

**RESISTENCIA A FATIGA EN MATERIALES COMPUESTOS  
CONSIDERANDO DEGRADACIÓN HIGROTÉRMICA**

por

Ruth Esther Román Batista

Tesis sometida en cumplimiento parcial de los requisitos para el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS

en

INGENIERÍA CIVIL

UNIVERSIDAD DE PUERTO RICO

RECINTO UNIVERSITARIO DE MAYAGÜEZ

Diciembre 2009

Aprobada por:

\_\_\_\_\_  
Felipe J. Acosta, Ph.D.  
Presidente, Comité Graduado

\_\_\_\_\_  
Fecha

\_\_\_\_\_  
Luis A. Godoy, Ph.D.  
Miembro, Comité Graduado

\_\_\_\_\_  
Fecha

\_\_\_\_\_  
Miguel A. Pando, Ph.D.  
Miembro, Comité Graduado

\_\_\_\_\_  
Fecha

\_\_\_\_\_  
David Serrano, Sc.D.  
Representante de Estudios Graduados

\_\_\_\_\_  
Fecha

\_\_\_\_\_  
Ismael Pagán, M.Sc.  
Director del Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura

\_\_\_\_\_  
Fecha

# ABSTRACT

---

Fiber-reinforced polymer composites (FRP) constitute an attractive alternative in the construction industry to conventional materials such as steel and concrete. However, understanding of the influence of environmental conditions in their long-term mechanical behavior is of vital importance to ensure their implementation. The main objective of this thesis is to assess the effect of hygrothermal exposure on the fatigue performance of glass/vinyl-ester composites. Two types of laminates (unidirectional and cross-ply) and vinyl-ester neat resin are investigated. The specimens are immersed in distilled water at 40°C [104°F] for periods of times ranging from 50 hours to 500 days. Fatigue tests are performed at a stress ratio ( $R$ ) of 0.1 and a frequency of 5 Hz. Three stress levels are evaluated: 70%, 50% and 30% of the unaged ultimate tensile strength. Using Epaarachchi and Clausen methodology, a fatigue life prediction model is proposed that incorporates the hygrothermal conditioning effect on the fatigue life. The aging specimens show a decrease in fatigue life compared to the as-received specimens. The higher fatigue life degradation occurred in the unidirectional laminate samples. Fatigue life time predictions of vinyl-ester neat resin samples based on exposure time show a better correlation than the results based on moisture absorption. In the case of laminate specimens, both approaches show good correspondence with experimental results.

# RESUMEN

---

Los materiales compuestos fibro-reforzados se presentan como una atractiva alternativa para la construcción frente a materiales tradicionales como acero y hormigón. Sin embargo, su uso aún es limitado y el entendimiento de su comportamiento a largo plazo bajo la exposición a condiciones ambientales es de vital importancia para posibilitar su aplicación. Esta tesis presenta la evaluación de los efectos de la exposición higrotérmica en la resistencia a fatiga en los compuestos de fibra de vidrio y resina viniléster. Se estudian dos laminados, con refuerzo unidireccional y bidireccional y una resina viniléster sin refuerzo. El acondicionamiento ambiental consiste en la sumersión en agua destilada a una temperatura de 40°C [104°F] por periodos de 50 a 500 días aproximadamente. Los ensayos a fatiga se realizan utilizando un índice de reversión ( $R$ ) de 0.10, una frecuencia de 5 Hz y se ensayan tres niveles de esfuerzos: 70%, 50% y 30% del esfuerzo último a tensión del material sin añejar. Se propone una metodología de predicción basada en un modelo desarrollado por Epaarachchi y Clausen, establecida a partir del análisis de los resultados experimentales y que integra los efectos del condicionamiento higrotérmico en base a porcentaje de absorción de humedad y tiempo de exposición. Los resultados del ensayo de vida a fatiga de los especímenes envejecidos presentan una disminución respecto a los especímenes de control, mostrando la mayor degradación en las muestras de laminado unidireccional. Las predicciones del modelo propuesto en base al tiempo de exposición para las muestras de resina viniléster presentan una mejor correlación que los resultados en base al porcentaje de humedad. Mientras que en los laminados ambos enfoques muestran una buena correspondencia con los resultados experimentales.

# DEDICATORIA

---

A mi familia...

Mi madre Mélida

Mis hermanos Thelma, Laura, Nelly, David y Francisca

Mis sobrinos Daira, Melina, Cariany, Danna, Alicia y TJ

...por su amor y apoyo incondicional.

# AGRADECIMIENTOS

---

A Dios, por su fidelidad, por su gracia, por darme la vida y la fortaleza, porque con Él todo lo puedo.

Al Departamento de Defensa y la Universidad de Puerto Rico por el apoyo económico.

Al Instituto Politécnico y Universidad Estatal de Virginia por su colaboración en la realización de los materiales utilizados en este estudio.

Al Dr. Felipe Acosta por su orientación en el desarrollo de esta tesis y por su calidad humana.

A los miembros del comité graduado Dr. Miguel Pando y Dr. Luis Godoy por sus colaboraciones y sus contribuciones en la revisión del presente trabajo.

Al personal técnico y administrativo de Civil: Monse, Elvis, Jaime, Ruth, Myriam, Liz, Jessica, Daisy, Miguelón, Octavio e Iván por su disposición.

A los profesores que compartieron sus conocimientos y experiencia.

A mis hermanos de la Iglesia de Cristo en Isabela por hacerme parte de su familia.

A Paola por ser mi amiga y convertirse en mi familia más cercana.

A todos los amigos con los que pude compartir este camino, en especial a Vicky, Javier, César, Carolina, Juan Carlos, Mauricio T, Eimar, Mau, Francisco, Irene, Hebenly, Amelia, Norberto, Julissa, May, Raúl, Andrés, Calero, Majo, Meagan y José Roberto, por los momentos tan gratos que guardo en mi memoria.

A mi familia por su apoyo, sus oraciones y por hacerme sentir su amor a pesar de la distancia.

Y a todas las personas que de una u otra forma colaboraron en la realización de esta tesis, o que estuvieron siempre pendientes del progreso de esta investigación.

¡Gracias!

# TABLA DE CONTENIDO

---

ABSTRACT .....	ii
RESUMEN .....	iii
DEDICATORIA .....	iv
AGRADECIMIENTOS .....	v
TABLA DE CONTENIDO.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABLAS .....	xii
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Preliminares.....	1
1.2 Motivación .....	4
1.3 Objetivos .....	6
1.4 Contenido de la tesis .....	7
<b>CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA .....</b>	<b>9</b>
2.1 Introducción .....	9
2.2 Durabilidad en materiales fibro-reforzados.....	10
2.3 Fatiga en materiales fibro-reforzados.....	16
2.3.1 Introducción .....	16
2.3.2 Evaluación de vida a fatiga en materiales compuestos.....	18
2.3.3 Fatiga y exposición ambiental .....	21
2.3.4 Modelos de predicción del comportamiento a fatiga.....	27
2.4 Resumen.....	33
<b>CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES.....</b>	<b>34</b>
3.1 Introducción .....	34
3.2 Preparación de los especímenes .....	35
3.2.1 Constituyentes.....	35
3.2.2 Proceso de manufactura .....	35
3.3 Caracterización de las propiedades físicas.....	37
3.3.1 Densidad .....	38
3.3.2 Fracción de volumen de constituyentes .....	39
3.4 Caracterización de las propiedades mecánicas.....	40
3.5 Resultados experimentales .....	42
3.5.1 Densidad y fracción de volumen de los constituyentes .....	42
3.5.2 Ensayo de tensión longitudinal .....	45

<b>CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DE FATIGA Y HUMEDAD.....</b>	<b>50</b>
4.1	Introducción ..... 50
4.2	Exposición higrotérmica ..... 51
4.2.1	Preparación y condicionamiento de los especímenes ..... 51
4.2.2	Absorción de humedad ..... 52
4.3	Metodología para la evaluación de la vida a fatiga ..... 53
4.4	Resultados experimentales ..... 57
4.4.1	Resina viniléster..... 58
4.4.1.1	Curvas tensión – vida a fatiga para resina viniléster..... 62
4.4.2	Compuesto bidireccional ..... 64
4.4.2.1	Curvas tensión – vida a fatiga para compuesto bidireccional..... 67
4.4.3	Compuesto unidireccional ..... 70
4.4.3.1	Curvas tensión – vida a fatiga para compuesto unidireccional..... 72
4.5	Micrografías electrónicas de rastreo ..... 75
<b>CAPÍTULO 5. ANÁLISIS EMPÍRICO.....</b>	<b>77</b>
5.1	Introducción ..... 77
5.2	Metodología de modelación ..... 79
5.2.1	Modelo empírico de Epaarachchi-Clausen (2003) ..... 79
5.2.2	Incorporación de los efectos del condicionamiento higrotérmico en el modelo de predicción de vida a fatiga ..... 81
5.3	Comparación del modelo con los datos experimentales ..... 85
5.3.1	Resina viniléster..... 86
5.3.2	Compuesto bidireccional ..... 91
5.3.3	Compuesto unidireccional ..... 96
<b>CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>101</b>
6.1	Resumen ..... 101
6.2	Conclusiones ..... 102
6.3	Recomendaciones para trabajos futuros ..... 105
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>106</b>
APÉNDICE A.	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE FATIGA..... 114
APÉNDICE B.	ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA)..... 121
APÉNDICE C.	MICOGRAFÍAS ELECTRÓNICAS DE RASTREO..... 131

# LISTA DE FIGURAS

---

Figura 1.1. Aplicaciones del <i>FRP</i> en infraestructuras civiles (Adaptado de López-Anido y Kharbari, 2000).....	3
Figura 1.2. (a) Perfiles de <i>FRP</i> fabricados por el proceso de pultrusión. (b) Sección híbrida de puente con vigas de <i>FRP</i> y losa de hormigón armado (Ponce, PR). ....	4
Figura 2.1. Evolución típica de una curva S-N desde su valor estático ( $\sigma_{ult}$ ) hasta el límite de fatiga ( $\sigma_{end}$ ). (Adaptado de Mayugo, 2003). ....	18
Figura 2.2. Mecanismos de daño por fatiga en compuestos unidireccionales bajo cargas cíclicas paralelas a la orientación de las fibras: (a) rotura de fibras, separación de la interfase (b) agrietamiento de la matriz (c) falla por cortante. (Adaptado de Talreja, 1981). ....	19
Figura 2.3. Curvas normalizadas de vida a fatiga para el compuesto según recibido y envejecido (Adaptado de McBagonluri <i>et al.</i> , 1999). ....	23
Figura 2.4. Diagrama S-N para los dos tipos de compuesto (Adaptado de Iqbal, 2001). ....	25
Figura 3.1. (a) Configuración del sistema de transferencia de resina al vacío (VARTM), ....	37
Figura 3.2. Muestras (a) antes y (b) después de la quema de la resina. ....	44
Figura 3.3. Especímenes después de falla por tensión (a) laminado (b) resina viniléster. ....	45
Figura 3.4. Esquema típico del diagrama esfuerzo-deformación en resina viniléster. ....	46
Figura 3.5. Diagramas esfuerzo- deformación de todas las muestras de resina viniléster. ....	47
Figura 3.6. Diagrama típico de deformación transversal-deformación longitudinal para determinación de la razón de Poisson. ....	48
Figura 3.7. Diagramas esfuerzo-deformación de todas las muestras de laminado. ....	49
Figura 4.1. Tanque para envejecimiento de todas las muestras. ....	52
Figura 4.2. Evolución típica de la carga cíclica. ....	54
Figura 4.3. (a) Configuración del equipo utilizado. (b) Espécimen listo para el ensayo. ....	56
Figura 4.4. Superficies de falla en especímenes de resina viniléster. ....	59
Figura 4.5. Muestras ensayadas de resina viniléster con falla en la parte ancha del espécimen. ....	60
Figura 4.6. Comparación de los resultados promedio de ganancia de humedad con los datos publicados por Obando-Fuertes (2009) para resina viniléster. ....	61
Figura 4.7. Curvas S-N para muestras de resina viniléster para distintos tiempos de envejecimiento. ....	63

Figura 4.8. Fallas en especímenes de compuesto bidireccional ensayados bajo cargas cíclicas. .....	65
Figura 4.9. Comparación de los resultados promedio de ganancia de humedad con los datos publicados por Obando-Fuertes (2009) para el compuesto bidireccional. ....	66
Figura 4.10. Comparación de las curvas S-N para muestras de control (sin condicionamiento) del compuesto bidireccional con la literatura. ....	68
Figura 4.11. Curvas S-N para muestras de compuesto bidireccional para distintos tiempos de exposición. ....	69
Figura 4.12. Fallas en especímenes de compuesto unidireccional.....	70
Figura 4.13. Comparación de los resultados promedio de ganancia de humedad con los datos publicados por Obando-Fuertes (2009) para el compuesto unidireccional. ....	72
Figura 4.14. Comparación de las curvas S-N para muestras de control del compuesto unidireccional con la literatura.....	73
Figura 4.15. Curvas S-N para muestras de compuesto unidireccional para distintos tiempos de envejecimiento. ....	74
Figura 4.16. Micrografía <i>SEM</i> de la superficie de falla en un espécimen de laminado bidireccional de control ensayado a un nivel de esfuerzo de 30% $\sigma_{ult}$ : (a) sección perpendicular a las fibras, (b) sección paralela a las fibras.....	75
Figura 4.17. Micrografía <i>SEM</i> de la superficie de falla en especímenes de laminado bidireccional envejecidos durante 100 días ensayado a un nivel de esfuerzo de 30% $\sigma_{ult}$ : (a) sección perpendicular a las fibras, (b) sección paralela a las fibras. ....	76
Figura 4.18. Micrografía <i>SEM</i> de la superficie de falla en especímenes de laminado bidireccional envejecidos durante 504 días ensayado a un nivel de esfuerzo de 50% $\sigma_{ult}$ : (a) y (b) sección perpendicular a las fibras. ....	76
Figura 5.1. Estimación de los parámetros $\alpha$ y $\beta$ para los resultados de los especímenes de laminado unidireccional envejecidos durante 110 días. ....	81
Figura 5.2. Variación del parámetro de ajuste $\beta$ para muestras de resina viniléster (a) en función del tiempo de exposición higrotérmica y (b) en función del porcentaje de humedad.....	83
Figura 5.3. Comparación de los resultados experimentales con el modelo analítico para los especímenes de control de resina viniléster. ....	86
Figura 5.4. Comparación de los resultados experimentales con el modelo analítico para los especímenes de resina viniléster envejecidos durante 68 días.....	87
Figura 5.5. Comparación de los resultados experimentales con el modelo analítico para los especímenes de resina viniléster envejecidos durante 122 días.....	88
Figura 5.6. Comparación de los resultados experimentales con el modelo analítico para los especímenes de resina viniléster envejecidos durante 215 días.....	89
Figura 5.7. Comparación de los resultados experimentales con el modelo analítico para los especímenes de resina viniléster envejecidos durante 509 días.....	90

Figura 5.8. Comparación de los resultados experimentales con el modelo analítico para los especímenes de control del compuesto bidireccional. ....	91
Figura 5.9. Comparación de los resultados experimentales con el modelo analítico para los especímenes del compuesto bidireccional envejecidos durante 60 días. ....	92
Figura 5.10. Comparación de los resultados experimentales con el modelo analítico para los especímenes del compuesto bidireccional envejecidos durante 100 días. ....	93
Figura 5.11. Comparación de los resultados experimentales con el modelo analítico para los especímenes del compuesto bidireccional envejecidos durante 208 días. ....	94
Figura 5.12. Comparación de los resultados experimentales con el modelo analítico para los especímenes del compuesto bidireccional envejecidos durante 504 días. ....	95
Figura 5.13. Comparación de los resultados experimentales con el modelo analítico para los especímenes de control del compuesto unidireccional. ....	96
Figura 5.14. Comparación de los resultados experimentales con el modelo analítico para los especímenes del compuesto unidireccional envejecidos durante 57 días. ....	97
Figura 5.15. Comparación de los resultados experimentales con el modelo analítico para los especímenes del compuesto unidireccional envejecidos durante 110 días. ....	98
Figura 5.16. Comparación de los resultados experimentales con el modelo analítico para los especímenes del compuesto unidireccional envejecidos durante 210 días. ....	99
Figura 5.17. Comparación de los resultados experimentales con el modelo analítico para los especímenes del compuesto unidireccional envejecidos durante 521 días. ....	100
Figura C.1. Micrografía <i>SEM</i> de la superficie de falla perpendicular a las fibras en un espécimen de laminado bidireccional de control (sin condicionamiento) ensayado a un nivel de esfuerzo de 30% $\sigma_{ult}$ . ....	131
Figura C.2. Micrografía <i>SEM</i> de la superficie de falla paralela a las fibras en un espécimen de laminado bidireccional de control (sin condicionamiento) ensayado a un nivel de esfuerzo de 30% $\sigma_{ult}$ . ....	132
Figura C.3. Micrografía <i>SEM</i> de la superficie de falla perpendicular a las fibras en un espécimen de laminado bidireccional envejecido durante 100 días ensayado a un nivel de esfuerzo de 30% $\sigma_{ult}$ . ....	132
Figura C.4. Micrografía <i>SEM</i> de la superficie de falla perpendicular a las fibras en un espécimen de laminado bidireccional envejecido durante 504 días ensayado a un nivel de esfuerzo de 50% $\sigma_{ult}$ . ....	133
Figura C.5. Micrografía <i>SEM</i> de la superficie de falla perpendicular a las fibras en un espécimen de laminado unidireccional de control (sin condicionamiento) ensayado a un nivel de esfuerzo de 70% $\sigma_{ult}$ . ....	133
Figura C.6. Micrografía <i>SEM</i> de la superficie de falla perpendicular a las fibras en un espécimen de laminado unidireccional de control (sin condicionamiento) ensayado a un nivel de esfuerzo de 70% $\sigma_{ult}$ . ....	134

Figura C.7. Micrografía *SEM* de la superficie de falla perpendicular a las fibras en un espécimen de laminado unidireccional envejecido durante 110 días ensayado a un nivel de esfuerzo de 50%  $\sigma_{ult}$ . ..... 134

Figura C.8. Micrografía *SEM* de la superficie de falla perpendicular a las fibras en un espécimen de laminado unidireccional envejecido durante 110 días ensayado a un nivel de esfuerzo de 50%  $\sigma_{ult}$ . ..... 135

Figura C.9. Micrografía *SEM* de la superficie de falla perpendicular a las fibras en un espécimen de laminado unidireccional envejecido durante 521 días ensayado a un nivel de esfuerzo de 50%  $\sigma_{ult}$ . ..... 135

# LISTA DE TABLAS

---

Tabla 1.1. Comparación de las propiedades de los materiales compuestos reforzados con fibra con el acero. (Adaptado de López-Anido y Kharbari, 2000).	2
Tabla 2.1. Porcentaje de reducción de las propiedades del compuesto fibra de vidrio/epóxi respecto a los valores de control. (Adaptado de Kajorncheappunngam <i>et al.</i> 2002).	14
Tabla 2.2. Porcentaje de reducción de las propiedades de la resina epóxi respecto a los valores de control. (Adaptado de Kajorncheappunngam <i>et al.</i> 2002).	14
Tabla 2.3. Resultados de las pruebas estáticas en el compuesto SMC-R25 (Adaptado de Quaresimin y Guglielmino, 2001).	24
Tabla 2.4. Porcentaje de disminución en la resistencia a fatiga para las distintas condiciones de envejecimiento (Adaptado de Ellyin y Rohrbacher, 2003).	27
Tabla 2.5. Resumen de los modelos de fatiga significativos presentados por Degrieck y Van Paepegem (2001).	29
Tabla 3.1. Especificaciones de los constituyentes dados por el fabricante.	36
Tabla 3.2. Dimensiones de especímenes para los ensayos de las propiedades físicas.	38
Tabla 3.3. Dimensiones de los especímenes para el ensayo de tensión.	42
Tabla 3.4. Resultados ensayo gravedad específica y densidad.	43
Tabla 3.5. Contenido volumétrico y en peso de los constituyentes para el laminado bidireccional.	44
Tabla 3.6. Contenido volumétrico y en peso de los constituyentes para el laminado unidireccional.	44
Tabla 3.7. Resultados ensayos de tensión longitudinal en resina viniléster.	46
Tabla 3.8. Resultados ensayos de tensión longitudinal en el laminado.	49
Tabla 4.1. Dimensiones de las muestras para ensayo de vida a fatiga.	53
Tabla 4.2. Parámetros del ensayo de vida a fatiga.	55
Tabla 4.3. Parámetros de caracterización de la carga cíclica para cada material.	55
Tabla 4.4. Resumen de los resultados de la ganancia de humedad y los ensayos de vida a fatiga en resina viniléster en función del esfuerzo máximo.	62
Tabla 4.5. Parámetros de la regresión lineal para curvas S-N en muestras de resina viniléster.	63
Tabla 4.6. Resumen de los resultados de la ganancia de humedad y los ensayos de vida a fatiga en el compuesto bidireccional en función del esfuerzo máximo.	67

Tabla 4.7. Parámetros de la regresión lineal para curvas S-N en muestras de compuesto bidireccional.....	69
Tabla 4.8. Resumen de los resultados de la ganancia de humedad y los ensayos de vida a fatiga en el compuesto unidireccional en función del esfuerzo máximo. ....	71
Tabla 4.9. Parámetros de la regresión lineal para curvas S-N en muestras de compuesto unidireccional.....	74
Tabla 5.1. Valores de $\alpha$ , $\beta$ y $R^2$ para los especímenes de control. ....	82
Tabla 5.2. Ecuaciones según el modelo de regresión de mejor ajuste para los parámetros $\alpha_t$ y $\beta_t$ , determinadas en base a los datos experimentales.....	84
Tabla A.1. Resultados del ensayo de fatiga en especímenes de control de resina viniléster. ....	114
Tabla A.2. Resultados del ensayo de fatiga en especímenes de resina viniléster envejecidos durante 68 días. ....	114
Tabla A.3. Resultados del ensayo de fatiga en especímenes de resina viniléster envejecidos durante 122 días. ....	115
Tabla A.4. Resultados del ensayo de fatiga en especímenes de resina viniléster envejecidos durante 215 días. ....	115
Tabla A.5. Resultados del ensayo de fatiga en especímenes de resina viniléster envejecidos durante 509 días. ....	115
Tabla A.6. Resultados del ensayo de fatiga en especímenes de control de compuesto bidireccional.....	116
Tabla A.7. Resultados del ensayo de fatiga en especímenes de compuesto bidireccional envejecidos durante 60 días. ....	116
Tabla A.8. Resultados del ensayo de fatiga en especímenes de compuesto bidireccional envejecidos durante 100 días. ....	117
Tabla A.9. Resultados del ensayo de fatiga en especímenes de compuesto bidireccional envejecidos durante 208 días. ....	117
Tabla A.10. Resultados del ensayo de fatiga en especímenes de compuesto bidireccional envejecidos durante 504 días. ....	118
Tabla A.11. Resultados del ensayo de fatiga en especímenes de control de compuesto unidireccional.....	118
Tabla A.12. Resultados del ensayo de fatiga en especímenes de compuesto unidireccional envejecidos durante 57 días. ....	119
Tabla A.13. Resultados del ensayo de fatiga en especímenes de compuesto unidireccional envejecidos durante 110 días. ....	119
Tabla A.14. Resultados del ensayo de fatiga en especímenes de compuesto unidireccional envejecidos durante 210 días. ....	120

Tabla A.15. Resultados del ensayo de fatiga en especímenes de compuesto unidireccional envejecidos durante 521 días. ....	120
Tabla B.1. Análisis de varianza de un factor para especímenes de resina viniléster ensayados a un nivel de esfuerzo de $70\% \sigma_{max} / \sigma_{ult}$ . ....	122
Tabla B.2. Análisis de varianza de un factor para especímenes de resina viniléster ensayados a un nivel de esfuerzo de $50\% \sigma_{max} / \sigma_{ult}$ . ....	123
Tabla B.3. Análisis de varianza de un factor para especímenes de resina viniléster ensayados a un nivel de esfuerzo de $30\% \sigma_{max} / \sigma_{ult}$ . ....	123
Tabla B.4. Análisis de varianza de dos factores para todos los especímenes de resina viniléster ensayados bajo cargas cíclicas. ....	124
Tabla B.5. Análisis de varianza de un factor para especímenes de compuesto bidireccional ensayados a un nivel de esfuerzo de $70\% \sigma_{max} / \sigma_{ult}$ . ....	125
Tabla B.6. Análisis de varianza de un factor para especímenes de compuesto bidireccional ensayados a un nivel de esfuerzo de $50\% \sigma_{max} / \sigma_{ult}$ . ....	125
Tabla B.7. Análisis de varianza de un factor para especímenes de compuesto bidireccional ensayados a un nivel de esfuerzo de $30\% \sigma_{max} / \sigma_{ult}$ . ....	126
Tabla B.8. Análisis de varianza de dos factores para todos los especímenes de compuesto bidireccional ensayados bajo cargas cíclicas. ....	127
Tabla B.9. Análisis de varianza de un factor para especímenes de compuesto unidireccional ensayados a un nivel de esfuerzo de $70\% \sigma_{max} / \sigma_{ult}$ . ....	128
Tabla B.10. Análisis de varianza de un factor para especímenes de compuesto unidireccional ensayados a un nivel de esfuerzo de $50\% \sigma_{max} / \sigma_{ult}$ . ....	128
Tabla B.11. Análisis de varianza de un factor para especímenes de compuesto unidireccional ensayados a un nivel de esfuerzo de $30\% \sigma_{max} / \sigma_{ult}$ . ....	129
Tabla B.12. Análisis de varianza de dos factores para todos los especímenes de compuesto unidireccional ensayados bajo cargas cíclicas. ....	130

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

---

### 1.1 Preliminares

Los materiales compuestos fibro-reforzados se presentan como una atractiva alternativa frente a materiales tradicionales utilizados en la construcción y la industria, como el acero, el concreto y la madera. Jones (1999) define materiales compuestos como la combinación de dos o más materiales, cuya unión posee algunas propiedades ventajosas con respecto a los materiales constituyentes por separado. En el presente trabajo se estudia uno de estos materiales, el producido a partir de una matriz polimérica reforzada con fibras (*FRP*, de sus siglas en inglés *Fiber-Reinforced Polymers*) el cual está constituido por dos fases: (1) las fibras, responsables de las propiedades resistentes del material compuesto y (2) la matriz, la cual soporta y protege las fibras, transmite los esfuerzos entre ellas y representa la configuración geométrica del material. En la Tabla 1.1 se presenta una comparación de los

rangos típicos de las propiedades del *FRP* y el acero de refuerzo. Estos materiales presentan propiedades muy especiales entre las que pueden citarse:

- Elevadas rigidez y resistencia específicas, buen comportamiento a fatiga y bajo peso, lo que se traduce en rápida colocación en obra y reducción de cargas muertas.
- Alta resistencia a la corrosión y fácil mantenimiento, útil para aplicaciones en ambientes agresivos.
- Baja conductividad térmica y no producen interferencias con campos electromagnéticos, características fundamentales en ciertas aplicaciones.
- Posibilidad de moldeo de grandes piezas, presentan libertad de formas y diseños, pudiendo diseñarse el material con características específicas para determinados sectores como la industria automotriz y aeronáutica, objetos deportivos, tuberías, contenedores y en la construcción civil.

Tabla 1.1. Comparación de las propiedades de los materiales compuestos reforzados con fibra con el acero. (Adaptado de López-Anido y Kharbari, 2000).

<b>Propiedad</b>	<b>Rango</b>	<b>Comparación con el acero</b>
Módulo elástico	20 - 138 GPa (2900 - 20000 ksi)	1/10 a 2/3 veces menor que el acero
Esfuerzo último	340 - 1700 MPa (49 - 245 ksi)	1 a 5 veces el esfuerzo de fluencia del acero
Deformación máxima	1 - 3%	1/10 a 1/3 veces menor que el acero
Densidad	1.4 - 2.0 gr/cm <sup>3</sup> (0.05 - 0.07 lb/pulg <sup>3</sup> )	4 a 6 veces más liviano que el acero

En la Figura 1.1 se muestra un esquema de las utilidades del *FRP* en el área de la construcción civil. Una de las aplicaciones de los materiales compuestos en el área de

infraestructura civil es la rehabilitación de estructuras existentes, que se presenta como una solución ventajosa frente al uso de técnicas convencionales, por la mínima modificación que supone en las dimensiones de los elementos reforzados.

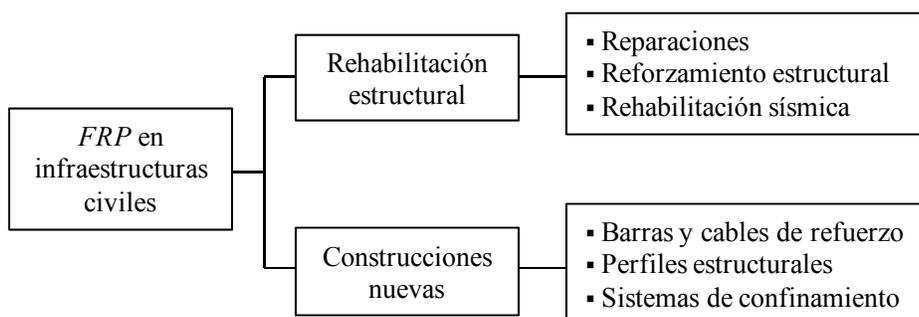


Figura 1.1. Aplicaciones del *FRP* en infraestructuras civiles (Adaptado de López-Anido y Kharbari, 2000).

El uso de *FRP* en nuevas estructuras, sin embargo, es todavía bastante limitado principalmente a causa de su elevado costo, la degradación de sus propiedades a temperaturas no muy elevadas, el desconocimiento de los códigos de diseño y la escasa información del comportamiento estructural del material y la durabilidad a largo plazo. Sin embargo muchas de estas desventajas pueden ser superadas a través de la educación, la investigación y el desarrollo de nuevos proyectos (López-Anido y Kharbari, 2000). En la Figura 1.2 se muestran ejemplos de aplicaciones en estructuras nuevas: en la Figura 1.2(a) se muestran diferentes perfiles de *FRP*, mientras que en la Figura 1.2(b) se presenta una sección híbrida de puente, con vigas formadas por tubulares conectados de *FRP* y una losa de concreto reforzado. Este puente es el primero de este tipo en Puerto Rico y fue construido por la Autoridad de carreteras y transportación (*ACT*).

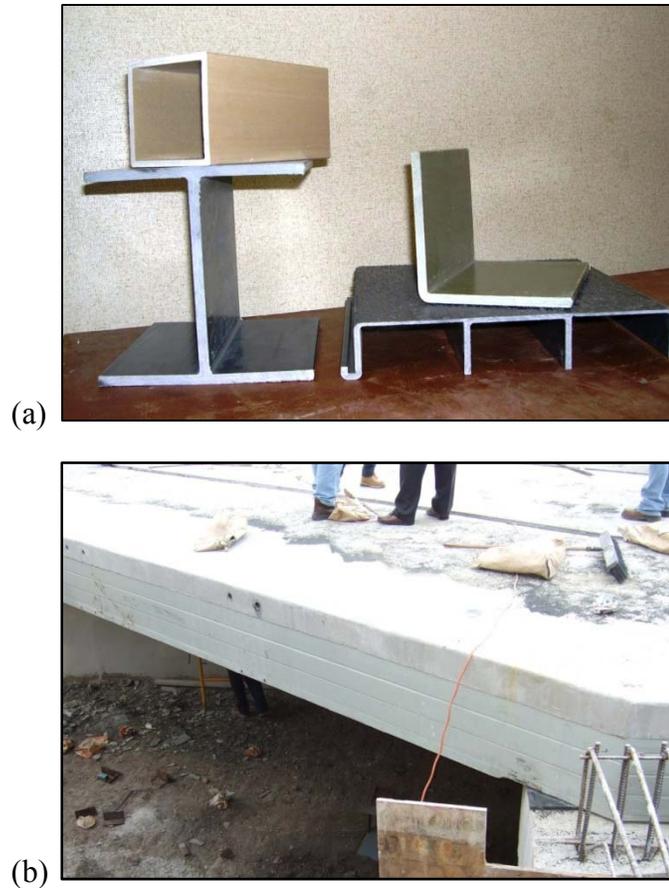


Figura 1.2. (a) Perfiles de *FRP* fabricados por el proceso de pultrusión. (b) Sección híbrida de puente con vigas de *FRP* y losa de hormigón armado (Ponce, PR).

## 1.2 Motivación

Los elementos estructurales de materiales compuestos en servicio son expuestos a medios higrotérmicos, los cuales inducen la degradación de las propiedades mecánicas. Los efectos de la humedad y la temperatura en las propiedades mecánicas en los compuestos han sido documentados en la literatura por varios autores. Kajorncheappunngam *et al.* (2002) y Helbling y Karbhari (2005) estudiaron los efectos del envejecimiento a corto y largo plazo respectivamente, en el comportamiento de las propiedades mecánicas de compuestos de fibra de vidrio, relacionando la degradación del material a la exposición higrotérmica.

De igual forma, muchos de estos componentes estructurales en su vida útil están sometidos a historias de carga que varían en el tiempo en forma cíclica, las cuales ocasionan un debilitamiento en el material. Este fenómeno, conocido como fatiga del material, produce la falla a valores de tensión inferiores a los esfuerzos últimos de falla. La fatiga es actualmente una de las principales causas de fallo en elementos en servicio. Mayugo (2003) apunta que entre el 50 y el 90% de las fallas se debe a este fenómeno. Las cargas cíclicas, en comparación con las cargas estáticas, producen un daño más significativo en los compuestos reforzados con fibra de vidrio (Ellyin y Rohrbacher, 2003).

El estudio de los efectos del envejecimiento higrotérmico en la resistencia a fatiga de los materiales compuestos reforzados con fibra de vidrio se ha identificado como una problemática cuyo entendimiento permitiría obtener una aproximación racional de la vida de un elemento estructural bajo estas condiciones, que es uno de los objetivos básicos del diseño. El conocimiento de los mecanismos de degradación del material posibilita el desarrollo de modelos analíticos para caracterizar el material y predecir la esperanza de vida.

Existen limitados trabajos de investigación que incorporen el estudio de los efectos a largo plazo del envejecimiento en la evolución de la fatiga y para el conocimiento del autor pocos engloban conjuntamente la modelación numérica, como se mostrará en el Capítulo 2 (Revisión de literatura). Lo anteriormente expuesto justifica el desarrollo de una investigación que integre datos experimentales sobre absorción de humedad y fatiga en materiales compuestos y la implementación de un modelo analítico basado en una aproximación fenomenológica.

Este trabajo de investigación es el último de tres estudios que conforman un proyecto que busca analizar el problema de degradación mecánica de materiales compuestos

laminados de fibra de vidrio, a nivel de la macro y micromecánica en presencia de humedad y temperatura. Los estudios presentados anteriormente se resumen a continuación: (1) Mondragón-Maca (2008) analizó el daño en la interfase fibra-matriz a través de un modelo de celda unitaria utilizando el programa de elementos finitos ABAQUS y (2) Obando-Fuertes (2009) examinó experimentalmente la variación de las propiedades mecánicas por efecto de la absorción de humedad. El trabajo presentado por Obando-Fuertes (2009) se realizó en conjunto con la presente investigación.

### **1.3 Objetivos**

El objetivo principal de este trabajo de investigación es evaluar los efectos de la exposición higrotérmica en la resistencia a fatiga en los materiales compuestos.

Entre los objetivos específicos de este trabajo se incluyen los siguientes:

- Estudiar el comportamiento a fatiga de la resina viniléster y dos tipos de laminados de fibra de vidrio tipo E y resina viniléster, bajo condiciones iniciales de control (sin exposición higrotérmica).
- Contabilizar la absorción de humedad en los materiales utilizados en este estudio.
- Evaluar la vida a fatiga en los materiales bajo estudio después de la exposición higrotérmica.
- Implementar un modelo analítico que incluya los efectos de la absorción de humedad en el comportamiento a fatiga y permita estimar el tiempo de vida de los materiales.

## 1.4 Contenido de la tesis

El presente documento está organizado en seis capítulos donde se presenta el programa experimental desarrollado para abordar la problemática de durabilidad y fatiga en materiales compuestos y el modelo fenomenológico implementado. En los apéndices que acompañan el documento se exponen aspectos adicionales para complementar su análisis.

- En el Capítulo 1 se presenta una introducción del uso de los materiales compuestos, se defiende la importancia del estudio, se detallan los objetivos que plantean el alcance de la investigación y se presenta la organización del documento.
- En el Capítulo 2 se recopilan los trabajos más significativos sobre evaluación de vida a fatiga en materiales compuestos, durabilidad y modelos de predicción de vida a fatiga, que permite enmarcar el tema en el entorno del actual estado del arte.
- En el Capítulo 3 se describen las características de los componentes de los materiales y el método de manufactura, se presenta una metodología para la caracterización física y mecánica de los materiales bajo estudio y se describen los resultados de los ensayos llevados a cabo para evaluar las propiedades físicas como la densidad y la fracción de volumen de fibra, y las propiedades mecánicas como el esfuerzo último a tensión, el módulo elástico, deformación última y la razón de Poisson.
- En el Capítulo 4 se detalla la preparación de los especímenes para el condicionamiento higrotérmico, se presenta el análisis de la absorción de humedad y los resultados de los ensayos a fatiga, incluyendo el desarrollo de las curvas S-N, tanto para la condición inicial como para los especímenes sometidos a envejecimiento.

- En el Capítulo 5 se reseña la implementación de una metodología analítica de predicción de vida a fatiga incorporando los efectos del condicionamiento higrotérmico. Se incluye además la verificación del modelo usando los resultados obtenidos en el programa experimental.
- En el Capítulo 6 se explican las conclusiones a las que se ha llegado con esta investigación y se sugieren posibles futuras líneas de trabajo para completarlo. Finalmente se incluye la lista de referencias citadas en el contenido del documento.
- En el Apéndice A se presenta la totalidad de los resultados de las pruebas de fatiga.
- En el Apéndice B se muestran los resultados del análisis estadístico realizado en base a los datos experimentales de vida a fatiga de los materiales bajo estudio.

## CAPÍTULO 2

# REVISIÓN DE LITERATURA

---

### **2.1 Introducción**

El objetivo de este capítulo es presentar una revisión de las investigaciones previas en las áreas de durabilidad, envejecimiento y comportamiento a fatiga de materiales compuestos. La primera sección condensa los trabajos concernientes a los temas de durabilidad, condicionamiento higrotérmico y químico y sus efectos sobre las propiedades de los materiales. La segunda sección reúne las investigaciones relacionadas a la fatiga por cargas cíclicas, comportamiento, mecanismos de degradación y modelos de predicción de tiempo de vida. Estos temas proveen una base para la investigación presentada en esta tesis sobre los efectos del envejecimiento por humedad en la vida a fatiga de polímeros reforzados con fibra.

