



Universidad de Concepción  
Dirección de Postgrado  
Facultad de Ingeniería  
Programa de Magister en ciencias de la Ingeniería con mención en Ingeniería Mecánica



**Estudio experimental de impacto y su influencia sobre el  
daño en materiales compuestos**

Tesis para optar al grado de magister en ciencias de la ingeniería con  
mención en ingeniería mecánica

JOAQUÍN MANUEL OLIVARES JEREZ  
CONCEPCIÓN-CHILE  
2014

Profesor Guía: Paulo Flores Vega  
Dpto. de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería  
Universidad de Concepción

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

Profesor Patrocinante:  
Dr. Ing. Paulo Flores Vega



**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE IMPACTO Y SU  
INFLUENCIA SOBRE EL DAÑO EN MATERIALES  
COMPUESTOS**

**Joaquín Manuel Olivares Jerez**

Informe de Tesis

para optar al Grado de

Magister en Ciencias de la Ingeniería

con mención en Ingeniería Mecánica

Agosto - 2014

# Agradecimientos

Agradezco a mis padres y familia por su apoyo, a Gabriela por su amor y paciencia, al profesor Paulo Flores por sus conocimientos, al equipo del laboratorio de materiales compuestos por su alegría y auxilio en los obstáculos. Al laboratorio de mecánica sólidos y en particular a don Patricio Casanova por la paciencia y la confianza.

Igualmente agradezco a los profesores y maestros por los conocimientos entregados a lo largo de los años dentro del programa de magister, al proyecto Fondef D08I1138 por el apoyo en la realización de esta investigación, y finalmente a mis amigos y compañeros.



# Sumario

Este trabajo se enfoca en el análisis y comparación entre dos materiales compuestos sometidos a eventos de impacto y su posterior daño.

Se destacan los aspectos teóricos más relevantes que permiten establecer un protocolo de experimentación con la finalidad de obtener parámetros que sirvan para comparar los efectos sobre cada material.

Se presentan aspectos técnicos de fabricación y medición, basados en normas que permitan establecer repetitividad y parámetros comparativos a la hora de estudiar materiales bajo las mismas condiciones. Se presentan resultados experimentales y analíticos que buscan explicar la hipótesis.

En la tesis se describen todos los parámetros y variables involucradas en un evento de impacto, caracterización del material y comparación numérica entre la sensibilidad e influencia del impacto sobre un material sometido a cargas cíclicas luego de un evento de tracción violenta.

Finalmente los resultados muestran que para la configuración de laminado seleccionada para este estudio, el compuesto de carbono/epoxi muestra una mínima sensibilidad ante un evento de impacto y su posterior ensayo de daño. Es decir, el material presenta una diferencia de un 7,3 % en el módulo de elasticidad que finalmente podría tener tras un ensayo de daño sin impacto previo y otro con un impacto a una velocidad de 150[mm/s]. Por otra parte el compuesto de fibra de carbono-aramida/epoxi tolera de mejor forma cada ciclo de daño, degradando su módulo de elasticidad a una tasa más lenta que el material en comparación, sin embargo la sensibilidad que presenta frente al daño hace que el parametro estudiado alcance una diferencia de 76,1 % entre el módulo final tras un ensayo cíclico sin impacto y uno con impacto inicial a la misma velocidad mencionada anteriormente.

# Índice General

<b>Dedicatoria</b>	<b>I</b>
<b>Sumario</b>	<b>II</b>
<b>Índice General</b>	<b>III</b>
<b>Índice General</b>	<b>III</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>V</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>V</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>VIII</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>VIII</b>
<b>Nomenclatura</b>	<b>VIII</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Aspectos generales . . . . .	1
1.2. Estado del arte . . . . .	4
1.3. Hipótesis y objetivos . . . . .	6
1.3.1. General . . . . .	6
1.3.2. Específicos . . . . .	7
1.4. Contenidos . . . . .	7



<b>2. Marco teórico y protocolo experimental</b>	<b>8</b>
2.1. Objeto de estudio . . . . .	8
2.2. Evidencia experimental . . . . .	8
2.3. Modelo de daño . . . . .	10
2.3.1. Ley elástica del daño . . . . .	10
2.3.2. Ley de plasticidad . . . . .	12
2.4. Estrategia experimental . . . . .	13
2.5. Materiales y fabricación . . . . .	13
2.6. Ensayo de tracción . . . . .	19
2.6.1. Implementación . . . . .	19
2.6.2. Procedimientos . . . . .	20
2.7. Ensayo de tracción a mayor velocidad . . . . .	21
2.8. Ensayo carga-descarga . . . . .	22
<b>3. Resultados experimentales</b>	<b>24</b>
3.1. Resumen de los ensayos a continuación . . . . .	24
3.2. Resultados para los ensayos de tracción cuasiestáticos . . . . .	30
3.3. Resultados para los ensayos carga-descarga cuasiestáticos . . . . .	31
3.4. Resultados para los ensayos de tracción 15 [mm/s] y a 150 [mm/s] . . . . .	39
3.5. Resultados para los ensayos carga-descarga tras aplicar tracciones a 15 [mm/s] y a 150 [mm/s] . . . . .	41
3.6. Deformación inelástica en los ensayos cíclicos . . . . .	45
<b>4. Análisis de resultados y conclusiones</b>	<b>50</b>
4.1. Análisis de resultados ensayos de tracción . . . . .	50
4.2. Análisis de resultados al impacto . . . . .	51
4.3. Análisis de resultados ensayos de daño . . . . .	52
4.4. Figuras complementarias y análisis comparativo . . . . .	57
4.5. Conclusiones . . . . .	60
4.6. Perspectivas a futuro . . . . .	62
<b>Bibliografía</b>	<b>63</b>

# Índice de Figuras

1.1. Curvas de esfuerzo versus deformación para un compuesto de fibra de vidrio - epoxi sometidas a distintas velocidades de deformación [2]. . . . .	3
1.2. Efectos de la velocidad de deformación sobre distintos parámetros del material [2]. .	4
1.3. Resultados de distintos ensayos de tracción, con distintas velocidades. [4]. . . . .	5
1.4. Curvas experimentales de carga y descarga a distintas velocidades de deformación [5].	5
2.1. Resultados para un ensayo de compresión a distintas velocidades de deformación. [3]	9
2.2. Materiales objeto de esta investigación: Fibra de carbono (izquierda), Fibra de carbono-aramida (derecha) . . . . .	10
2.3. Resina L20 y su endurecedor Härter EPH 161 . . . . .	14
2.4. Esquema del proceso de transferencia de resina asistida por vacío [18] . . . . .	15
2.5. Proceso de transferencia de resina asistida por vacío en acción . . . . .	16
2.6. Microscopía corte de agua versus corte sierra banco [21] . . . . .	17
2.7. Proceso de corte por agua con CNC en acción [20] . . . . .	18
2.8. Dimensiones de las probetas de fibra de carbono/epoxi [mm] . . . . .	18
2.9. Dimensiones de las probetas de fibra de carbono-aramida/epoxi [mm] . . . . .	19
2.10. Máquina Instron 8801 . . . . .	20
2.11. Cámaras del sistema óptico de medición ARAMIS [23] . . . . .	21
2.12. Presencia de deformación plástica para laminados a 0°, 90° y 45° en carga-descarga [15] . . . . .	23
3.1. Gráficos con los resultados del ensayo de tracción para ambos materiales . . . . .	30
3.2. Gráfico para el ensayo carga-descarga para caracterizar el daño sobre la probeta K5 EP/CF . . . . .	32

3.3. Gráfico para el ensayo carga-descarga para caracterizar el daño sobre la probeta G5 EP/CAF . . . . .	33
3.4. Degradación del módulo de elasticidad para EP/CF Probeta K5 en tracción cíclica . .	34
3.5. Degradación del módulo de elasticidad para EP/CAF Probeta G5 en tracción cíclica .	34
3.6. Degradación del módulo de elasticidad para EP/CF en tracción cíclica cuasiestática sin impacto previo . . . . .	35
3.7. Degradación del módulo de elasticidad para EP/CAF en tracción cíclica cuasiestática sin impacto previo . . . . .	36
3.8. Degradación del módulo de elasticidad para EP/CF en tracción cíclica cuasiestática tras un impacto previo a 0,033[mm/s] . . . . .	37
3.9. Degradación del módulo de elasticidad para EP/CAF en tracción cíclica cuasiestática tras un impacto previo a 0,033[mm/s] . . . . .	38
3.10. Esfuerzos alcanzados a una deformación de $\epsilon = 0,008$ por impactos sobre EP/CF a distintas velocidades de deformación . . . . .	39
3.11. Esfuerzos alcanzados a una deformación de $\epsilon = 0,009$ por impactos sobre EP/CAF a distintas velocidades de deformación . . . . .	40
3.12. Degradación del módulo de elasticidad para EP/CF en tracción cíclica cuasiestática tras un impacto previo a 15[mm/s] . . . . .	41
3.13. Degradación del módulo de elasticidad para EP/CF en tracción cíclica cuasiestática tras un impacto previo a 150[mm/s] . . . . .	42
3.14. Degradación del módulo de elasticidad para EP/CAF en tracción cíclica cuasiestática tras un impacto previo a 15[mm/s] . . . . .	43
3.15. Degradación del módulo de elasticidad para EP/CAF en tracción cíclica cuasiestática tras un impacto previo a 150[mm/s] . . . . .	44
3.16. Deformación permanente tras la descarga de cada ciclo de tracción en un ensayo de daño en tracción cíclica cuasiestática sobre EP/CF . . . . .	45
3.17. Deformación permanente tras la descarga de cada ciclo de tracción en un ensayo de daño en tracción cíclica cuasiestática sobre EP/CAF . . . . .	46
3.18. Deformación permanente y su relación con el módulo de elasticidad para ensayos cíclicos de daño en EP/CF . . . . .	47



3.19. Deformación permanente y su relación con el módulo de elasticidad para ensayos cíclicos de daño en EP/CAF . . . . .	48
4.1. Esfuerzos alcanzados a distintas velocidades de deformación:(izquierda) a una deformación de $\epsilon = 0,008$ por impactos sobre EP/CF, (derecha) a una deformación de $\epsilon = 0,009$ por impactos sobre EP/CAF . . . . .	51
4.2. Resumen de los promedios y linealizaciones de los resultados de daño para EP/CF . .	52
4.3. Resumen de los promedios y linealizaciones de los resultados de daño para EP/CF . .	53
4.4. Resumen de los promedios y linealizaciones de los resultados de daño para EP/CF considerando un módulo de elasticidad inicial constante . . . . .	54
4.5. Resumen de los promedios y linealizaciones de los resultados de daño para EP/CF considerando un módulo de elasticidad inicial constante . . . . .	55
4.6. Degradación del módulo de elasticidad en ambos materiales para ensayos de daño en tracción cíclica sin impacto previo . . . . .	57
4.7. Degradación del módulo de elasticidad en ambos materiales para ensayos de daño en tracción cíclica con impacto previo a $0,033[mm/s]$ . . . . .	58
4.8. Degradación del módulo de elasticidad en ambos materiales para ensayos de daño en tracción cíclica con impacto previo a $15[mm/s]$ . . . . .	58
4.9. Degradación del módulo de elasticidad en ambos materiales para ensayos de daño en tracción cíclica con impacto previo a $150[mm/s]$ . . . . .	59

# Índice de Tablas

2.1. Valores de cada parámetro material . . . . .	14
2.2. Dimensiones de placas carbono-aramida epoxi . . . . .	16
2.3. Dimensiones de placas carbono epoxi . . . . .	17
3.1. Probetas utilizadas para el ensayo de tracción . . . . .	25
3.2. Probetas utilizadas para los ensayos de carga y descarga cuasiestáticos . . . . .	26
3.3. Probetas utilizadas en los ensayos de impacto a $0,033[mm/s]$ y posterior carga descarga	27
3.4. Probetas utilizadas en los ensayos de impacto a $15[mm/s]$ y posterior carga descarga	28
3.5. Probetas utilizadas en los ensayos de impacto a $150[mm/s]$ y posterior carga descarga	29
3.6. Módulo de elasticidad según teoría clásica de laminados [19] . . . . .	30
3.7. Módulo de elasticidad para cada probeta sometida a tracción simple . . . . .	31
3.8. Módulo de elasticidad y deformaciones para cada ciclo de carga y descarga . . . . .	32
4.1. Comparación en la pendiente de degradación del módulo de elasticidad por cada ciclo de daño sobre el material . . . . .	56

# Nomenclatura

$E$	Módulo de Young o módulo de elasticidad.
$G$	Módulo de corte.
$E_c$	Módulo de compresión
$\nu$	Coefficiente de Poisson.
$\sigma$	Esfuerzo.
$\epsilon$	Deformación.
$\dot{\epsilon}$	Velocidad de deformación.
$t$	Tiempo.
$l$	Largo de la placa.
$w$	Ancho de la placa.
$h$	Espesor de la placa.
$M$	Masa.
$d_1$	Variable de daño asociada a la dirección longitudinal de la lámina.
$d_2$	Variable de daño asociada a la dirección transversal de la lámina.
$d_{12}$	Variable de daño asociada al plano de la lámina.
$E_D$	Energía de deformación.
$Y_{d1}$	Fuerza termodinámica asociada a la variable de daño $d_1$ .
$Y_{d2}$	Fuerza termodinámica asociada a la variable de daño $d_2$ .
$Y_{d12}$	Fuerza termodinámica asociada a la variable de daño $d_{12}$ .
$\underline{Y}$	Fuerza termodinámica equivalente.
$\tilde{\sigma}$	Tensor de esfuerzo efectivo.
$\rho$	Densidad.
$p$	Deformación plástica equivalente.



$R_o$	Umbral de plasticidad.
$Y_o$ y $Y_c$	Fuerza termodinámica umbral y crítica.
$K$	Constante ley de plasticidad.
$n$	Exponente ley de plasticidad.
$A_t$	Área transversal de las probetas.
$CNC$	Control numérico por computadora
$EP/CF$	Fibra de carbono con resina epóxica
$EP/CAF$	Fibra de carbono y aramida con resina epóxica



# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Aspectos generales

Materiales compuestos son todos aquellos en donde a un nivel macroscópico se pueden identificar dos o más constituyente. El desempeño mecánico y las propiedades de un compuesto superan a las de sus componentes por separado, observando una sinergia en el producto. En la actualidad existe una variedad de estos materiales y se pueden clasificar según su matriz ya sea cerámica, metálica o polimérica.

Progresivamente estos últimos, fabricados de resinas termoestables reforzadas con fibras, han sustituido a materiales tradicionales en aplicaciones estructurales y su uso en la industria aeroespacial impulsa nuevos desafíos en ámbitos como caracterización, comportamiento y fabricación. Particularidades como la relación resistencia-peso, propiedades mecánicas y facilidades de diseño, hacen de estos materiales una excelente opción para mejorar el rendimiento mecánico de componentes o estructuras. No obstante, la falta de precisión para predecir el comportamiento de estos materiales conduce a diseños conservadores o ensayos prueba y error, incrementando el costo del producto. En la actualidad, los obstáculos se encuentran en la comprensión de ciertos aspectos del comportamiento de los materiales compuestos, fundamentalmente en áreas como mecanismos de fallo y predicción de resistencia, análisis de fallos en servicio, introducción de cargas concentradas, uniones, durabilidad, comportamiento a fatiga, tolerancia al daño, etc.

La búsqueda de eficiencia e integridad estructural es uno de los temas principales de la industria aeroespacial, la cual se fiscaliza bajo una estricta normativa de certificación. Dado esto, cada aspecto

del comportamiento mecánico en servicio del material debe ensayarse y analizarse por completo.

Las ventajas que presentan los materiales compuestos sobre los materiales tradicionales obligan a adquirir el conocimiento apropiado para diseñar y predecir la respuesta que estos puedan presentar frente a diversos fenómenos. Generalmente los diseños conservadores emplean parámetros del material fundamentados en caracterizaciones con un limitado número de variables, mientras que en la realidad, estos se encuentran expuestos a cargas dinámicas, fatiga, impactos y fenómenos que no pueden representarse con parámetros obtenidos bajo un régimen cuasi estático y donde la influencia de la velocidad de deformación cobra importancia tras demostrar la sensibilidad a esta variable.

Su masificación y uso dentro del mercado se justifican por su gran resistencia y rigidez en la dirección de la fibra o laminado, su excelente respuesta ante esfuerzos y deformaciones, y porque su comportamiento casi nunca es crítico ante cargas nominales, las cuales solo son obtenidas en condiciones experimentales. Sin embargo, estas características hacen que, frente a las ventajas que presentan estos materiales, se investiguen aspectos en otros campos físicos, como la resistencia eléctrica, parámetros relacionados con la transferencia de calor y aspectos situacionales en funcionamiento como la fatiga o la resistencia al impacto.

Se observa que dentro de las aplicaciones, estos materiales pueden estar sometidos a cargas dinámicas, como puede ser la viga principal en el ala de un avión o el tren de aterrizaje de un UAV [1], frente a lo cual las propiedades mecánicas de un material compuesto, caracterizadas bajo un régimen cuasi estático pueden responder bien bajo determinados eventos, mientras que en la realidad la velocidad de deformación a la cual estarán sometidos en servicio puede ser superior al régimen experimental.

El uso de propiedades mecánicas caracterizadas mediante ensayos dinámicos, es decir, fuera del rango cuasi estático, puede asegurar que el diseño de estructuras utilizando polímeros termoestables reforzados sea eficiente bajo cargas dinámicas en un determinado rango de velocidades. Por otra parte, para estos materiales tanto la aparición como el progreso del daño son aspectos sensibles a la velocidad de deformación. La cual actualmente no es considerada en el diseño ni simulaciones. Cabe destacar que tanto la falla o ruptura, como los esfuerzos máximos que puedan alcanzar estos materiales también se ven afectados por la velocidad a la que se deforman, como se muestra en la figura 1.2, donde los autores muestran que la diferencia de velocidades a las cuales se realiza un ensayo de tracción afecta varios parámetros dentro de la caracterización.

Por consiguiente la necesidad de establecer una línea de investigación y experimentación que

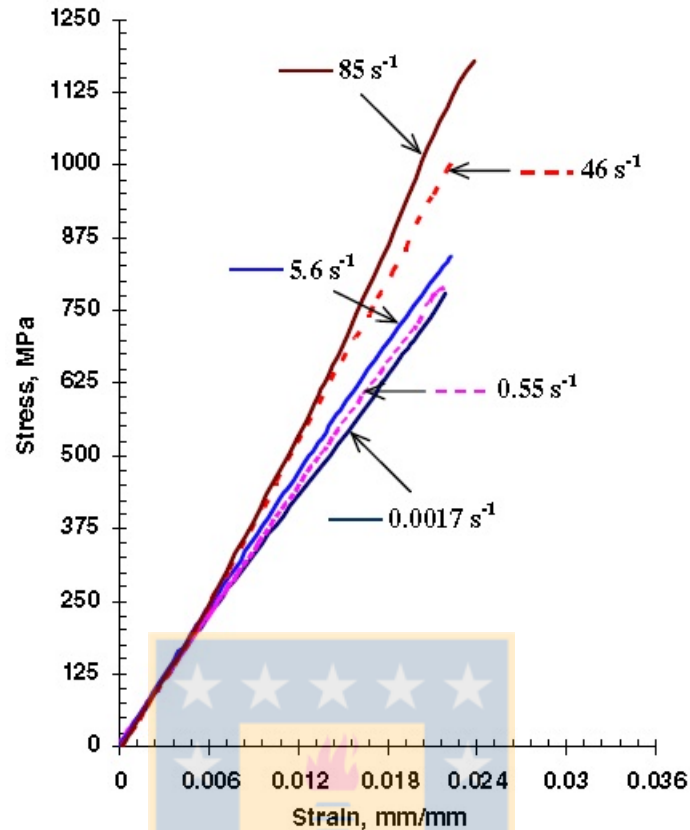


Figura 1.1: Curvas de esfuerzo versus deformación para un compuesto de fibra de vidrio - epoxi sometidas a distintas velocidades de deformación [2].

apunte al análisis de la influencia de la velocidad de deformación tanto en las propiedades mecánicas como en el daño, y la respuesta que pueden presentar los materiales compuestos reforzados tanto con fibra de carbono, como fibra de carbono-aramida es latente y presentaría beneficios para el diseño y uso de estos materiales. Sin embargo, Para esto se deben establecer rangos de velocidad, ensayos estándar, variables y los materiales a comparar mediante un protocolo de experimentación que asegure repetitividad en los resultados y minimice el error.

Implícitamente se puede identificar una clasificación para la velocidad del ensayo, donde el régimen cuasi estático corresponde a velocidades de deformación menores a  $0,002s^{-1}$ , mientras que rangos de velocidades de deformación intermedios correspondientes a ensayos dinámicos entre  $0,002s^{-1}$  y  $200s^{-1}$ . Por último ensayos de alta velocidad de deformación son llevados a cabo mediante maquinaria y experimentación específicamente diseñada como la Split Hopkinson pressure bar, la cual puede alcanzar velocidades en compresión de hasta  $104s^{-1}$ , mientras que para ensayos cuasi estáticos y dinámicos maquinas servo hidráulicas son las comúnmente utilizadas.

