ciclos y no se observa un verdadero límite de fatiga. El fallo ocurre a cualquier carga aplicada si el número de ciclos aplicado es suficientemente grande. El agrietamiento de un metal como resultado de la acción combinada del medio corrosivo y las cargas repetidas o alternadas se llama fatiga con corrosión. El daño causado al material es por lo general mayor que la suma de los daños que causa la corrosión y la fatiga cada uno por separado.

Algunos rasgos distintivos de la fatiga por corrosión es la aparición de grietas debidas a la fatiga. Normalmente se producen muchas mas grietas en corrosión que en una falla por fatiga normal debido a que el ataque electroquímico se reduce a medida que la grieta crece. En consecuencia, la velocidad de propagación de la grieta disminuye, dando tiempo a que se formen más grietas.

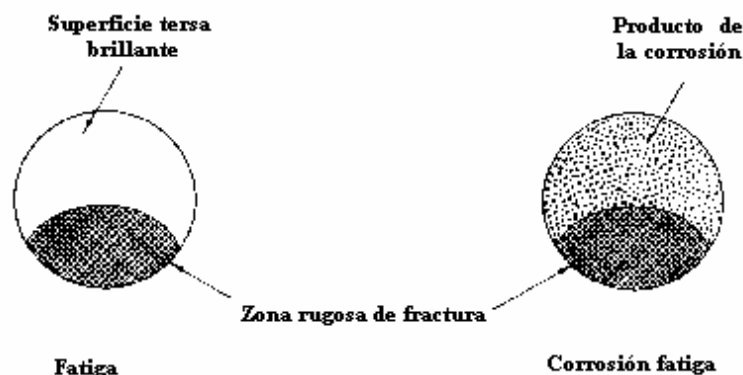


Figura 1.11 Ilustración esquemática de los efectos de corrosión en la superficie de fractura por fatiga.^[11]

Las grietas de fatiga con corrosión son típicamente transgranulares y con frecuencia ramificadas. Las grietas de fatiga son de manera similar transgranulares pero es raro encontrar más de una grieta principal y la grieta comienza desde la superficie. En fatiga con corrosión se forman picaduras por corrosión en la superficie del metal en donde se inician las grietas.

El acero sufre fatiga corrosión en aguas dulces naturales, agua de mar, productos condensados de combustión, medios químicos en general, etc.

Las aguas dulces naturales y en particular las aguas salobres tienen mayor efecto sobre la fatiga con corrosión de los aceros que sobre el cobre ya que este metal es más resistente a la corrosión. Los aceros inoxidable, el Ni y las aleaciones a base de Ni son mas resistentes a la corrosión que los aceros al carbono.

En general la resistencia de los metales a la fatiga con corrosión está asociada mayormente a su resistencia inherente a la corrosión que con su resistencia mecánica.

1.2.3. Medidas preventivas de la fatiga con corrosión

Existen diversos métodos para reducir la fatiga con corrosión. Si el medio corrosivo consiste en una solución acuosa, se puede implementar una protección

catódica logrando obtener por esta vía que el límite de fatiga se pueda elevar hasta el valor obtenido en vacío. Otra forma es la de actuar propiamente en la solución colocando inhibidores de corrosión, disminuyendo así la acción corrosiva mediante el aporte de sustancias tales como $\text{Cr}_2\text{O}_7\text{Na}_2$ al agua en razón de 200 ppm. Otra posibilidad consiste en utilizar recubrimientos de sacrificio de Zn o Cd que son electrodepositados sobre el metal y proporcionan protección al mismo en base a los defectos de recubrimiento. También se utilizan otros elementos con la misma técnica de electrodeposición tales como Ag, Cu, Pb y Sn que proporcionan protección contra la corrosión sin afectar las propiedades de fatiga del acero.

1.2.4. Mecanismos de la fatiga con corrosión

La fatiga al aire implica deslizamientos localizados que forman zonas de extrusión e intrusión del metal en la superficie. El origen y desarrollo de grietas empieza en la superficie del material por las agrupaciones de bandas de deslizamiento.

A diferencia de la fatiga en aire, en la fatiga con corrosión hay indicios de que el metal bajo tensiones cíclicas se hace más sensible a la corrosión en las aglomeraciones de bandas de deslizamiento. Esto puede ser causado en su mayor parte, por el hecho de que en cada ciclo de la aplicación de tensión se produce una superficie metálica limpia. El resultado es una marcada tendencia a la disolución de tales áreas que actúan como ánodos. Este es el mecanismo principal que produce la fatiga con corrosión para los metales en general; no sin dejar afuera otros factores suplementarios que consisten en la reducida polarización anódica de un metal, o la segregación de impurezas o de átomos aleados siguiendo zonas de imperfecciones producidas por deslizamientos, y actuando estos últimos átomos como electrodos de pilas galvánicas que forman parte del proceso de corrosión.

Finalmente, es altamente probable que la propagación de las grietas se deba en parte a la absorción de O_2 y H_2O ó ambos, así como de varias especies iónicas a lo

largo de las paredes de la grieta, las cuales reducen la energía superficial del metal y también evitan que la grieta se vuelde de nuevo en cada ciclo de tensión.

1.3. ENSAYOS MECÁNICOS

1.3.1. Ensayo de Dureza

El ensayo de dureza mide la resistencia de la superficie de un material a la penetración por un objeto duro. Las pruebas de microdureza se pueden realizar empleando penetradores de tipo Vickers y Knoop.

Dureza Vickers

La determinación de la dureza Vickers requiere la utilización de un penetrador constituido por una pirámide de diamante de base cuadrada. El número de dureza Vickers se obtiene con mediciones microscópicas de las diagonales de la impresión que resulta con cargas predeterminadas. Esta prueba se realiza para cada probeta por separado y bajo una preparación de superficie de pulido tipo espejo debido a lo diminuta y precisa que es la prueba. Esta prueba se emplea en trabajos de investigación de materiales porque proporciona un campo continuo de durezas.

Dureza Knoop

En este tipo de ensayo se utiliza un indentador piramidal de diamante similar al de la prueba Vickers pero con la diferencia de que el indentador posee una de las diagonales de mayor tamaño que la otra. Como se trata de otro procedimiento de microdureza, el acabado superficial del espécimen debe ser fino y preparado con mucho cuidado.

1.3.2. Ensayo de Tensión

El ensayo de tracción es empleado para evaluar diversas características mecánicas del material, que luego serán útiles en el diseño. Este ensayo mide la resistencia del material a una fuerza aplicada gradualmente en una dirección. Para ello se emplea una probeta con dimensiones normalizadas, la cual es colocada en la máquina de ensayos y se le aplica una carga F . El diámetro original y la longitud calibrada inicial se registran antes de iniciar el ensayo, medidas que servirán para determinar los valores de deformación.

Luego que la probeta es montada en la máquina y es cargada lentamente a tensión, se observan los valores de carga aplicada y de deformación producida. Al concluir la prueba o durante ella, los resultados se llevan a una gráfica llamada diagrama de esfuerzo-deformación.

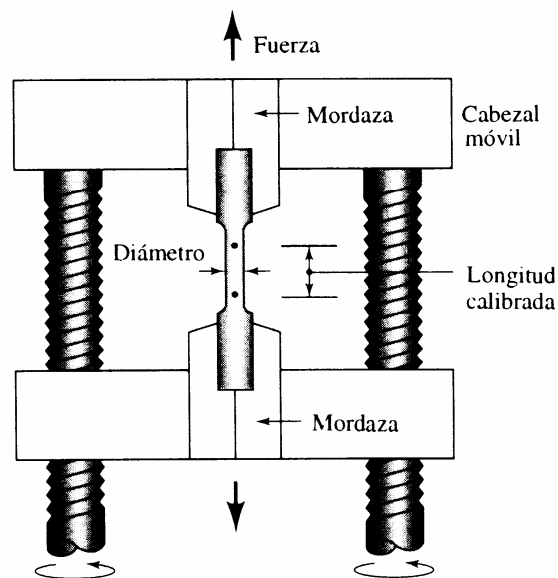


Figura 1.12 Esquema de máquina de ensayo de tensión aplicándose la fuerza unidireccional a la probeta. ^[12]

Esfuerzo y deformación ingenieril^[12]

El esfuerzo y la deformación ingenieril son definidos mediante las siguientes ecuaciones:

$$\text{Esfuerzo ingenieril: } \sigma = \frac{F}{A_0} \quad (\text{Ecuac. 1.5})$$

$$\text{Deformación ingenieril: } \varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (\text{Ecuac. 1.6})$$

Donde:

A_0 : área original de la sección transversal de la probeta antes de efectuarse el ensayo.

l_0 : distancia original entre marcas calibradas

l : distancia entre las marcas calibradas pero después de haberse aplicado la fuerza F .

Propiedades obtenidas a partir del ensayo de tensión

Por medio del ensayo de tensión se puede obtener información relacionada con las características mecánicas del material tales como la resistencia, rigidez y ductilidad.

Esfuerzo de cedencia

Es el nivel de esfuerzo en el cual la deformación plástica del material cobra importancia y, por lo tanto, es el nivel de esfuerzo que divide los comportamientos elástico y plástico del material. Se dice que por lo general este es el esfuerzo requerido en los metales para que las dislocaciones comiencen a deslizar.

En algunos materiales el esfuerzo al cual el material cambia su comportamiento de elástico a plástico no está definido claramente. En este caso se determina un esfuerzo de cedencia convencional trazando una línea paralela a la porción inicial de la curva esfuerzo deformación, pero desplazada 0,2 % del origen,

entonces el esfuerzo de cedencia convencional de 0,2 % es el esfuerzo al cual dicha línea interseca la curva esfuerzo deformación.

Resistencia a la Tensión

El esfuerzo obtenido de la fuerza de mayor magnitud aplicada es la resistencia a la tensión que es el esfuerzo máximo sobre la curva esfuerzo-deformación ingenieril.

Ductilidad

Una forma de determinar la ductilidad es calcular el cambio porcentual en el área de la sección transversal antes y después del ensayo. El porcentaje de reducción de área expresa el adelgazamiento sufrido por el material durante la prueba y viene dada por la siguiente expresión:

$$\% \text{ reducción de área} = \frac{A_0 - A_f}{A_0} * 100 \quad (\text{Ecuac. 1.7})$$

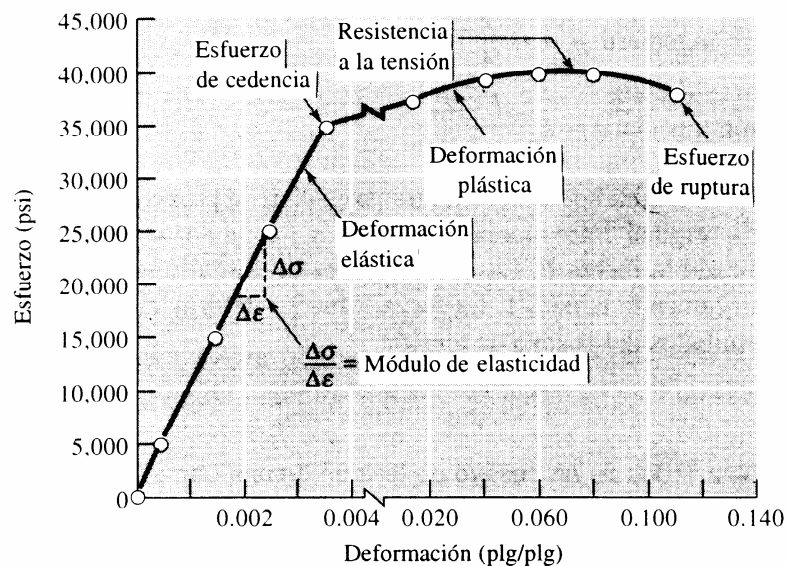


Figura 1.13 Curva de esfuerzo-deformación ^[12]

1.3.3. Ensayo de Fatiga

a) *Ensayo de la viga rotatoria en voladizo*: es un método para medir la resistencia a la fatiga de un material el cual consiste en sujetar al eje de un motor, uno de los extremos de una probeta normalizada. El otro extremo de la probeta tendrá suspendido un peso que le producirá esfuerzos alternantes de compresión y de tensión a medida que esta gira.

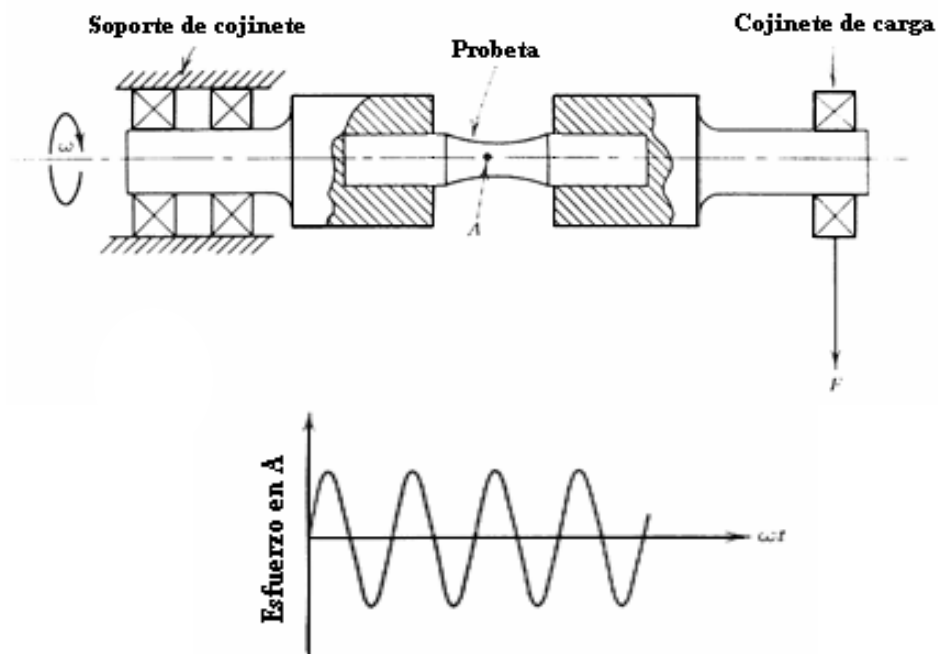


Figura 1.14 Máquina de ensayo de fatiga de viga en voladizo a flexión rotativa. ^[13]

b) *Ensayo de flexión plana*: en este caso se dispone de una probeta plana la cual esta sujeta por un extremo a un dinamómetro y el otro extremo a un brazo que le ejerce una fuerza de flexión alternante, el cual a su vez está sujeto a una manivela conectada a un motor con una excéntrica. Al girar el motor le produce un movimiento flexionante a la probeta que induce esfuerzos alternantes de tensión y compresión por arriba y debajo del plano neutro de la probeta.

1.3.4. Ensayo de Fatiga corrosión

Este ensayo es similar al de fatiga de la viga rotatoria en voladizo pero con la diferencia que la probeta se encuentra en una cámara de corrosión la cual contiene una solución corrosiva que en el presente caso es NaCl al 3%. El suministro de la solución salina se produce mediante un surtidor en la cámara que proporciona un goteo continuo de la misma.

1.4. TÉCNICAS DE DEPOSICIÓN

La mayoría de los metales casi siempre son tratados para mejorar sus propiedades superficiales, ya sea por medio de procedimientos que proporcionen buenas propiedades mecánicas o mediante el uso de recubrimientos de naturaleza metálica, cerámica o polimérica. Entre las razones principales que existen para recubrir un metal se encuentran:

- 1) Proporcionar al material base o sustrato una buena protección contra la corrosión.
- 2) Mejorar el aspecto exterior del producto, otorgando una textura, brillo y color específicos.
- 3) Mejorar la resistencia al desgaste por abrasión y reducir la fricción en la superficie del material base.
- 4) Mejorar o disminuir la conductividad eléctrica.
- 5) Preparar la superficie para un tratamiento posterior.
- 6) Reconstruir la superficie que ha estado sometida a desgaste o erosión.

Diferentes Técnicas de Deposición

A. Chapeado.

- A.1. Electrodeposición.
- A.2. Electroformado.
- A.3. Deposición sin electricidad.
- A.4. Inmersión en caliente.

B. Recubrimientos por conversión.

- B.1. Recubrimientos por conversión química.
- B.2. Anodizado.

C. Deposición en fase de vapor.

- C.1. Deposición física de vapor.
 - C.1.1. Deposición física en fase vapor asistida por plasma.
- C.2. Deposición química en fase vapor.
 - C.2.1. Deposición química en fase vapor asistida por plasma.

D. Recubrimientos orgánicos.

E. Esmaltado en porcelana y recubrimientos cerámicos.

F. Otros proceso de recubrimientos.

1.4.1. Introducción al concepto de Plasma

En general se dice que existe un cuarto estado de la materia que es llamado plasma. Si se considera un gas formado por átomos y moléculas neutras y se le proporciona suficiente energía, los átomos comienzan a ionizarse y aparecen en el gas partículas cargadas eléctricamente. Cuando el número de partículas cargadas es lo

suficientemente grande como para que el comportamiento dinámico del sistema esté determinado por fuerzas electromagnéticas de largo alcance y no por colisiones entre las partículas neutras, como ocurriría en el caso de los gases ideales, entonces se dice que el gas se ha transformado en un plasma.

Entrando ahora en una definición más rigurosa se puede decir que un plasma es un gas cuasi-neutro de partículas cargadas y neutras que presentan un comportamiento colectivo y en el cual la energía potencial de una partícula típica debida a la interacción con su vecino próximo es mucho menor que su energía cinética. Esto quiere decir entonces que este comportamiento colectivo se va a ver afectado en su mayoría por ondas electromagnéticas de largo alcance, a diferencia de los gases ideales cuyo comportamiento está afectado por los choques elásticos de las partículas vecinas.

1.4.2. Procesamiento por Plasma

Son técnicas que utilizan plasmas para modificar la superficie o el volumen de los materiales. En procesos superficiales se utiliza la deposición de un recubrimiento delgado sobre el sustrato, ambos de diferente material. También se modifican las capas superficiales de un material cambiando su morfología, composición química, etc. Asimismo, es posible mejorar la resistencia al desgaste o a la corrosión de un material dado, su compatibilidad físico-química con determinados medios, su apariencia estética, etc.

1.4.3. Ventajas del procesamiento de materiales por plasma

- Posibilidad de obtener recubrimientos con composición química y estructura controlada (morfología, estequiometría, tensiones residuales, dureza, etc.) por medio del control durante el proceso de las condiciones de la deposición.

- Capacidad de alcanzar mayor adherencia de los recubrimientos, consecuencia esta del proceso previo de limpieza del sustrato por el bombardeo iónico incluyendo el mismo durante la deposición.
- Posibilidad de utilizar temperaturas menores para los procesos de deposición, comparadas con otros métodos convencionales.
- Factibilidad de depositar una amplia gama de materiales inorgánicos tales como metales, aleaciones, cerámicos, así como también materiales orgánicos.
- Menores tiempos necesarios para el procesamiento de endurecimiento superficial asistido por plasma.
- Posibilidad de alcanzar un elevado control de los parámetros del proceso y propiedades del recubrimiento.

1.4.4. Técnicas de procesamiento por plasma

Se puede establecer una división en base al tipo de plasma utilizado, ya sea para un plasma a alta presión en el cual sus especies se encuentran a la misma temperatura, denominado *plasma térmico*, o un plasma a baja presión en el cual sus electrones libres no están en equilibrio térmico con las especies pesadas, denominado *plasma fuera de equilibrio o de baja densidad*.

Para los plasmas de baja densidad las técnicas pueden dividirse, según el tipo de plasma, en PVD (“Physical Vapour Deposition”) o CVD (“Chemical Vapour Deposition”).

La técnica PAPVD (“Plasma Assisted Physical Vapour Deposition”) y PACVD (“Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition”) están referidas también a plasmas de baja densidad, según se trate de la técnica PVD o la técnica CVD respectivamente. La diferencia está en la forma en que se introducen las especies de la mezcla gaseosa en el reactor de plasma.

Para el caso de PAPVD, algunas especies se producen como consecuencia de la evaporación del material sólido que se encuentra dentro del mismo reactor o por bombardeo del material con iones positivos (“sputtering”).

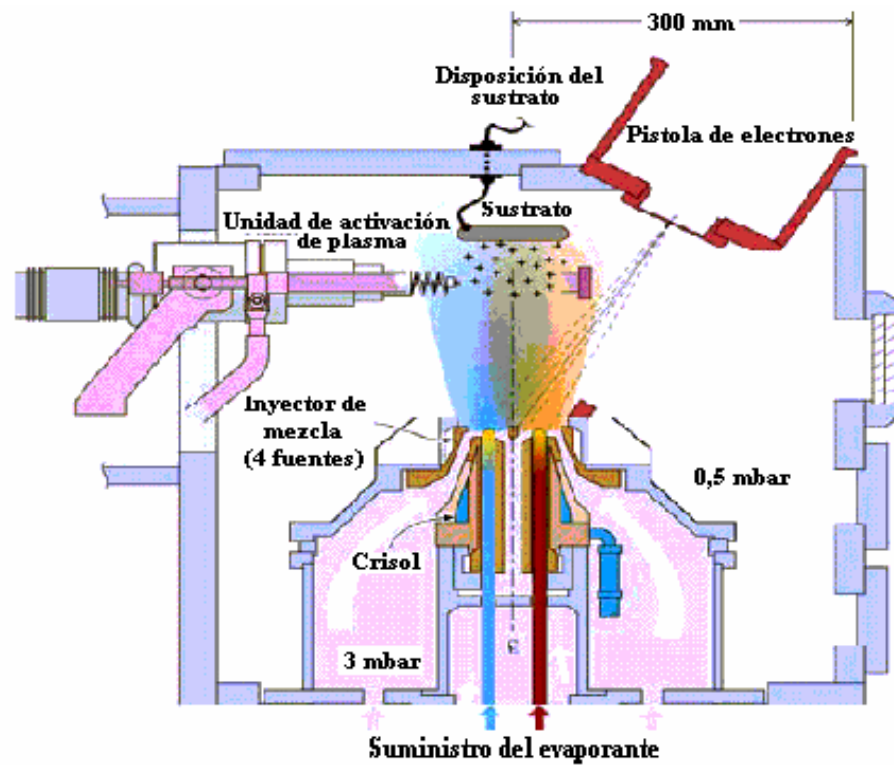


Figura 1.15 Procesamiento por técnica PAPVD.^[14]

Para el caso de PACVD las especies se introducen como gases puros o como vapores de compuestos moleculares que contienen especies propias del recubrimiento a ser producido.

En relación a las técnicas de procesamiento por plasma de baja densidad existen tres subgrupos los cuales son:

- CVD
- PVD
- Modificación superficial

A continuación se presenta un esquema que indica los diferentes tipos de procesamiento por plasma.

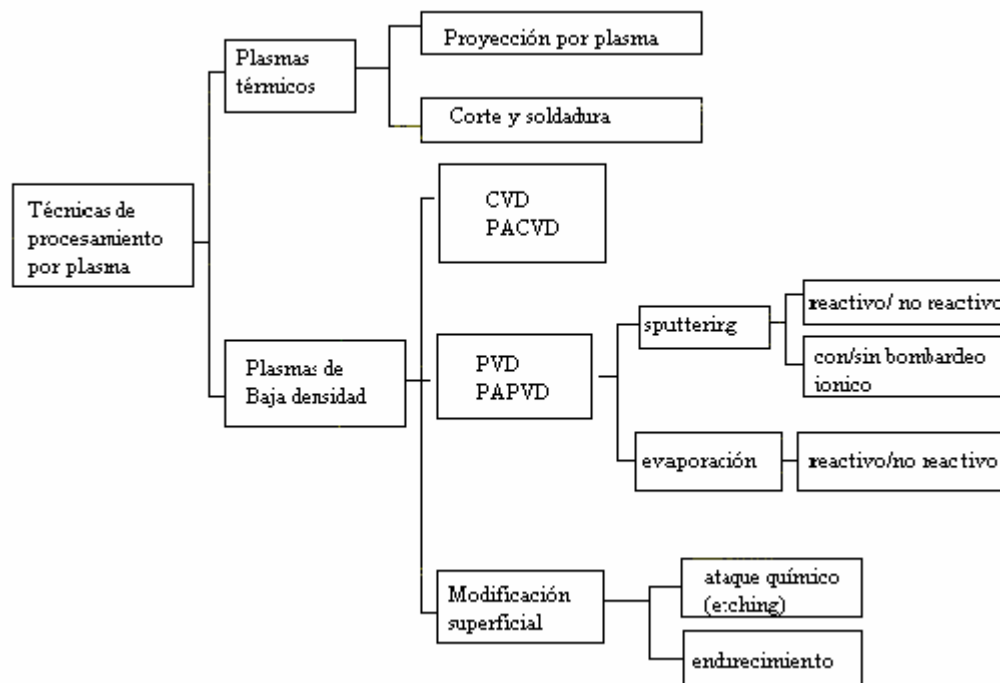


Figura 1.16 Técnicas de procesamiento por plasma. ^[15]

1.4.5. Deposición física en fase de vapor

Las técnicas de recubrimiento PVD se refieren a una familia de procesos en los cuales se emplea el plasma para generar y transportar el vapor del material de recubrimiento y la forma en que luego se deposita sobre el sustrato. La técnica PVD se usa en la aplicación de una alta variedad de recubrimientos orgánicos e inorgánicos sobre sustratos que pueden ser metales, vidrios, cerámicos, plásticos, etc.

La técnica PVD asistida por plasma ha significado un aumento importante en la eficiencia de las técnicas tradicionales debido principalmente a una condición de falso equilibrio del plasma que ha permitido generar especies reactivas a relativas

bajas temperaturas y aumentar la velocidad de deposición, por la presencia de iones que pueden ser acelerados eléctricamente hacia el sustrato.

Técnicas de PVD

En el procesamiento de metales por la técnica de PVD, dado que el transporte de las especies de recubrimiento se realiza por medios físicos, es necesario que este proceso se realice en una cámara de alto vacío para que haya un camino libre por el cual los átomos y moléculas superen la distancia entre el material de recubrimiento que se encuentra en un *blanco* (fuente del recubrimiento) y el sustrato.

Entre las diferentes técnicas del proceso PVD se encuentran la evaporación en vacío y el “sputtering”. Con la posibilidad del manejo del plasma se suma a estas técnicas una nueva llamada “ion plating”, además de desarrollar procesos de evaporación o “sputtering” reactivos que permiten realizar deposición de nuevos materiales.

Proceso de evaporación al vacío

En el proceso de evaporación al vacío, se sublima el material que luego será depositado al condensarse en el sustrato. Como su nombre lo indica la técnica consiste en la vaporización del material sólido calentándolo a altas temperaturas. Subsecuentemente, las partículas producidas viajan hasta el sustrato y se condensan formando una película delgada. La forma del calentamiento del recubrimiento se puede llevar a cabo mediante el disparo de un haz de electrones, por calentamiento eléctrico o por calentamiento por resistencia de un recipiente que lo contenga.

Independientemente de la forma en que sea calentado el material de recubrimiento, los átomos evaporados dejan la fuente (blanco) y siguen trayectorias en línea recta hasta que chocan con moléculas de gas o con una superficie sólida. Es por esto que se emplea una cámara de vacío para así evitar que los átomos provenientes de la fuente choquen con moléculas o partículas de otros gases. La colocación del sustrato se dispone en forma tal que pueda recibir los átomos de vapor de la fuente en toda la superficie deseada. El choque de las partículas en forma

de vapor proveniente del blanco con la superficie relativamente fría del sustrato implica que el nivel de energía de estos átomos se reduce, no pudiendo permanecer en forma de vapor y quedando adheridos al sustrato, formando entonces una película delgada.

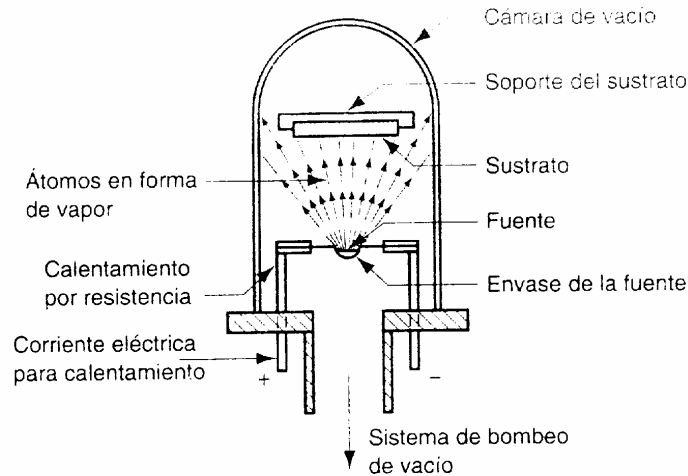


Figura 1.17 Instalación para la deposición física de vapor por evaporación al vacío. ^[16]

Un *proceso de evaporación reactivo* es aquel cuyo plasma contiene un gas no inerte capaz de reaccionar con los átomos provenientes del blanco para formar compuestos que se depositarán en el sustrato.

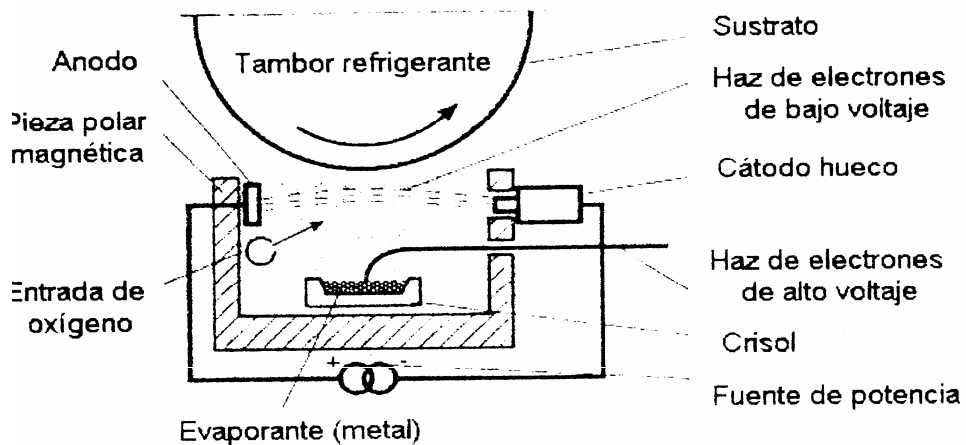


Figura 1.18 Proceso de evaporación reactivo asistido por un haz de electrones. ^[15]

Proceso de bombardeo con partículas atómicas (“sputtering”)

Otro proceso incluido dentro de las técnicas PVD consiste básicamente en la creación de las partículas en fase vapor provenientes de la fuente, partiendo de la misma en forma de átomos o moléculas que han sido arrancadas mecánicamente mediante el bombardeo de partículas atómicas de energías suficientemente altas como para producir suficiente transferencia de energía. Esto permite que las partículas de la fuente puedan desprenderse y proyectarse fuera del blanco. La forma más conveniente de emplear partículas de alta energía es con un gas ionizado, como el argón energizado mediante un campo eléctrico para formar un plasma. Como proceso de PVD, el “sputtering” involucra el bombardeo de material de recubrimiento catódico con los iones de argón (Ar^+) y provoca que los átomos de la superficie escapen y se depositen en un sustrato, formando una película delgada sobre él. El sustrato estará colocado cerca del cátodo y a una mayor temperatura para incrementar la unión de los átomos del recubrimiento.

El bombardeo con partículas atómicas se aplica casi a cualquier material, tanto metálico como no metálico, aleaciones, cerámicas y polímeros. Las películas de aleaciones y compuestos pueden procesarse mediante deposición electrónica sin cambiar su composición química. Las películas de compuestos químicos también se depositan mediante el empleo de gases reactivos que forman óxidos, carburos o nitruros con el metal chisporroteante.

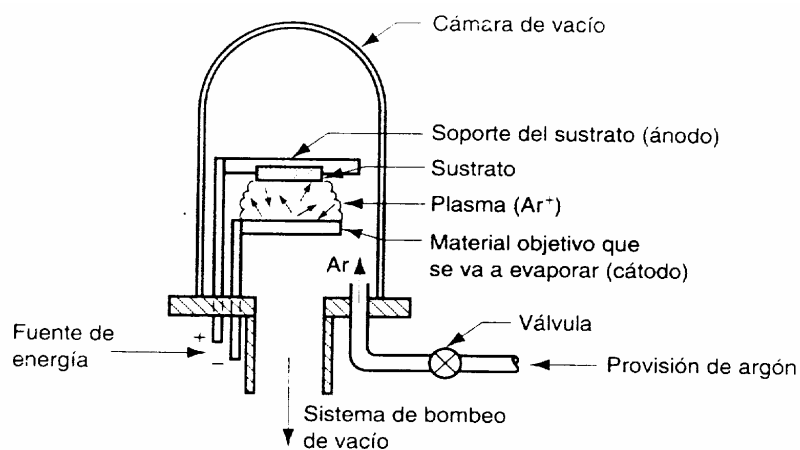


Figura 1.19 Instalación posible para el bombardeo de partículas atómicas en forma de deposición física de vapor.^[16]

El proceso de “sputtering” también es empleado ampliamente en la limpieza de sustratos previo a otros tratamientos de deposición de películas delgadas. Algunas características del proceso de “sputtering” se pueden resumir de la siguiente manera:

- a) Las especies arrancadas son generalmente neutras.
- b) La energía de los iones arrancados del blanco tiene una distribución maxwelliana con una larga cola hacia las energías altas. Cuando se eleva la energía de los iones, el pico de la distribución se desplaza levemente hacia energías mayores, ocasionado por el efecto opuesto que proviene del hecho que a mayor energía los iones incidentes penetran mayor distancia en el blanco.
- c) La velocidad del proceso, la cual indica la eficiencia del mismo, se mide con un parámetro llamado “sputtering yield” y se simboliza con la letra Y.