## 2.2 Durabilidad en materiales fibro-reforzados

La durabilidad es una propiedad que permite definir las características de resistencia más importantes en el diseño y uso de los materiales. Según el Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos en su carta técnica No. 1110-2-548 (1997) la principal problemática respecto a durabilidad es cuánto subsistirá el material bajo unas condiciones anticipadas. Los mecanismos que controlan la durabilidad en materiales compuestos pueden dividirse en tres: (1) Cambios físicos o químicos en la matriz, (2) Separación entre la matriz y la fibra, lo que en inglés se conoce como “*debonding*” y (3) Reducción en las propiedades de la fibra. Las condiciones ambientales, tales como humedad, temperatura, radiación solar, presencia de químicos degradantes como sales o álcalis, y las condiciones de carga afectan la durabilidad. Los efectos de envejecimiento son menos severos en los compuestos con resina termoestable (*thermoset*), más comúnmente disponibles, que en compuestos con resina termoplástica. Los materiales compuestos saturados con agua presentan degradación en la resistencia y en el módulo con cambios generalmente reversibles al secarse el compuesto. La temperatura es un factor importante en el mecanismo de absorción de la humedad en los materiales compuestos y marca una influencia en la distribución, la cantidad y la razón de absorción de la humedad (*U.S. Army Corps of Engineers, 1997*).

La presencia de humedad en el material, sola o combinada con otros químicos, inicia desfavorables cambios estructurales dentro de las fibras, la matriz y en la interfase entre ambas, lo cual reduce considerablemente la durabilidad del compuesto. Otro efecto de la humedad es el incremento de volumen de la muestra, lo que puede inducir esfuerzos similares a los producidos por efectos térmicos, que se traducen en micro grietas. El cambio de volumen puede producir delaminaciones y pérdida en la adhesión fibra-matriz, dando

como resultado la falla del material compuesto. El alcance de estas posibles delaminaciones puede depender del tipo de químico empleado para aumentar la adherencia fibra-matriz (Kajorncheappunngam *et al.*, 2002).

Diversos trabajos de investigación se han enfocado en el estudio de la degradación de las propiedades de los materiales compuestos reforzados con fibra por efectos de la exposición a ambientes agresivos. A continuación se presenta una selección de estos trabajos, con el fin de proveer una representación de las publicaciones más relevantes en el área de durabilidad.

Ishai (1975) investigó los efectos de la exposición ambiental cíclica sobre un compuesto fibra de vidrio/epoxi y resina epoxi sin refuerzo. El espectro ambiental consistió en la inmersión en agua a temperaturas de 22°C [72°F] y 80°C [176°F], intercalado con ciclos de secado al horno a una temperatura de 105°C [221°F]. La duración de los ciclos de condicionamiento varió de 7 a 36 días. Las muestras fueron ensayadas a tensión para determinar su resistencia a tensión residual. El autor concluyó que, para ambos materiales, el esfuerzo a tensión residual resultó sustancialmente menor en especímenes previamente sumergidos en agua a temperatura de 80°C [176°F] que en especímenes expuestos al agua a temperatura de 22°C [72°F]. El cambio en peso de los especímenes sumergidos en agua a una temperatura de 22°C [72°F], tomado como parámetro para determinar la absorción de humedad, reflejó valores más altos en la resina epoxi sin refuerzo que en el compuesto y presentó una recuperación casi total luego del ciclo de secado para ambos materiales. Este comportamiento se repitió en la resina sin refuerzo sumergida en agua a una temperatura de 80°C [176°F]. Sin embargo el compuesto presentó una irrecuperable pérdida de peso luego

de los ciclos de inmersión y secado para la misma temperatura, atribuida a la degradación de la superficie de las fibras por efecto de la humedad y la temperatura.

Bank, Gentry y Barkatt (1995) presentaron una revisión de literatura técnica sobre el desarrollo de métodos de ensayos acelerados en materiales compuestos fibro-reforzados sometidos a diferentes condicionamientos. La revisión se concentró en trabajos sobre fibras de vidrio, carbón y aramida. Respecto a las matrices, el enfoque recayó sobre los polímeros termoestables (*thermosetting*), abarcando los grupos epoxi, poliéster y viniléster. Entre las condiciones de exposición abarcadas se incluyeron temperatura, humedad, presión, soluciones químicas, mezclas gaseosas, exposiciones cíclicas, radiación ultravioleta y corrosión por esfuerzo. Los autores señalaron que la degradación más crítica ocurre en presencia de humedad, soluciones alcalinas y ácidas, dependiendo de la composición del material.

Karbhari y Zhang (2002) investigaron la durabilidad en medios acuosos de compuestos de fibra de vidrio tipo E y resina viniléster, fabricados con la técnica de infusión de resina. Los autores utilizaron tres tipos de laminados: uniaxial ( $0^\circ$ ), biaxial ( $0^\circ/90^\circ$ ) y triaxial ( $0^\circ/\pm 45^\circ$ ), los cuales fueron inmersos en agua des-ionizada a temperaturas de  $23^\circ\text{C}$  [ $73^\circ\text{F}$ ] y  $60^\circ\text{C}$  [ $140^\circ\text{F}$ ], y una solución potásica a  $23^\circ\text{C}$  [ $73^\circ\text{F}$ ] por un período de 57 semanas. Se verificó una mayor absorción de humedad en las muestras sumergidas a temperatura de  $60^\circ\text{C}$  [ $140^\circ\text{F}$ ], en relación a las sumergidas a  $23^\circ\text{C}$  [ $73^\circ\text{F}$ ]. Los autores plantearon que el nivel de absorción aumentó por el tipo de orientación de las fibras, verificándose el nivel menor para el laminado uniaxial y la mayor absorción para los especímenes reforzados triaxialmente. Las propiedades mecánicas (resistencia a tensión y módulo elástico) disminuyeron por efecto del condicionamiento ambiental. Los mecanismos de daño

presentados en los resultados incluyeron separación de la interfase (*debonding*), incisiones en la fibra, y agrietamiento de la matriz. Estos mecanismos de daño produjeron un aumento en la absorción de humedad que, unido a un post curado del material inducido por la humedad, resultó en un incremento de las propiedades mecánicas después de la disminución inicial por efecto de la inmersión en el medio acuoso.

Kajorncheappunngam *et al.* (2002) realizaron ensayos de tensión en muestras de compuesto fibra de vidrio/epóxi y resina epóxi, sumergidas en cuatro soluciones diferentes a temperatura ambiente y a 60°C [140°F], por espacio de hasta cinco meses. Las soluciones fueron: (a) agua destilada, (b) solución salina (*NaCl*), (c) solución de hidróxido de sodio (*NaOH*) y (d) ácido clorhídrico (*HCl*). En la Tabla 2.1 se muestra el tipo de solución, el tiempo de envejecimiento y los porcentajes de reducción respecto a los valores de control del módulo elástico, esfuerzo máximo a tensión y deformación unitaria para las muestras de compuesto. Las reducciones más altas se registraron en la resistencia a tensión en el compuesto sumergido en ácido clorhídrico a una temperatura de 60°C [140°F], el cual disminuyó un 73%. El daño acumulado en el compuesto sumergido a una temperatura de 60°C [140°F] fue mayor que el correspondiente a temperatura ambiente. En las muestras de resina, para todos los acondicionamientos a temperatura ambiente, el valor del esfuerzo último inicialmente incrementó y luego disminuyó hasta un valor menor que el de la resina sin envejecer, como se muestra en Tabla 2.2.

Tabla 2.1. Porcentaje de reducción de las propiedades del compuesto fibra de vidrio/epóxi respecto a los valores de control. (Adaptado de Kajorncheappunngam *et al.* 2002).

Solución	Tiempo [meses]	Temperatura ambiente			60°C [140°F]		
		Módulo elástico	Esfuerzo máximo	Deformación última	Módulo elástico	Esfuerzo máximo	Deformación última
		[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
<i>NaCl</i>	1	4.92	6.13	5.87	7.54	6.43	2.32
	3	1.64	2.21	2.77	-3.28	0.34	1.13
	5	1.64	-3.05	0.07	8.20	19.31	16.21
5 M <i>NaOH</i>	1	0.33	24.21	17.13	8.52	53.09	44.71
	3	-5.90	19.11	20.87	9.51	73.08	65.64
	5	0.33	27.79	27.82	8.52	73.47	70.04
Agua Destilada	1	-3.93	-0.85	6.96	3.61	49.23	50.61
	3	0.00	18.28	22.45	-1.31	47.34	51.39
	5	2.62	23.24	26.02	-0.66	47.75	51.02
1M <i>HCl</i>	1	7.21	49.92	46.74	16.39	35.51	21.49
	3	18.36	69.42	64.04	23.61	34.79	37.83
	5	17.38	73.54	69.59	19.34	48.05	34.97

Tabla 2.2. Porcentaje de reducción de las propiedades de la resina epóxi respecto a los valores de control. (Adaptado de Kajorncheappunngam *et al.* 2002).

Solución	Tiempo [meses]	Temperatura ambiente			60°C [140°F]		
		Módulo elástico	Esfuerzo máximo	Deformación última	Módulo elástico	Esfuerzo máximo	Deformación última
		[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
<i>NaCl</i>	1	11.76	-20.67	-90.89	13.73	0.08	-23.25
	3	5.88	3.99	-1.44	11.76	9.81	-6.94
	5	-1.96	9.01	9.76	7.84	13.94	1.81
5 M <i>NaOH</i>	1	13.73	-54.23	-145.71	17.65	-20.88	-55.59
	3	19.61	-30.06	-109.87	15.69	10.02	-6.73
	5	7.84	-4.73	-16.34	7.84	15.20	5.09
Agua Destilada	1	-3.92	-6.42	-13.05	15.69	-4.37	-32.99
	3	13.73	-20.65	-76.03	15.69	4.43	-22.58
	5	17.65	-2.14	-31.51	11.76	4.06	-14.34
1M <i>HCl</i>	1	-29.41	-10.81	14.54	3.92	19.17	13.83
	3	-1.96	18.12	20.41	-1.96	4.01	11.13
	5	0.00	17.88	18.87	3.92	-2.01	-10.22

Helbling y Karbhari (2005) estudiaron los efectos sinérgicos de la inmersión en agua, temperatura y carga sostenida de flexión en el comportamiento de la absorción de humedad y las propiedades mecánicas de un compuesto unidireccional de fibra de vidrio y resina viniléster producido con la técnica de pultrusión. Los especímenes fueron expuestos a diferentes condicionamientos por un período de tres años: inmersión en agua de-ionizada a temperaturas de 22°C [72°F], 40°C [104°F] y 60°C [140°F], aplicando niveles sostenidos de deformación por flexión de 0%, 30% y 45%, para cada una de las temperaturas antes mencionadas. Para calcular la absorción de humedad, fueron obtenidas mediciones gravimétricas en intervalos de tiempo específicos. Las muestras fueron sometidas a ensayos de tensión cuasi estática para evaluar el esfuerzo último, el módulo elástico y la deformación última en función del tiempo de exposición. Además se determinaron la temperatura de transición del vidrio ( $T_g$ ) y el módulo dinámico del material. El esfuerzo último a tensión del compuesto disminuyó mientras incrementó el tiempo de inmersión y la temperatura, con mayor degradación para los niveles altos de cargas sostenidas de flexión. Los autores asociaron la pérdida inicial de resistencia a tensión con la plastificación de la matriz, mientras que reducciones tardías fueron relacionadas a la separación de la interfase fibra-matriz y corrosión por esfuerzo. El módulo elástico se mantuvo relativamente invariable, mientras que la deformación última exhibió un comportamiento similar al esfuerzo último a tensión.

Helbling y Karbhari (2007) presentaron una recopilación de estudios sobre materiales compuestos sometidos a condicionamientos en ambientes acuosos. Los temas alcanzados incluyen la influencia de la humedad a nivel de los constituyentes, los distintos perfiles de absorción de humedad y los parámetros que influyen en el mismo, los efectos de la humedad

en las propiedades físicas y mecánicas del material y las relaciones entre el esfuerzo y la exposición higrotérmica. Los autores concluyen que, aunque los elementos constituyentes (resina y fibra) son susceptibles a la degradación por efecto de exposiciones higrotérmicas, la cuidadosa selección de los materiales, el adecuado control de calidad durante los procesos de manufactura y el uso de apropiados revestimientos (*coating*) puede resultar en materiales compuestos que presenten un significativo incremento en la durabilidad en comparación con materiales convencionales sometidos a las mismas condiciones.

## **2.3 Fatiga en materiales fibro-reforzados**

### **2.3.1 Introducción**

El fenómeno de fatiga es definido como la degradación de la integridad del material consecuencia de condiciones externas variables en el tiempo. Estas condiciones externas usualmente se presentan como cargas fluctuantes, pero también pueden mostrarse de otras formas, como esfuerzos cíclicos inducidos termalmente o ciclos de exposición a humedad. La integridad de un material es comúnmente medida en términos de sus propiedades mecánicas como la rigidez o la resistencia (Schaff, 2006). Los materiales sometidos a cargas fluctuantes por encima de su límite de fatiga pueden fallar a niveles de esfuerzos mucho más bajos que su resistencia última a tensión. Esto implica que las cargas cíclicas pueden reducir la resistencia de un material (Iqbal, 2001).

Al hablar de fatiga es conveniente resaltar las diferencias entre la evolución del daño en los materiales compuestos y la que aparece en los materiales homogéneos, como los metales. Los mecanismos de daño en los compuestos no se limita a la propagación de una

grieta sino que se presentan otros fenómenos activos dentro del material, como rotura de fibras, formación de grietas en la matriz, rotura de la interfase entre fibra-matriz y pandeo de la fibra bajo esfuerzos de compresión. La participación de cada mecanismo dependerá de las propiedades de los materiales componentes, de la configuración del laminado y de las características de la carga aplicada (Mayugo, 2003). En los materiales compuestos, por su naturaleza, la variabilidad en el comportamiento a fatiga es mucho mayor que la asociada con materiales metálicos (Harris, 2003).

La falla por cargas cíclicas de tensión ocurre por la rotura de las fibras principales que acarrean la tensión, lo que transfiere una concentración de carga a las fibras adyacentes. El daño ocurre en forma de separación de la interfase fibra-matriz y agrietamiento de las láminas no orientadas en la dirección de la carga, lo que incrementa la tensión en los elementos críticos que acarrean las cargas (Post, 2008).

La resistencia a fatiga de un material es caracterizada en términos del número de ciclos a falla y el nivel de tensión cíclica aplicada y generalmente es representada en una curva tensión-vida o curva S-N, como la mostrada en la Figura 2.1. La ordenada es el esfuerzo máximo o la amplitud de esfuerzo en una escala lineal. La abscisa de la curva es el número de ciclos a falla y es dispuesta usualmente en escala logarítmica. El índice de reversión  $R$ , definido como la relación entre el esfuerzo mínimo y máximo ( $R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$ ) y la frecuencia de ensayo, se mantienen constantes para cada curva desarrollada.

En general, las curvas S-N incluyendo la de materiales compuestos, presenta una pendiente negativa, lo que representa que el número de ciclos de carga para alcanzar la falla se incrementa cuando el nivel de tensión cíclica aplicada disminuye. En materiales compuestos, la curva S-N es influenciada por variables del material como el tipo de matriz, la

orientación de las láminas, la fracción de volumen de fibra y las propiedades de la interfase, y por variables del ensayo como el tipo de carga (tensión-tensión, tensión-compresión, compresión-compresión), la tensión media, la frecuencia y el medio ambiente (Agarwal *et al.*, 2006).

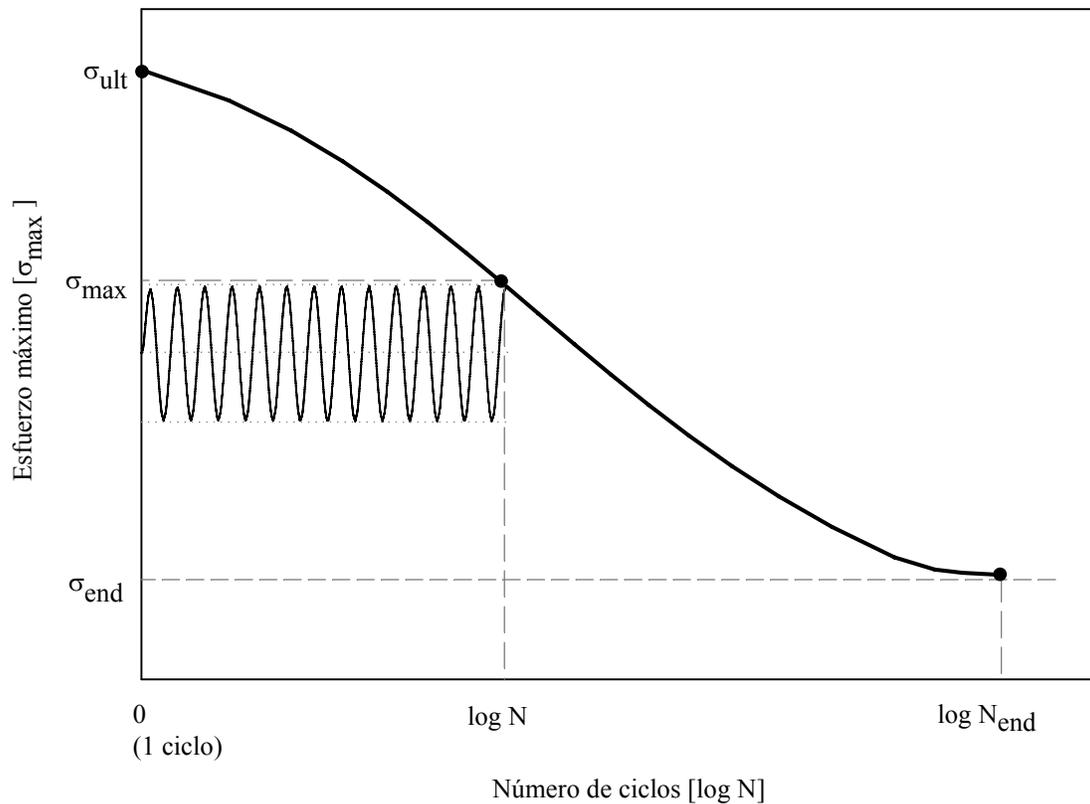


Figura 2.1. Evolución típica de una curva S-N desde su valor estático ( $\sigma_{ult}$ ) hasta el límite de fatiga ( $\sigma_{end}$ ). (Adaptado de Mayugo, 2003).

### 2.3.2 Evaluación de vida a fatiga en materiales compuestos

Talreja (1981) realizó una revisión de los mecanismos básicos de daño por fatiga en compuestos, concluyendo que estos dependen del modo de carga y de la dirección de la carga respecto a la orientación de la fibra. Este autor indica que en compuestos unidireccionales, cuando la carga cíclica en tensión es paralela a la orientación de las fibras, se pueden

presentar tres tipos de daños, como se muestra en la Figura 2.2: (a) rotura de fibras, que ocurre cuando el nivel de esfuerzo excede la resistencia de las fibras, (b) agrietamiento de la matriz, que se presenta cuando la deformación cíclica aplicada excede el límite de deformación en la matriz y (c) falla por cortante, que ocurre cuando, por la ampliación de una grieta, los esfuerzos cortantes producen una falla por deslizamiento de la interfase.

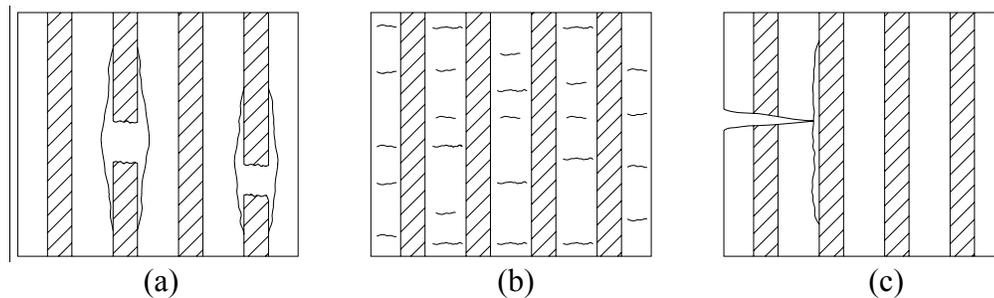


Figura 2.2. Mecanismos de daño por fatiga en compuestos unidireccionales bajo cargas cíclicas paralelas a la orientación de las fibras: (a) rotura de fibras, separación de la interfase (b) agrietamiento de la matriz (c) falla por cortante. (Adaptado de Talreja, 1981).

Los tres tipos de daños pueden ocurrir simultáneamente, no obstante, el mecanismo de falla predominante podría ser efectivo en un rango limitado de las deformaciones máximas aplicadas. Cuando la carga cíclica no es paralela a la orientación de las fibras, los mecanismos de falla pueden incluir separación de la interfase fibra-matriz y delaminación. La mayor resistencia a fatiga se consigue en compuestos unidireccionales cuando la carga cíclica a tensión está en la dirección de las fibras. Cualquier desviación a este patrón, apunta el autor, produce que el rendimiento a fatiga dependa de la parte débil del compuesto, la matriz.

Harris (2003) presentó una revisión histórica del comportamiento a fatiga de los materiales reforzados con fibras, abarcando los primeros trabajos publicados en el área. El autor incluyó temas como: (1) la concentración de daño en los compuestos resaltando la

rotura de fibras, agrietamiento en la matriz, separación fibra-matriz, y delaminación, (2) la dispersión en los datos de fatiga experimentales enfatizando en la importancia de realizar réplicas del ensayo, (3) el desarrollo de curvas esfuerzo/vida y deformación/vida y diagramas de vida constante y (4) los factores que afectan el comportamiento de vida a fatiga como los materiales constituyentes, el medio ambiente y las condiciones de carga.

Zhou *et al.* (2007) presentaron un análisis teórico de la durabilidad de los materiales compuestos sometidos a cargas de fatiga donde discuten, en base a trabajos publicados previamente, los factores que influyen en el comportamiento a fatiga de los materiales compuestos usados en el área de la ingeniería civil. Los autores resaltaron que, aunque el comportamiento a fatiga es controlado por la fibra, también es influenciado por otros factores como el proceso de manufactura y el historial de carga. Además examinan distintos enfoques de diseño para fatiga, como los basados en confiabilidad que posibilitan la inclusión de la complejidad del fenómeno de fatiga, y los basados en el método de factores de carga y resistencia (*LRFD*, por sus siglas en inglés) cuya implementación permite que los compuestos sean manejados como materiales convencionales.

Helmi, Fam y Mufti (2008) estudiaron el comportamiento a fatiga de muestras extraídas de tubos de material compuesto fibra de vidrio/epóxi. Uno de los objetivos de los autores era determinar el efecto en la vida a fatiga de la variación de diferentes factores como frecuencia, relación de esfuerzos máximos y mínimos, relación de esfuerzos máximos y últimos a tensión, y dimensiones de los especímenes. Los autores concluyeron que los incrementos en la frecuencia de las cargas aplicadas produjeron un incremento en la vida a fatiga y que la presencia de componentes de carga a compresión redujo la resistencia a fatiga. Sin embargo, este efecto tiende a disminuir para relaciones de esfuerzos bajos.

### 2.3.3 Fatiga y exposición ambiental

Diversos autores han estudiado los efectos del envejecimiento y las cargas cíclicas en compuestos reforzados con fibra de vidrio. A continuación se resumen algunos de estos trabajos.

Jones *et al.* (1983) presentaron los resultados de una serie de ensayos a fatiga axial y a flexión en compuestos de matriz epóxi reforzados con fibra de vidrio (*GFRP* por sus siglas en inglés), fibras de carbono (*CFRP*) y fibras orgánicas *Kevlar-49* (*KFRP*), bajo las siguientes condiciones ambientales: (1) secado a una temperatura de 60°C [140°F] por cuatro semanas, (2) a temperatura ambiente y humedad relativa de 65% por tres meses, (3) en agua hirviendo por tres semanas. En todas las condiciones de envejecimiento, los compuestos *KFRP* absorbieron más humedad que los compuestos reforzados con fibras inorgánicas. La resistencia a fatiga de los compuestos *CFRP* mostró insensibilidad a la acción de la humedad. En los compuestos *KFRP* la condición de secado completo resultó ser menos resistente a fatiga axial que el compuesto húmedo, incluso sumergido en agua hirviendo. Los resultados de los efectos del envejecimiento en la resistencia a fatiga a flexión fueron más dispersos que en el caso de fatiga axial, por la complejidad mostrada en los modos de falla de los compuestos.

Chauteauminos *et al.* (1993) realizaron pruebas monotónicas y de fatiga estática utilizando el ensayo de flexión de tres puntos (en inglés *three-point bending test*) en un compuesto unidireccional con fibra de vidrio/epóxi sometido a tres condiciones: (1) seco, (2) envejecido por 100 días en agua destilada a temperaturas de 30°C [86°F], 50°C [122°F], 70°C [158°F] y 90°C [194°F] y (3) resecado luego de la inmersión por 100 días. La absorción de humedad indujo una disminución en la resistencia y la deformación última,

mientras que el valor del módulo elástico se mantuvo constante. Las pérdidas en las propiedades fueron identificadas como reversibles para las temperaturas de 30°C [86°F] y 50°C [122°F], contrario en las temperaturas de 70°C [158°F] y 90°C [194°F], donde el desgaste fue irreversible. Dependiendo de la temperatura se identifican dos mecanismos de falla. El primero, característico de temperaturas de envejecimiento de 30°C [86°F] y 50°C [122°F], es dependiente de las propiedades visco elásticas de la matriz y se caracteriza por falla drástica por micro pandeo en el área a compresión de la muestra. El segundo, relacionado a las temperaturas de 70°C [158°F] y 90°C [194°F], está caracterizado por daño progresivo por agrietamiento y rotura de las fibras en la zona a tensión. Los autores concluyen que el envejecimiento higrotérmico a elevadas temperaturas modifica los mecanismos de daño en el compuesto.

McBagonluri *et al.* (1999) estudiaron los efectos del condicionamiento a corto plazo en un compuesto de matriz viniléster reforzado con fibra de vidrio, producido por la técnica de pultrusión, bajo cargas cíclicas. Los especímenes fueron sometidos a cuatro acondicionamientos: (1) inmersos en agua fresca a 45°C [113°F], (2) inmersos en una solución salina a 65°C [149°F], (3) acondicionamiento termal a una temperatura de 45°C [113°F] y (4) ciclos de absorción y secado. Las muestras fueron sometidas a ensayos de tensión cuasi estática y ensayos de fatiga con amplitud constante usando un índice de reversión  $R = 0.1$  a una frecuencia de 2 Hz y 10 Hz. El material envejecido en la solución salina presentó una reducción del 32% en la resistencia a tensión y 11% de reducción en el módulo elástico. Los especímenes envejecidos en agua presentaron variaciones similares en sus propiedades mecánicas. Las pendientes de las curvas de vida a fatiga, mostradas en la Figura 2.3, se presentan similares, por lo que los autores sugieren la existencia de un

mecanismo común de daño dominado por la fibra, independiente del contenido de humedad o del tipo de envejecimiento.

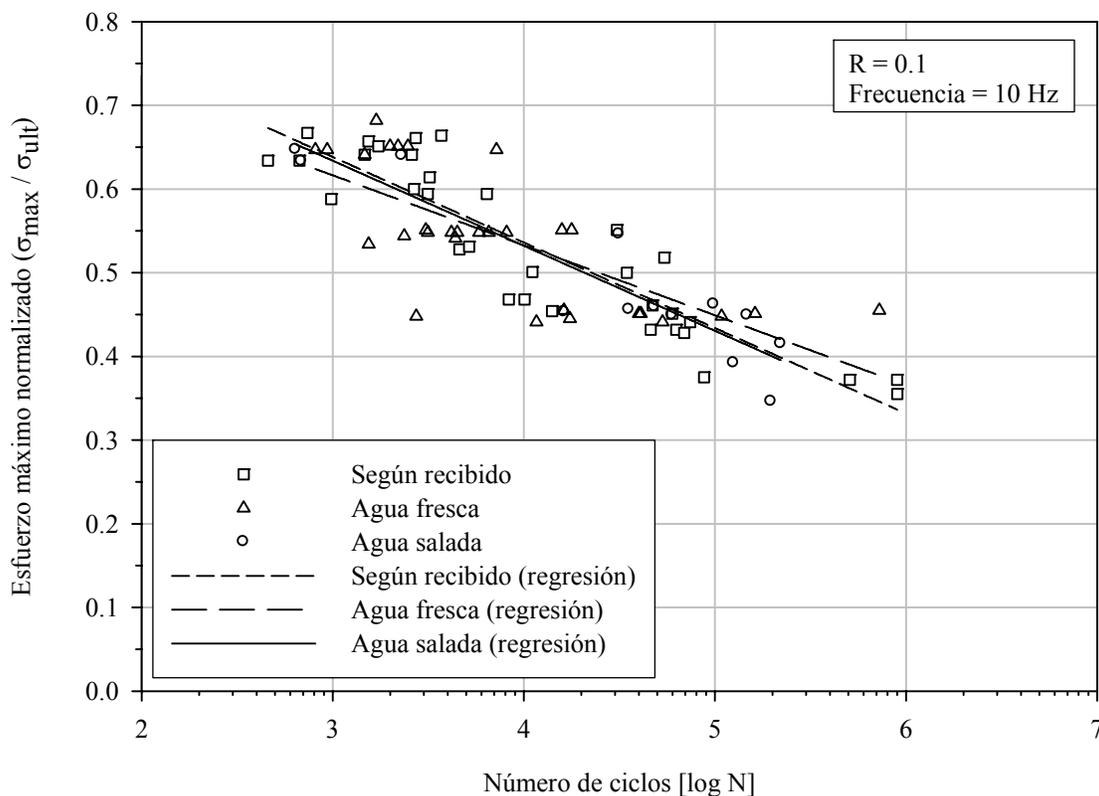


Figura 2.3. Curvas normalizadas de vida a fatiga para el compuesto según recibido y envejecido (Adaptado de McBagonluri *et al.*, 1999).

Quaresimin y Guglielmino (2001) ensayaron un compuesto manufacturado con el proceso *SMC-R25* (en inglés *Sheet Moulding Compound*). El compuesto fue manipulado en tres estados: (1) ciclos térmicos, (2) solución salina y (3) una combinación de ambos. Los autores consideran estos procesos como representativos de las peores condiciones de servicio en que puede encontrarse un material. Los resultados de esfuerzo último, módulo elástico y deformación última son mostrados en la Tabla 2.3. El valor del módulo elástico presenta una disminución respecto al valor de control, lo que los autores consideran es producto del daño presentado en la interfase fibra-matriz. La mayor disminución en el módulo elástico se

relaciona con la aplicación de ciclos térmicos. Del mismo modo los autores concluyen que la humedad pudo inducir la plastificación de la resina y la relajación de los esfuerzos residuales debido al proceso de manufactura, lo que explicaría el incremento en la resistencia estática.

Tabla 2.3. Resultados de las pruebas estáticas en el compuesto SMC-R25 (Adaptado de Quaresimin y Guglielmino, 2001).

Condiciones de envejecimiento	Esfuerzo último		Módulo elástico		Deformación última [%]
	[MPa]	[ksi]	[MPa]	[ksi]	
Ninguna	57.9	8.4	7,965	1155	1.72
Ciclos térmicos	60.2	8.7	6,419	931	1.59
Solución salina	70.9	10.3	6,553	950	1.68
Ciclos térmicos y solución salina	65.3	9.5	6,873	997	1.78

Las pruebas de fatiga fueron desarrolladas utilizando amplitudes de esfuerzo constantes con una onda de carga sinusoidal, un rango de frecuencia de 10 a 15 Hz y un índice de reversión ( $R$ ) de 0.10. Las muestras sumergidas en la solución salina fueron las más susceptibles a daño por fatiga y las muestras sometidas a ciclos térmicos evidenciaron una disminución mayor del 20% en su rigidez en el principio de su vida a fatiga.

Iqbal (2001) evaluó la vida a fatiga de un compuesto fibro-reforzado (*FRP* por sus siglas en inglés) producido con dos técnicas de manufactura: pultrusión y *hand lay-up*. Las probetas fueron sometidas a cuatro diferentes condiciones ambientales: (1) ciclos de congelamiento y descongelamiento, (2) agua a una temperatura de 45°C, (3) radiación ultravioleta (*UV*) y (4) simulación de agua marina. El diagrama S-N mostrado en la Figura 2.4, expone una pendiente más pronunciada en el compuesto manufacturado por pultrusión comparado con el procesado con *hand lay-up*, lo que indica que para niveles de esfuerzos bajos, el *hand lay-up FRP* tendría una mayor vida a fatiga. La resistencia a fatiga del *hand*

*lay-up FRP* exhibe una alta variabilidad comparada con el compuesto producido por pultrusión, principalmente porque el proceso *hand lay-up* introduce muchas variables tales como la temperatura de impregnación, periodo de curado, entre otras. La exposición a radiación *UV* fue considerada por el autor como el peor escenario para la combinación con cargas de fatiga.

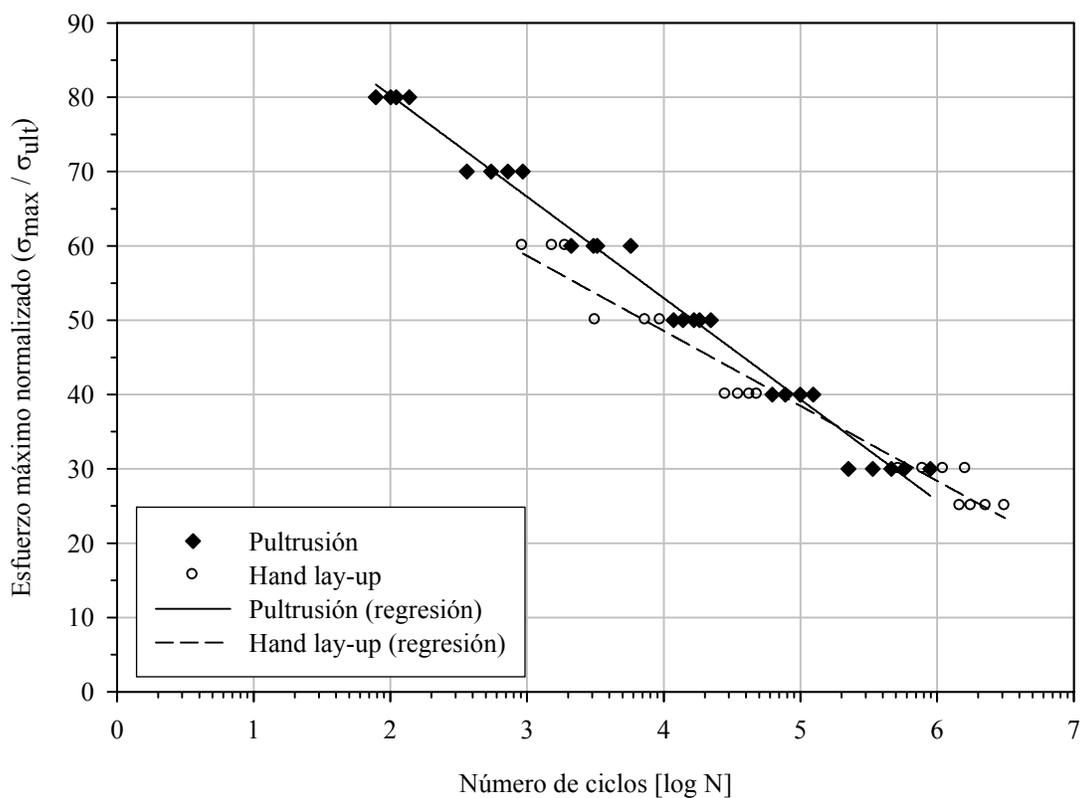


Figura 2.4. Diagrama S-N para los dos tipos de compuesto (Adaptado de Iqbal, 2001).

Shan y Liao (2002) ensayaron compuestos unidireccionales reforzados con fibra de vidrio e híbridos vidrio-carbón y matriz epóxi, con una fracción de volumen de fibra aproximada de 30% en ambos compuestos. Las muestras fueron sometidas a cargas cíclicas, usando una onda sinusoidal con un índice de reversión  $R = 0.1$ . Los autores utilizaron valores de frecuencia diferentes para distintos niveles de carga: 10 Hz para niveles de carga de 65% y

85% del esfuerzo último a tensión y 20 Hz para cargas del orden de 30% y 45%. Los especímenes fueron ensayados secos e inmersos en agua destilada a 25°C empleando un montaje especial. No se presentaron cambios significativos en la vida a fatiga de ambos compuestos para las dos condiciones de ensayo, para cargas cíclicas del orden del 85% del esfuerzo último a tensión, mientras que para valores de cargas equivalentes a 65% y 45% del esfuerzo último a tensión, la vida a fatiga se redujo significativamente. Los especímenes híbridos inmersos mostraron una mejor retención de la integridad estructural al ser sometidos a fatiga, que las muestras reforzadas con fibra de vidrio solamente.

Ellyin y Rohrbacher (2003) experimentaron con tres tipos de laminados de fibra de vidrio tipo E y matriz epóxi:  $[0_2/90_3]_s$ ,  $[\pm 45/90_3]_s$  y  $[\pm 45_2]_s$ . El acondicionamiento consistió en la sumersión en agua destilada a temperatura ambiente  $\sim 20^\circ\text{C}$  [ $\sim 68^\circ\text{F}$ ] y a  $90^\circ\text{C}$  [ $194^\circ\text{F}$ ]. La absorción de humedad en las muestras sumergidas a temperatura ambiente alcanzó el estado de saturación, mientras que en las muestras condicionadas a  $90^\circ\text{C}$  [ $194^\circ\text{F}$ ] la tasa de absorción de humedad incrementó continuamente. Los ensayos de fatiga fueron realizados con una relación  $R = 0.1$  y una frecuencia de 3 Hz. En la Tabla 2.4 se reporta el porcentaje de disminución de la resistencia a fatiga para los tres laminados respecto a las condiciones de envejecimiento. La resistencia a fatiga de los especímenes sumergidos en agua a temperatura de  $90^\circ\text{C}$  [ $194^\circ\text{F}$ ] presentó una reducción de 38% a 65% en comparación con los especímenes secos, mientras que los sumergidos a temperatura ambiente presentaron una ligera variación respecto a las muestras secas, sugiriendo un mejor comportamiento a fatiga. En todos los laminados el estado de saturación de grietas se presentó antes de que el índice de vida completase el 50%.

Tabla 2.4. Porcentaje de disminución en la resistencia a fatiga para las distintas condiciones de envejecimiento (Adaptado de Ellyin y Rohrbacher, 2003).

Condiciones	Disminución en la resistencia a fatiga [%]		
	[0 <sub>2</sub> , 90 <sub>3</sub> ] <sub>s</sub>	[±45, 90 <sub>3</sub> ] <sub>s</sub>	[±45 <sub>2</sub> ] <sub>s</sub>
<b>Seco</b>	0	0	0
<b>TA</b>	8.6	6.8	21.3
<b>90°C</b>	62.5	37.6	55.8

TA: Sumergido en agua destilada a temperatura ambiente.

90°C: Sumergido en agua destilada a temperatura de 90°C [194°F].