## 1.2. Estado del arte

Investigaciones y estudios que evalúen las propiedades de un material, la relación entre la velocidad de deformación, el daño y comparaciones entre las propiedades de materiales utilizados para similares aplicaciones, se pueden encontrar en la literatura especializada, mas no existe ninguna que relacione todos los aspectos, que permita establecer protocolos con distintas velocidades de deformación y la cuantificación de qué produciría un evento violento sobre el daño en un ensayo de cargas cíclicas.

En cuanto a los materiales, Mahmood et al. [2] [3] [4] presentan una caracterización dinámica para la tracción, el corte y las propiedades transversales de fibra de vidrio/epoxi unidireccional, estableciendo una sensibilidad de parte del módulo de elasticidad y mostrando un aumento significativo en este parámetro al igual que en los esfuerzos máximos alcanzados al incrementar la velocidad del ensayo. La figura 1.3 muestra la comparación de ensayos de tracción y ensayos de compresión sobre un mismo material compuesto de fibra de vidrio y resina, a distintas velocidades de deformación.

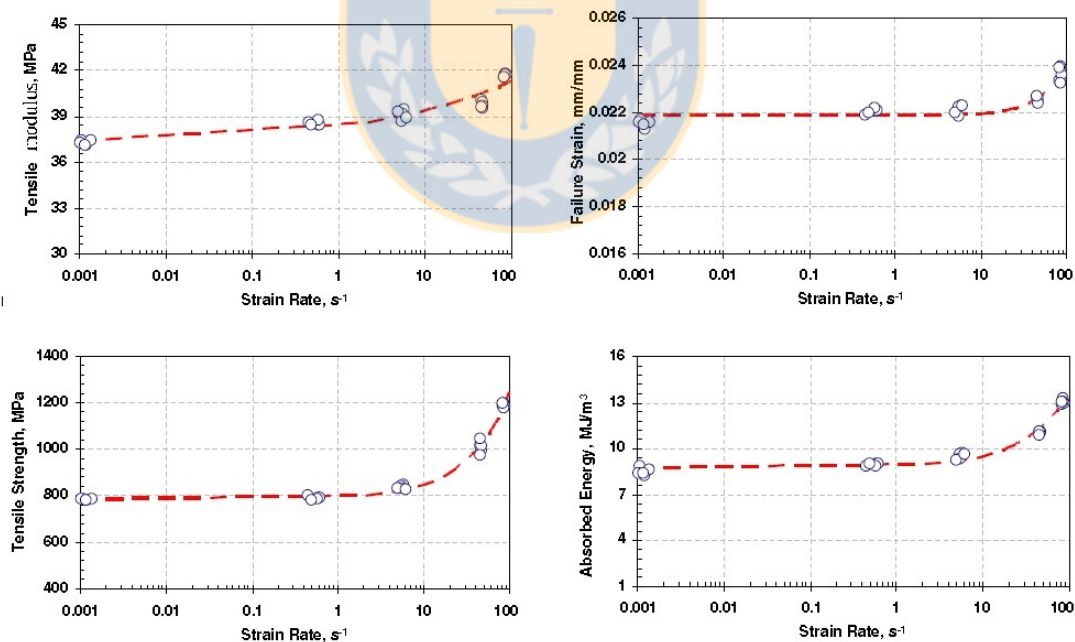


Figura 1.2: Efectos de la velocidad de deformación sobre distintos parámetros del material [2].

Fitoussi et al. [5] muestran avances en la optimización de métodos experimentales estables y con esfuerzos y deformaciones homogéneas para una caracterización de materiales compuestos sometidos



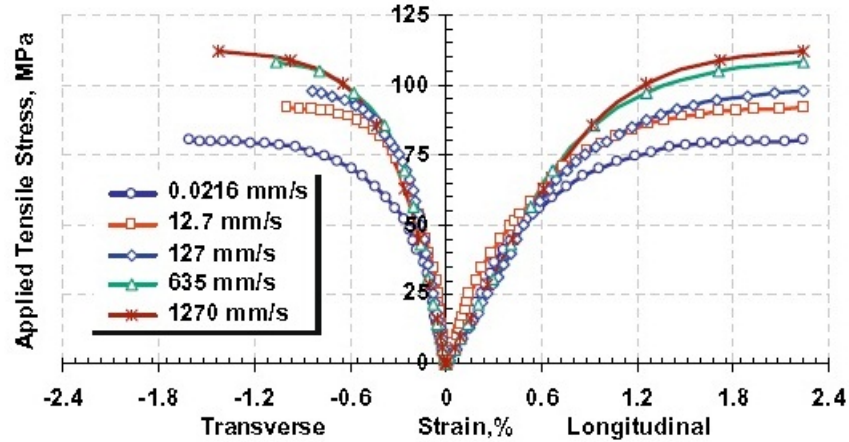


Figura 1.3: Resultados de distintos ensayos de tracción, con distintas velocidades. [4].

a distintas velocidades de deformación. Utilizando estos métodos logra mostrar el incremento en el módulo de elasticidad que sufre la fibra de carbono/epoxi, insistiendo en la relación que puede presentar la sensibilidad a la velocidad de deformación y la orientación de la fibra. La figura 1.4 muestra que el efecto de la velocidad de deformación sobre un ensayo cíclico. Se observa que a una mayor velocidad de deformación la magnitud del esfuerzo máximo de cada ciclo de carga y descarga es mayor, sin embargo la deformación en cada ciclo es menor y la ruptura sucede a menores valores de este parámetro.

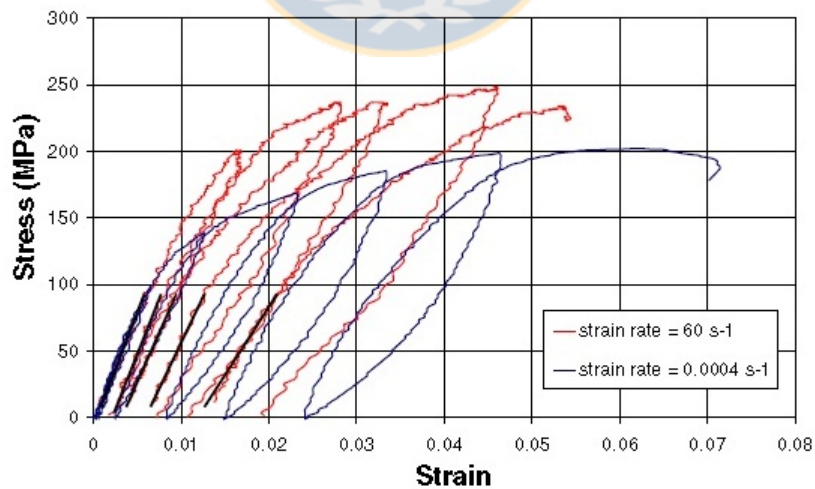


Figura 1.4: Curvas experimentales de carga y descarga a distintas velocidades de deformación [5].

Para el Kevlar/epoxi, Al-Salehi et al. [6] muestran que en la dirección transversal a la fibra un ensayo con una velocidad de deformación de  $70\text{s}^{-1}$  producirá un aumento en el módulo de seis veces

sobre el valor cuasi estático y de diez veces para la resistencia máxima del material en esta dirección.

Daniel et al. [7] buscan ajustar modelos numéricos para los criterios de falla sobre un amplio rango de velocidades de deformación, estudiando la influencia de la orientación del laminado sobre el aumento en los parámetros de falla a distintas velocidades. Raimondo et al. [8] también busca implementar modelos numéricos que contribuyan a la simulación de los efectos en cuestión, para evitar la caracterización dinámica y los métodos experimentales no estandarizados. Sus resultados establecen una aproximación a la realidad en todas las direcciones del material.

Los estudios que presentan la relación entre el daño y la velocidad de deformación muestran la sensibilidad que la degradación de parámetros presenta para determinados materiales compuestos. Jendli et al. [9] concluyen un retraso en la aparición del daño desde el nivel microscópico lo que deriva en un menor valor final de este parámetro. Por otro lado Papadakis et al. [10] [11] analizan el daño en corte y su relación con la velocidad del ensayo, mostrando que modelos como el de Ladevéze [12] permiten predecir la respuesta del material y la evolución del daño presente tras ensayos de carga y descarga. Sin embargo para este autor la deformación angular al momento de la falla es independiente de la velocidad de deformación.

Otras aproximaciones numéricas sobre el daño a altas velocidades de deformación presentada por Tardemirci et al. [13] y Qida Bing et al. [14] establecen respuestas y modos de falla presentes en rango muy altos de velocidad, coincidiendo con estudios experimentales.

### **1.3. Hipótesis y objetivos**

La hipótesis principal de este estudio es que, a distintas velocidades de deformación, un mismo material compuesto presentará un comportamiento distinto y éste tendrá directa influencia en la evolución del daño. Frente a esta suposición se fijan los objetivos generales y específicos de la investigación, los cuales se detallan a continuación.

#### **1.3.1. General**

El objetivo de este estudio es determinar experimentalmente la influencia que pueda tener una carga repentina con determinada velocidad de deformación sobre un laminado de material compuesto de matriz polimérica, ya sea reforzado con fibras de carbono o carbono-aramida, sobre las propiedades

mecánicas del material. Además observar los efectos del evento de deformación sobre la evolución del daño.

### 1.3.2. Específicos

- Establecer protocolo experimental para observar la influencia de la velocidad de deformación en las propiedades mecánicas de un material compuesto.
- Determinar las propiedades mecánicas de materiales compuestos de carbono y uno de carbono-aramida, dentro del rango cuasi estático.
- Observar la evolución del daño en ambos materiales, tras un evento con una velocidad mayor a la cuasi estática, mediante un ensayo de cargas cíclicas.
- Comparar las ventajas en diseño entre un compuesto de carbono/epoxi y uno de carbono-aramida/epoxi.

## 1.4. Contenidos

En el segundo capítulo, se establecen las variables que permitan diseñar un protocolo de ensayos a distintas velocidades de deformación, caracterizar un material bajo este régimen y observar las diferencias con los ensayos cuasi estáticos.

En el tercer capítulo, se expone los resultados experimentales

Finalmente, en el cuarto capítulo, se realizan conclusiones, discusiones y perspectivas a futuro del trabajo experimental.

# Capítulo 2

## Marco teórico y protocolo experimental

### 2.1. Objeto de estudio

El principal objeto de este estudio es establecer experimentalmente las diferencias en el comportamiento de un material compuesto ante impactos a distintas velocidades. Para esto es necesario precisar ciertos aspectos y establecer claramente los alcances de esta investigación.

Si bien el impacto se define como el choque de un proyectil o de otro objeto contra algo, la definición tomada para establecer el protocolo y objetivos de los experimentos será: “Efecto de una fuerza aplicada bruscamente”. De esta última explicación se extraen dos términos los cuales enmarcan la teoría a estudiar: la fuerza aplicada y lo brusco o rápido que ésta se aplica.

Según lo estudiado por los autores mencionados en el capítulo anterior y dado sus alcances, se entiende que la velocidad de deformación tendrá influencia en los esfuerzos, el módulo de elasticidad y por ende sobre el daño que una carga cíclica pueda provocar sobre un material compuesto.

### 2.2. Evidencia experimental

Evidencia experimental muestra que la velocidad de deformación tiene una influencia sobre el módulo de elasticidad de un material compuesto. Mahmood et al. [2] [3] [4] estudiaron experimentalmente el comportamiento de un compuesto de fibra de vidrio/epoxi unidireccional ante esfuerzos de tracción y corte a distintas velocidades de deformación.

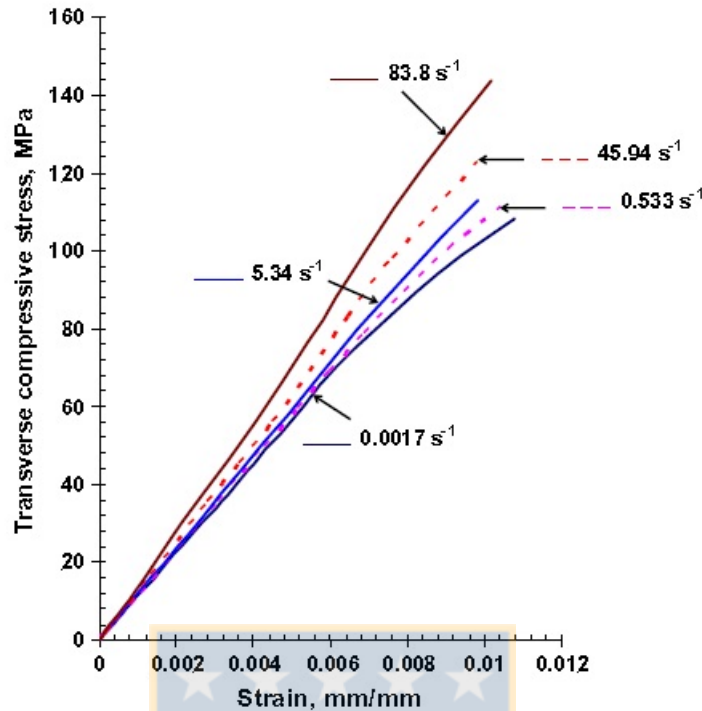


Figura 2.1: Resultados para un ensayo de compresión a distintas velocidades de deformación. [3]

En la figura 2.1 se observa que al aumentar la velocidad de deformación del ensayo de compresión existe un cambio en la pendiente de la curva de esfuerzo - deformación, aumentando conforme se aumenta la velocidad del experimento. Este efecto puede ser determinante en el valor del módulo de elasticidad el cual se degrada conforme existan fuerzas cíclicas sobre el material. Esta degradación, llamada “Daño” se encuentra estudiada por Ladevéze [12], Hochard [15] y otros expertos en este tema. Por otra parte Medina [16] plantea un protocolo de ensayo con el cual se pueden encontrar variables que permiten cuantificar esta degradación del módulo de elasticidad.

De forma experimental, Daniel [15] estableció que la influencia de la velocidad de deformación es logarítmica sobre el módulo de elasticidad, lo cual brinda un importante dato para establecer un protocolo de ensayos a distintas velocidades de deformación en donde los resultados sean notorios y cuantificables. Este autor señala además que la velocidad de los ensayos guarda relación también con los valores últimos y máximos de esfuerzo y deformación de un material compuesto.

Ante toda esta evidencia, es claro preguntarse: si al aumentar la velocidad de un ensayo, o mejor dicho, si un material compuesto sufre una deformación brusca ¿Se degradará de igual modo el módulo de elasticidad ante futuras cargas cíclicas? El material, o la estructura construida con compuestos ¿Será capaz de resistir de igual modo tras deformaciones bruscas o impactos? ¿qué sucede con las

variables caracterizadas cuasiestáticamente? ¿cambian? ¿de qué modo?

Ahora bien, para extender de mejor manera los efectos y no puntualizar casos particulares se estudian a continuación todas estas preguntas sobre materiales compuestos de fibra de carbono y otro de fibra de carbono-aramida, los cuales se muestra en la siguiente figura.

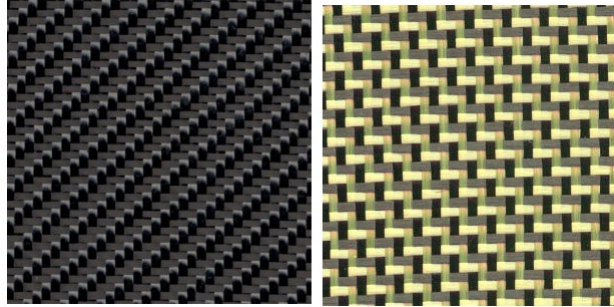


Figura 2.2: Materiales objeto de esta investigación: Fibra de carbono (izquierda), Fibra de carbono-aramida (derecha)

## 2.3. Modelo de daño

Basándose en el modelo presentado por Medina [16] y sus resultados, el desarrollo en materia de daño expuesto en primera instancia por Hochard [15] define la parte elástica basada en la energía de deformación y en variables de daño gobernadas por fuerzas termodinámicas asociadas a la disipación mecánica, además mediante un factor de acoplamiento de corte/tensión, se unen estados de esfuerzos mixtos. esta ley modela el comportamiento como la degradación de las propiedades mecánicas debido a las variables de daño. La parte con endurecimiento está ligada con las variables de daño mediante los esfuerzos efectivos o deformaciones inelásticas.

### 2.3.1. Ley elástica del daño

El modelo constitutivo de un material dañado es derivado del principio de energía deformación.

$$E_D = \frac{1}{2} \int \sigma \varepsilon dV = E_D(\tilde{\sigma}), \tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{(1-d)} \quad ; \quad 0 \leq d \leq 1 \quad (2.1)$$

$$E_D = \frac{1}{2} \left[ \frac{\langle \sigma_1 \rangle_+^2}{E_1^0(1-d_1)} + \frac{\langle \sigma_1 \rangle_-^2}{E_1^0} - 2 \frac{\nu_{12}^0}{E_1^0} \sigma_1 \sigma_2 + \frac{\langle \sigma_2 \rangle_+^2}{E_2^0(1-d_2)} + \frac{\langle \sigma_2 \rangle_-^2}{E_2^0} + \frac{\sigma_{12}^2}{G_{12}^0(1-d_{12})} \right] \quad (2.2)$$

Para determinar el inicio y la evolución del daño se utiliza funciones de daño con las siguientes relaciones:

$$d_1(\hat{Y}_1); d_2(\hat{Y}_2); d_6(\hat{Y}_2) \quad (2.3)$$

Siendo  $\hat{Y}_1$  y  $\hat{Y}_2$  las variables internas del modelo, estas se definen mediante una combinación lineal de las fuerzas termodinámicas asociadas al daño:

$$\hat{Y}_1 = \max_{s=0,t} \{Y_1^s\}; \hat{Y}_2 = \max_{s=0,t} \{Y_6^s + bY_2^s\} \quad (2.4)$$

Donde  $b$  es una constante del material e  $Y_i$  las fuerzas termodinámicas asociadas a la variable daño. Las variables de daño serán nulas hasta llegar a un umbral a partir del cual crecerán hasta alcanzar el valor de 1.

Para determinar las leyes de daño, y comprobar la bondad de la relación secante elegida por Ladevèze utiliza el concepto de los escenarios de daño. Considera un conjunto de mecanismos de fallo, por ejemplo en la matriz considera daño difuso o microdaño producido por la separación entre la fibra y la matriz, agrietamiento a lo largo de todo el espesor de la capa y delaminación entre capas. definiendo micromodelos de elementos finitos con este daño puede determinar el valor de la perdida de rigidez del laminado al generarse cada modo de daño.

De la fórmula se observa una diferenciación entre los esfuerzos en compresión y tracción. En compresión no se aprecia una degradación de las propiedades, ya que las microgrietas en compresión se cierran.

Derivando la energía de deformación con respecto al esfuerzo efectivo se tiene la ley de daño elástico:

$$\varepsilon = \frac{\partial E_D}{\partial \tilde{\sigma}} = C : \tilde{\sigma} \quad (2.5)$$

La disipación de energía en el daño está relacionada con las fuerzas termodinámicas definidas como:

$$Y_i = \frac{\partial E_D}{\partial d_i} = \frac{\langle \sigma_i \rangle_+^2}{2E_i^0(1-d_i)^2} \quad (2.6)$$

$$Y_{12} = \frac{\partial E_D}{\partial d_{12}} = \frac{\sigma_{12}^2}{2G_{12}^0(1-d_{12})^2} \quad (2.7)$$

Con las cuales se define una fuerza termodinámica equivalente:

$$Y = \alpha(Y_{d1} + Y_{d2}) + Y_{12} \quad (2.8)$$

La degradación de las propiedades son efecto de las variables de daño definidas como:

$$d_{12} = \left\langle \frac{\sqrt{Y} - \sqrt{Y_0}}{\sqrt{Y_C} - \sqrt{Y_0}} \right\rangle, \quad d_1 = d_2 = 0 \quad (2.9)$$

De la formula anterior se deduce que la degradación de las propiedades mecánicas son producto del corte en el plano 12. Cabe destacar que en la dirección de las fibras las variables de daño toman el valor 0 ó 1, ya que en esas direcciones el material no se degrada, sino que solo falla.

### 2.3.2. Ley de plasticidad

El criterio de plasticidad y la ley de endurecimiento se expresan en términos de los esfuerzos efectivos  $\tilde{\sigma}$ . Se define el tensor de velocidad de deformación plástica efectiva  $\dot{\tilde{\epsilon}}_p$ , que satisface la equivalencia del principio de disipación de la energía plástica:

$$\tilde{\sigma} : \dot{\tilde{\epsilon}}_p = \sigma : \dot{\epsilon}_p \quad (2.10)$$

Por tanto se define la deformación plástica efectiva y la deformación plástica equivalente como:

$$\tilde{\epsilon}^p = \epsilon^p(1 - d) \quad \Rightarrow \quad p = \int d\tilde{\epsilon}^p \quad (2.11)$$

Debido a la falta de plasticidad en la dirección de las fibras, el criterio de la plasticidad tiene una expresión particular, diferente del habitual criterio de Von Mises:

$$f = |\tilde{\sigma}_{12}| - R(p) - R_0 = 0 \quad (2.12)$$

La ley de endurecimiento de Hollomon está definida como:

$$R(p) = Kp^\gamma \quad (2.13)$$

Donde  $p$  corresponde a la deformación plástica equivalente,  $\gamma$  es el exponente de endurecimiento por deformación y  $K$  la constante de la ley de plasticidad.