El proceso PAPVD por “sputtering” es bastante adecuado para la deposición de recubrimientos con multicomponentes, donde los distintos átomos son eyectados capa a capa desde un blanco múltiple formándose una película homogénea en el sustrato. Esto se debe a los índices característicos del proceso de “sputtering” en torno a su eficiencia y velocidad, que son relativamente bajos y con corrientes iónicas limitadas, lo cual lo hace un proceso menos intenso, refiriéndonos a los niveles energéticos.

“Magnetron sputtering”

Con el propósito de incrementar la eficiencia de los iones del proceso de “sputtering” a bajas presiones, se implementa un nuevo dispositivo capaz de generar un campo magnético transversal, normal al campo eléctrico ya existente. Pero la implementación del campo magnético hará que se concentren partículas del recubrimiento en unas zonas más que en otras de la superficie del sustrato, disminuyendo la uniformidad con que el recubrimiento se adhiere a este. Una de las

posibles soluciones a esta problemática es la de utilizar un cátodo con forma cilíndrica y el campo magnético paralelo al eje del cilindro. De esta manera se hacen más uniformes los recubrimientos sobre sustratos tridimensionales ubicados en el interior de un cátodo hueco.

Con este implemento se tiene una ventaja, cual es el poder utilizar eficientemente la potencia de descarga en el cátodo (mayor a 60%) para generar altas densidades de corrientes (aproximadamente 50 mA/cm^2) a tensiones relativamente bajas ($\sim 500 - 1000 \text{ V}$), aumentando de esa forma las velocidades de deposición. Existe otra ventaja adicional la cual permite trabajar sobre áreas grandes y a temperaturas relativamente bajas ya que la película no está sometida a un bombardeo del plasma o de electrones.

El empleo de la técnica de “*magnetron sputtering*” permitió que se empleara el proceso de “sputtering” con más frecuencia, ya que anteriormente se utilizaba más el proceso de PVD por evaporación.

En el presente las técnicas PVD son aplicadas en una diversidad de campos, desde aplicaciones en óptica, microelectrónica, hasta los recubrimientos sobre vidrios de hasta 3,5 m de largo.

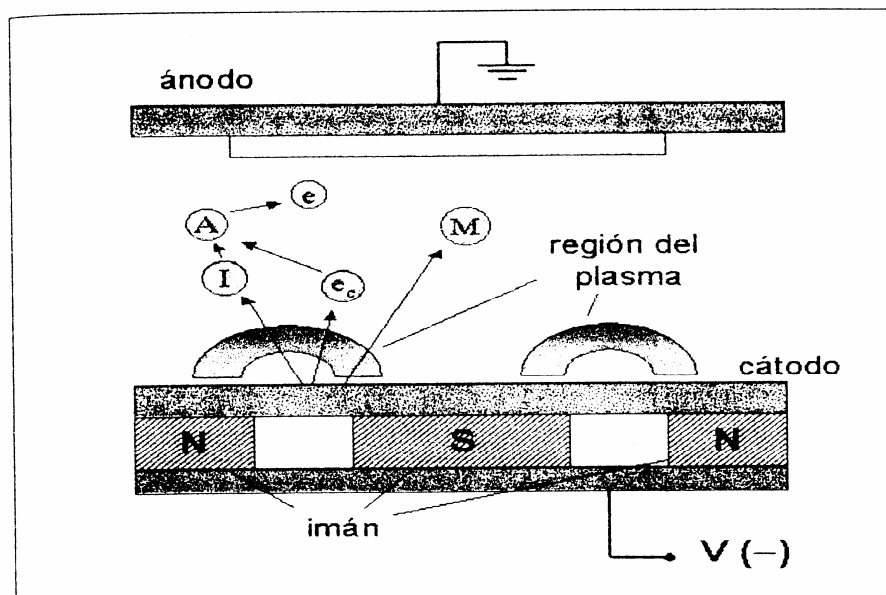


Figura 1.20 Esquema de un proceso de “Magnetron sputtering”.^[15]

“Ion plating”

En este proceso el recubrimiento iónico usa una combinación de bombardeo de partículas atómicas y evaporación al vacío para depositar una película delgada sobre un sustrato. El funcionamiento básico se describe a continuación:

Se coloca el sustrato para que funcione como cátodo en la parte superior de la cámara, colocando la fuente en la parte inferior. Se establece un nivel de vacío en la cámara y se ingresa argón, aplicando un campo eléctrico para ionizar este gas y producir un plasma. Esto produce un bombardeo iónico (“sputtering”) del sustrato, por lo que su superficie se frota lográndose una limpieza atómica. Posteriormente se calienta el material fuente a un nivel dado que comience a generar vapores de recubrimiento. Es entonces cuando las moléculas del vapor pasan a través del plasma y recubren el sustrato. Durante el proceso se continúa el bombardeo con iones de argón, además de los iones del material fuente que se han energizado mientras están bajo la acción del campo de energía. Los efectos de estas condiciones de procesamiento producen películas de espesores uniformes y excelente adherencia al sustrato.

El recubrimiento con iones es aplicable a sustratos que posean geometría irregular debido a los efectos de dispersión que existen en el campo del plasma. Una ventaja de esta técnica es la uniformidad del recubrimiento y buena adherencia, junto a la alta velocidad del proceso de deposición.

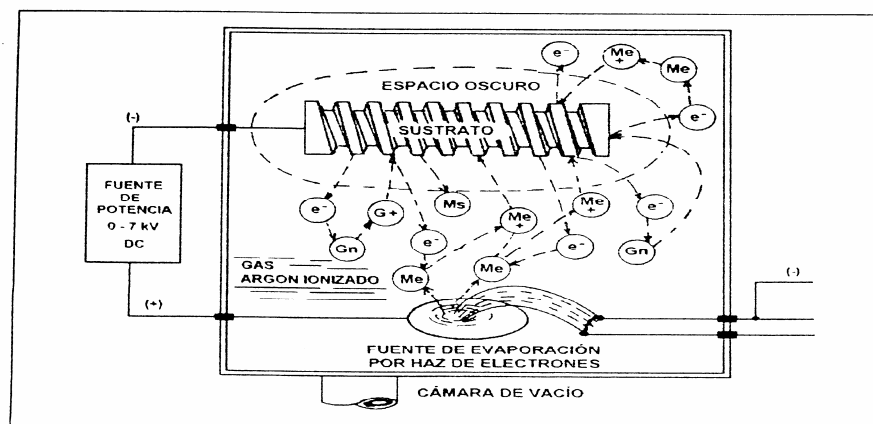


Figura 1.21 Esquema de un proceso de “Ion Plating”.^[15]

Procesos ARC-PVD

Existe una combinación de ARE (“Active Reactive Evaporation”) con IP (“Ion plating”) desarrollado durante la década de los 70. Esta combinación es conocida como ARIP (“Activated Reactive Ion Plating”). Esta técnica también es comúnmente conocida como ARC-PVD, dado que utiliza descargas tipo arco en gases donde los electrones se generan desde un cátodo caliente. El arco es mantenido por generación de calor mediante el bombardeo iónico o con un filamento caliente. La importancia de este proceso está en que se alcanzan grados elevados de ionización y corrientes iónicas, lo cual ocasiona que el metal sea evaporado del cátodo por las altas densidades de corriente. La deposición es eficiente debido al alto grado de ionización y a las altas energías de los iones, resultando en un 30 a 50 % de eficiencia, contra 2 a 8 % de “Ion Plating”, “Magnetron sputtering” y evaporación reactiva. Entre otras características del proceso se encuentran:

- Se producen iones en diferentes estados de carga.
- Alta energía de los iones (entre 10 y 100 eV).
- Se forman películas de alta calidad, en cuanto a morfología y adherencia.
- Altas velocidades de deposición.
- Temperaturas de procesos bajas.

1.4.6. Deposición química en fase de vapor

Entre los procesos de recubrimiento por plasma se encuentra también el CVD, llamado o *Deposición química en fase vapor*. Este proceso implica la interacción entre una mezcla de gases y la superficie del sustrato calentado, provocando la descomposición química de algunas de las partes del gas y la formación de una película sólida en el sustrato. Estas reacciones se realizan dentro de una cámara sellada. Una vez que se da la formación de la reacción produciendo una sustancia metálica o algún compuesto, este se forma en un núcleo de la superficie del sustrato y comienza a desarrollarse alrededor de toda la superficie, formándose de esta manera el recubrimiento. Los recubrimientos que son depositados por CVD suelen ser de

películas más gruesas que los depositados por PVD, pero esto depende del flujo de los gases empleados, tiempo y temperatura. Los ciclos de recubrimientos por la técnica CVD se realizan empleando mayor cantidad de tiempo, pues primero se debe calentar el sustrato a una cierta temperatura, luego el proceso en si requiere de un espacio de tiempo algo prolongado y finalmente el tiempo que transcurre en dejar enfriar la pieza a temperatura ambiente.

Ventajas del procesamiento CVD

- 1) Es posible depositar materiales refractarios a temperaturas debajo de su punto de fusión o sinterizado.
- 2) Es posible el control del crecimiento del tamaño de grano.
- 3) El proceso se realiza a presión ambiente y no requiere de una cámara de vacío.
- 4) Existe una buena unión del recubrimiento a la superficie del sustrato.

Existen formas alternativas para el proceso CVD, dependiendo de las condiciones en que se realizan los procesos de deposición. Si el proceso se realiza a una presión atmosférica o cercana a la atmosférica, se denomina APCVD (“Atmospheric Pressure Chemical Vapour Deposition”). Para ciertas reacciones existen ventajas al realizar el proceso a una presión inferior a la atmosférica. Este tipo de proceso se denomina entonces LPCVD (“Low Pressure Chemical Vapour Deposition”), en donde las reacciones ocurren en un vacío parcial.

Otra variable del proceso CVD es la deposición asistida por plasma, PACVD, en la cual la deposición sobre el sustrato se efectúa por medio de la reacción de los componentes pertenecientes al recubrimiento en una atmósfera de un gas ionizado mediante alguna descarga eléctrica. La energía proporcionada por el gas ionizado es la que se emplea para que se realicen las reacciones químicas en vez de emplear energía térmica para tal fin. Esto trae como ventajas:

- El empleo de una menor temperatura en el proceso, como también menor temperatura del sustrato.
- Mejor fuente de energía para la deposición proporcionada por el gas ionizado.
- Mejor adhesión.
- Velocidad de deposición más alta.

1.5. SUBSTRATO: ACERO AISI/SAE 4340

1.5.1. Aceros de baja aleación

El acero AISI 4340 es de baja aleación. Estos aceros son aleaciones hierro-carbono con elementos aleantes adicionales en cantidades totales menores al 5% en peso. El propósito de estos elementos aleantes adicionales es mejorar las propiedades mecánicas para ciertas aplicaciones específicas que se comparan con otros aceros no aleados. Estas propiedades que por lo general son mejoradas comprenden la resistencia, dureza, dureza en caliente, resistencia al desgaste, tenacidad, y combinaciones más deseables de estas propiedades.

La primera cifra de la designación 4340, indica el tipo de acero (elemento de aleación principal), el segundo dígito indica el porcentaje (%) en peso aproximado del elemento de aleación principal y los dos últimos dígitos proporcionan el contenido medio de carbono en porcentaje en peso (%).^[17]

Se suministra en estado de bonificado, es decir templado y revenido, lo que permite en la mayoría de los casos su aplicación sin necesidad de tratamiento térmico posterior. Es utilizado a temperaturas de hasta 773 K, sin perder su estado de bonificación.^[14]

Este acero es ampliamente usado en la fabricación de pernos, tornillos, otros elementos de seguridad; engranajes, piñones, ejes y similares componentes de máquinas; cigüeñales y pasadores de pistón, bielas para motores; además de sus usos en materiales y aplicaciones de maquinaria pesada, tiene otras aplicaciones en

elementos estructurales en la aviación. En el mercado puede encontrarse de diversas formas tales como barras, forjados, varillas de soldadura tubos, varas, así como planchas ligeras y fundiciones.

Los elementos comunes más importantes presentes en el acero AISI 4340 son Níquel, Cromo y Molibdeno, los cuales forman soluciones sólidas con el hierro y carburos, es decir, compuestos metálicos con el carbono.

Se puede resumir algunos de los efectos de los principales elementos aleantes del AISI 4340 como se describe a continuación:

Níquel (Ni): Mejora la resistencia y tenacidad, incrementa la templabilidad pero no tanto como los otros elementos de aleación. En cantidades significativas mejora la resistencia a la corrosión.

Cromo (Cr): Mejora la resistencia, dureza, dureza en caliente y resistencia al desgaste. Tiene gran importancia en el incremento de la templabilidad. También mejora significativamente la resistencia a la corrosión.

Molibdeno (Mo): Aumenta la tenacidad, la dureza en caliente y la resistencia a la termofluencia. También mejora la templabilidad y junto al carbono forma carburos que proporcionan mayor resistencia al desgaste.

Tabla 1.2 *Composición Química del acero AISI 4340, expresada en % en peso.*^[18]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Fe
0.38-0.43	0.15-0.35	0.60-0.80	0.035	0.040	0.70-0.90	1.65-2.00	0.20-0.30	BALANCE

El acero AISI 4340^[18] combina capacidad de endurecimiento profundo con alta ductilidad, tenacidad y resistencia. Este material posee alta resistencia a la fatiga y al deslizamiento, es comúnmente empleado donde existen condiciones severas de servicio y donde se requieren secciones de alta resistencia mecánica. En secciones pequeñas, este acero es templado al aire y en la práctica, para secciones de tamaño

normal, es templado en aceite. Este acero presenta una baja resistencia a la corrosión bajo tensión, agrietándose cuando el esfuerzo de tensión es de aproximadamente 1500-1950 MPa. Este efecto se puede reducir por medio de la nitruración lo cual ofrece mejoras a la vida en condiciones de fatiga.

El acero AISI 4340 es usualmente forjado a temperaturas que van desde 1065-1230 °C. Después del forjado las partes pueden ser enfriadas al aire en un lugar seco o preferiblemente enfriados en el horno. El grado de maquinabilidad de este acero es de 55%, para los materiales estirados en frío y de 45% para el material recocido. El tratamiento de normalizado de este acero produce una estructura esferoidizada particular que mejora la maquinabilidad. El AISI 4340 tiene buenas características de soldabilidad ya que el proceso se puede realizar mediante soldadura por gas o por arco, pero el material de aporte debe tener la misma composición.

Tabla 1.3 *Propiedades mecánicas típicas del acero AISI 4340.* ^[18]

Temperatura de templado	Esfuerzo De Tensión	Esfuerzo de Cedencia	Elongación en 50mm	Reducción de área	Dureza Brinell	Dureza Rockwell	Ensayo Izod energía
°C	Mpa	Mpa	%	%	HB	HRC	J
205	1980	1860	11	39	520	53	20
315	1760	1620	12	44	490	49,5	14
425	1500	1365	14	48	440	46	16
540	1240	1160	17	53	360	39	47
650	1020	860	20	60	290	31	100
705	860	740	23	63	250	24	102

1.5.2. Tratamientos Térmicos

Los tratamientos térmicos básicos aplicados al acero AISI 4340 son:

- *Normalizado*: Se realiza a temperaturas del orden de 845°- 900 °C. La pieza permanece a estas temperaturas por un período de tiempo que depende del grosor de la sección y posterior a ello se le permite enfriamiento al aire.
- *Recocido*: Se realiza a temperaturas del orden de 830°-860 °C y se mantiene la pieza durante un tiempo que depende del grosor de la sección o carga del horno. Se permite el enfriamiento dentro del horno.
- *Endurecimiento*: Se calienta la pieza a temperaturas de 800°-845 °C por un período de 15 min, por cada 25 mm de espesor. Posterior a ello se enfría en aceite a 65 °C o en una solución de sales fundidas que se encuentran a 200°-210 °C, permaneciendo allí durante 10 min. Luego es colocado en un chorro de aire a 65 °C.
- *Temple*: Se calienta durante una media hora a 200°-650 °C, luego se permite un enfriamiento al aire. Las temperaturas y el tiempo de templado depende principalmente de los grados de endurecimientos finales deseados.
- *Esferoidizado*: el esquema preferido es el de precalentar el acero a una temperatura de 690 °C y dejar que este permanezca allí durante un tiempo de dos horas, incrementar la temperatura hasta 745 °C y dejar que permanezca a ese nivel durante dos horas más, enfriar hasta 650 °C durante 6 horas, colocar la temperatura del horno en 600 °C y finalmente dejar que se enfríe a temperatura ambiente. Una alternativa diferente en el proceso consiste en calentar el acero hasta una temperatura de 730°-745 °C, dejar que el mismo permanezca allí durante muchas horas, luego permitir enfriamiento en el horno y posteriormente enfriamiento a temperatura ambiente.
- *Revenido*: Este proceso consiste en disminuir los esfuerzos residuales y la dureza de la martensita, producto de los anteriores tratamientos térmicos, así como también del trabajo en frío realizado previamente. Para ello se procede a

realizar un calentamiento durante cierto espacio de tiempo a una temperatura inferior a la temperatura crítica y luego se deja enfriar al aire. Las temperaturas a las cuales se recalienta y el tiempo de duración del proceso dependen de la composición del acero así como también del grado de dureza y tenacidad que se requieren. Este procedimiento también es llamado calentamiento para alivio de tensiones y suavizado.

1.6. RECUBRIMIENTO

1.6.1. Recubrimientos y aplicaciones

Los recubrimientos que se utilizan sobre elementos mecánicos son empleados por las industrias metalúrgicas con el fin de realizar mejoras de las propiedades mecánicas y tribológicas de la superficie, tales como resistencia al desgaste y a la corrosión, mejoras de la lubricación, reducción del coeficiente de fricción y mejoramiento de la textura, brillo y estética de la superficie.

Uno de los campos donde los recubrimientos de compuestos metálicos y no metálicos, compuestos orgánicos e inorgánicos tienen mayor aplicación es la industria de las herramientas de corte, en la cual se emplean con el propósito de aumentar la vida útil de la herramienta. Algunos de los recubrimientos más utilizados sobre aceros para herramientas de corte son: nitruro de titanio (TiN), carburo de titanio (TiC), nitratos y carburos de hafnio (HfN y HfC), carbonitruro de titanio (TiCN), óxido de aluminio (Al_2O_3) y carburo de zirconio (ZrC).

Además de los recubrimientos duros sobre herramientas de corte, existen otras áreas en las que se emplean otros recubrimientos.

Muchos de estos recubrimientos se aplican utilizando las técnicas de PVD, en diversos campos, tales como:

- Microelectrónica: Películas de nitruro de aluminio sobre sustratos de silicio, vidrio y cuarzo.
- Deposición de películas basadas en titanio (Ti puro, TiCr y TiFe) mediante la técnica de “sputtering” asistido por magnetrón desbalanceado.
- Películas sobre aluminio y aleaciones.
- Películas de carbono tipo diamante (DLC) logradas con la técnica ARC-PVD.
- Uso de la técnica ARC-PVD en mayor variedad de sustratos.
- Películas para aplicaciones ópticas: Óxidos de silicio, titanio, cromo, zirconio y aluminio.

Tabla 1.4 *Tabla comparativa de propiedades de recubrimientos mediante PVD.*

FILM	COLOR	DUREZA (HV)	RUGOSIDAD Ra μm	TEMPERATURA DE OXIDACIÓN (°C)
TiN	oro	2900	0,2	400
TiCN	azul negro	4500	0,18	350
TiAlN	bronce	2600	0,4	800
AlTiN	negro	4500	0,15	800
CrN	plata	2500	0,2	700
ZrN	oro	2800	0,2	500

1.6.2. Tendencias en los recubrimientos

Dada la gran variedad de aplicaciones y de requisitos de los recubrimientos funcionales y procesos de modificación superficial por plasma, se identifican algunas de las tendencias sobre los recubrimientos, tal como se muestra a continuación:

- Recubrimientos de alta adherencia.
- Recubrimientos de compuestos multicomponentes.
- Recubrimientos multicapas.
- Recubrimientos con variación gradual en sus propiedades.
- Investigación y búsqueda de nuevos materiales de recubrimientos.
- Búsqueda de nuevas aplicaciones para los recubrimientos.
- Mejor conocimiento de los procesos de crecimiento de recubrimientos (proceso de interacción vapor- superficie de sustrato).
- Mejor conocimiento de las relaciones entre las variables del proceso y las propiedades del recubrimiento.
- Modelado de procesos de formación y crecimiento de recubrimientos.

Hoy en día, la mayor parte de los recubrimientos comerciales de alta calidad tienen estructura multicapa. Este concepto implica el uso de varias capas de materiales con interfases claramente definidas entre sí, lo cual permite una mayor adherencia entre las interfaces de las mismas.

El material de la primera capa, en contacto con el sustrato, tiene por función principal promover una buena adherencia (usualmente se emplea TiN o TiC), en tanto que los materiales empleados en las capas sucesivas se seleccionan con el propósito de aumentar la dureza y resistencia al desgaste (TiC ó TiCN). También se pueden emplear otros materiales en las siguientes capas para mejorar la resistencia química, como el óxido de aluminio (Al_2O_3).

El uso de recubrimientos multicapa permite extender la vida de la herramienta y aumentar la velocidad de corte y de avance con respecto a recubrimientos monocapa y aportan por tanto una ventaja económica importante en el proceso de producción continua.

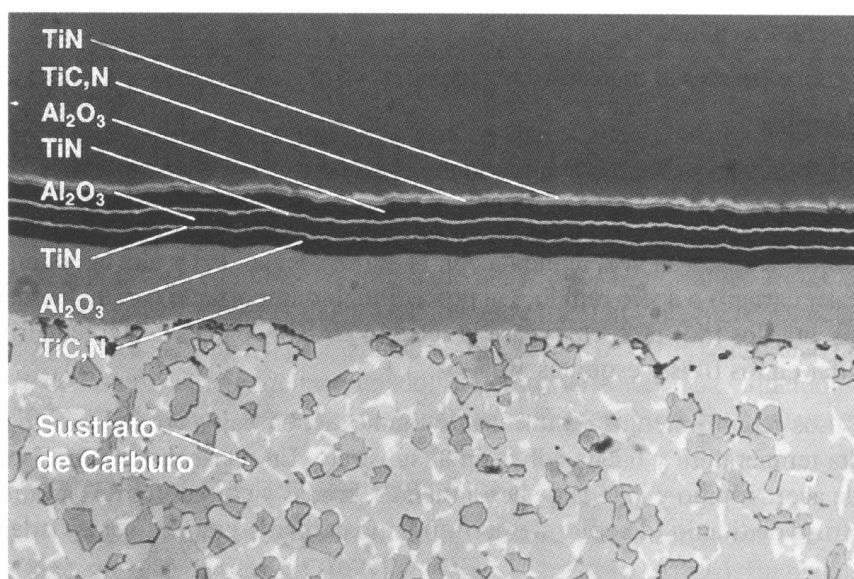


Figura 1.22 Recubrimientos de varias fases o multicomponentes sobre un sustrato de carburo de tungsteno.

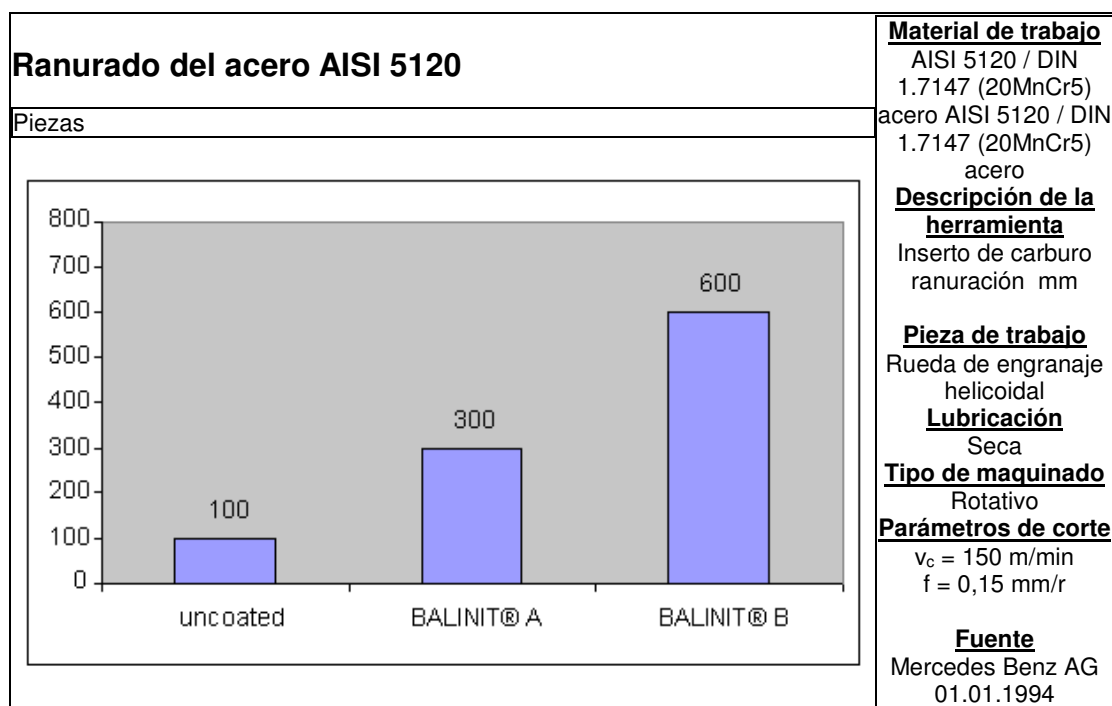


Figura 1.23 Comparación entre el número de piezas obtenidas por una herramienta recubierta con BALINIT® B, BALINIT® A y sin recubrir.

1.6.3. Descripción característica de la adherencia, dureza y espesor de los recubrimientos

En cuanto al recubrimiento, existen propiedades intrínsecas a él que lo caracterizan. Entre estas propiedades se encuentran la dureza, adherencia y espesor, que juntas definen algunos de los aspectos más importantes del comportamiento mecánico del recubrimiento, una vez aplicado en el sustrato. También estas propiedades determinan ciertos factores importantes que guardan relación con el comportamiento mecánico del conjunto sustrato-recubrimiento. Una vez que se ha realizado el recubrimiento del sustrato es común que se torne difícil y a veces imposible, separar el comportamiento del recubrimiento de aquel del sustrato, dificultando también la medición de las propiedades discutidas.

Finalmente, se realiza una breve descripción de las características de dureza, adherencia y espesor, propias de los recubrimientos duros aplicados mediante las técnicas de plasma.

Características de adherencia en los recubrimientos

La adherencia de un recubrimiento es una de las propiedades más importantes en lo que se refiere a su funcionalidad. Esta se refiere a la capacidad de permanecer adherido al sustrato y soportar los factores propios de las condiciones de operación para el cual está diseñado el sustrato. Concretamente, la adherencia es una propiedad que está referida a la interfase entre el sustrato y el recubrimiento y ella depende de las fuerzas de unión que existen entre ambos materiales.

Considerando el comportamiento mecánico del conjunto sustrato-recubrimiento, a veces pueden ocurrir fallas referidas a la adherencia por las diferencias entre las características particulares de cada material del conjunto. Igualmente, las fallas de adherencia pueden estar influenciadas por el mecanismo que mantiene unidos al sustrato y al recubrimiento. En consecuencia una falla de la unión recubrimiento-sustrato puede resultar tanto en fallas de adherencia a nivel

interfacial como en fallas cohesivas del recubrimiento o del sustrato, que den lugar al desprendimiento del primero.

En la práctica se manejan cuatro diferentes tipos de interfase sustrato-recubrimiento. Interfase abrupta, interfase compuesta, interfase de difusión e interfase de enlace mecánico.

Interfase abrupta: En el caso de la interfase abrupta no hay una afinidad química, no ocurren efectos de difusión entre los átomos de recubrimiento y sustrato, en consecuencia, la interfase queda limitada a una pequeña región de dimensiones atómicas donde predominan fuerzas de unión tipo Van der Waals. Esto indica que la adherencia en este caso es relativamente pobre.

Interfase compuesta: En este caso existe una ligera relación atómica por la actividad química existente entre los átomos de los diferentes componentes del sistema; este tipo de interfase es usualmente frágil como resultado de las tensiones internas generadas por los cambios volumétricos que acompañan a las reacciones químicas, por lo que solamente interfases delgadas tienen un comportamiento satisfactorio referente a la adherencia.

Interfase de difusión: Si existe la característica de difusividad entre las especies del sustrato y el recubrimiento se forma la interfase de difusión determinada por la transición gradual de las propiedades entre ambos materiales. Esta interfase se caracteriza por una alta adherencia que en muchos casos es posible lograrla mediante la implantación iónica.

Interfase de enlace mecánico: Si la rugosidad del sustrato tiene valores significativos entonces se forma una interfase junto con el recubrimiento de tramado mecánico. En este caso la adherencia está determinada por las características mecánicas de los materiales de sustrato y recubrimiento, así como también del espesor del recubrimiento.

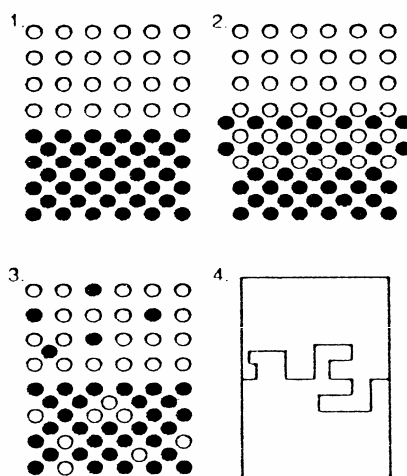


Figura 1.24 *Distintos tipos de interfase: 1) Abrupta; 2) Compuesta; 3) De Difusión; 4) De enlace Mecánico.*

Dureza de los recubrimientos

Se puede definir la dureza de un material como la resistencia a la deformación plástica superficial localizada bajo el efecto de una fuerza aplicada por un material más duro. El estudio de la dureza de un recubrimiento condiciona las características de su comportamiento tribológico (fricción, desgaste y lubricación).

Desde el punto de vista de las fuerzas interatómicas, una alta energía de cohesión, una corta longitud de enlace y un alto grado de enlaces covalentes aumentan la dureza de un material. Un parámetro de mérito de la relevancia de las fuerzas interatómicas es el cociente entre el calor de sublimación y el volumen molar, lo cual da una medida de la relación: energía cohesiva del material / longitud de enlace. Cuanto mayor es este parámetro, tanto mayor es la dureza.^[15]

En relación a las características microestructurales, se puede considerar que el tamaño de grano y estructura de los bordes de grano, impurezas, textura y estructuras metaestables tienen un valor que influencia la dureza del recubrimiento y esta se relaciona directamente con la mayor o menor facilidad de deslizamiento de las dislocaciones en la microestructura del recubrimiento.

Existen diferentes técnicas para la medición de la dureza del recubrimiento que se basan en producir una deformación plástica superficial localizada del material,

empleando un indentador de un material mucho más duro, con una geometría específica. En general el procedimiento consiste en producir una huella en la superficie del material mediante la fuerza aplicada al indentador sobre el mismo. Luego se obtiene la dureza mediante la relación fuerza aplicada sobre superficie de la huella producida.

Características referentes al espesor de los recubrimientos

El espesor de un recubrimiento es un parámetro característico de relativa importancia. Desde el punto de vista funcional, el espesor tiene gran relevancia en las aplicaciones ópticas, en particular en el campo de desarrollo de filtros ópticos, donde el espesor de las diferentes capas depositadas debe guardar una relación precisa con las longitudes de onda que dichos filtros deben transmitir o reflejar. También el espesor del recubrimiento tiene alta influencia en las propiedades tribológicas ya que el mismo está vinculado a las propiedades antidesgaste, adherencia y dureza de recubrimientos diseñados para mejorar propiedades mecánicas de los substratos.

Considerando en particular los recubrimientos duros producidos por plasmas PVD y CVD para aplicaciones tribológicas, se encuentran espesores típicos que están en el orden de 1 a 10 μm .

La adherencia de la película depende en forma compleja del espesor del recubrimiento. Hay ciertos factores que señalan la existencia de tensiones internas producidas por esfuerzos de corte en la interfase con el substrato y que las mismas aumentan con el espesor de la película de recubrimiento y disminuyen la adherencia del mismo. En conclusión, para espesores de películas de recubrimientos que van más allá de un cierto espesor crítico, se pueden generar esfuerzos que den lugar a un desprendimiento de la capa de recubrimiento o que por lo menos disminuya en grado importante la función del recubrimiento para lo cual fue diseñado.

En general, existe un valor óptimo del espesor para recubrimientos duros aplicados por las técnicas PVD y CVD asistidas por plasma, que dependen de los materiales del recubrimiento-substrato y de la aplicación específica considerada.