### 2.3.4 Modelos de predicción del comportamiento a fatiga

La complejidad de los sucesos de fatiga en materiales laminados ha llevado al desarrollo de diversos modelos que intentan representar la amplia variedad de materiales, métodos de manufactura y diseños de laminados. Esto dificulta desarrollar una interpretación universal del comportamiento a fatiga de los compuestos. Como resultado, muchos modelos se han desarrollado para configuraciones de carga y materiales específicos, y su generalización a otros casos es imprecisa (Post 2008). La elección de un modelo específico para fatiga está sustancialmente limitada a la información disponible que se pueda adaptar al modelo.

Degrieck y Van Paepegem (2001) presentan una recopilación de los principales modelos y metodologías para predecir la vida a fatiga en materiales compuestos. Los autores clasifican los modelos en tres categorías:

- Modelos de vida a fatiga: utilizan las curvas S-N o los diagramas de Goodman e introducen algunos criterios de falla a fatiga. No toman en cuenta la acumulación de daño, sino que predicen el número de ciclos para condiciones de carga fijas.
- Modelos fenomenológicos para resistencia o rigidez residuales.

- Modelos de daño progresivo: utilizan variables de daño relacionadas a manifestaciones de daño mesurables como grietas en la matriz, delaminación, etc.

Los autores concluyen que los modelos de daño progresivo son los más promisorios, y que los mismos deben estar correlacionados con la degradación de las propiedades mecánicas del material para obtener una simulación completa del estado de daño. En la Tabla 2.5 se muestra un resumen de las metodologías más significativas presentadas en el artículo.

Post *et al.* (2006) desarrollaron un modelo que determina el comportamiento de la resistencia residual del material sujeto a condiciones de fatiga conocidas. El método se basa en la identificación de los elementos críticos y no críticos en el compuesto. Los elementos críticos en el laminado son aquellos cuya falla local produce la falla global del laminado, mientras que la falla de los elementos no críticos solo incrementan el nivel de esfuerzos en los elementos críticos. La relación entre la rigidez inicial y el cambio en el módulo en función de la vida del material, es generalmente insignificante. Sin embargo, estas relaciones no son consistentes entre distintos niveles de carga, lo que muestra que el cambio de rigidez no puede ser usado como una medida de la vida remanente del material. El valor de la rigidez en cualquier tiempo durante la vida del material está correlacionada con la rigidez inicial, lo que resulta compatible según los autores, con la suposición que la rigidez de los elementos críticos no cambia significativamente durante las primeras dos etapas del daño por fatiga ya que los elementos críticos dominan la mayor parte de la rigidez.

Tabla 2.5. Resumen de los modelos de fatiga significativos presentados por Degriek y Van Paepegem (2001).

Modelo	Criterios de falla	Parámetros	Comentarios	Enfoque
Hashin y Rotem (1973)	$\sigma_A = \sigma_A^u$ $\left( \frac{\sigma_T}{\sigma_T^u} \right)^2 + \left( \frac{\tau}{\tau^u} \right)^2 = 1$	$\sigma_A$ = esfuerzo longitudinal $\sigma_t$ = esfuerzo transversal $\tau$ = esfuerzo cortante	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Válido solamente para laminados unidireccionales.</li> </ul>	Vida a fatiga
Ellyin y El-Kadi (1990)	$\Delta W^{\alpha} = \kappa N_f^{\alpha}$	$\Delta W$ = densidad de energía de deformación $\kappa, \alpha$ = funciones del ángulo de orientación de la fibra $N_f$ = número de ciclos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utiliza la densidad de energía de deformación calculada bajo el estado de esfuerzos plano.</li> </ul>	Vida a fatiga
Reifnider y Gao (1991)	$\langle \sigma_{11}^f \rangle = X^f$ $\left( \frac{\langle \sigma_{22}^{m1} \rangle}{X^m} \right)^2 + \left( \frac{\langle \sigma_{12}^{m1} \rangle}{S^m} \right)^2 = 1$	$X$ = funciones de falla a fatiga para fibra y matriz $S$ = función de falla a fatiga para la resina bajo carga cortante	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Basado en el método de Mori-Tanaka.</li> <li>- Aplicado a cargas <i>off-axis</i> en laminados unidireccionales.</li> </ul>	Vida a fatiga
Lawrence Wu (1993)	$\frac{3}{2(F+G+H)} [F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\sigma_{yz}^2 + 2M\sigma_{zx}^2 + 2N\sigma_{xy}^2] = \sigma^2$	$F, G, H, L, M, N$ = funciones de los esfuerzos máximos $X, Y, Z$ = esfuerzos máximos $Q, R, S$ = esfuerzos cortantes	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Basado en el criterio de falla de Tsai-Hill.</li> <li>- Convalidado con compuestos de fibra de carbono.</li> <li>- Esfuerzos obtenidos de análisis con FEM.</li> </ul>	Vida a fatiga
Fawaz y Ellyin (1994)	$S = m \log(N) + b$	$S$ = esfuerzo aplicado $m, b$ = ecuaciones definidas a partir de los parámetros $a_1, a_2, \theta$ y $R$ . $a_1 = \sigma_y / \sigma_x$ $a_2 = \tau_{xy} / \sigma_x$ $\theta$ = ángulo orientación fibras $R$ = índice de reversión	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utiliza una curva S-N de referencia para determinar los parámetros del material.</li> <li>- El modelo es sensible a la escogencia de la línea de referencia.</li> </ul>	Vida a fatiga

Tabla 2.5. Resumen de los modelos de fatiga significativos presentados por Degriek y Van Paepegem (2001).

Modelo	Criterios de falla	Parámetros	Comentarios	Enfoque
Jen y Lee (1998)	$M_{11}^2 \left( \frac{\sigma_{xx}}{\sigma_{11}} \right)^2 + M_{22}^2 \left( \frac{\sigma_{xx}}{\sigma_{22}} \right)^2 - M_{11} M_{22} \left( \frac{\sigma_{xx}}{\sigma_{11}} \right) \left( \frac{\sigma_{xx}}{\sigma_{22}} \right)^2$ $+ M_{12}^2 \left( \frac{\sigma_{xx}}{\sigma_{12}} \right)^2 = 1$	$\sigma =$ componentes del esfuerzo $\bar{\sigma} =$ resistencia a fatiga en función de la frecuencia y el índice de reversión	- Basado en el criterio de falla de Tsai-Hill. - Convalidado con laminados carbón/PEEK. - Para laminados $[\pm 45]_{4s}$ el porcentaje de error fue alto.	Vida a fatiga
Hwang y Han (1986)	$\frac{dF}{dn} = -A c N^{c-1} \sigma_a = F(n_i)^b \cdot \varepsilon(n_i)$ $N^r = [B(1-r)]^{1/c}$ $D = \frac{r}{1-r} \cdot \left[ \frac{F_0}{F(n)} - 1 \right]$	$F =$ módulo de fatiga $A, B, c =$ constantes del material $\varepsilon =$ deformación $N =$ número de ciclos $r = \sigma_a / \sigma_u$ $D =$ daño acumulado	- Asume que el índice de degradación del módulo de fatiga sigue una función de potencia a razón del número de ciclos y que existe una relación lineal entre el esfuerzo aplicado y la deformación correspondiente.	Rigidez residual
Whitworth (1987)	$\left( \frac{E(N^*)}{E(0)} \right)^a = 1 - H \cdot \left( 1 - \frac{S}{R(0)} \right)^a N^{*a}$ $D = \left[ \frac{H \cdot (1 - \bar{S})^a}{1 - S^a} \right] \cdot \frac{n}{N}$	$N^* = n / N$ $S =$ esfuerzo aplicado $R(0) =$ resistencia estática $E(0) =$ módulo inicial $a, H =$ parámetros independientes del nivel de esfuerzo aplicado $D =$ daño acumulado	- Convalidado con compuestos de grafito/epoxi. - Puede utilizarse para fatiga con amplitud variable. - Asume que el comportamiento del material es independiente del historial de carga.	Rigidez residual
Brondsted et al. (1997)	$\frac{d(E/E_1)}{dN} = -K \cdot \left( \frac{\sigma}{E_0} \right)^m$ $\frac{E}{E_1} = A \cdot N + B$	$E =$ módulo después de N ciclos $E_1 =$ módulo inicial $E_0 =$ módulo estático $\sigma =$ esfuerzo máximo $K =$ constante $A =$ variable en función del esfuerzo	- Suponen que el cambio en la rigidez es independiente del historial de carga, por lo que el modelo puede usarse para amplitud de carga variables. - Convalidado en compuestos reforzados con fibra de vidrio.	Rigidez residual
Daniel y Charewicz (1986)	$\left[ \frac{1-f_r}{1-s} \right] = g \left( \frac{n}{N} \right)$	$F =$ resistencia del material $f_r = Fr / F_0$ $s = \sigma_a / F_0$ $g(n/N) =$ función de # ciclos	- Convalidado con laminados cross-ply grafito/epoxi. - La curva de resistencia residual presenta gran dispersión de los datos.	Resistencia residual

Tabla 2.5. Resumen de los modelos de fatiga significativos presentados por Degrieck y Van Paepegem (2001).

Modelo	Criterios de falla	Parámetros	Comentarios	Enfoque
Reifsmider (1986)	$\frac{S_L^r(\tau_1)}{S_{Ln}^i} = \left[ \frac{(F_e/E_L)^i}{F_e(\tau)/F_L(\tau)} \right]_{\tau_1} \cdot \left[ 1 - \int_0^{\tau_1} (1 - F_e(\tau))k(\tau)^{k-1}d\tau \right]$	$S_L$ = resistencia residual $F$ = criterio de falla generalizado sub-índices $e$ y $L$ = identifican los elementos críticos y no críticos	- Abarca la problemática de la interacción de distintos tipos de daño. - Divide el volumen representativo en elementos críticos y sub-críticos - El criterio de falla es función del tiempo por la variación en el estado de esfuerzos en los elementos.	Daño progresivo
Dahlen y Springer (1994)	$\Delta a \frac{\sigma_f^2}{E_y G_{crit}} = A \left( \frac{G_{max}}{U G_{crit}} \right)^b$	$\Delta a$ = crecimiento delaminación $\sigma_f$ = resistencia de la lámina $E_y$ = módulo elástico transversal $G_{crit}$ = tasa crítica de liberación de energía $A, b$ = constantes del material $U$ = función que depende del esfuerzo cortante $G_{max}$ = tasa de liberación de energía máxima	- El modelo estima el crecimiento de la delaminación bajo carga cíclica incluyendo los modos I, II y combinados. - Asume que el modo III no contribuye significativamente y que los efectos viscoelásticos y termales son despreciables. - Convalidado con laminados grafito/epoxi.	Daño progresivo
Hénaff-Gardin et al. (1997)	$\frac{dS}{dN} = A \left( \frac{G_I}{G_{max}} \right)^n$	$S$ = superficie de grietas $G_I$ = tasa de energía de deformación $G_{max}$ = tasa de energía de deformación máxima $A, n$ = constantes del material $N$ = número de ciclos	- Estima el progresivo agrietamiento en la matriz. - Cuando $G_{max} < G_{Ic}$ utilizan una ecuación fenomenológica para predecir los ciclos necesarios para el inicio del agrietamiento transversal. - Valido para laminados <i>cross-ply</i> .	Daño progresivo
Bucinell (1998)	$\frac{da}{dN} = \alpha \left[ \frac{G(\sigma_m, \alpha)}{G_c} \right]^\rho$	$a$ = ancho delaminación $N$ = número de ciclos $\sigma_m$ = esfuerzo aplicado $G, G_c$ = tasa de energía de deformación $\alpha, \rho$ = constantes del material	- Estima el crecimiento de la delaminación por efecto de bordes libres. - Basado en principios de mecánica de fractura. - Convalidado con laminados $[\pm 45^\circ/90^\circ/0^\circ]_s$ .	Daño progresivo

Epaarachchi y Clausen (2003) proponen un modelo que define la degradación de la resistencia del material sometido a una carga cíclica de amplitud constante y a una frecuencia de carga constante, para determinar el efecto del índice de reversión ( $R$ ) y la frecuencia de carga sobre la vida a fatiga del material. Los resultados de aplicar el modelo planteado a datos experimentales de compuesto de fibra de vidrio presentan una relación no lineal entre el índice de reversión y la frecuencia de carga, con la predicción de vida a fatiga del compuesto.

Mayugo (2003) propuso una metodología para el análisis de la degradación por fatiga en un compuesto laminado de fibras largas, representando los mecanismos de degradación a través de los diagramas de vida a fatiga. El autor implementó el modelo en un sistema de cálculo numérico de elementos finitos que permite acoplar la degradación a fatiga con cualquier modelo constitutivo del material (elástico, degradación progresiva y localizada, plasticidad, entre otros).

Barbero y Damiani (2003) plantean un procedimiento que permite utilizar conjuntamente datos desarrollados bajo condiciones ambientales aparentemente no comparables. Los autores introducen el concepto de resistencia inerte (en inglés *inert aged strength*) que permitiría homogenizar los resultados correspondientes a pruebas con envejecimiento, transfiriendo los datos en valor a la condición inerte. Este concepto es empleado para desarrollar un modelo generalizado de comportamiento a fatiga estática. Para validar el modelo se utilizaron ensayos realizados en compuestos reforzados con fibra de vidrio para largos periodos de tiempo.

## 2.4 Resumen

Se ha presentado un esquema general del estado del arte respecto a los temas de durabilidad y vida a fatiga en materiales compuestos. En general, fueron encontrados variados trabajos orientados a la investigación de ambos temas. De la revisión, surge que existen en la literatura pocos trabajos enfocados en la degradación por fatiga en resinas. Del mismo modo se advirtió sobre las escasas publicaciones que evalúen los efectos a largo plazo de la exposición ambiental en el comportamiento a fatiga de los materiales compuestos. El presente trabajo pretende aportar evidencia experimental y analítica en esta área del conocimiento de los materiales compuestos fibro-reforzados.

## CAPÍTULO 3

# CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

---

### 3.1 Introducción

En este capítulo se describen los materiales evaluados en este estudio. Se presentan las especificaciones de los constituyentes, el proceso de manufactura usado en la preparación de los especímenes y los procedimientos de las pruebas experimentales para la caracterización de los materiales. El proceso de manufactura es presentado con más detalles por Obando-Fuertes (2009).

Para la presente investigación se estudiaron tres tipos de materiales:

- laminado unidireccional,
- laminado bidireccional (conocido en inglés como *cross-ply*), y
- resina viniléster sin refuerzo.

Para la caracterización física y mecánica del material fueron realizados ensayos para la determinación de la gravedad específica y densidad de los materiales, la fracción de volumen de fibra de los laminados y la resistencia longitudinal a tensión. La ejecución de los experimentos fue planteada de acuerdo a los protocolos de los estándares *ASTM* correspondientes. Posteriormente se incluyen los resultados de los ensayos realizados.

## **3.2 Preparación de los especímenes**

### **3.2.1 Constituyentes**

Para la fabricación de los especímenes de laminado se utilizaron tres constituyentes principales: resina viniléster y fibra de vidrio tipo E unidireccional y bidireccional  $0^{\circ}/90^{\circ}$ . Los dos tipos de fibra utilizada se encontraban en forma de tela cosida (*stitched fabric*).

La información básica de las telas de fibras de vidrio y la resina utilizada en la producción de los paneles se muestra en la Tabla 3.1. Esta información fue provista por los respectivos fabricantes de cada componente.

### **3.2.2 Proceso de manufactura**

Los materiales fueron fabricados en las facilidades del Instituto Politécnico y Universidad Estatal de Virginia (Virginia Tech), en Blacksburg, Virginia, Estados Unidos. Los paneles de resina fueron curados en moldes usando las proporciones de mezcla mostradas en la Tabla 3.1 y posteriormente seccionados en especímenes con las dimensiones deseadas. Los paneles de laminado fueron fabricados usando la técnica de transferencia de resina al vacío *VARTM* (por sus siglas en inglés, *Vacuum Assisted Resin Transfer Molding*). En la Figura 3.1 se muestra la configuración del sistema de vacío y la colocación de los tubos

de infusión de la resina en un panel, por los cuales la resina penetra y empapa la fibra homogéneamente.

Tabla 3.1. Especificaciones de los constituyentes dados por el fabricante.

<b>Resina</b>	
Componente	Proporción de mezcla
Resina viniléster DERAKANE® 8084	W
Catalizador: <i>Cobalt napthenate</i>	0.3% W
Acelerador: <i>N, N-dimethyl aniline</i>	0.025%W
Activador: <i>Norox MEKP-925H peroxide</i>	1.5% W
Densidad [gr/cm <sup>3</sup> ]	1.14 (resina post-curada)
Distribuidor	Ashland Inc.
<b>Fibra de vidrio bidireccional</b>	
Distribuidor	V2Composites
Nombre comercial	VT360
Peso del tejido [oz/yd <sup>2</sup> ]	36
Espesor nominal	44 mils
Tipo de fibra	Hybon® 2022 Roving (PPG)
<i>Yield</i> [yd/lb]	218
Diámetro fibras [micrómetros, μm]	17
Peso de fibra en dirección 0° [oz/yd <sup>2</sup> ]	18.5
Peso de fibra en dirección 90° [oz/yd <sup>2</sup> ]	15.85
Peso <i>Stitching</i> [oz/yd <sup>2</sup> ]	0.27
Densidad [gr/cm <sup>3</sup> ]	2.65
<b>Fibra de vidrio unidireccional</b>	
Distribuidor	V2Composites
Nombre comercial	VT170
Peso del tejido [oz/yd <sup>2</sup> ]	17
Espesor nominal	23 mils
Tipo de fibra	Hybon® 2022 Roving (PPG)
<i>Yield</i> [yd/lb]	218 (0°) 1800 (90°)
Diámetro fibras [micrómetros, μm]	17 (0°) 13 (90°)
Peso de fibra en dirección 0° [oz/yd <sup>2</sup> ]	15.85
Peso de fibra en dirección 90° [oz/yd <sup>2</sup> ]	0.64
Peso <i>Stitching</i> [oz/yd <sup>2</sup> ]	0.27
Densidad [gr/cm <sup>3</sup> ]	2.65

El laminado unidireccional consistió en diez capas de fibra de vidrio *VT170*, con un espesor nominal promedio de 0.18 pulgadas. El laminado bidireccional constó de doce capas de fibra de vidrio *VT360*, con una orientación  $[0^\circ/90^\circ]_{3S}$ , arregladas simétricamente respecto al centro, con espesor nominal promedio de 0.22 pulgadas.



(a)



(b)

Figura 3.1. (a) Configuración del sistema de transferencia de resina al vacío (VARTM), (b) Panel de laminado preparado para infusión de la resina. (Fotos de Obando-Fuertes, 2009)

### 3.3 Caracterización de las propiedades físicas

La evaluación de las propiedades físicas del material incluyó la realización de pruebas para la determinación de la densidad del compuesto, la fracción de volumen de los constituyentes y la estructura del laminado. En la Tabla 3.2 se muestran las dimensiones de las muestras ensayadas.

Tabla 3.2. Dimensiones de especímenes para los ensayos de las propiedades físicas.

Tipo muestra	Tipo espécimen	Dimensiones promedio		
			[cm]	[pulg.]
Resina sola	Rectangular	Ancho:	2.05	0.81
		Largo:	13.2	5.20
		Espesor:	1.32	0.52
Laminado bidireccional	Rectangular	Ancho:	2.54	1.00
		Largo:	3.2	1.26
		Espesor:	0.54	0.21
Laminado unidireccional	Rectangular	Ancho:	2.54	1.00
		Largo:	2.54	1.00
		Espesor:	0.48	0.19

### 3.3.1 Densidad

El procedimiento se realizó siguiendo el protocolo del estándar *ASTM D 792* para determinar la densidad relativa en plásticos por el método de desplazamiento y fue realizado en condiciones de temperatura y humedad ambientales. Los especímenes fueron pesados en aire y luego se obtuvo su peso sumergido en agua destilada, partiendo de la aplicación del Principio de Arquímedes, para determinar la gravedad específica del material de acuerdo con la ecuación (3-1). La densidad del material fue calculada siguiendo la ecuación (3-2).

$$GE = \frac{W_a}{W_a - W_s} \quad (3-1)$$

$$\rho = (GE)(\rho_w) \quad (3-1)$$

donde:

$GE$  = gravedad específica del material

$W_a$  = peso al aire del material

$W_s$  = peso sumergido del material

$\rho$  = densidad del material

$\rho_w$  = densidad del agua a 28°C = 0.996 gr/cm<sup>3</sup> (Streeter, 1985)

### 3.3.2 Fracción de volumen de constituyentes

Para determinar el porcentaje de volumen de fibra en el laminado se siguió el método especificado en el estándar *ASTM D 2584*. El procedimiento consiste en la quema de la resina del compuesto a través de la aplicación de alta temperatura, en intervalos, hasta alcanzar 565°C. El peso del material restante luego de la remoción de la resina constituyó el peso de las fibras. La fracción de volumen de fibra se determinó utilizando la ecuación (3-3). Para lo cual se necesita el peso de las fibras, la densidad del compuesto y la densidad de la fibra. La fracción de volumen de la matriz se obtuvo sustituyendo en la ecuación (3-3) los valores correspondientes a la resina.

$$v_f = w_f \frac{\rho}{\rho_f} \quad (3-2)$$

donde:

- $v_f$  = fracción de volumen de fibra
- $w_f$  = fracción de peso de fibra (medido)
- $\rho$  = densidad del compuesto obtenida por el método descrito en la sección anterior
- $\rho_f$  = densidad de la fibra (dato del fabricante)

Este método permitió verificar la secuencia del laminado al quedar expuestas las distintas capas de refuerzo luego del proceso de quema de la resina. Además se calculó la fracción de fibra teórica utilizando los datos provistos por las compañías manufactureras de los materiales constituyentes. Partiendo del dato del peso de la fibra proporcionado por el fabricante, se procedió a calcular la fracción de volumen de fibra usando la ecuación (3-4).

$$v_f = \frac{A_s \left( \frac{W_{fa}}{W_a} \right)}{\rho_f t_c} \quad (3-3)$$

donde:

- $v_f$  = fracción de volumen de fibra
- $A_s$  = área del espécimen
- $W_{fa}$  = peso de la fibra por unidad de área (dato del fabricante)
- $W_a$  = peso al aire del material
- $\rho_f$  = densidad de la fibra (dato del fabricante)
- $t_c$  = espesor del laminado

### 3.4 Caracterización de las propiedades mecánicas

La caracterización mecánica de las propiedades del material abarca la determinación de la resistencia longitudinal última a tensión, deformación última, módulo elástico, y razón de Poisson.

Todas las muestras fueron cortadas con una sierra de disco de diamante para corte en húmedo. Las muestras de resina viniléster fueron llevadas a un taller de modelado (*machine shop*) donde se les dio la forma final y se suavizaron las superficies. A las muestras de laminado se le pulieron los bordes para asegurar la uniformidad y prevenir fallas prematuras por defectos en los bordes. En la Tabla 3.3 se muestran las dimensiones de las muestras utilizadas en las pruebas de tensión longitudinal.

Los especímenes fueron ensayados siguiendo el protocolo del estándar *ASTM D 3039* y *ASTM D 638*, para las muestras de laminado y de resina viniléster, respectivamente. El ensayo de resistencia a tensión cuasi estática se ejecutó bajo control de desplazamiento a una velocidad de 1.27 mm/min [0.05 pulg./min], hasta alcanzar la falla de la muestra. El módulo

elástico y la razón de Poisson fueron computados a partir de las deformaciones entre 1000 a 3000  $\mu\epsilon$ , como se indica en el método descrito en el estándar *ASTM D 3039*.

Las muestras de laminado fueron ensayadas en la orientación  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , para obtener el esfuerzo último, deformación última y el módulo elástico correspondiente a cada orientación. En las muestras de resina viniléster se dedujo el esfuerzo último, deformación última, el módulo elástico, la razón de Poisson y el límite elástico convencional. Este último es el esfuerzo correspondiente al punto de intersección entre el diagrama de esfuerzo-deformación y una línea paralela a la porción lineal del diagrama, con un corrimiento desde el origen del eje de las deformaciones de 0.2% (*MIL-HDBK-17-1F*, 2002) según el método descrito en el estándar *ASTM D 638*.

Para las pruebas de tensión se utilizó un marco de carga MTS 810 de accionamiento hidráulico servo controlado con capacidad máxima de 244 kN [55 kips], con un controlador de circuito hidráulico Instron 8500 y mordazas mecánicas. Se dispuso de una malla de acero inoxidable tipo 304 con alambres de 0.11mm [0.0045 pulg.] de diámetro para asegurar el agarre de las muelas al espécimen. Las medidas de deformación axial y transversal se realizaron usando un extensómetro de 2.54 cm [1 pulg.] de longitud de calibración y sensores de deformación (en inglés *strain gages*). El control del sistema se realizó con la implementación de subrutinas programadas en LabView versión 7 de National Instruments y con el programa WaveMaker versión 7.1 de Instron.

Tabla 3.3. Dimensiones de los especímenes para el ensayo de tensión.

Tipo muestra	Forma del espécimen	Dimensiones promedio		
			cm	[pulg.]
Resina sola	<i>Dog Bone</i>	Ancho <i>gage</i> :	1.91	0.75
		Ancho <i>grip</i> :	2.88	1.13
		Longitud:	25.40	10.00
		Espesor:	1.02	0.40
Laminado bidireccional	Rectangular	Ancho:	2.54	1.00
		Longitud:	25.40	10.00
		Espesor:	0.54	0.21
Laminado unidireccional	Rectangular	Ancho:	2.54	1.00
		Longitud:	25.40	10.00
		Espesor:	0.48	0.19

## 3.5 Resultados experimentales

### 3.5.1 Densidad y fracción de volumen de los constituyentes

Para la caracterización física del laminado fueron escogidos aleatoriamente cuatro paneles de laminado bidireccional y seis paneles de laminado unidireccional. Se tomaron tres muestras de cada panel, resultando un total de 12 muestras de laminado bidireccional y 18 muestras de laminado unidireccional. De la misma forma fueron muestreadas tres especímenes de resina viniléster.

En la Tabla 3.4 se muestran los resultados de los ensayos de gravedad específica y densidad realizados de acuerdo a la metodología descrita en secciones anteriores. La densidad promedio de las muestras de resina viniléster fue  $1.128 \text{ gr/cm}^3$  [ $0.041 \text{ lb/in}^3$ ], lo cual es un valor previsible de acuerdo a las especificaciones técnicas del producto. Los valores de los coeficientes de variación son bajos, lo que evidencia una leve dispersión en los resultados.

Tabla 3.4. Resultados ensayo gravedad específica y densidad.

Análisis estadístico	Gravedad específica	Densidad	
		[gr/cm <sup>3</sup> ]	[lb/pulg <sup>3</sup> ]
Resina viniléster			
Promedio	1.13	1.13	0.0408
Desv. estándar	0.0004	0.0004	0.00001
CV%	0.03	0.03	0.03
Laminado bidireccional			
Promedio	1.928	1.92	0.0694
Desv. estándar	0.019	0.019	0.00069
CV%	0.97	0.97	0.97
Laminado unidireccional			
Promedio	1.884	1.88	0.0679
Desv. estándar	0.023	0.023	0.00083
CV%	1.22	1.22	1.22

En la Tabla 3.5 y la Tabla 3.6 se muestran los valores correspondientes a las fracciones de peso y volumen de fibra y resina para los laminados bidireccional y unidireccional, respectivamente. La fracción de volumen de fibra total en el laminado bidireccional fue aproximadamente 52% y en el laminado unidireccional fue aproximadamente 50%. Se advierte una leve diferencia entre los valores de fracción de volumen de fibra calculados a partir de los resultados del procedimiento consistente en la remoción de la resina y los valores derivados del cálculo teórico utilizando datos proporcionados por el fabricante, debido a que el primer procedimiento toma en cuenta las variaciones asociadas al proceso de manufactura. En la Figura 3.2 se presentan las muestras de laminado antes y después del proceso de remoción de la resina a alta temperatura.



Figura 3.2. Muestras (a) antes y (b) después de la quema de la resina.

Tabla 3.5. Contenido volumétrico y en peso de los constituyentes para el laminado bidireccional.

Análisis estadístico	Fracción peso matriz [%]	Fracción peso fibra [%]	Fracción volumen matriz [%]	<sup>(1)</sup> Fracción volumen fibra [%]	<sup>(2)</sup> Fracción volumen fibra [%]		
					0°	90°	Total
Promedio	28.04	71.96	47.22	52.16	26.95	23.26	50.21
Desviación estándar	0.96	0.96	1.16	1.18	0.58	0.50	1.09
CV%	3.41	1.33	2.46	2.26	2.16	2.16	2.16

<sup>(1)</sup> Valor experimental (Método de quema de resina) [ecuación (3-3)].

<sup>(2)</sup> Valor teórico (Utilizando datos del fabricante) [ecuación (3-4)].

Tabla 3.6. Contenido volumétrico y en peso de los constituyentes para el laminado unidireccional.

Análisis estadístico	Fracción peso matriz [%]	Fracción peso fibra [%]	Fracción volumen matriz [%]	<sup>(1)</sup> Fracción volumen fibra [%]	<sup>(2)</sup> Fracción volumen fibra [%]
Promedio	30.03	69.97	49.42	49.56	46.03
Desviación estándar	1.347	1.347	1.615	1.517	1.726
CV%	4.485	1.925	3.269	3.062	3.749

<sup>(1)</sup> Valor experimental (Método de quema de resina) [ecuación (3-3)].

<sup>(2)</sup> Valor teórico (Utilizando datos del fabricante) [ecuación (3-4)].

### 3.5.2 Ensayo de tensión longitudinal

Los valores del esfuerzo axial se calcularon utilizando el área transversal original de los especímenes, siguiendo las recomendaciones dadas en las normas *ASTM D 3039* y *ASTM D 638*. En la Figura 3.3 se muestran imágenes de los especímenes de laminado (a) y resina viniléster (b), después de la falla por tensión longitudinal. En la muestra de laminado se observa delaminación y rotura de fibras en la parte superior de la porción libre. En la muestra de laminado la falla se produjo en la fracción central del espécimen.

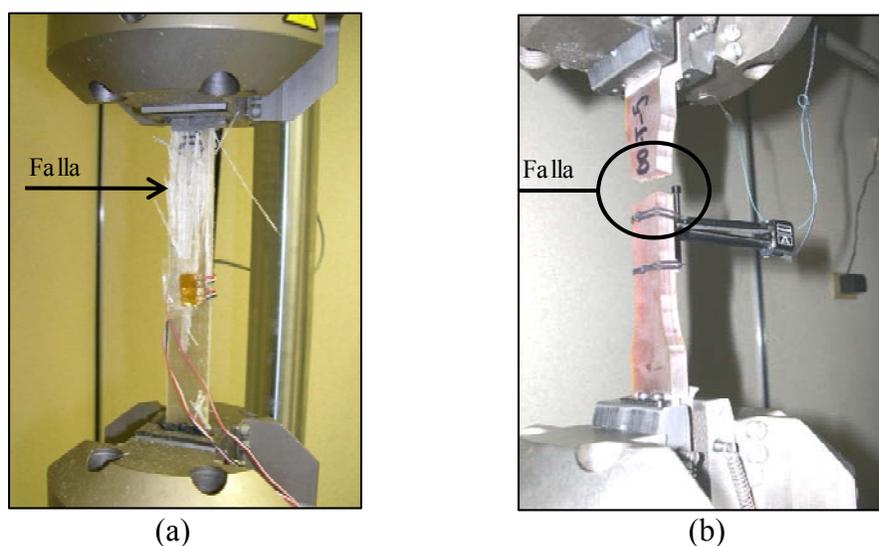


Figura 3.3. Especímenes después de falla por tensión (a) laminado (b) resina viniléster.

En la Figura 3.4 se presenta un esquema típico del diagrama esfuerzo-deformación de una muestra de resina viniléster, refiriendo las variables registradas para la identificación del material. Se reportó el esfuerzo último de tensión longitudinal ( $\sigma_u$ ) y su correspondiente deformación ( $\epsilon_u$ ), el límite elástico respecto a un corrimiento de 0.2% ( $\sigma_e$ ), la deformación elástica ( $\epsilon_e$ ), y el módulo elástico ( $E$ ). En la Tabla 3.7 se muestra un resumen de los resultados del ensayo en las muestras de resina. El tamaño de la muestra fue de 10

especímenes. La deformación máxima presentó una variación significativa, como indica el alto valor del coeficiente de variación (11.52%).

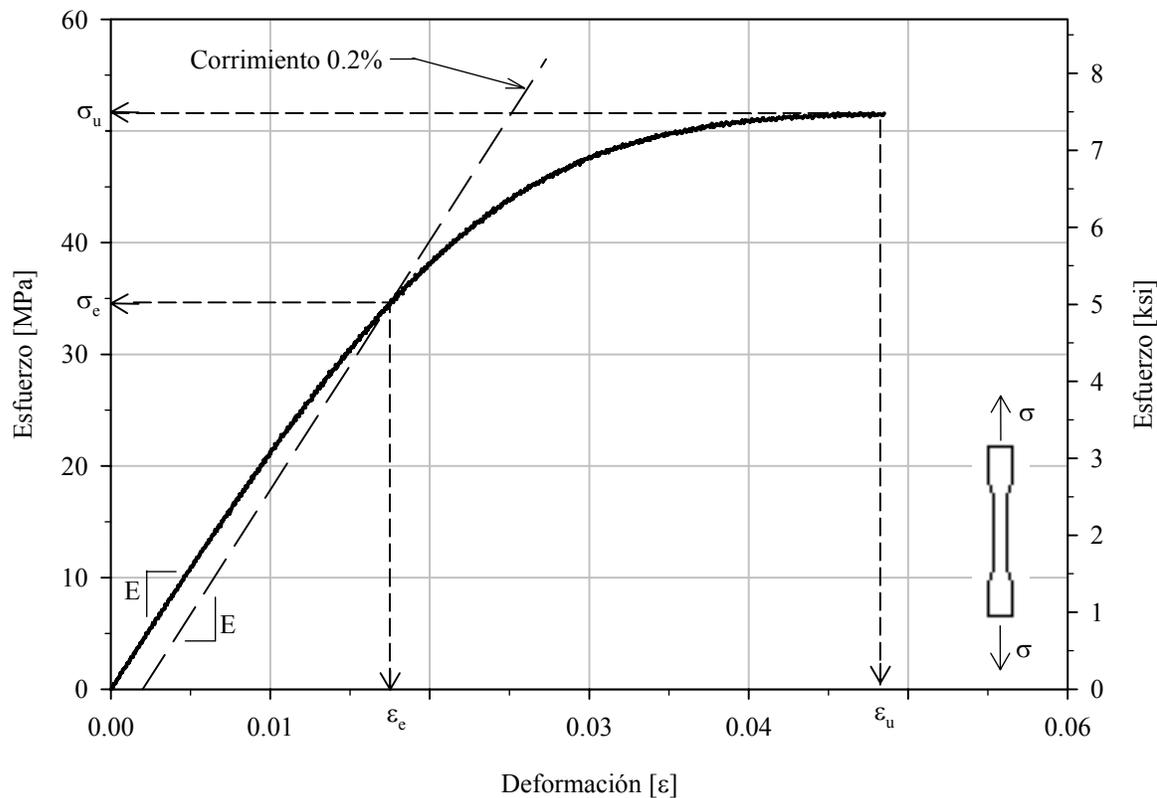


Figura 3.4. Esquema típico del diagrama esfuerzo-deformación en resina viniléster.

Tabla 3.7. Resultados ensayos de tensión longitudinal en resina viniléster.

Propiedad	Promedio	Desviación estándar	CV %
Límite elástico (0.2% $\epsilon$ )	32.98 MPa [4.78 ksi]	2.48 MPa [0.36 ksi]	7.50
Deformación elástica ( $\epsilon_e$ )	0.015	0.002	11.82
Esfuerzo último ( $\sigma_u$ )	47.40 MPa [6.88 ksi]	3.77 MPa [0.55 ksi]	7.96
Deformación última ( $\epsilon_u$ )	0.044	0.001	2.83
Módulo elástico ( $E$ )	2.52 MPa [365.88 ksi]	0.18 MPa [25.61 ksi]	7.00
Razón de Poisson ( $\nu$ )	0.399	0.002	0.39

Los diagramas esfuerzo-deformación de todas las muestras de resina ensayadas se presentan en la Figura 3.5. Se puede apreciar en el conjunto de curvas que la dispersión de la pendiente inicial es mucho menor que la de la pendiente final, lo que implica una mayor variabilidad en los resultados de la condición última del material.

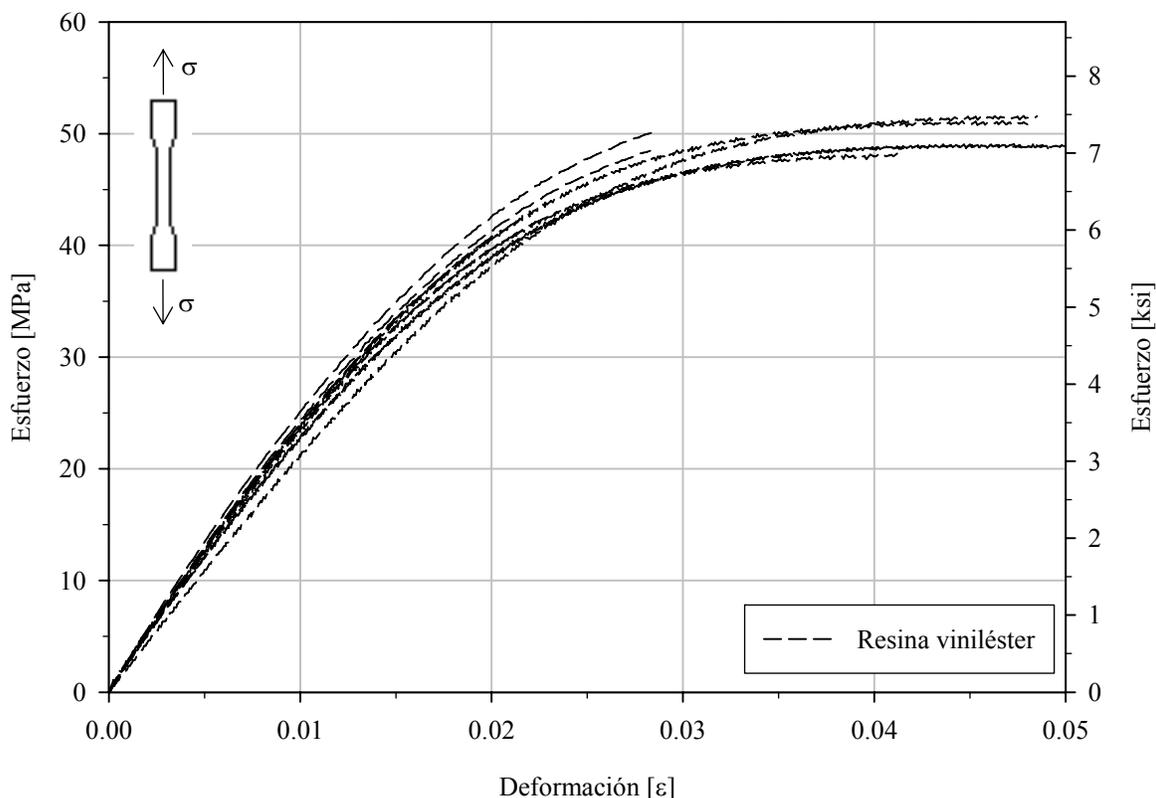


Figura 3.5. Diagramas esfuerzo- deformación de todas las muestras de resina viniléster.