## 2.4. Estrategia experimental

Para observar diferencias entre un material compuesto reforzado con carbono y otro reforzado con carbono-aramida en primer lugar se establecen parámetros que se mantendrán constantes, como la matriz epóxica para ambos. De igual manera el proceso de fabricación será el mismo para ambos, es decir el corte de la fibra, el impregnado, el curado y el corte. Todo esto se detalla en la secciones siguientes.

Además se utilizan las mismas máquinas y herramientas de medición para evitar error al comparar resultados.

Tras puntualizar lo anterior, la primera etapa es caracterizar las propiedades mecánicas cuasiestáticas de los laminados elegidos para estos ensayos, para luego establecer las condiciones normales de comportamiento al daño de estos materiales siguiendo un protocolo similar al de Medina [16], el cual observa la degradación de parámetros al hacer ensayos cíclicos de carga descarga sobre el material.

Para observar la influencia de un impacto sobre el material se considera una carga de tracción sobre una probeta, como la aplicada para caracterizar cuasiestáticamente el material. Esta carga intenta recrear el efecto de una fuerza violenta, a una velocidad de deformación distinta a la utilizada en la primera caracterización del material. Tras este hecho, se vuelve a la condición inicial de la probeta, es decir liberándola de la carga anterior, para proceder a ensayar cíclicamente el material en condiciones normales siguiendo nuevamente el protocolo de identificación de daño.

## 2.5. Materiales y fabricación

La selección de materiales se fundamenta en la búsqueda de comparar dos materiales compuestos similares en tejido pero con distintas propiedades mecánicas, las cuales presentan una mejor o peor tolerancia al daño. Dentro de los posibles materiales objetos de este estudio se encuentra la fibra de carbono y la aramida. Los usos de la fibra de carbono-aramida en chalecos antibalas, cascos y artículos específicamente diseñados para impacto prevén que su resistencia al impacto sea mayor, por otra parte compuestos de fibra de carbono tienen variados usos en donde también se busca la integridad de los componentes, mientras que los compuestos de carbono tiene una amplia gama de usos y aplicaciones.

Para este estudio experimental se utiliza una fibra de carbono con una densidad planar de  $204 \text{ g/m}^2$ ,

mientras que el segundo material es fibra de carbono-aramida con una densidad planar de  $210 \text{ g/m}^2$ , ambos equi-bidireccional tipo twill  $2 \times 2$  y utilizando para siempre la misma matriz de resina epóxica L20 de baja viscosidad e incolora (Figura 2.3). Esta debe ser mezclada con su respectivo endurecedor, EPH 161, con el cual se logra la consistencia final. Este tipo de resina es termoestable, es decir, se forma por reacciones químicas no reversibles donde se endurece generando un producto final infusible en cualquier tipo de condición. Este tipo de laminados se caracteriza por ser balanceados y se adaptan mejor a superficies complejas, haciéndolos indicados para la industria aeronáutica y aeroespacial.



Figura 2.3: Resina L20 y su endurecedor Härter EPH 161

Las propiedades de estos materiales ya se encuentran caracterizadas dentro del proyecto Fondef D08I1138 para sus principales direcciones y se detallan en la tabla 2.1:

Tabla 2.1: Valores de cada parámetro material

Ensayo	Parámetro	EP/CF	EP/CAF
Tracción	E [Mpa]	58860,29	48542,30
	Esfuerzo a la ruptura [MPa]	711,52	611,01
Corte	G [Mpa]	3341,54	2648,24
	Esfuerzo a la ruptura [MPa]	49,02	47,88
Compresión	Ec [Mpa]	8659,41	6593,62
	Esfuerzo a la ruptura [MPa]	315,83	199,43
Impacto	Resistencia al impacto [ $J/m$ ]	1140,08	2457,65
Volumen de fibra	Porcentaje %	53,8	51,6

Como el objeto de estudio es referente a impacto se utiliza la configuración de laminado  $[0^\circ/45^\circ]_{3S}$  la cual es la misma configuración empleada en ensayos normados según ASTM D 7136/D 7136M-05 [17] para ensayo de impacto de baja velocidad. Más importante aún, es que este laminado es cuasi isotrópico lo que favorece la fabricación, la experimentación y el estudio en general.

Para asegurar la repetitividad de los resultados y reducir el error se fabrican siete placas de fibra de carbono-aramida y nueve placas de fibra de carbono, de las cuales se extraen la mayor cantidad de probetas para los respectivos ensayos. La fabricación se lleva a cabo mediante transferencia de resina asistida por vacío (VI) (Figura 2.4), el cual utiliza el vacío para el impregnado de las fibras junto con la matriz polimérica, y además, para la compactación de las fibras. En este proceso las fibras se montan sobre un molde que previamente es limpiado, encerado y pulido. Luego, por sobre las fibras se coloca una lámina antiadherente llamada peel-ply, la cual separa las fibras del medio difusor que en caso de la figura 2.5 se identifica como una malla plástica verde necesaria para lograr el escurrimiento de la resina y medir el desplazamiento de esta.

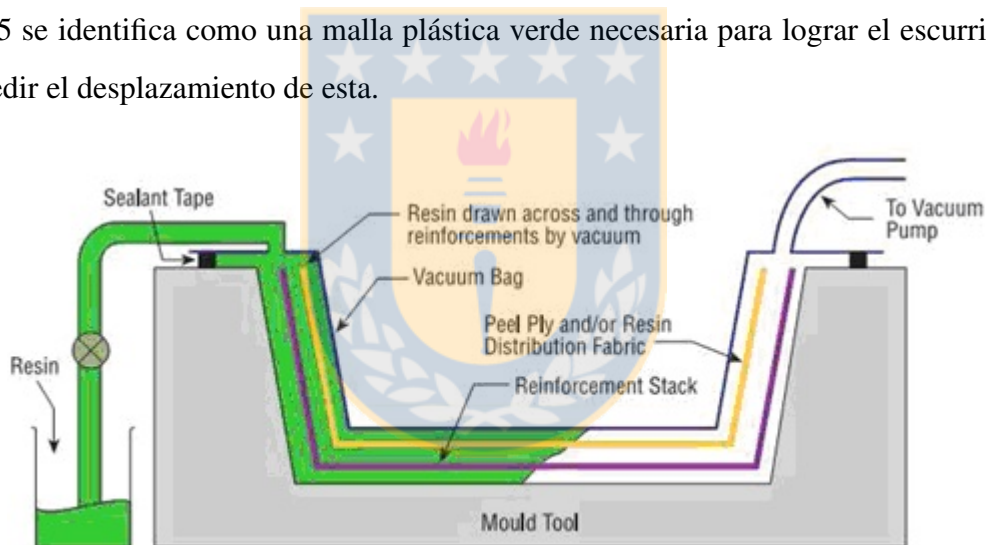


Figura 2.4: Esquema del proceso de transferencia de resina asistida por vacío [18]

Una vez posicionado el medio difusor se procede a instalar los canales de alimentación y descarga de la resina, que representan la entrada y salida de la misma. Para cerrar el montaje es colocado un sello adhesivo y la bolsa de vacío sobre el molde. Finalmente, se procede a realizar la infusión activando la central de vacío y permitiendo que la resina impregne las fibras.

Tras dar el tiempo necesario para solidificar, se procede a despegar todos los componentes y limpiar las superficies de las placas. Antes de los procesos de maquinado, corte y rectificación, es necesario un proceso de curado en un horno a  $100^\circ\text{C}$  por 15 horas.

Las siguientes tablas contienen las dimensiones y características de las placas fabricadas para

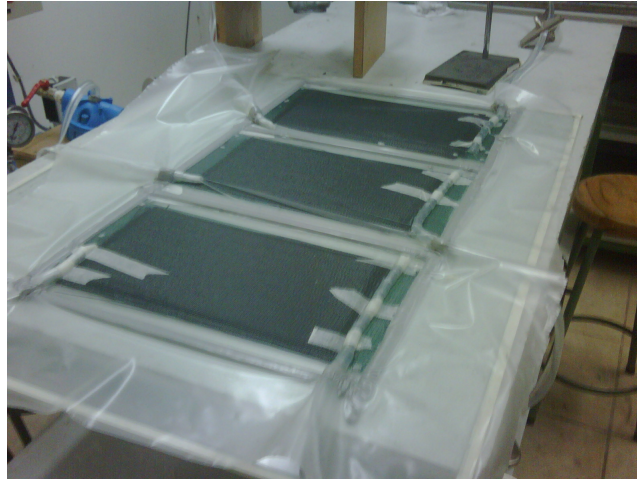


Figura 2.5: Proceso de transferencia de resina asistida por vacío en acción

extraer las probetas para los ensayos de tracción y ensayos cíclicos.

Tabla 2.2: Dimensiones de placas carbono-aramida epoxi

Placa	Espesor $h$ [mm]	Ancho $w$ [mm]	Largo $l$ [mm]	Dureza Barcol
Placa A	$2,898 \pm 0,012$	$224,91 \pm 0,32$	$412,93 \pm 0,31$	$57 \pm 6$
Placa B	$2,920 \pm 0,039$	$225,34 \pm 0,29$	$418,21 \pm 0,24$	$57 \pm 4$
Placa C	$2,962 \pm 0,017$	$224,69 \pm 0,15$	$430,31 \pm 0,30$	$57 \pm 5$
Placa D	$3,406 \pm 0,034$	$225,07 \pm 0,25$	$405,20 \pm 0,32$	$50 \pm 7$
Placa E	$2,946 \pm 0,025$	$225,11 \pm 0,28$	$422,25 \pm 0,40$	$57 \pm 5$
Placa F	$2,946 \pm 0,019$	$227,14 \pm 0,38$	$420,18 \pm 0,32$	$55 \pm 4$
Placa G	$2,948 \pm 0,028$	$226,07 \pm 0,57$	$428,23 \pm 0,51$	$56 \pm 6$
Placa H	$3,314 \pm 0,022$	$223,89 \pm 0,23$	$426,35 \pm 0,47$	$56 \pm 4$
Placa I	$3,468 \pm 0,031$	$225,34 \pm 0,18$	$419,40 \pm 0,20$	$56 \pm 4$

Tabla 2.3: Dimensiones de placas carbono epoxi

Placa	Espesor $h$ [mm]	Ancho $w$ [mm]	Largo $l$ [mm]	Dureza Barcol
Placa J	$2,589 \pm 0,018$	$186,17 \pm 0,68$	$349,71 \pm 0,52$	$61 \pm 6$
Placa K	$2,596 \pm 0,031$	$182,67 \pm 0,50$	$358,09 \pm 0,29$	$62 \pm 5$
Placa L	$2,528 \pm 0,017$	$191,38 \pm 0,72$	$361,19 \pm 0,65$	$63 \pm 5$
Placa M	$2,564 \pm 0,024$	$188,29 \pm 0,87$	$355,32 \pm 0,31$	$62 \pm 4$
Placa N	$2,628 \pm 0,021$	$181,34 \pm 0,66$	$358,29 \pm 0,27$	$62 \pm 5$
Placa O	$2,606 \pm 0,027$	$185,45 \pm 0,41$	$363,41 \pm 0,53$	$62 \pm 4$
Placa P	$2,696 \pm 0,030$	$190,21 \pm 0,87$	$360,30 \pm 0,43$	$62 \pm 4$

El proceso de corte para las probetas es tratado por Rodríguez [19] y Pincheira [21] en donde se señala que el corte por agua con CNC [20] asegura repetitividad y calidad superficial. La figura de la referencia muestra las caras de corte obtenidas por corte de agua y por sierra de banco comparadas en microscopía (Figura 2.6). Allí se ve que el corte por sierra deja una superficie irregular y con indicios de delaminación. Por otra parte, el corte de agua deja un mejor acabado superficial y asegura repetitividad, sin embargo, se aprecia un ángulo en corte.

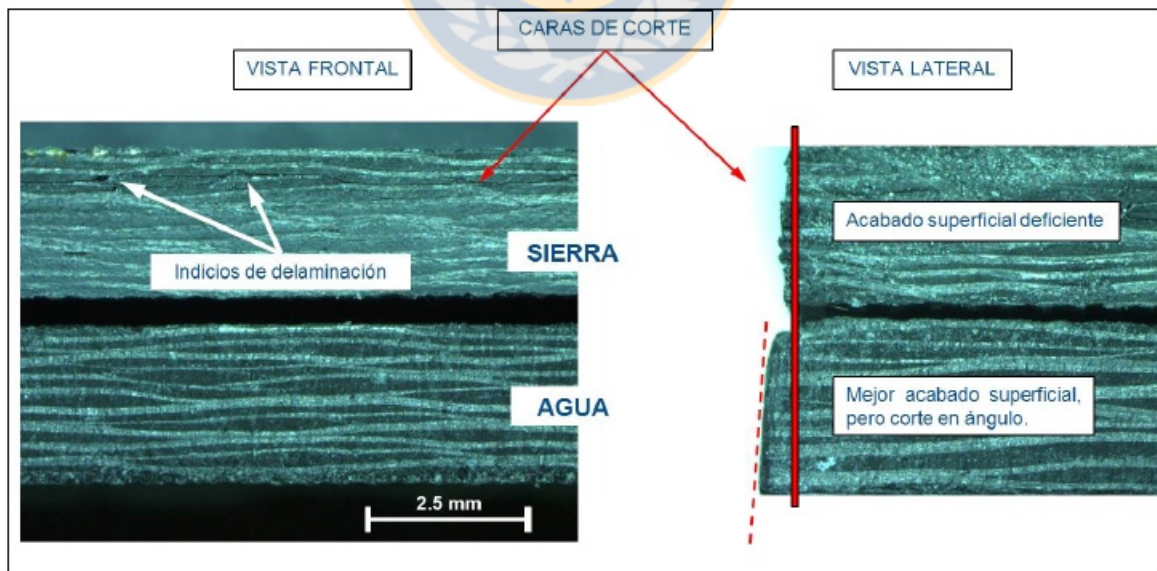


Figura 2.6: Microscopía corte de agua versus corte sierra banco [21]

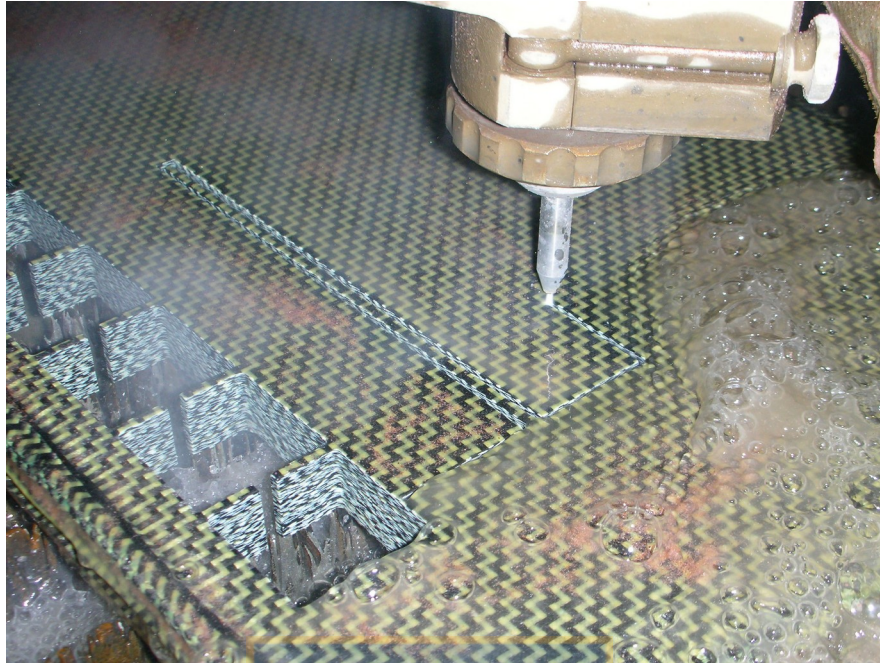


Figura 2.7: Proceso de corte por agua con CNC en acción [20]

La geometría de las probetas cortadas está determinada según la norma ASTM D 3039/D 3039M-08 [22], que establece los métodos más adecuados para la caracterización de parámetros elásticos de un material compuesto como los estudiados.

Para las probetas de fibra de carbono/epoxi se utiliza la geometría representada en la figura 2.8 la cual posee en los extremos refuerzos del mismo material pegados con la misma resina epóxica de infusión.



Figura 2.8: Dimensiones de las probetas de fibra de carbono/epoxi [mm]

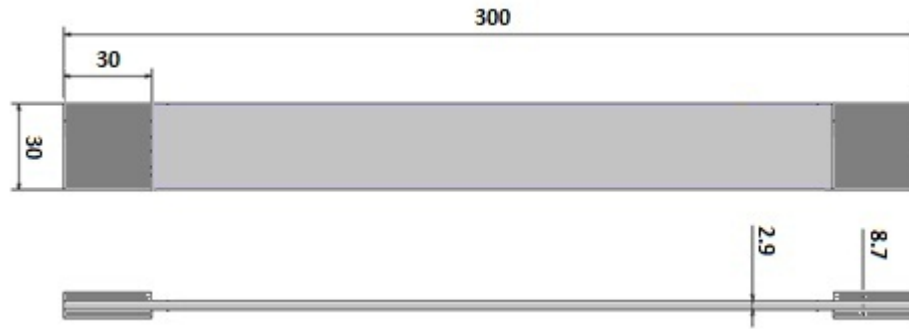


Figura 2.9: Dimensiones de las probetas de fibra de carbono-aramida/epoxi [mm]

## 2.6. Ensayo de tracción

Como el primer paso es caracterizar ambos materiales compuestos es necesario seguir la norma ASTM D 3039/D 3039M-08 [22], la cual establece los métodos más adecuados para la identificación de parámetros elásticos de un material compuesto como los seleccionados. La idea del ensayo es montar la probeta, anteriormente descrita, en las garras o sistema de sujeción de una máquina para ensayos mecánicos registrando los datos de carga y deformación al aplicar una fuerza longitudinal de tracción. Este ensayo permite identificar la fuerza de ruptura del material, la deformación o el desplazamiento, la respuesta de esfuerzo-deformación del material, módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson.

### 2.6.1. Implementación

Para llevar a cabo este ensayo, los instrumentos principales son la máquina hidráulica de tracción Instron 8801 y el sistema óptico de medición Aramis 5M LT.

La máquina Instron 8801 corresponde a un sistema servohidráulico que permite una variada gama de pruebas con variados requisitos dinámicos y estáticos. Es útil ante las necesidades de materiales avanzados y pruebas de componentes, y es ideal para las pruebas de fatiga, termo-mecánica y pruebas de fractura. Tiene una capacidad de hasta  $100kN$ , un espacio de trabajo mayor, una alta rigidez, y la precisión de la alineación.

El sistema de medición de deformación ARAMIS es un sistema de medición óptico de deformación 3D. La representación gráfica de los resultados de la medición proporciona una comprensión óptima del comportamiento del objeto a medir.



Figura 2.10: Máquina Instron 8801

ARAMIS reconoce la superficie del objeto a medir por medio de cámaras digitales, asignando coordenadas a los píxeles de la imagen. La primera imagen en el proyecto de medición representa el estado no deformado del objeto. Después de o durante la deformación del objeto a medir, las imágenes adicionales son registradas. Entonces, ARAMIS compara las imágenes digitales y calcula el desplazamiento y deformación de puntos en el objeto. En el caso de superficies homogéneas, es necesario preparar las caras de la muestra por medio de métodos adecuados, por ejemplo, aplicar un patrón estocástico de color en aerosol, al igual lo indica el manual y como lo hace Davidkov et al [24] para su estudio de sobre el doblado de aleaciones y el daño.

Este sistema de adquisición de datos, es particularmente adecuado para las mediciones de deformación en tres dimensiones con carga estática y dinámica con el fin de analizar las deformaciones y el esfuerzo de una muestra.

El error asociado a la medición de la deformación es de un 0,008 % utilizando una calibración para pequeños volúmenes con un resultado de desviación de 0,03 píxeles.

### 2.6.2. Procedimientos

En primer lugar, se calibra el sistema de medición siguiendo lo indicado para el caso de una medición de deformación plana en un ensayo de tracción (Ver manual, [23]). A continuación, se posiciona la probeta en la máquina de tracción alineándola utilizando el dispositivo diseñado por





Figura 2.11: Cámaras del sistema óptico de medición ARAMIS [23]

Rodríguez [19], el cual alinea la probeta en la dirección en que se aplica la fuerza y asegura repetitividad. Luego se configura la fuerza y el desplazamiento de los cabezales en cero; y se establece una velocidad de desplazamiento del cabezal cuasiestática de  $2[mm/min]$ . Además se programan las cámaras para que obtengan una imagen de la probeta por cada  $1kN$  de fuerza aplicada sobre la muestra.

El experimento comienza con la toma de imágenes de la probeta sin deformación para establecer el punto de comparación. Luego se carga de forma cuasiestática la probeta mientras se guardan los valores de fuerza y deformación sobre la probeta, y terminará cuando la probeta alcance su máximo y se rompa.

## 2.7. Ensayo de tracción a mayor velocidad

Para emular los efectos de un impacto o fuerza violentamente aplicada sobre el compuesto se utilizará un procedimiento similar al ensayo de tracción cuasiestática, utilizando la misma implementación y herramientas para llevara cabo la recopilación de datos.