1.6.4. Carbonitruro de Titanio (TiCN)

Si bien todavía son comunes los recubrimientos de nitruro de titanio (TiN) obtenidos por deposición química en fase vapor, en la actualidad se han logrado avances en el desarrollo y aplicación de nuevos materiales de recubrimiento. El carburo nitruro de titanio (TiCN) ha demostrado su eficacia en el corte de aceros inoxidable. Este material se deposita por PVD, es más duro y tenaz que el TiN y se puede usar sobre herramientas de carburo y de acero rápido.

Esta capa proporciona una resistencia más alta a la abrasión y un coeficiente de la fricción más bajo que el TiN, CrN y TiAlN pero tiene un límite de temperatura más bajo. Es superior al TiN para los aceros inoxidables.

BALINIT A (TiN)	BALINIT B (TiCN)	BALINIT FUTURA N (TiAlN)	BALINIT X.TREME (TiAlN)
			
Temperatura	máxima	de oxidación	(°C)
600	450	900	800

Figura 1.25 Algunos recubrimientos BALINIT®.

Tabla 1.5 Características del recubrimiento BALINIT® B.

Nombre del producto	Material del recubrimiento	Microdureza HV*	Coefficiente de fricción contra acero (en seco)*	Tensiones internas (Gpa)*	Temperatura máx.(°C)*	Color del recubrimiento	Estructura del recubrimiento
BALINIT® B	TiCN	3000	0,4	-4,0	400	azul-gris	multicapa, gradiente

* Depende de la aplicación y las condiciones de la prueba

Aplicaciones del recubrimiento de carbonitruro de titanio (TiCN)

Ideal para herramientas de corte con elevados esfuerzos mecánicos, fresado, conformado, punzonado, etc. Tiene solo unas milésimas de milímetro de espesor, pero son más duros que el acero y químicamente inertes. Por esta razón, reducen el desgaste de las herramientas, la soldadura en frío y la fricción. Debido a un menor desgaste de las herramientas, a la reducción en el consumo de lubricantes, a menos fallos de herramienta y a cambios de herramientas programables, los costos se reducen. Debido a una vida útil más larga, a un incremento del número de golpes, a un menor tiempo de parada de la máquina y a menos operaciones de acabado podrá punzonar y conformar con mayor rentabilidad, por lo que la productividad aumenta. Las herramientas recubiertas con BALINIT® B pueden producir múltiples piezas sin causar rebabas y rayas antes que la herramienta necesite afilarse o pulirse. Este recubrimiento previene la adhesión y la soldadura en frío. Debido a que la fricción es menor, la superficie de las herramientas se expone a menor tensión térmica, lo que previene la fatiga superficial. El resultado es que las herramientas recubiertas con BALINIT® B tienen una vida útil más larga, dependiendo del esfuerzo en la herramienta y del número de cambios de esfuerzo, las herramientas pueden fallar prematuramente debido a la fatiga material.

1.7. REFERENCIAS DE OTRAS INVESTIGACIONES REALIZADAS

A continuación se hace referencia a algunas investigaciones relacionadas al tema:

- *Paiva y Corsi (2003)* ^[14], realizaron un estudio de fatiga-corrosión en un acero estructural recubierto con un depósito de tipo multicapa. El planteamiento inicial de la investigación fue evaluar el efecto que produce la aplicación de películas de recubrimiento por el proceso de deposición física en fase de vapor asistido por plasma (PAPVD), sobre el comportamiento a la fatiga-corrosión en un acero AISI 4340 templado y revenido. Estos autores llegaron a la conclusión que los valores de σ_y y σ_{sut} incrementan para el sustrato recubierto como consecuencia de la presencia del recubrimiento. Además, concluyeron que la presencia de películas delgadas de recubrimiento, consideradas como depósitos de alta dureza; incrementa la vida a la fatiga en aceros de baja aleación y alta resistencia.
- *Berrios et al. (2001)* ^[20], evaluaron las propiedades del acero AISI 316L recubierto con Nitrato de Titanio subestequiométrico (TiN_x) depositado por PVD. El objetivo de la investigación fue determinar el efecto que produce la presencia de tales películas de compuestos subestequiométricos en las propiedades de fatiga de un sustrato de acero AISI 316L. Estos investigadores llegaron a la conclusión que las propiedades de fatiga del acero AISI 316L incrementan sustancialmente cuando este es recubierto por las diferentes películas de TiN_x . El incremento de la vida de fatiga fue atribuido a las altas propiedades mecánicas del recubrimiento en comparación con las del sustrato.
- Berríos-Ortíz, et al. (2003) ^[21], llevaron a cabo una investigación sobre las propiedades de fatiga de un acero inoxidable 316L recubierto con diferentes depósitos de ZrN. Su trabajo se basó en las propiedades de fatiga de un acero inoxidable 316L recubierto con diferentes depósitos de ZrN mediante la técnica

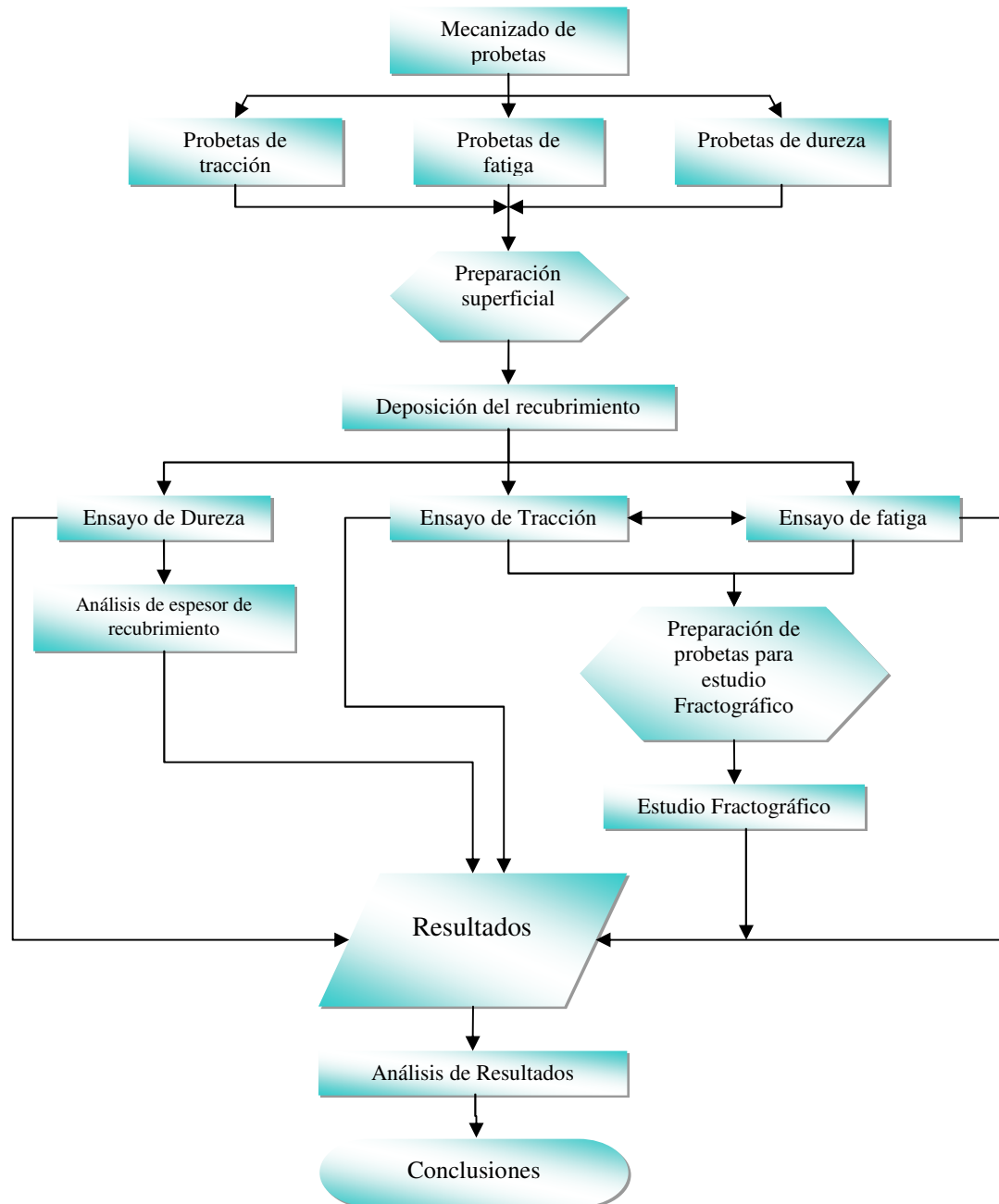
de PVD por “magnetron sputtering”, comparándolas con el material sustrato sin recubrir. Dichos investigadores determinaron que el recubrimiento es adecuado al material sustrato, además que este proporciona mejoras a las propiedades superficiales mostrando también una excelente adherencia. Realizaron estudios del comportamiento de la fatiga y análisis fractográfico indicando que el proceso de fractura bajo esfuerzos alternantes está dominado por la propagación de una sola grieta. Finalmente concluyeron que el acero inoxidable 316L puede ser recubierto adecuadamente mediante películas delgadas de ZrN_x a través de la técnica PVD mejorando alguna de las propiedades superficiales sin comprometer el comportamiento a la fatiga. Los estudios fractográficos evidenciaron que el recubrimiento ZrN_x se conserva bien adherido al sustrato aún después de severas deformaciones plásticas, una estimación preliminar de la resistencia mecánica de los depósitos indicaron que ellos variaban entre 22,5 y 34,6 GPa.

- *Herrera y Martínez (2001)* ^[22], realizaron un estudio del comportamiento de fatiga al aire y fatiga-corrosión de un acero AISI 316L con recubrimiento de TiN depositado por PVD. Estas investigadoras realizaron ensayos de fatiga a las probetas expuestas en un ambiente corrosivo y realizaron el estudio metalográfico. El objetivo de la investigación fue determinar en que forma afecta la aplicación de un recubrimiento de TiN a un acero de tipo AISI 316L. En su estudio, llegaron a la conclusión que el incremento de la resistencia, de los especímenes recubiertos, a la fatiga al aire fue de un 1863% para bajos esfuerzos y de un 394% para altos esfuerzos, evidenciando la ventaja del recubrimiento. De igual forma observaron resultados similares para las probetas en medios corrosivos. Finalmente señalaron que el recubrimiento empleado ofrece una excelente protección al acero contra la corrosión.

CAPITULO II

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.0. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO



2.1. MECANIZADO

Para realizar nuestro trabajo requerimos de la fabricación de probetas para ensayos de dureza, tracción y fatiga. Para ello se debió obtener una barra de acero AISI 4340 cuya composición química, en % en peso, es la siguiente: C% 0.34, Si% 0.3, Mn% 0.50, Cr.% 1.50, Mo% 0.20 y Ni% 1.5.

Una vez obtenido el material se mecanizaron las probetas en el taller de precisión J.V. C.A. ubicado en la zona industrial de Turumo. Estas probetas fueron elaboradas según las normas ASTM para probetas para ensayos de fatiga y ensayos de tracción.

Los ensayos de fatiga requieren de una probeta con longitud y geometría especificada según la norma ASTM E-606, mientras que las probetas para ensayos de tracción se mecanizaron de acuerdo a la norma ASTM A- 370.

El diámetro de los extremos de las probetas de fatiga de los materiales con y sin recubrimiento es de 12,7 mm y la longitud de 101,6 mm, de acuerdo a lo sugerido por el fabricante del equipo, la empresa Fatigue Dynamics, en sus manuales.

La sección de ensayo de la probeta de fatiga es de radio continuo y tiene las siguientes dimensiones: diámetro menor de la sección de ensayo (*do*) aproximadamente igual a 6,35 mm, radio continuo de la sección de ensayo (*R*) igual a 58,74 mm.

El diámetro de los extremos de las probetas de tracción de los materiales con y sin recubrimiento es de 12,7 mm, al igual que el de las probetas de fatiga. La longitud de las probetas de tracción es de 120 mm.

Las dimensiones de la sección de ensayo de las probetas de tracción son las siguientes: diámetro (*d*) igual a $6,25 \pm 0,12$ mm, longitud de 32 mm y radio de filete entre la sección de ensayo y el hombro de la probeta *R* igual a 5 mm.

A través de las normas ASTM E 606 se determinó que para obtener los parámetros de la ecuación de Basquin con confiabilidad aceptable, es necesario ensayar de 12 a 24 probetas de fatiga, mientras que, de acuerdo a la Norma ASTM

A-370 correspondiente al ensayo de tracción, para reportar confiablemente las propiedades estáticas se necesita ensayar como mínimo 3 probetas.

Las muestras en forma de pletina serán utilizadas para realizar los ensayos de microdureza. Dichas pletinas son de acero para herramientas tipo AISI D2, cuya dureza es elevada, esto con la finalidad de determinar la dureza del recubrimiento. Para este tipo de probeta no existe una norma de elaboración.

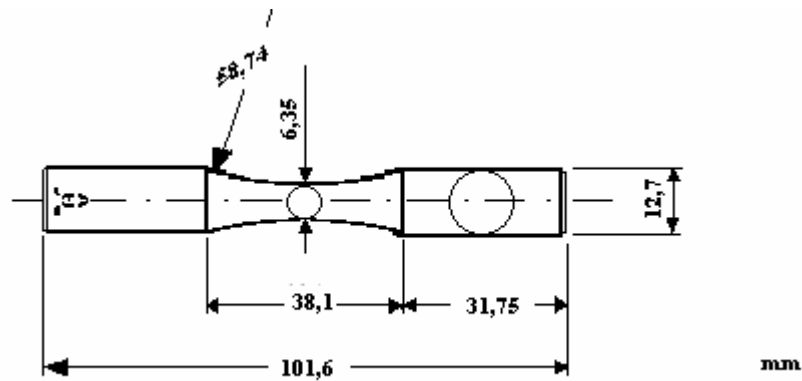


Figura 2.1 Probeta para ensayo de fatiga según norma ASTM E-606

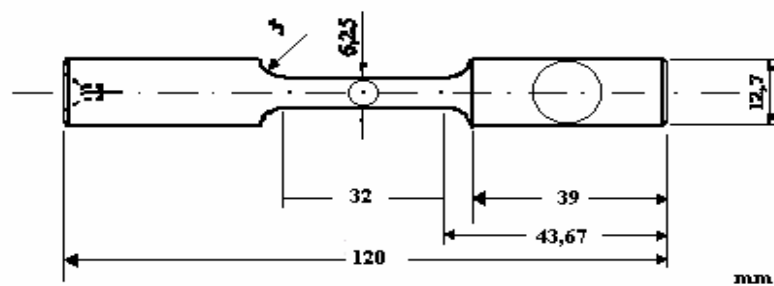


Figura 2.2 Probeta para ensayo de tracción según norma ASTM A-370

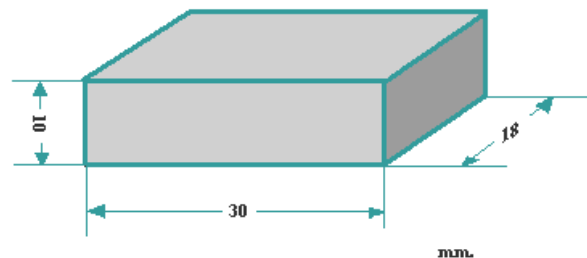


Figura 2.3 Probeta para ensayo de dureza



Figura 2.4 *Probetas empleadas. En orden descendente: Probeta para fatiga sin recubrimiento, Probeta para fatiga recubierta, probeta para tracción recubierta, probeta para dureza recubierta.*

Se fabricaron 150 probetas, de las cuales 140 fueron destinadas para ensayos de fatiga y 10 para ensayos de tracción. Para la determinación del límite de fatiga se emplearon 30 muestras.

Tabla 2.1 *Límites de composición del acero herramienta tipo D2.*

Designación del acero	Composición en %								
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	V	Co
D2	1,40- 1,60	0,60 máx	0,60 máx	11,0- 13,0	0,30 máx	0,70- 1,20	...	1,10 máx	...

Los aceros para herramientas tipo D2 se usan para operaciones en frío tales como: estampado de láminas mecánicas, extrusión en frío y ciertas operaciones de forja. La especificación D representa dado. Las especificaciones AISI más estrechamente relacionadas son A y O, las cuales simbolizan procesos de templeado por aire y por aceite.

Tabla 2.2 Características de procesamiento y servicio de aceros para herramientas tipo D2.

Designación	resistencia	Resistencia	Dureza	Maquinabilidad	Tenacidad	Resistencia	Resistencia
AI SI	a la carburación	al agrietamiento	aprox. (HRC)			a ablandarse	al desgaste
D2	medio	la más alta	54 - 61	baja	baja	alta	de alta a muy alta

2.2. PREPARACIÓN SUPERFICIAL

2.2.1. Preparación de probetas para ensayos de tracción y fatiga

Luego de obtenidas las probetas mecanizadas, fue necesario darles un acabado superficial adecuado eliminando las marcas circunferenciales que deja el mecanizado previo, así como las imperfecciones en la superficie, tratando de dejar la misma lo más lisa posible. Con esto se busca evitar las fallas de fatiga por defectos superficiales que modifiquen el verdadero comportamiento de falla por fatiga del material. Además, mejorando la superficie se logra una mejor adherencia del recubrimiento sobre el sustrato ya que el mismo es muy delgado, estando en el orden de 1 a 5 μm .

Para pulir las probetas se utilizó un torno marca Myford que opera a velocidad constante, tiene un plato de mordaza ajustable y un centro punto donde se apoya uno de los extremos de la probeta.

**Figura 2.5** Conjunto de torno.

Durante el proceso de pulido las probetas fueron montadas en el torno a baja velocidad, para ser acondicionadas con papel de lija de distintos grados. El proceso de pulido se realizó con un movimiento longitudinal al eje de la probeta para eliminar las ralladuras circunferenciales de la misma, mientras las probetas rotaban en el torno a una velocidad fija. El proceso se realizó empleando la siguiente secuencia de lijas: 240, 320, 400, 500, 600, 1200 y 1500. Para eliminar las porosidades más grandes se usó una lija de menor grado, la cual se les pasó a todas las probetas de fatiga y tracción, después de lo cual se fue aumentando consecutivamente hasta llevar a las probetas a una superficie pulida con un valor de rugosidad aritmética por el orden de $0,037 \mu\text{m}$.

Para realizar la operación de pulido se tomaron diversas medidas de seguridad, de acuerdo a lo establecido con las normas para trabajar con máquinas herramientas tipo torno. Entre las medidas de seguridad vale destacar las siguientes:

- Empleo de vestimenta de trabajo sencilla con mangas cortas.
- Uso de cabello recogido, evitando de esta manera accidentes con los elementos rotativos de la máquina.
- Prescindir del uso de adornos tales como cadenas, relojes, etc.
- Empleo de guantes protectores para evitar la adherencia de polvillo metálico en la superficie de la piel.

2.2.2. Preparación de probetas para ensayos de dureza

La preparación de las probetas diseñadas para los ensayos de dureza del material recubierto se realizó empleando un equipo de pulido de plato giratorio, el cual consta de dos discos donde se colocan papeles de lija de diferentes grados, con un suministro de agua para su lubricación. El equipo tiene la posibilidad de trabajar a dos velocidades distintas, pero en este caso se trabajó a 240 rpm. Las probetas fueron pulidas uniformemente mediante la sucesión progresiva en el número de granulometría de cada papel de lija, de acuerdo a la siguiente secuencia: 320, 400, 600, 1200, 1500 y 4000. La colocación de la probeta fue alternada respecto al giro del plato contenedor del papel de lija, con la finalidad de ir eliminando el rayado

anterior producido por el papel de lija en una dirección. Seguidamente, se realizó un último pulido superficial mediante el empleo del disco provisto con una tela tipo paño, utilizando una solución para pulido a base de diamante, lo que confirió a las superficies de las probetas un acabado brillante tipo espejo.



Figura 2.6 Máquina para pulido de plato giratorio.

2.3. DEPOSICIÓN DEL RECUBRIMIENTO

Una vez efectuada la preparación las probetas, estas fueron enviadas a la empresa *Balzers, Troy, New York, USA*, la cual se especializa en este tipo de recubrimientos, llamados comercialmente *BALINIT®*. Esta empresa cuenta con equipos adecuados, según el tipo de técnica de deposición requerida, para la deposición de recubrimientos a nivel industrial.

Para llevar a cabo el estudio se enviaron 78 probetas de las cuales 70 serán para ensayos de fatiga, fatiga corrosión y límite de fatiga, 5 para ensayos de tracción y 3 para las pruebas de microdureza, estas tres últimas de acero AISI D2.

El proceso se efectúa en alto vacío y a temperaturas entre 200°-500 °C. Para el proceso no reactivo se emplean gases inertes, tales como argón que es el menos costoso, para la formación del plasma y bombardeo de electrones. Para el proceso

reactivo se utilizan oxígeno y nitrógeno. Tanto los gases inertes como los reactivos deben estar libres de contaminantes.

El recubrimiento aplicado en las probetas es Balinit[®] B que es un recubrimiento del tipo multicapa, gradiente, de carbonitruro de titanio (TiCN), el cual se deposita en el material base mediante la técnica PAPVD (“Plasma Assisted Physical Vapour Deposition” o Deposición Física en Fase Vapor Asistida por Plasma), “*Ion Plating*” específicamente “*Magnetron Sputtering*”.

La técnica consiste en un arranque de partículas provenientes del crisol, por evaporación al vacío, que proporciona parte del material de recubrimiento. Dicho proceso se efectúa por un calentamiento, logrando desprender los átomos y moléculas que luego pasarán a formar parte del recubrimiento en el sustrato. Las partículas energizadas pueden provenir de un haz de electrones. Se suministra gas argón, se energizan las partículas positivamente mediante un campo eléctrico y luego ocurre un bombardeo de partículas atómicas en el sustrato.



Figura 2.7 Equipo de Balzers para deposición de recubrimientos BALINIT[®].

2.4. PERFILOMETRÍA

Con la finalidad de conocer la rugosidad asociada al acabado de las probetas luego de ser pulidas, así como también conocer la rugosidad de las muestras recubiertas, se procedió a medir dicho parámetro empleando un perfilómetro Zygo, modelo New View 200, que consiste en un equipo capaz de evaluar una cierta área de la muestra y representar los datos de rugosidad en forma numérica y gráfica. El equipo posee suspensión de aire, es decir, un mecanismo que permite aislar en un alto grado el equipo, de las vibraciones externas que pudiesen transmitirse hacia el instrumento, afectando de manera significativa la medición realizada.

El análisis arroja los siguientes resultados:

R_z : Es la distancia promedio entre los 5 picos más altos y los 5 valles más profundos medida desde una línea paralela a la línea central.

$$R_z = \frac{(P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5) - (V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5)}{5} \quad (\text{Ecuac. 2.1})$$

Donde:

P_i : Es la distancia de pico.

V_i : Es la distancia de valle.

Para una serie de datos de contorno, un pico está definido como la porción de una superficie por encima de la línea media y entre las líneas de cruce con la línea central. Para una serie de datos de mapa, un pico está definido como alguna isla de datos protuberante a través del plano de los datos promedio.

R_a : Es la desviación promedio aritmética de la línea central.

$$R_a = \frac{Y_1 + Y_2 + Y_3 + \dots + Y_n}{N} \quad (\text{Ecuac. 2.2})$$

Donde:

Y_i : Es el valor absoluto de cada punto.

N : Es el número de elementos discretos.

rms: Significa raíz cuadrada media y representa la desviación de la raíz cuadrada media de la línea central. Este es un método que consiste en calcular un promedio de los cuadrados de cada valor y luego tomar la raíz cuadrada de la media.

$$rms = \left(\frac{Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 + \dots + Y_n^2}{N} \right)^{1/2} \quad (\text{Ecuac. 2.3})$$

El rms resultante es la raíz cuadrada promedio de la superficie de la figura con el error transmitido relativo a una superficie de referencia.

El rms resultante es calculado como la desviación estándar de las alturas (o profundidades) de una superficie de prueba relativa a la referencia de todos los puntos en el diagrama de superficie.



Figura 2.8 Máquina para perfilometría.

2.5. ENSAYO DE DUREZA DE LAS MUESTRAS RECUBIERTAS

Para el análisis de dureza se empleó un microdurómetro Leco 3001. Este equipo posee un cabezal a través del cual se puede seleccionar el tipo de prueba a realizar, es decir, se le rota el indentador de acuerdo al ensayo requerido (Vickers ó Knoop). De esta manera se pueden realizar diversos ensayos de dureza. Se empleará la norma de dureza ASTM E 384. Para la determinación de la dureza Vickers se coloca el penetrador de pirámide con base cuadrada y ángulo entre sus caras $\alpha = 136^\circ$.



Figura 2.9 *Máquina para ensayo de dureza.*

En este equipo se realizó un barrido de cargas a la probeta recubierta y un barrido de cargas a la probeta sin recubrir. El barrido se realizó a las siguientes cargas: 25, 50, 100, 200, 300, 500 y 1000 gr. Para el barrido se construye una matriz de 5 filas y 2 columnas que hacen un total de 10 mediciones por cada carga. La distancia entre los puntos de cada indentación tanto en filas como en columnas de la matriz se tomó mayor a tres veces la longitud de la diagonal marcada por la

indentación en cada carga. Esta distancia es requerida para evitar el endurecimiento por deformación ocurrido por la penetración en los puntos adyacentes del barrido de cargas y para minimizar cualquier efecto que pudiese alterar los resultados de dureza. El equipo tiene un software con el cual se programa el barrido y la distancia entre los puntos de la matriz. Con dicho programa se obtienen las medidas de las diagonales de huella generados por el indentador. La posición y vista de la huella es ampliada en un monitor.

Luego, para poder obtener la dureza del recubrimiento se efectúa el barrido en la probeta recubierta y en la no recubierta. Además se realiza un barrido en la probeta recubierta pero en la zona donde no tiene recubrimiento, con el fin de compararla con la probeta sin recubrir para determinar si el proceso de recubrimiento afectó la dureza del material debido a la existencia en el proceso de deposición de temperaturas tan o más elevadas que la temperatura de revenido del acero de herramienta. Para determinar la dureza Vickers se empleó la siguiente fórmula:

$$HV = \frac{P}{A_s} \quad (\text{Ecuac. 2.4.a})$$

$$HV = \frac{2.P.\text{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{d^2} \quad (\text{Ecuac. 2.4.b})$$

Donde:

P : Carga [Kgf]

A_s : Área de la superficie de indentación [mm]

d : Diagonal principal de indentación [mm]

α : Ángulo de cara del indentador ($\alpha = 136^\circ$)

2.6. ENSAYOS DE TRACCIÓN

Los ensayos de tracción fueron realizados en una máquina Instron modelo 8502 controlada servo-hidráulicamente. Dicho equipo consta de un cabezal fijo en la parte

superior y otro móvil en la parte inferior que posee un amplio espectro de velocidades. En el presente trabajo se empleó una velocidad de cabezal móvil de 3 mm/min. El ensayo se realizó a 6 probetas de las cuales 3 eran de material substrato y las otras 3 de material recubierto. Para realizar el ensayo, antes de montar la probeta se midió con un vernier electrónico el radio de la sección calibrada, luego fue montada verticalmente la probeta y asegurada con las mordazas hidráulicas y con los cabezales cilíndricos, verificando que la probeta quede lo menos descubierta posible. Mediante un programa de computadora que posee el equipo, se controla el ensayo a velocidad de cabezal constante aplicada, el inicio del ensayo y otras funciones de operación del equipo. Durante el ensayo se observa como es el desarrollo de la curva esfuerzo-deformación nominal hasta la fractura final. Luego de terminado el ensayo se desmonta la probeta y se realiza de nuevo en la probeta la medición de la sección de menor diámetro donde ocurre la falla. Luego se toman los datos obtenidos para determinar la curva esfuerzo-deformación realizando el procedimiento correspondiente y las debidas correcciones por deformación elástica de los elementos de máquina.



Figura 2.10 *Máquina para ensayo de tracción*

2.7. CORRECCIÓN POR DEFORMACIÓN ELÁSTICA DE LOS ELEMENTOS DE MÁQUINAS

En la realización de los ensayos de tensión ocurren deformaciones elásticas en el conjunto. Para evitar estas alteren los resultados reales, es necesario hacer una corrección de los datos de alargamiento.

A continuación se presenta la ecuación que será empleada para la corrección de los datos:

$$(\Delta L_i)_{corr} = \Delta L_i - \Delta F_i \left(\frac{1}{K_{exp}} - \frac{1}{K_{prob}} \right) \quad (Ecuac. 2.5)$$

Donde:

K_{exp} : rigidez experimental del conjunto,

K_{prob} : rigidez teórica del material de la probeta.

$$K_{exp} = \frac{\Sigma F_i}{\Sigma \Delta L_i} \quad (Ecuac. 2.6)$$

$$K_{prob} = \frac{A_0 \cdot E}{L_0} \quad (Ecuac. 2.7)$$

Donde:

A_0 : área transversal inicial de la sección de ensayo de la probeta.

E : módulo de elasticidad del material.

L_0 : longitud inicial de la sección de ensayo de la probeta.

Para obtener los valores de los parámetros deseados y debido a la cantidad de datos provenientes del ensayo de tracción hasta la fractura final, requerimos la utilización de una hoja de cálculo como Microsoft Excel® y manejar con esta las ecuaciones antes mencionadas.

Una vez obtenidos los valores de resistencia a la tracción y límite de fluencia del material, se puede seleccionar un intervalo de valores de niveles de esfuerzos, en los cuales se van a realizar los ensayos de fatiga en flexión rotativa sin que se produzca fluencia del material.

Al realizar las pruebas de tensión con el material sustrato y con el material recubierto se puede establecer una comparación del comportamiento de ambos ensayos, para saber si el proceso de deposición del recubrimiento mejora o afecta al metal base.

Al obtener los valores de alargamiento corregido $(\Delta L_i)_{corr}$, para cada estado de carga correspondiente (F_i) , se construye la curva de esfuerzo real vs. deformación real (σ vs ϵ), a partir de la curva esfuerzo-deformación ingenieril (S vs e) con valores provenientes de las siguientes ecuaciones:

Esfuerzo ingenieril:

$$S_i = \frac{F_i}{A_0} \quad (\text{Ecuac. 2.8})$$

Deformación ingenieril:

$$e_i = \frac{(\Delta L_i)_{corr}}{l_0} \quad (\text{Ecuac. 2.9})$$

Esfuerzo real:

$$\sigma_i = S_i (1 + e_i) \quad (\text{Ecuac. 2.10})$$

Deformación real:

$$\epsilon_i = \ln (1 + e_i) \quad (\text{Ecuac. 2.11})$$

2.8. CURVAS DE ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN

Para obtener la curva esfuerzo-deformación real, luego realizar la corrección los datos originales, se procede a graficar dicha curva junto con la recta paralela a la porción inicial de la curva de esfuerzo-deformación, desplazada una distancia de 0.002 (mm/mm) del origen.

Luego se obtienen el esfuerzo de fluencia (o cedencia convencional) (σ_y) de 0,2% que es el esfuerzo al cual dicha línea interseca la curva de esfuerzo-deformación y además se obtiene el esfuerzo real a carga máxima (σ_{ut}).

Finalmente se obtiene el porcentaje de reducción de área con los datos de medición del radio de la probeta antes y después del ensayo de tracción.

2.9. ENSAYO DE FATIGA

Los ensayos de fatiga en flexión rotativa se realizaron en los equipos marca Fatigue Dynamics, modelo RBF-200. Cada equipo consta de un motor cuyo eje está acoplado al conjunto de mordaza y un dado que sujeta la probeta en uno de sus extremos. Además, tiene conectado mediante un mecanismo tipo cremallera y tornillo sinfín un contador de ciclos y una bomba que suministra la solución corrosiva para el ensayo de fatiga corrosión. Tiene también un graduador de velocidad y un contrapeso con una regleta calibrada para colocarle la carga adecuada para aplicar el momento flector, según el esfuerzo requerido para el ensayo en base a la sección de menor diámetro de la probeta.

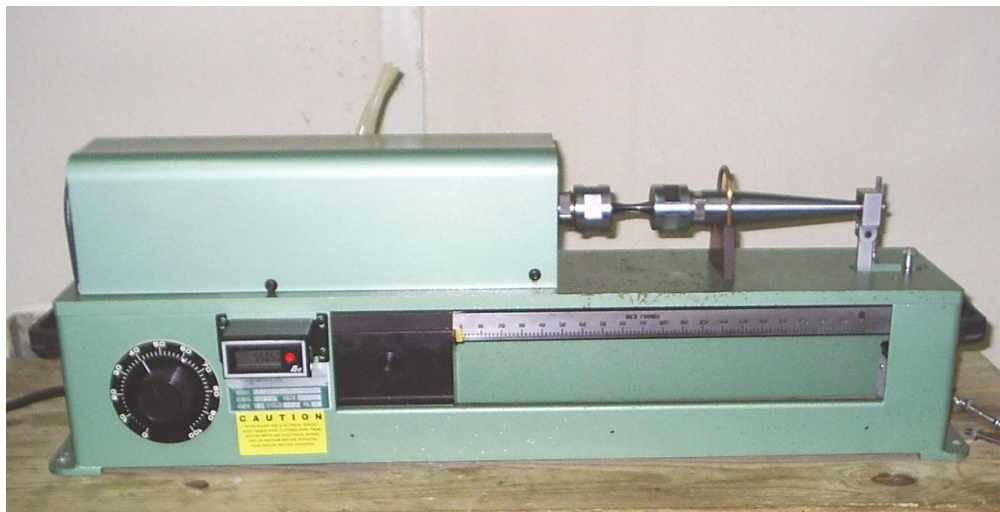


Figura 2.11 *Máquina de fatiga.*

Los ensayos de fatiga se realizaron a una frecuencia de 50 Hz equivalente a una velocidad promedio de 3000 rpm. Se ensayaron a una misma velocidad para disminuir la dispersión de los resultados y a una temperatura de 24 °C. Los datos

obtenidos de estos ensayos fueron número de ciclos a falla en función del nivel de esfuerzo alternante.