En la Figura 3.6 se muestran las curvas representativas de las deformaciones longitudinal versus transversal utilizadas en la evaluación de la razón de Poisson. Los valores del esfuerzo último, deformación última, módulo elástico, razón de Poisson, y su correspondiente análisis estadístico, fueron tabulados para los dos tipos de laminados y se muestran en la Tabla 3.8 el muestreo incluyó un total de 20 especímenes de laminado bidireccional, 10 ensayados en la orientación de  $0^\circ$  y 10 en la orientación de  $90^\circ$ , respectivamente. Asimismo, un total de 14 muestras de laminado unidireccional fueron

ensayadas, 10 en la orientación  $0^\circ$  y cuatro en la orientación de  $90^\circ$ . Los diagramas esfuerzo-deformación de todas las muestras de laminado se presentan en la Figura 3.7.

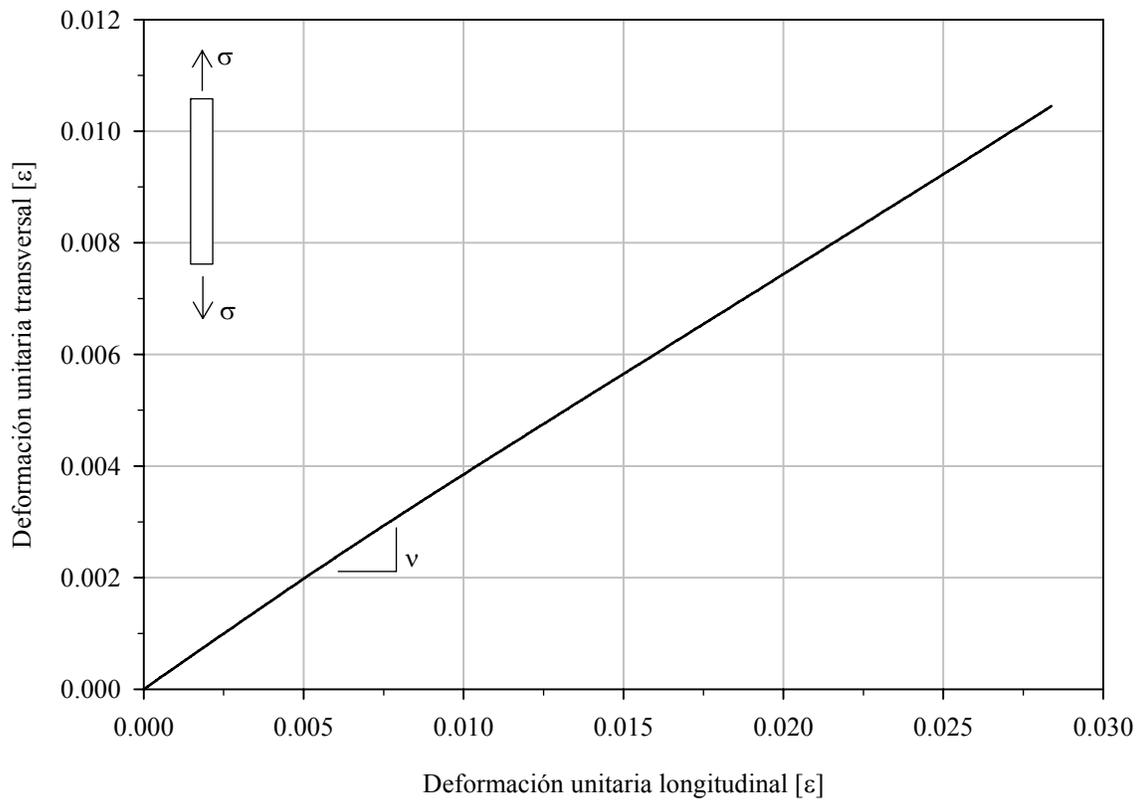


Figura 3.6. Diagrama típico de deformación transversal-deformación longitudinal para determinación de la razón de Poisson.

Tabla 3.8. Resultados ensayos de tensión longitudinal en el laminado.

Análisis estadístico	No. de muestras	Esfuerzo último		Módulo elástico		Deformación última [ε]	Razón de Poisson
		[MPa]	[ksi]	[GPa]	[ksi]		
Laminado bidireccional (orientación 0°)							
Promedio		333.48	48.37	21.61	3134	0.022	0.12
Desv. estándar	10	28.48	4.13	1.66	241	0.002	0.01
CV %		8.54	8.54	7.70	7.70	8.45	7.70
Laminado bidireccional (orientación 90°)							
Promedio		494.33	71.70	28.16	4085	0.020	0.14
Desv. estándar	10	38.00	5.51	1.20	174	0.001	0.02
CV %		7.69	7.69	4.25	4.25	6.97	11.22
Laminado unidireccional (orientación 0°)							
Promedio		612.07	88.77	35.91	5209	0.018	0.27
Desv. estándar	10	66.58	9.66	1.14	165	0.002	0.01
CV %		10.88	10.88	3.17	3.17	11.80	2.55
Laminado unidireccional (orientación 90°)							
Promedio		60.91	8.83	11.35	1646	-	-
Desv. estándar	4	1.34	0.19	1.44	210	-	-
CV %		2.20	2.20	12.73	12.73	-	-

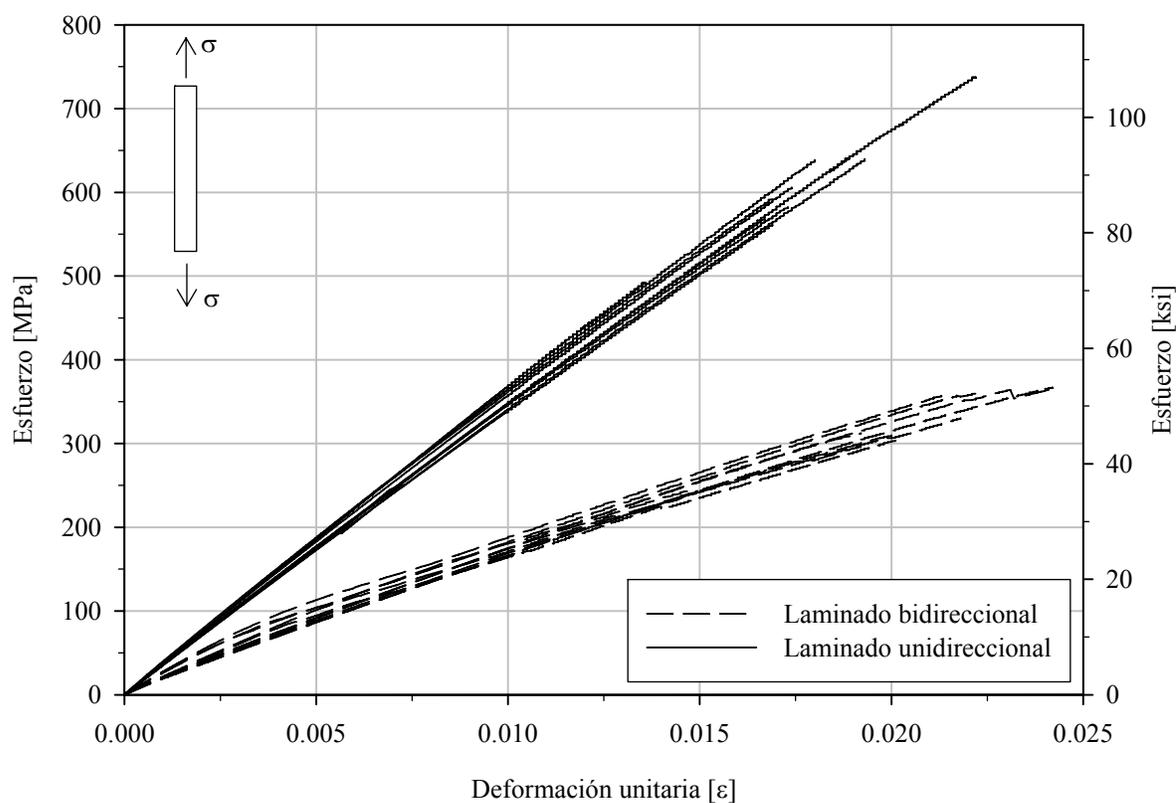


Figura 3.7. Diagramas esfuerzo-deformación de todas las muestras de laminado.

## CAPÍTULO 4

# EVALUACIÓN DE FATIGA Y HUMEDAD

---

### 4.1 Introducción

Existen limitados estudios en la literatura que evalúen los efectos a largo plazo de la exposición higrotérmica en el comportamiento a fatiga en materiales compuestos. Por tal razón se desarrolló un programa experimental diseñado para estudiar los efectos del envejecimiento por humedad en la vida a fatiga de los materiales caracterizados en el Capítulo 3. El programa experimental incluyó la preparación y acondicionamiento ambiental de las muestras, la determinación de los porcentajes de humedad de los especímenes en función del tiempo y los ensayos a fatiga bajo cargas de tensión-tensión con amplitud constante realizados a las muestras, tanto las de control como las envejecidas. Se realizó además el análisis de los resultados de las pruebas y los diagramas comparativos de las curvas tensión-vida de los materiales en función del tiempo de envejecimiento.

## **4.2 Exposición higrotérmica**

### **4.2.1 Preparación y condicionamiento de los especímenes**

Todas las muestras fueron cortadas con una sierra de disco de diamante para corte en húmedo. Las muestras de resina fueron llevadas a un taller de modelado donde se les dio la forma final y se suavizaron las superficies. Los bordes de los especímenes de laminado fueron pulidos utilizando papel lija de agua #600, para asegurar la uniformidad y prevenir fallas prematuras por defectos en los bordes.

Todos los especímenes fueron dispuestos en un horno a una temperatura de 40°C [104°F] durante un periodo de tiempo aproximado de 24 horas. Luego fueron conservadas en un contenedor con un agente desecante hasta el momento de sumergirlas. Este estado fue usado como referencia para la medición de la ganancia de peso de los especímenes envejecidos para el monitoreo de la absorción de humedad, tomada como parámetro del nivel de envejecimiento del material.

Para acelerar el proceso de absorción de humedad, las muestras fueron sumergidas en agua destilada a una temperatura de 40°C [104°F]. Se utilizó un tanque con capacidad para 50 galones, equipado con un calentador de 110 voltios y una bomba de circulación para mantener la temperatura constante en todo el tanque, el cual se muestra en la Figura 4.1. Para monitorear y mantener la temperatura deseada del agua se implementó un termostato digital externo. Las muestras fueron colocadas en anaqueles dispuestos para asegurar una absorción equivalente en todas las caras de las muestras y una máxima exposición de cada espécimen a las condiciones de envejecimiento. El periodo de sumersión varió de 50 a 500 días aproximadamente. La matriz de ensayos original incluía periodos de sumersión de 50, 100, 200, 300, 400 y 500 días, con  $\pm 7$  días de tolerancia. Por circunstancias ajenas a lo planeado,

estos periodos fueron modificados. Los tiempos de exposición para cada material se especifican en las secciones de resultados correspondientes.

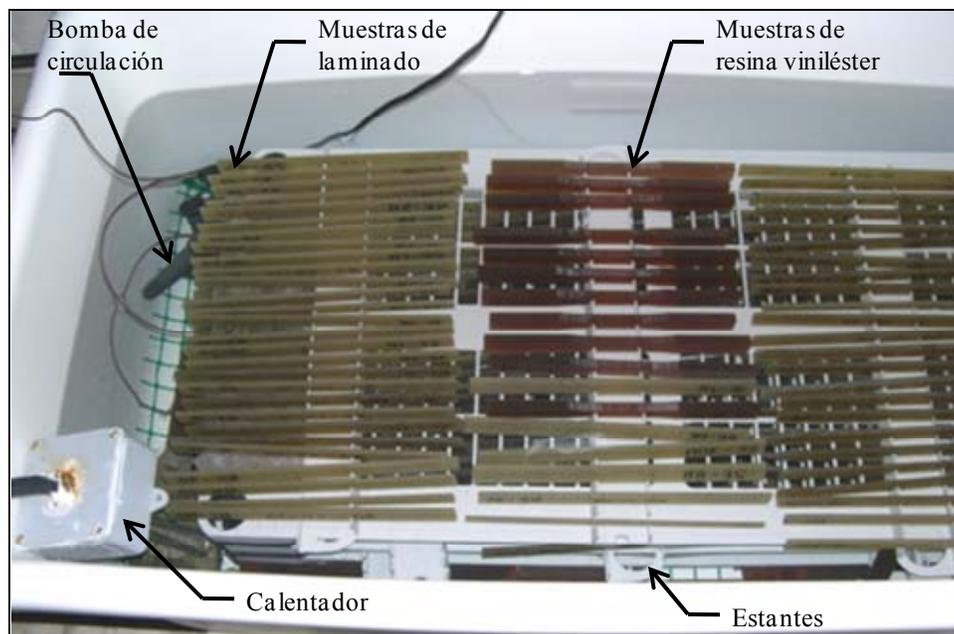


Figura 4.1. Tanque para envejecimiento de todas las muestras.

#### 4.2.2 Absorción de humedad

El análisis de la absorción de humedad se realizó tomando medidas gravimétricas empleando una balanza digital de precisión de cuatro dígitos decimales, para monitorear el peso de las muestras. Antes de ser ensayadas las muestras eran removidas del tanque, secadas superficialmente y pesadas. El porcentaje de absorción de humedad se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$\%H = \frac{W_f - W_i}{W_i} \times 100 \quad (4-1)$$

donde:

- $\%H$  = porcentaje de absorción de humedad
- $W_i$  = peso inicial de la muestra seca
- $W_f$  = peso final de la muestra sumergida

### 4.3 Metodología para la evaluación de la vida a fatiga

Las propiedades de fatiga de las muestras de control y los especímenes sometidos a envejecimiento, fueron evaluadas siguiendo el protocolo del estándar *ASTM D 3479*. Las muestras de laminado fueron ensayados solamente en la dirección longitudinal ( $0^\circ$ ).

En la Tabla 4.1 se muestran las dimensiones de las muestras utilizadas en los ensayos de vida a fatiga para los tres materiales utilizados en este estudio. Estas dimensiones se usaron siguiendo las recomendaciones del estándar *ASTM D 3479*.

Tabla 4.1. Dimensiones de las muestras para ensayo de vida a fatiga.

Tipo muestra	Tipo espécimen	Dimensiones promedio		
		[cm]	[pulg.]	
Resina viniléster	<i>Dog Bone</i>	Ancho <i>gage</i> :	1.91	0.75
		Ancho <i>grip</i> :	2.88	1.13
		Longitud:	25.40	10.00
		Espesor:	1.02	0.40
Laminado bidireccional	Rectangular	Ancho:	2.54	1.00
		Longitud:	27.94	11.00
		Espesor:	0.54	0.21
Laminado unidireccional	Rectangular	Ancho:	2.54	1.00
		Longitud:	27.94	11.00
		Espesor:	0.48	0.19

En la Figura 4.2 se muestra un esquema de la evolución de la carga cíclica, identificando los distintos parámetros necesarios para su caracterización, como el esfuerzo máximo ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ ), esfuerzo mínimo ( $\sigma_{m\acute{i}n}$ ), esfuerzo medio ( $\sigma_m$ ), amplitud de esfuerzo ( $\sigma_a$ ) y el período de carga. En la Tabla 4.2 se describen los parámetros anteriormente mencionados. El ensayo de vida a fatiga se ejecutó en control de carga, utilizando cargas cíclicas del tipo tensión-tensión con amplitud constante, con un índice de reversión ( $R = \sigma_{m\acute{i}n} / \sigma_{m\acute{a}x}$ ) de 0.10



Tabla 4.2. Parámetros del ensayo de vida a fatiga.

Parámetros	Descripción	
Clasificación de la carga	tensión - tensión	Tipo de carga
	amplitud constante	Espectro de carga-tiempo
Índice de reversión $R$	0.10	$\sigma_{min.} / \sigma_{max.}$
Frecuencia	5 Hz	Número de ciclos por segundo
Tipo de onda	Sinusoidal	Forma de la evolución de la carga
Niveles de carga ( $\sigma_{max}$ )	0.70	Esfuerzo máximo normalizado respecto al esfuerzo último a tensión del material ( $\sigma_{max} / \sigma_{ult}$ )
	0.50	
	0.30	
Esfuerzo medio $\sigma_m$	Ver Tabla 4.3	$(\sigma_{max.} + \sigma_{min.}) / 2$
Amplitud de esfuerzo $\sigma_a$	Ver Tabla 4.3	$(\sigma_{max.} - \sigma_{min.}) / 2$

Los valores del esfuerzo máximo, medio y la amplitud de esfuerzo utilizados en los ensayos de vida a fatiga se presentan en la Tabla 4.3, para los tres tipos de material y en función de los porcentajes del esfuerzo último usados.

Tabla 4.3. Parámetros de caracterización de la carga cíclica para cada material.

Nivel de esfuerzo ( $\sigma_{max} / \sigma_{ult}$ )	Esfuerzo máximo		Esfuerzo medio		Amplitud de esfuerzo	
	[ksi]	[MPa]	[ksi]	[MPa]	[ksi]	[MPa]
<b>Laminado unidireccional</b>						
0.70	60.92	420.04	33.51	231.02	27.41	189.02
0.50	43.52	300.03	23.93	165.01	19.58	135.01
0.30	26.11	180.02	14.36	99.01	11.75	81.01
<b>Laminado bidireccional</b>						
0.70	31.40	216.51	17.27	119.08	14.13	97.43
0.50	22.43	154.65	12.34	85.06	10.09	69.59
0.30	13.46	92.79	7.40	51.03	6.06	41.76
<b>Resina viniléster</b>						
0.70	4.81	33.16	2.64	18.24	2.16	14.92
0.50	3.44	23.68	1.89	13.03	1.55	10.66
0.30	2.06	14.21	1.13	7.82	0.93	6.39

\* Esfuerzo último a tensión en muestras no envejecidas. Ver sección 3.5.2.

Los ensayos fueron llevados a cabo utilizando un marco de carga MTS 810 de accionamiento hidráulico servo controlado con capacidad máxima de 244 kN [55 kips], con un controlador de circuito hidráulico Instron 8500 y mordazas mecánicas. Se dispuso de una malla de acero inoxidable tipo 304 con alambres de 0.11mm [0.0045 pulg.] de diámetro para prevenir el deslizamiento de las muestras en las mordazas durante el ensayo. Las medidas de deformación axial se realizaron usando un extensómetro con una longitud de calibración de 2.54 cm [1 pulg.]. Para generar la onda de carga se utilizó el programa SAX versión 7.1 de Instron. En la Figura 4.3 se muestra el equipo utilizado y un espécimen preparado para la prueba a fatiga. No se dispuso de ningún mecanismo para evitar la pérdida de humedad durante la prueba. En los especímenes que sobrepasaban las 12 horas de ensayos, las pruebas fueron llevadas a cabo interrumpiendo las mismas durante las noches, por normas de seguridad del laboratorio de estructuras del Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura de UPRM donde se ejecutaron las pruebas.

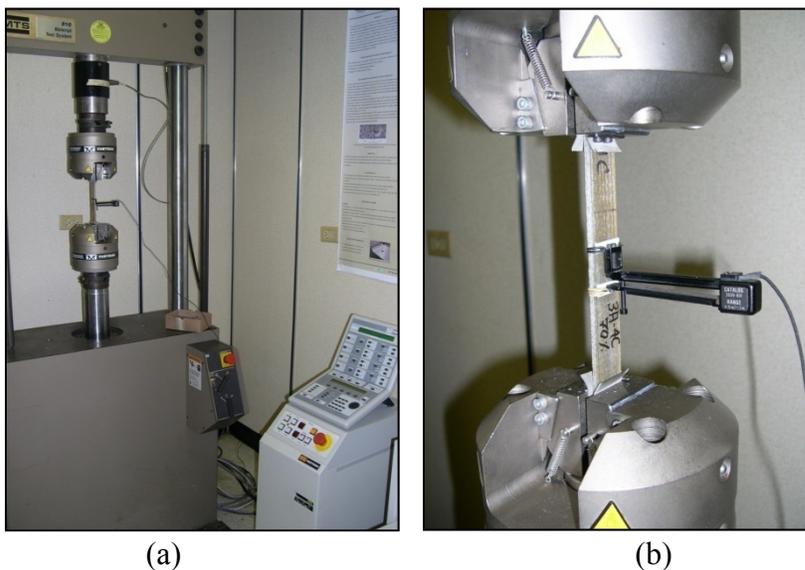


Figura 4.3. (a) Configuración del equipo utilizado. (b) Especimen listo para el ensayo.

## 4.4 Resultados experimentales

En esta sección se resumen y analizan los resultados de los ensayos de vida a fatiga para los tres tipos de materiales utilizados en este estudio, siguiendo la metodología expuesta en secciones anteriores. Se presenta además los valores gravimétricos de absorción de humedad en los especímenes envejecidos, los cuales fueron comparados con los resultados de Obando-Fuertes (2009), quien evaluó las características de absorción de humedad en especímenes de los mismos materiales utilizados en el presente estudio, sumergidos en agua destilada a 40 y 56 °C [104 y 133°F]. La totalidad de los resultados experimentales se presentan en el Apéndice A. Para caracterizar el comportamiento a fatiga de los materiales se realizaron los diagramas tensión-vida de los materiales en función del tiempo de envejecimiento. El eje de las ordenadas representa el esfuerzo máximo normalizado respecto al esfuerzo último a tensión en una escala lineal, mientras que el eje de las abscisas representa el número de ciclos registrados para llegar a falla en escala logarítmica con base 10. Las curvas S-N fueron trazadas utilizando el modelo de regresión por el método de los mínimos cuadrados, según la ecuación (4-2). Conjuntamente se calculó el coeficiente de correlación  $R^2$  correspondiente a cada curva para evaluar la bondad de ajuste del modelo de regresión a los datos experimentales.

$$\sigma_n = A \log N + B \quad (4-2)$$

donde:

$$\sigma_n = \sigma_{max} / \sigma_{ult}$$

$N$  = número de ciclos

$A$  = parámetro de la regresión (pendiente)

$B$  = parámetro de la regresión (intercepto)

Un problema persistente que se presentó en los ensayos de vida a fatiga de los materiales fue la falla en el borde de las mordazas. Este tipo de falla está asociada a la concentración de esfuerzos que concurren en esta área. Para tratar de disminuir la reincidencia de este tipo de falla en los especímenes se procedió a utilizar *tabs* de compuesto de fibra de vidrio-epoxi, adheridos al espécimen con adhesivo epoxi. Desafortunadamente el adhesivo epoxi fallaba antes de que se verificara la falla del espécimen, por lo que el uso de los *tabs* fue descartado. Otros autores también han reportado este problema como Iqbal (2001) y Post (2008). Se procedió a probar con las mallas de acero utilizadas en los ensayos de tensión, tratando de asegurar el mayor ajuste en las muelas mecánicas, con lo que se logró reducir la aparición de este tipo de falla.

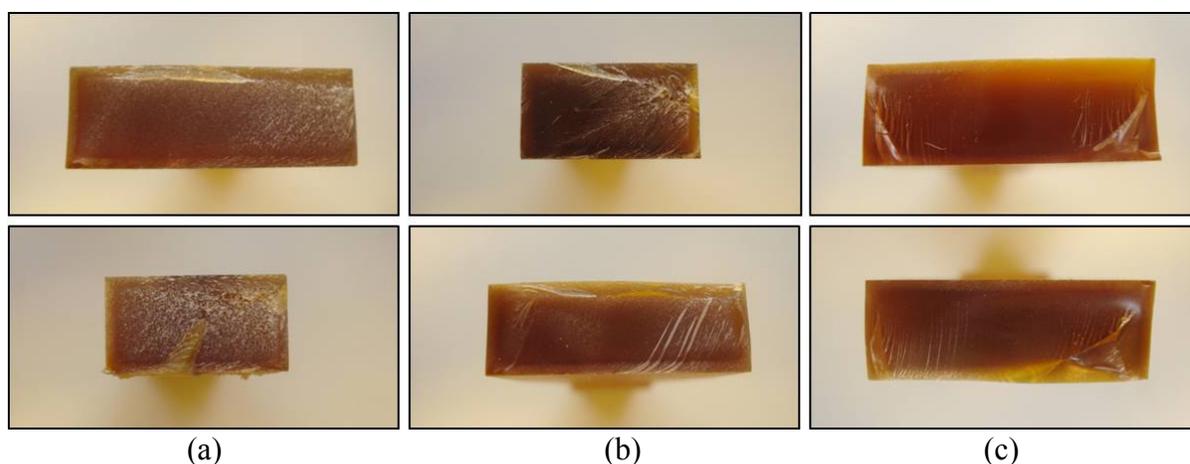
Se realizó un análisis estadístico de la vida a fatiga, llevado a cabo a través de un análisis de varianza (ANOVA), para verificar si los especímenes de control presentaban una diferencia estadísticamente significativa de las muestras envejecidas, a un nivel de significación ( $\alpha$ ) de 5%. Esta diferencia fue indicada por medio del valor de distribución  $F$ . Los resultados del análisis estadístico se presentan en el Apéndice B.

#### **4.4.1 Resina viniléster**

Fueron ensayadas tres muestras de control (estado inicial) para cada nivel de esfuerzo último a tensión (70%, 50% y 30%). De las muestras envejecidas fueron ensayadas dos especímenes para cada nivel de esfuerzo. Los especímenes sumergidos en agua destilada a una temperatura de 40°C [104°F] fueron ensayados en periodos de 68, 122, 215 y 509 días.

Las superficies de falla en los especímenes ensayados exponen un patrón característico de roturas por fatiga en materiales homogéneos. Se presentan dos superficies características, dependiendo de los niveles de esfuerzo: (1) una superficie granular,

correspondiente a una zona de rotura súbita, que ocurre cuando la sección resistente original es menor que la sección necesaria para soportar la sollicitación de carga. Esta falla es típica en niveles altos de esfuerzos, como se muestra en la Figura 4.4 (a) para los especímenes ensayados a 70% del esfuerzo último; (2) una superficie lisa, correspondiente a la rotura por fatiga neta, donde se reconocen las llamadas marcas de playa, las cuales tienen el aspecto de crestas paralelas, como se muestra en la Figura 4.4 (c) para los especímenes ensayados a 30% del esfuerzo último a tensión. En los especímenes ensayados a un nivel de esfuerzo de 50%  $\sigma_{ult}$  la superficie de falla muestra una combinación de los patrones de falla descritos anteriormente (Figura 4.4 (b)).



(a) (b) (c)  
 Figura 4.4. Superficies de falla en especímenes de resina viniléster.  
 (a) 70%  $\sigma_{ult}$  (b) 50%  $\sigma_{ult}$  (c) 30%  $\sigma_{ult}$ .

En la Tabla 4.4 se muestran los resultados del ensayo de fatiga, recopilando el promedio del número de ciclos a falla de los especímenes en función del esfuerzo máximo normalizado respecto al esfuerzo último a tensión del material. Se muestran además los promedios de los porcentajes de ganancia de humedad y días de exposición de las muestras. Debido a que la mayoría de los especímenes fallaron en la parte ancha del borde de la

sección, como se muestra en la Figura 4.5, estos resultados representarían un estimado conservador de la vida a fatiga para el material bajo estudio.



Figura 4.5. Muestras ensayadas de resina viniléster con falla en la parte ancha del espécimen.

Los resultados de absorción de humedad indican una tendencia progresiva continua, verificándose una ganancia de 0.54% respecto de las muestras de control para los primeros 68 días, como se muestra en la Tabla 4.4. En lo subsecuente se muestra un incremento menor en el porcentaje de humedad, presentándose un aumento respecto al anterior de 0.08%, 0.09% y 0.12% correspondientes a 122, 215 y 509 días de exposición, respectivamente. En la Figura 4.6 se muestran los promedios de los resultados de ganancia de humedad, conjuntamente con los datos de Obando-Fuertes (2009). La ganancia de humedad a través del tiempo coincide con los resultados experimentales mostrados por Obando-Fuertes (2009) e indican que no se ha alcanzado una humedad de saturación.

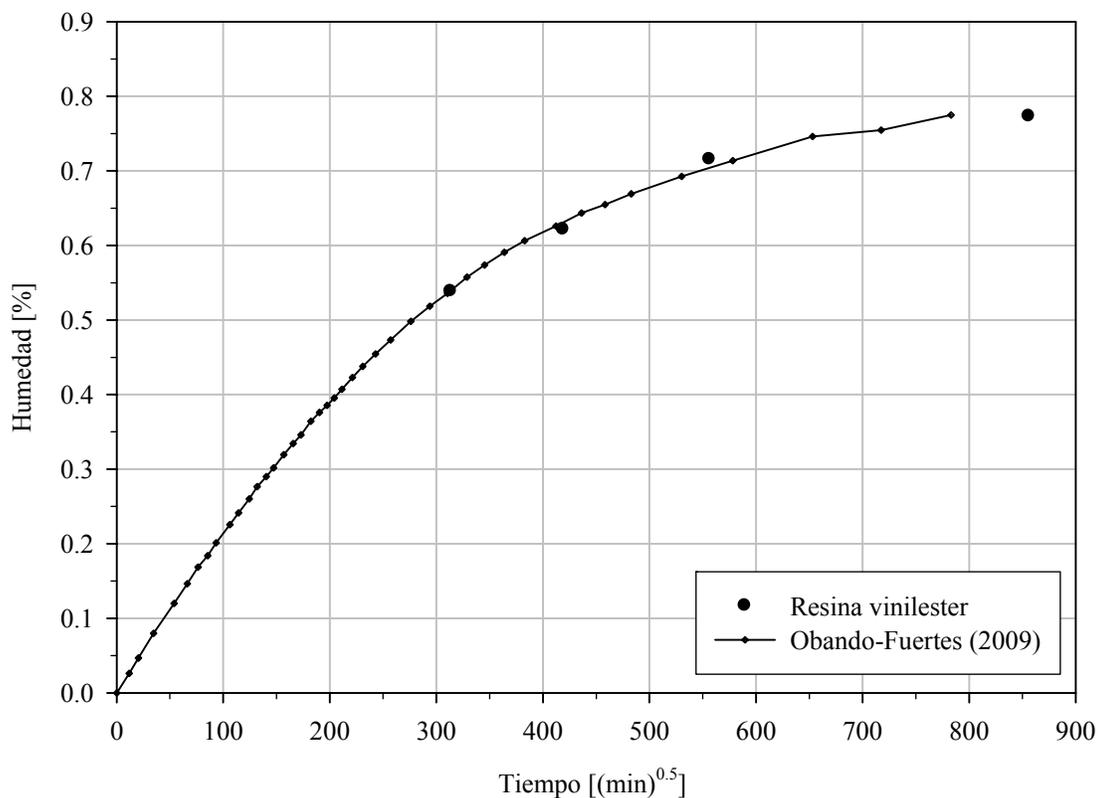


Figura 4.6. Comparación de los resultados promedio de ganancia de humedad con los datos publicados por Obando-Fuertes (2009) para resina viniléster.

La vida a fatiga de los especímenes envejecidos, mostrada en la Tabla 4.4, presenta una evidente disminución respecto a los especímenes de control y se verifica una degradación mayor de la esperanza de vida en los especímenes ensayados en el nivel de esfuerzo de  $30\% \sigma_{ult}$ . Los especímenes ensayados a 509 días de exposición muestran una disminución en la vida a fatiga en comparación con los especímenes de control. Sin embargo, presentan un aumento en el número de ciclos a falla respecto a las muestras ensayadas a 122 y 215 días de exposición para los niveles de esfuerzo de  $50\% \sigma_{ult}$  y  $70\% \sigma_{ult}$ .

El análisis de varianza (ANOVA) entre los resultados de los especímenes envejecidos y los especímenes de control demostró una diferencia estadísticamente significativa para un nivel de significancia de 5%. Los resultados del análisis estadístico se resumen en el Apéndice B.

Tabla 4.4. Resumen de los resultados de la ganancia de humedad y los ensayos de vida a fatiga en resina viniléster en función del esfuerzo máximo.

<b>Envejecimiento</b> <b>[días]</b>	<b>Humedad</b> <b>promedio [%]</b>	$\sigma_{max}/\sigma_{ult}$ <b>[%]</b>	<b>Número de</b> <b>Ciclos</b>
0	0.00	70	864
		50	5766
		30	117758
68	0.54	70	265
		50	1048
		30	9976
122	0.62	70	223
		50	721
		30	5927
215	0.72	70	229
		50	828
		30	5932
509	0.77	70	275
		50	951
		30	4285

#### 4.4.1.1 Curvas tensión – vida a fatiga para resina viniléster

Las curvas S-N para los especímenes de resina viniléster fueron trazadas según la ecuación (4-2), utilizando el método de los mínimos cuadrados. Estas se muestran en la Figura 4.7, donde están incluidas todas las curvas S-N para cada tiempo de exposición. Los especímenes de control muestran una marcada dispersión en los resultados de los ensayos al nivel de esfuerzo menor (30%  $\sigma_{ult}$ ).

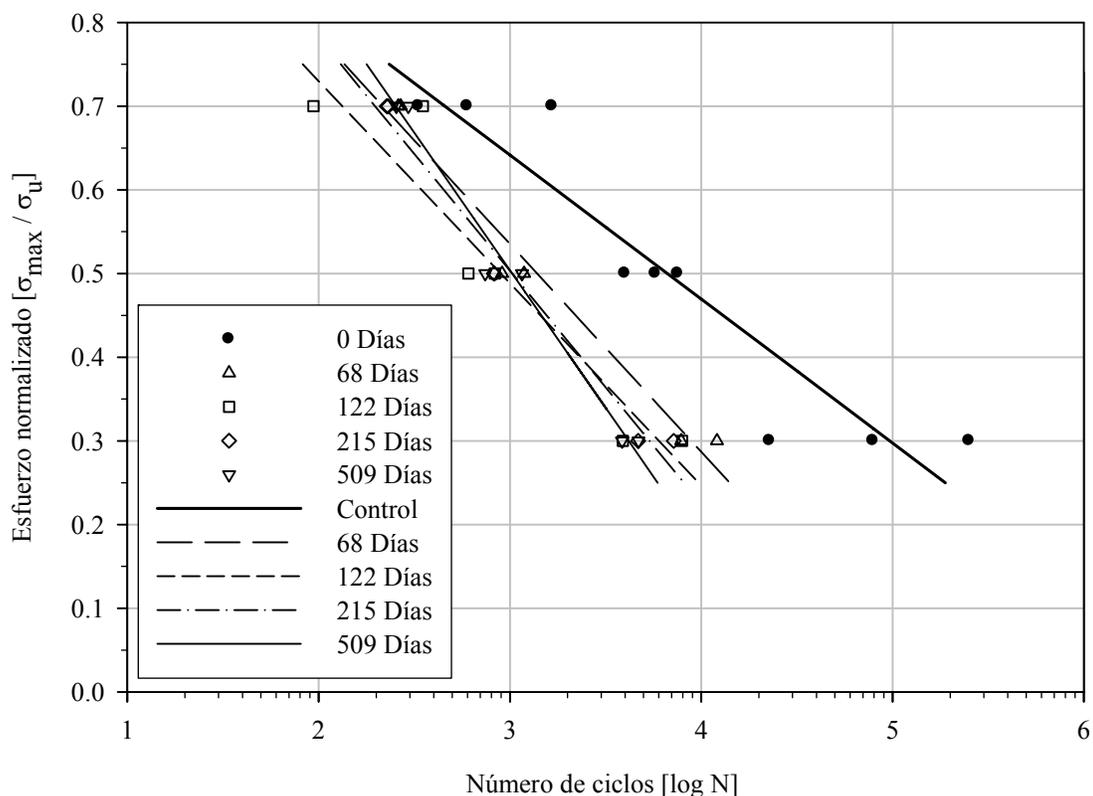


Figura 4.7. Curvas S-N para muestras de resina viniléster para distintos tiempos de envejecimiento.

Los valores de los parámetros de la regresión lineal con escala semi-logarítmica,  $A$  y  $B$ , para cada tiempo se muestran en la Tabla 4.5. Los especímenes de control reflejan el menor valor de pendiente ( $A = -0.17$ ) y la mayor dispersión de los datos ( $R^2 = 0.88$ ).

Tabla 4.5. Parámetros de la regresión lineal para curvas S-N en muestras de resina viniléster.

Envejecimiento [días]	$A$	$B$	$R^2$
0	-0.17	1.16	0.88
68	-0.25	1.28	0.97
122	-0.24	1.21	0.90
215	-0.28	1.34	0.98
509	-0.33	1.49	0.98

#### 4.4.2 Compuesto bidireccional

Para la determinación de las propiedades de vida a fatiga, para cada tiempo de exposición fueron ensayadas tres muestras por cada nivel de esfuerzo (70%-50%-30%  $\sigma_{ult}$ ), para un total de nueve especímenes por cada periodo de envejecimiento. Los especímenes sumergidos en agua destilada a una temperatura de 40°C [104°F] fueron ensayados en periodos de 60, 100, 208 y 504 días.

Los mecanismos de falla más recurrentes en las muestras de compuesto bidireccional fueron la delaminación y la rotura abrupta de las fibras. En la Figura 4.8 se presentan especímenes de compuesto bidireccional con marcada delaminación. La delaminación se presentó más frecuentemente en las muestras ensayadas a niveles altos de esfuerzos (70-50%  $\sigma_{ult}$ ). En laminados bidireccionales el mecanismo de daño dominante durante las primeras etapas de la fatiga es el agrietamiento de la matriz entre las láminas. Estas grietas, asociadas al incremento de los esfuerzos interlaminares, causan la falla de la interfase laminar lo que conduce a la delaminación (Harris, 2003; Talreja, 1987).