La idea es comparar los valores de esfuerzo y deformación obtenidos para un ensayo de tracción cuasiestática en donde la velocidad del cabezal es de  $2[mm/min]$  o  $0,03[mm/s]$  con dos ensayos más: uno a  $15[mm/s]$  y otro a  $150[mm/s]$ .

Sin embargo, a diferencia del ensayo de tracción anterior, en donde se llegaba hasta los valores máximos y la ruptura, este experimento busca mantener la integridad de la probeta para luego hacer ensayos cíclicos sobre ella. Para comparar ambos materiales a la misma velocidad es necesario establecer que el desplazamiento que alcance el cabezal será proporcional al largo de la probeta, es decir, el  $\Delta L$  que se alcanzará con este experimento corresponde a un 1 % del largo total de la probeta traccionada. De este modo se obtienen velocidades de deformación similares para cada caso y con un aumento exponencial entre sí.

Como las velocidades propuestas superan las capacidades del sistema óptico de adquisición de datos, solo se toman imágenes que permitan establecer la deformación inicial y la deformación final de la muestra. Es claro que estos resultados no califican para un análisis que permita caracterizar el material a esa determinada velocidad, sin embargo dada la configuración del laminado, se espera que el comportamiento de la muestra se mantenga dentro del rango elástico lineal lo que implica que solo se puede comparar el valor de esfuerzo alcanzado con el que debería alcanzarse con condiciones normales de caracterización.

Tras descargar la probeta no se libera de las mordazas. La muestra pasa a la siguiente fase del experimento.

## 2.8. Ensayo carga-descarga

Este ensayo permite visualizar la evolución del daño del material a estudiar. El número de ciclos de carga-descarga debe ser bajo y no debe alcanzar la ruptura del material, es por eso que se resuelve llevar a cabo al menos siete ciclos. Cabe mencionar que se debe mantener el ensayo en un dominio donde el efecto de la fatiga sea despreciable.

Con este ensayo se determinan las fuerzas termodinámicas críticas  $Y_C$  y umbral  $Y_0$  analizando el cambio de pendiente en cada descarga, es decir el cambio de módulo de elasticidad del material. Para encontrar estos parámetros se realiza una linealización de la evolución de la variable de daño con respecto a la fuerza termodinámica. Los parámetros de la ley de endurecimiento o ley de plasticidad modelan el comportamiento tras superar la zona elástica, sin embargo se espera esta sea mínima o no aparezca dada la configuración del laminado (Figura 2.12). Estos escalares son el coeficiente de la ley de plasticidad  $K$ , el exponente de la ley de plasticidad  $n$  y el umbral de la ley de plasticidad  $R_0$ , los cuales se determinan analizando la deformación plástica acumulada luego de cada descarga mediante

una extrapolación de valores de la curva endurecimiento - deformación plástica acumulada.

Otro punto a aclarar, es que esta etapa del protocolo se llevará a cabo bajo condiciones de velocidad cuasiestáticas y siguiendo el protocolo utilizado por Medina [16]. En esta secuencia ya no es necesario utilizar elevadas velocidades, ya que el impacto se representó con la etapa anterior y el objetivo del ensayo carga-descarga es observar el daño o su evolución tras la fuerza aplicada violentamente.

Se establece que cada ciclo de tracción la medida que establecerá los límites y alcances de cada ciclo será el desplazamiento del cabezal de la máquina de tracción. Comenzando con  $0,5[mm]$  para el primer ciclo de carga y aumentando la misma cantidad en los siguientes ciclos de tracción, es decir, para el segundo ciclo se alcanzará un desplazamiento del cabezal de  $1,0[mm]$ , para el siguiente  $1,5[mm]$  y así sucesivamente hasta alcanzar un desplazamiento del cabezal equivalente al  $1,5\%$  del largo total de cada probeta.

Esta decisión se fundamenta en las limitaciones que posee el sistema óptico de medición de deformación, el cual no entrega instantáneamente para cada segundo la deformación de la muestras, ventaja que si posee el strain gage. Esto limita la posibilidad de establecer una medida porcentual de deformación la cual se debe alcanzar para cada ciclo de tracción, sin embargo, al utilizar la medida propuesta en el párrafo anterior los materiales se comparan frente a las mismas condiciones y se establece un protocolo uniforme.

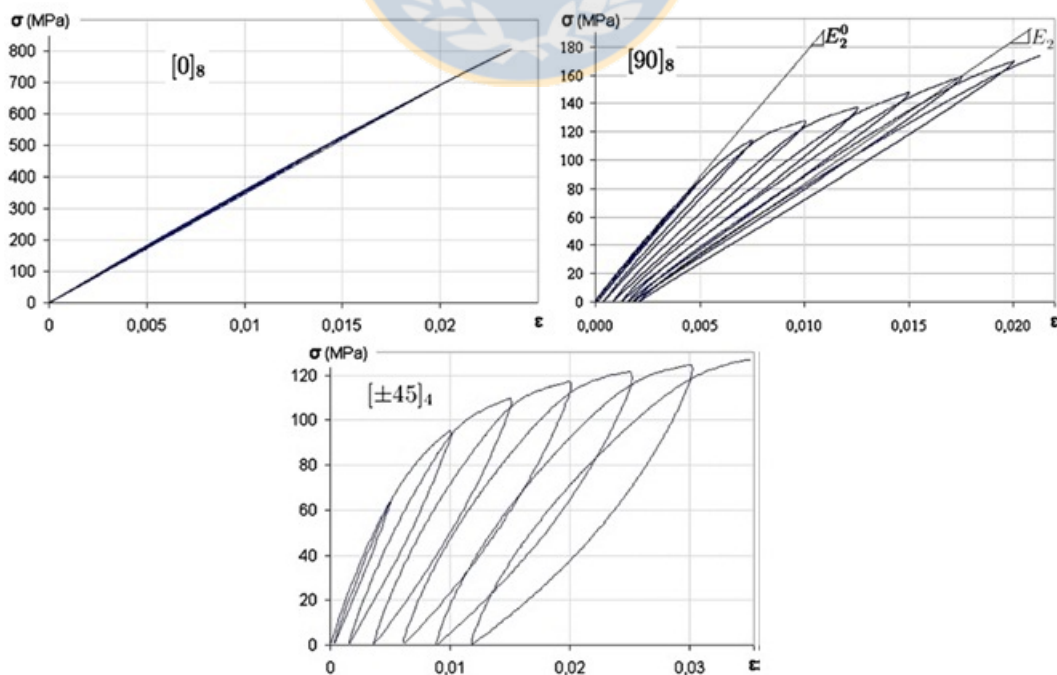


Figura 2.12: Presencia de deformación plástica para laminados a  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  y  $45^\circ$  en carga-descarga [15]

# Capítulo 3

## Resultados experimentales

A continuación se muestran los resultados obtenidos tras aplicar los protocolos de ensayos del capítulo anterior a un material compuesto de fibra de carbono con matriz epóxica y otro de fibra de carbono-aramida con la misma matriz. Los materiales fabricados presentaron un 48,63 % y 46,82 % de volumen de fibra respectivamente.

### 3.1. Resumen de los ensayos a continuación

Las tablas 3.1 y 3.2 resumen e ilustran el esquema de ensayo que permite asegurar repetitividad en los resultados. En primer lugar se presentan siete pruebas con probetas elegidas de distintas muestras de material compuesto para cada variación de las condiciones de prueba, es decir siete probetas para un ensayo de tracción simple que permite identificar los parámetros del material, los cuales se comparan con los obtenidos por otras siete probetas que se someten a condiciones de impacto a 15[mm/s] y 150[mm/s] y sus respectivas caracterizaciones al daño tras cargas cíclicas.

En particular, la tabla 3.1 muestra las probetas, sus dimensiones y tolerancias para los ensayos de tracción, mientras que la tabla 3.2 enumera las probetas utilizadas para cada tipo de impacto y su respectivo ensayo de daño.

Tabla 3.1: Probetas utilizadas para el ensayo de tracción

Probeta	J1	K1	L3	M1	N1	O1	P1
Tracción simple EP/CF	Ancho	24,620 ± 0,030	24,489 ± 0,071	24,450 ± 0,019	24,362 ± 0,031	24,342 ± 0,034	24,586 ± 0,036
	Espesor	2,512 ± 0,032	2,508 ± 0,036	2,564 ± 0,024	2,628 ± 0,023	2,606 ± 0,009	2,696 ± 0,009
	Área	63,498 ± 0,782	63,603 ± 0,665	62,690 ± 0,621	64,023 ± 0,559	63,435 ± 0,250	66,283 ± 0,305
Probeta	B1	C1	E1	F1	G1	H1	I1
Tracción simple EP/CAF	Ancho	29,754 ± 0,026	29,708 ± 0,011	29,682 ± 0,095	30,222 ± 0,033	29,800 ± 0,035	29,752 ± 0,038
	Espesor	2,954 ± 0,009	2,888 ± 0,007	2,901 ± 0,017	2,926 ± 0,027	3,314 ± 0,015	3,468 ± 0,015
	Área	87,417 ± 0,227	85,796 ± 0,189	86,078 ± 0,465	88,429 ± 1,170	98,757 ± 0,539	103,180 ± 0,423

Tabla 3.2: Probetas utilizadas para los ensayos de carga y descarga cuasiestáticos

Probeta	J3	K5	M5	N5	O6	P5	L3
Ensayo cíclico cuasiestático EP/CF	Ancho	24,620 ± 0,030	24,489 ± 0,071	24,450 ± 0,019	24,362 ± 0,031	24,342 ± 0,034	24,586 ± 0,036
	Espesor	2,512 ± 0,032	2,508 ± 0,036	2,564 ± 0,024	2,628 ± 0,023	2,606 ± 0,009	2,696 ± 0,009
	Área	63,498 ± 0,782	63,623 ± 0,379	63,603 ± 0,665	64,023 ± 0,559	63,435 ± 0,250	66,283 ± 0,305
Probeta	A4	B5	C5	E5	F5	G5	H5
Ensayo cíclico cuasiestático EP/CAF	Ancho	29,754 ± 0,026	29,758 ± 0,030	29,708 ± 0,011	29,682 ± 0,095	30,222 ± 0,033	29,752 ± 0,038
	Espesor	2,954 ± 0,009	2,938 ± 0,007	2,888 ± 0,007	2,901 ± 0,017	2,926 ± 0,027	3,468 ± 0,015
	Área	87,417 ± 0,227	87,905 ± 0,321	85,796 ± 0,189	86,078 ± 0,465	88,429 ± 1,170	98,757 ± 0,539

Tabla 3.3: Probetas utilizadas en los ensayos de impacto a  $0,033[mm/s]$  y posterior carga descarga

Tracción cuasiestática	Probeta	J2	K2	M2	N2	O2	O3	P2
hasta 1 % luego ensayo	Ancho	$29,754 \pm 0,026$	$24,548 \pm 0,064$	$24,508 \pm 0,102$	$24,414 \pm 0,020$	$24,412 \pm 0,082$	$24,386 \pm 0,060$	$24,654 \pm 0,017$
cíclico cuasiestático	Espesor	$2,954 \pm 0,009$	$2,590 \pm 0,023$	$2,576 \pm 0,011$	$2,598 \pm 0,008$	$2,650 \pm 0,032$	$2,610 \pm 0,012$	$2,728 \pm 0,008$
EP/CF	Área	$87,417 \pm 0,227$	$63,579 \pm 0,550$	$63,133 \pm 0,467$	$63,427 \pm 0,164$	$64,693 \pm 0,966$	$63,648 \pm 0,444$	$67,256 \pm 0,214$
Tracción cuasiestática	Probeta	A1	B2	C2	E2	F2	G2	H2
hasta 1 % luego ensayo	Ancho	$29,718 \pm 0,011$	$29,744 \pm 0,064$	$29,704 \pm 0,030$	$29,800 \pm 0,070$	$29,696 \pm 0,015$	$29,808 \pm 0,016$	$29,754 \pm 0,026$
cíclico cuasiestático	Espesor	$2,898 \pm 0,008$	$2,920 \pm 0,018$	$2,962 \pm 0,015$	$2,946 \pm 0,009$	$2,946 \pm 0,017$	$2,948 \pm 0,029$	$2,898 \pm 0,008$
EP/CAF	Área	$86,122 \pm 0,249$	$86,852 \pm 0,424$	$87,983 \pm 0,443$	$87,790 \pm 0,161$	$87,484 \pm 0,509$	$87,874 \pm 0,897$	$86,122 \pm 0,249$

Tabla 3.4: Probetas utilizadas en los ensayos de impacto a 15[mm/s] y posterior carga descarga

Tracción a 15[mm/s]	Probeta	J3	K3	L1	M3	N3	O4	P3
hasta 1 % luego ensayo	Ancho	29,754 ± 0,026	24,548 ± 0,018	24,416 ± 0,044	24,592 ± 0,015	24,410 ± 0,051	24,410 ± 0,115	24,530 ± 0,049
cíclico cuasiestático	Espesor	2,954 ± 0,009	2,600 ± 0,016	2,674 ± 0,013	2,714 ± 0,015	2,636 ± 0,024	2,604 ± 0,028	2,542 ± 0,008
EP/CF	Área	87,417 ± 0,227	63,825 ± 0,410	65,288 ± 0,365	66,742 ± 0,391	64,346 ± 0,702	63,562 ± 0,497	62,355 ± 0,281
Tracción a 15[mm/s]	Probeta	A2	B3	C3	E3	F3	G3	H3
hasta 1 % luego ensayo	Ancho	29,742 ± 0,102	29,748 ± 0,078	29,764 ± 0,055	29,728 ± 0,028	29,708 ± 0,042	29,824 ± 0,083	29,758 ± 0,071
cíclico cuasiestático	Espesor	2,932 ± 0,011	2,968 ± 0,017	2,978 ± 0,009	2,960 ± 0,019	2,960 ± 0,018	2,934 ± 0,029	2,951 ± 0,016
EP/CAF	Área	87,204 ± 0,314	88,292 ± 0,260	88,637 ± 0,285	87,995 ± 0,453	87,936 ± 0,520	87,5504 ± 0,405	88,110 ± 0,320



Tabla 3.5: Probetas utilizadas en los ensayos de impacto a 150[mm/s] y posterior carga descarga

Tracción a 150[mm/s]	Probeta	J2	K4	M4	N4	O5	P4	L2
hasta 1 % luego ensayo	Ancho	24,488 ± 0,055	24,546 ± 0,029	24,492 ± 0,051	24,382 ± 0,019	24,430 ± 0,048	24,568 ± 0,015	24,448 ± 0,065
cíclico cuasiestático	Espesor	2,539 ± 0,017	2,574 ± 0,027	2,544 ± 0,021	2,612 ± 0,031	2,630 ± 0,040	2,722 ± 0,013	2,652 ± 0,011
EP/CF	Área	62,827 ± 0,611	63,181 ± 0,539	62,307 ± 0,560	63,686 ± 0,209	64,250 ± 0,653	66,874 ± 0,123	64,835 ± 0,234
Tracción a 150[mm/s]	Probeta	A3	B4	C4	E4	F4	G4	H4
hasta 1 % luego ensayo	Ancho	29,746 ± 0,043	29,800 ± 0,014	29,692 ± 0,067	29,834 ± 0,009	29,680 ± 0,033	29,836 ± 0,087	29,598 ± 0,101
cíclico cuasiestático	Espesor	2,924 ± 0,017	2,954 ± 0,008	2,990 ± 0,026	2,962 ± 0,018	2,942 ± 0,031	2,968 ± 0,022	2,970 ± 0,016
EP/CAF	Área	86,977 ± 0,305	88,030 ± 0,527	88,779 ± 0,312	88,368 ± 0,278	87,319 ± 0,680	88,553 ± 0,552	88,412 ± 0,704

### 3.2. Resultados para los ensayos de tracción cuasiestáticos

El principal parámetro identificado para ambos materiales es el del módulo de elasticidad. Por otra parte este ensayo también busca establecer la forma de la curva esfuerzo - deformación identificando si existe una zona plástica visible antes de la ruptura.

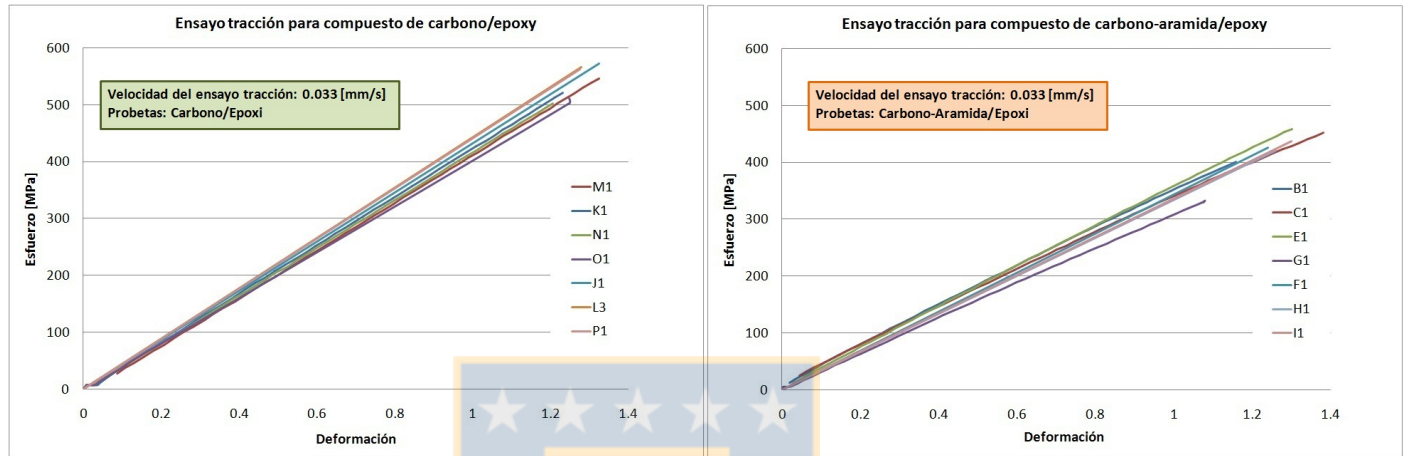


Figura 3.1: Gráficos con los resultados del ensayo de tracción para ambos materiales

La figura anterior muestra que para la configuración de laminado utilizada en ambos materiales compuestos, su comportamiento será lineal en todo su dominio, implicando que existirá solo una zona elástica para terminar con la ruptura, sin que exista una zona plástica. El error asociado a la medición de la deformación es de un 0,008 % con una desviación estándar de  $\pm 0,00001$  sobre el valor de la deformación de cualquier zona de la probeta.

Es claro que al tener las mismas escalas en ambos gráficos las rectas del compuesto de carbono-aramida poseen menor pendiente, sin embargo esta observación es predecible considerando la teoría clásica de laminados [19], la cual indica que los resultados esperados para el módulo de elasticidad, considerando el porcentaje de volumen de fibra, deben encontrarse alrededor de los siguientes valores:

Tabla 3.6: Módulo de elasticidad según teoría clásica de laminados [19]

Material	Módulo de elasticidad [MPa]
EP/CF	43076.92
EP/CAF	35364.94

Esta tabla también da una idea del error al cual se encuentra sometido todo el estudio experimental, ya que establece la diferencia entre la teoría y los valores reales obtenidos para el módulo de elasticidad.

La siguiente tabla resume los resultados para los ensayos de tracción cuasiestática a los cuales se sometió a ambos materiales según la planificación mostrada anteriormente.

Tabla 3.7: Módulo de elasticidad para cada probeta sometida a tracción simple

EP/CF	Probeta	J1	K1	L3	M1	N1	O1	P1	Promedio
	E [MPa]	43262	42280	44234	41910	41950	40710	44177	42762,17 ± 1128
EP/CAF	Probeta	B1	C1	E1	F1	G1	H1	I1	Promedio
	E [MPa]	34090	34980	35220	34370	32098	33432	34694	34126,28 ± 788

Con respecto a las tablas 3.6 y 3.7 es posible calcular que la diferencia entre lo que indica la teoría de laminados y los resultados para estos ensayos es de un 0,73 % para el compuesto de carbono/epoxi y de un 3,50 % para el de carbono-aramida/epoxi. Por otra parte a interpretación de este resultado, error o cualquier otra conclusión se desarrollará en el siguiente capítulo.

### 3.3. Resultados para los ensayos carga-descarga cuasiestáticos

Al tener un comportamiento elástico lineal, sin zona plástica visible en la dirección en que se aplica la fuerza, los resultados de un ensayo de carga-descarga son poco visibles a través de un gráfico, sin embargo su análisis cuantitativo es valioso y se presenta en la tabla 3.8 para un par de ensayos representativos:

La figura 3.2 muestra que el esfuerzo y la deformación en el ensayo cíclico se sobrepone tras un ciclo, y que la posibilidad de observar o concluir con respecto a este tipo de figuras es complejo. Sin embargo la tabla 3.8 muestra diferencias numéricas en los parámetros medidos para cada ciclo.