Para calcular el valor del momento flector para cada uno de los niveles de esfuerzos preestablecidos se utilizó la siguiente ecuación:

$$S = \frac{M * C}{I} \quad (\text{Ecuac. 2.12})$$

Donde:

S: Esfuerzo aplicado [MPa].

M: Momento flector [N.m].

C: Distancia desde el eje neutro de la carga hasta la superficie de la probeta en mm.

I: Momento polar de inercia [mm⁴].

Y se conoce que:

$$C = \frac{D}{2} \quad (\text{Ecuac. 2.13})$$

Donde:

D: Diámetro de la probeta [mm.]

Para una barra circular, se tiene que:

$$I = \frac{\pi * D^4}{64} \quad (\text{Ecuac. 2.14})$$

Al sustituir se tiene que:

$$M = \frac{S(\frac{\pi.D^4}{64})}{\frac{D}{2}} = \frac{S.\pi.D^3}{32} \quad (\text{Ecuac. 2.15})$$

Entonces el momento flector (M) se obtiene como:

$$M = 0,0982 \times S \times D^3 \text{ [Lbf} \times \text{pulg]} \quad \text{ó} \quad (\text{Ecuac. 2.16.a})$$

$$M = 11,0955 \times S \times D^3 \text{ [MPa} \times \text{mm}^3] \quad (\text{Ecuac. 2.16.b})$$

2.10. ENSAYO DE FATIGA CORROSIÓN

En el ensayo de fatiga corrosión se le incorpora una cámara de corrosión al mismo equipo que se utiliza para los ensayos de fatiga al aire. La cámara trabaja con una solución salina de Cloruro de sodio (NaCl) al 3 %. Esta cámara es colocada de tal forma que rodea la probeta y está conectada a mangueras en su parte superior, para el suministro de la solución y en la parte inferior para la descarga. La manguera de la parte superior es estrangulada por un pequeño dispositivo para controlar la cantidad a suministrar, la cual debe ser un goteo constante, sin llegar a ser un chorro continuo. Para la recirculación de la solución esta cámara posee una bomba, la cual está conectada al motor de la máquina de fatiga y esta siempre en funcionamiento mientras la máquina de fatiga esté encendida y se esté realizando el ensayo. La bomba es de tipo de desplazamiento positivo de lóbulo rotativo, el cual al girar presiona una manguera flexible forzando al líquido para que circule por ella constantemente.

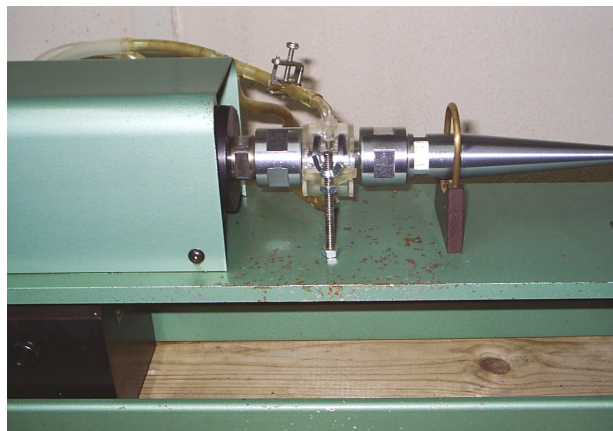


Figura 2.12 Máquina de fatiga con implementos para corrosión.



Figura 2.13 *Cámara de corrosión.*



Figura 2.14 *Montaje para ensayo de fatiga corrosión.*

2.11. CURVA DE WÖHLER

Una vez realizado los ensayos de fatiga, se procede a graficar la curva de Wöhler con los datos obtenidos de número de ciclos a falla para los esfuerzos soportados por la muestra. Estos datos son representados en un escala doble logarítmica.

Para el límite de fatiga son utilizadas 15 probetas, tanto para el material base como el material recubierto. Los ensayos para determinar el límite de fatiga se realizaron hasta alcanzar un número de ciclos de 5×10^6 . Las probetas que alcanzaron este valor se consideraron con vida infinita. Para obtener el límite de fatiga se emplea el método de la escalera.

Método de la escalera

La primera probeta se ensaya al valor de límite de fatiga estimado. Este valor estimado se determinó a partir de un porcentaje del esfuerzo de fluencia de aproximadamente 63 %. Si ésta probeta falla, la tensión aplicada en la próxima probeta a ensayar se reduce en un escalón que para nuestro caso es de 5 MPa. Sucesivamente se aplica el mismo procedimiento hasta obtener una probeta que no falle, entonces para la siguiente probeta se eleva el nivel de esfuerzo nuevamente en 5 MPa y así sucesivamente. Se continúa con este procedimiento aumentando el nivel de esfuerzo cuando la probeta ensayada no rompe y disminuyéndolo cuando falla. Según los procedimientos encontrados en la literatura, es necesario ensayar entre quince y veinticinco probetas.

Posteriormente los resultados de las probetas ensayadas se separan en fallas y no fallas, colocándose en una tabla que indica las que fallaron y las que no fallaron, así el nivel de esfuerzo al cual ocurrió el evento correspondiente.

Tomando en cuenta el suceso menos frecuente, al menor nivel de tensión al cual se obtiene una falla se le asignará en índice $i=0$, el siguiente será el $i=1$, y así sucesivamente hasta el mayor nivel de esfuerzo. El límite medio de fatiga $\bar{X}$ y su desviación típica (s) se determinan mediante las ecuaciones siguientes:

$$\bar{X} = X_0 + d \left(\frac{A}{N} \pm \frac{1}{2} \right) \quad (\text{Ecuac. 2.17})$$

Donde:

i : Nivel de tensiones.

X_0 : Primer nivel de tensiones.

d : Incremento de tensión.

A : Sumatoria de los sucesos menos frecuentes multiplicado por el nivel de tensiones.

N : Sumatoria de los sucesos menos frecuentes.

Cuando el análisis se basa en las probetas que no fallan se emplea el signo positivo en la primera ecuación y cuando se basa en las probetas que fallan se emplea el signo negativo.

$$s = 1,620d \left(\frac{NB - A^2}{N^2} + 0,029 \right) \quad (\text{Ecuac. 2.18})$$

Donde:

B: Sumatoria de los sucesos menos frecuentes multiplicado por el nivel de tensiones al cuadrado.

2.12. ECUACIÓN DE BASQUIN

Para una mejor entendimiento de la curva S-N o curva de Wöhler y una mejor identificación del límite de fatiga de un material, es necesario representar en escala doble logarítmica los valores obtenidos de los ensayos de fatiga colocando el logaritmo decimal de los esfuerzos alternantes ($\log S$) en el eje de las abscisas, contra el logaritmo decimal del número de ciclos a falla ($\log N$), transformando de esta manera la curva en una línea recta, la cual es representada mediante la ecuación sugerida por Basquin:

$$S_a = S_f (N)^b$$

Donde:

S_a : Es la resistencia a la fatiga del material.

S_f : Es el coeficiente de resistencia a la fatiga.

N : Es el número de ciclos.

B : Es el exponente de Basquin.

En este Trabajo, las ecuaciones de Basquin fueron obtenidas aplicando el método de regresión lineal recomendado por la norma ASTM E739.

2.13. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS PARA EL ESTUDIO FRACTOGRÁFICO

Para realizar el estudio fractográfico de las muestras ensayadas se tomaron en cada curva dos probetas correspondientes al esfuerzo mayor y menor de los cuatro esfuerzos aplicados en cada curva, seleccionándose aquellas probetas más cercanas a la curva de Basquin.

Luego de determinar las 8 probetas a ser analizadas, así como una de las probetas de tracción correspondiente al material recubierto también a ser observada, se procedió a efectuar los cortes de las secciones transversales y longitudinales respectivamente, necesarias para el estudio fractográfico. El corte transversal, paralelo a la superficie de fractura, se realizó en la parte positiva de la fractura a una distancia de la superficie de aproximadamente 4 mm. Dichos cortes fueron realizados en una máquina de disco abrasivo. Cada muestra fue identificada y almacenada individualmente cuidando la superficie de fractura.



Figura 2.15 *Máquina de corte de disco abrasivo.*

Posteriormente, las muestras fueron limpiadas con acetona en un equipo de limpieza por ultrasonido, sumergiendo las mismas y manteniendo la zona de fractura hacia abajo para que los desechos desprendidos de la superficie a estudiar caigan y no sean retenidos nuevamente. Finalmente, las muestras son limpiadas con alcohol y secadas con el secador de muestras.



Figura 2.16 *Equipo de limpieza por ultrasonido.*

Preparación de probetas para análisis de la intercara longitudinal

Con la otra mitad de las muestras, es decir la parte negativa de la superficie de fractura, se realizó un corte longitudinal, empleándose una máquina cortadora de disco de diamante. El montaje de las probetas se realizó de tal manera que el corte se realizara paralelo al eje longitudinal de la probeta, teniendo en cuenta que el corte fuese realizado aproximadamente a la mitad de la sección transversal circular de la probeta, con la finalidad de obtener información relacionada con la formación de las grietas y su subsecuente preparación. Seguidamente, se montó la probeta para realizar el corte transversal que permitiría separar la muestra a estudiar del resto de la probeta.



Figura 2.17 *Máquina de corte de disco de diamante.*

Una vez efectuado el corte longitudinal se procedió al embutido de las muestras en una máquina que realiza el proceso, empleando una resina en polvo la

cual es moldeada a presión y temperatura altas, para posteriormente ser pulidas hasta lograr que la superficie a estudiar tenga apariencia tipo espejo.

Luego del pulido se retiró el embutido y se procedió a la limpieza de las muestras en el equipo de ultrasonido con acetona. El estudio fractográfico se realizó con la ayuda de un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB), empleando un voltaje de aceleración de 25 KV.

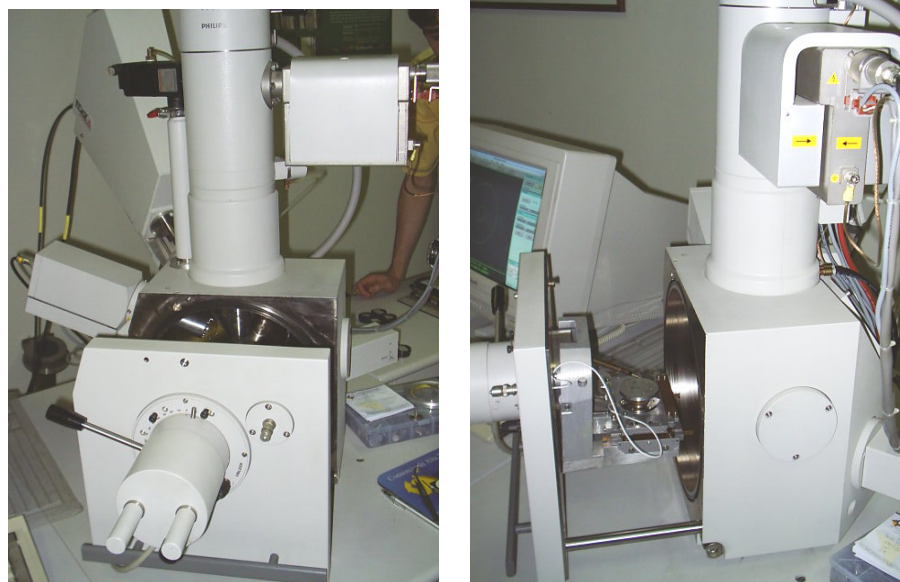


Figura 2.18 *Microscopio electrónico de barrido.*

2.14. DETERMINACIÓN DEL ESPESOR DEL RECUBRIMIENTO

Para determinar el espesor del recubrimiento se realizó un ensayo de calota esférica y posteriormente se observó la muestra ensayada en un analizador de imágenes. El ensayo de la calota esférica o “*calotest*”, consiste en la realización de un cráter esférico sobre una probeta plana. La huella dejada sobre el material a ensayar, es producida por la fricción generada por la rotación de una esfera de metal de alta dureza de radio R_b contra la superficie. Posteriormente se realiza la medición de la huella producida con el analizador de imágenes Leco, conjuntamente con la lupa estereoscópica.

La ecuación utilizada para determinar el espesor del recubrimiento es:

$$E = \frac{1}{2} \left(\sqrt{4R_b^2 + d^2} - \sqrt{4R_b^2 + D^2} \right) \quad (\text{Ecuac. 2.19})$$

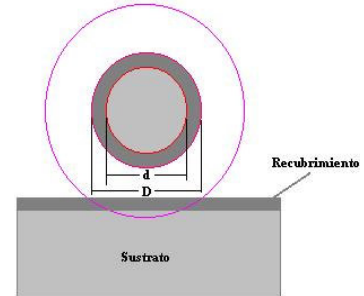
Donde:

R_b : Es el radio de la bola.

D : Es el diámetro de la huella del recubrimiento.

d : Es el diámetro de la huella del sustrato.

Medidas en μm .



CAPITULO III

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos de los diferentes estudios realizados. Se mostrarán algunas gráficas representativas, así como fotomicrografías y se realizará un análisis que permitirá el entendimiento de los resultados.

3.1. ANÁLISIS DE RUGOSIDAD

Con la finalidad de conocer en que estado se encuentra la superficie del sustrato y del material recubierto se efectuó un estudio de perfilometría en las dos superficies.

Al realizar el análisis, el equipo arrojó los siguientes resultados para las pruebas de probetas sin recubrir y para las probetas con recubrimiento.

Tabla 3.1 *Análisis de rugosidad de probetas AISI 4340 sin recubrir.*

	Distancia promedio entre picos y valles Rz (μm)	Desviación promedio aritmética Ra (μm)	Raíz cuadrada media rms (μm)
Promedio	0,888	0,037	0,057

Tabla 3.2 *Análisis de rugosidad de probetas AISI 4340 recubierto con TiCN.*

	Distancia promedio entre picos y valles Rz (μm)	Desviación promedio aritmética Ra (μm)	Rugosidad rms [μm]
Promedio	1,624	0,064	0,095

Es evidente que ocurrió un incremento en los tres valores promedio medidos, el aumento aproximado para valores de Rz, Ra y rms fueron de 83 %, 75 % y 67 % respectivamente.

A continuación, en la figura 3.1 se presentan gráficamente una porción de área de la superficie de una probeta de acero AISI 4340. Se puede apreciar que la superficie se encuentra bastante regular.

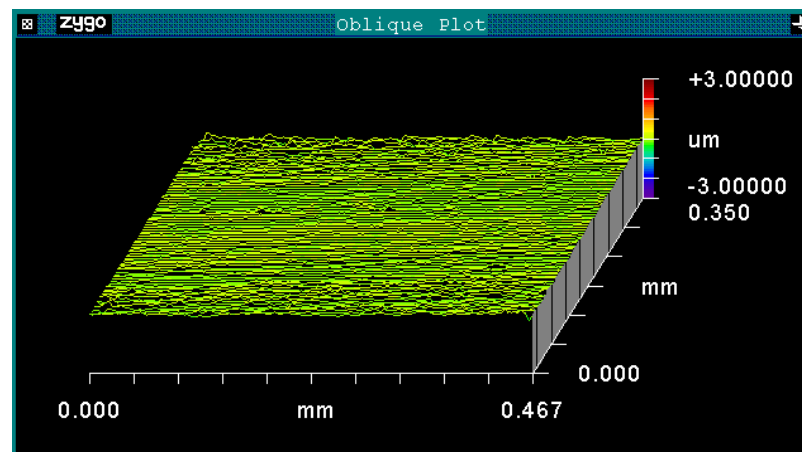


Figura 3.1 Representación gráfica de un área de medición de rugosidad del AISI 4340.

Al comparar este gráfico con el de la figura 3.2, para el caso de la probeta de acero AISI 4340 recubierto con TiCN, se puede apreciar que la superficie no se conserva igual ya que ocurre una pequeña variación entre ambas.

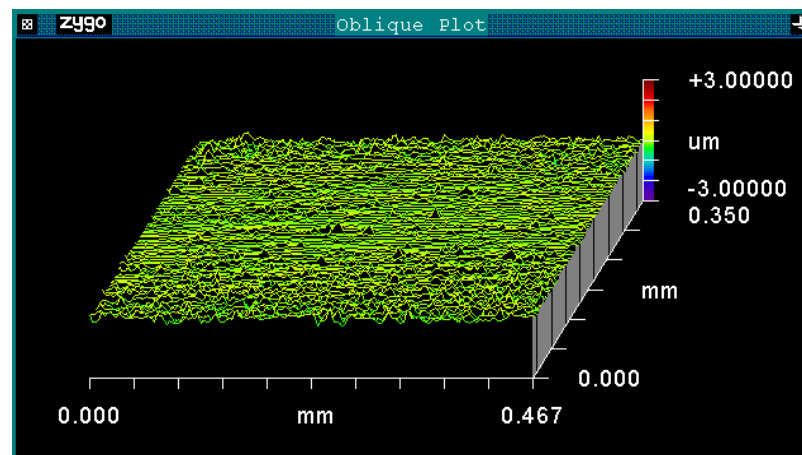


Figura 3.2 Representación gráfica de un área de medición de rugosidad del AISI 4340 recubierto con BALINIT B.

3.2. ENSAYOS DE DUREZA

3.2.1. Prueba de Calotest

Se determinó el espesor del recubrimiento (t), mediante la prueba de Calotest. También se realizó la medición del diámetro de la esfera de acero endurecido con un calibrador tipo Vernier digital para determinar el radio de la bola (R_b). De la medición se obtuvo un valor de $R_b = 19050 \mu\text{m}$.

Con los diámetros promedio de la circunferencia exterior de la huella D_i y con los diámetros promedio de la circunferencia interior límite del recubrimiento d_j y el valor medido del radio de la esfera de acero endurecido, se obtuvieron los valores de espesores utilizando la fórmula del espesor para ensayo de calotest.

Tabla 3.3 Resultado de medición de espesores del recubrimiento.

Huella	Promedio de Espesores (μm)	Espesor Promedio Total (t)
1	3,74	3,82
2	3,88	
3	3,85	
Desvest	0,075	

De la tabla 3.3 se puede observar que los valores promedio obtenidos del espesor del recubrimiento son bastante uniformes.

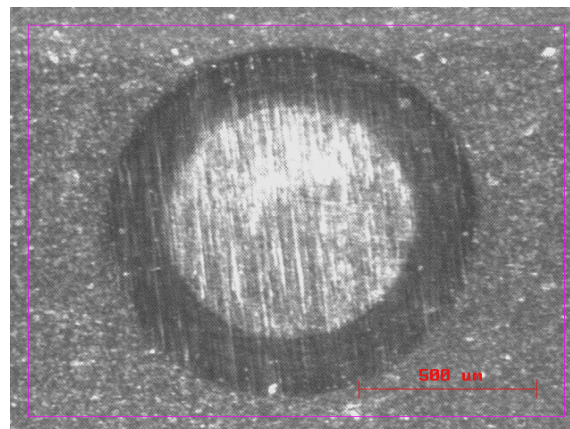


Figura 3.3 Imagen observada del espesor del recubrimiento BALINIT®B.

3.2.2. Dureza del recubrimiento

De los ensayos de dureza realizados a las diferentes probetas se obtuvieron los siguientes resultados:

Resultados de dureza de acero AISI D2 recubierta con BALINIT B

Las mediciones de dureza en el material recubierto arrojaron valores relativamente más elevados de este parámetro para las cargas bajas, tal como se observa en la tabla 3.4. En dicha tabla se reportan los valores promedio de las diagonales de huella (d), adicionalmente se registran los valores de profundidad relativa de indentación (RID), la cual se define por $RID = d / (7.t)$.

Para una carga de 25 g se registró un valor promedio de la dureza compuesta de 2468,3 HV. A medida que se aumentaba la carga se notó la disminución en los valores de dureza, pudiéndose observar que para una carga de 1000g la dureza obtenida fue de aproximadamente 529,5 HV. Podemos pensar que a medida que aumentamos la carga, la contribución de la dureza del sustrato a la dureza compuesta es mucho mayor y por lo tanto el valor de la dureza disminuye.

Tabla 3.4 Resultado del barrido de dureza de acero AISI D2 recubierto con BALINIT B.

Carga (Recubrimiento)	Dureza Vickers (HV)	Desvest (Dureza)	d (μm)	RID
25	2468,3	382,4	5,1	0,1896
50	1569,2	139,73	8,1	0,3028
100	1195,3	32,666	12,2	0,4559
200	952,6	19,7887	19,0	0,7111
300	786,2	30,7495	25,3	0,9449
500	743,2	15,1203	34,7	1,2968
1000	529,5	8,6058	50,1	1,8714

En la figura 3.4 se puede notar la forma decreciente de la curva a medida que aumenta la carga aplicada. En la misma se indica el intervalo de desviaciones estándar para cada carga, observándose que la desviación fue alta para cargas bajas,

mientras que para las cargas mayores esta desviación es mucho menor. El valor de la dureza compuesta se va aproximando progresivamente al valor de la dureza del sustrato para altos valores de carga.

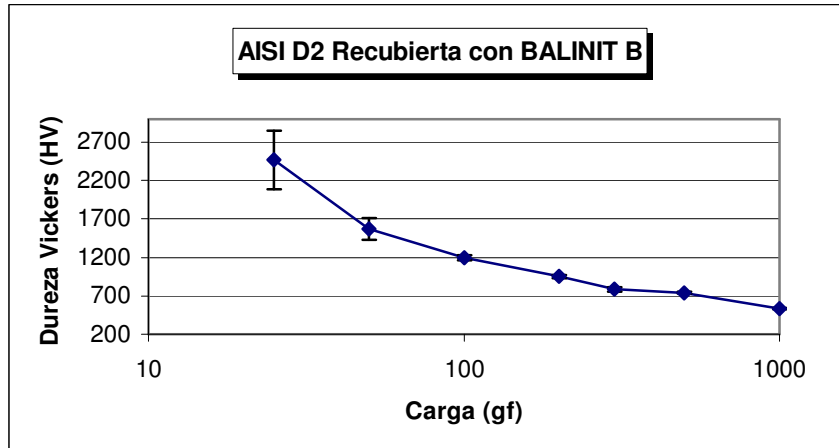


Figura 3.4 Curva de Dureza Vickers (HV) vs. Carga (gf) de acero AISI D2 recubierto con BALINIT B.

La figura 3.5 ilustra básicamente los mismos datos que la figura anterior, con la diferencia la dureza compuesta se grafica en función de la profundidad de indentación relativa (RID). Este es un parámetro más conveniente para la representación de los datos de dureza de los materiales recubiertos ya que permite la comparación entre diversos sistemas en los cuales el recubrimiento varíe de espesor.

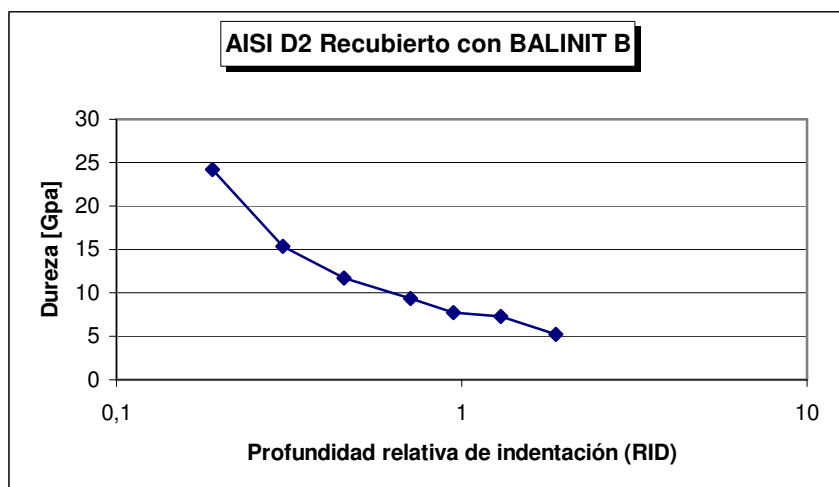


Figura 3.5 Curva de Dureza Vickers (HV) vs. Profundidad de indentación relativa (RID) de acero AISI D2 recubierto con BALINIT B.

Resultado de dureza del sustrato en probeta recubierta

Seguidamente se presenta un análisis de la dureza en una zona del sustrato de una de las probetas que fueron recubiertas. La finalidad es la de realizar la comparación entre los valores de dureza determinados en la probeta recubierta, con los valores que se obtienen en otra que no fue recubierta. De esta forma, se podrán poner de manifiesto las variaciones en la dureza de la probeta, ocurridas como consecuencia del proceso de recubrimiento.

En la tabla 3.5 se observa que en el intervalo de cargas de 25-200 g, la dureza del material disminuye progresivamente con el aumento de la carga aplicada en el ensayo, poniendo de manifiesto un efecto de tamaño de huella. Sin embargo, en el intervalo de 200-500 g esta tendencia es invertida, observándose un aumento de la dureza con el incremento de la carga. Finalmente, el efecto del tamaño de huella se vuelve a hacer presente para una carga de 1000 g, valor al cual se observa la menor dureza de todo el conjunto.

Tabla 3.5 Resultado del barrido de dureza del sustrato en la probeta recubierta.

Carga (Sustrato en probeta recubierta)	Dureza Vickers (HV)	Desvest (Dureza)	d (μm)
25	549,9	22,7	9,9
50	540,6	15,3	13,5
100	529,1	9,8	18,4
200	509,8	6,7	25,9
300	553,3	16,8	30,4
500	595,5	25,4	38,9
1000	432,6	2,7	56,5
Promedio	530,1		
Desvest	45,3		

La figura 3.6 ilustra gráficamente los resultados anteriormente descritos.

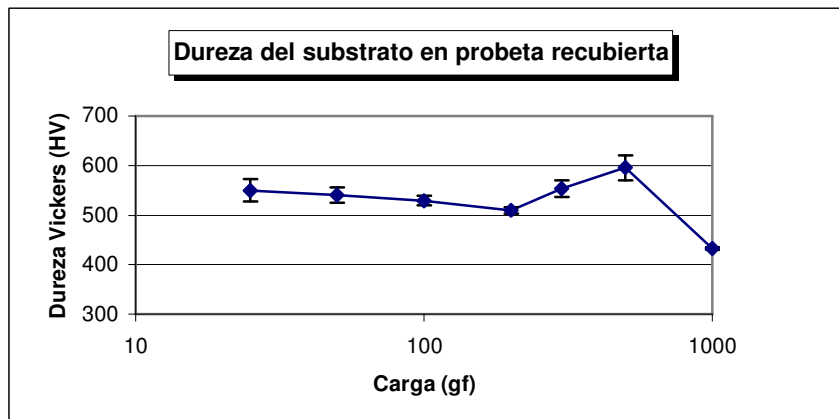


Figura 3.6 Curva de Dureza Vickers (HV) vs. Carga (gf) del sustrato en la probeta recubierta.

Resultado de dureza de acero AISI D2 sin recubrimiento

Continuando con el análisis de los valores de dureza, se pudo observar que para la probeta de acero que no fue recubierta los valores de dicha propiedad no mostraron la existencia de un efecto de tamaño de huella, manteniéndose alrededor de 543 ± 54 . El único valor que se aleja más del promedio es el correspondiente a la carga de 1000 g.

Tabla 3.6 Resultado del barrido de dureza de acero AISI D2 sin recubrimiento.

Carga (Sustrato)	Dureza Vickers (HV)	Desvest (Dureza)	d (μm)
25	533,2	28,1	10,1
50	603,2	40,9	12,9
100	562,5	9,8	17,6
200	545,3	11,8	24,9
300	551,1	9,5	30,6
500	571,4	2,9	39,6
1000	431,1	1,7	56,5
Promedio	542,5		
Desvest	54,0		

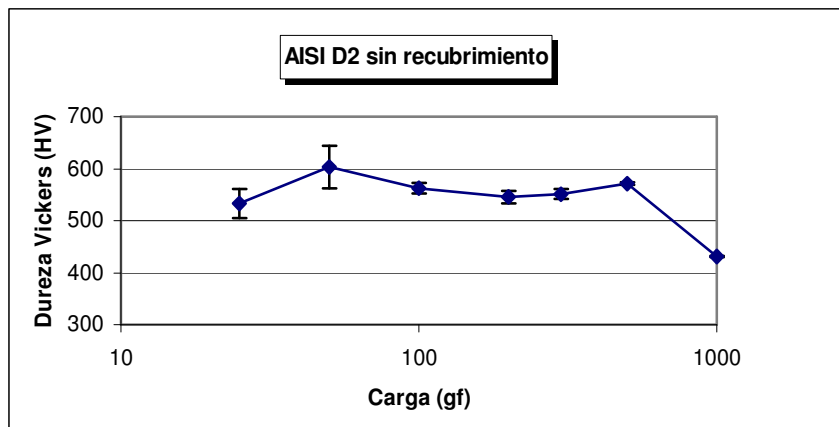


Figura 3.7 *Curva de Dureza Vickers (HV) vs. Carga (gf) de acero AISI D2 sin recubrimiento.*

La comparación de las figuras 3.6 y 3.7 permite verificar si el proceso de recubrimiento se efectuó a una temperatura superior a la del tratamiento térmico aplicado al acero de herramienta que sirvió de sustrato para la evaluación de la dureza del recubrimiento. De esta manera, la figura 3.8 ilustra la comparación entre de los valores de la dureza compuesta determinados en las muestras recubiertas, con los valores determinados en ambos sustratos, todos en función de la carga aplicada.

De acuerdo a lo que puede observarse en dicha figura, prácticamente no hay diferencia significativa alguna entre los valores de dureza del sustrato de las muestras recubiertas y aquel de las muestras no recubiertas, lo que significa que el tratamiento de recubrimiento se efectuó a una temperatura inferior a 500 °C, que representa la temperatura a la cual se le efectuó el tratamiento de revenido al acero de herramienta durante una hora.

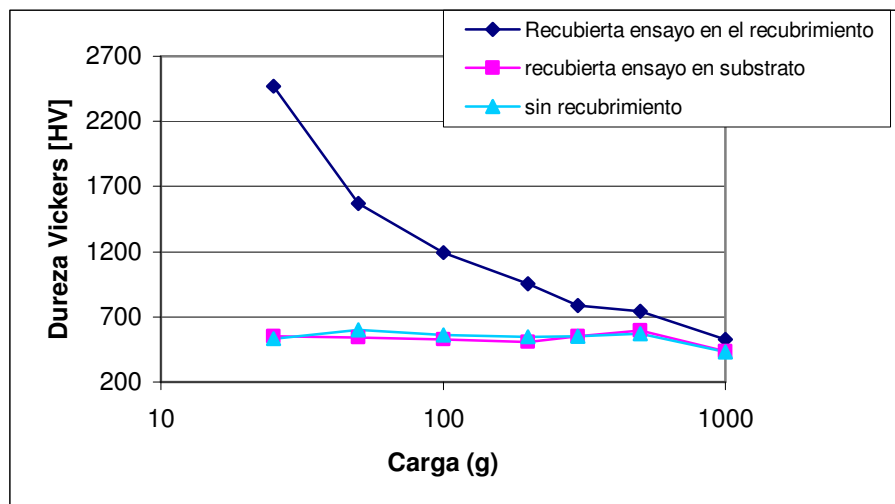


Figura 3.8 Comparación de dureza del recubrimiento con el material sustrato acero de herramientas AISI D2.

3.3. ENSAYOS DE TRACCIÓN

Para la realización de los ensayos de fatiga fue necesario evaluar el comportamiento mecánico del material en tracción uniaxial. A tal efecto, se realizaron una serie de ensayos de tracción tanto al material base como al material recubierto. En cada caso se realizaron tres ensayos en iguales condiciones, corrigiéndose posteriormente los valores del alargamiento por efecto de la deformación elástica de los elementos de máquina del equipo de ensayos mecánicos, lo que permitió determinar el valor medio del esfuerzo de fluencia, esfuerzo máximo y porcentaje de reducción de área.