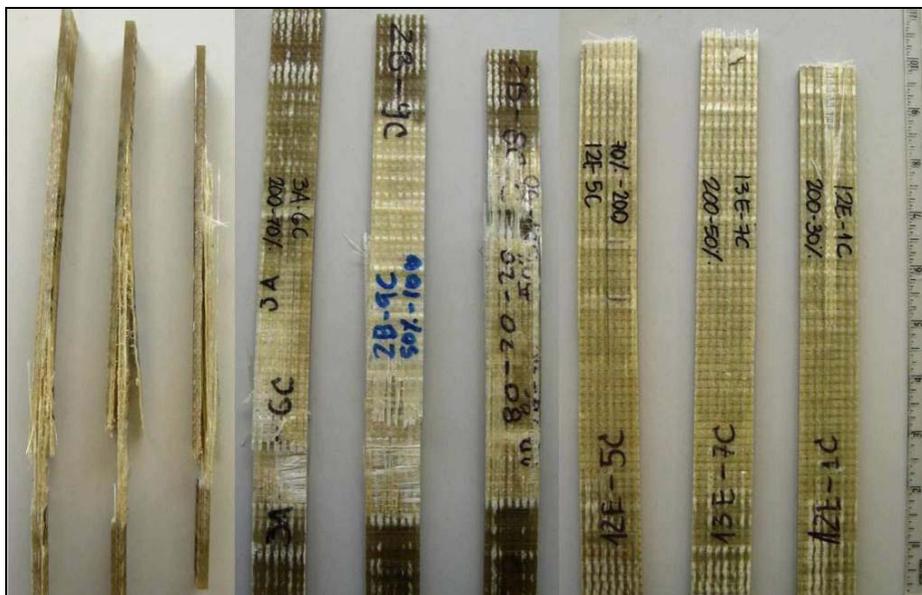


Figura 4.8. Fallas en especímenes de compuesto bidireccional ensayados bajo cargas cíclicas.

Los resultados del ensayo de fatiga y los porcentajes de ganancia de humedad en función de los días de exposición fueron recopilados en la Tabla 4.6. El monitoreo de la absorción de humedad no muestra una estabilización de la humedad y presenta valores ligeramente más altos que los publicados por Obando-Fuertes (2009), como se muestra en la Figura 4.9. La discrepancia podría radicar en la diferencia de dimensiones entre los especímenes de ambas investigaciones.

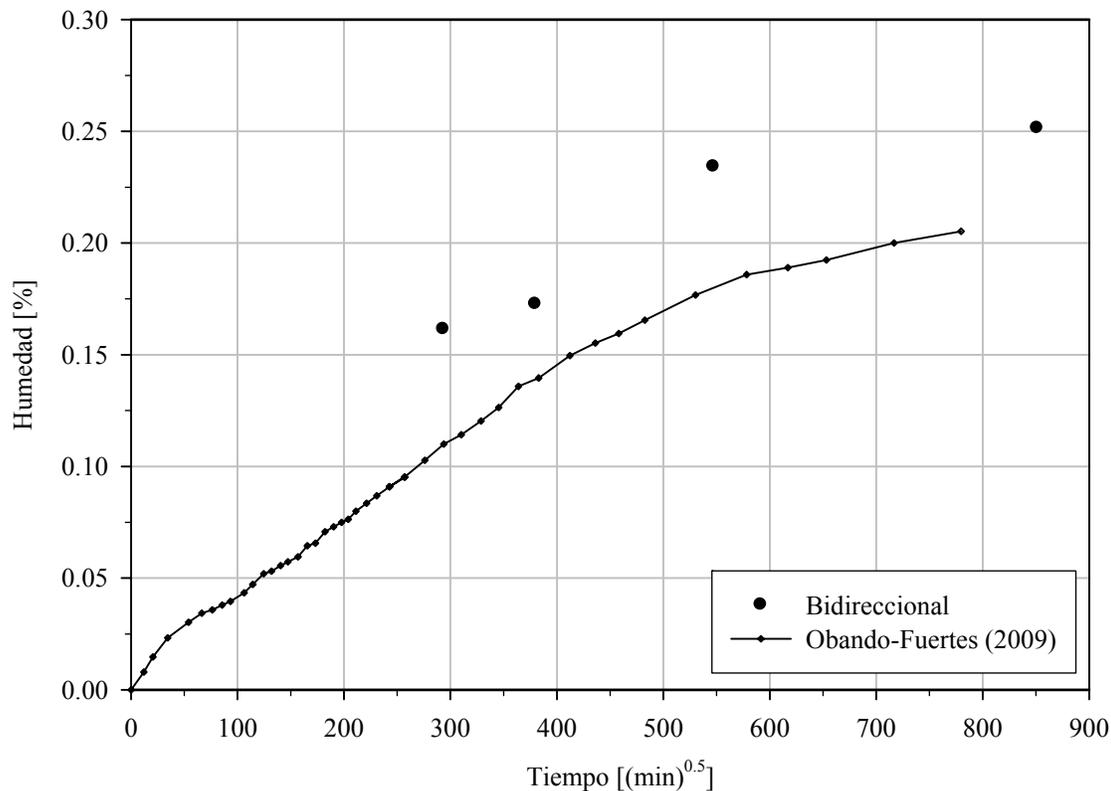


Figura 4.9. Comparación de los resultados promedio de ganancia de humedad con los datos publicados por Obando-Fuertes (2009) para el compuesto bidireccional.

Los especímenes ensayados a un nivel de esfuerzos de  $70\% \sigma_{ult}$  muestran una tendencia decreciente en la esperanza de vida a fatiga, representada por el número de ciclos en la Tabla 4.6. Mientras que los promedios de los resultados de las muestras ensayadas a  $50\%$  y  $30\%$  del esfuerzo último a tensión no manifiestan una tendencia concluyente.

Tabla 4.6. Resumen de los resultados de la ganancia de humedad y los ensayos de vida a fatiga en el compuesto bidireccional en función del esfuerzo máximo.

<b>Envejecimiento</b> <b>[días]</b>	<b>Humedad</b> <b>promedio [%]</b>	$\sigma_{max}/\sigma_{ult}$ <b>[%]</b>	<b>Número de</b> <b>ciclos</b>
0	0.00	70	405
		50	3759
		30	42518
60	0.16	70	213
		50	3247
		30	34837
100	0.17	70	156
		50	1553
		30	44106
208	0.23	70	135
		50	2887
		30	76905
504	0.25	70	126
		50	877
		30	30489

#### 4.4.2.1 Curvas tensión – vida a fatiga para compuesto bidireccional

Las curvas S-N para los especímenes de control, conjuntamente con datos de la literatura para compuestos bidireccionales se muestran en la Figura 4.10. El índice de reversión utilizado fue el mismo en todos los ensayos ( $R = 0.10$ ). Los resultados de los especímenes de control muestran buena correspondencia con los resultados de Phifer (1998) y Epaarachchi y Clausen (2003), a pesar de haber utilizado diferentes valores de frecuencia de carga en los ensayos. Distintos estudios sobre el efecto de la frecuencia de carga en el comportamiento a fatiga no han sido concluyentes debido a la variabilidad de los resultados experimentales (McBagonluri, 1998, Zhou *et al.*, 2007). El comportamiento a fatiga de los compuestos ha demostrado ser claramente dependiente de factores como el proceso de manufactura y el índice de reversión ( $R$ ) (Zhou *et al.*, 2007).

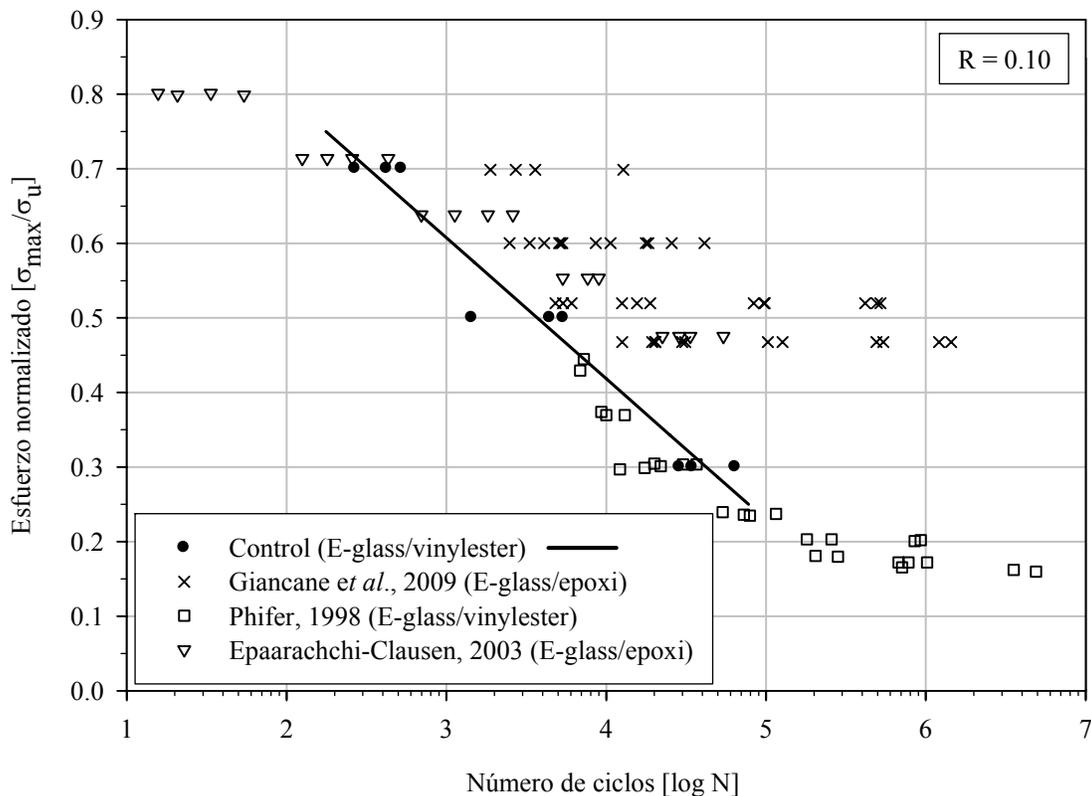


Figura 4.10. Comparación de las curvas S-N para muestras de control (sin condicionamiento) del compuesto bidireccional con la literatura.

Las curvas S-N para los especímenes envejecidos exhiben la tendencia general mostrada por los especímenes de control, como se muestra en la Figura 4.11. Los resultados muestran una ligera disminución en la vida a fatiga para los especímenes envejecidos respecto a las muestras de control.

Los parámetros de las regresiones para los resultados de los ensayos se resumen en la Tabla 4.7. Las pendientes de las curvas S-N de las muestras expuestas y las de control se muestran similares, lo que sugiere la existencia de un mecanismo común de daño para los diferentes niveles de exposición (McBagonluri, 1998). La mayor variación mostrada entre las pendientes de las curvas S-N fue de 26% entre los especímenes de control y las muestras expuestas por un periodo de 208 días.

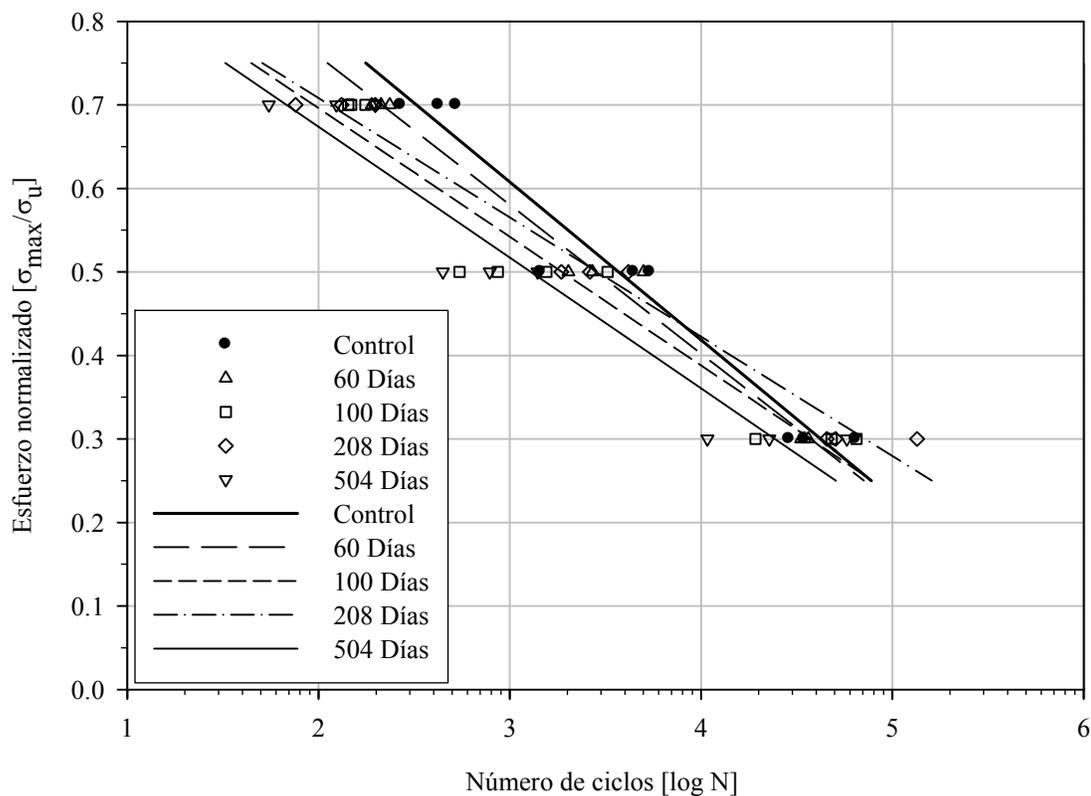


Figura 4.11. Curvas S-N para muestras de compuesto bidireccional para distintos tiempos de exposición.

Tabla 4.7. Parámetros de la regresión lineal para curvas S-N en muestras de compuesto bidireccional.

Envejecimiento [días]	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>
0	-0.19	1.17	0.95
60	-0.18	1.12	0.99
100	-0.15	1.00	0.92
208	-0.14	0.99	0.98
504	-0.16	0.99	0.92

El análisis de varianza (ANOVA) entre los resultados de los especímenes envejecidos y los especímenes de control no mostró una diferencia estadísticamente significativa para un nivel de significancia de 5%. Los resultados del análisis estadístico se resumen en el Apéndice B.

### 4.4.3 Compuesto unidireccional

Para la determinación de las propiedades de vida a fatiga, para cada tiempo de exposición fueron ensayadas tres muestras por cada nivel de esfuerzo ensayado. Los especímenes expuestos al envejecimiento higrotérmico fueron ensayados en periodos de 57, 110, 210 y 521 días.

En la Figura 4.12 se muestran las fallas de distintos especímenes de compuesto unidireccional, las cuales presentan un esquema semejante a las fallas por tensión del mismo material presentadas por Obando-Fuertes (2009) y se caracterizan por la progresión de una grieta paralela a la dirección de la carga. En algunos casos, la grieta se inició en el borde de la muestra con fractura de fibras que acarrearán la falla del espécimen. Iqbal (2001) presentó este tipo de falla como característica de compuestos unidireccionales.

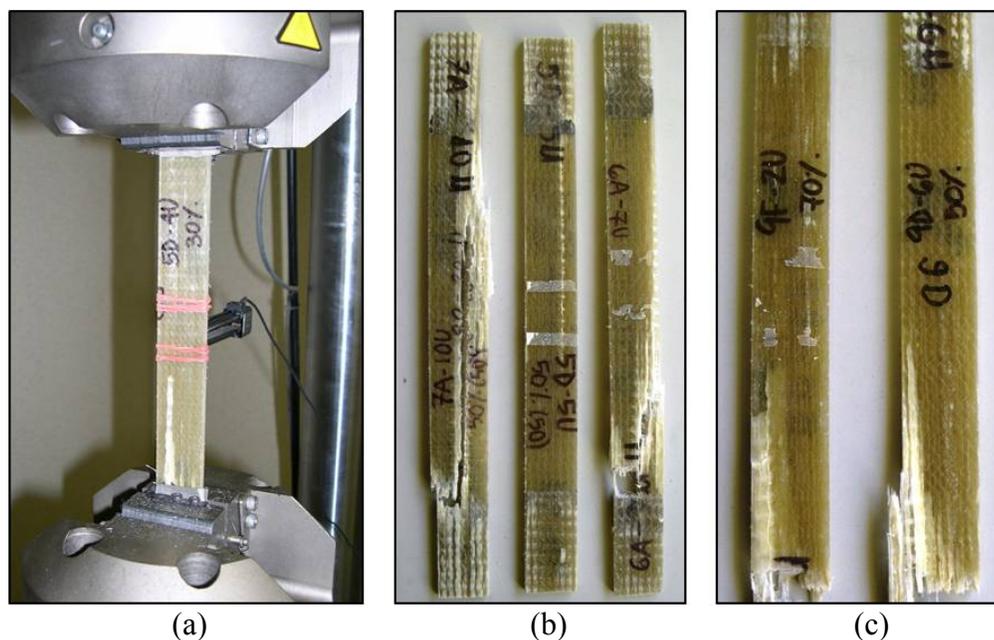


Figura 4.12. Fallas en especímenes de compuesto unidireccional.

(a) Muestra después de falla en pórtico de carga.

(b) (c) Especímenes muestran grietas en dirección paralela a la carga.

Tabla 4.8. Resumen de los resultados de la ganancia de humedad y los ensayos de vida a fatiga en el compuesto unidireccional en función del esfuerzo máximo.

<b>Envejecimiento</b> <b>[días]</b>	<b>Humedad</b> <b>promedio [%]</b>	$\sigma_{max}/\sigma_{ult}$ <b>[%]</b>	<b>Número de</b> <b>ciclos</b>
0	0.00	70	2033
		50	9876
		30	388259
57	0.16	70	846
		50	8114
		30	537521
110	0.20	70	333
		50	5032
		30	303306
210	0.24	70	214
		50	4533
		30	151050
521	0.25	70	26
		50	2003
		30	99984

En la Tabla 4.8 se muestran en resumen los resultados del ensayo de fatiga y los porcentajes de absorción de humedad en función del tiempo de exposición. Los especímenes de compuesto unidireccional presentan una ganancia de humedad equivalente a la mostrada por los especímenes de compuesto bidireccional y no evidencian una saturación de humedad para el periodo de tiempo sometidos a envejecimiento. Los promedios de ganancia de humedad presentan una aceptable correlación con los datos publicados por Obando-Fuertes (2009) como se muestra en la Figura 4.13. El número de ciclos presenta un constante decrecimiento para los niveles de esfuerzo de 50 y 70% del esfuerzo último a tensión. La degradación mayor de la vida a fatiga se verifica en los especímenes ensayados en el nivel de esfuerzo de 70%  $\sigma_{ult}$ .

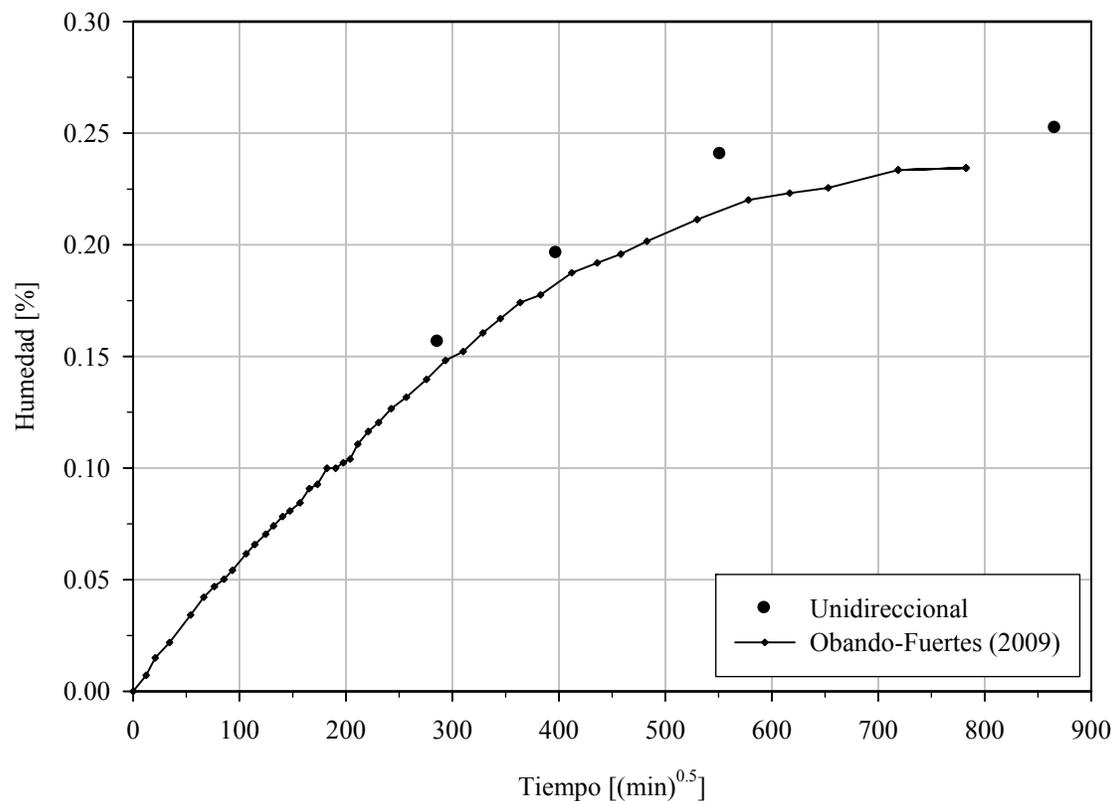


Figura 4.13. Comparación de los resultados promedio de ganancia de humedad con los datos publicados por Obando-Fuertes (2009) para el compuesto unidireccional.

#### 4.4.3.1 Curvas tensión – vida a fatiga para compuesto unidireccional

Las curvas S-N para los especímenes unidireccionales de control presentan una elevada correlación con los datos de compuestos unidireccionales encontrados en la literatura ensayados para una misma relación de esfuerzos ( $R = 0.10$ ), como se muestra en la Figura 4.14.

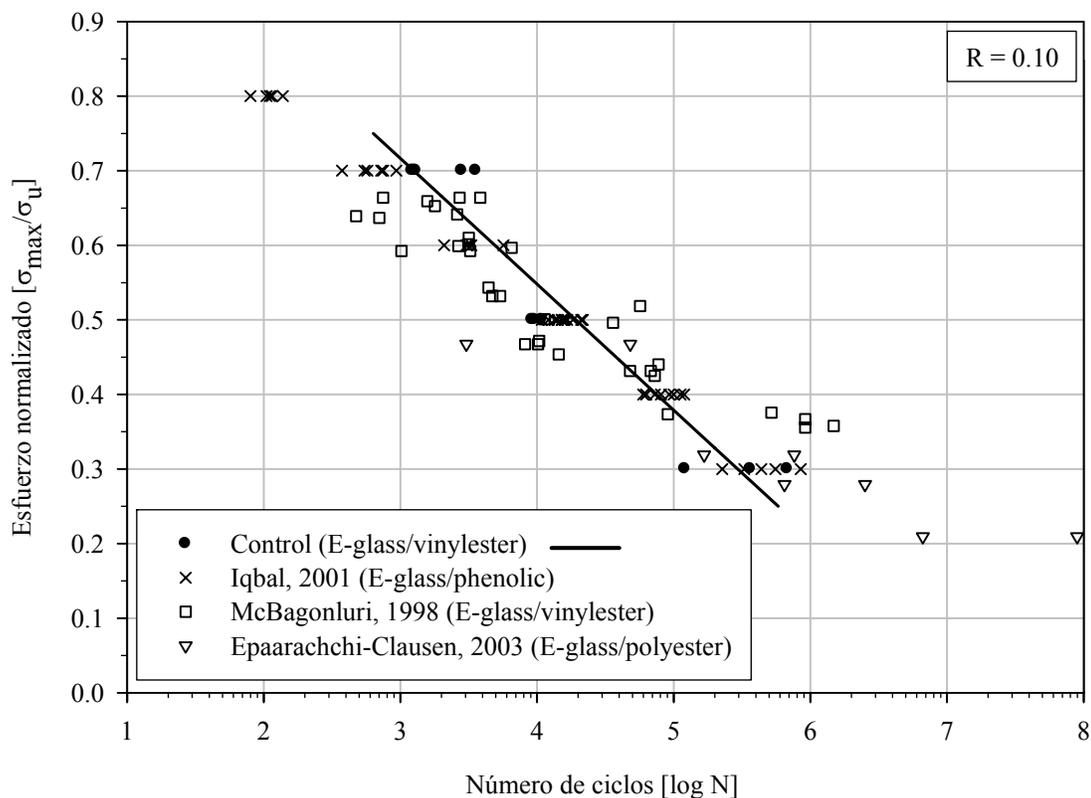


Figura 4.14. Comparación de las curvas S-N para muestras de control del compuesto unidireccional con la literatura.

Las curvas relacionando el esfuerzo normalizado y el número de ciclos para los especímenes de compuesto unidireccional se muestran en la Figura 4.15. Los resultados de las pruebas realizadas a los 521 días presentan una marcada diferencia respecto a los resultados de las pruebas de control y expuestas al tratamiento ambiental por periodos de 57, 110 y 210 días, como evidencia el decrecimiento en los valores de la pendiente de las curvas S-N mostradas en la Tabla 4.9.

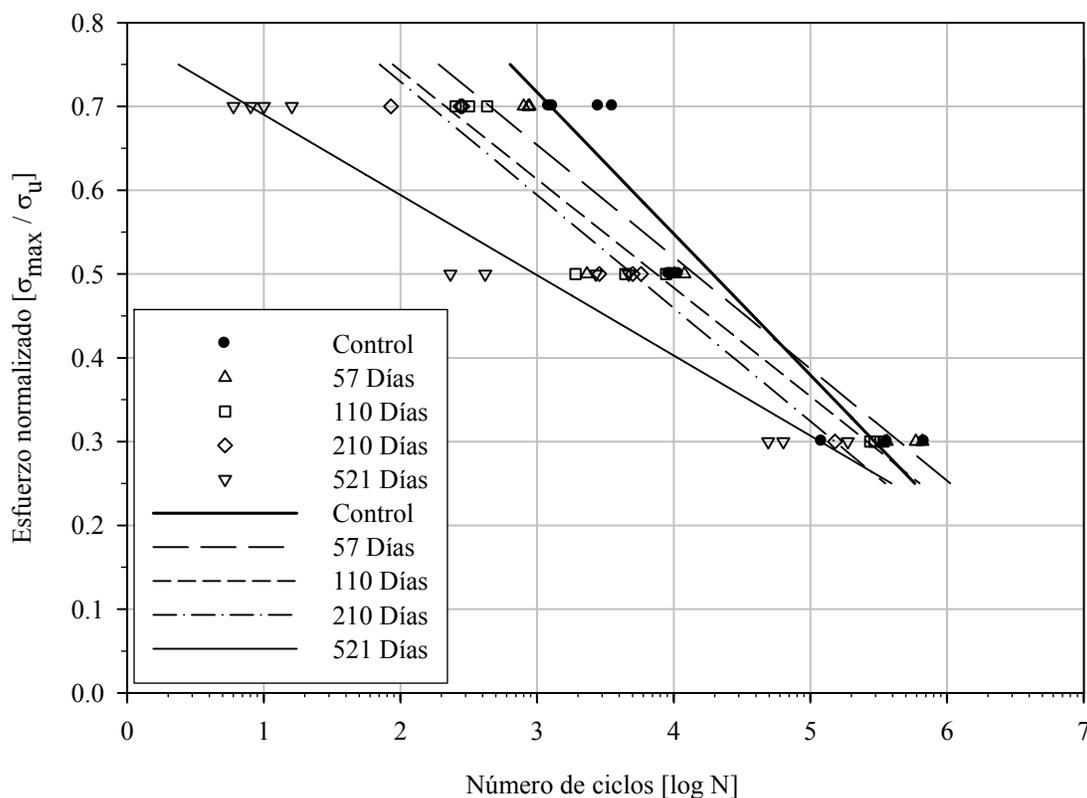


Figura 4.15. Curvas S-N para muestras de compuesto unidireccional para distintos tiempos de envejecimiento.

Tabla 4.9. Parámetros de la regresión lineal para curvas S-N en muestras de compuesto unidireccional.

Envejecimiento [días]	A	B	R <sup>2</sup>
0	-0.17	1.22	0.92
57	-0.13	1.05	0.93
110	-0.13	1.00	0.96
210	-0.14	1.00	0.97
521	-0.10	0.79	0.95

El análisis de varianza (ANOVA) entre los resultados de los especímenes envejecidos y los especímenes de control del compuesto unidireccional comprobó una diferencia estadísticamente significativa para un nivel de significación de 5%. Los resultados del análisis estadístico se presentan en el Apéndice B.

## 4.5 Micrografías electrónicas de rastreo

Las superficies de fractura de los especímenes de laminado bidireccional ensayados a fatiga fueron analizadas utilizando un microscopio electrónico de rastreo (*SEM*, por sus siglas en inglés). Las micrografías para los especímenes de control y envejecidas durante 100 y 504 días se muestran en las Figuras 4.16, 4.17 y 4.18, respectivamente. La superficie de fractura para los especímenes de control muestran las fibras embebidas en la resina (Figura 4.16a), lo que sugiere que la interfase fibra-matriz conservó su integridad. Las superficies de falla en las muestras envejecidas mostraron una degradación progresiva en la interfase fibra-resina, evidenciando el debilitamiento de la interfase por efecto del ingreso de humedad al material. Esto se verifica por los escasos residuos de resina adheridas a las superficies de las fibras en la micrografía mostrada en la Figura 4.18(b).

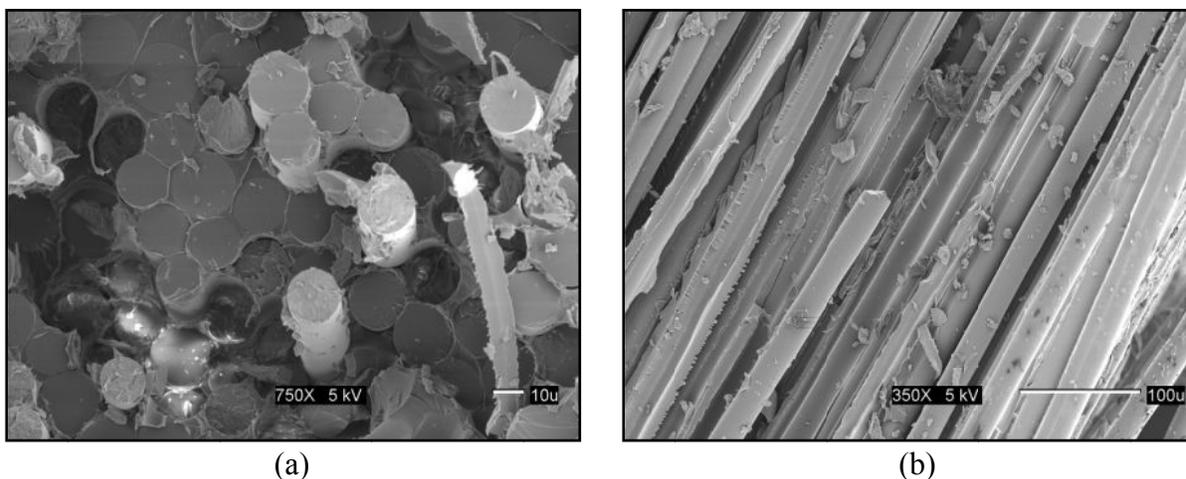


Figura 4.16. Micrografía *SEM* de la superficie de falla en un espécimen de laminado bidireccional de control ensayado a un nivel de esfuerzo de  $30\% \sigma_{ult}$ . (a) sección perpendicular a las fibras, (b) sección paralela a las fibras.

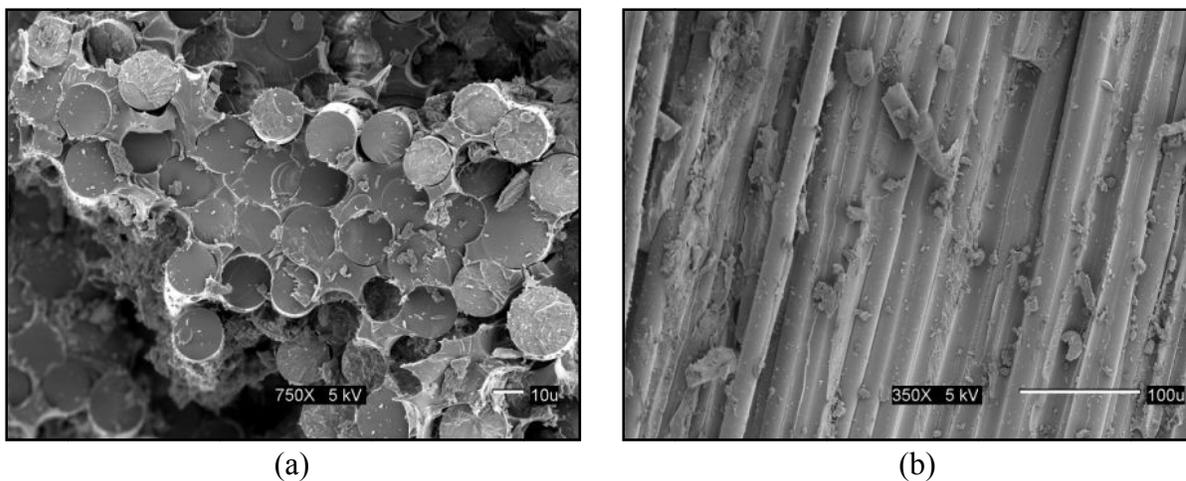


Figura 4.17. Micrografía *SEM* de la superficie de falla en especímenes de laminado bidireccional envejecidos durante 100 días ensayado a un nivel de esfuerzo de 30%  $\sigma_{ult.}$ : (a) sección perpendicular a las fibras, (b) sección paralela a las fibras.

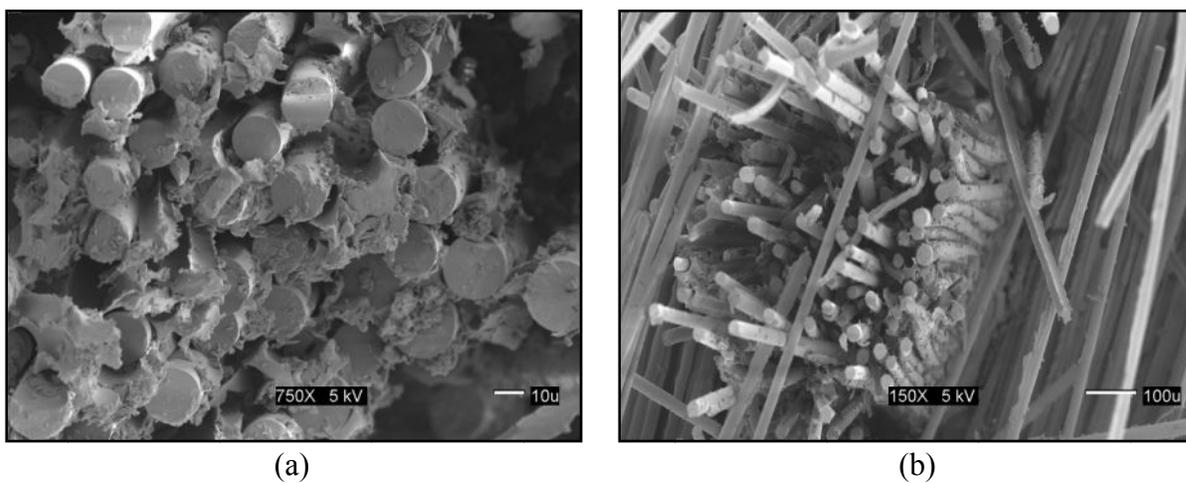


Figura 4.18. Micrografía *SEM* de la superficie de falla en especímenes de laminado bidireccional envejecidos durante 504 días ensayado a un nivel de esfuerzo de 50%  $\sigma_{ult.}$ : (a) y (b) sección perpendicular a las fibras.

# CAPÍTULO 5

## ANÁLISIS EMPÍRICO

---

### 5.1 Introducción

La comprensión del fenómeno de la fatiga en materiales compuestos es crucial para muchas de sus aplicaciones en infraestructuras civiles, por lo que el desarrollo de modelos y metodologías que permitan caracterizar el material para obtener una aproximación racional de la esperanza de vida posibilita aplicaciones más eficientes de estos materiales.

En general, el desarrollo de un modelo racional de predicción de vida para un material se compone de varias etapas: (1) una observación experimental del proceso de acumulación y la definición de una métrica de daño, (2) la formulación de un modelo de acumulación de daño y la caracterización experimental de los parámetros del modelo, (3) el desarrollo de un procedimiento de adición de degradación basado en la métrica de daño para predecir la vida bajo cargas cíclicas generales, y (4) la verificación experimental de las

predicciones de vida (Sendekyj, 1990). De acuerdo a Mayugo (2003) los modelos dirigidos a estimar la esperanza de vida de un compuesto pueden dividirse en dos grandes categorías, según a qué nivel estructural se estudien los sucesos de daño y degradación: (a) los modelos macroscópicos, basados en un estudio empírico del comportamiento del material y (b) los modelos mecanicistas, donde se consideran los mecanismos microestructurales que se establecen entre los diferentes constituyentes del compuesto.

En este capítulo se presenta una metodología para el tratamiento de la degradación causada por la aplicación de cargas cíclicas en los materiales estudiados y la verificación de los resultados obtenidos. Esta metodología, establecida a partir del análisis de los resultados experimentales presentados en el capítulo anterior, permitirá integrar los efectos del condicionamiento higrotérmico en las propiedades a fatiga del material. Existen limitados trabajos de investigación que incorporen los efectos a largo plazo del envejecimiento en la evolución de la fatiga y para el conocimiento de la autora ninguno de ellos engloba conjuntamente la modelación numérica, como se mostró en el Capítulo 2 (Revisión de literatura). Con la modelación presentada a continuación se busca aportar significativamente en el área de predicción de vida a fatiga y contribuir al desarrollo de la confiabilidad en la duración de los materiales compuestos. La metodología se basa en investigaciones previas presentadas por Helmi (2006) y Epaarachchi y Clausen (2003).

## 5.2 Metodología de modelación

### 5.2.1 Modelo empírico de Epaarachchi-Clausen (2003)

En el Capítulo 4 se mostraron los resultados experimentales de las pruebas de fatiga para tres niveles de esfuerzos. Las curvas S-N fueron trazadas en el plano a semi-logarítmico utilizando el modelo de regresión lineal. Verificando los valores del parámetro  $B$ , que representa el intercepto con el eje de las ordenadas (Tabla 4.5, Tabla 4.7, Tabla 4.9), en la mayoría de los casos la relación de esfuerzos  $\sigma_{max} / \sigma_{ult}$  resultó ser mayor que la unidad para una vida a fatiga de un ciclo (equivalente a tensión monotónica). Por lo que para caracterizar íntegramente la curva S-N de los materiales es más eficaz un modelo no lineal, pero muchos de ellos requieren un volumen considerable de datos experimentales y precisan rangos más amplios de niveles de esfuerzo de ensayo.