Tabla 3.8: Módulo de elasticidad y deformaciones para cada ciclo de carga y descarga

	Ciclo	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°
		Deformación máxima	0,002	0,004	0,006	0,008	0,010	0,012	0,014	0,016	0,018
EP/CF (Probeta K5)	Deformación permanente	0	0,00026	0,00027	0,00028	0,00030	0,00031	0,00035	0,00045	-	-
	E [MPa]	43072,74	42933,64	42898,18	42751,61	42707,19	42639,72	42351,88	42058,23	-	-
EP/CAF (Probeta G5)	Deformación permanente	0	0,00035	0,00031	0,00043	0,00051	0,00053	0,00054	0,00063	0,00082	0,00099
	E [MPa]	33113,62	32947,62	32898,03	32866,04	32698,41	32620,95	32546,52	32379,02	32215,40	32127,76

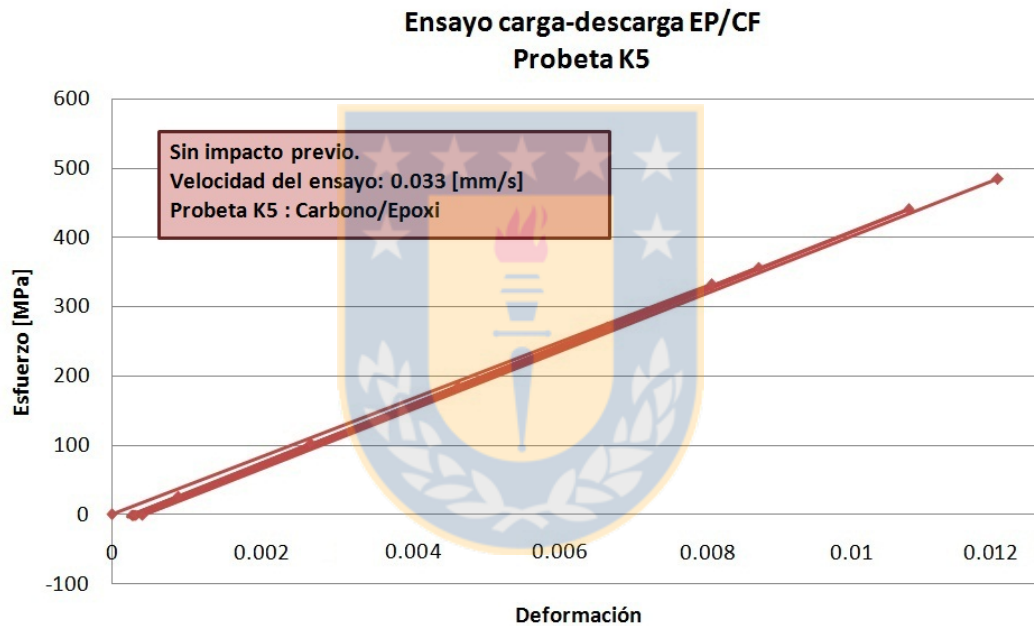


Figura 3.2: Gráfico para el ensayo carga-descarga para caracterizar el daño sobre la probeta K5 EP/CF

Por otra parte la figura 3.3 que muestra el desarrollo del esfuerzo y la deformación en una probeta de carbono-aramida/epoxy no presenta el mismo efecto que en el material anterior, notando una menor superposición de los resultados ciclo a ciclo. Sin embargo para cuantificar resultados se omite este tipo de presentación.

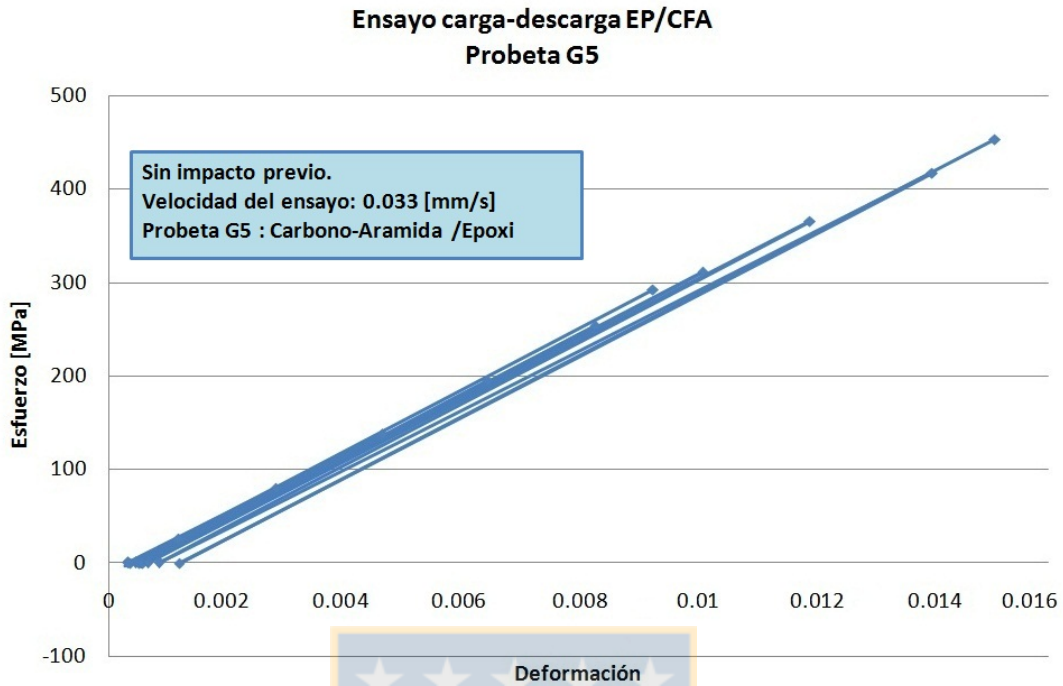


Figura 3.3: Gráfico para el ensayo carga-descarga para caracterizar el daño sobre la probeta G5 EP/CAF

A partir de las figuras 3.2 y 3.3 es posible observar que el daño o degradación del módulo elástico será de bajo porcentaje y es necesario estudiar o graficar a través de otras variables, como lo son la deformación permanente, la deformación alcanzada en el ciclo, el esfuerzo máximo en el ciclo y/o el número de ciclos para los cuales se registra el módulo de elasticidad registrado.

Se observa entonces que existe una degradación en el módulo de elasticidad del material el cual se puede graficar para cada ciclo de tracción sobre el cual fue medido. La figura 3.5 muestra que se puede linealizar este efecto para los ciclos de carga aplicados y su pendiente es negativa.

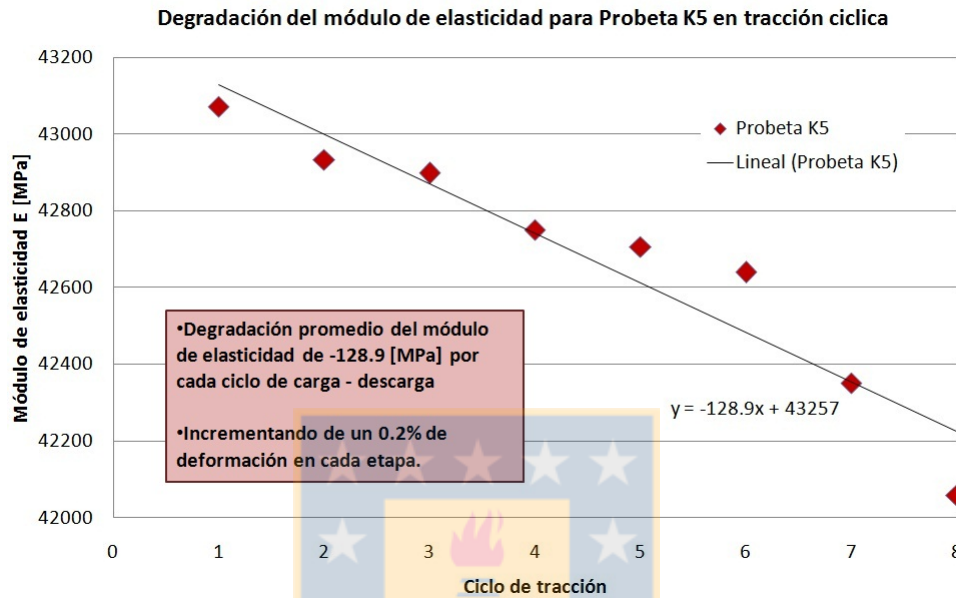


Figura 3.4: Degradación del módulo de elasticidad para EP/CF Probeta K5 en tracción cíclica

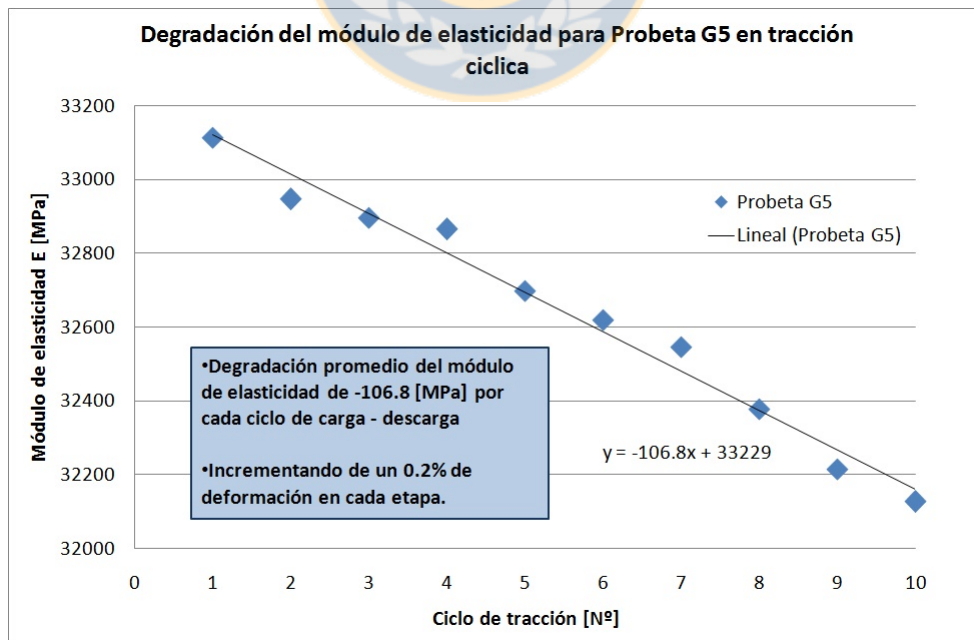


Figura 3.5: Degradación del módulo de elasticidad para EP/CAF Probeta G5 en tracción cíclica

Para el resto de las probetas ensayadas se tienen los siguientes resultados en los gráficos 3.6 y 3.7:

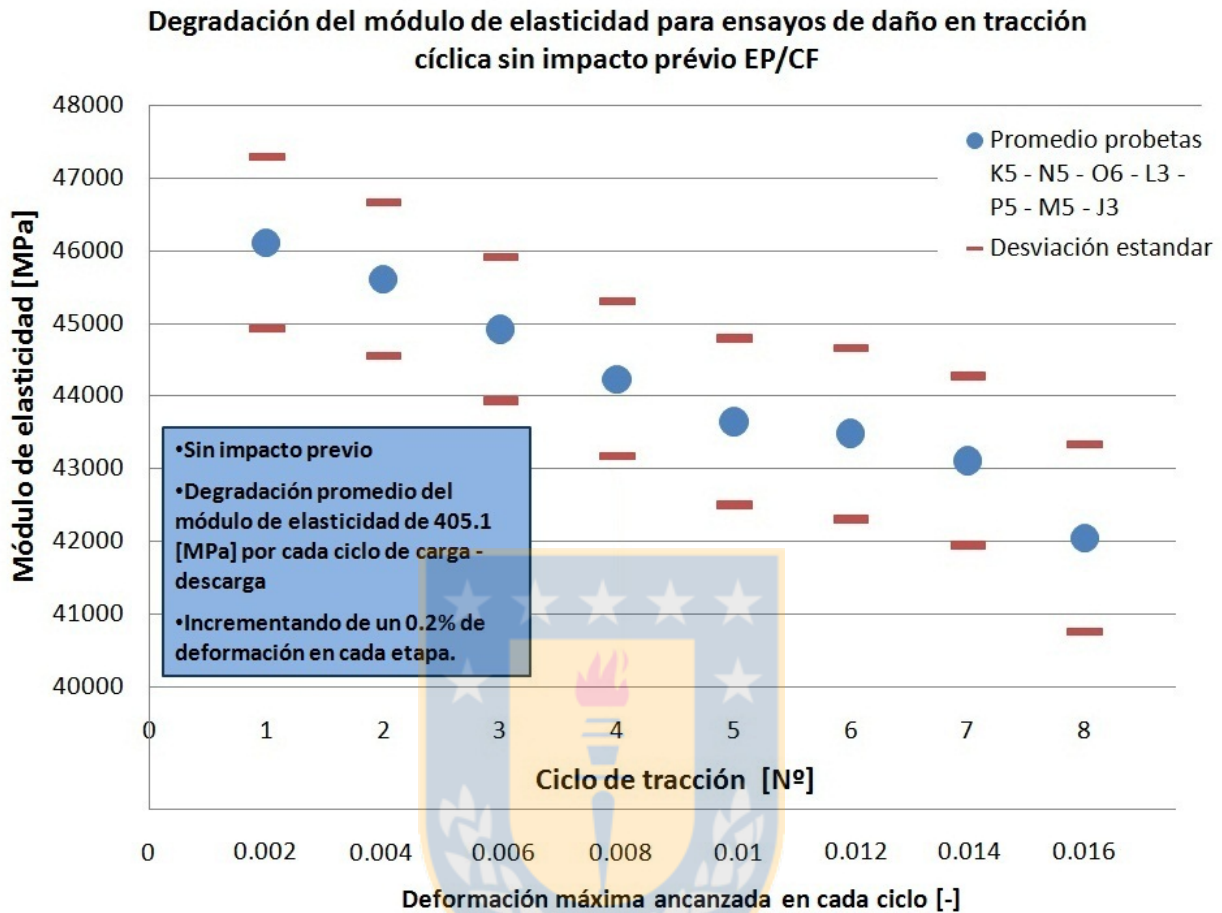


Figura 3.6: Degradación del módulo de elasticidad para EP/CF en tracción cíclica cuasiestática sin impacto previo

La aproximación lineal que agrupa los resultados del último gráfico muestra una pendiente negativa indicando la existencia de daño progresivo y degradación del módulo de elasticidad en cada uno de los ciclos de carga y descarga a los cuales se someten las muestras.

En particular, se observa que el material de carbono/epoxi para la configuración de laminado escogida, muestra una disminución de  $-405,1 [MPa/ciclo]$  que en promedio implica una disminución de un 7,04 % del módulo de elasticidad en los ocho ciclos de carga y descarga. Mientras que para el compuesto de carbono-aramida/epoxy de la figura 3.7 se tiene una pendiente de menor magnitud,  $-92,73 [MPa/ciclo]$ , que en diez ciclos reduce el módulo de elasticidad inicial de este compuesto en un 2,74 %.

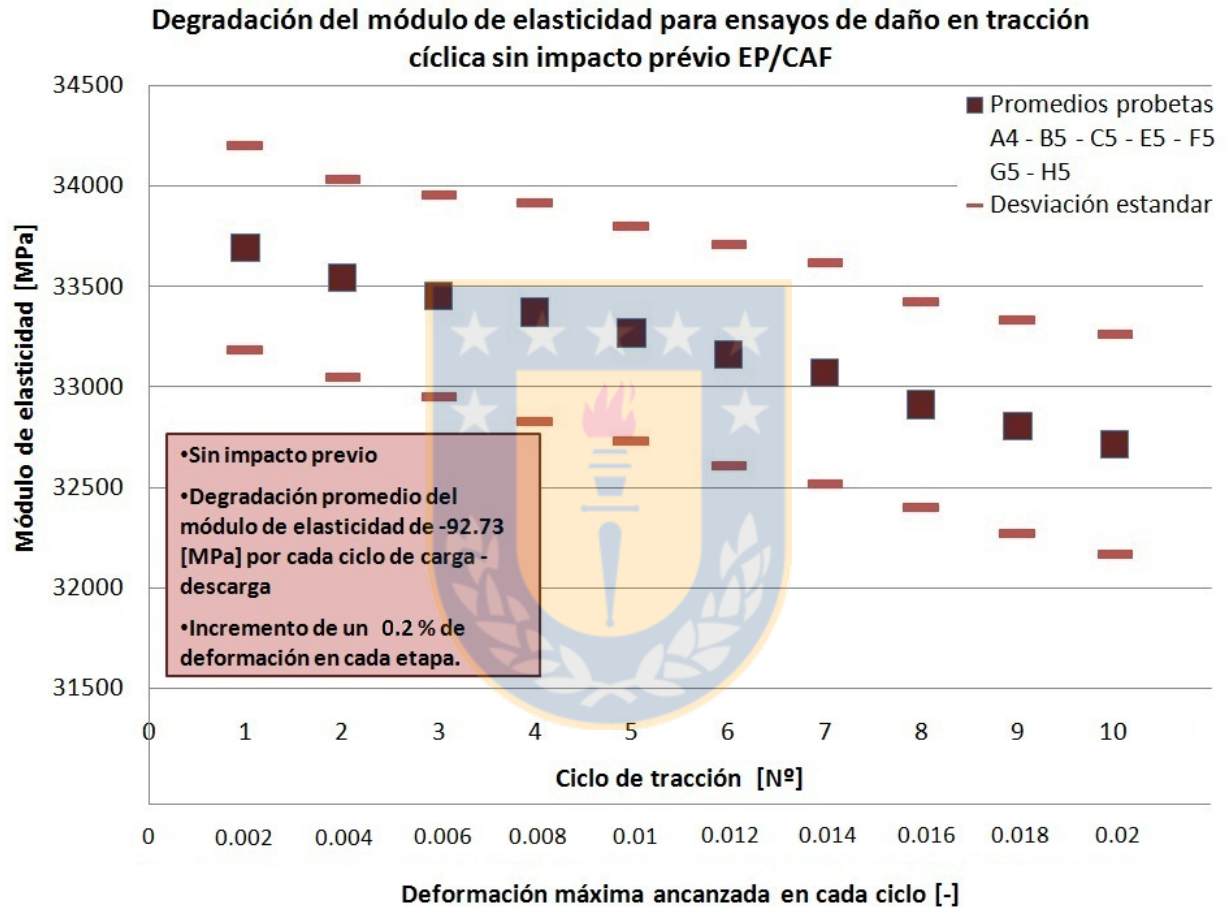


Figura 3.7: Degradación del módulo de elasticidad para EP/CAF en tracción cíclica cuasiestática sin impacto previo



Por otra parte al aplicar un impacto o carga inicial, a velocidad cuasiestática, sobre las probetas de ambos materiales que alcance un 1 % de la longitud total de estas, se observa que la degradación del módulo de elasticidad es aun mayor.

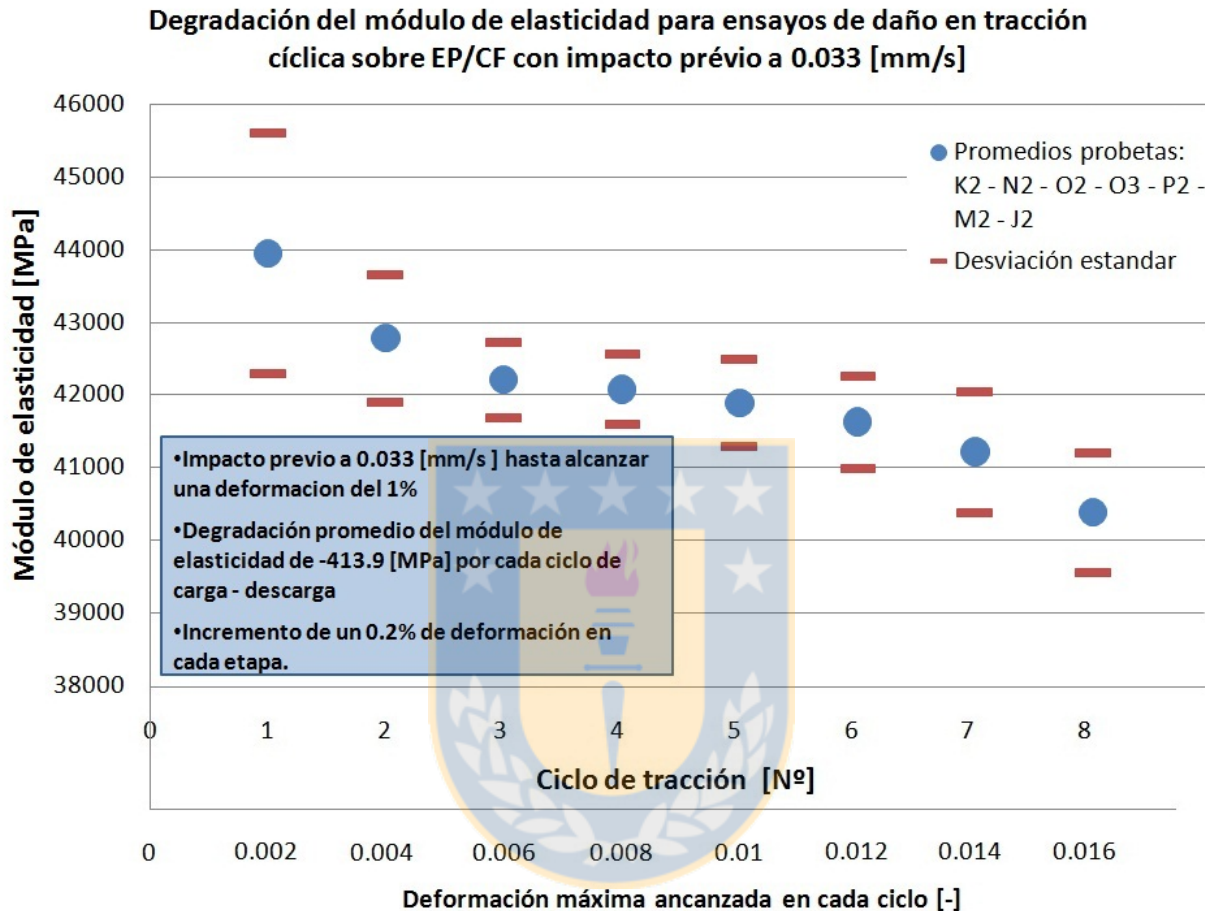


Figura 3.8: Degradación del módulo de elasticidad para EP/CF en tracción cíclica cuasiestática tras un impacto previo a 0,033[mm/s]

Para los experimentos realizados sobre las muestras de carbono/epoxi se observa que existe un leve aumento en la pendiente que muestra la degradación del módulo de elasticidad por cada ciclo de carga-descarga alcanzando 413,9[MPa/ciclo] solo por el hecho de aplicar el ensayo de daño tras realizar el impacto señalado anteriormente. Por otra parte la figura 3.9 muestra que el carbono-aramida/epoxi presenta un aumento de este parámetro y alcanza 118,0[MPa/ciclo] lo que implica una degradación del módulo de elasticidad de un 3,5 % en los diez ciclos del experimento, aun menor que el 7,55 % que muestra el otro material.