Resultados de los ensayos de tracción del acero AISI 4340

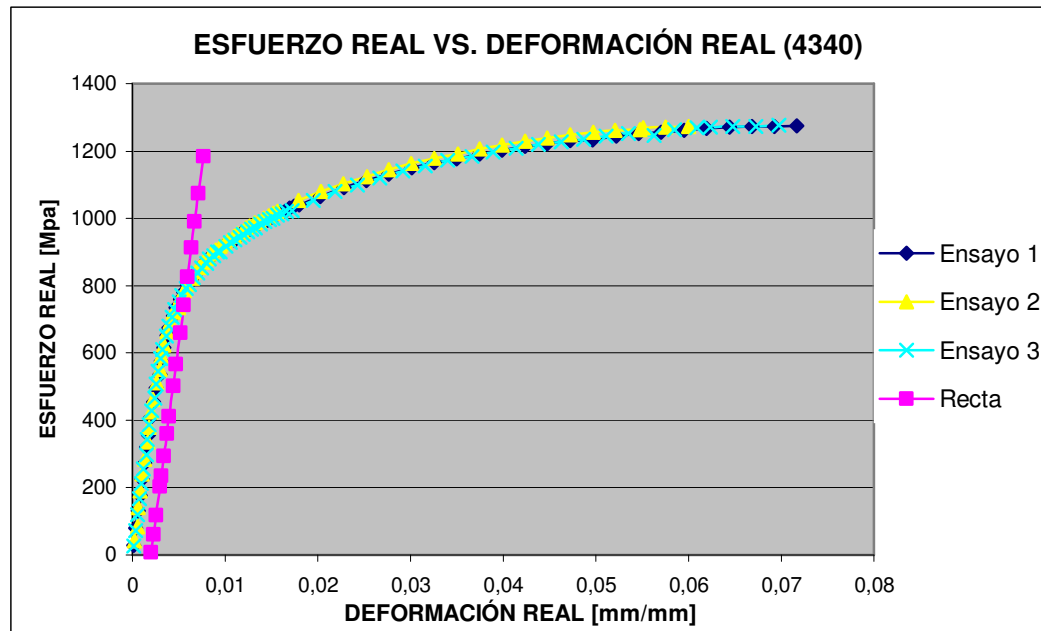


Figura 3.9 Curvas de esfuerzo real vs. Deformación real de un acero AISI 4340.

La figura 3.9 ilustra las curvas esfuerzo-deformación real del acero AISI 4340, observándose la reproducibilidad satisfactoria de los ensayos. La recta paralela a la porción inicial de la curva, desplazada una distancia de 0.002 (mm/mm) del origen, permite determinar el valor del esfuerzo de fluencia del material de acuerdo a la regla del 0.2% de deformación.

Tabla 3. 7 Resultados de los ensayos de tracción de las probetas de acero AISI 4340.

Nº ensayo	Esfuerzo de Fluencia Real (σ_v)	Esfuerzo máximo Real (σ_{ut})	% Reducción de Área
1	792,4	1275,0	27,7
2	796,7	1272,4	30,3
3	790,4	1276,2	29,9
Promedio	793,2	1274,5	29,3
Desviación Estándar	3,2	1,9	1,4

Los resultados se presentan en la tabla 3.7, en la cual se observa que las desviaciones estándar de las medias de las diversas propiedades evaluadas son

prácticamente insignificantes. El valor del esfuerzo máximo es aproximadamente un 60% mayor que el valor de esfuerzo de fluencia.

Resultados de los ensayos de tracción del acero AISI 4340

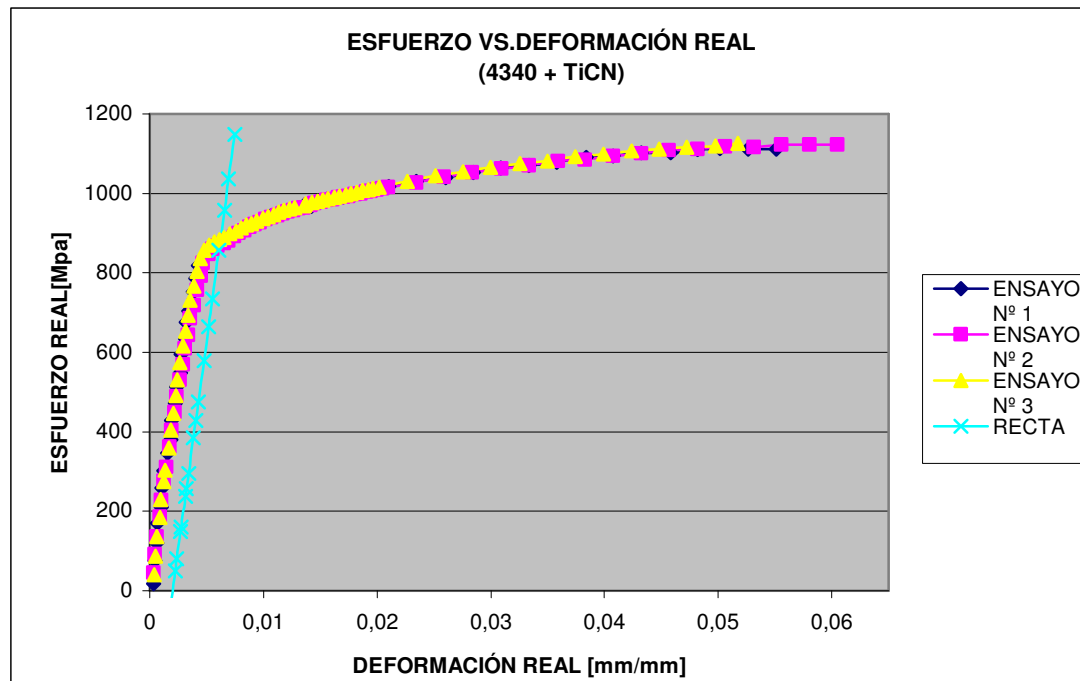


Figura 3.10 Curvas de esfuerzo real vs. Deformación real de un acero AISI 4340 recubierto con BALINIT® B.

En el caso de las probetas recubiertas, el comportamiento es ligeramente diferente al de las no recubiertas, tal como se observa en la figura 3.10, particularmente en la región posterior al punto de fluencia del material. La comparación de las figuras 3.9 y 3.10 tiende a indicar que la temperatura del proceso de recubrimiento fue superior a la temperatura de revenido del acero 4340, generando una leve reducción en sus propiedades mecánicas más allá de la fluencia, así como un incremento en el % de reducción de área.

Tabla 3.8 Resultados de los ensayos de tracción de las probetas recubiertas con BALINIT® B

Nº ensayo	Esfuerzo de Fluencia Real (σ_y)	Esfuerzo máximo Real (σ_{ut})	% Reducción de Área
1	873,6	1112,5	44,1
2	870,4	1123,4	45,5
3	885,3	1125,6	44,4
Promedio	876,4	1120,5	44,6
Desviación Estándar	7,8	7,0	0,7

La tabla 3.8 contiene los valores derivados del análisis y en la misma también se observa que las desviaciones estándar de los diferentes resultados son muy pequeñas en comparación con los valores medios de las propiedades evaluadas. En este caso el valor del esfuerzo real máximo presentó un incremento de 28% respecto al esfuerzo de fluencia.

En la tabla 3.9 se observa la comparación de los valores del esfuerzo de fluencia y del esfuerzo máximo del material recubierto con respecto al no recubierto, notándose que, como consecuencia del recubrimiento, el esfuerzo de fluencia tuvo un incremento de 10,5 % con respecto al material base, mientras que el esfuerzo máximo presentó una disminución de 12,1 % respecto al sustrato, lo que confirma la observación previa en relación a la temperatura del proceso de deposición y su efecto sobre las propiedades mecánicas del sustrato.

Tabla 3.9 Variación de las propiedades del esfuerzo real de fluencia y del esfuerzo real máximo del material con recubrimiento respecto al material base.

	Esfuerzo Real de Fluencia σ_y		Esfuerzo Real Máximo σ_{ut}	
	Variación	%	Variación	%
Balinit B	83,3	10,5	-154,0	-12,1

* El signo negativo (-) representa reducción con respecto al sustrato.

3.4. ENSAYOS DE FATIGA

Los resultados concernientes con los ensayos de fatiga al aire realizados en el acero AISI 4340 se presentan en la tabla 3.10. Tal como es de esperarse, a medida

que el esfuerzo alternante aplicado disminuye se produce un aumento en el número de ciclos a falla, así como de la desviación estándar del valor medio de dicho número.

Tabla 3.10 Resultados de ensayos de fatiga al aire del acero AISI 4340.

	NIVELES DE ESFUERZOS			
	539 [MPa]	571[MPa]	603[MPa]	634[MPa]
Nº del Ensayo	Número de ciclos			
1	554.700	242.600	190.200	127.900
2	495.000	422.000	174.400	91.500
3	581.700	274.600	206.600	131.900
4	383.000	281.000	203.300	111.600
5	877.200	298.900	229.300	143.600
6	1.499.500	226.400	152.800	136.800
Promedio	731.850	290.917	192.767	123.883
Desviación Estándar	410.399	69.438	26.752	19.160

En la tabla 3.11 se presentan los resultados de los ensayos de fatiga al aire para el acero 4340 recubierto. Como se puede observar, a diferencia de los ensayos anteriores para estas muestras fue necesario aumentar los niveles de esfuerzo alternante debido al incremento en las propiedades de fatiga que imparte la presencia del recubrimiento.

Tabla 3.11 Resultados de ensayos de fatiga al aire del acero AISI 4340 recubierto con BALINIT B.

	NIVELES DE ESFUERZOS			
	603[MPa]	634[MPa]	665[MPa]	696[MPa]
Nº del Ensayo	Número de ciclos			
1	225.300	407.900	156.200	62.900
2	621.100	280.700	126.400	119.000
3	276.700	181.600	205.000	64.800
4	298.500	298.000	200.900	120.400
5	455.500	207.700	159.600	82.700
6	400.200	167.300	111.700	95.300
Promedio	379.550	257.200	159.967	90.850
Desviación Estándar	145.246	90.747	37.880	25.345

En lo que respecta al límite de fatiga, los ensayos fueron iniciados a un nivel de esfuerzo correspondiente al 63 % del esfuerzo de fluencia obtenido en tracción, prosiguiendo luego con el método de la escalera, aplicando escalones de 5MPa. Nótese en la tabla 3.12 que existen valores de esfuerzo para el acero AISI 4340 comprendidos entre los 500 MPa y los 530 MPa, lo cual indica que el límite de fatiga del material se encuentra en dicho intervalo de valores.

Tabla 3.12 *Resultados de ensayos de límite de fatiga del acero AISI 4340.*

	Esfuerzo [Mpa]	Ciclos (N_f)
1	500	5.000.000
2	505	5.000.000
3	510	5.000.000
4	515	1.346.700
5	510	5.000.000
6	515	5.000.000
7	520	5.000.000
8	525	5.000.000
9	530	885.800
10	525	1.184.600
11	520	5.000.000
12	525	874.200
13	520	5.000.000
14	525	1.035.300
15	520	5.000.000

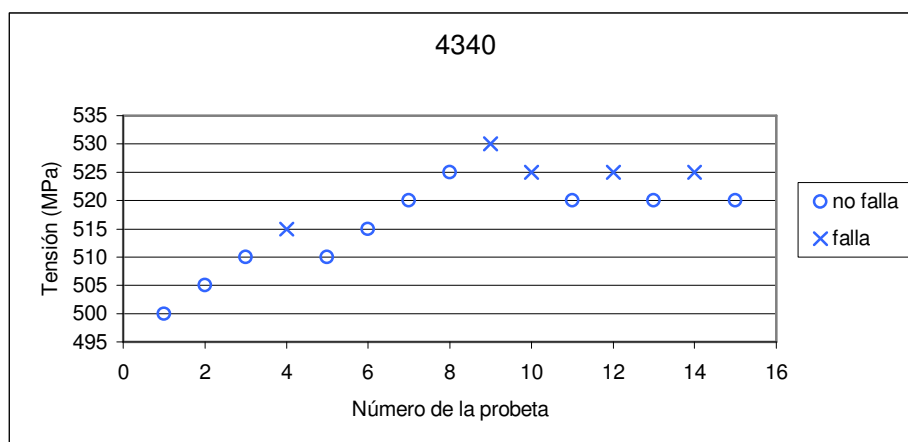


Figura 3.11 *Sucesión de ensayos en escalera para determinación del límite medio de fatiga del 4340.*

De los resultados obtenidos para la evaluación de esta propiedad se tomaron en cuenta los sucesos menos frecuentes. La tabla 3.13 presenta estos resultados y en la misma se puede observar que el suceso menos frecuentes es el que corresponde a la falla de las muestras. Se determinaron los valores de N, A, y B que se emplearon en las ecuaciones correspondientes para el cálculo del valor medio del límite y su desviación estándar.

Tabla 3.13 *Determinación de parámetros para obtención del límite medio de fatiga del AISI 4340.*

S (Mpa)	Nivel	Resultados de los ensayos															Resumen de resultados de los ensayos		Frecuencia de especímenes que fallaron		
	i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Fallaron	No fallaron	f _i	i*f _i	i ² *f _i
530	6									X							1	0	1	6	36
525	5							O		X		X		X			3	1	3	15	75
520	4						O				O		O		O		0	4	0	0	0
515	3				X		O										1	1	1	3	9
510	2			O		O											0	2	0	0	0
505	1		O														0	1	0	0	0
500	0	O															0	1	0	0	0
T O T A L																	5	10	5	24	120
																			N = 5	A = 24	B = 120

De esta manera, se determinó que el sustrato tiene un límite de fatiga de 521,5 MPa $\pm$ 8,01 MPa.

En el caso del acero recubierto también se utilizó un esfuerzo inicial para la evaluación del límite de fatiga, correspondiente al 63% del esfuerzo de fluencia, es decir, 560 MPa. De esta manera, se determinó que dicho límite se encontraba en el intervalo 545-560 MPa, tal como se aprecia en la tabla 3.14.

Tabla 3.14 *Resultados de ensayos de límite de fatiga del acero AISI 4340 recubierto con BALINIT B.*

	Esfuerzo [MPa]	Ciclos (N_f)
1	560	2.692.800
2	555	1.213.400
3	550	5.000.000
4	555	889.100
5	550	657.000
6	545	5.000.000
7	550	5.000.000
8	555	2.518.500
9	550	5.000.000
10	555	3.951.900
11	550	3.741.200
12	545	5.000.000
13	550	5.000.000
14	555	1.014.300
15	550	5.000.000

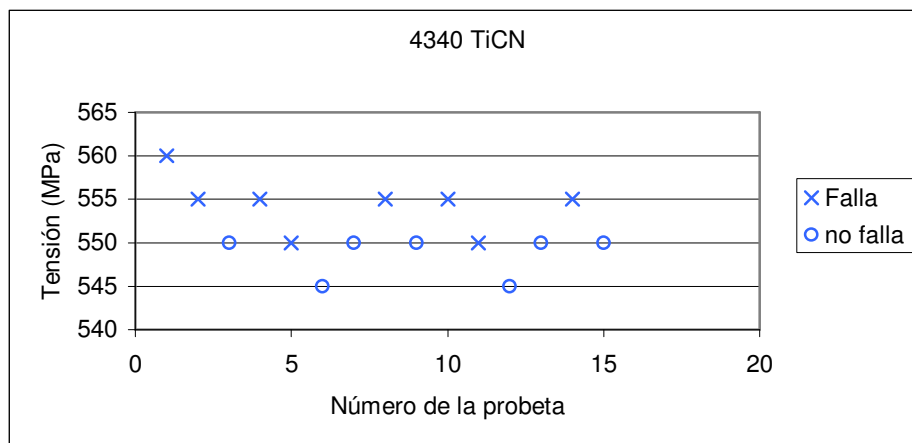


Figura 3.12 *Sucesión de ensayos en escalera para determinación del límite medio de fatiga del 4340 recubierto con BALINIT B.*

En el caso de las probetas recubiertas, de acuerdo a lo que se observa en la tabla 3.15, los sucesos menos frecuentes es la no falla de las muestras lo cual permitió la determinación de los parámetros necesarios para el cálculo tanto del límite medio de fatiga como de su respectiva desviación.

Tabla 3.15 Determinación de parámetros para obtención del límite medio de fatiga del AISI 4340 recubierto con BALINIT B.

S (Mpa)	Nivel	Resultados de los ensayos															Resumen de resultados de los ensayos		Frecuencia de especímenes que fallaron		
	i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Fallaron	No fallaron	f _i	i*f _i	i^2*f _i
560	3	X															1	0	0	0	0
555	2		X		X				X		X				X		5	0	0	0	0
550	1			O		X		O		O		X		O		O	2	5	5	5	5
545	0						O						O				0	2	2	0	0
T O T A L																	8	7	7	5	5
																			N = 7	A = 5	B = 5

Para el caso del acero recubierto el valor del límite medio de fatiga de 551 ± 2 MPa.

Con los resultados obtenidos de los ensayos de vida y de límite de fatiga se procedió a construir la curva de Wöhler representada en la figura 3.13, en la cual se observa un aumento de ambos parámetros.

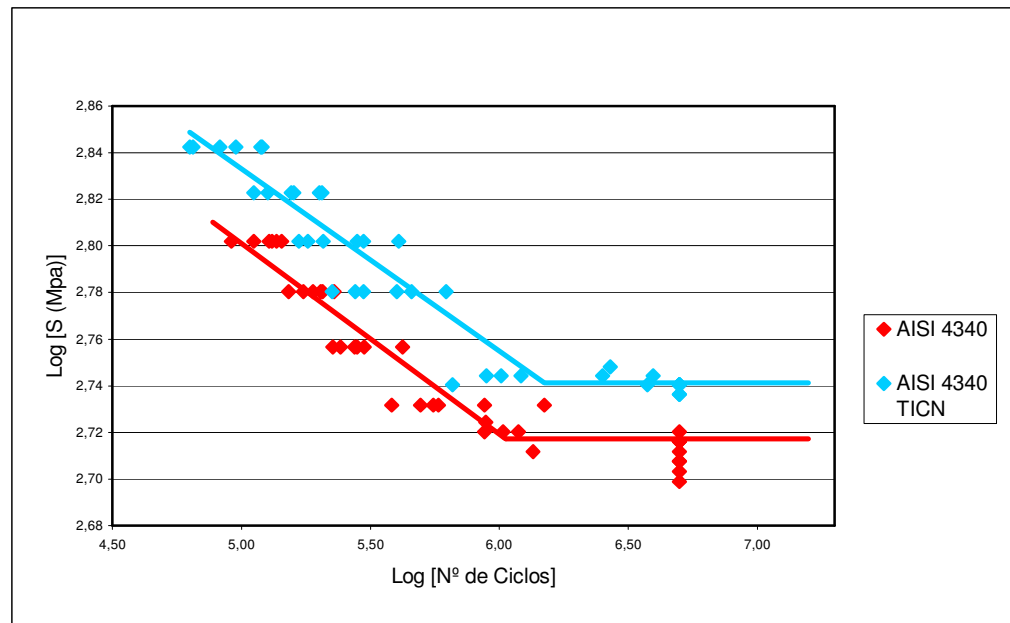


Figura 3.13 Resistencia a la fatiga de los aceros AISI 4340 y AISI 4340 recubierto con BALINIT B ensayos de fatiga al aire.

Con lo datos obtenidos de las curvas de Wöhler para el acero base y el acero recubierto, se obtuvieron las ecuaciones de Basquin expresadas en las tablas 3.16 y 3.17 respectivamente.

Tabla 3.16 Ecuación de Basquin para ensayo fatiga al aire del acero AISI 4340.

<i>Obtención de la ecuación de Basquin.</i>			
Datos de la curva		Parámetros ec. Basquin	
Pendiente =	-0,0820	b =	-0,0820
Intersección (eje Y)	3,2113	Sf =	1.626,68
		<i>Ecuación de Basquin</i>	
R2 =	0,8264	S_a=1.626,68*(N_f)^{-0,0820}	

Tabla 3.17 Ecuación de Basquin para ensayo de fatiga al aire del acero AISI 4340 recubierto con BALINIT B.

<i>Obtención de la ecuación de Basquin.</i>			
Datos de la curva		Parámetros ec. Basquin	
Pendiente =	-0,0781	b =	-0,0781
Intersección (eje Y)	3,2233	Sf =	1.672,34
		<i>Ecuación de Basquin</i>	
R2 =	0,7597	S_a=1.672,34*(N_f)^{-0,0781}	

3.5. ENSAYOS DE FATIGA-CORROSIÓN

A continuación se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de fatiga corrosión, en la tabla 3.18 podemos destacar la influencia del medio corrosivo si se compara con la fatiga al aire, se ensayaron probetas a 4 diferentes niveles de esfuerzos haciéndose notorio como a mayor esfuerzo se obtenían menores números de ciclos de resistencia a la fatiga. También se observa como a medida que se aumenta el nivel de esfuerzo al cual está sometido la probeta, disminuye la desviación estándar del mismo conjunto.

Tabla 3.18 *Resultados de ensayos de fatiga corrosión del acero AISI 4340.*

	NIVELES DE ESFUERZOS			
	539 [Mpa]	571[Mpa]	603[Mpa]	634[Mpa]
Nº del Ensayo	Número de ciclos			
1	117.800	78.300	88.100	64.600
2	184.100	88.300	75.100	44.000
3	107.300	98.300	109.500	68.200
4	144.100	97.300	69.700	81.100
5	109.800	120.400	72.100	60.600
6	95.100	114.600	109200	68.600
Promedio	126.367	99.533	87.283	64.517
Desviación Estándar	32.670	15.786	18.236	12.178

La tabla 3.19 muestra los resultados del sustrato con recubrimiento BALINIT B, obtenidos del ensayo de fatiga corrosión pudiéndose observar los resultados muy similares a los obtenidos de ensayos de fatiga corrosión de las probetas no recubiertas, reflejados en la tabla 3.18.

Tabla 3.19 *Resultados de ensayos de fatiga corrosión del acero AISI 4340 recubierto con BALINIT B.*

	NIVELES DE ESFUERZOS			
	539 [Mpa]	571[Mpa]	603[Mpa]	634[Mpa]
Nº del Ensayo	Número de ciclos			
1	122.400	100.200	109.400	69.500
2	137.100	111.500	95.800	73.300
3	135.500	112.100	92.900	84.500
4	130.200	99.000	77.000	71.700
5	128.600	123.600	73.800	66.800
6	126.400	100.400	90.200	61.600
Promedio	130.033	107.800	89.850	71.233
Desviación Estándar	5.539	9.714	13.037	7.694

Siguiendo con el análisis de los ensayos de fatiga corrosión observamos a continuación la figura 3.14 donde se reflejan los resultados gráficamente de los ensayos de fatiga corrosión para el sustrato recubierto comparándose junto con el

substrato no recubierto para los diferentes niveles de esfuerzo, nótese que la variación entre uno y otro es relativamente poca.

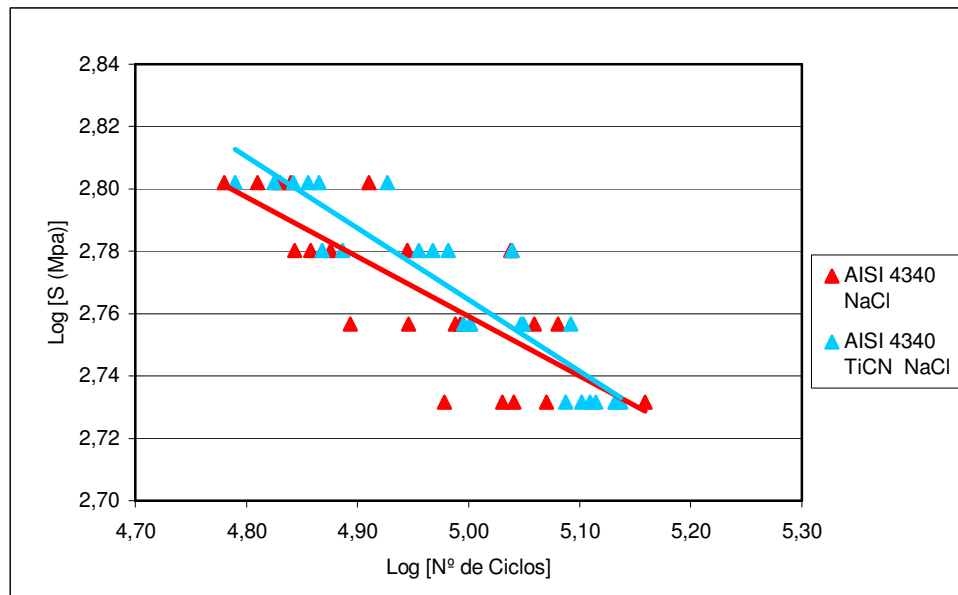


Figura 3.14 Resistencia a la fatiga de aceros AISI 4340 y AISI 4340 recubierto con BALINIT B ensayos de fatiga-corrosión.

Por medio de las rectas obtenidas anteriormente para los ensayos de fatiga corrosión de las probetas recubiertas y las no recubiertas, se pueden determinar los parámetros de las ecuaciones de Basquin. Dichos valores se encuentran reflejados en las tablas 3.20 y 3.21 respectivamente.

Tabla 3.20 Ecuación de Basquin para ensayos de fatiga corrosión del acero AISI 4340.

<i>Obtención de la ecuación de Basquin.</i>			
Datos de la curva		Parámetros ec. Basquin	
Pendiente =	-0,1909	b =	-0,1909
Intersección (eje Y)	3,7136	Sf =	5.171,26
R2 =	0,5960	<i>Ecuación de Basquin</i>	
		S_a=5.171,26*(N_f)^{-0,1909}	

Tabla 3.21 Ecuación de Basquin para ensayo de fatiga corrosión del acero AISI 4340 recubierto con BALINIT B.

<i>Obtención de la ecuación de Basquin.</i>			
Datos de la curva		Parámetros ec. Basquin	
Pendiente =	-0,2293	b =	-0,2293
Intersección (eje Y)	3,9110	Sf =	8.147,28
		<i>Ecuación de Basquin</i>	
R2 =	0,8470	$S_a = 8.147,28 \cdot (N_f)^{-0,2293}$	

Por último observamos los resultados en forma gráfica de los ensayos de fatiga corrosión comparándose con los resultados de la resistencia a la fatiga y límite de fatiga para el sustrato recubierto con BALINIT B y para el sustrato no recubierto, teniéndose una mejor visión de los resultados para todos los ensayos y una comparación grafica de los mismos. De esta manera determinamos como se vio afectado el sustrato recubierto respecto al material sin recubrir. Esto puede observarse en la figura 3.15.

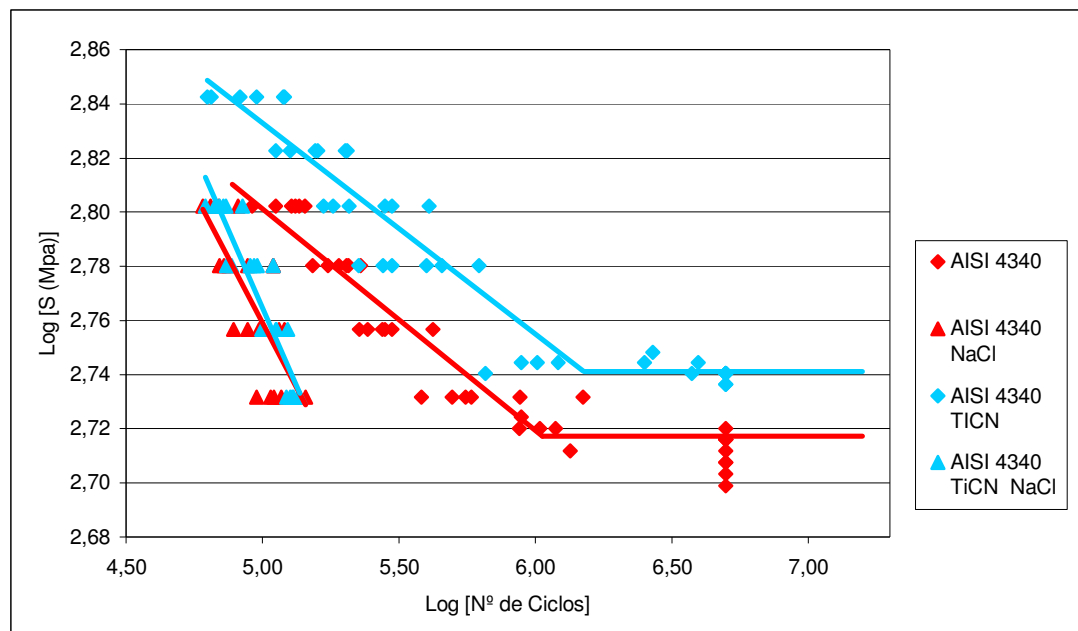


Figura 3.15 Resistencia a la fatiga de los aceros AISI 4340 y AISI 4340 recubierto con BALINIT B ensayos de fatiga al aire y de fatiga-corrosión.

3.6. INCREMENTO EN LA VIDA A FATIGA

Para determinar como afecta el recubrimiento al comportamiento de la vida a fatiga del sustrato, se realiza una comparación entre el sustrato y el recubrimiento mediante una determinación del porcentaje de incremento en la vida a fatiga, en la figura 3.16 se puede observar que existe un incremento en la vida a fatiga con valores que varían aproximadamente entre 135 hasta 175 %, cuando la variación de esfuerzos correspondiente se mantuvo entre los 696 hasta 539 MPa.

Retomando el límite de fatiga se observó que las propiedades de este, presente en las probetas recubiertas reflejaron un incremento en el límite de fatiga de aproximadamente 6 % respecto a las probetas sin recubrir. Esto equivale a decir que el límite de fatiga aumentó en aproximadamente 30 MPa.

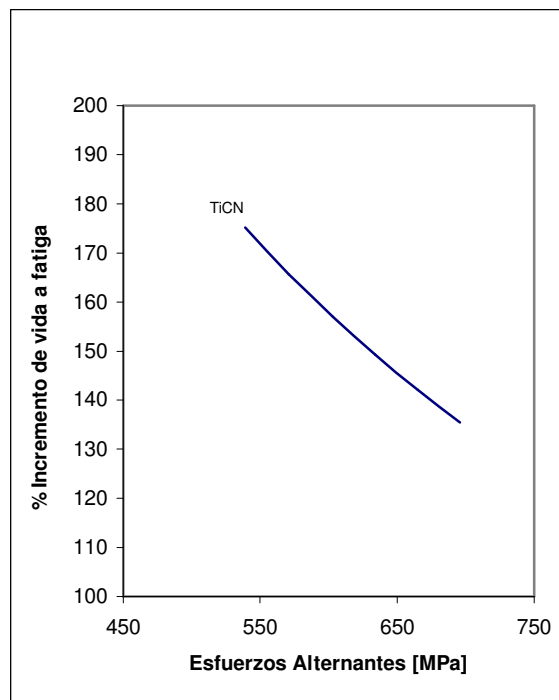


Figura 3.16 Cambio en el porcentaje de incremento de la vida a fatiga al aire con esfuerzos alternantes para depósito de Carbonitruro de Titanio.

Haciendo la comparación entre el sustrato y el recubrimiento en ambiente corrosivo, se puede observar en la figura 3.17 que existe un incremento en la vida a fatiga con valores que varían aproximadamente entre 25 hasta 0 %, cuando la variación de esfuerzos correspondiente se mantuvo entre los 696 hasta 539 MPa.

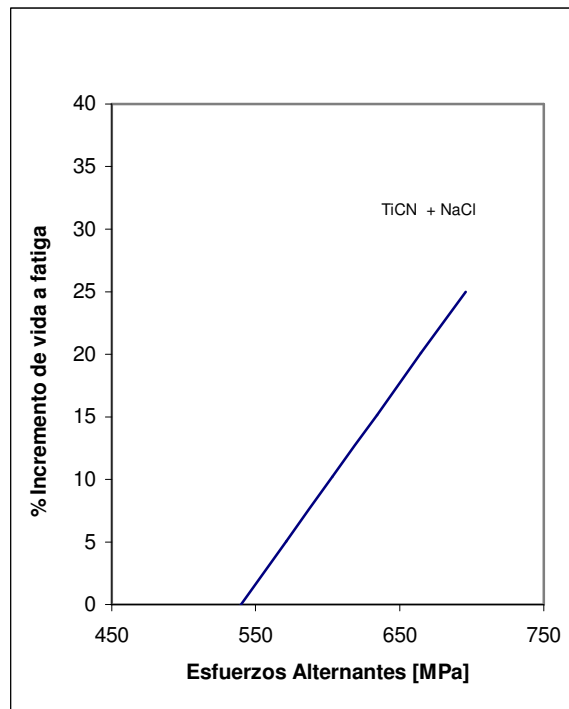


Figura 3.17 Cambio en el porcentaje de incremento de la vida a fatiga en ambiente corrosivo con esfuerzos alternantes para depósito de Carbonitruro de Titanio.

CAPITULO IV

4. ESTUDIO FRACTOGRÁFICO

A continuación se presenta el análisis de las superficies de fractura realizado por medio de un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB). El estudio fue llevado a cabo en probetas correspondientes a las propias superficies de fractura y a cortes longitudinales perpendiculares a dicha superficie. Se emplearon ocho muestras de las probetas fracturadas, cuatro correspondientes a las muestras sin recubrir y cuatro a las muestras recubiertas, todas escogidas de los puntos más cercanos a las curvas de Wöhler determinadas experimentalmente en condiciones de fatiga al aire y fatiga corrosión, para los niveles de esfuerzo alternante extremos.