Epaarachchi y Clausen (2003) implementaron un modelo empírico que describe la degradación de la resistencia de un compuesto sometido a cargas cíclicas con amplitud y frecuencia constantes. El método parte de una ecuación determinística para desarrollar una sencilla función no lineal que representa el rango completo de la razón de esfuerzos  $\sigma_{max}/\sigma_{ult}$ . El modelo tiene dos variables,  $\alpha$  y  $\beta$ , que requieren ser determinados en base a los datos experimentales. La principal ventaja de este modelo consiste en que, para la determinación de los parámetros de ajuste, requiere una cantidad de ensayos relativamente pequeña para un solo valor de índice de reversión ( $R$ ) y varios niveles de esfuerzos. Además, el método permite predecir la vida a fatiga para valores de frecuencias e índices de reversión ( $R$ ) distintos a los usados en la calibración de los parámetros de ajuste. A continuación las ecuaciones propuestas por Epaarachchi y Clausen (2003):

$$D = \left( \frac{\sigma_{ult}}{\sigma_{max}} - 1 \right) \left( \frac{\sigma_{ult}}{\sigma_{max}} \right)^{0.6 - \psi |\sin\theta|} \left[ \frac{1}{(1 - \psi)^{1.6 - \psi |\sin\theta|}} \right] f^\beta \quad (5-1)$$

$$\frac{D}{\alpha} = (N^\beta - 1) \quad (5-2)$$

donde:  $\sigma_{ult}$  = esfuerzo último a tensión del material

$\sigma_{max}$  = esfuerzo máximo aplicado en el ensayo a fatiga

$\psi = R$  para  $-\infty < R < 1$  (tensión-tensión y tensión-compresión)

$\psi = 1 / R$  para  $1 < R < \infty$  (compresión-compresión)

$\theta$  = ángulo menor entre la dirección de la carga y la orientación de las fibras

$f$  = frecuencia de aplicación de carga

$N$  = número de ciclos

$\alpha$  y  $\beta$  = parámetros de ajuste de las curvas S-N (constantes del material)

Los valores de los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  fueron obtenidos mediante el método de prueba y error. Para cada serie de datos experimentales se determinó el valor de  $D$  y  $(N^\beta - 1)$  según las ecuaciones (5-1) y (5-2), para un valor de prueba del parámetro  $\beta$ . Estos valores fueron graficados con  $(N^\beta - 1)$  en el eje de las abscisas y  $D$  en el eje de las ordenadas como se muestra en la Figura 5.1, y los datos se ajustaron con una regresión lineal con una ordenada en el origen igual a cero. Este procedimiento fue repetido para distintos valores de  $\beta$  hasta obtener la regresión lineal con mejor ajuste, determinado a través del coeficiente de correlación  $R^2$ . El valor del parámetro  $\alpha$  fue calculado como la pendiente de la línea de regresión. Estos valores fueron usados para implementar la incorporación de los efectos del condicionamiento higrótico al modelo y para graficar las curvas S-N.

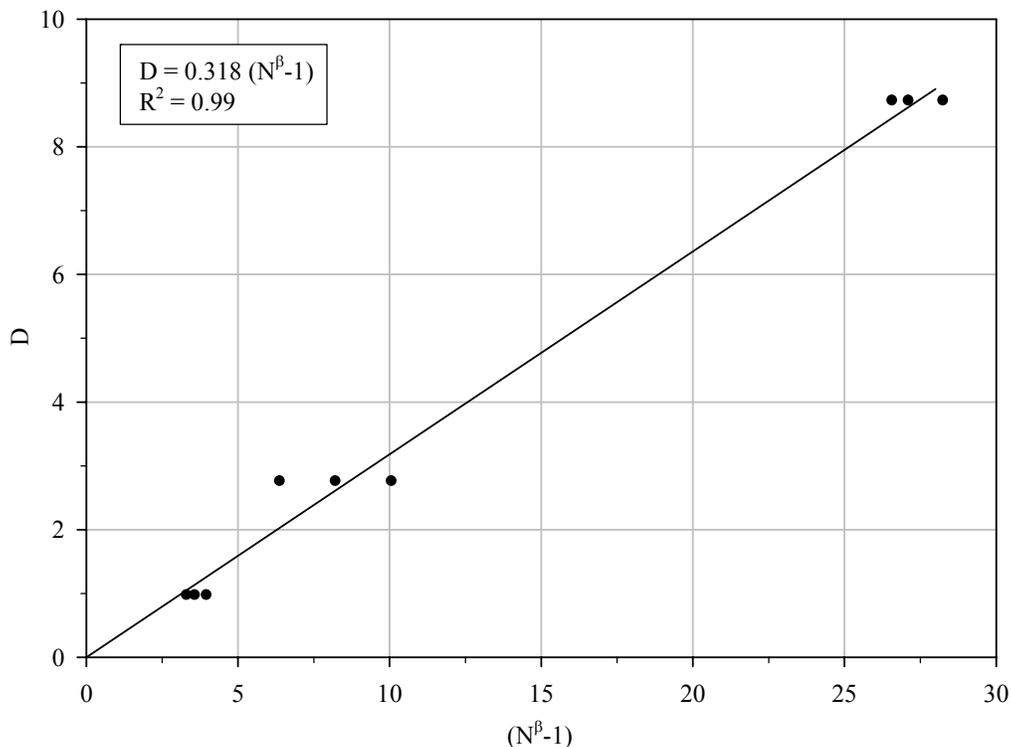


Figura 5.1. Estimación de los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  para los resultados de los especímenes de laminado unidireccional envejecidos durante 110 días.

### 5.2.2 Incorporación de los efectos del condicionamiento higrotérmico en el modelo de predicción de vida a fatiga

Para la incorporación de los efectos del condicionamiento higrotérmico a la metodología descrita anteriormente, los parámetros de ajuste  $\alpha$  y  $\beta$  fueron adoptados como agentes de la métrica de daño en el material, estudiando su evolución en función del tiempo de envejecimiento y del porcentaje de ganancia de humedad.

Los valores de los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  fueron agrupados para cada serie experimental, como se muestra en la Tabla 5.1. Luego estos valores fueron graficados, disponiendo en el eje de las ordenadas los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$ , y en eje de las abscisas los periodos de exposición higrotérmica o los porcentajes de absorción de humedad. Los gráficos se evaluaron para

varios modelos de regresión, tanto lineales como no lineales, hasta obtener las curvas de mejor ajuste para cada parámetro. En la Figura 5.2 se muestra una síntesis del análisis anteriormente expuesto, presentando el parámetro de ajuste  $\beta$  graficado en función del tiempo de envejecimiento (Figura 5.2 (a)) y del porcentaje de ganancia de humedad (Figura 5.2 (b)). Se indica además la ecuación de regresión con mejor ajuste y el valor del coeficiente de correlación  $R^2$  correspondiente.

Tabla 5.1. Valores de  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $R^2$  para los especímenes de control.

Envejecimiento [días]	Humedad promedio [%]	$\alpha$	$\beta$	$R^2$
<b>Resina viniléster</b>				
0	0.00	0.09	0.41	0.85
68	0.54	0.13	0.50	0.97
122	0.62	0.33	0.40	0.89
215	0.72	0.11	0.56	0.96
509	0.84	0.04	0.75	0.98
<b>Compuesto bidireccional</b>				
0	0.00	0.15	0.40	0.93
60	0.16	0.10	0.46	0.99
100	0.17	0.44	0.29	0.93
208	0.23	0.41	0.28	0.94
504	0.25	0.70	0.25	0.90
<b>Compuesto unidireccional</b>				
0	0.00	0.21	0.30	0.90
57	0.16	0.27	0.27	0.98
110	0.20	0.32	0.27	0.99
210	0.24	0.25	0.31	0.99
521	0.25	0.95	0.19	0.92

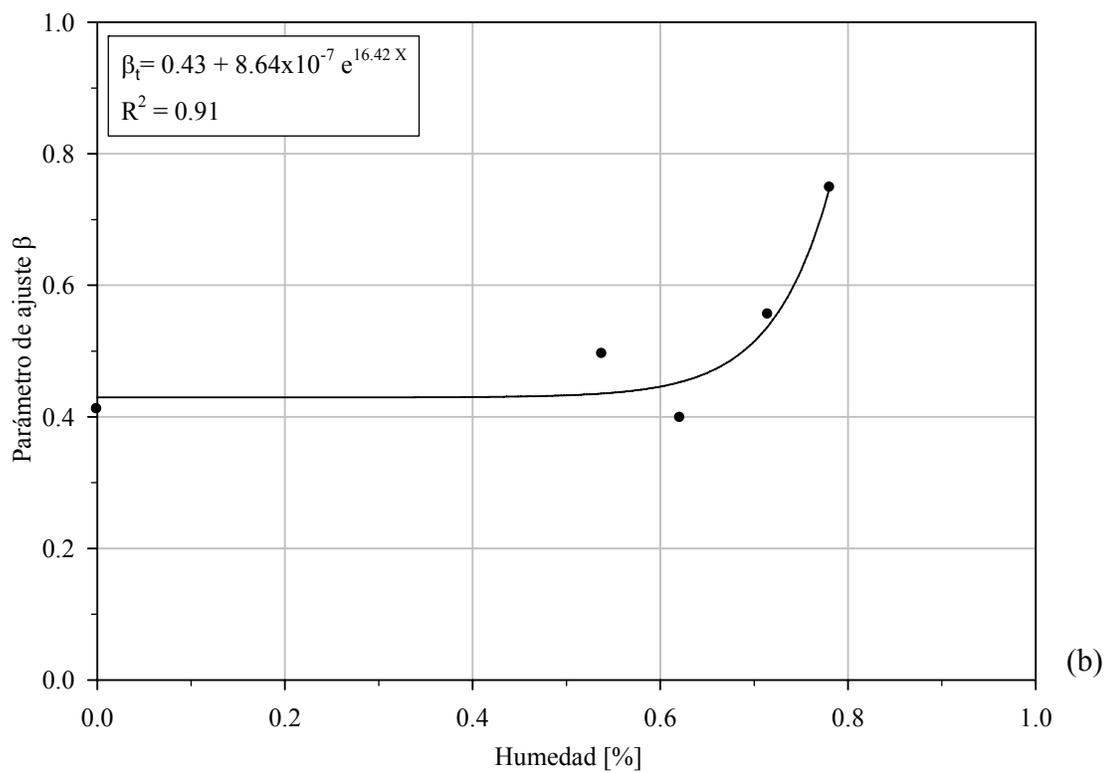
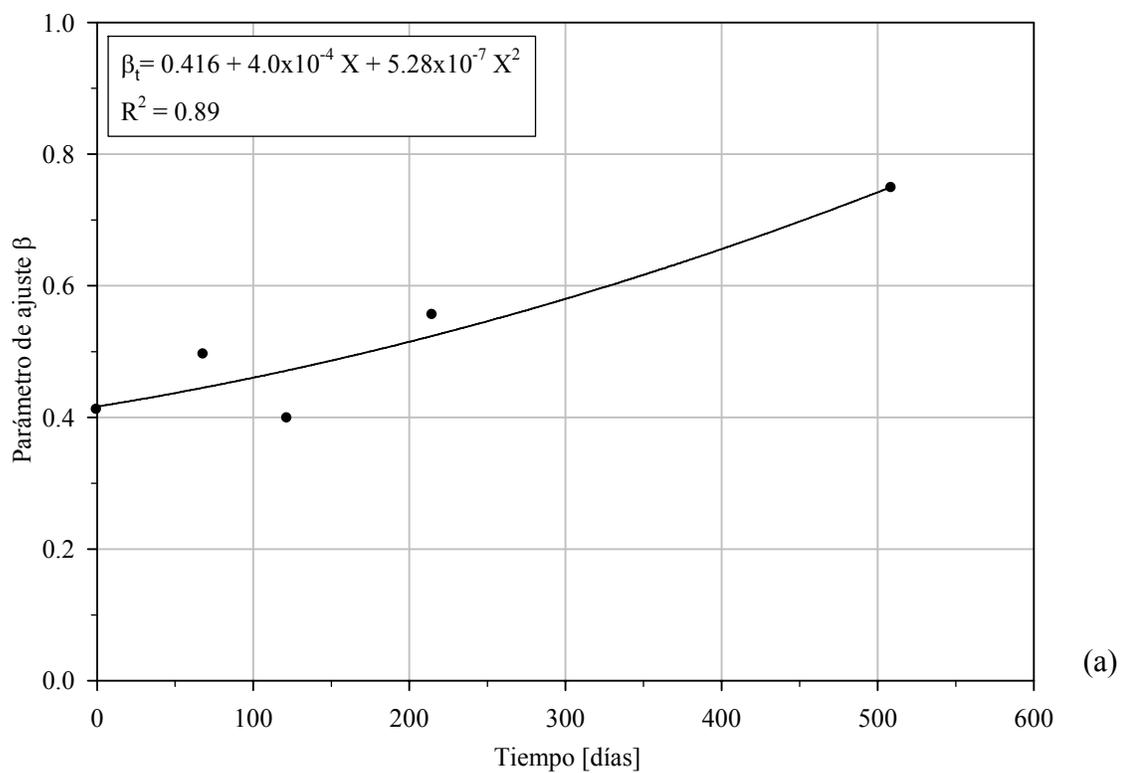


Figura 5.2. Variación del parámetro de ajuste  $\beta$  para muestras de resina viniléster (a) en función del tiempo de exposición higratérmica y (b) en función del porcentaje de humedad.

En la Tabla 5.2 se recopilan las ecuaciones que representan los parámetros teóricos para cada material. En el análisis de los especímenes de resina viniléster, la regresión polinomial cuadrática se presentó como la curva con mejor ajuste para los parámetros en función del tiempo de envejecimiento, mientras que el modelo de regresión exponencial de tres variables mostró la mejor correlación con los datos experimentales en función del porcentaje de absorción de humedad. Para los especímenes de compuesto bidireccional y unidireccional la regresión polinomial cuadrática se presentó como la curva con mejor ajuste para ambas variables (tiempo de envejecimiento y porcentaje de humedad).

Tabla 5.2. Ecuaciones según el modelo de regresión de mejor ajuste para los parámetros  $\alpha_t$  y  $\beta_t$ , determinadas en base a los datos experimentales.

<b>Ecuación</b>		<b>Modelo de regresión</b>
<b>Resina viniléster</b>		
(5-3)	$\beta_t = 0.42 + 4.0 \times 10^{-4} T + 5.28 \times 10^{-7} T^2$	Polinomial cuadrática
(5-4)	$\alpha_t = 0.12 + 8.0 \times 10^{-4} T - 1.94 \times 10^{-6} T^2$	Polinomial cuadrática
(5-5)	$\beta_t = 0.43 + 8.65 \times 10^{-7} e^{16.42H}$	Exponencial
(5-6)	$\alpha_t = 0.17 - 0.51 e^{24.88H}$	Exponencial
<b>Compuesto bidireccional</b>		
(5-7)	$\beta_t = 0.43 - 1.0 \times 10^{-3} T + 1.26 \times 10^{-6} T^2$	Polinomial cuadrática
(5-8)	$\alpha_t = 0.13 + 1.80 \times 10^{-3} T - 1.37 \times 10^{-6} T^2$	Polinomial cuadrática
(5-9)	$\beta_t = 0.40 + 0.81H - 5.62 \times 10^{-6} H^2$	Polinomial cuadrática
(5-10)	$\alpha_t = 0.16 - 2.29H + 16.40H^2$	Polinomial cuadrática
<b>Compuesto unidireccional</b>		
(5-11)	$\beta_t = 0.28 + 2.0 \times 10^{-4} T - 6.19 \times 10^{-7} T^2$	Polinomial cuadrática
(5-12)	$\alpha_t = 0.25 - 4.0 \times 10^{-4} T + 3.31 \times 10^{-6} T^2$	Polinomial cuadrática
(5-13)	$\beta_t = 0.29 - 1.82 \times 10^{-2} H - 0.71H^2$	Polinomial cuadrática
(5-14)	$\alpha_t = 0.21 - 2.72H + 17.31H^2$	Polinomial cuadrática
Donde:	T = tiempo de envejecimiento [días]	
	H = humedad [%]	

Las curvas S-N para cada tiempo de envejecimiento fueron trazadas a partir de los valores teóricos del número de ciclos ( $N_t$ ) calculados según la ecuación (5-15), conjuntamente con los parámetros de ajuste  $\alpha_t$  y  $\beta_t$  calculados según la ecuación correspondiente para cada material. Los resultados de la modelación analítica fueron comparados con la respuesta experimental de los especímenes ensayados.

$$N_t = \left( \frac{D}{\alpha_t} + 1 \right)^{\frac{1}{\beta_t}} \quad (5-15)$$

donde:  $N_t$  = número de ciclos teórico

$D$  = variable evaluada según ecuación (5-1)

$\alpha_t$  y  $\beta_t$  = parámetros de ajuste teóricos

### 5.3 Comparación del modelo con los datos experimentales

Los resultados de la modelación empírica fueron comparados con la respuesta experimental de los especímenes ensayados para cada periodo de tiempo de condicionamiento higrotérmico. En cada gráfica, conjuntamente con los resultados experimentales, se presentan dos curvas S-N: la línea sólida representa la curva S-N calculada en base a la variación de los parámetros de ajuste  $\alpha_t$  y  $\beta_t$  respecto al tiempo de exposición higrotérmica de los especímenes, mientras que la línea punteada representa la curva S-N deducida del cambio en los parámetros de ajuste por la degradación del material por la absorción de humedad.

### 5.3.1 Resina viniléster

En la Figura 5.3 a Figura 5.7 se muestran las curvas S-N analíticas evaluadas en función del tiempo de envejecimiento y del porcentaje de ganancia de humedad, conjuntamente con los datos experimentales. En general, las predicciones del modelo en función del tiempo de exposición muestran una mejor correlación con los resultados experimentales que las curvas S-N derivada de la variación en el contenido de humedad.

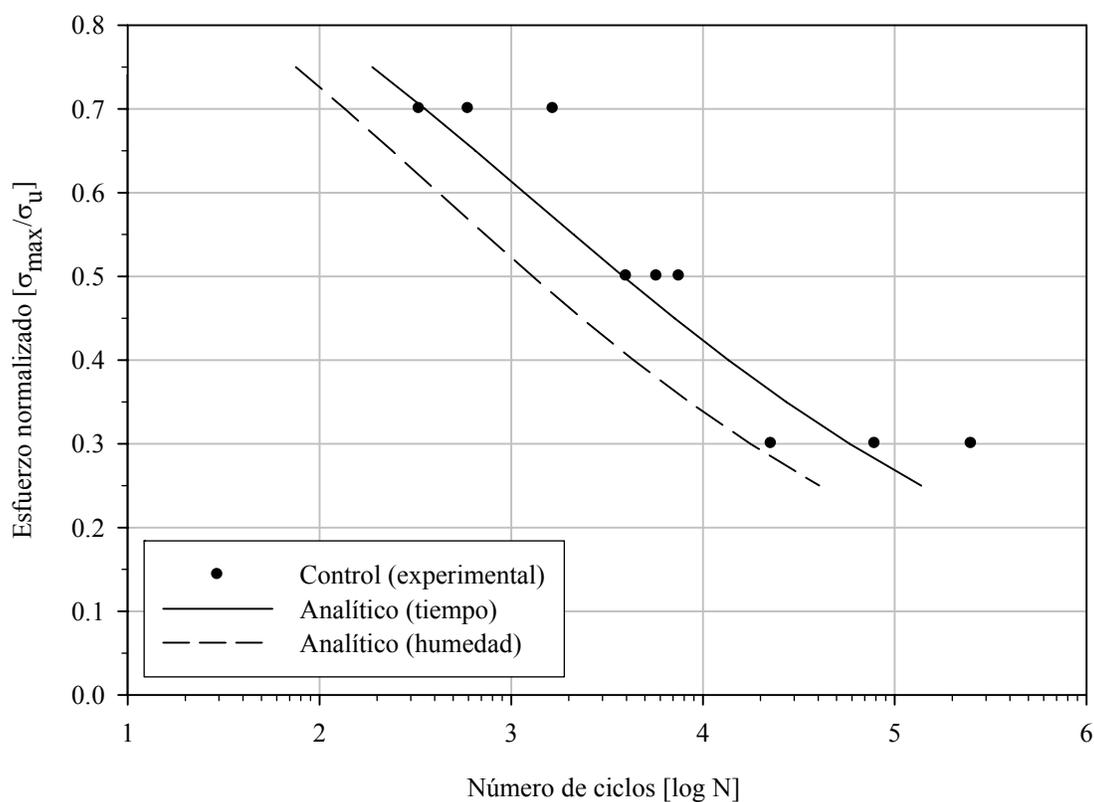


Figura 5.3. Comparación de los resultados experimentales con el modelo analítico para los especímenes de control de resina viniléster.

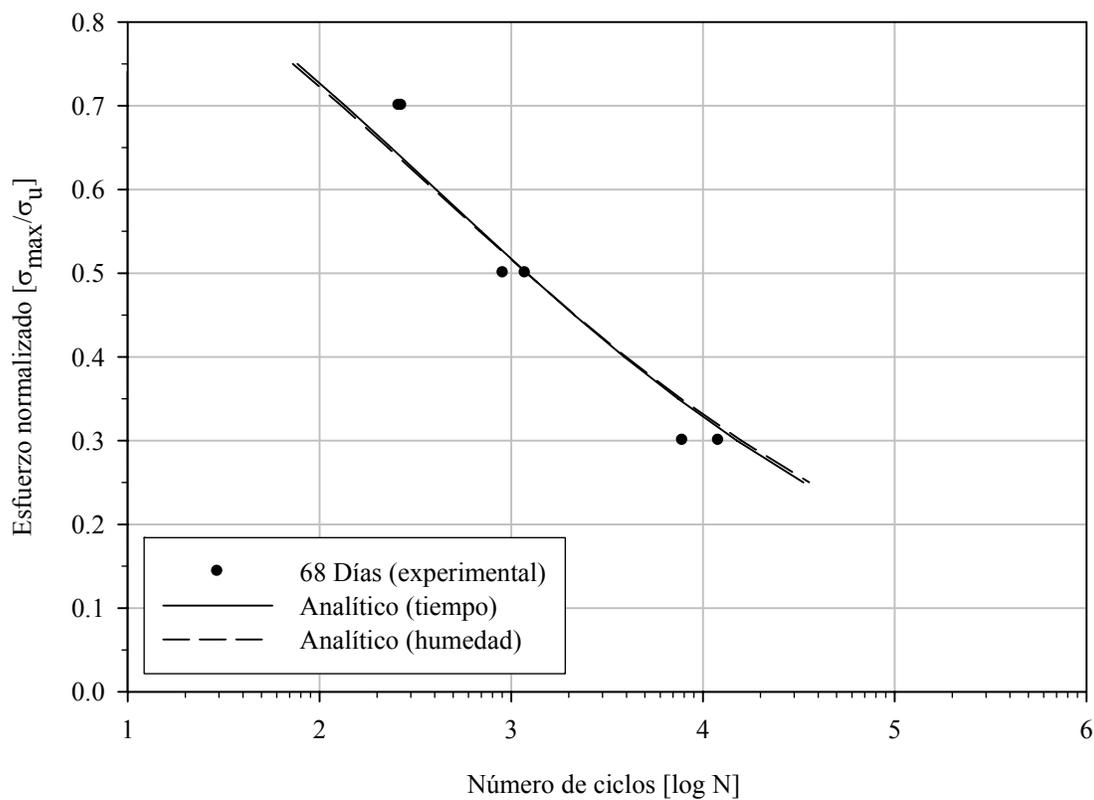


Figura 5.4. Comparación de los resultados experimentales con el modelo analítico para los especímenes de resina viniléster envejecidos durante 68 días.

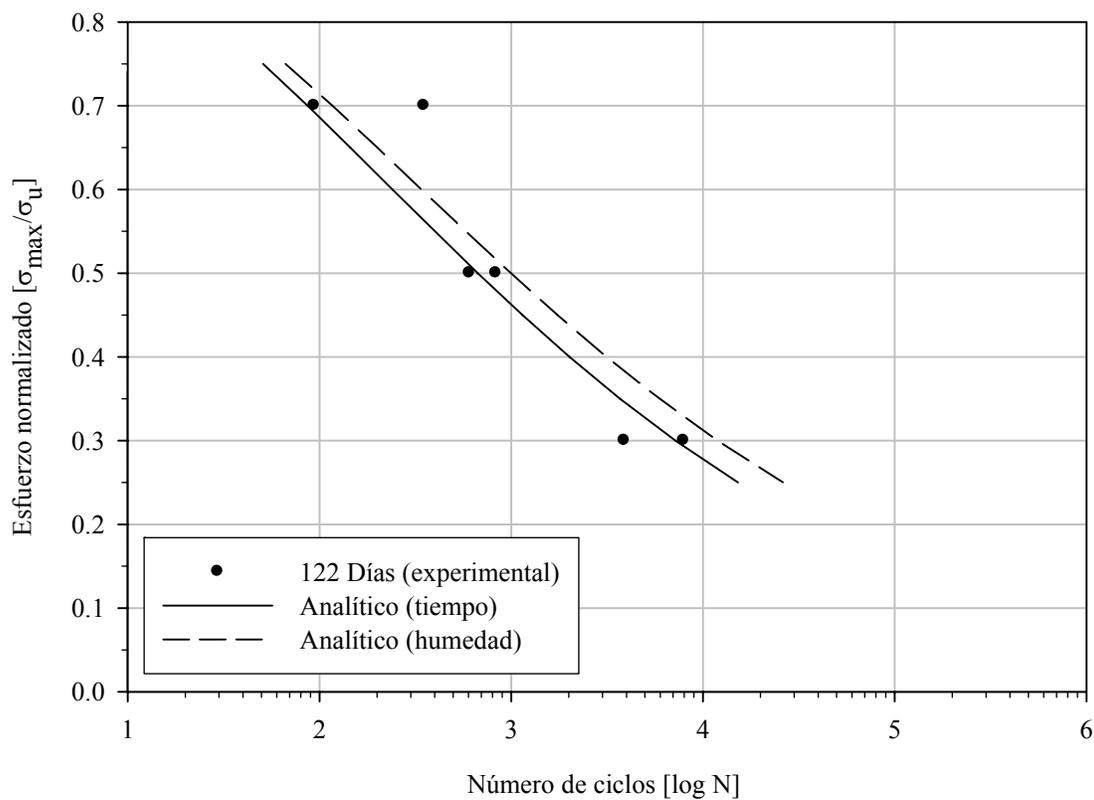


Figura 5.5. Comparación de los resultados experimentales con el modelo analítico para los especímenes de resina viniléster envejecidos durante 122 días.

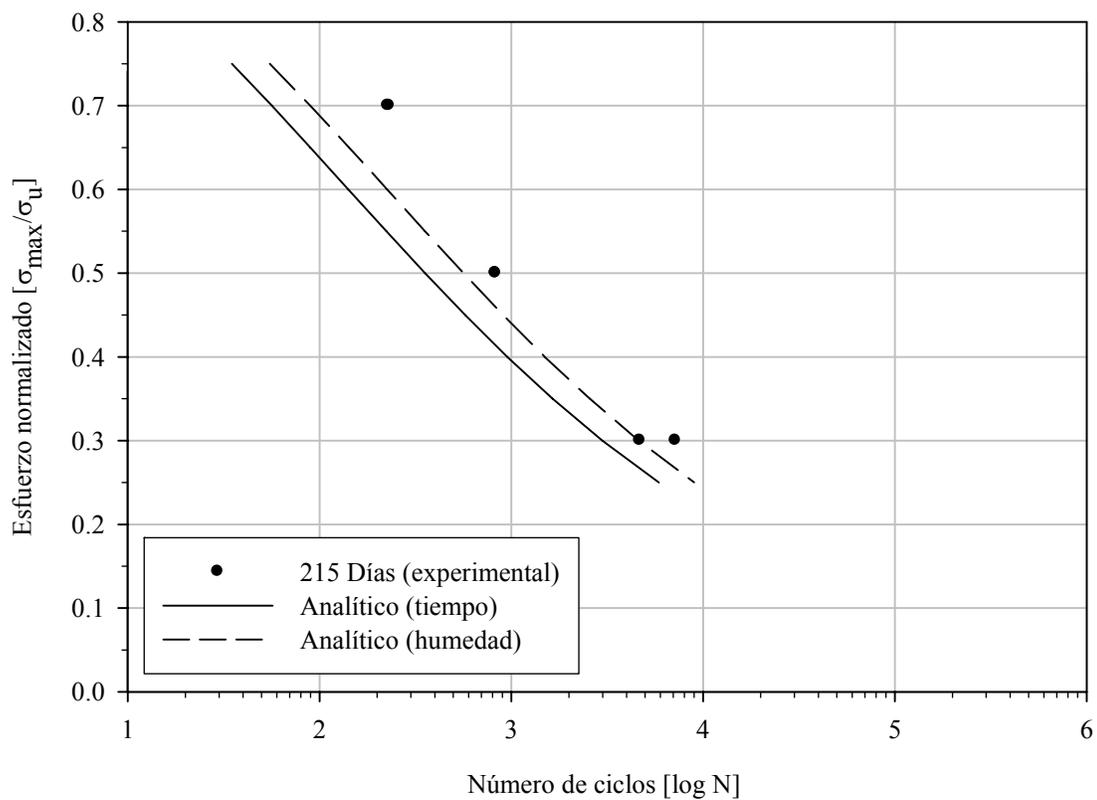


Figura 5.6. Comparación de los resultados experimentales con el modelo analítico para los especímenes de resina viniléster envejecidos durante 215 días.

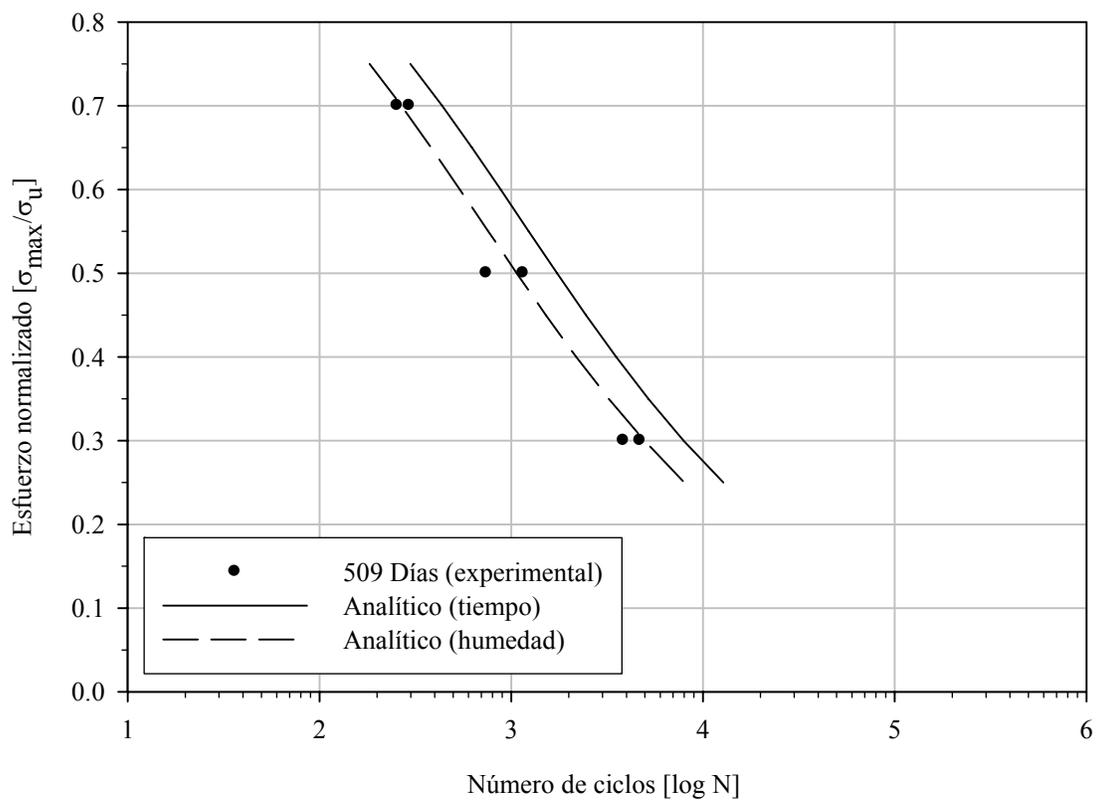


Figura 5.7. Comparación de los resultados experimentales con el modelo analítico para los especímenes de resina viniléster envejecidos durante 509 días.

### 5.3.2 Compuesto bidireccional

Las predicciones del modelo en comparación con los resultados experimentales se muestran en la Figura 5.8 a Figura 5.12. Las curvas S-N analíticas evaluadas presentan una buena correlación con los datos experimentales, tanto las estimadas en función del tiempo de envejecimiento como las calculadas en función de la variación del contenido de humedad.

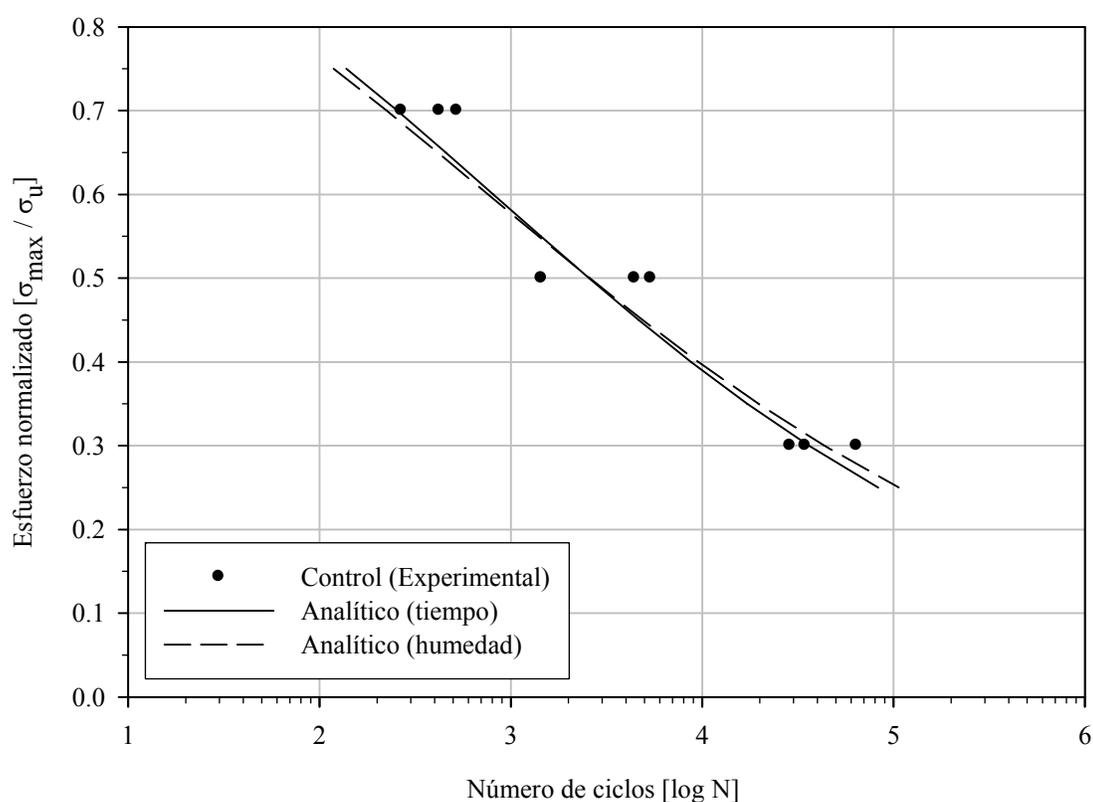


Figura 5.8. Comparación de los resultados experimentales con el modelo analítico para los especímenes de control del compuesto bidireccional.

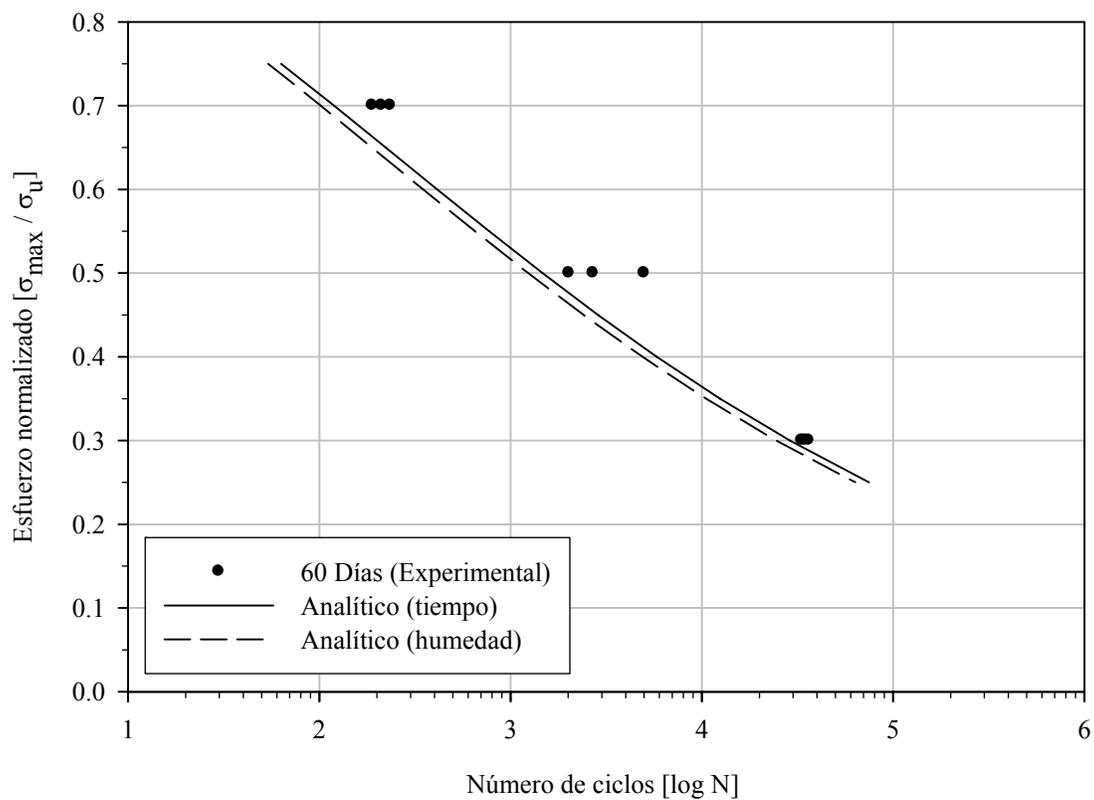


Figura 5.9. Comparación de los resultados experimentales con el modelo analítico para los especímenes del compuesto bidireccional envejecidos durante 60 días.