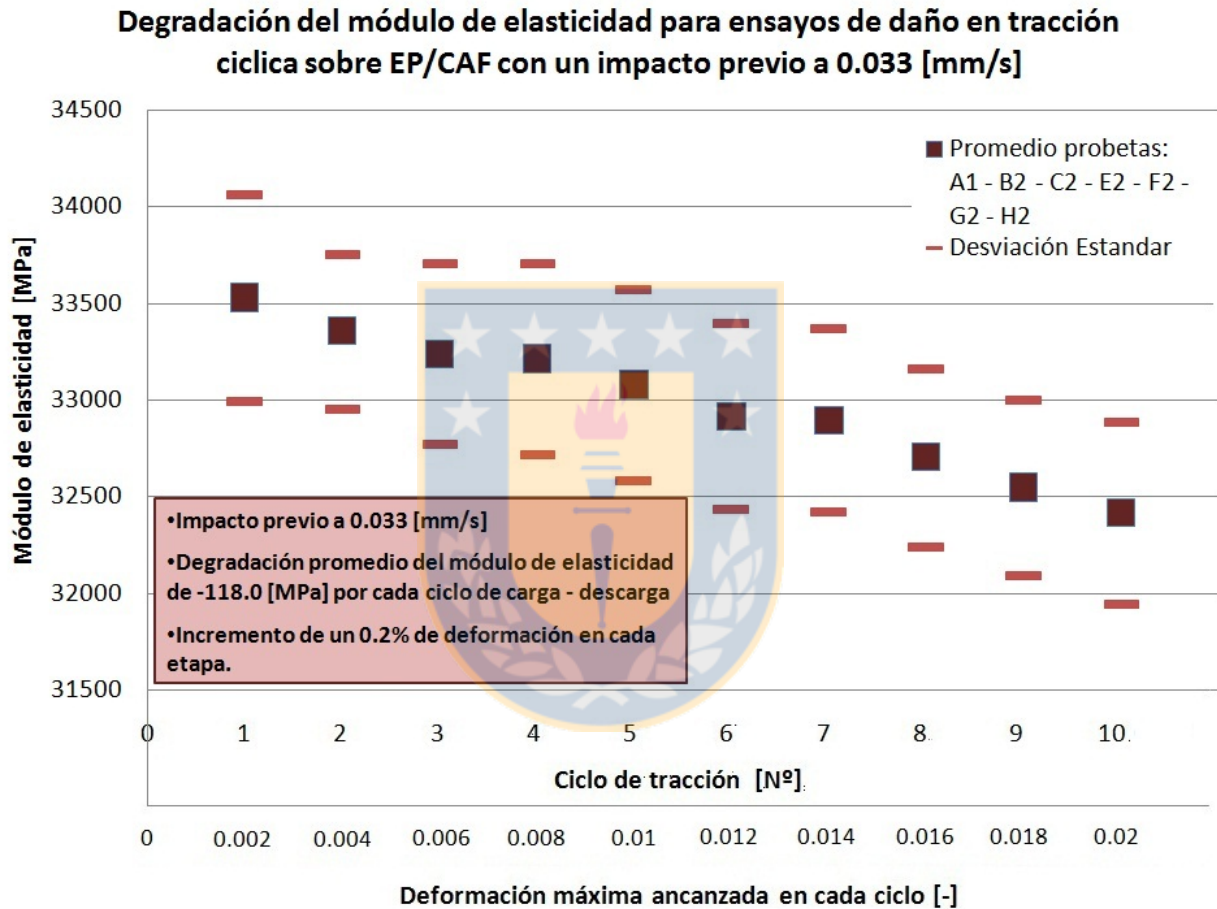


Figura 3.9: Degradación del módulo de elasticidad para EP/CAF en tracción cíclica cuasiestática tras un impacto previo a 0,033[mm/s]

### 3.4. Resultados para los ensayos de tracción 15 [mm/s] y a 150 [mm/s]

El efecto que produce la tracción inicial a estas velocidades ya fue estudiada por autores como Mahmood et al. [2] [3] [4], sin embargo las herramientas e instrumentos de medición no permiten comparar el módulo de elasticidad de los materiales estudiados, y solo es posible mostrar los resultados de esfuerzo y deformación para un punto alcanzado por las muestras de este estudio.

Como el impacto a 15[mm/s] y a 150[mm/s] se aplica hasta alcanzar un 1% de la longitud de la muestra todas las probetas alcanzan el mismo estado de deformación es posible observar que los esfuerzos no son los mismos al aplicar esta deformación a distintas velocidades. Las figuras 3.10 y 3.11 muestran los distintos esfuerzos alcanzados en las muestras de carbono/epoxi y carbono-aramida/epoxi respectivamente.

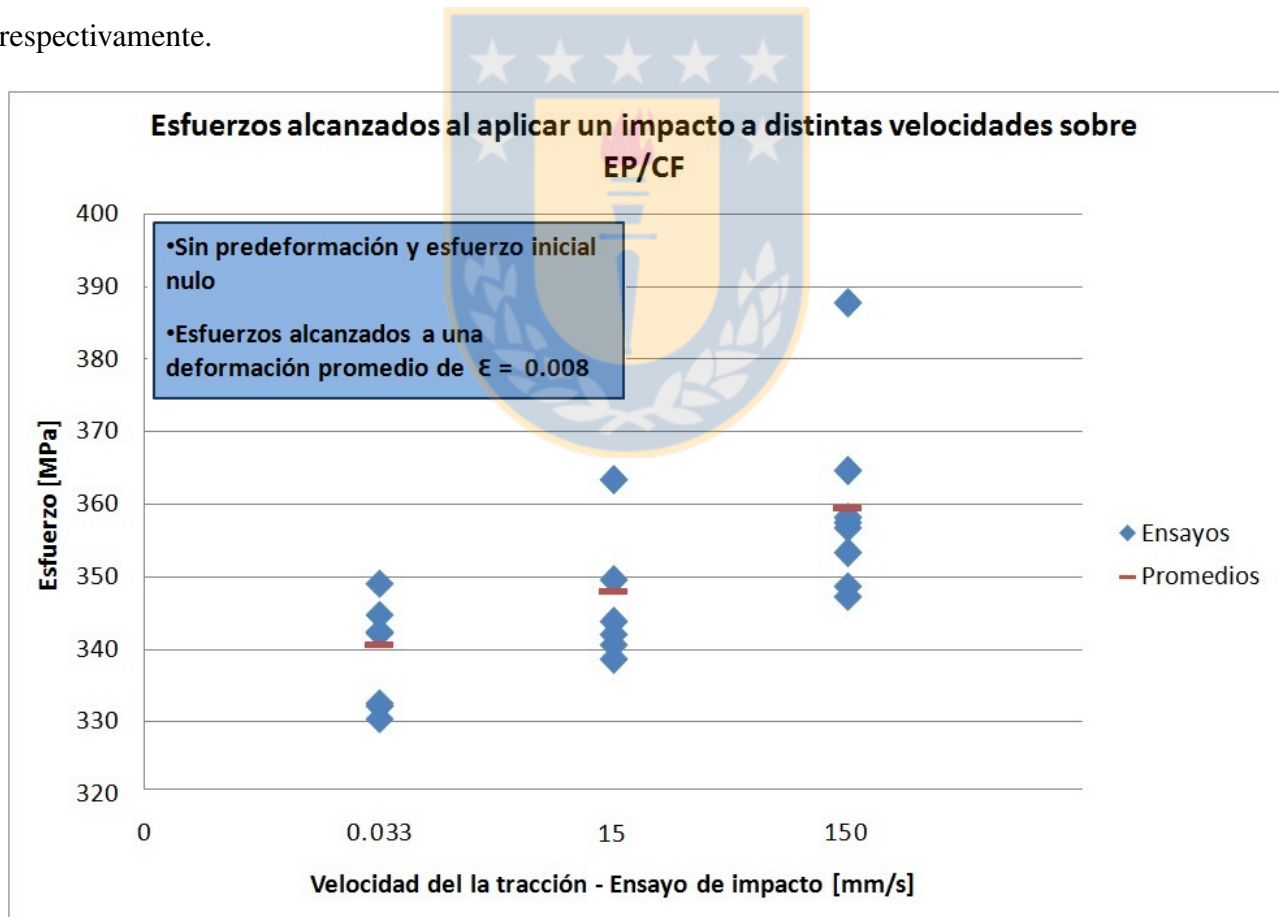


Figura 3.10: Esfuerzos alcanzados a una deformación de  $\epsilon = 0,008$  por impactos sobre EP/CF a distintas velocidades de deformación

Se observa que existe un aumento en los esfuerzos alcanzados para la misma deformación establecida. El promedio muestra que al aumentar exponencialmente la velocidad de deformación, el aumento es de  $10[MPa]$  aproximadamente.

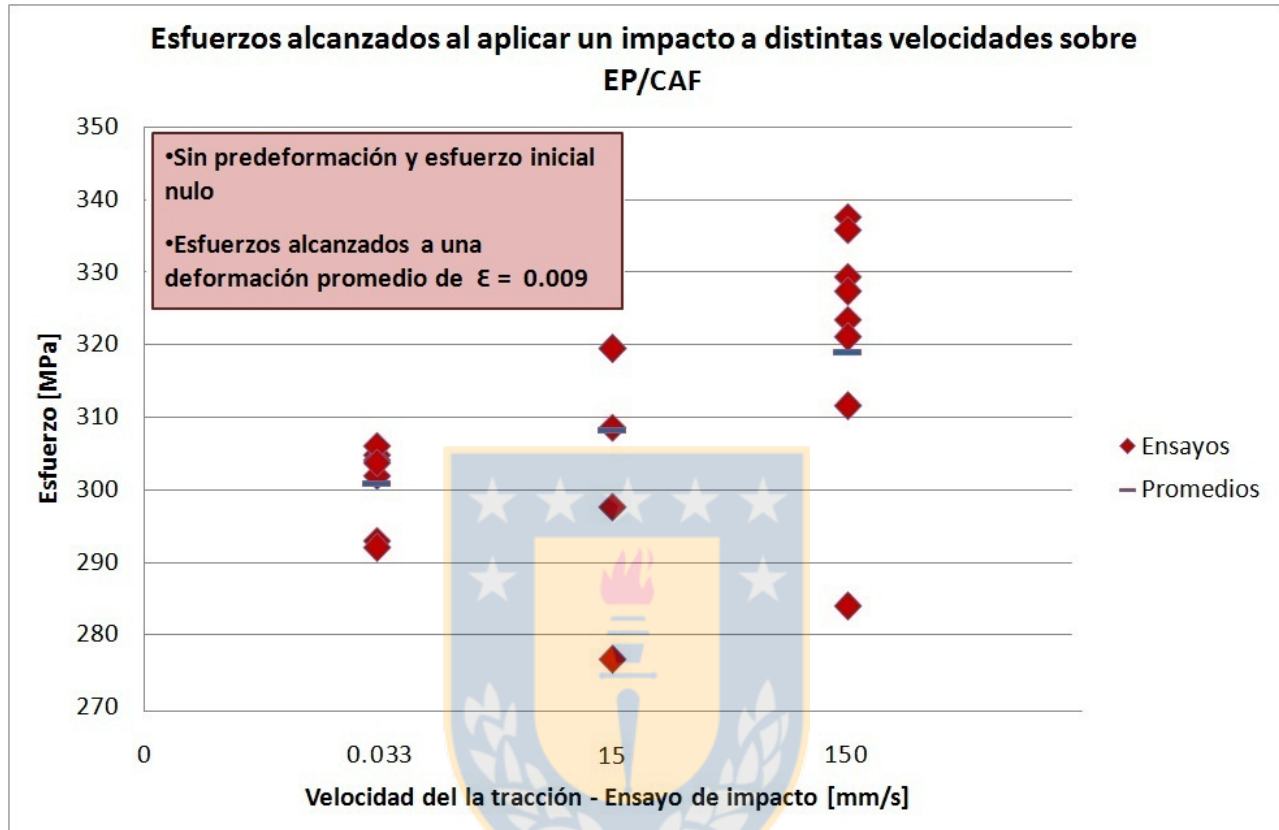


Figura 3.11: Esfuerzos alcanzados a una deformación de  $\epsilon = 0,009$  por impactos sobre EP/CAF a distintas velocidades de deformación

La figura 3.11 muestra que el compuesto de carbono-aramida también tiene un comportamiento similar en respuesta al aumento de la velocidad de deformación. El promedio muestra que para las velocidades estudiadas en los experimentos, el aumento es de  $10[MPa]$  aproximadamente.

### 3.5. Resultados para los ensayos carga-descarga tras aplicar tracciones a 15 [mm/s] y a 150 [mm/s]

Al aumentar la velocidad del impacto o carga inicial se observan los siguientes resultados sobre ambos materiales.

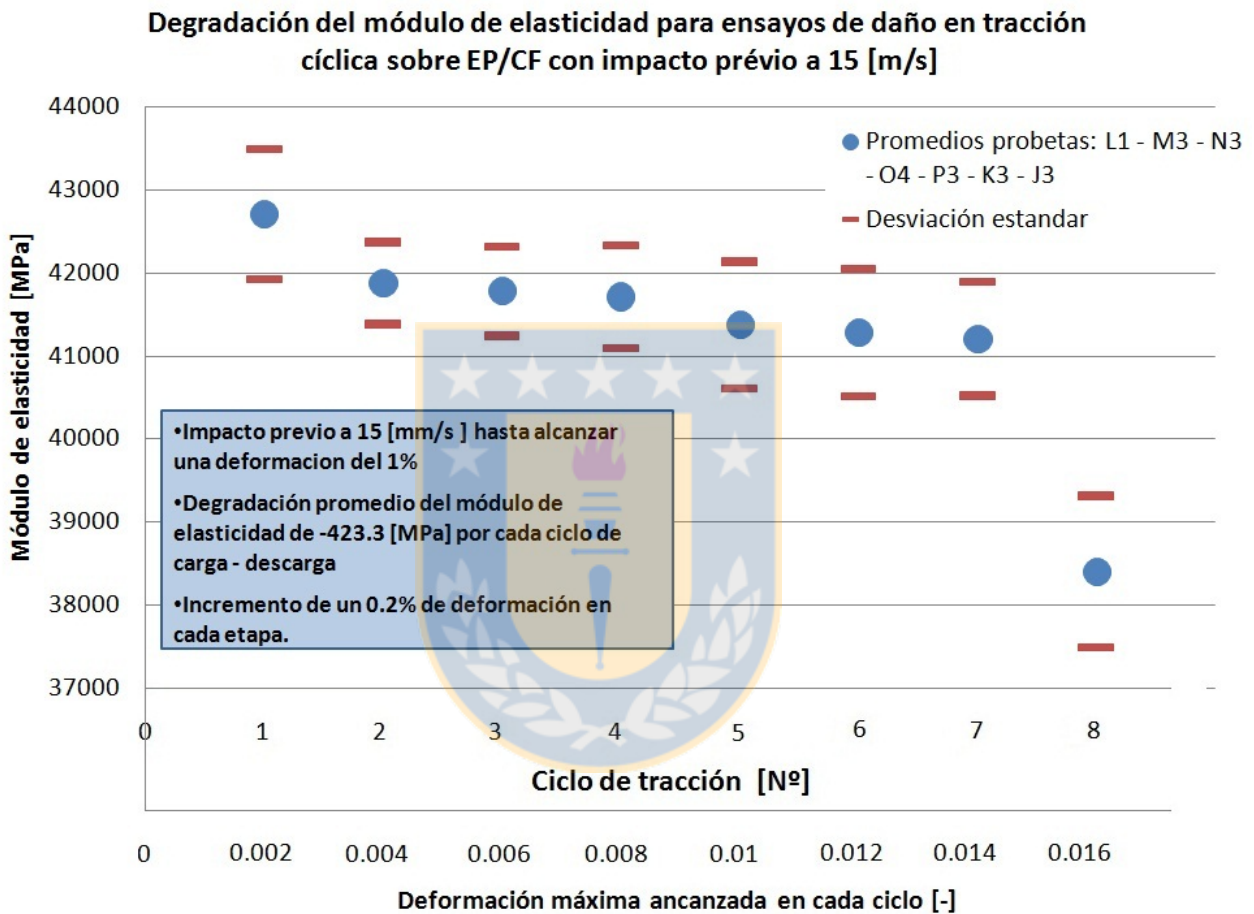


Figura 3.12: Degradación del módulo de elasticidad para EP/CF en tracción cíclica cuasiestática tras un impacto previo a 15[mm/s]

El compuesto de carbono muestra que al someterse a un impacto inicial a velocidades de deformación considerables y con una diferencia exponencial su pendiente de degradación del módulo de elasticidad aumenta a  $-423,3 [MPa/ciclo]$  tras un impacto a 15[mm/s] y a  $-434,7 [MPa/ciclo]$  tras un impacto a 150[mm/s]. Estos resultados implican una disminución de un 7,91 % y en un 7,93 % respectivamente en el módulo de elasticidad tras ocho ciclos de carga y descarga.

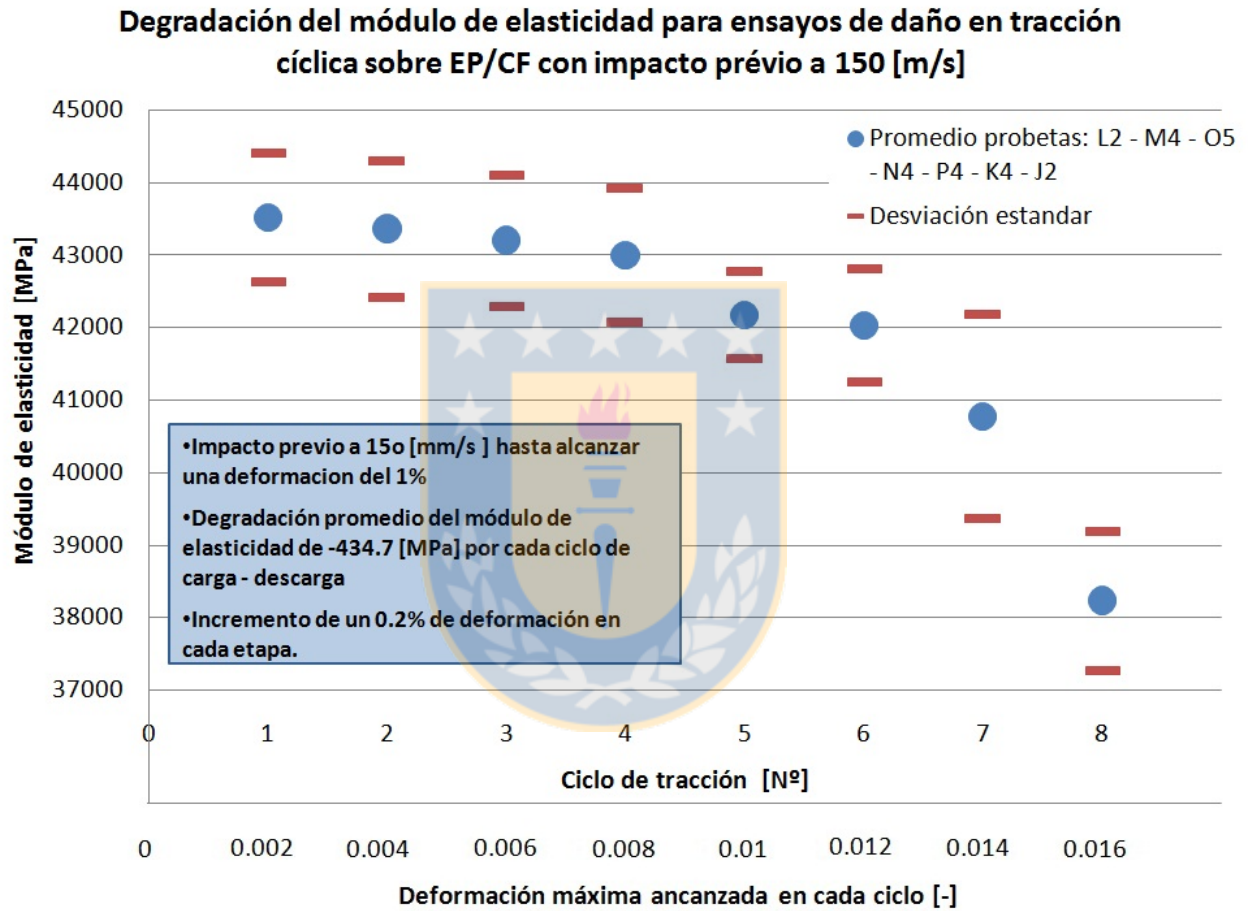


Figura 3.13: Degradación del módulo de elasticidad para EP/CF en tracción cíclica cuasiestática tras un impacto previo a 150[mm/s]

Por otra parte, para el compuesto de carbono-aramida, los resultados muestran que la pendiente de degradación aumenta a  $-356,9[MPa/ciclo]$  tras un impacto a  $15[mm/s]$  y a  $-439,2[MPa/ciclo]$  tras un impacto a  $150[mm/s]$ . Estos resultados implican una disminución de un  $9,49\%$  y en un  $11,64\%$  respectivamente en el módulo de elasticidad tras doce ciclos de carga y descarga.