Con el propósito de llevar a cabo un análisis general de las superficies de fractura y particularmente para determinar los posibles puntos de inicio de las grietas, se tomaron una serie de fotomicrografías a distintos aumentos, tanto en la modalidad de electrones secundarios (SE) como de electrones retrodispersados (BSE).

A las muestras de secciones transversales se les observó a mayores aumentos para definir el mecanismo de fractura del material y se realizó un estudio del recubrimiento para observar como se propagan las grietas y como es su comportamiento luego de someter la muestra a cargas alternantes. En una muestra longitudinal recubierta se realizó un análisis de composición en el recubrimiento por medio de la técnica de Espectroscopia por Dispersión en Energía de Rayos X (EDS). Adicionalmente, se tomaron fotomicrografías a las muestras con corte transversal recubiertas a un ángulo de incidencia de los electrones de 45° y a una muestra recubierta ensayada en tracción.

4.1. CORTES TRANSVERSALES DE LAS PROBETAS DE FATIGA

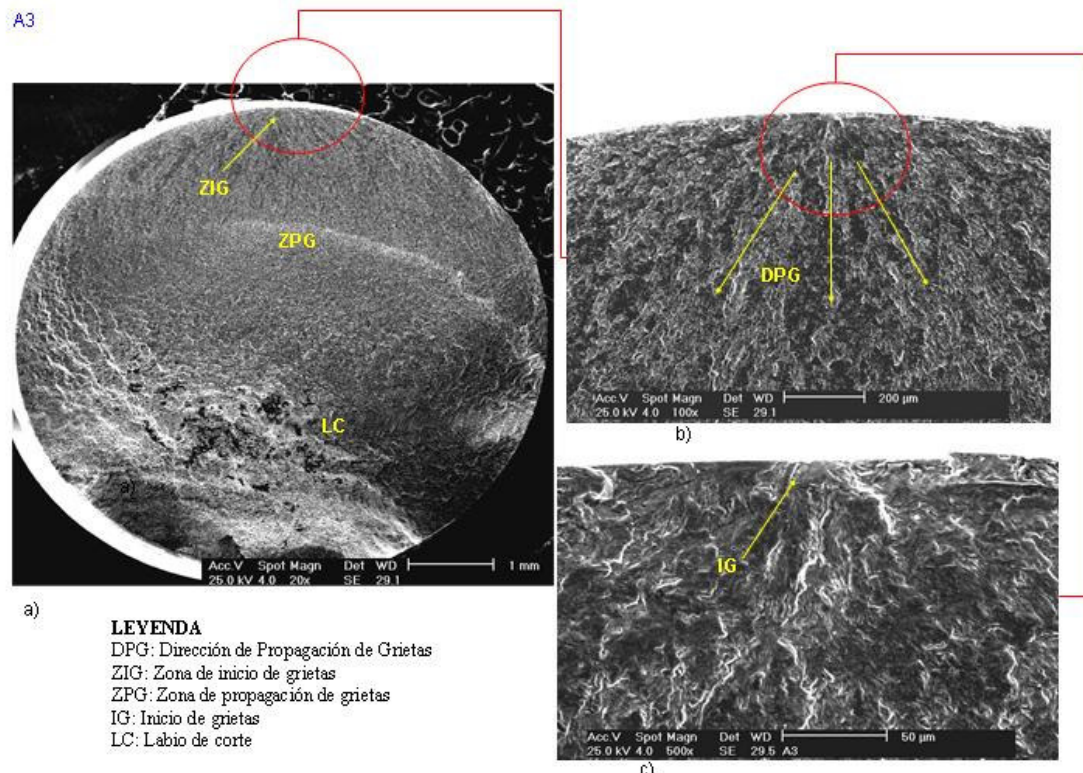


Figura 4.1 a) Vista general de la superficie de fractura de una probeta no recubierta ensayada al aire a $S_f = 539 \text{ MPa}$ y $N_f = 581700$ ciclos. b) y c) ampliación y detalle de la zona de inicio de grieta.

La figura 4.1 muestra la superficie de fractura de una probeta no recubierta ensayada al aire a un esfuerzo de 539 MPa, el cual es el nivel de más bajo de esfuerzo al que se ensayaron dichas probetas, siendo esta la que se aproximó más al valor de vida a la fatiga determinado por la ecuación de Basquin. En la misma es posible observar la superficie general de fractura, notándose diversas zonas características tales como el sitio de inicio de la grieta dominante, la zona de propagación de esta y la zona de fractura final (labio de corte). Se identifican estas diferentes zonas por la morfología presentada en la superficie de fractura, viéndose el cambio gradual en su textura. La zona de propagación de grietas presenta una

textura de aspecto liso mientras que la zona de fractura final presenta una textura rugosa.

En la figura 4.1.b se pueden observar con mayor detalle las direcciones de propagación de la grieta dominante, señaladas por las flechas dibujadas sobre la fotomicrografía. El origen de la grieta estaría en el punto donde convergen dichas flechas. Analizando a un mayor aumento la zona de origen de la grieta, tal como se muestra en la figura 4.1.c, es posible observar con mayor detalle las características de dicho punto.

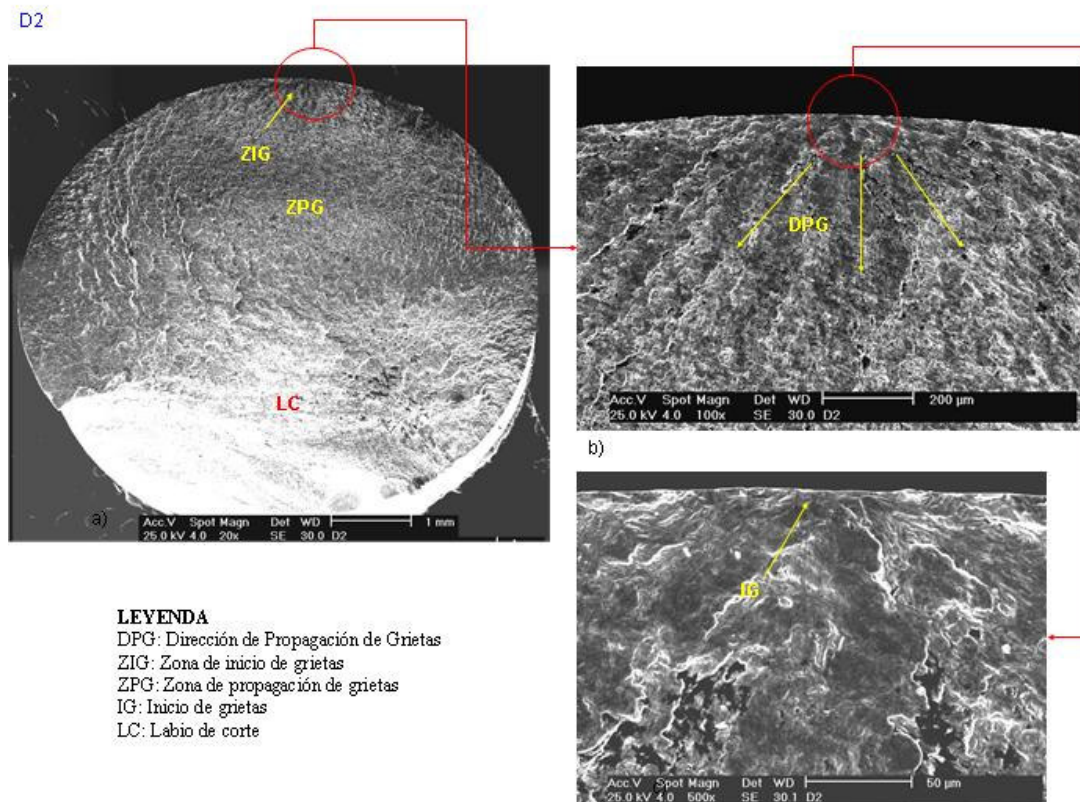


Figura 4.2 a) Vista general de la superficie de fractura de una probeta no recubierta ensayada al aire a $S_f = 634 \text{ MPa}$ y $N_f = 91500$ ciclos. b) y c) ampliación y detalle de la zona de inicio de grieta.

La figura 4.2 representa un conjunto de fotomicrografías que identifican la superficie de fractura de la probeta no recubierta ensayada al aire a un esfuerzo de 634 MPa. De igual manera que para bajos esfuerzos alternantes, se puede observar la presencia de una grieta dominante. La comparación entre las fotomicrografías de las

muestras ensayadas a altos y bajos niveles de esfuerzos indica que para esfuerzos elevados la zona de propagación de grieta es pequeña, tal como cabría esperar.

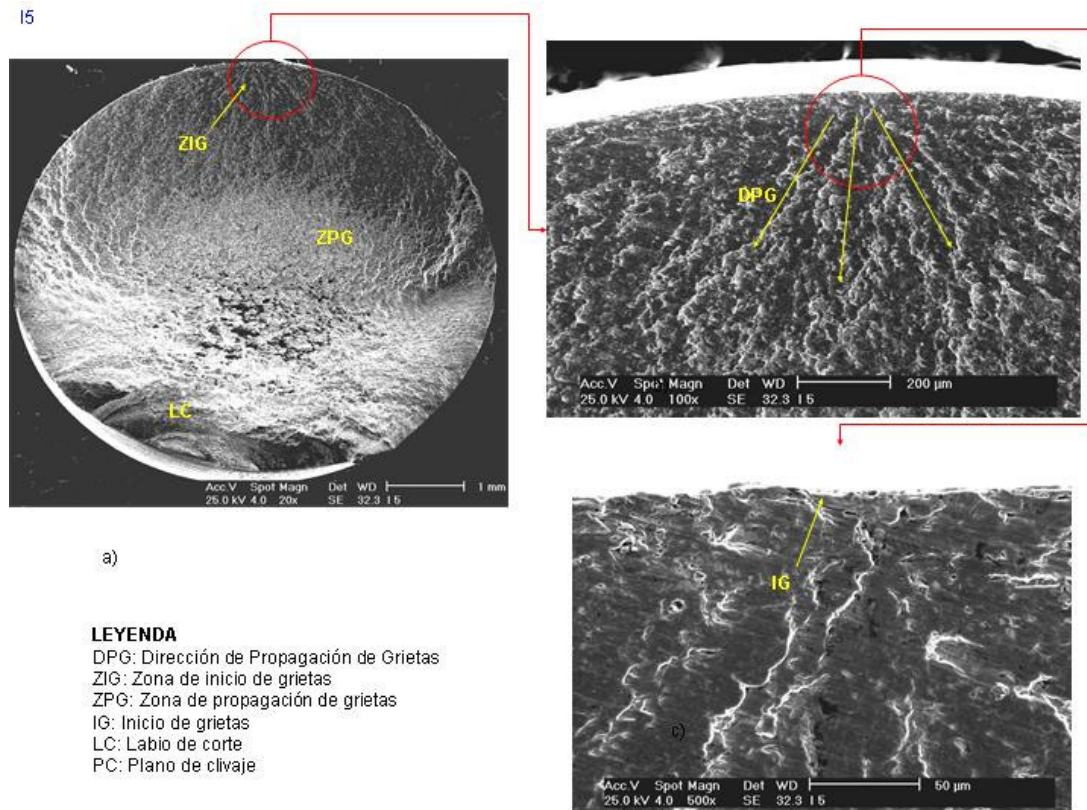


Figura 4.3 a) Vista general de la superficie de fractura de una probeta recubierta ensayada al aire a $S_f = 603 \text{ MPa}$ y $N_f = 455500$ ciclos. b) y c) ampliación y detalle de la zona de inicio de grieta.

En la figura 4.3.a se señala la morfología de la superficie de fractura de una probeta recubierta, la cual fue ensayada a un esfuerzo alternante de 603 MPa. Se presenta la vista general de la superficie de fractura en donde se puede apreciar de manera bien definida el origen de la grieta y la zona de propagación de la misma, observándose las líneas características denominadas comúnmente como “marcas de playa”. Mas abajo, en la vista general de la superficie de fractura, se nota como la rugosidad se acentúa más, indicando la zona de fractura final o también llamada labio de corte.

En la figura 4.3.b se realiza la ampliación del origen de la grieta presentado en la figura 4.3.a, lo que permite observar con detalle la dirección de propagación de la grieta representada por las flechas que parten de un punto de convergencia.

La figura 4.3.c constituye una vista aún más detallada del origen de la grieta.

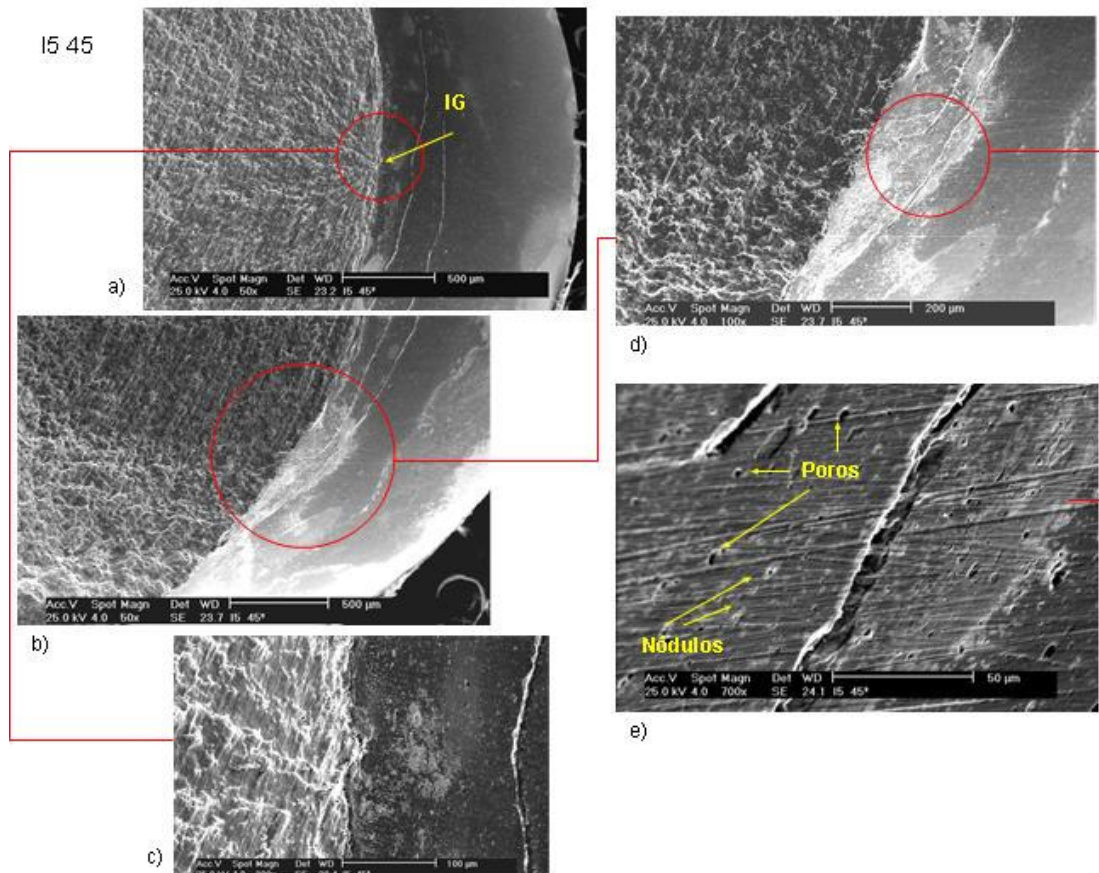


Figura 4.4 a) y b) Vista a 45° de la superficie de fractura de una probeta recubierta ensayada al aire a $S_f = 603 \text{ MPa}$ y $N_f = 455500$ ciclos. c) Detalle de inicio de grieta de “a”. d) y e) Detalles de grietas circunferenciales en la superficie lateral ampliando la figura “b”.

En concordancia con las figuras anteriores, la figura 4.4 muestra la caracterización de la superficie lateral de la misma probeta, en la cercanía del origen de la grieta. Este compendio de fotomicrografías fue tomado a un ángulo de incidencia de 45°, encontrándose la existencia de grietas circunferenciales cercanas a la superficie de fractura. El conjunto de fotomicrografías de las figuras 4.4a-4.4c ilustran claramente el origen de la grieta dominante, mientras que las figuras 4.4d-

4.4e se detallan las grietas circunferenciales de la pared lateral. La figura 4.4.b es la continuación de la figura 4.4.a, la cual muestra la presencia de las mismas líneas circunferenciales y una zona que revela un cambio de dirección de estas grietas, indicando un cambio hacia la superficie de fractura. Este fenómeno se observa en la figura 4.4.d y se ve con mayor detalle en la figura 4.4.e. En esta última fotomicrografía se evidencia la presencia de nódulos y poros.

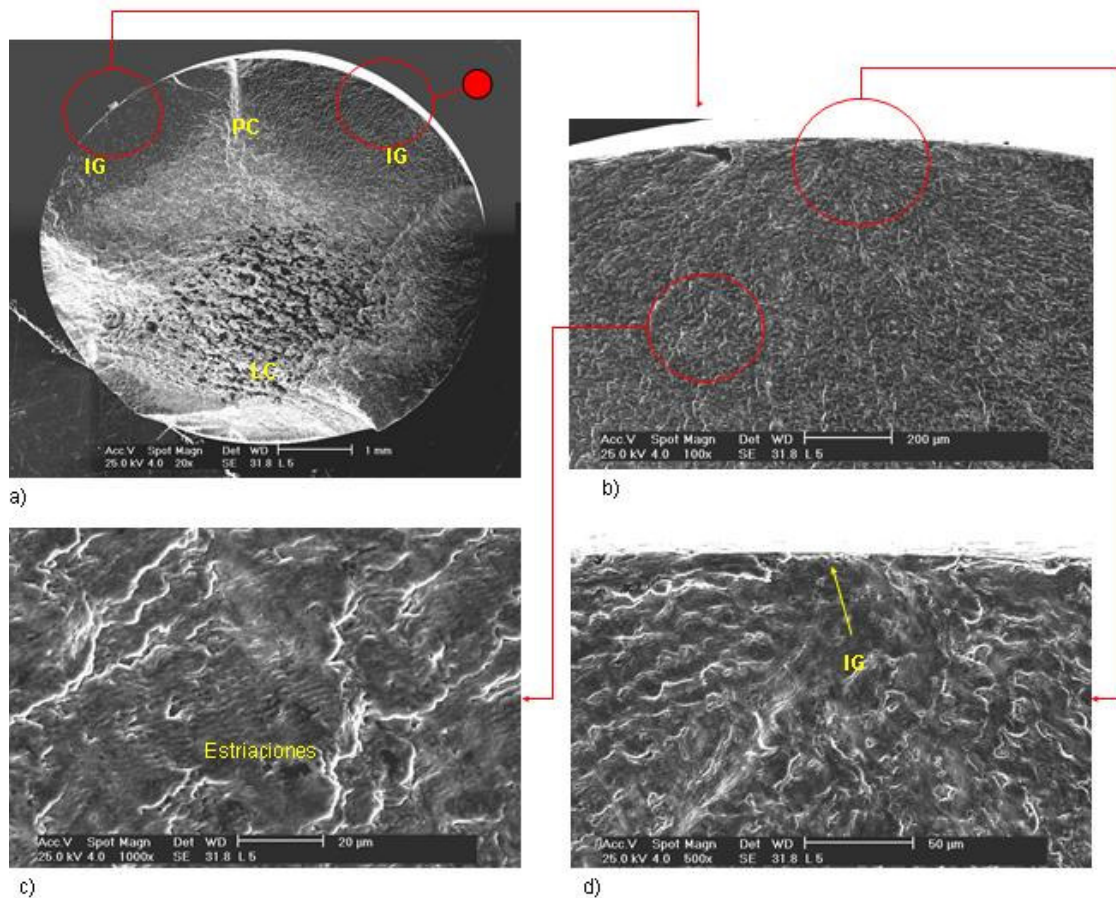


Figura 4.5 Vista general de la superficie de fractura de una probeta recubierta ensayada al aire a $S_f = 696 \text{ MPa}$ y $N_f = 82700$ ciclos. b) y d) ampliación y detalle de la zona de inicio de grieta. c) Mostrando detalle de zona de estriaciones de “b”

En la figura 4.5 se detalla la superficie de fractura de una probeta recubierta, la cual fue ensayada a un esfuerzo alternante de 696 MPa. La figura 4.5.a describe la vista general de la superficie de fractura en la cual, a diferencia de las figuras

anteriores, es notoria la presencia de dos zonas de inicio de grietas, además de la existencia de un escalón de clivaje. Se observa también que la región de fractura final está localizada más hacia el centro de la muestra, causado por la presencia de los dos puntos de inicio de grieta.

En la figura 4.5.b se observa con mayor detalle la zona de inicio de la grieta del lado izquierdo, zona que se detalla con mayor aumento en la figura 4.5.d. Se muestra también una zona con presencia de estriaciones que son observadas a mayor aumento en la figura 4.5.c.

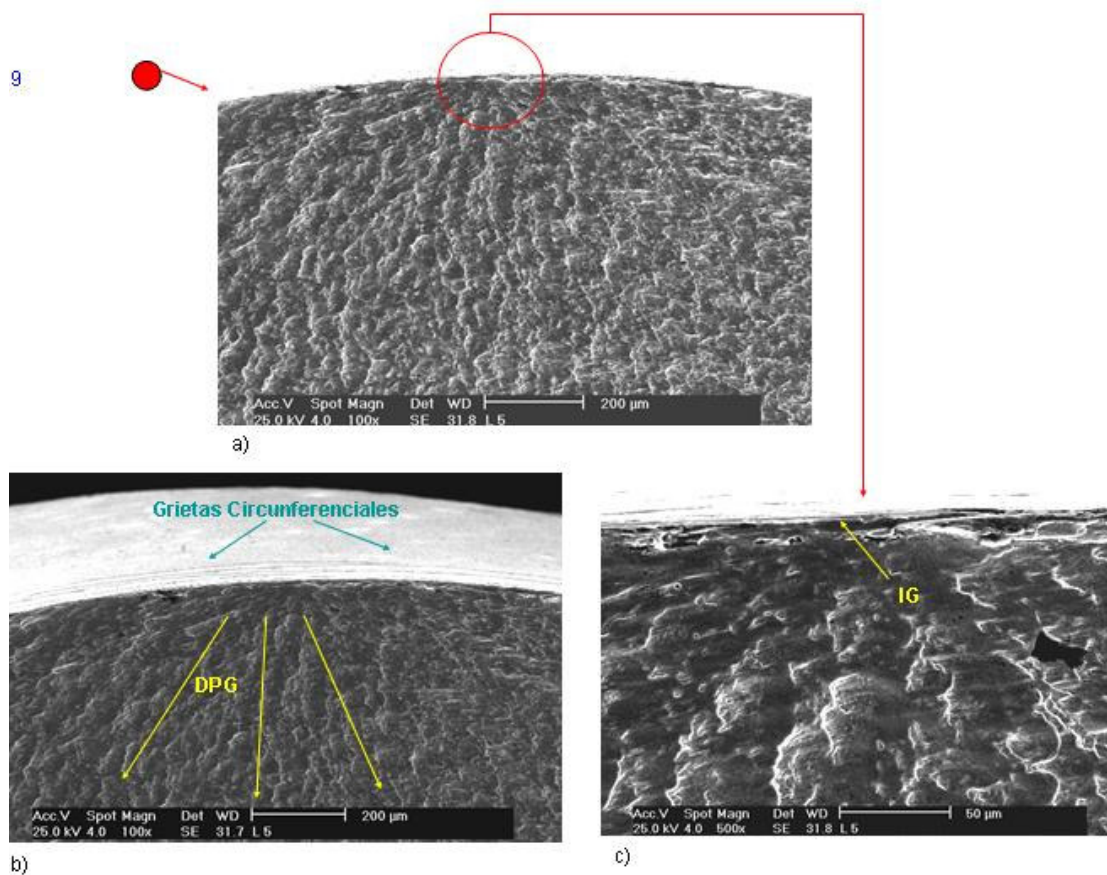


Figura 4.6 a) Vista general de la superficie de fractura de una probeta recubierta ensayada al aire a $S_f = 696 \text{ MPa}$ y $N_f = 82700$ ciclos. b) Vista de la superficie lateral y de fractura mostrando grietas circunferenciales. c) Detalle de inicio de grieta.

La figura 4.6 señala el otro punto de inicio de una grieta presente en la probeta recubierta ensayada a 696 MPa. La figura 4.6.a detalla el origen de la grieta

y la figura 4.6.b indica la presencia de grietas circunferenciales y la dirección de propagación a partir del origen.

La figura 4.6.c describe la localización del punto de inicio de la grieta determinado por la convergencia de las flechas de la figura anterior, indicando la zona de donde parten las direcciones de propagación de la grieta.

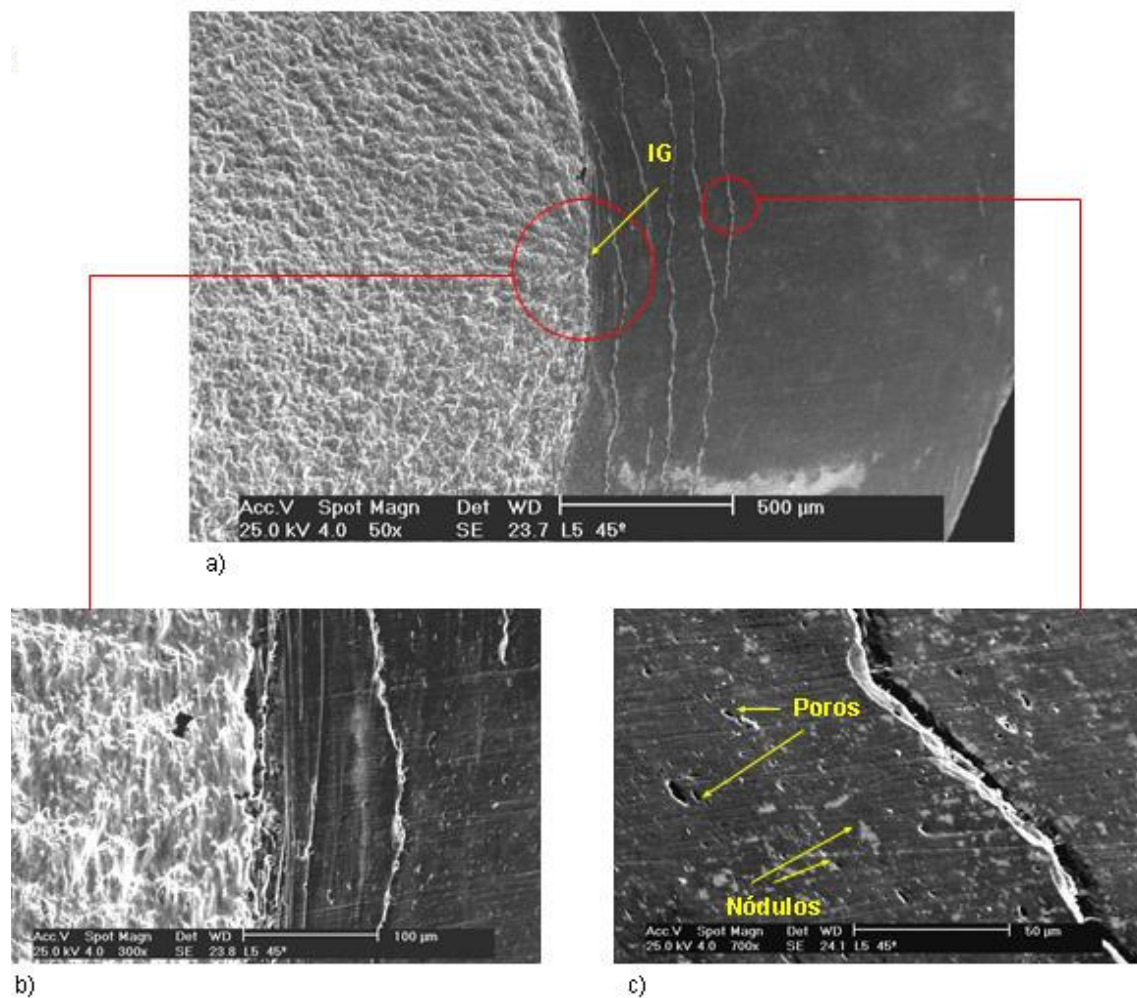


Figura 4.7 a) Vista a 45° de una probeta recubierta ensayada al aire a $S_f = 696 \text{ MPa}$ y $N_f = 82700$ ciclos. b) Detalle del comportamiento del recubrimiento en el inicio de grieta. c) Detalle de grieta circunferencial en el recubrimiento.

La figura 4.7 es una composición de varias fotomicrografías, tomadas con un ángulo de incidencia de 45° , para resaltar las características más importantes de la

superficie de fractura, acompañada de la superficie lateral, mostrándose el aumento en la cantidad de grietas circunferenciales comparado con la probeta recubierta pero ensayada a menor un nivel de esfuerzo. Esto se observa en la figura 4.7.a mientras que la figura 4.7.b presenta la superficie lateral con mayor detalle con la finalidad de describir el comportamiento del recubrimiento, notándose el agrietamiento del mismo en la cercanía de la superficie de fractura.

En la figura 4.7.c, se hace una ampliación de la zona donde se encuentra una grieta circunferencial presente en la figura 4.7.a. Aquí se detalla la presencia de nódulos y poros, pudiéndose hacer la suposición que estos poros son ocasionados por desprendimiento localizado del recubrimiento a partir de los nódulos que se forman durante el proceso de deposición, los cuales al estar poco adheridos al volumen del substrato se desprenden originando dichos defectos, los que representan puntos potenciales para la nucleación de las grietas. Esto es una suposición que indica que los poros poseen la condición de iniciar las grietas, pero como se podrá ver más adelante, los mismos no siempre determinan la nucleación de la grieta de fractura.

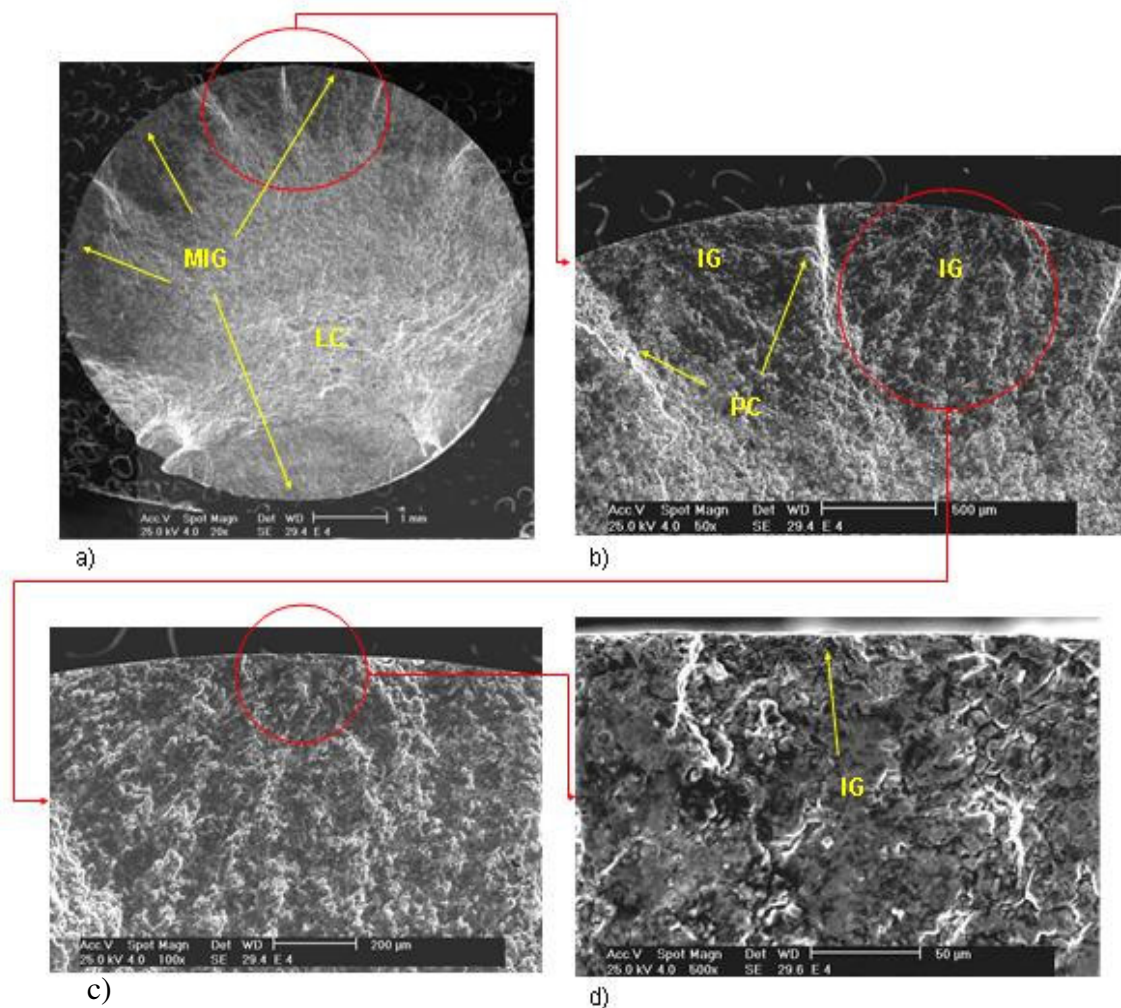


Figura 4.8 a) Vista general de la superficie de fractura de una probeta no recubierta ensayada en ambiente corrosivo a $S_f = 539$ MPa y $N_f = 144100$ ciclos. b), c) y d) Detalle de inicio de grieta en diferentes aumentos.