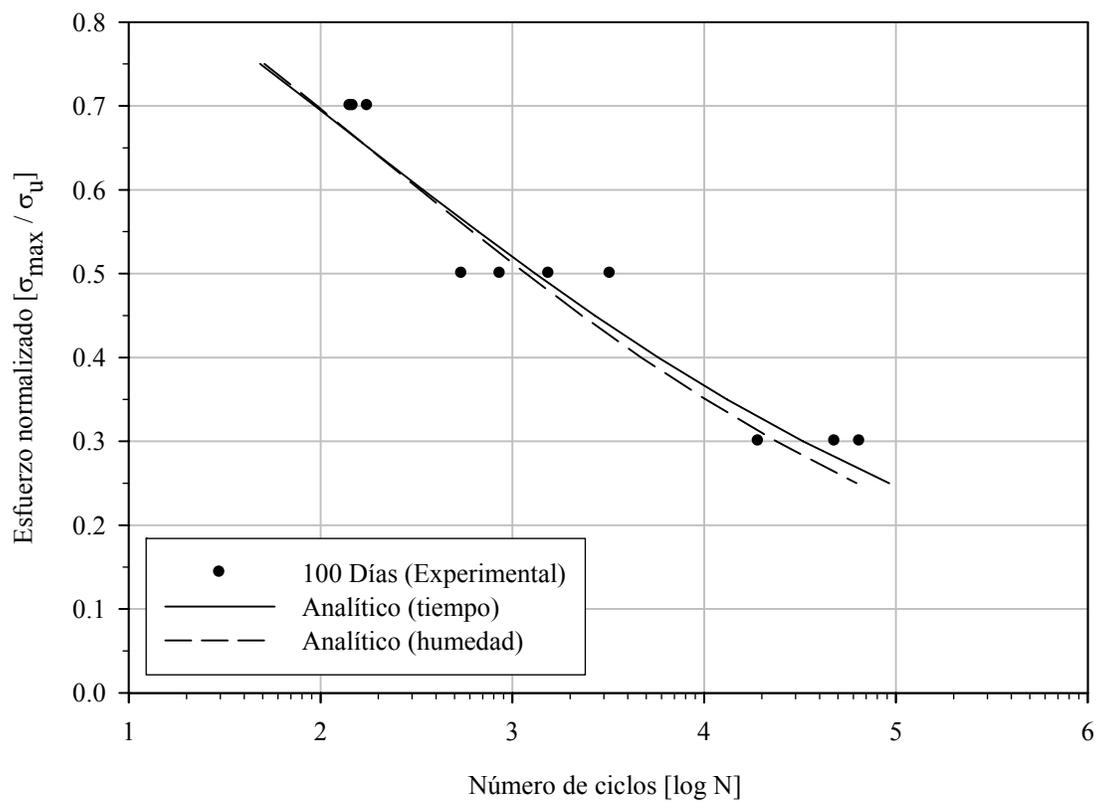


Figura 5.10. Comparación de los resultados experimentales con el modelo analítico para los especímenes del compuesto bidireccional envejecidos durante 100 días.

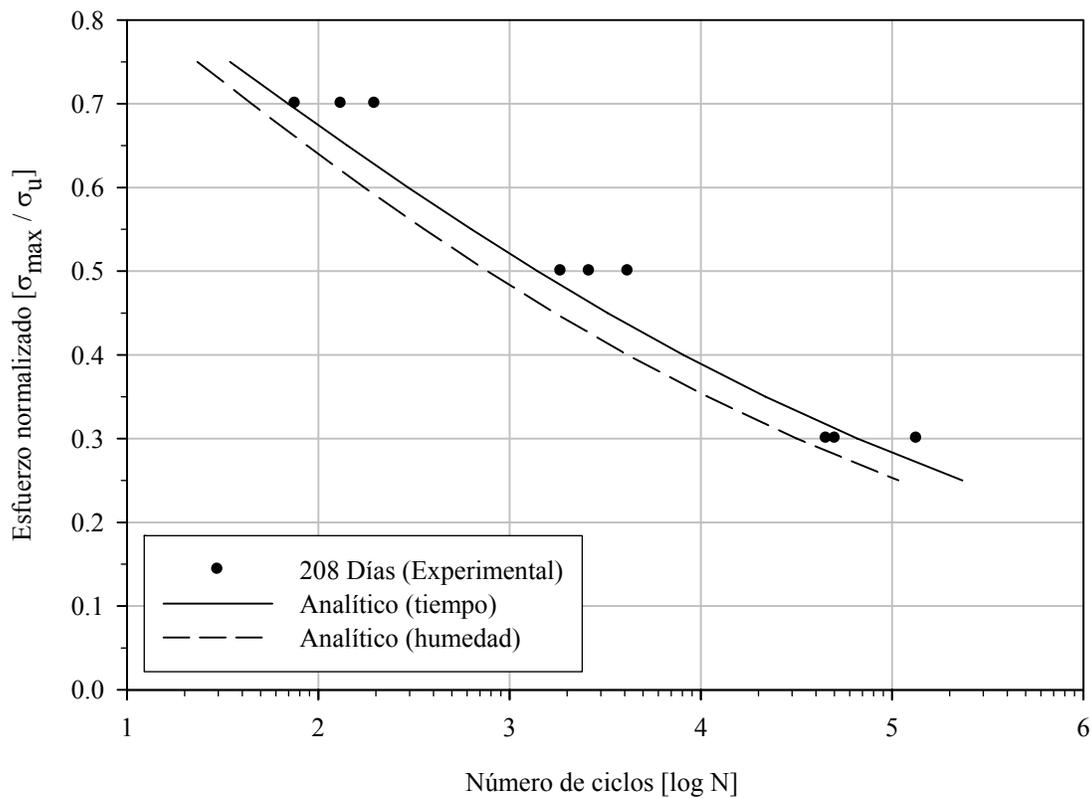


Figura 5.11. Comparación de los resultados experimentales con el modelo analítico para los especímenes del compuesto bidireccional envejecidos durante 208 días.

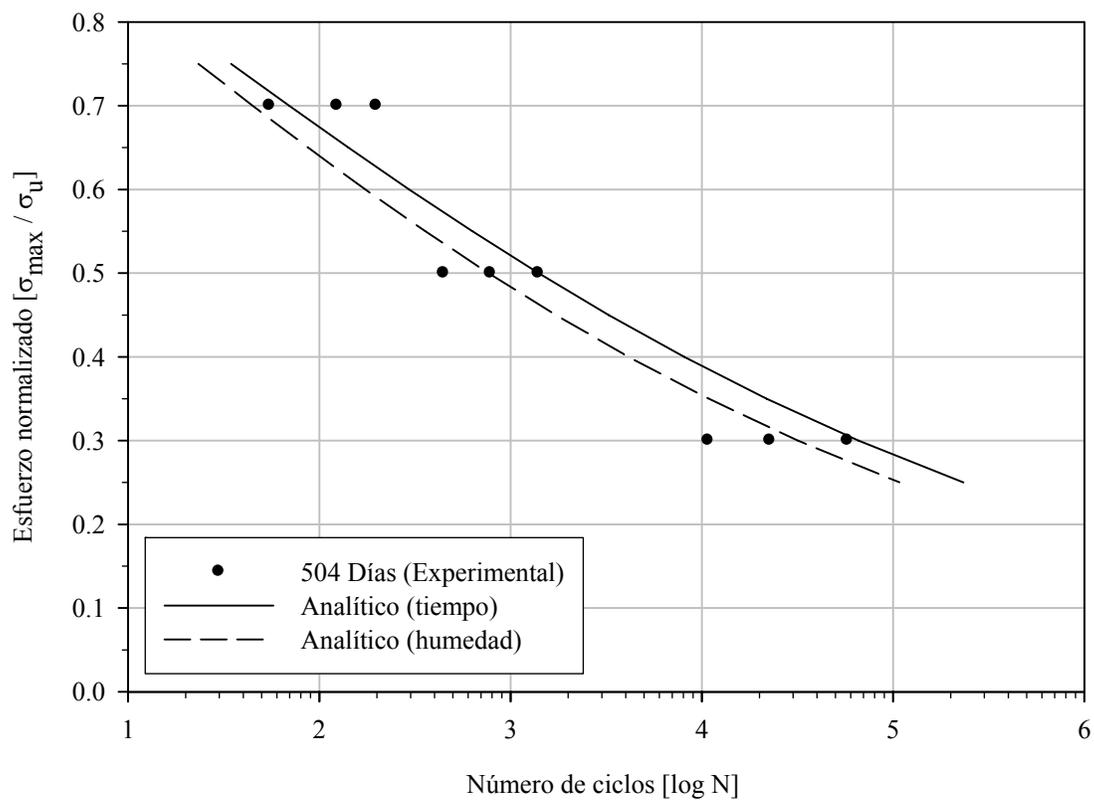


Figura 5.12. Comparación de los resultados experimentales con el modelo analítico para los especímenes del compuesto bidireccional envejecidos durante 504 días.

### 5.3.3 Compuesto unidireccional

En la Figura 5.13 a Figura 5.17 se muestran las curvas S-N analíticas evaluadas en función del tiempo de envejecimiento y del porcentaje de ganancia de humedad. Las predicciones de ambos enfoques teóricos presentan una correspondencia razonable con los resultados experimentales tanto de los especímenes de control como los sometidos a exposición higrotérmica.

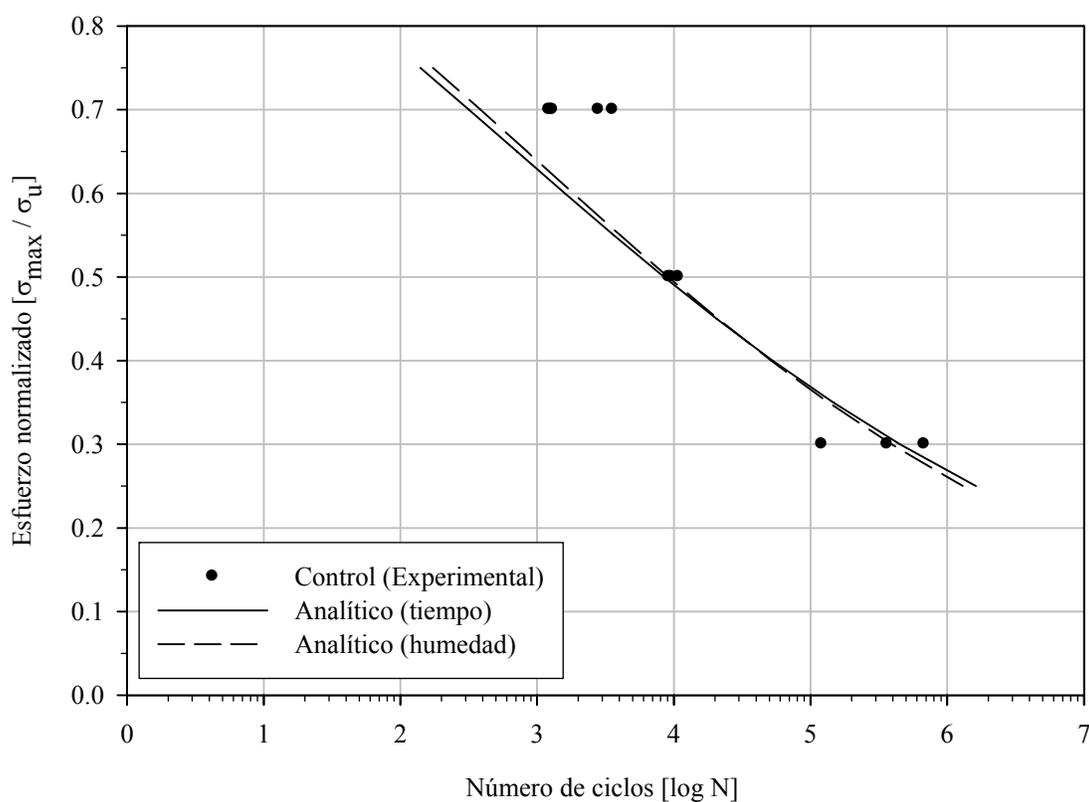


Figura 5.13. Comparación de los resultados experimentales con el modelo analítico para los especímenes de control del compuesto unidireccional.

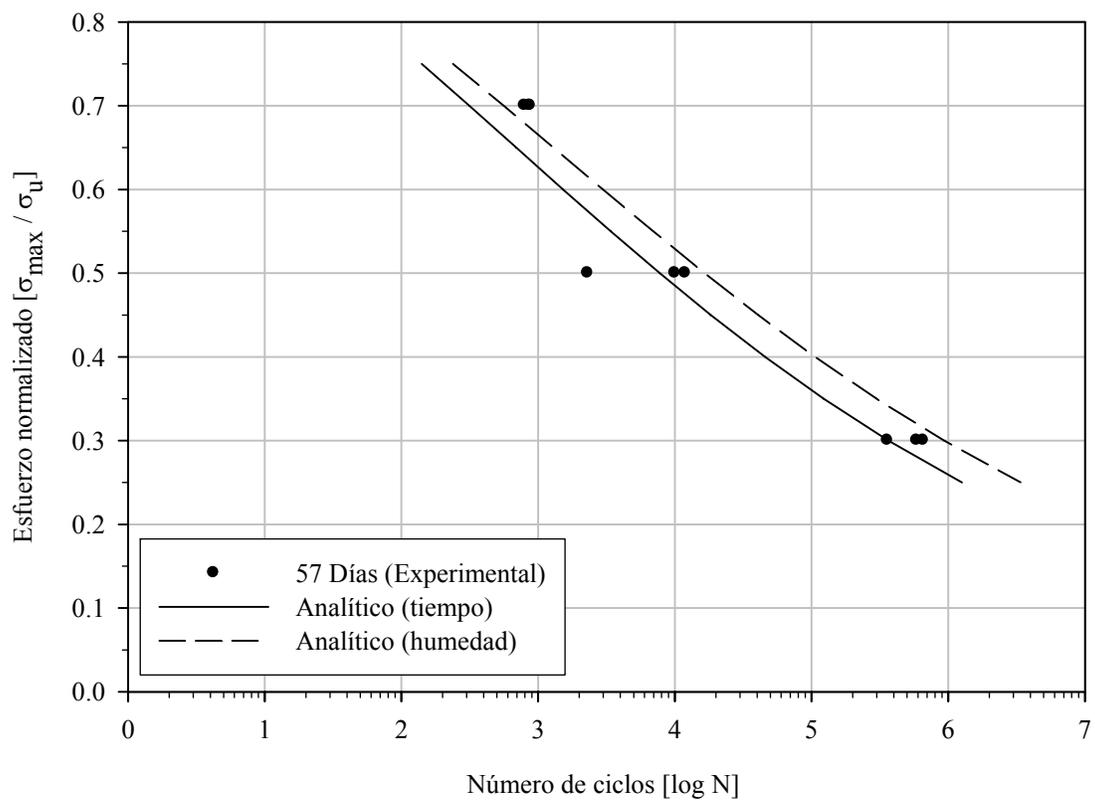


Figura 5.14. Comparación de los resultados experimentales con el modelo analítico para los especímenes del compuesto unidireccional envejecidos durante 57 días.

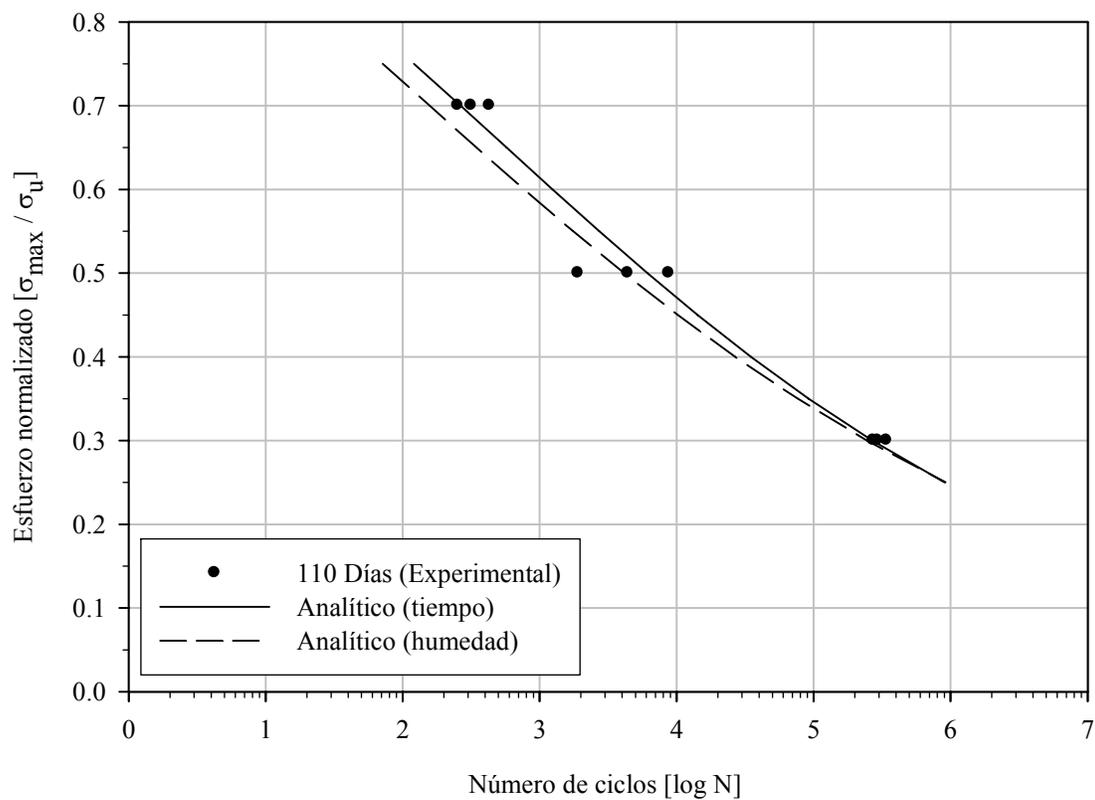


Figura 5.15. Comparación de los resultados experimentales con el modelo analítico para los especímenes del compuesto unidireccional envejecidos durante 110 días.

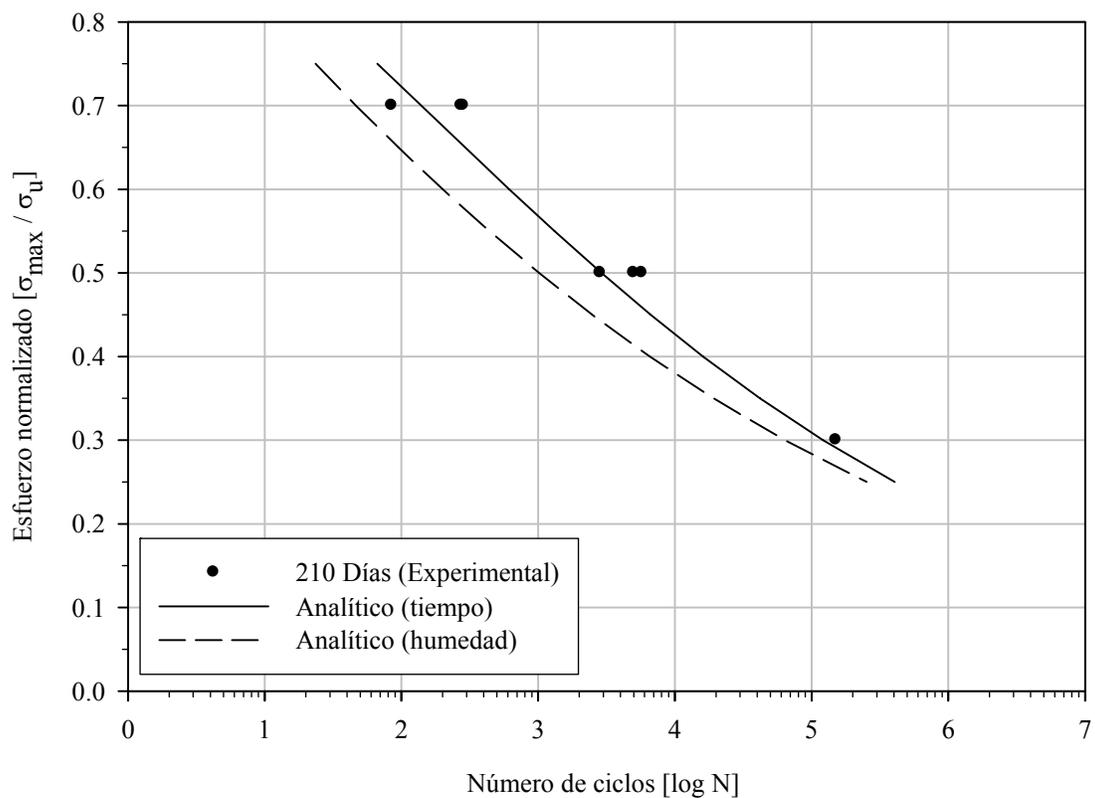


Figura 5.16. Comparación de los resultados experimentales con el modelo analítico para los especímenes del compuesto unidireccional envejecidos durante 210 días.

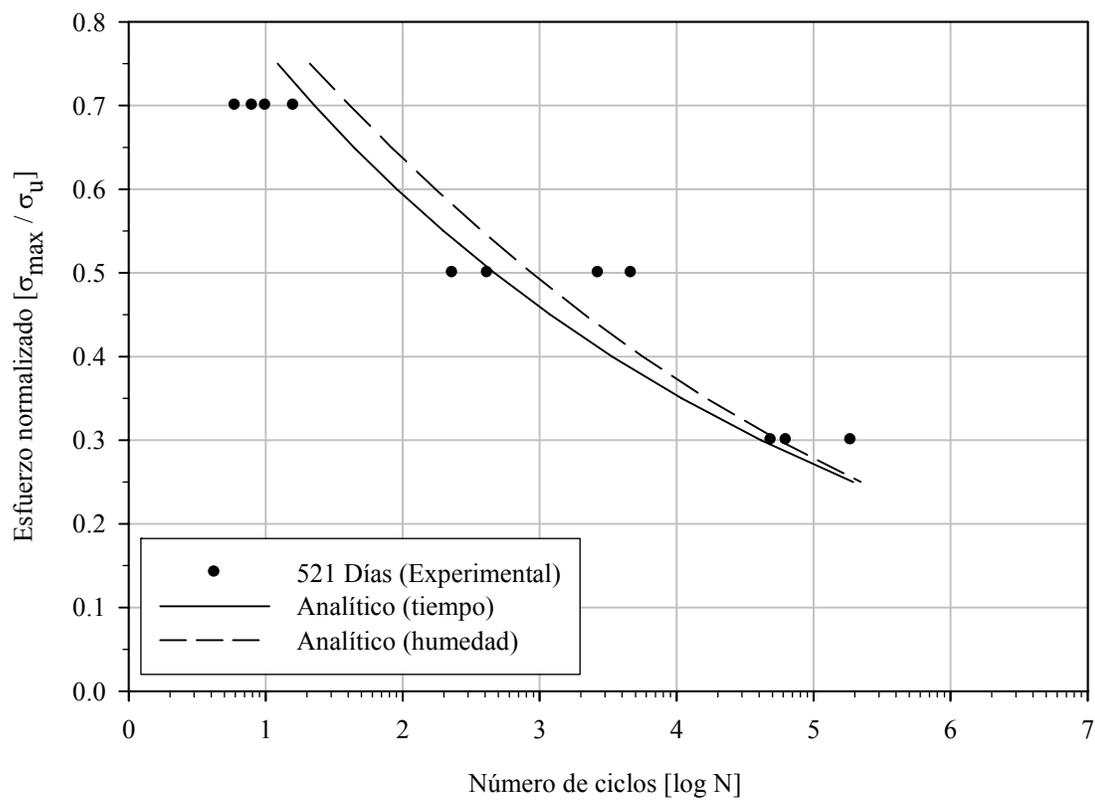


Figura 5.17. Comparación de los resultados experimentales con el modelo analítico para los especímenes del compuesto unidireccional envejecidos durante 521 días.

## CAPÍTULO 6

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

### 6.1 Resumen

En la presente tesis se presentó un programa experimental dirigido a evaluar los efectos de la exposición higrotérmica en comportamiento a fatiga de dos tipos de laminado, con refuerzo bidireccional y unidireccional, y una resina viniléster. El programa abarcó varias etapas:

1. La caracterización física y mecánica de los materiales, donde se evaluaron la densidad, la fracción de volumen de fibra en los laminados, el esfuerzo último a tensión, el módulo elástico, la deformación última y la razón de Poisson.
2. El condicionamiento higrotérmico de los especímenes, que consistió en la sumersión en agua destilada a una temperatura de 40°C [104°F]. El análisis de la

absorción de humedad se realizó tomando medidas gravimétricas durante periodos de variables de 50 a 500 días aproximadamente.

3. La evaluación de la vida a fatiga para diferentes niveles de carga. Los ensayos se realizaron utilizando cargas cíclicas del tipo tensión-tensión con amplitud constante, con un índice de reversión ( $R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$ ) de 0.10. El tipo de onda de carga fue sinusoidal, con una frecuencia de 5 Hz, aplicándose tres niveles de esfuerzos: 70%, 50% y 30% del esfuerzo último a tensión del material ensayado a tiempo cero (control).

Se propuso, además, una metodología de predicción basada en un modelo desarrollado por Epaarachchi y Clausen (2003), establecida a partir del análisis de los resultados experimentales, integrando los efectos del condicionamiento higrotérmico en las propiedades a fatiga del material. Se incluyó la verificación del modelo usando los resultados obtenidos en el programa experimental.

Los aportes principales de este trabajo lo constituyen el desarrollo de una base de datos experimentales relacionando exposición ambiental y fatiga para periodos largos y la propuesta de un modelo teórico de predicción de vida a fatiga que incluye los efectos del envejecimiento.

## 6.2 Conclusiones

Las conclusiones más relevantes obtenidas de la realización de este trabajo se recopilan a continuación:

- Los especímenes sometidos a condicionamiento higrotérmico no presentaron un nivel de saturación de humedad para el periodo de exposición.

- Los resultados experimentales a fatiga en los tres materiales bajo estudio presentaron un alto grado de dispersión, lo cual es concordante con la complejidad del fenómeno de fatiga.
- Debido a que la mayoría de los especímenes de resina viniléster no fallaron en la zona del *gage*, estos resultados representarían un estimado conservador de la vida a fatiga en el material.
- El mecanismo de falla más recurrente en las muestras de compuesto bidireccional fue la delaminación, mientras que en los especímenes de compuesto unidireccional la falla se caracterizó por la progresión de una grieta paralela a la dirección de la carga.
- La vida a fatiga de los especímenes envejecidos para los tres materiales bajo estudio evidenció una disminución respecto a los especímenes de control, verificándose una degradación mayor de la esperanza de vida en los especímenes ensayados en el nivel de esfuerzo de  $30\% \sigma_{ult}$  para las muestras de resina viniléster. Mientras que en los especímenes de laminado la mayor disminución de la vida a fatiga se verificó para el nivel de esfuerzo más alto ( $70\% \sigma_{ult}$ ). La evolución del comportamiento a fatiga en materiales compuestos ha demostrado ser independiente del contenido de humedad para periodos cortos de tiempo, sin embargo, para largos periodos de tiempo, la esperanza de vida a fatiga es afectada por la exposición a humedad (Zhou *et al.*, 2007).
- La mayor degradación de la resistencia a fatiga se presentó en forma más evidente en el compuesto unidireccional para el nivel de esfuerzo de  $70\% \sigma_{ult}$ , lo que coincide con la mayor degradación de las propiedades de tensión en el material planteada por Obando-Fuertes (2009).

- Las pendientes de las curvas S-N para las muestras de compuesto mostraron concordancia con las conclusiones de McBagonluri (1998) que expone que la pendiente debe estar entre 10 y 20% para compuestos reforzados con fibra de vidrio. El compuesto bidireccional presentó una variación de la pendiente de las curvas S-N entre 14 y 19%, mientras que el laminado unidireccional evidenció una variación entre 13 y 17%.
- El análisis de varianza (ANOVA) entre los resultados de los especímenes envejecidos demostró una diferencia estadísticamente significativa para un nivel de significancia ( $\alpha$ ) del 5% para los especímenes de resina viniléster y del compuesto unidireccional. Lo que implica que existe un 95% de confianza en que la variación en los resultados es producto de los efectos de la variable de entrada (tiempo de exposición) sobre la variable de respuesta (ciclos).
- Las predicciones del modelo propuesto en base al tiempo de exposición para las muestras de resina viniléster presentaron una mejor correlación que los resultados en base al porcentaje de humedad. Mientras que en los laminados ambos enfoques mostraron una buena correspondencia con los resultados experimentales.
- Aunque en algunos casos la predicción analítica a partir del tiempo de envejecimiento muestra mejor correspondencia que la predicción a partir del porcentaje de humedad, es preferible utilizar la predicción calculada en base al porcentaje de humedad por ser esta la medida que caracteriza la acumulación de daño en el material.

### 6.3 Recomendaciones para trabajos futuros

A partir de la investigación realizada en esta tesis se presentan a continuación sugerencias sobre futuras líneas de trabajo que permitirían mejorar la base de datos experimentales de vida a fatiga y diversificar la implementación de la metodología analítica propuesta:

- Desarrollar un programa experimental que incluya un mayor número de especímenes a ensayar y otros niveles de aplicación de carga y para periodos de envejecimiento más extensos, orientado a obtener una mejor caracterización del comportamiento a fatiga de los materiales estudiados. Se sugiere evaluar el procedimiento experimental y tipo de mordaza utilizada para evitar la falla en la zona de las mordazas. Se recomienda un mínimo de diez especímenes para cada nivel de esfuerzo aplicado, por el alto grado de dispersión que presentan los resultados experimentales de fatiga. Se recomienda además incluir en la configuración de los ensayos una cámara ambiental, que asegure el mantenimiento de las condiciones de exposición durante el ensayo.
- Estudiar la recuperación de las propiedades a fatiga del material luego de ser sometido a un proceso de sumersión y secado.
- Realizar ensayos en la dirección 90° del laminado bidireccional para conseguir una representación global del comportamiento del laminado.
- Convalidar la metodología analítica presentada en la presente investigación a partir de otras bases de datos experimentales.
- Estudiar la degradación por fatiga del modulo elástico y el comportamiento histerético en los materiales.

## REFERENCIAS

---

- Agarwal, B.D., Broutman, L.J. y Chandrashekhara, K. (2006). *Analysis and Performance of Fiber Composites*, 3<sup>era</sup> edición, John Wiley & Sons, New Jersey.
- ASTM Standard D2584 (2002). "Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins." ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM Standard D3039 (2007). "Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials." ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM Standard D3479 (2007). "Standard Test Method for Tension-Tension Fatigue of Polymer Matrix Composite Materials." ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM Standard D638 (2008). "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics." ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM Standard D792 (2000). "Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement." ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Bank, L. C., Gentry R. T., y Barkatt, A. (1995). "Accelerated Test Methods to Determine the Long-term Behavior of FRP Composite Structures: Environmental Effects." *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 14 (6), pp. 559-587.
- Barbero, E. J., y Damiani, T. M. (2003). "Interaction between Static Fatigue and Zero-Stress Aging in E-glass Fiber Composites." *Journal of Composites for Construction*, vol. 7(1), pp. 3-9.

- Brøndsted, P., Andersen, S.I. y Lilholt, H. (1997). "Fatigue Damage Accumulation and Lifetime Prediction of GFRP Materials under Block Loading and Stochastic Loading." *Polymeric Composites - Expanding the Limits. Proceedings of 18th International Symposium on Materials Science*, S.I. Andersen, P. Brøndsted, H. Lilholt, A. Lystrup, J.T. Rheinlander, B.F. Sorensen y H. Toftegaard (eds.), Riso International Laboratory, Roskilde, Denmark, pp. 269–278.
- Bucinell, R.G. (1998). "Development of a Stochastic Free Edge Delamination Model for Laminated Composite Materials Subjected to Constant Amplitude Fatigue Loading." *Journal of Composite Materials*, vol. 32, pp. 1138–1156.
- Chateauminois, A., Chabert, B., Soulier, J. P. y Vincent, L. (1993). "Hygrothermal Ageing Effects on the Static Fatigue of Glass/Epoxy Composites." *Composites*, vol. 24(7), pp. 547-555.
- Dahlen, C. y Springer, G.S. (1994). "Delamination Growth in Composites under Cyclic Loads." *Journal of Composite Materials*, vol. 28, pp. 732–781.
- Daniel, I.M. y Charewicz, A. (1986). "Fatigue Damage Mechanisms and Residual Properties of Graphite/Epoxy Laminates." *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 25(5), pp. 793–808.
- Degrieck, J. y Van Paepegem, W. (2001). "Fatigue Damage Modeling of Fibre-reinforced Composite Materials: Review." *Applied Mechanics Reviews*, vol. 54(4), pp. 279-299.
- Ellyin, F. y El-Kadi, H. (1990). "A Fatigue Failure Criterion for Fiber Reinforced Composite Laminae." *Composite Structures*, vol. 15(1), pp. 61–74.
- Ellyin, F., y Rohrbacher, C. (2003). "The Influence of Aqueous Environment Temperature and Cyclic Loading on Glass-Fiber/Epoxy Composite Laminates." *Reinforced Plastics and Composites*, vol. 22(7), pp. 615-636.

- Epaarachchi, J.A. y Clausen, P.D. (2003). "An empirical model for fatigue behavior prediction of glass fibre-reinforced plastic composites for various stress ratios and test frequencies." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 34, pp. 313-326.
- Fawaz, Z. y Ellyin, F. (1994). "Fatigue Failure Model for Fibre Reinforced Materials under General Loading Conditions." *Journal of Composite Materials*, vol. 28, pp. 1432–1451.
- Giancane, S., Panella, F.W. y Dattoma, V. (2009). "Characterization of fatigue damage in long fiber epoxy composite laminates". *International Journal of Fatigue*, vol. 32(1), pp. 46-53
- Harris, B. (2003). "A historical review of the fatigue behavior of fibre-reinforced plastics." *Fatigue in Composites*, B. Harris (ed.), CRC Press, Boca Raton, FL., pp. 2-40.
- Hashin, Z. y Rotem, A. (1973). "A Fatigue Criterion for Fibre Reinforced Composite Materials." *Journal of Composite Materials*, vol. 7, pp. 448–464.
- Helbling, C. y Karbhari, V.M. (2005). "Durability Assessment of Combined Environmental Exposure and Bending." *ACI Special Publication*, vol. 230, pp. 1397–1418.
- Helbling, C. y Karbhari, V.M. (2007). "Durability of Composites in Aqueous Environments." *Durability of Composites for Civil Structural Applications*, V.M. Karbhari (ed.), CRC Press, Boca Raton, FL., pp. 31-71.
- Helmi, K. (2006). *The Effects of Driving Forces and Reversed Bending Fatigue of Concrete-Filled FRP Circular Tubes for Piles and Other Applications*, tesis doctoral, University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada.

- Helmi, K., Fam, A., y Mufti, A. (2008). "Fatigue Life Assessment and Static Testing of Structural GFRP Tubes Based on Coupon Tests." *Journal of Composites for Construction ASCE*, vol. 12(2), pp. 212–223.
- Hénaff-Gardin, C., Lafarie-Frenot, M.C. y Goupillaud, I. (1997). "Prediction of Cracking Evolution under Uniaxial Fatigue Loading in Crossply Composite Laminates." *International Conference on Fatigue of Composite*, S. Degallaix, C. Bathias y R. Fougères (eds.), La Société Française de Métallurgie et de Matériaux, Paris, France, pp. 189-196.
- Hwang, W. y Han, K.S. (1985). "Fatigue of Composites-Fatigue Modulus Concept and Life Prediction." *Journal of Composite Materials*, vol. 20(2), pp. 154-165.
- Hwang, W. y Han, K.S. (1986). "Cumulative Damage Models and Multi-stress Fatigue Life Prediction." *Journal of Composite Materials*, vol. 20, pp. 125–153.
- Iqbal, M.A. (2001). *Fatigue Life of Pultruded and Hand Lay-up GFRP Exposed to Different Environmental Conditions*, tesis de maestría, The University of Maine, Orono, Maine.
- Ishai, O. (1975). "Environmental Effects on Deformation, Strength, and Degradation of Unidirectional Glass-Fiber Reinforced Plastics. II. Experimental Study." *Polymer Engineering and Science*, vol. 15(7), 491-499.
- Jen, M.H.R. y Lee, C.H. (1998). "Strength and Life in Thermoplastic Composite Laminates under Static and Fatigue Loads. Part I: Experimental." *International Journal of Fatigue*, vol. 20, pp. 605–615.
- Jones, C.J., Dickson, R.F., Adam, T. Reiter, H. y Harris, B. (1983). "Environmental fatigue of reinforced plastics." *Composites*, Vol. 14(3), pp. 288-293.

- Jones, R.M. (1999). *Mechanics of Composite Materials*, 2<sup>da</sup> edición, Taylor & Francis, Inc. Philadelphia, PA.
- Kajorncheappunngam, S., Rakesh. KG., y GangaRao H.V. (2002). "Effect of Ageing Environment on Degradation of Glass-Reinforced Epoxy." *Journal Composites of Construction*, vol. 6(1), pp. 61-69.
- Karbhari V. M. y Zhang S. (2003). "E-Glass/Vinylester Composites in Aqueous Environments – I: Experimental Results." *Applied Composite Materials*, vol. 10(1), pp. 19-48.
- Kshirsagar, S. (1998). *Durability of Fiber Reinforced Composite Wrap System for the Rehabilitation of Concrete Structures*, tesis de maestría, West Virginia University, Morgantown, West Virginia.
- Lawrence Wu, C.M. (1993). "Thermal and Mechanical Fatigue Analysis of CFRP Laminates." *Composite Structures*, vol. 25, pp. 339–344.
- Lopez-Anido, R.A. y Karbhari, V.M. (2000). "Fiber Reinforced Composites in Civil Infrastructure." *Emerging Materials for Civil Infrastructure – State of Art*, R.A. Lopez-Anido y T.R. Naik, eds., American Society of Civil Engineers (ASCE), pp. 41-78.
- Mayugo M., J.A. (2003). *Estudio constitutivo de materiales compuestos laminados sometidos a cargas cíclicas*, tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Cataluña, España.
- McBagonluri, D.F. (1998). *Simulation of Fatigue Performance & Creep Rupture of Glass-Reinforced Polymeric Composites for Infrastructure Applications*, tesis de maestría, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.

- McBagonluri, D.F., Garcia, K., Hayes, M., Verguese, K.N.E. y Lesko, J.J. (2000). "Characterization of Fatigue and Combined Environment on Durability Performance of Glass-vinyl Ester Composite for Infrastructure Applications." *International Journal Fatigue*, vol. 22(1), pp. 53–64.
- MIL-HDBK-17-1F (2002). *Military Handbook: Composite Materials Handbook, Volume 1 Polymer Matrix Composites Guidelines for Characterization of Structural Materials*. U.S. Department of Defense.
- Mondragón-Maca., M. V. (2008). *Modelo de la micromecánica de materiales compuestos considerando degradación higrotérmica*, tesis de maestría, Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez, Mayagüez, P.R.
- Montgomery, D.C. (2003). *Applied Statistics and Probability for Engineers*. 3<sup>era</sup> edición, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Obando-Fuertes F., J.C. (2009). *Propiedades mecánicas de materiales compuestos a nivel micro y macro considerando degradación higrotérmica*, tesis de maestría, Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez, Mayagüez, P.R.
- Phifer, S.P. (1998). *Quasi-Static and Fatigue Evaluation of Pultruded Vinyl Ester/E-Glass Composites*, tesis de maestría, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- Post, N.L. (2008). *Reliability based design methodology incorporating residual strength prediction of structural fiber reinforced polymer composites under stochastic variable amplitude fatigue loading*, tesis doctoral, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.