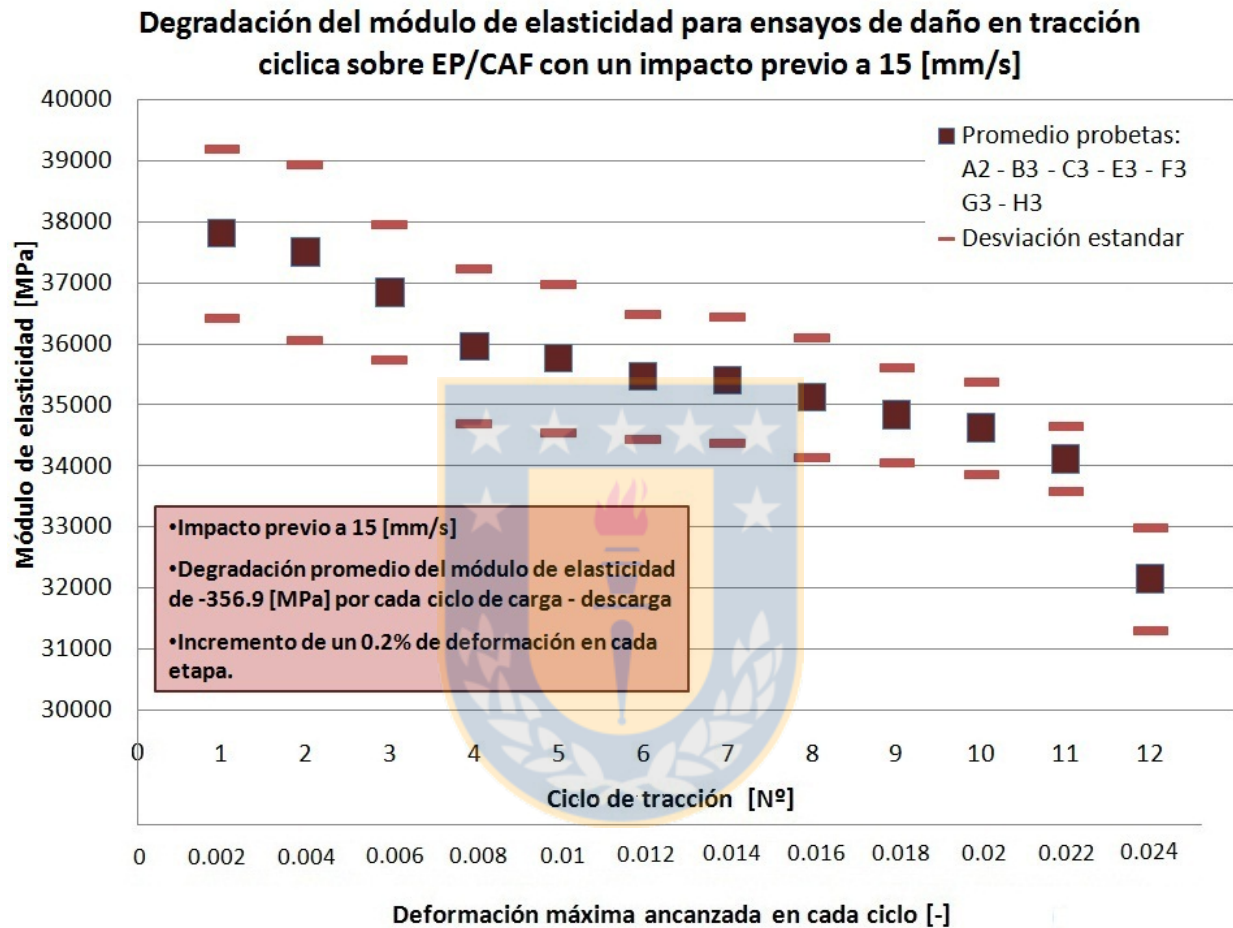


Figura 3.14: Degradación del módulo de elasticidad para EP/CAF en tracción cíclica cuasiestática tras un impacto previo a  $15[mm/s]$

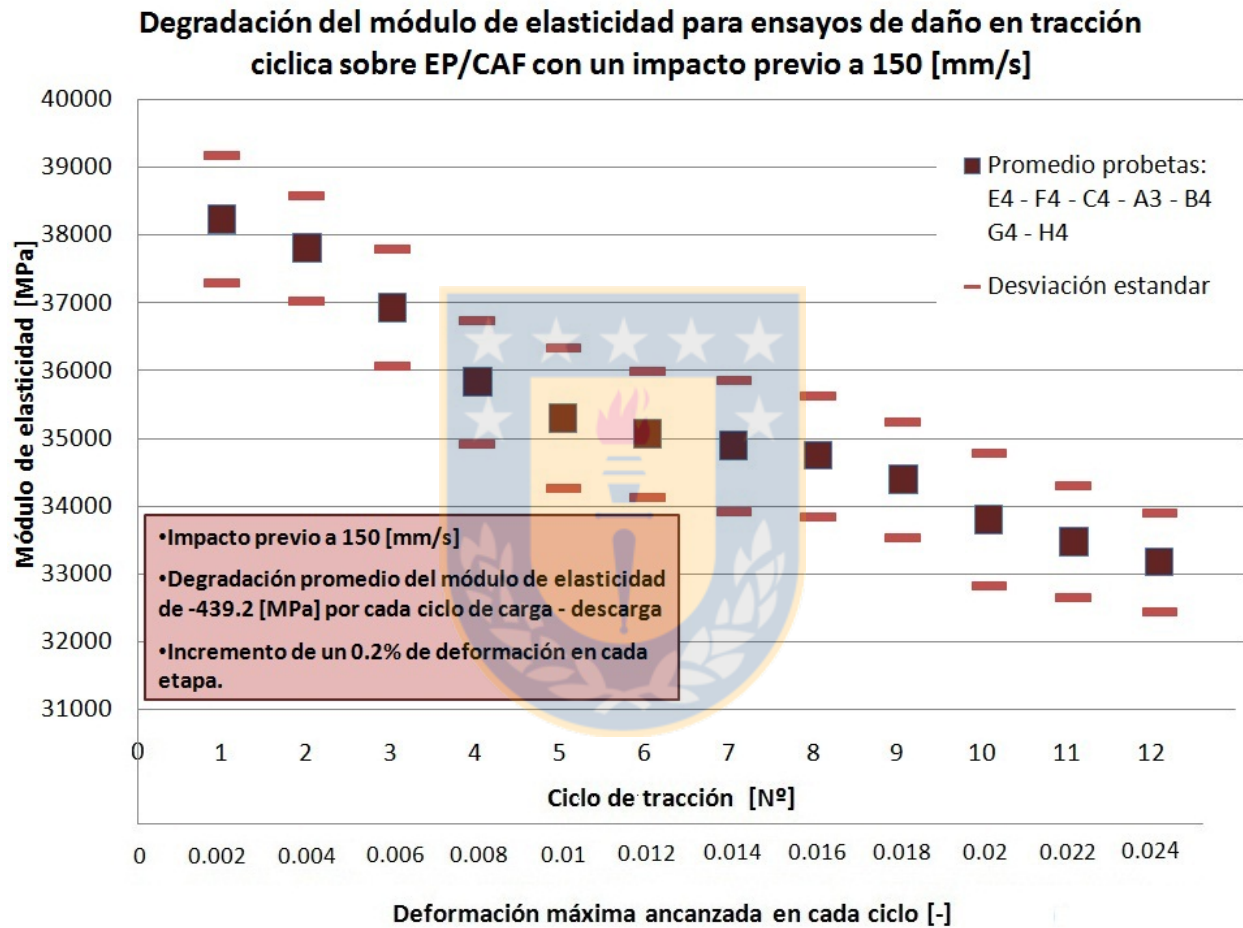


Figura 3.15: Degradación del módulo de elasticidad para EP/CAF en tracción cíclica cuasiestática tras un impacto previo a 150[mm/s]



### 3.6. Deformación inelástica en los ensayos cíclicos

Los modelos de daño basan su análisis y resultados en el parámetro de la deformación inelástica o deformación que presenta la muestra tras descargar completamente y alcanzar un esfuerzo nulo en cada ciclo. Este resultado da muestras de la cantidad de energía disipada y de la cantidad de daño o pérdida de integridad en el material.

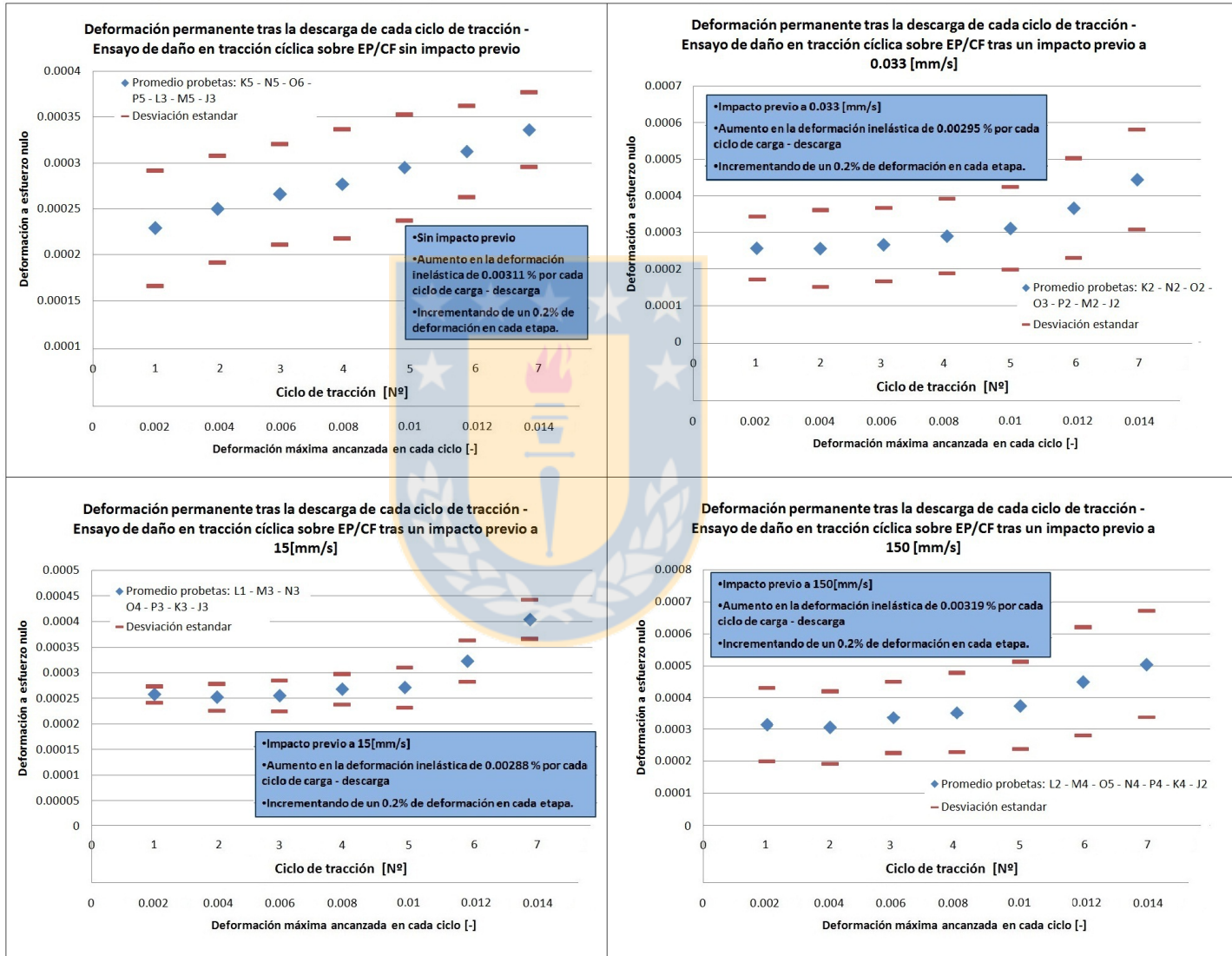


Figura 3.16: Deformación permanente tras la descarga de cada ciclo de tracción en un ensayo de daño en tracción cíclica cuasiestática sobre EP/CF

La figura 3.16 muestra que al aplicar tracciones o impactos la cantidad de deformación inelástica sobre el compuesto de carbono crece al aumentar la velocidad de deformación. El gráfico que

muestra la deformación inelástica sin impacto muestra que inicialmente en promedio se comienza con  $2,29 \times 10^{-4}$  de deformación a esfuerzo nulo, mientras que al agregar un impacto previo al ensayo cíclico, la deformación inelástica es de  $2,57 \times 10^{-4}$  para un impacto a velocidad cuasiestática,  $2,58 \times 10^{-4}$  para un impacto a  $15[mm/s]$  y  $3,15 \times 10^{-4}$  para el impacto a  $150[mm/s]$ .

Para los máximo se observa el mismo orden correlativo, alcanzando valores entre  $3,36 \times 10^{-4}$  y  $5,04 \times 10^{-4}$  para la deformación inelástica o permanente.

Por otra parte la pendiente que presenta el parámetro estudiado,, o mejor dicho, el crecimiento de esta curva aumenta ligeramente al aumentar la velocidad de deformación del ensayo de daño.

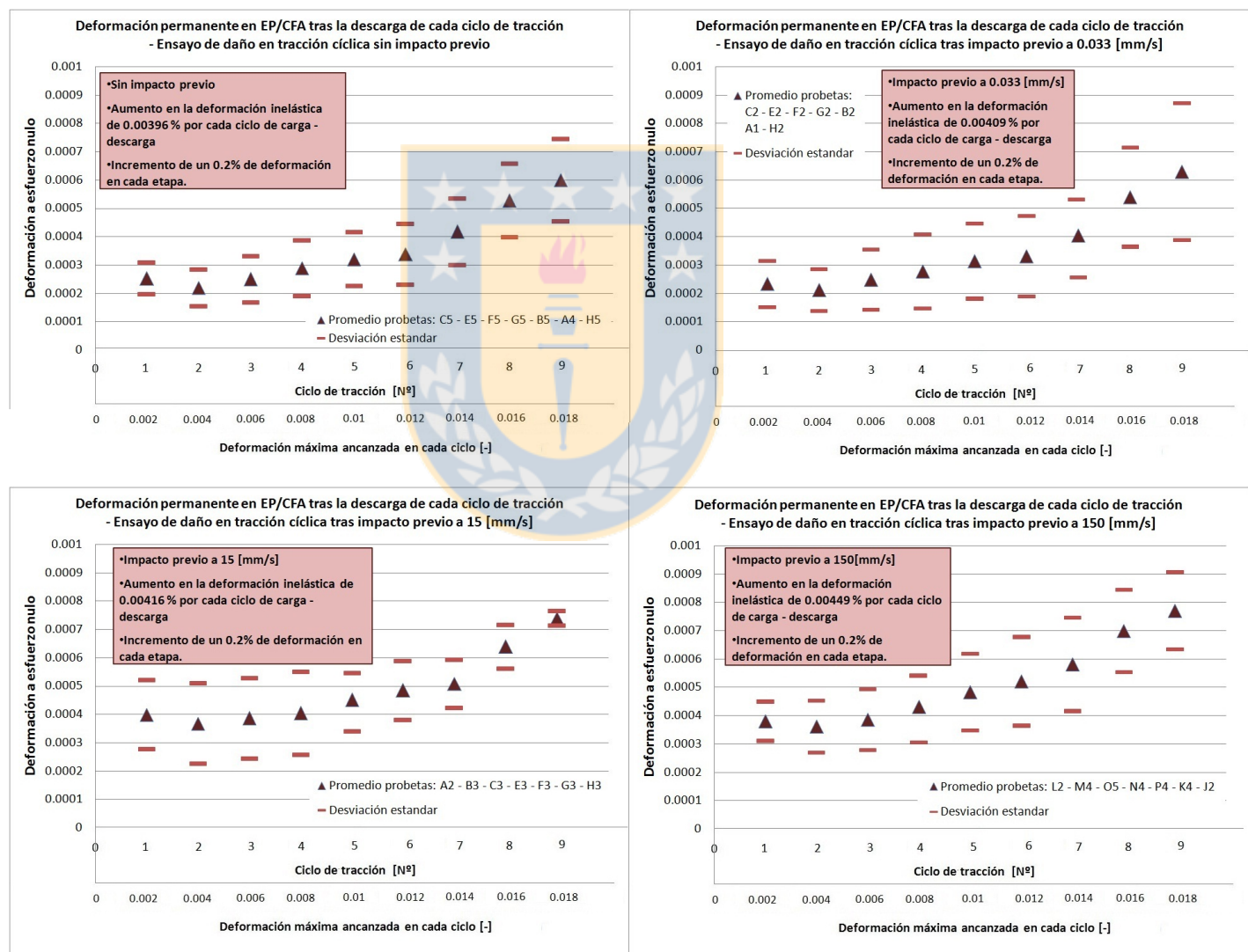


Figura 3.17: Deformación permanente tras la descarga de cada ciclo de tracción en un ensayo de daño en tracción cíclica cuasiestática sobre EP/CAF

Finalmente, el compuesto de carbono-aramida también presenta un patrón de aumento en la deformación inelástica producto del impacto, sin embargo para el ensayo sin impacto previo, la cantidad de deformación inelástica es en promedio mayor que para el material anterior, comenzando con  $2,32 \times 10^{-4}$  de deformación permanente. Sin embargo, para cada caso de estudio las muestras de carbono-aramida presentan una pendiente o tasa de en el aumento en este tipo de deformación por cada ciclo de daño, que aumenta junto con utilizar velocidades de deformación mayores. Los máximos se encuentran entre los  $5,99 \times 10^{-4}$  y los  $7,70 \times 10^{-4}$  de deformación permanente.

Por último los gráficos 3.18 y 3.19 muestran la tendencia y relación que existe entre la degradación del módulo de elasticidad y la deformación permanente a esfuerzo nulo.

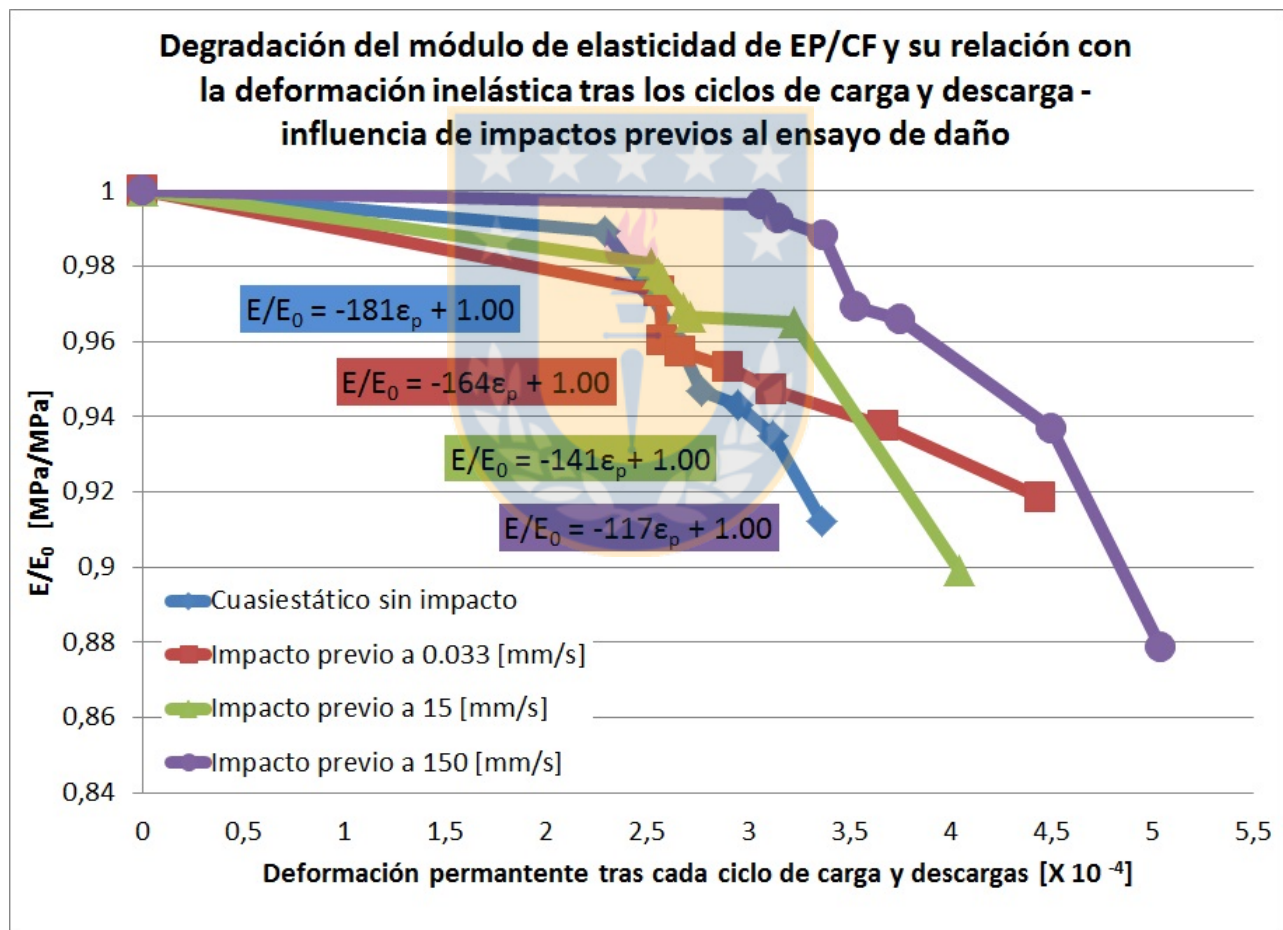


Figura 3.18: Deformación permanente y su relación con el módulo de elasticidad para ensayos cíclicos de daño en EP/CF

La figura muestra el módulo de elasticidad inicial normalizado en la unidad con la finalidad de estandarizar y mostrar el porcentaje de disminución que cada experimento muestra sobre el parámetro en estudio al aumentar la velocidad de un impacto previo.