La figura anterior muestra las vistas general y en detalle de la superficie de fractura de una probeta no recubierta ensayada bajo ambiente corrosivo a un nivel de esfuerzo alternante de 539 MPa.

La figura 4.8.a señala la vista general de la superficie de fractura donde se pueden observar diferentes zonas de inicio de grietas, además de notarse varios planos de clivaje. También se observa que existe un mayor número de puntos de inicio de grietas en la parte superior de la superficie de fractura que en la parte inferior, produciendo que la propagación de grietas ocupe mayor parte del área

superior, haciendo que la zona de fractura o labio de corte se encuentre en la zona inferior de la superficie de fractura.

En las figuras 4.8.b-4.8.d se observan varias vistas ampliadas de un inicio de grieta y en particular en la figura 4.8.b se muestran planos de clivaje formados por los frentes de crecimiento de grieta que se propagan en diferentes direcciones y se encuentran uno con el otro.

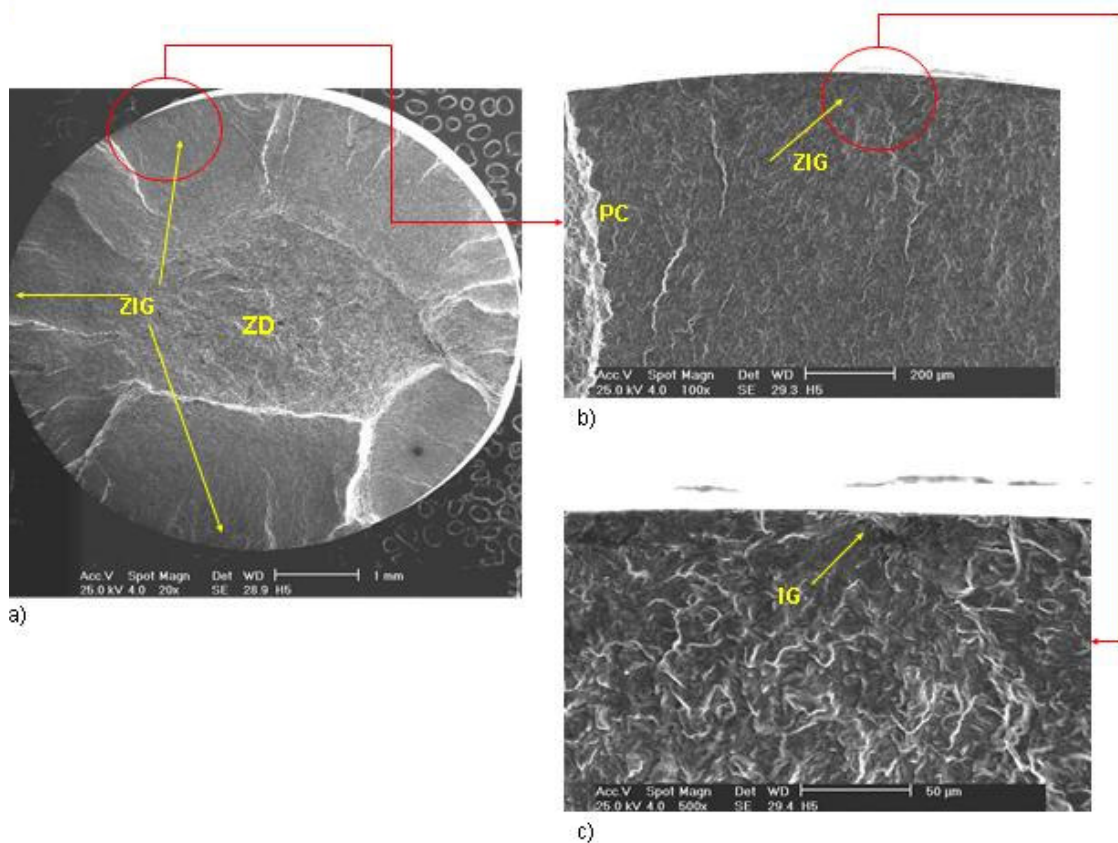


Figura 4.9 a) Vista general de la superficie de fractura de una probeta no recubierta ensayada en ambiente corrosivo a $S_f = 634 \text{ MPa}$ y $N_f = 60600$ ciclos. b) y c) detalle de inicio de grieta a diferentes aumentos.

De manera similar al caso anterior, la figura 4.9 presenta la superficie de fractura de otra probeta no recubierta, pero ensayada a 634 MPa. En la figura 4.9.a se muestran múltiples inicios de grietas y planos de clivaje alrededor de toda la periferia, lo cual indica que en estas condiciones de ensayo también se forman varias grietas, sin que alguna de ellas en especial sea la grieta dominante. Adicionalmente

se observa una zona de fractura final o labio de corte localizado hacia el centro de la superficie de fractura y de un mayor tamaño si se compara con la figura 4.8.a. En la figura 4.9.b se revela una zona de inicio de grieta a mayor aumento junto con la formación de un plano de clivaje adyacente. Finalmente, la figura 4.9.c ilustra en detalle el punto de inicio de la grieta de la figura 4.9.b.

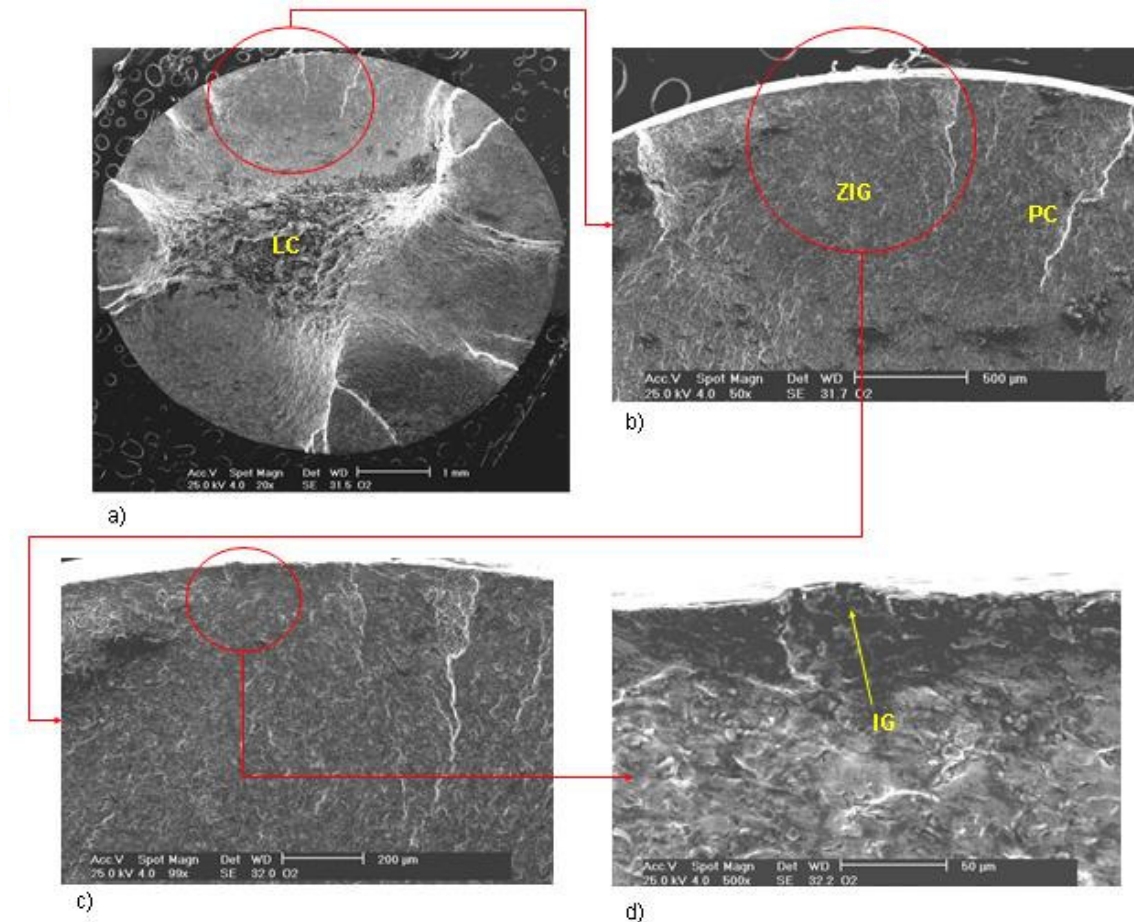


Figura 4.10 a) Vista general de la superficie de fractura de una probeta recubierta ensayada en ambiente corrosivo a $S_f = 539 \text{ MPa}$ y $N_f = 137100$ ciclos. b) y c) detalle de inicio de grieta a diferentes aumentos.

A partir de la figura 4.10 se observa la influencia del ambiente corrosivo en la superficie de fractura de una probeta recubierta ensayada a 539 MPa, en la cual se pueden notar las características siguientes: presencia de diferentes inicios de grietas,

formación de planos de clivaje, aumento en proporción de la zona de fractura final o labio de corte.

En la figura 4.10.a se observa la presencia de escalonamientos lo cual hace ver que hubo una formación de múltiples grietas en diferentes zonas, formando los conocidos planos de clivaje. Seguidamente en la figura 4.10.b, se hace un aumento de una de las zonas de inicio de tales grietas para mostrar con mayor detalle donde posiblemente se origina la misma. Aquí se puede observar también un plano de clivaje en la adyacencia de la zona de inicio de la grieta. En la figura 4.10.c, se observa un detalle tomado de la figura anterior mostrando el origen de la grieta anterior a mayor aumento. De igual manera, se observa en la figura 4.10.d, el punto de inicio de la grieta. En general también se evidencian unas ciertas zonas oscuras que reflejan el daño ocasionado por la acción corrosiva.

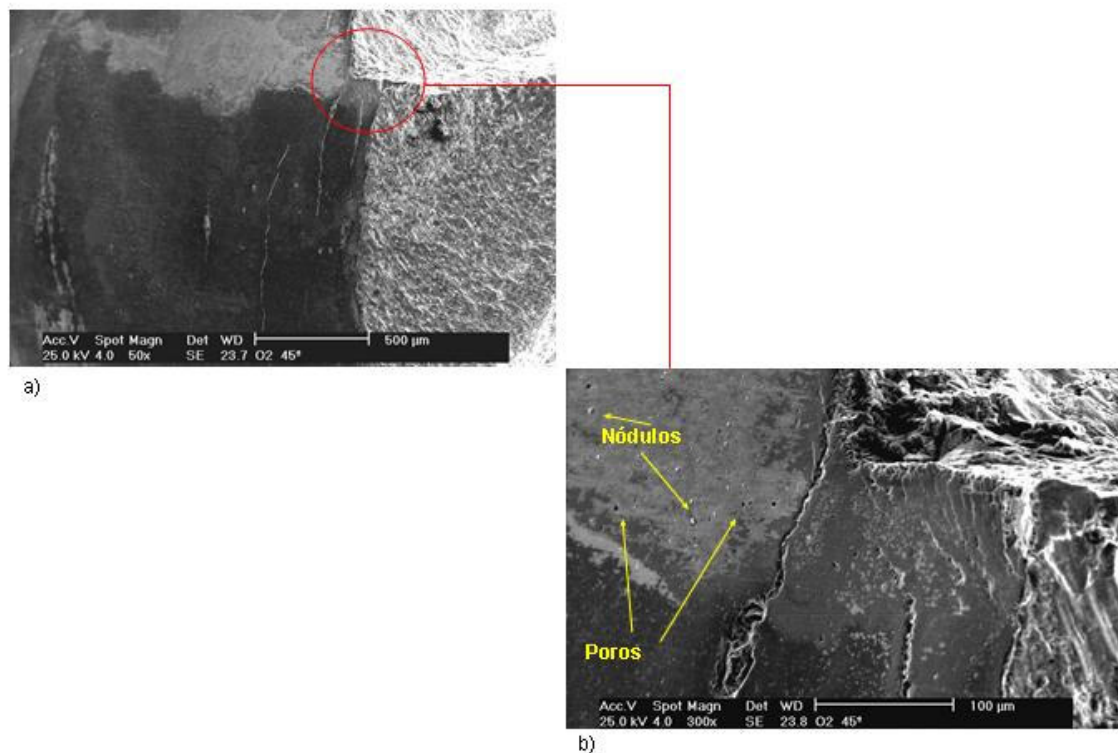


Figura 4.11 a) Vista a 45° de una probeta recubierta ensayada en ambiente corrosivo a $S_f = 539\text{MPa}$ y $N_f = 137100$ ciclos. b) Detalle de escalonamiento.

La figura 4.11 describe una vista tomada a un ángulo de incidencia de 45°, de una probeta recubierta ensayada en ambiente corrosivo a 539 MPa, en la cual se nota, en la figura 4.11.a, la formación de un escalón, presentando también algunas grietas circunferenciales. En la figura 4.11.b, se detalla el escalón antes mencionado, ocasionado por los diferentes frentes de grietas que originan planos de clivaje. También se observa la presencia de nódulos y algunos poros presentes en la pared lateral del recubrimiento.

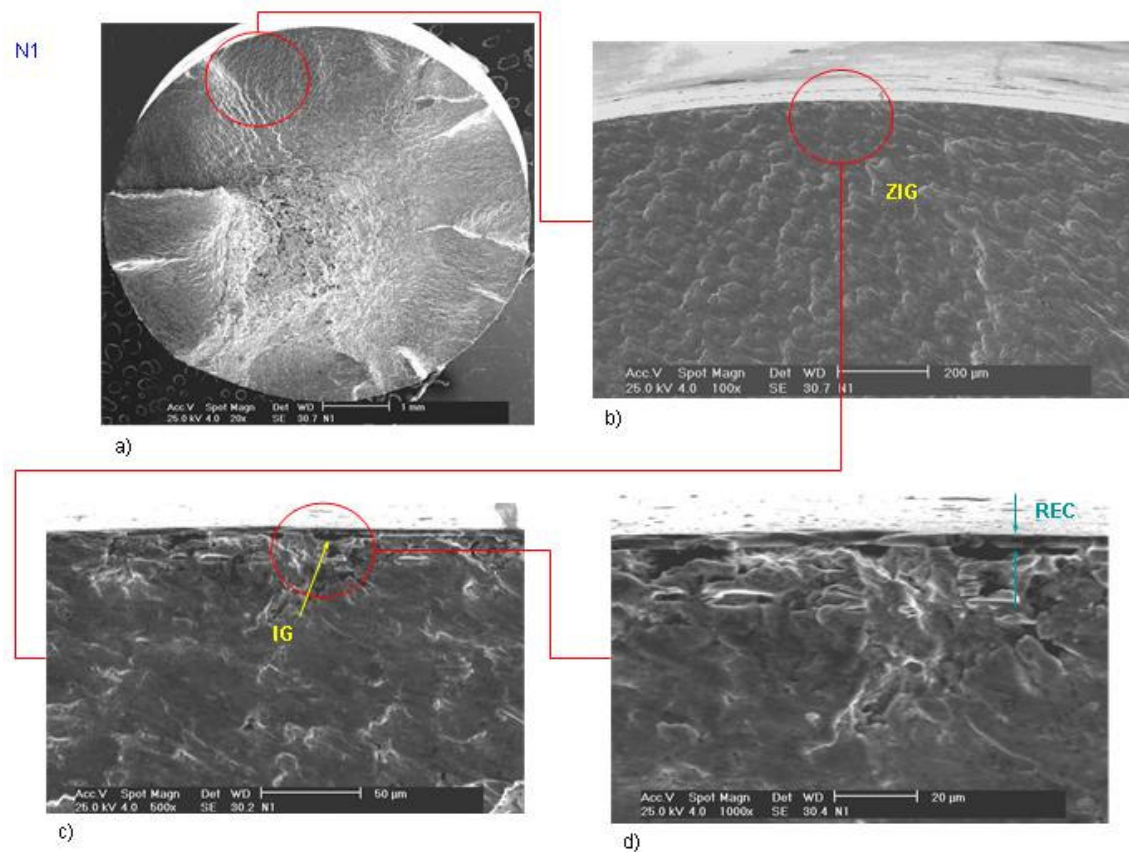


Figura 4.12 a) Vista general de la superficie de fractura de una probeta recubierta ensayada en ambiente corrosivo a $S_f = 634$ MPa y $N_f = 69500$ ciclos. b) y c) Detalle de inicio de grieta a diferentes aumentos. d) Detalle de inicio de grieta a mayor aumento, se puede apreciar el espesor del recubrimiento.

La figura 4.12. corresponde a otra probeta recubierta ensayada en ambiente corrosivo a 534 MPa. En la figura 4.12.a se presenta una vista de la superficie de

fractura, indicando los planos de clivaje y múltiples inicios de grieta, así como la zona de fractura por sobrecarga, la cual posee mayor tamaño en comparación con la probeta ensayada a un menor esfuerzo. En la figura 4.12.b se puede ver el detalle de una de las zonas de inicio de grieta y también es posible notar la presencia de grietas circunferenciales y lo que pudieran ser productos de corrosión. Seguidamente en la figura 4.12.c se destaca a un mayor aumento dicho punto de inicio, mientras que en la figura 4.12.d muestra como la solución salina a través de su acción corrosiva ha penetrado la intercara substrato-recubrimiento, generando un daño claramente visible. Adicionalmente, se observa el espesor del recubrimiento.

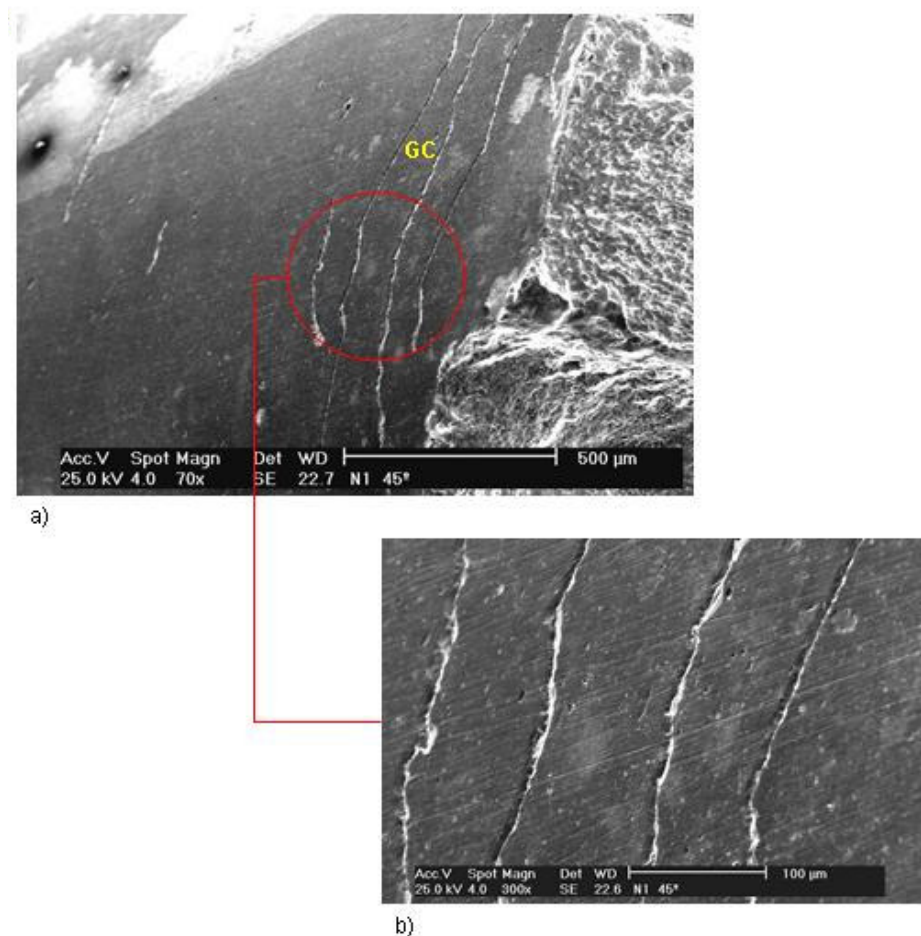


Figura 4.13 a) Vista a 45° de una probeta recubierta ensayada en ambiente corrosivo a $S_f = 634$ MPa y $N_f = 69500$ ciclos. b) Detalle de grietas circunferenciales.

Para la probeta recubierta ensayada en ambiente corrosivo a 634 MPa que se observa en la figura 4.13 se aprecian una mayor cantidad de grietas circunferenciales que en el caso de la probeta ensayada a un nivel de esfuerzos menor. Dichas grietas se encuentran cerca de lo que parece ser un plano de clivaje. Además hay presencia de zonas oscuras que evidencian el daño por corrosión.

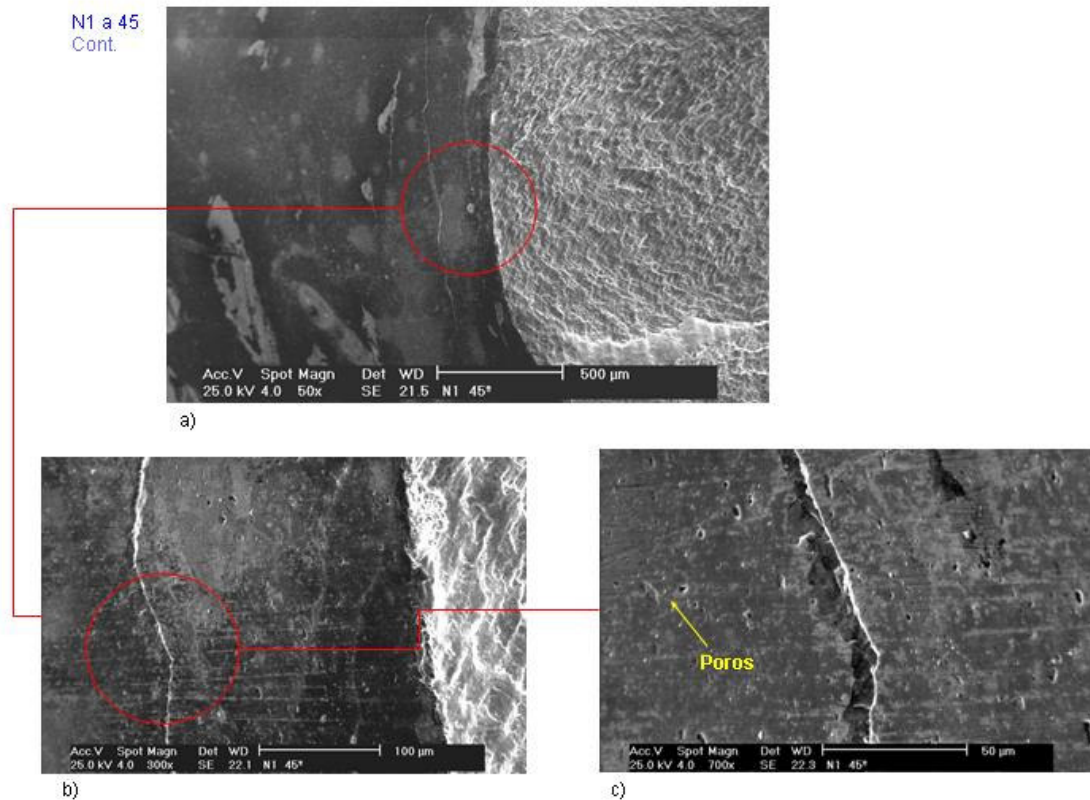


Figura 4.14 a) Vista a 45° de origen de grieta de una probeta recubierta ensayada en ambiente corrosivo a $S_f = 634 \text{ MPa}$ y $N_f = 69500$ ciclos. b) Detalle de inicio y grieta circunferencial. c) Detalle de grieta circunferencial.

En la figura 4.14 se muestra la misma probeta de la figura 4.13, pero en este caso se detalla el punto de inicio de la grieta y un detalle de una grieta circunferencial con una desviación ligera en su dirección paralela a la superficie de fractura.

4.2. CORTES LONGITUDINALES DE LAS PROBETAS DE FATIGA

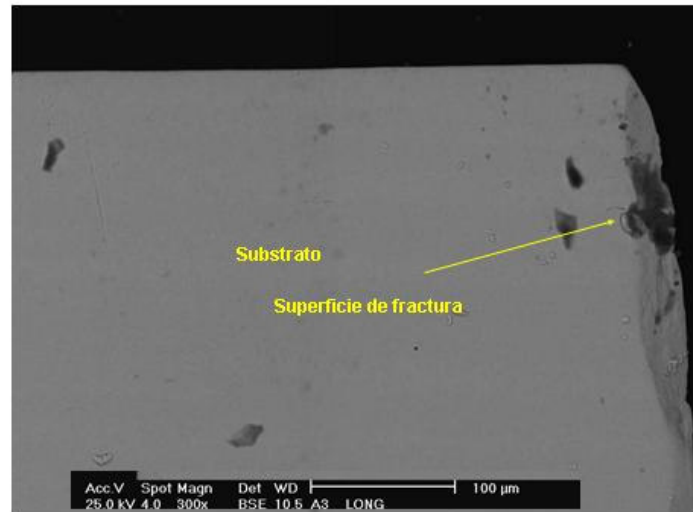


Figura 4.15 Vista de sección longitudinal de una probeta no recubierta ensayada al aire a $S_f = 539$ MPa y $N_f = 581700$ ciclos.

La figura 4.15 presenta un corte longitudinal de una probeta no recubierta ensayada al aire a 539 MPa, ilustrando la zona cercana a la superficie de fractura, donde se pueden observar ciertas cavidades presentes en el sustrato.

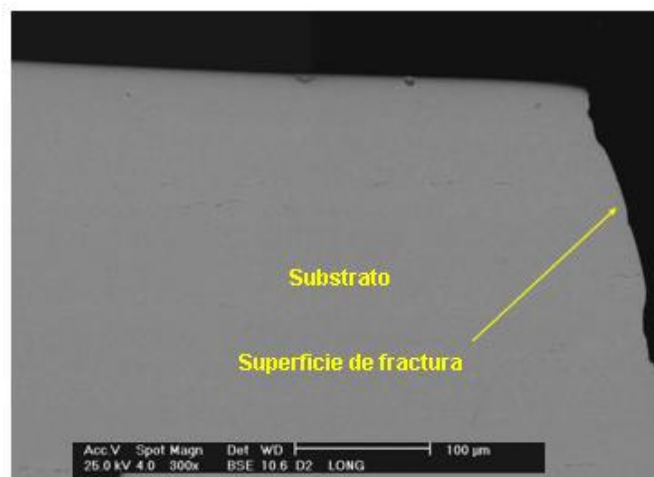


Figura 4.16 Vista de sección longitudinal de una probeta no recubierta ensayada al aire a $S_f = 634$ MPa y $N_f = 91500$ ciclos.

La figura 4.16 muestra varias cavidades presentes en la cercanía de la superficie lateral (indicada por el borde superior de la figura) de una probeta no recubierta ensayada al aire a 634 MPa.

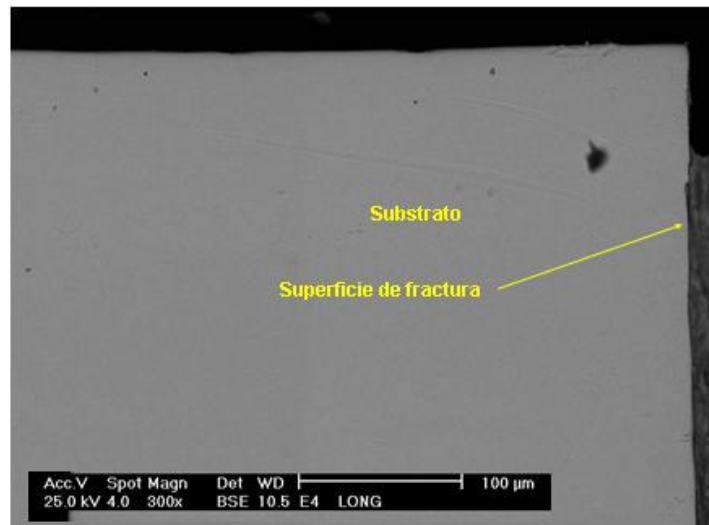


Figura 4.17 *Vista de sección longitudinal de una probeta no recubierta ensayada en ambiente corrosivo a $S_f = 539$ MPa y $N_f = 144100$ ciclos.*

La figura 4.17 presenta otro corte longitudinal realizado a una probeta no recubierta ensayada en medio corrosivo a 539 MPa, indicando una mayor presencia de cavidades y una superficie longitudinal irregular representada por el borde superior de la figura.

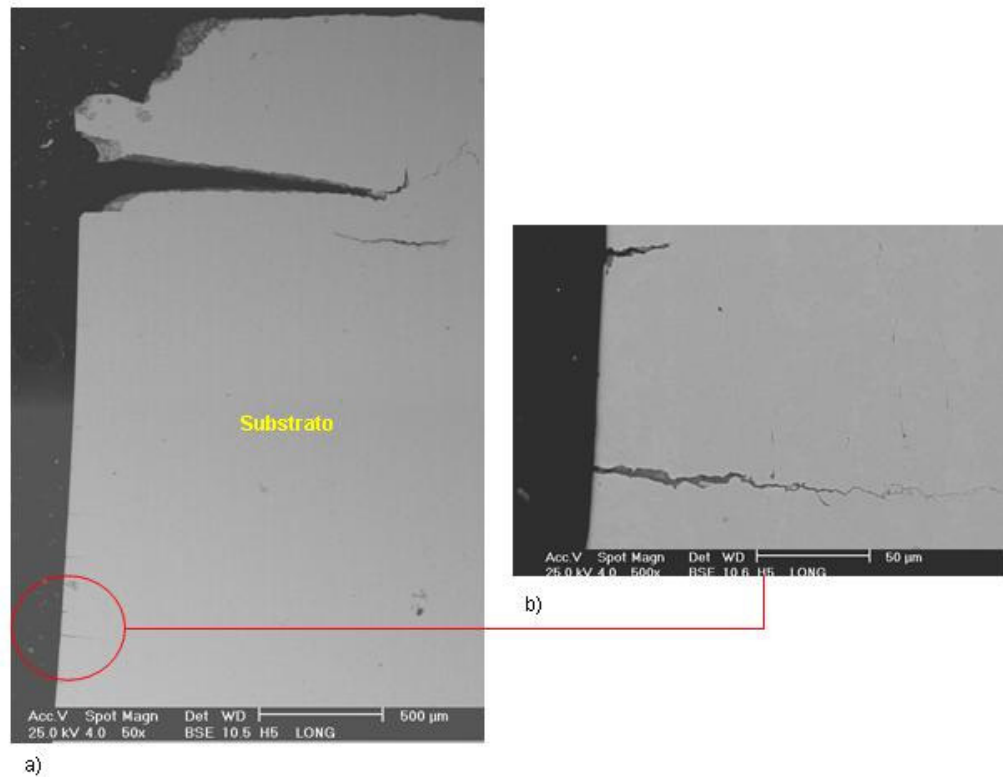


Figura 4.18 a) *Vista de sección longitudinal de una probeta no recubierta ensayada en ambiente corrosivo a $S_f = 634$ MPa y $N_f = 60600$ ciclos.* b) *Detalle de grietas.*

En la figura 4.18 se describe la superficie longitudinal de una probeta no recubierta ensayada en ambiente corrosivo a 634 MPa, en donde es posible observar la aparición de grietas que comienzan en la superficie lateral y se propagan hacia el interior del substrato. En 4.18.b se hace una ampliación de una zona alejada de la superficie de fractura en la cual también se percibe el crecimiento de grietas, con el mismo comportamiento señalado anteriormente, en el sentido de su crecimiento desde la superficie lateral de la probeta hacia el interior del substrato.