- Post, N.L., Bausano, J., Case, S.W., y Lesko, J.J. (2006). "Modeling the remaining strength of structural composite materials subjected to fatigue." *International Journal of Fatigue*, vol. 28(10), pp. 1100-1108.
- Quaresimin, M. y Guglielmino, E. (2001). "Influence of Quick Ageing on the Fatigue Behaviour of SMC Composite Materials." *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 20(2), pp.147-165.
- Reifsnider, K.L. (1986). "The Critical Element Model: A Modeling Philosophy." *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 25, pp. 739-749.
- Reifsnider, K.L. y Gao, Z. (1991). "A Micromechanics Model for Composites under Fatigue Loading." *International Journal of Fatigue*, vol. 13, pp. 149-156.
- Schaff, J.R. (2006). "Fatigue and Life Prediction." *ASM Handbook Composites*, Vol. 21, pp. 252-258.
- Sendeckyj, G.P. (1990). "Life Prediction for Resin-Matrix Composite Materials." *Fatigue of Composite Materials*, K.L. Reifsnider (ed.), Elsevier Science, New York, pp. 431-483.
- Shan, Y., y Liao, K. (2002). "Environmental Fatigue Behavior and Life Prediction of Unidirectional Glass-Carbon/Epoxy Hybrid Composites." *International Journal of Fatigue*, vol. 24(8), pp. 847-859.
- Streeter, V.L. y Wylie, E.B. (1985). *Fluid Mechanics*, 8<sup>va</sup> edición, McGraw Hill, New York.
- Talreja, R. (1981). "Fatigue of Composite Materials: Damage Mechanisms and Fatigue-Life Diagrams." *Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, vol. 378(1775), pp. 461-475.

U.S. Army Corps of Engineers (1997). "Technical Letter No. 1110-2-548." *Engineering and Design Composite Materials for Civil Engineering Structures*, Department of the Army, Washington, DC, pp. 6-1 – 6-8.

Whitworth, H.A. (1987). "Modeling Stiffness Reduction of Graphite Epoxy Composite Laminates." *Journal of Composite Materials*, vol. 21, pp. 362–372.

Zhou, A., Post, N., Pingry, R., Cain, J., Lesko, J.J. y Case, S.W. (2007). "Durability of Composites under Fatigue Loads." *Durability of Composites for Civil Structural Applications*, V.M. Karbhari (ed.), Woodhead Publishing, Boca Raton, FL., pp. 126-149.

# APÉNDICE A

## RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE FATIGA

### A.1 Resina viniléster

Tabla A.1. Resultados del ensayo de fatiga en especímenes de control de resina viniléster.

$\sigma_{\max} / \sigma_{\text{ult}}$	Número de ciclos N	Log N	Promedio		
			$\sigma_{\max} / \sigma_{\text{ult}}$	N	Log N
0.70	599*	2.78			
0.70	332*	2.52	0.70	864	2.94
0.70	1660*	3.22			
0.50	3994*	3.60			
0.50	7544*	3.88	0.50	5766	3.76
0.50	5761*	3.76			
0.30	22778*	4.36			
0.30	79218*	4.90	0.30	117758	5.07
0.30	251277*	5.40			

(\*) Falla en el área del *gage*.

Tabla A.2. Resultados del ensayo de fatiga en especímenes de resina viniléster envejecidos durante 68 días.

$\sigma_{\max} / \sigma_{\text{ult}}$	Número de ciclos N	Log N	Promedio		
			$\sigma_{\max} / \sigma_{\text{ult}}$	N	Log N
0.70	261*	2.417			
0.70	269	2.430	0.70	265	2.42
0.50	910*	2.959			
0.50	1186*	3.074	0.50	1048	3.02
0.30	7855*	3.895			
0.30	12097*	4.083	0.30	9976	4.00

(\*) Falla en el área del *gage*.

Tabla A.3. Resultados del ensayo de fatiga en especímenes de resina viniléster envejecidos durante 122 días.

$\sigma_{\max} / \sigma_{\text{ult}}$	Número de ciclos N	Log N	Promedio		
			$\sigma_{\max} / \sigma_{\text{ult}}$	N	Log N
0.70	94	1.973	0.70	223	2.35
0.70	351*	2.545			
0.50	834*	2.921	0.50	721	2.86
0.50	607*	2.783			
0.30	3899*	3.591	0.30	5927	3.77
0.30	7955*	3.901			

(\*) Falla en el área del *gage*.

Tabla A.4. Resultados del ensayo de fatiga en especímenes de resina viniléster envejecidos durante 215 días.

$\sigma_{\max} / \sigma_{\text{ult}}$	Número de ciclos N	Log N	Promedio		
			$\sigma_{\max} / \sigma_{\text{ult}}$	N	Log N
0.70	227*	2.356	0.70	229	2.36
0.70	231*	2.364			
0.50	829*	2.919	0.50	828	2.92
0.50	827*	2.918			
0.30	4680*	3.670	0.30	5932	3.77
0.30	7184*	3.856			

(\*) Falla en el área del *gage*.

Tabla A.5. Resultados del ensayo de fatiga en especímenes de resina viniléster envejecidos durante 509 días.

$\sigma_{\max} / \sigma_{\text{ult}}$	Número de ciclos N	Log N	Promedio		
			$\sigma_{\max} / \sigma_{\text{ult}}$	N	Log N
0.70	295	2.470	0.70	275	2.44
0.70	255*	2.407			
0.50	1158*	3.064	0.50	951	2.98
0.50	744*	2.872			
0.30	3862*	3.587	0.30	4285	3.63
0.30	4708*	3.673			

(\*) Falla en el área del *gage*.

## A.2 Compuesto bidireccional

Tabla A.6. Resultados del ensayo de fatiga en especímenes de control de compuesto bidireccional.

$\sigma_{\max} / \sigma_{\text{ult}}$	Número de ciclos N	Log N	Promedio		
			$\sigma_{\max} / \sigma_{\text{ult}}$	N	Log N
0.70	268	2.43			
0.70	423	2.63	0.70	405	2.61
0.70	523	2.72			
0.50	1445	3.16			
0.50	5392*	3.73	0.50	3759	3.58
0.50	4441	3.65			
0.30	64188	4.81			
0.30	28802	4.46	0.30	42518	4.63
0.30	34563	4.54			

(\*) Falla en el área de las mordazas.

Tabla A.7. Resultados del ensayo de fatiga en especímenes de compuesto bidireccional envejecidos durante 60 días.

$\sigma_{\max} / \sigma_{\text{ult}}$	Número de ciclos N	Log N	Promedio		
			$\sigma_{\max} / \sigma_{\text{ult}}$	N	Log N
0.70	236	2.37			
0.70	190	2.28	0.70	213	2.33
0.70	212	2.33			
0.50	2025	3.31			
0.50	2708*	3.43	0.50	3247	3.51
0.50	5008*	3.70			
0.30	33412	4.52			
0.30	36383	4.56	0.30	34837	4.54
0.30	34717	4.54			

(\*) Falla en el área de las mordazas.

Tabla A.8. Resultados del ensayo de fatiga en especímenes de compuesto bidireccional envejecidos durante 100 días.

$\sigma_{\max} / \sigma_{\text{ult}}$	Número de ciclos N	Log N	Promedio		
			$\sigma_{\max} / \sigma_{\text{ult}}$	N	Log N
0.70	143	2.16			
0.70	176	2.25	0.70	156	2.19
0.70	148	2.17			
0.50	3245*	3.51			
0.50	1553	3.19	0.50	1553	3.19
0.50	547	2.74			
0.50	865	2.94			
0.30	64923	4.81			
0.30	48145	4.68	0.30	44106	4.64
0.30	19251	4.28			

(\*) Falla en el área de las mordazas.

Tabla A.9. Resultados del ensayo de fatiga en especímenes de compuesto bidireccional envejecidos durante 208 días.

$\sigma_{\max} / \sigma_{\text{ult}}$	Número de ciclos N	Log N	Promedio		
			$\sigma_{\max} / \sigma_{\text{ult}}$	N	Log N
0.70	76	1.88			
0.70	198	2.30	0.70	135	2.13
0.70	132	2.12			
0.50	4177	3.62			
0.50	1861	3.27	0.50	2887	3.46
0.50	2622	3.42			
0.30	134767*	5.13			
0.30	50501*	4.70	0.30	76905	4.89
0.30	45448*	4.66			

(\*) Falla en el área de las mordazas.

Tabla A.10. Resultados del ensayo de fatiga en especímenes de compuesto bidireccional envejecidos durante 504 días.

$\sigma_{\max} / \sigma_{\text{ult}}$	Número de ciclos N	Log N	Promedio		
			$\sigma_{\max} / \sigma_{\text{ult}}$	N	Log N
0.70	199	2.30			
0.70	55	1.74	0.70	126	2.10
0.70	124	2.09			
0.50	1398	3.15			
0.50	447	2.65	0.50	877	2.94
0.50	787	2.90			
0.30	22734	4.36			
0.30	10814	4.03	0.30	30489	4.48
0.30	57920	4.76			

### A.3 Compuesto unidireccional

Tabla A.11. Resultados del ensayo de fatiga en especímenes de control de compuesto unidireccional.

$\sigma_{\max} / \sigma_{\text{ult}}$	Número de ciclos N	Log N	Promedio		
			$\sigma_{\max} / \sigma_{\text{ult}}$	N	Log N
0.70	2812	3.45			
0.70	1218	3.09			
0.70	1300*	3.11	0.70	2033	3.31
0.70	1263*	3.10			
0.70	3572*	3.55			
0.50	10812*	4.03			
0.50	9601*	3.98	0.50	9876	3.99
0.50	9216	3.96			
0.30	679331	5.83			
0.30	120922	5.08	0.30	388259	5.59
0.30	364525	5.56			

(\*) Falla en el área de las mordazas.

Tabla A.12. Resultados del ensayo de fatiga en especímenes de compuesto unidireccional envejecidos durante 57 días.

$\sigma_{\max} / \sigma_{\text{ult}}$	Número de ciclos N	Log N	Promedio		
			$\sigma_{\max} / \sigma_{\text{ult}}$	N	Log N
0.70	798*	2.90			
0.70	878*	2.94	0.70	846	2.93
0.70	863*	2.94			
0.50	2312	3.36			
0.50	11970	4.08	0.50	8114	3.91
0.50	10060	4.00			
0.30	660353	5.82			
0.30	591140	5.77	0.30	537521	5.73
0.30	361070	5.56			

(\*) Falla en el área de las mordazas.

Tabla A.13. Resultados del ensayo de fatiga en especímenes de compuesto unidireccional envejecidos durante 110 días.

$\sigma_{\max} / \sigma_{\text{ult}}$	Número de ciclos N	Log N	Promedio		
			$\sigma_{\max} / \sigma_{\text{ult}}$	N	Log N
0.70	317*	2.50			
0.70	253*	2.40	0.70	333	2.52
0.70	430*	2.63			
0.50	8778	3.94			
0.50	4410*	3.64	0.50	5032	3.70
0.50	1908*	3.28			
0.30	294358*	5.47			
0.30	273612*	5.44	0.30	303306	5.48
0.30	341948	5.53			

(\*) Falla en el área de las mordazas.

Tabla A.14. Resultados del ensayo de fatiga en especímenes de compuesto unidireccional envejecidos durante 210 días.

$\sigma_{\max} / \sigma_{\text{ult}}$	Número de ciclos N	Log N	Promedio		
			$\sigma_{\max} / \sigma_{\text{ult}}$	N	Log N
0.70	274	2.44			
0.70	284	2.45	0.70	214	2.33
0.70	85	1.93			
0.50	5748	3.76			
0.50	2852	3.46	0.50	4533	3.66
0.50	4999	3.70			
* 0.30	151050	5.18	0.30	151050	5.18

\* Para un nivel de esfuerzo de 0.30  $\sigma_{\max} / \sigma_{\text{ult}}$  el pórtico de carga utilizado en los ensayos sufrió una avería, lo que afectó el desenvolvimiento de la matriz de ensayos programada.

Tabla A.15. Resultados del ensayo de fatiga en especímenes de compuesto unidireccional envejecidos durante 521 días.

$\sigma_{\max} / \sigma_{\text{ult}}$	Número de ciclos N	Log N	Promedio		
			$\sigma_{\max} / \sigma_{\text{ult}}$	N	Log N
0.70	16	1.20			
0.70	6	0.78			
0.70	8	0.90	0.70	26	1.42
0.70	91	1.96			
0.70	10	1.00			
0.50	232	2.37			
0.50	4673	3.67	0.50	2003	3.30
0.50	417	2.62			
0.50	2688	3.43			
0.30	63348	4.80			
0.30	49102	4.69	0.30	99984	5.00
0.30	187503	5.27			

## APÉNDICE B

# ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA)

---

Para determinar si existe una diferencia estadísticamente significativa en los resultados de los ensayos de fatiga para los distintos periodos de envejecimiento se realizó un análisis de varianza (ANOVA) utilizando la herramienta de análisis de datos del programa Microsoft Excel. El ANOVA es una prueba de hipótesis en la que se verifica si la variable de entrada (tiempo de exposición y humedad) influyen sobre la variable de respuesta (número de ciclos). El análisis de varianza se ejecutó para un nivel de significancia ( $\alpha$ ) de 5% utilizando dos tipos de análisis:

- Análisis de un factor: sólo se consideró una variable de entrada, el tiempo de exposición.
- Análisis de dos factores: se consideraron el tiempo de envejecimiento y los niveles de esfuerzo como variables de entrada.

A continuación un glosario de las siglas empleadas adaptado de Montgomery (2003):

$\alpha$  = margen de error permitido.

$SS$  = suma de cuadrados. Tiene en cuenta la variabilidad en la variable de respuesta debido a las diferentes variables de entrada.

$df$  = grados de libertad. Es el número de estimaciones que se han calculado con ese mismo conjunto de datos.

$MS$  = media de cuadrados.

$F$  = distribución Fisher. Es una distribución de probabilidad continua y compara la variabilidad debido a las diferentes fuentes.

*P-value* = es el menor nivel de significancia que puede producir el rechazo de la hipótesis planteada para los datos dados.

*F crit* = es el valor del estadístico F a partir del cual la hipótesis es rechazada.

## B.1 Resina viniléster

Tabla B.1. Análisis de varianza de un factor para especímenes de resina viniléster ensayados a un nivel de esfuerzo de  $70\% \sigma_{max} / \sigma_{ult}$ .

<i>SUMMARY</i>				
<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
0	2	2259	1129.5	562860.5
68	2	530	265	32
122	2	445	222.5	33024.5
215	2	458	229	8
509	2	550	275	800

<i>ANOVA</i>							
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>	<i>Significance</i>
<i>Between Groups</i>	1247678.6	4	311919.65	2.614	0.160	5.192	<i>Not Different</i>
<i>Within Groups</i>	596725	5	119345				
<i>Total</i>	1844403.6	9					

Tabla B.2. Análisis de varianza de un factor para especímenes de resina viniléster ensayados a un nivel de esfuerzo de  $50\% \sigma_{max} / \sigma_{ult}$ .

*SUMMARY*

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
0	2	13305	6652.5	1589544.5
68	2	2096	1048	38088
122	2	1441	720.5	25764.5
215	2	1656	828	2
509	2	1902	951	85698

*ANOVA*

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>	<i>Significance</i>
<i>Between Groups</i>	53310331	4	13327582.8	38.318	0.0006	5.192	<i>Different</i>
<i>Within Groups</i>	1739097	5	347819.4				
<i>Total</i>	55049428	9					

Tabla B.3. Análisis de varianza de un factor para especímenes de resina viniléster ensayados a un nivel de esfuerzo de  $30\% \sigma_{max} / \sigma_{ult}$ .

*SUMMARY*

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
0	2	101996	50998	1592736800
68	2	19952	9976	8997282
122	2	11854	5927	8225568
215	2	11864	5932	3135008
509	2	8570	4285	357858

*ANOVA*

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>	<i>Significance</i>
<i>Between Groups</i>	3199117146	4	799779287	2.478	0.173	5.192	<i>Not Different</i>
<i>Within Groups</i>	1613452516	5	322690503				
<i>Total</i>	4812569662	9					

Tabla B.4. Análisis de varianza de dos factores para todos los especímenes de resina viniléster ensayados bajo cargas cíclicas.

*Anova: Two-Factor with Replication*

<i>SUMMARY</i>	0	68	122	215	509	<i>Total</i>
0.7						
<i>Count</i>	2	2	2	2	2	10
<i>Sum</i>	931	530	445	458	550	2914
<i>Average</i>	465.5	265	222.5	229	275	291.4
<i>Variance</i>	35644.5	32	33024.5	8	800	16593.82
0.5						
<i>Count</i>	2	2	2	2	2	10
<i>Sum</i>	11538	2096	1441	1656	1902	18633
<i>Average</i>	5769	1048	720.5	828	951	1863.3
<i>Variance</i>	6301250	38088	25764.5	2	85698	4967719
0.3						
<i>Count</i>	2	2	2	2	2	10
<i>Sum</i>	101996	19952	11854	11864	8570	154236
<i>Average</i>	50998	9976	5927	5932	4285	15423.6
<i>Variance</i>	1.59E+09	8997282	8225568	3135008	357858	5.35E+08
<i>Total</i>						
<i>Count</i>	6	6	6	6	6	
<i>Sum</i>	114465	22578	13740	13978	11022	
<i>Average</i>	19077.5	3763	2290	2329.667	1837	
<i>Variance</i>	9.37E+08	25090520	9643134	8484847	3775889	

*ANOVA*

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>	<i>Significance</i>
<i>Sample</i>	1.38E+09	2	6.92E+08	6.410	0.010	3.682	<i>Different</i>
<i>Columns</i>	1.32E+09	4	3.31E+08	3.062	0.050	3.056	<i>Different</i>
<i>Interaction</i>	1.91E+09	8	2.39E+08	2.216	0.088	2.641	<i>Not Different</i>
<i>Within</i>	1.62E+09	15	1.08E+08				
<i>Total</i>	6.24E+09	29					

## B.2 Compuesto bidireccional

Tabla B.5. Análisis de varianza de un factor para especímenes de compuesto bidireccional ensayados a un nivel de esfuerzo de  $70\% \sigma_{max} / \sigma_{ult}$ .

<i>SUMMARY</i>							
<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>			
0	3	2391	797	317428			
60	3	638	212.7	529.3			
100	3	467	155.7	316.3			
208	3	406	135.3	3729.3			
504	3	378	126	5187			

<i>ANOVA</i>							
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>	<i>Significance</i>
<i>Between Groups</i>	995351.333	4	248837.83	3.803	0.039	3.478	<i>Different</i>
<i>Within Groups</i>	654380	10	65438				
<i>Total</i>	1649731.33	14					

Tabla B.6. Análisis de varianza de un factor para especímenes de compuesto bidireccional ensayados a un nivel de esfuerzo de  $50\% \sigma_{max} / \sigma_{ult}$ .

<i>SUMMARY</i>							
<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>			
0	3	11278	3759.3	4243204.3			
60	3	9741	3247	2442463			
100	3	5345	1781.7	1859017.3			
208	3	8660	2886.7	1393500.3			
504	3	2632	877.3	232220.3			

<i>ANOVA</i>							
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>	<i>Significance</i>
<i>Between Groups</i>	16325848.9	4	4081462.23	2.007	0.170	3.478	<i>Not Different</i>
<i>Within Groups</i>	20340810.7	10	2034081.07				
<i>Total</i>	36666659.6	14					

Tabla B.7. Análisis de varianza de un factor para especímenes de compuesto bidireccional ensayados a un nivel de esfuerzo de  $30\% \sigma_{max} / \sigma_{ult}$ .

*SUMMARY*

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
0	3	127553	42517.6667	360499790
60	3	104512	34837.3333	2217570.33
100	3	132319	44106.3333	533716017
208	3	230716	76905.3333	2517362554
504	3	91468	30489.3333	599852705

*ANOVA*

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>	<i>Significance</i>
<i>Between Groups</i>	4007329223	4	1001832306	1.248	0.352	3.478	<i>Not Different</i>
<i>Within Groups</i>	8027297275	10	802729728				
<i>Total</i>	1.2035E+10	14					

Tabla B.8. Análisis de varianza de dos factores para todos los especímenes de compuesto bidireccional ensayados bajo cargas cíclicas.

*Anova: Two-Factor with Replication*

<i>SUMMARY</i>	0	68	122	215	509	Total
0.7						
<i>Count</i>	3	3	3	3	3	15
<i>Sum</i>	2391	638	467	406	378	4280
<i>Average</i>	797	212.6667	155.6667	135.3333	126	285.3333
<i>Variance</i>	317428	529.3333	316.3333	3729.333	5187	117838
0.5						
<i>Count</i>	3	3	3	3	3	15
<i>Sum</i>	11278	9741	5345	8660	2632	37656
<i>Average</i>	3759.333	3247	1781.667	2886.667	877.3333	2510.4
<i>Variance</i>	4243204	2442463	1859017	1393500	232220.3	2619047
0.3						
<i>Count</i>	3	3	3	3	3	15
<i>Sum</i>	127553	104512	132319	230716	91468	686568
<i>Average</i>	42517.67	34837.33	44106.33	76905.33	30489.33	45771.2
<i>Variance</i>	3.6E+08	2217570	5.34E+08	2.52E+09	6E+08	8.6E+08
<i>Total</i>						
<i>Count</i>	9	9	9	9	9	
<i>Sum</i>	141222	114891	138131	239782	94478	
<i>Average</i>	15691.33	12765.67	15347.89	26642.44	10497.56	
<i>Variance</i>	4.98E+08	2.77E+08	6E+08	2.05E+09	3.75E+08	

*ANOVA*

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>	<i>Significance</i>
<i>Sample</i>	1.97E+10	2	9.86E+09	36.766	0.000	3.316	<i>Different</i>
<i>Columns</i>	1.39E+09	4	3.47E+08	1.294	0.294	2.690	<i>Not Different</i>
<i>Interaction</i>	2.64E+09	8	3.29E+08	1.228	0.317	2.266	<i>Not Different</i>
<i>Within</i>	8.05E+09	30	2.68E+08				
<i>Total</i>	3.18E+10	44					

### B.3 Compuesto unidireccional

Tabla B.9. Análisis de varianza de un factor para especímenes de compuesto unidireccional ensayados a un nivel de esfuerzo de  $70\% \sigma_{max} / \sigma_{ult}$ .

<i>SUMMARY</i>							
<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>			
0	3	7684	2561.33	1337621.33			
57	3	2539	846.33	1808.33			
110	3	1000	333.33	8032.33			
210	3	643	214.33	12570.33			
521	3	115	38.33	2096.33			

<i>ANOVA</i>							
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>	<i>Significance</i>
<i>Between Groups</i>	12736059.6	4	3184014.9	11.688	0.001	3.478	<i>Different</i>
<i>Within Groups</i>	2724257.33	10	272425.7				
<i>Total</i>	15460316.9	14					

Tabla B.10. Análisis de varianza de un factor para especímenes de compuesto unidireccional ensayados a un nivel de esfuerzo de  $50\% \sigma_{max} / \sigma_{ult}$ .

<i>SUMMARY</i>							
<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>			
0	3	29629	9876.33	693660.33			
57	3	24342	8114	26159428			
110	3	15096	5032	12089388			
210	3	13599	4533	2259571			
521	3	7778	2592.67	4535200.33			

<i>ANOVA</i>							
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>	<i>Significance</i>
<i>Between Groups</i>	102568826	4	25642206.6	2.803	0.085	3.478	<i>Not Different</i>
<i>Within Groups</i>	91474495.3	10	9147449.53				
<i>Total</i>	194043322	14					

Tabla B.11. Análisis de varianza de un factor para especímenes de compuesto unidireccional ensayados a un nivel de esfuerzo de  $30\% \sigma_{max} / \sigma_{ult}$ .

*SUMMARY*

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
0	3	1164778	388259.33	7.8378E+10
57	3	1612563	537521	2.4549E+10
110	3	909918	303306	1227502252
210	1	151050	151050	
521	3	299953	99984.33	5795374890

*ANOVA*

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>	<i>Significance</i>
<i>Between Groups</i>	3.3049E+11	4	8.2622E+10	3.006	0.087	3.838	<i>Not Different</i>
<i>Within Groups</i>	2.199E+11	8	2.7487E+10				
<i>Total</i>	5.5039E+11	12					

Tabla B.12. Análisis de varianza de dos factores para todos los especímenes de compuesto unidireccional ensayados bajo cargas cíclicas.

*Anova: Two-Factor with Replication*

<i>SUMMARY</i>	0	68	122	215	509	Total
<i>0.7</i>						
<i>Count</i>	3	3	3	3	3	15
<i>Sum</i>	7684	2539	1000	643	115	11981
<i>Average</i>	2561.333	846.3333	333.3333	214.3333	38.33333	798.7333
<i>Variance</i>	1337621	1808.333	8032.333	12570.33	2096.333	1104308
<i>0.5</i>						
<i>Count</i>	3	3	3	3	3	15
<i>Sum</i>	29629	24342	15096	13599	7778	90444
<i>Average</i>	9876.333	8114	5032	4533	2592.667	6029.6
<i>Variance</i>	693660.3	26159428	12089388	2259571	4535200	13860237
<i>Total</i>						
<i>Count</i>	6	6	6	6	6	
<i>Sum</i>	37313	26881	16096	14242	7893	
<i>Average</i>	6218.833	4480.167	2682.667	2373.667	1315.5	
<i>Variance</i>	16865280	26310188	11462209	6504121	3772304	

*ANOVA*

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>	<i>Significance</i>
<i>Sample</i>	2.05E+08	1	2.05E+08	43.571	0.000	4.351	<i>Different</i>
<i>Columns</i>	90147872	4	22536968	4.785	0.007	2.866	<i>Different</i>
<i>Interaction</i>	25157014	4	6289253	1.335	0.291	2.866	<i>Not Different</i>
<i>Within</i>	94198753	20	4709938				
<i>Total</i>	4.15E+08	29					

## MICROGRAFÍAS ELECTRÓNICAS DE RASTREO

---

### C.1 Compuesto bidireccional

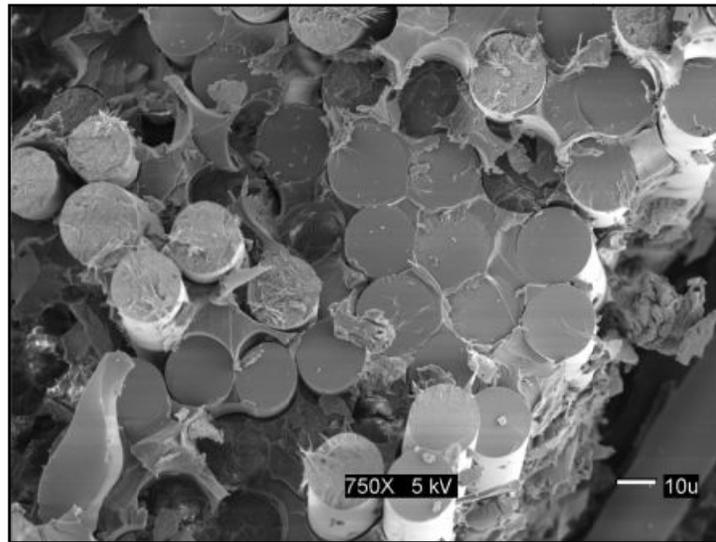


Figura C.1. Micrografía *SEM* de la superficie de falla perpendicular a las fibras en un espécimen de laminado bidireccional de control (sin condicionamiento) ensayado a un nivel de esfuerzo de 30%  $\sigma_{ult}$ .

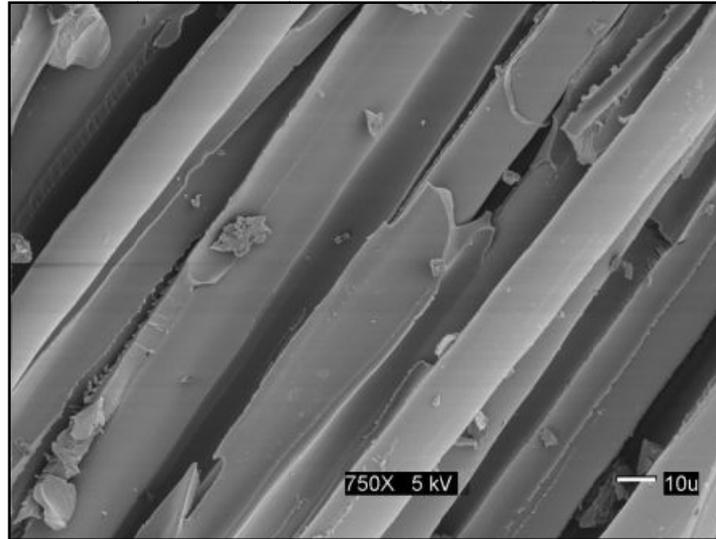


Figura C.2. Micrografía *SEM* de la superficie de falla paralela a las fibras en un espécimen de laminado bidireccional de control (sin condicionamiento) ensayado a un nivel de esfuerzo de  $30\% \sigma_{ult.}$

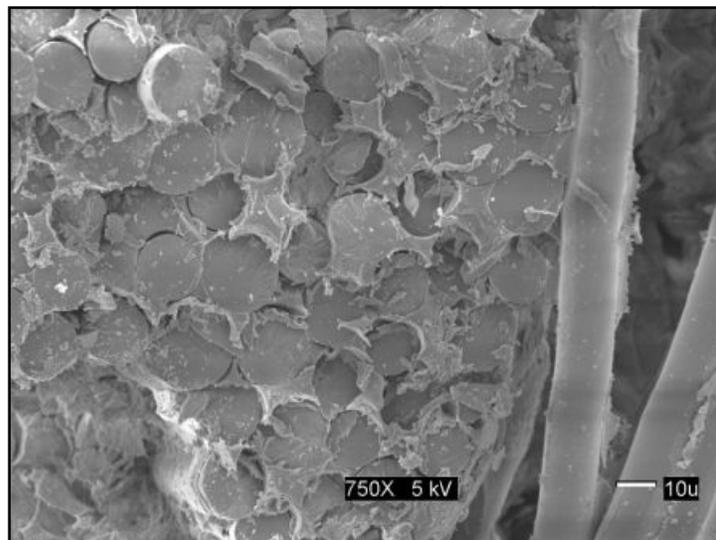


Figura C.3. Micrografía *SEM* de la superficie de falla perpendicular a las fibras en un espécimen de laminado bidireccional envejecido durante 100 días ensayado a un nivel de esfuerzo de  $30\% \sigma_{ult.}$

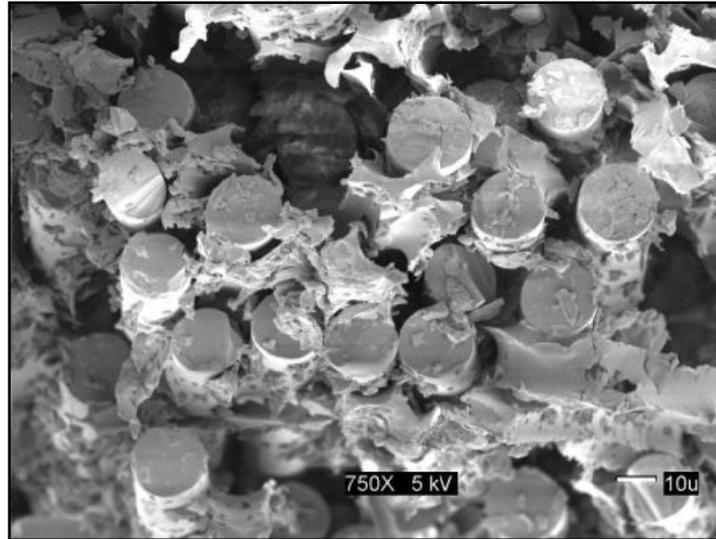


Figura C.4. Micrografía *SEM* de la superficie de falla perpendicular a las fibras en un espécimen de laminado bidireccional envejecido durante 504 días ensayado a un nivel de esfuerzo de 50%  $\sigma_{ult}$ .

## C.2 Compuesto unidireccional

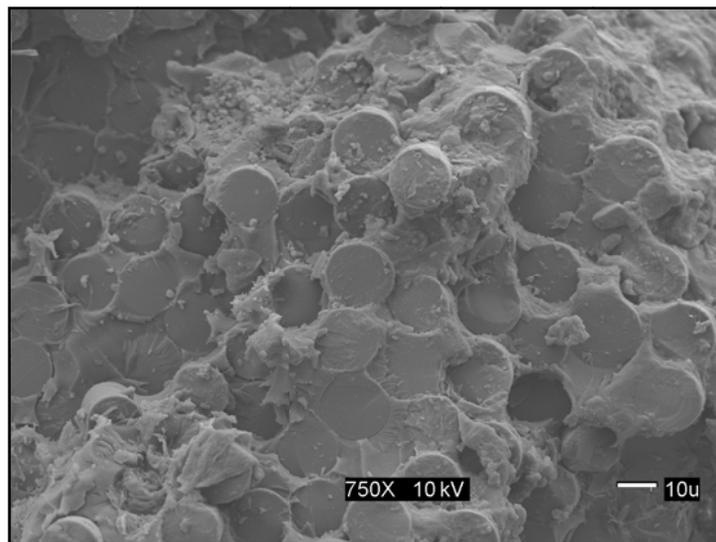


Figura C.5. Micrografía *SEM* de la superficie de falla perpendicular a las fibras en un espécimen de laminado unidireccional de control (sin condicionamiento) ensayado a un nivel de esfuerzo de 70%  $\sigma_{ult}$ .

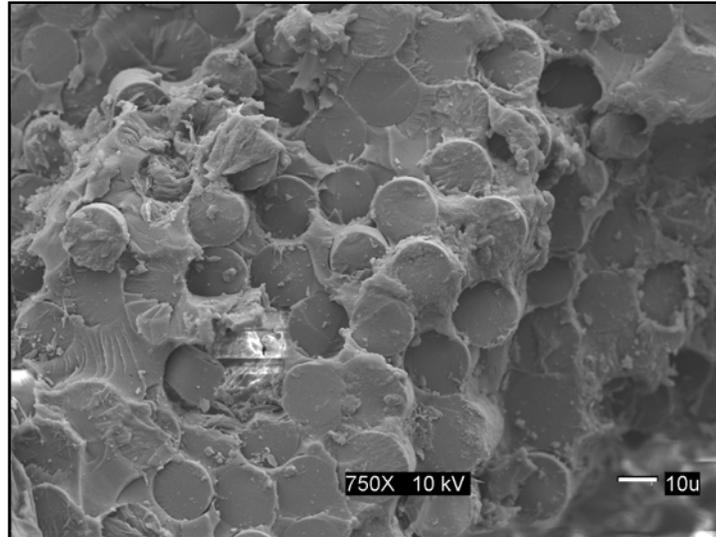


Figura C.6. Micrografía *SEM* de la superficie de falla perpendicular a las fibras en un espécimen de laminado unidireccional de control (sin condicionamiento) ensayado a un nivel de esfuerzo de  $70\% \sigma_{ult}$ .

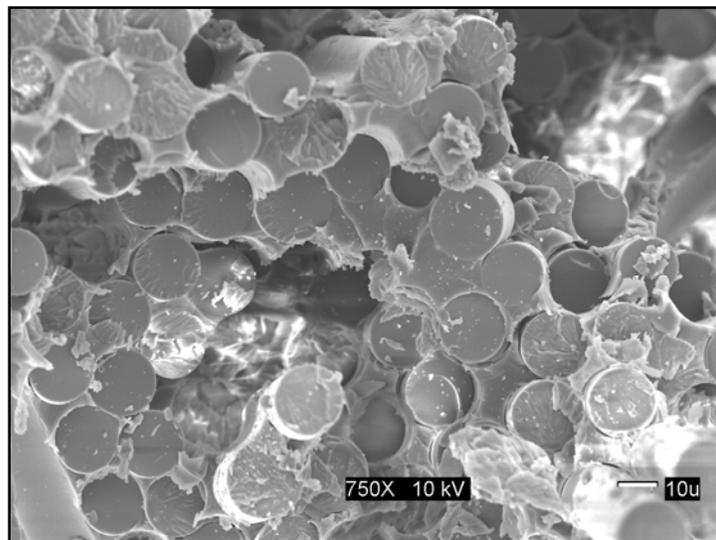


Figura C.7. Micrografía *SEM* de la superficie de falla perpendicular a las fibras en un espécimen de laminado unidireccional envejecido durante 110 días ensayado a un nivel de esfuerzo de  $50\% \sigma_{ult}$ .

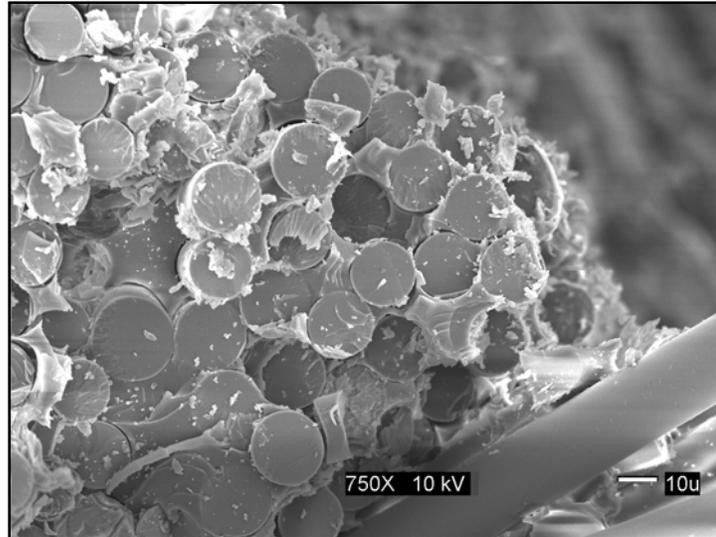


Figura C.8. Micrografía *SEM* de la superficie de falla perpendicular a las fibras en un espécimen de laminado unidireccional envejecido durante 110 días ensayado a un nivel de esfuerzo de  $50\% \sigma_{ult}$ .

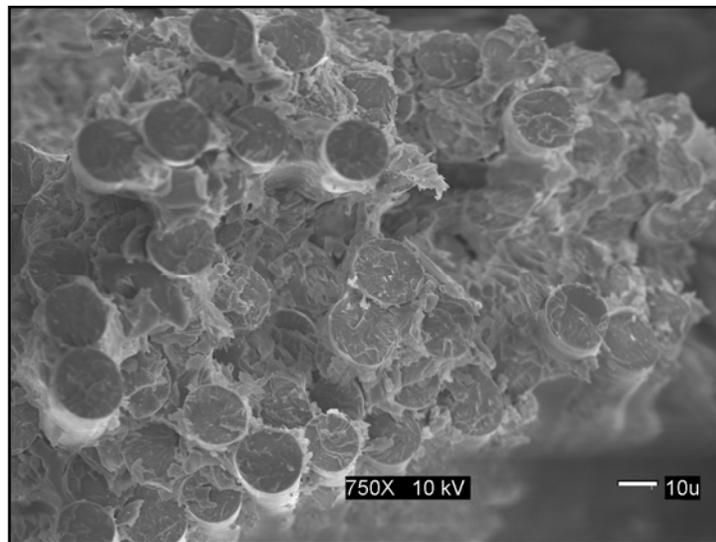


Figura C.9. Micrografía *SEM* de la superficie de falla perpendicular a las fibras en un espécimen de laminado unidireccional envejecido durante 521 días ensayado a un nivel de esfuerzo de  $50\% \sigma_{ult}$ .