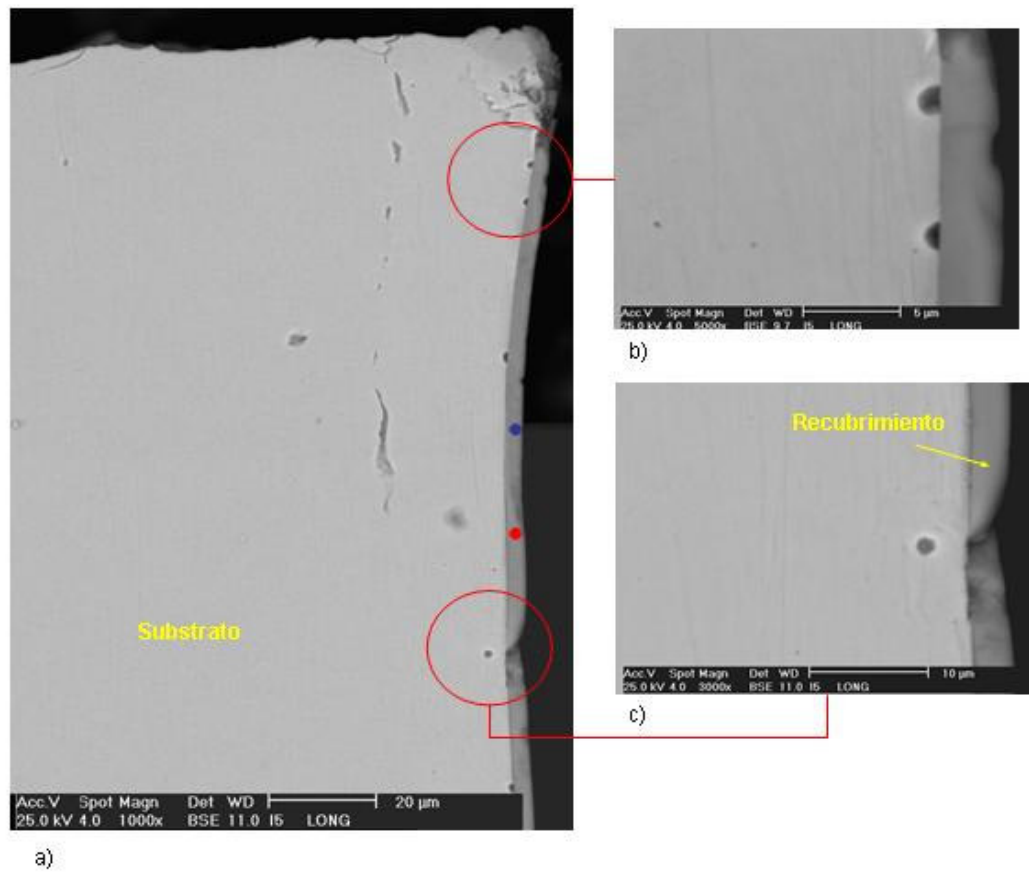


Figura 4.19 a) Vista de sección longitudinal de una probeta recubierta ensayada al aire a $S_f = 603$ MPa y $N_f = 455500$ ciclos. b) y c) Detalle de intercara substrato-recubrimiento.

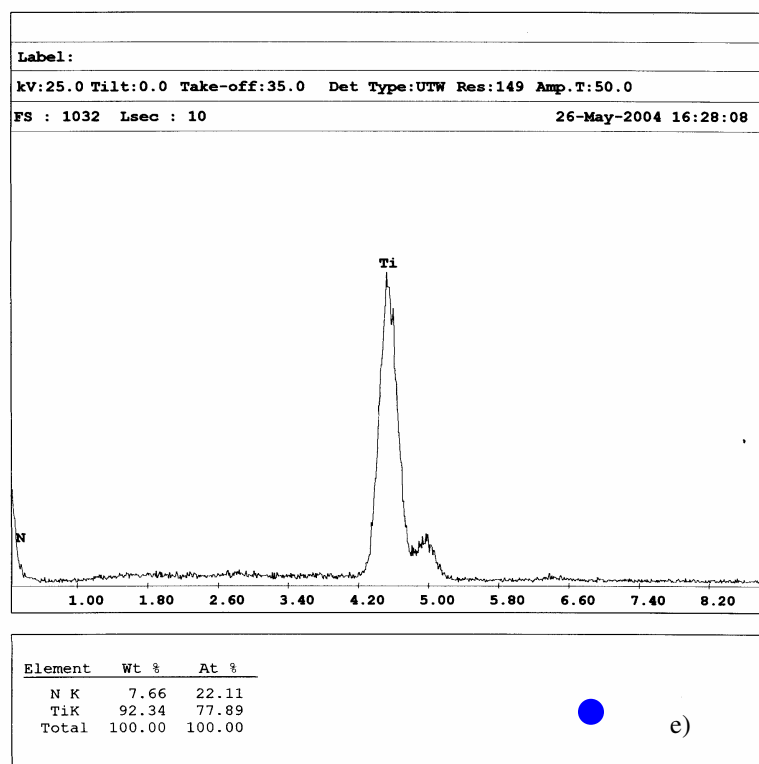
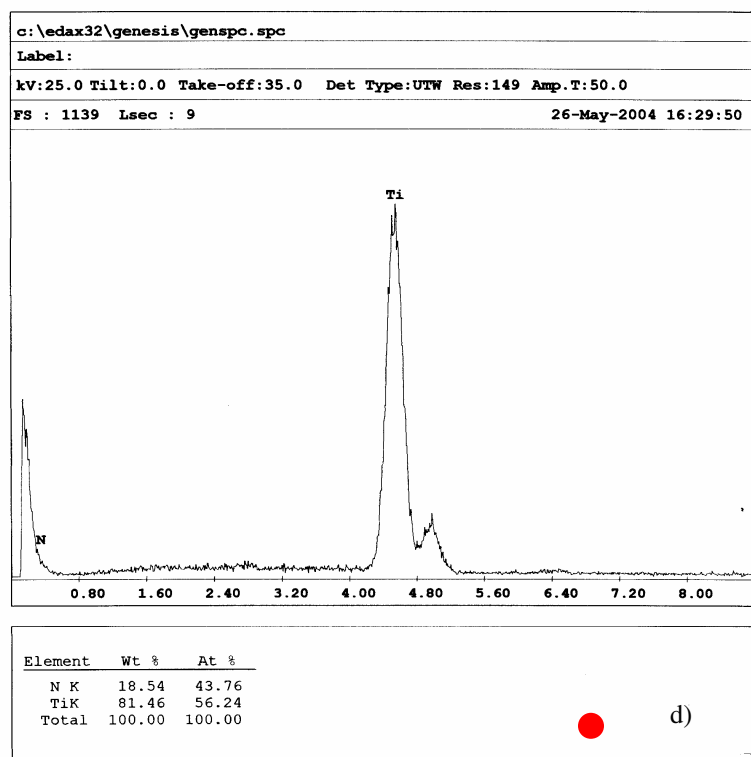


Figura 4.19 d) y e) Análisis de composición en el recubrimiento.

La figura 4.19 muestra el corte longitudinal de una probeta recubierta ensayada al aire a 603 MPa. En la misma se puede observar la intercara substrato-recubrimiento, ilustrando la presencia de ciertas cavidades en mayor cantidad que las presentes en las probetas sin recubrimiento. También se observa en la cercanía de la superficie de fractura mayor daño en el recubrimiento, notándose una superficie lateral abrupta. En la figura 4.19.b se detalla otra zona que muestra la intercara substrato-recubrimiento, donde se puede observar en mayor detalle la presencia de las cavidades que ya fueron señaladas anteriormente. En la figura 4.19.c se indica la misma característica anterior con la diferencia que la cavidad se encuentra alejada de la intercara, encontrándose en una porción más interna del substrato. Se observa también que el recubrimiento presenta una forma irregular en su superficie, aunque el mismo se encuentra completamente adherido al substrato. En la parte d) y e) se muestra el análisis de composición de los elementos presentes en el recubrimiento para dos puntos localizados en el mismo, los cuales están representados por los puntos de colores que se encuentran en la figura 4.19.a. Este análisis es un estudio de tipo cualitativo pues el mismo depende de la magnitud del haz de electrones que incide sobre esta zona.

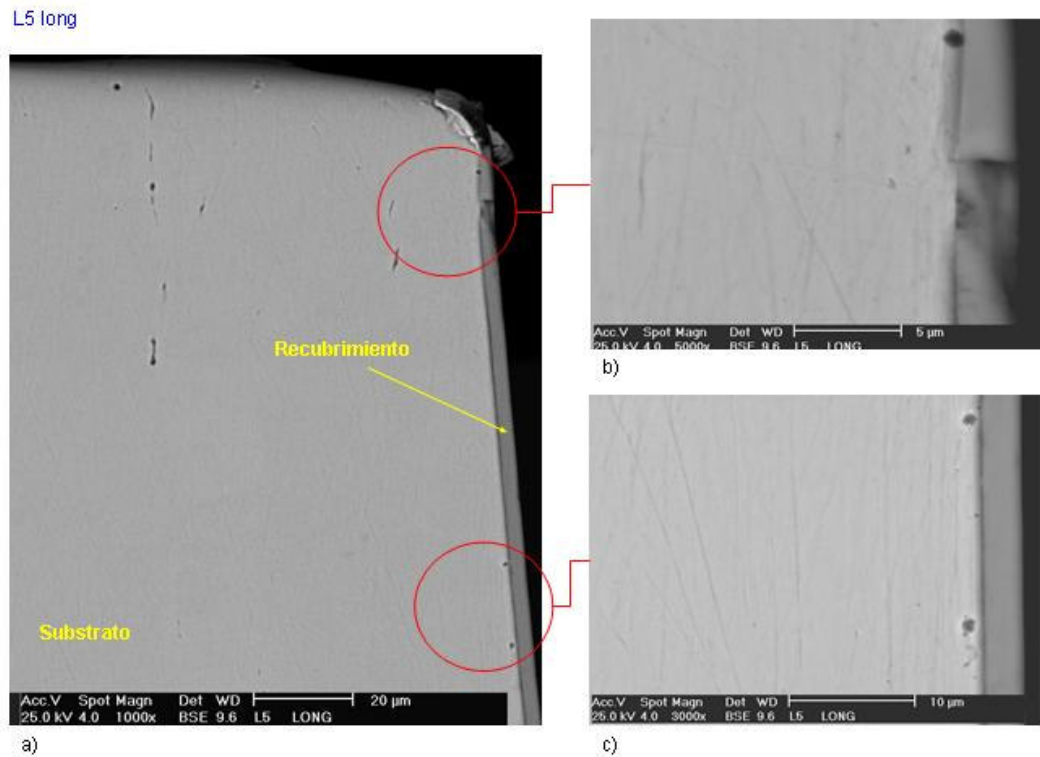


Figura 4.20 a) Vista de sección longitudinal de una probeta recubierta ensayada al aire a $S_f = 696$ MPa y $N_f = 82700$ ciclos. b) y c) Detalle de intercara substrato-recubrimiento.

La figura 4.20 presenta la superficie longitudinal de una probeta recubierta ensayada al aire a 696 MPa. Se observa la presencia de pocas cavidades en las cercanías de la intercara substrato-recubrimiento. El recubrimiento se mantiene bien adherido al substrato y su superficie se nota bastante uniforme. La parte b) muestra en detalle la intercara, donde se pueden observar claramente la fractura del recubrimiento y el avance de la grieta hacia el substrato.

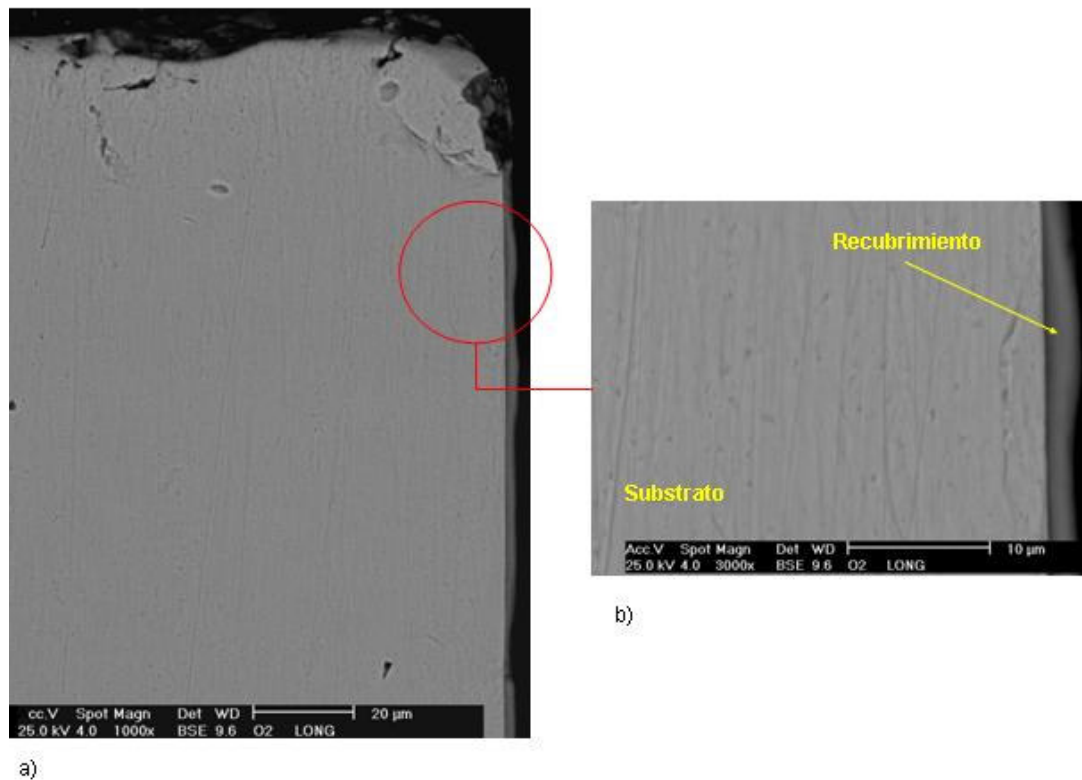


Figura 4.21 a) *Vista de sección longitudinal de una probeta recubierta ensayada en ambiente corrosivo a $S_f = 539$ MPa y $N_f = 137100$ ciclos.* b) *Detalle de intercara substrato-recubrimiento.*

En la figura 4.21 se presenta la superficie longitudinal de una probeta recubierta ensayada en ambiente corrosivo a 539 MPa. Se muestra que la superficie del recubrimiento está ligeramente afectada, indicándose este hecho por la forma irregular de la película. A pesar de ello el recubrimiento continúa adherido al substrato sin presentar desprendimiento o grietas en el plano de la intercara substrato recubrimiento.

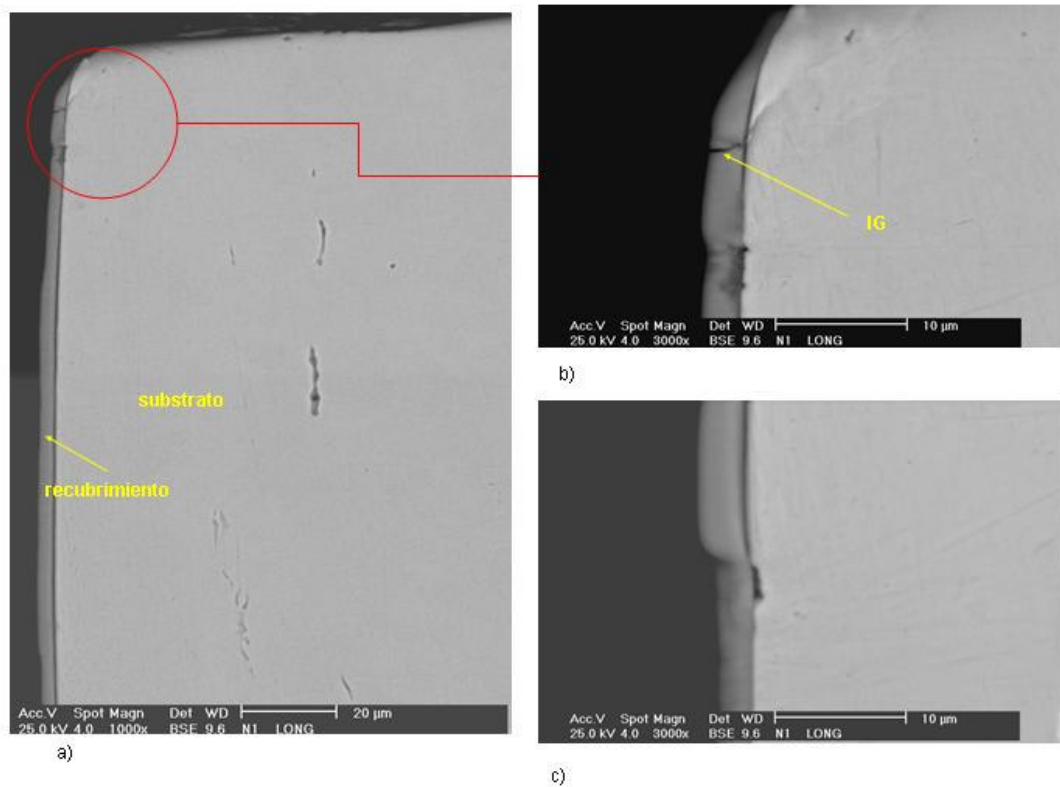


Figura 4.22 a) *Vista de sección longitudinal de una probeta recubierta ensayada en ambiente corrosivo a $S_f = 634$ MPa y $N_f = 69500$ ciclos.* b) *Detalle de inicio de grieta en el recubrimiento.* c) *Detalle de intercara substrato-recubrimiento.*

La figura 4.22 ilustra el corte longitudinal de una probeta recubierta ensayada en ambiente corrosivo a 634 MPa. En la misma se encuentran presente algunas cavidades en la intercara substrato-recubrimiento, además se observa en la figura 4.22.b un detalle del inicio de una grieta en el recubrimiento que se proyecta hacia el substrato, con un ligero cambio de dirección hacia la cercanía de la superficie de fractura. Se observa una cierta irregularidad en la superficie del recubrimiento y una posible disminución de laminación del mismo en la figura c).

4.3. CORTE TRANSVERSAL PROBETA DE TRACCIÓN

Tracción a 45°

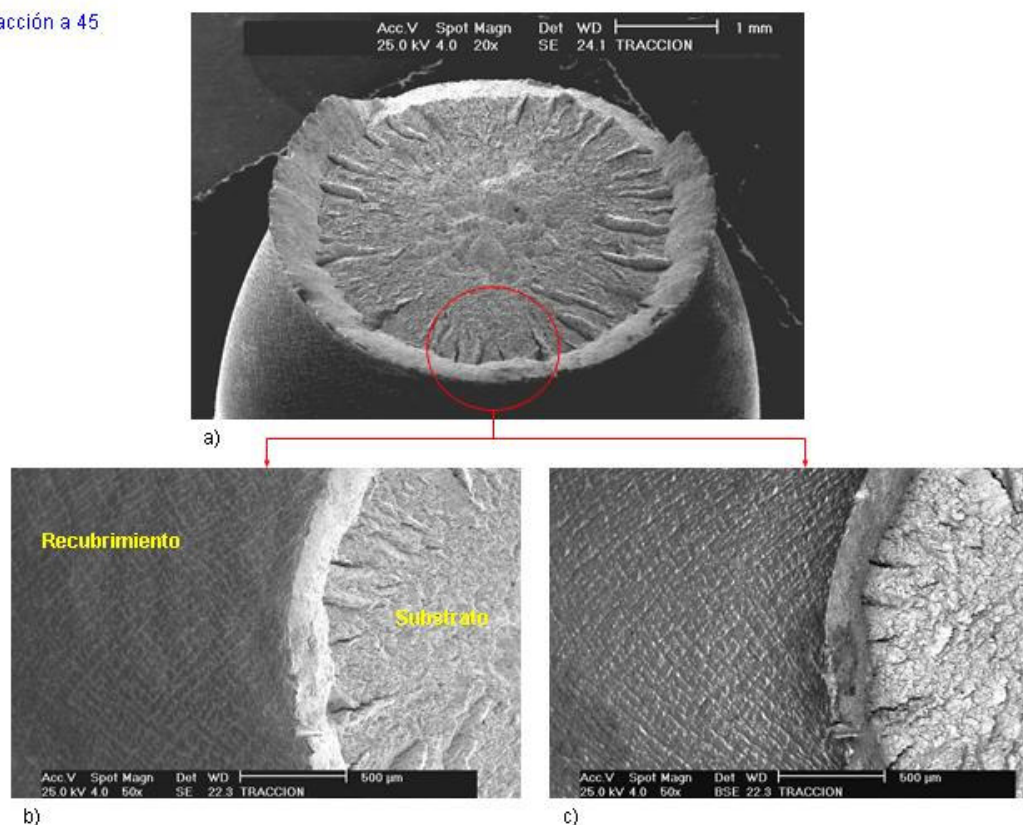


Figura 4.23 a) Vista a 45° de probeta de tracción recubierta. b) Detalle de superficie lateral en modo de imagen SE. c) Detalle de superficie lateral en modo de imagen BSE.

La figura 4.23 indica la superficie lateral de una probeta recubierta ensayada a tracción, con un ángulo de incidencia de 45°. Se muestra la superficie de rotura con una notable disminución del área de la sección transversal. La figura b) representa un aumento de una zona de la probeta en modo de imagen SE, mientras que en la figura c) se representa la misma zona en modo de imagen BSE. En ambas ampliaciones se observa en el recubrimiento una superficie en forma de tejido entrelazado lo cual sugiere la deformación plástica pronunciada del conjunto.

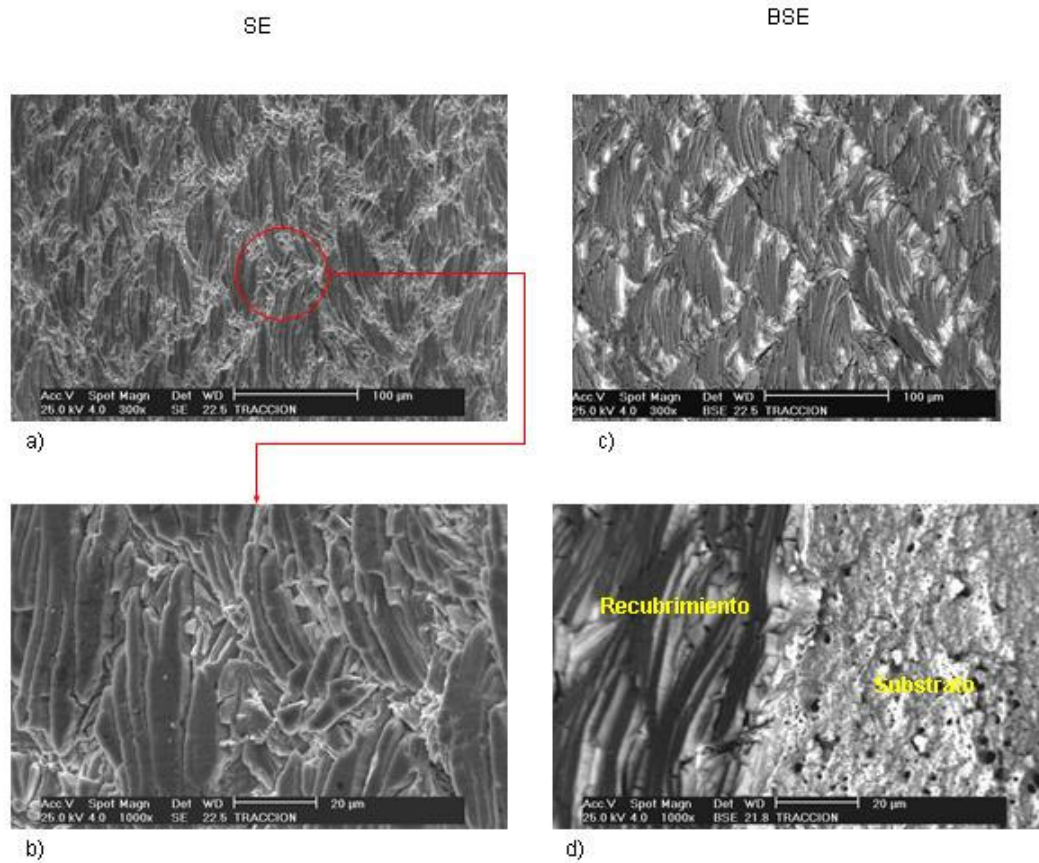


Figura 4.24 a) Ampliación de una zona observada a 45° de la probeta de tracción recubierta en modo de imagen SE. b) Detalle de “a”. c) Ampliación de una zona observada a 45° de la probeta de tracción recubierta en modo de imagen BSE. d) Detalle de intercara Substrato-recubrimiento cercano a la zona de rotura.

En la figura 4.24.a se muestra la ampliación de una zona observada a 45° de la probeta de tracción recubierta en modo de imagen SE, mostrándose un detalle de esta zona en la figura b), donde se puede apreciar la microestructura columnar del recubrimiento adherido completamente al sustrato. Además se puede observar esta misma zona en modo de imagen BSE en la figura c). Por último, se presenta un detalle de la intercara sustrato-recubrimiento cercano a la zona de rotura, mostrándose la deformación del mismo y la adherencia al sustrato, lo que produce la forma de tejido que se indicó anteriormente.

4.4. VISTA DE HUELLA DE CALOTEST

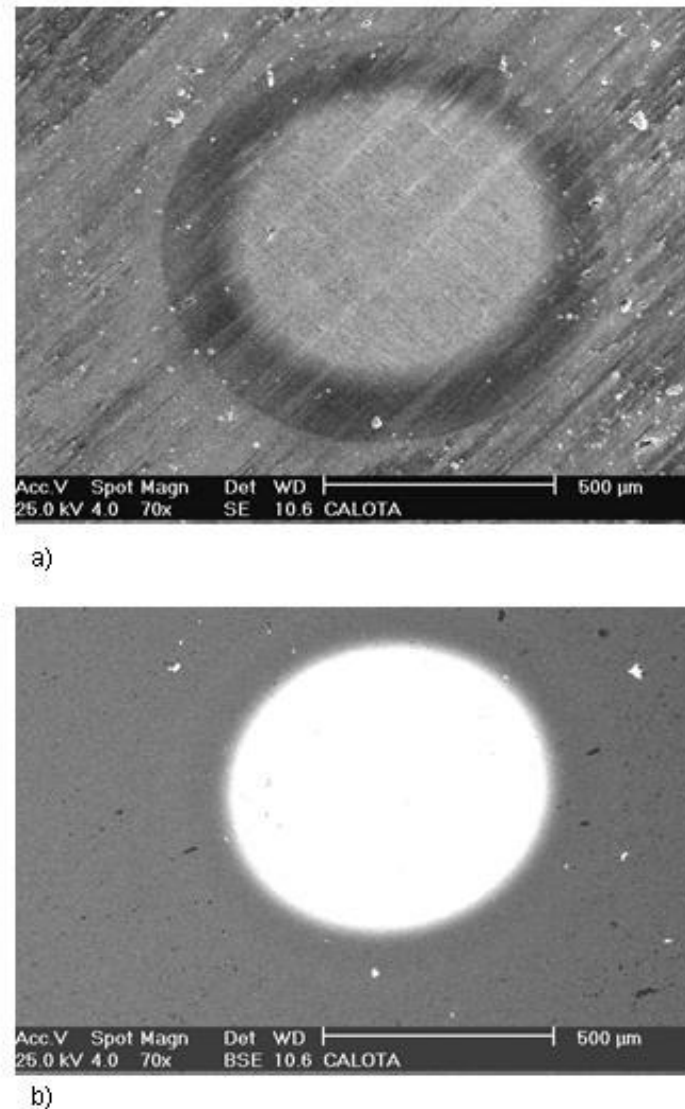


Figura 4.25 a) *observación en SE de huella de calotest.* b) *observación en BSE de huella de calotest.*

En la figura 4.25 se detalla la huella obtenida de la prueba de calotest realizada en una probeta de AISI D2 recubierta. En la figura 4.25.a, se observa una zona oscura que representa el espesor del recubrimiento en modo de imagen SE. En la parte b de la figura se realiza la misma fotomicrografía para el modo de imagen BSE, en el cual no se observa el espesor del mismo, lo que indica una composición uniforme del recubrimiento.

CONCLUSIONES

- La técnica de recubrimiento empleada proporciona una capa muy delgada de material que da lugar a un incremento en los valores de la rugosidad del sustrato, lo cual podría estar asociado a la presencia de glóbulos que pasaron a través de la trampa quedando luego en la película de recubrimiento. El incremento en rugosidad aritmética, con respecto a las muestras pulidas, fue de aproximadamente 83%.
- El proceso de deposición del recubrimiento no provoca ningún efecto sobre la dureza del sustrato de acero AISI D2, lo cual indica que la temperatura de deposición es inferior a la temperatura de revenido de dicho acero.
- Por el contrario, las propiedades mecánicas del acero AISI 4340 se vieron notablemente modificadas por el proceso de deposición al cual fue sometido, pudiéndose determinar un incremento del 10.5% en el esfuerzo de fluencia, y una disminución 12% en esfuerzo real a carga máxima. Se cree que el incremento en el esfuerzo de fluencia es debido a la resistencia mecánica misma de la película depositada, pero la disminución en el esfuerzo real a carga máxima sugiere que la temperatura de deposición de la película es superior a la temperatura de revenido del acero AISI 4340.
- El estudio realizado indicó una mejora en el comportamiento a la fatiga del AISI 4340 recubierto, presentándose incremento en la vida a fatiga en el intervalo de 135-175%. De igual forma, se observó un incremento en el límite de fatiga de 6% respecto al sustrato no recubierto. Dichos incrementos están asociados con el aumento del esfuerzo de fluencia del acero recubierto.
- En condiciones de fatiga corrosión, el acero AISI 4340 recubierto mostró un incremento en la vida a fatiga corrosión al compararse con el sustrato sin recubrimiento de 25-0% para una variación de esfuerzo entre 696-539 MPa respectivamente. Esto afirma que el recubrimiento no proporciona ventajas

al sustrato para niveles bajos de esfuerzos por lo tanto no es adecuado para mejorar las propiedades de resistencia a la fatiga corrosión del material.

- El estudio fractográfico de las superficies de fractura de las probetas ensayadas de AISI 4340 recubiertas mostró que el recubrimiento, aún en las peores condiciones de sollicitación en fatiga, se mantuvo adherido al sustrato. Adicionalmente se pudo observar que el recubrimiento, lejos de desprenderse, más bien mostró una capacidad de adherencia elevada aún por la deformación impuesta por el sustrato en los ensayos de tracción. Solo se observó fallas en el recubrimiento de tipo cohesivas debido a la naturaleza frágil del mismo.

RECOMENDACIONES

- Realizar un estudio de las propiedades tribológicas del conjunto substrato-recubrimiento, para determinar la influencia del recubrimiento en el comportamiento del acero bajo las condiciones de abrasión y desgaste.
- Realizar el estudio del conjunto bajo otras modalidades de fatiga, como lo es la fatiga por flexión plana y fatiga por carga axial, de manera de poder evaluar las características del recubrimiento para otras condiciones de fatiga.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Forrest, P.G., “Fatiga de los metales”; Ediciones URMO, pp 24, 227, España. 1972.
2. Thornton, P; Colangelo, V. “Ciencia de materiales para ingeniería”; pp 262, 307-335, Prentice Hall Iberoamericana Mexico, 1987.
3. Dieter, G.E.; “Metalúrgica Mecánica”; Mac Graw-Hill: pp 253-267, 316-355, 476-479. 1986.
4. Metals Handbook, 1948 ed., American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1948, p. 118.
5. Orowan, E.; “Proc. Roy. Soc. ”; vol. 171A, p. 79-106, Londres, 1939.
6. Wood, W. “ Bull. Inst. Metals.” Vol. 3 p.5-6, 1955.
7. A.H. Cottrell y D. Hull: “Proc.Roy.Soc”. (Londres), vol. 242A pp. 211-13, 1957.
8. N.F. Mott: “Acta Met”., vol , pp.195-97, 1958
9. Metal Handbook, “Fatigue Testing”; Mechanical Testing, vol 8, pp 363-378.
10. V. J. Colangelo, F. A. Heiser; “Analysis of Metallurgical failures”, John Wiley & Sons, Inc., USA, 1974.
11. Uhlig, H., “Corrosión y control de corrosión”. Ediciones URMO, España. 1963.
12. Askeland, D. R., “Ciencia e ingeniería de los materiales”. Grupo editorial Internatinal Thomson Editores, México. 1998.
13. J. A. Collins; “Failure of materials in mechanical desing, analysis predition prevention”, John Wiley & Sons. Inc., USA, 1981.
14. A. Paiva, F. Corsi; Tesis U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica (2003).
15. CNEA, CAC, JICA, “Procesamiento de Materiales por Plasma”; cuarto curso Latinoamericano; pp 1-18, 105-119, Argentina, 2001.
16. M. Groover; “Fundamentos de Manufactura Moderna”, Prentice-Hall, pp 828-831, México. 1997.
17. Flinn, R. A.; Trojan, P. K., “Materiales de ingeniería y sus aplicaciones”. Editorial Mc Graw-Hill. Bogotá. 1989, pp. 245,246.
18. Metals Handbook, American Society for Metals, Carbon and Low-Alloy Steels, Tomo 1, pp. 432-434.
19. S. Kalpakjian, S. Schmid; “Manufactura, ingeniería y tecnología”; Prentice-Hall editores, cuarta edición, pp 580-582, Mexico, 2002.
20. J.A. Berrios, D.G. Teer, E.S. Puchi-Cabrera (2001), “Fatigue properties of a 316L stainless steel coated with different TiN_x deposits”.
21. J.A. Berríos-Ortiz, J.G. La Barbera-Sosa, D.G. Teer, E.S. Puchi-Cabrera (2003), “Fatigue properties of a 316L stainless steel coated with different ZrN deposits”.
22. Herrera, Martínez; Tesis U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica (2001).

REFERENCIAS DE INTERNET

- <http://www.baltzer.com>
- <http://www.advanced.coating.com>
- <http://www.metalforming.magazine.com>
- <http://www.cemecon.com>
- <http://www.northeast.coatingtechnologies.com>
- <http://www.efunda.com.processes/surface>
- <http://www.eurotools.vr.it/caratteristiche/>
- <http://www.ferrum-ca.com>