Se obtiene una respuesta homogénea entre el módulo de elasticidad obtenido y la deformación permanente tras cada ciclo de carga para el compuesto de carbono/epoxi. Se observa que la tasa a la que se relacionan estos parámetros tiende a disminuir, sin embargo, se mantiene dentro de un promedio con 22 % de diferencia al agregar un impacto previo al ensayo cíclico o al no tenerlo. Mientras que la figura 3.19 donde se muestra la misma relación entre el módulo y la deformación permanente para el compuesto de carbono - aramida/epoxi, se observa una progresión creciente. Primero al agregar un impacto y luego al aumentar la velocidad de este, estableciendo que el daño está ligado principalmente a la deformación inelástica sobre el material.

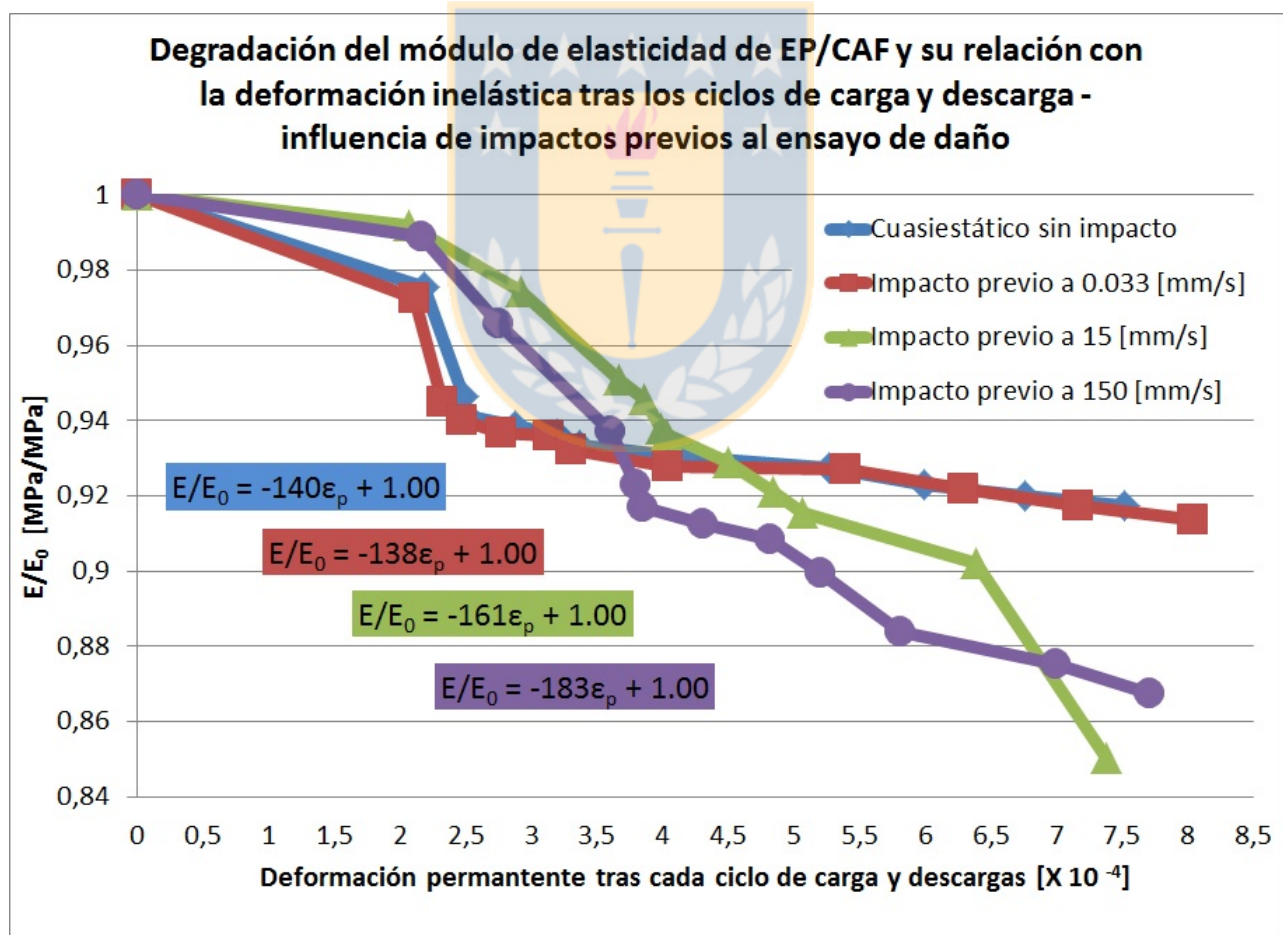


Figura 3.19: Deformación permanente y su relación con el módulo de elasticidad para ensayos cíclicos de daño en EP/CAF

Esta última figura muestra que un impacto a una velocidad de  $150[mm/s]$  degrada el módulo de elasticidad un 40 % más que si no existiera un impacto previo, aun considerando la misma cantidad de deformación permanente sobre el material.



# Capítulo 4

## Análisis de resultados y conclusiones

La repetitividad que poseen los experimentos basada en la forma que se fabricaron las muestras y la cantidad de ensayos realizados permite asegurar una baja incertidumbre con respecto a los materiales utilizados y su fabricación. Mientras que el protocolo y la mínima intervención en el procesamiento de los datos asegura menor error y arrastre.

Por otra parte, probetas que presentaran defectos o ensayos que no se llevaran a cabo de acuerdo al protocolo, fueron descartados y no se presentaron dentro de este documento.

### 4.1. Análisis de resultados ensayos de tracción

Los gráficos de esfuerzo versus deformación muestran un comportamiento lineal para ambos materiales en la configuración de laminado seleccionada, encontrando un módulo de elasticidad de  $42646,14 \pm 1067[MPa]$  para el compuesto de carbono/epoxi y de  $34126,28 \pm 788[MPa]$  para el compuesto de carbono-aramida/epoxi. Estos resultados difieren con los estimados según la teoría de laminados en un 0,73 % y en un 3,50 % respectivamente, debido principalmente a la disminución en el porcentaje de volumen de fibra obtenidos en el proceso de fabricación.

El error de fabricación asociado a la manipulación de las fibras, el adecuado ángulo de apilamiento, las condiciones de temperatura y humedad, el tiempo de secado y curado, entre otros, puede tener influencia en la diferencia entre la teoría y los resultados experimentales. Sin embargo la utilización de distintos lotes de resina y problemas en la utilización del horno de curado puede tener mayor efecto en los resultados.

## 4.2. Análisis de resultados al impacto

Antes de analizar los efectos del impacto sobre el daño, se observa que una tracción violenta sobre las probetas provoca valores de esfuerzos distintos a los que deberían obtenerse al llegar al mismo estado de deformación a velocidad cuasiestática. Ambos materiales presentan este efecto, el cual fue enunciado por Mahmood et al. [2] [3] [4], sin embargo este autor compara el módulo de elasticidad para demostrar este efecto. Como los instrumentos de medición utilizados no permiten caracterizar los materiales a estas velocidad, solo se compara el esfuerzo que se alcanza a una deformación fija para cada material.

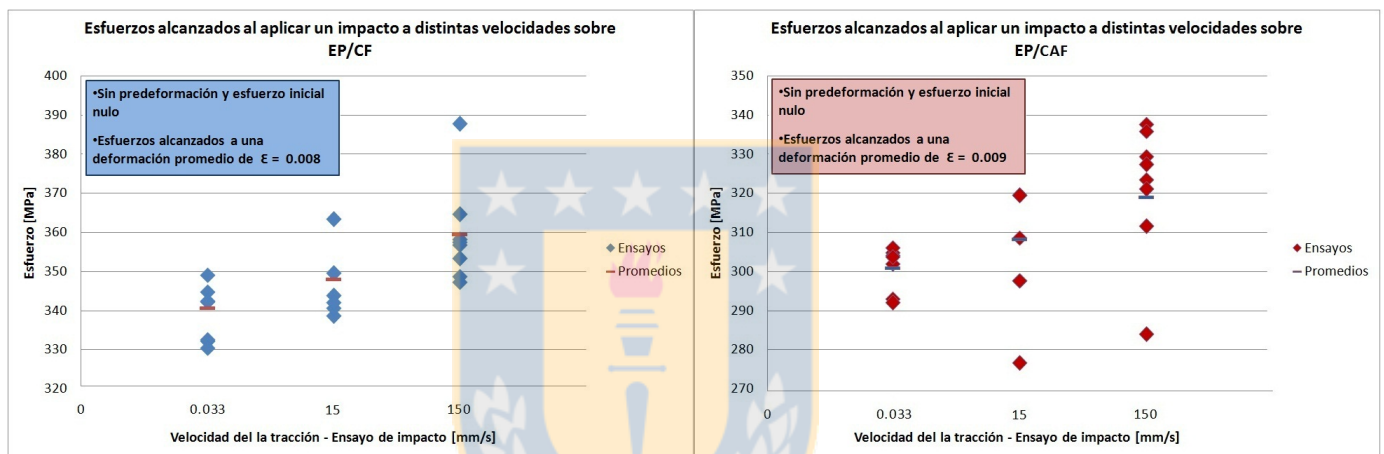


Figura 4.1: Esfuerzos alcanzados a distintas velocidades de deformación:(izquierda) a una deformación de  $\epsilon = 0,008$  por impactos sobre EP/CF, (derecha) a una deformación de  $\epsilon = 0,009$  por impactos sobre EP/CAF

En el caso del compuesto de carbono se observa que al alcanzar una deformación de  $\epsilon = 0,008$  el material alcanza esfuerzo de  $340,50[MPa]$  para el ensayo cuasiestático, mientras que para impactos a  $15[mm/s]$  y a  $150[mm/s]$  se alcanzan esfuerzos promedio de  $347,97[MPa]$  y  $359,39[MPa]$  respectivamente.

Las probetas de carbono-aramida/epoxi también presentaron un aumento en el esfuerzo alcanzado para una deformación de  $\epsilon = 0,009$  a distintas velocidades. Este material alcanza un esfuerzo de  $300,78[MPa]$  para el ensayo cuasiestático,  $308,08[MPa]$  para el impacto a  $15[mm/s]$  y  $318,91[MPa]$  a una velocidad de desplazamiento del cabezal de  $150[mm/s]$ . Sin embargo el gráfico anterior muestra una mayor dispersión en la muestra, aun cuando también se observa la tendencia al aumento.

Los resultados de esfuerzo alcanzado están por sobre la recta de esfuerzo - deformación trazada

por la caracterización que se hace anteriormente a estos materiales, lo que indica que a mayores velocidades de deformación ambos presentan mayor rigidez o mayor módulo de elasticidad. Sin embargo, para poder afirmar esto con certeza es necesario una caracterización completa a distintas velocidades utilizando una mayor cantidad de puntos dentro de la curva de esfuerzo - deformación.

### 4.3. Análisis de resultados ensayos de daño

Con la finalidad de minimizar el error, el daño se ve directamente en la disminución que presenta el material ante una serie de ciclos de deformación en donde por cada ciclo se agregue un porcentaje igual de carga sobre la muestra. Las figuras 3.6, 3.8, 3.12 y 3.14 muestran los efectos de este daño sobre las probetas de fibra de carbono/epoxi, las cuales muestran una pendiente negativa demostrando que existe degradación del módulo de elasticidad del material. Las muestras de fibra de carbono-aramida con resina epóxica en las figuras 3.7, 3.9, 3.13 y 3.15 muestran el mismo efecto de daño, sin embargo la magnitud de este presenta diferencia entre cada velocidad y cada material.

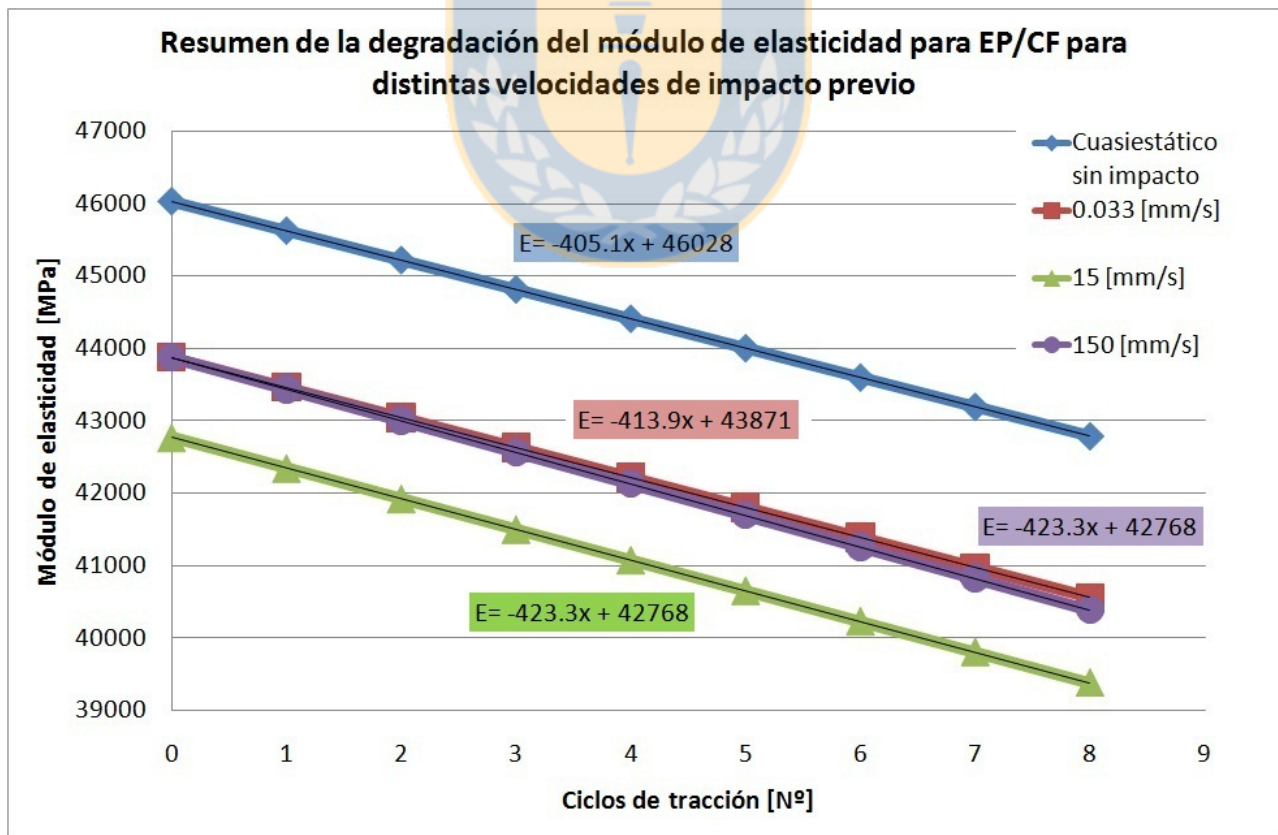


Figura 4.2: Resumen de los promedios y linealizaciones de los resultados de daño para EP/CF



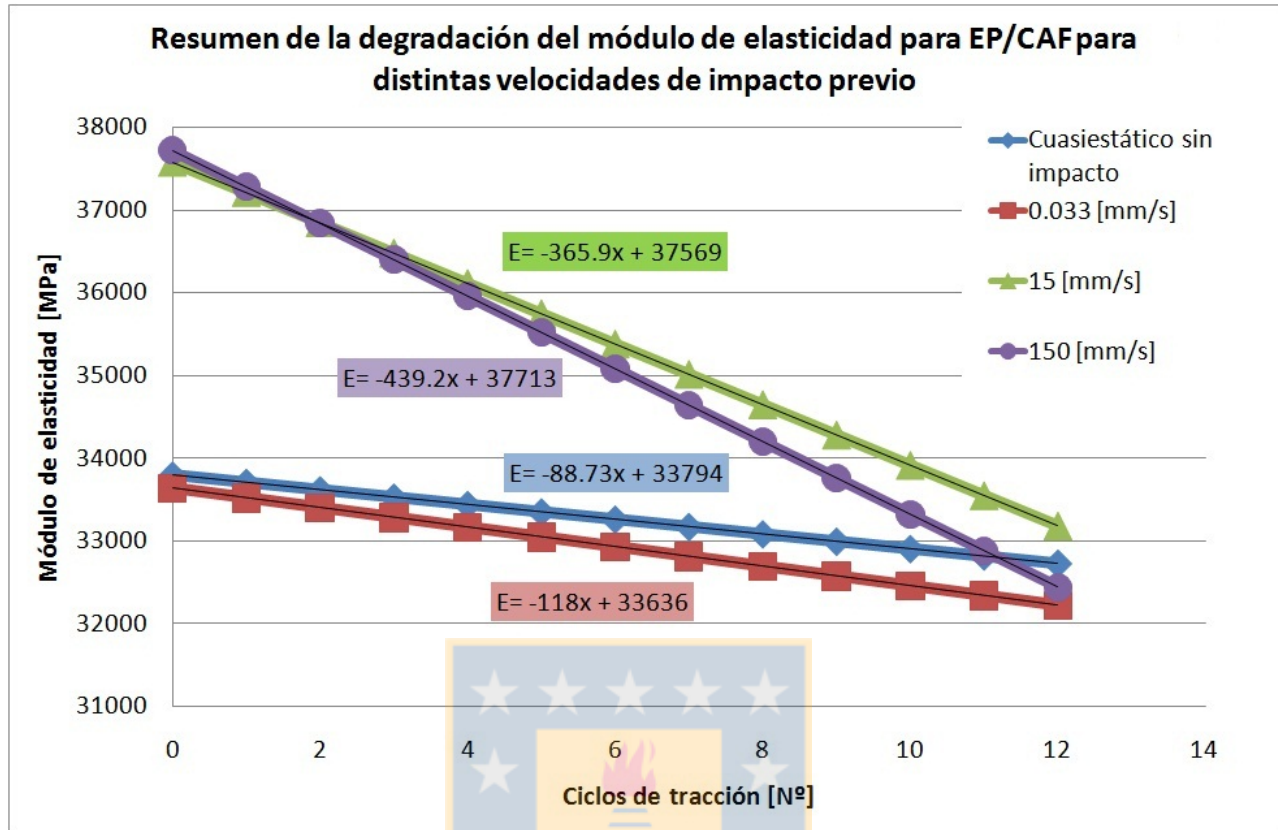


Figura 4.3: Resumen de los promedios y linealizaciones de los resultados de daño para EP/CF

Las figuras 4.2 y 4.3 muestran el resumen de los resultados de degradación del módulo de elasticidad linealizado para cada experimento. Se puede observar que la pendiente muestra la cantidad de MPa que pierde el módulo de elasticidad del material por cada ciclo de carga y descarga que se le aplica, aumentando un 0,2 % la deformación en cada ciclo de carga. Por otra parte la constante de la linealización muestra el valor promedio del módulo de elasticidad inicial que presenta el grupo de muestras lo que hace que cada recta cruce el eje de las ordenadas en un lugar distinto.

Si consideramos una normalización sobre el módulo de elasticidad inicial, se puede observar que cada curva tendrá una pendiente distinta, y que cada material tendrá una sensibilidad distinta a la aplicación de un impacto previo al ensayo cíclico.

La figura 4.4 muestra el resumen anterior considerando una normalización para observar la dependencia de la velocidad de deformación en el impacto.

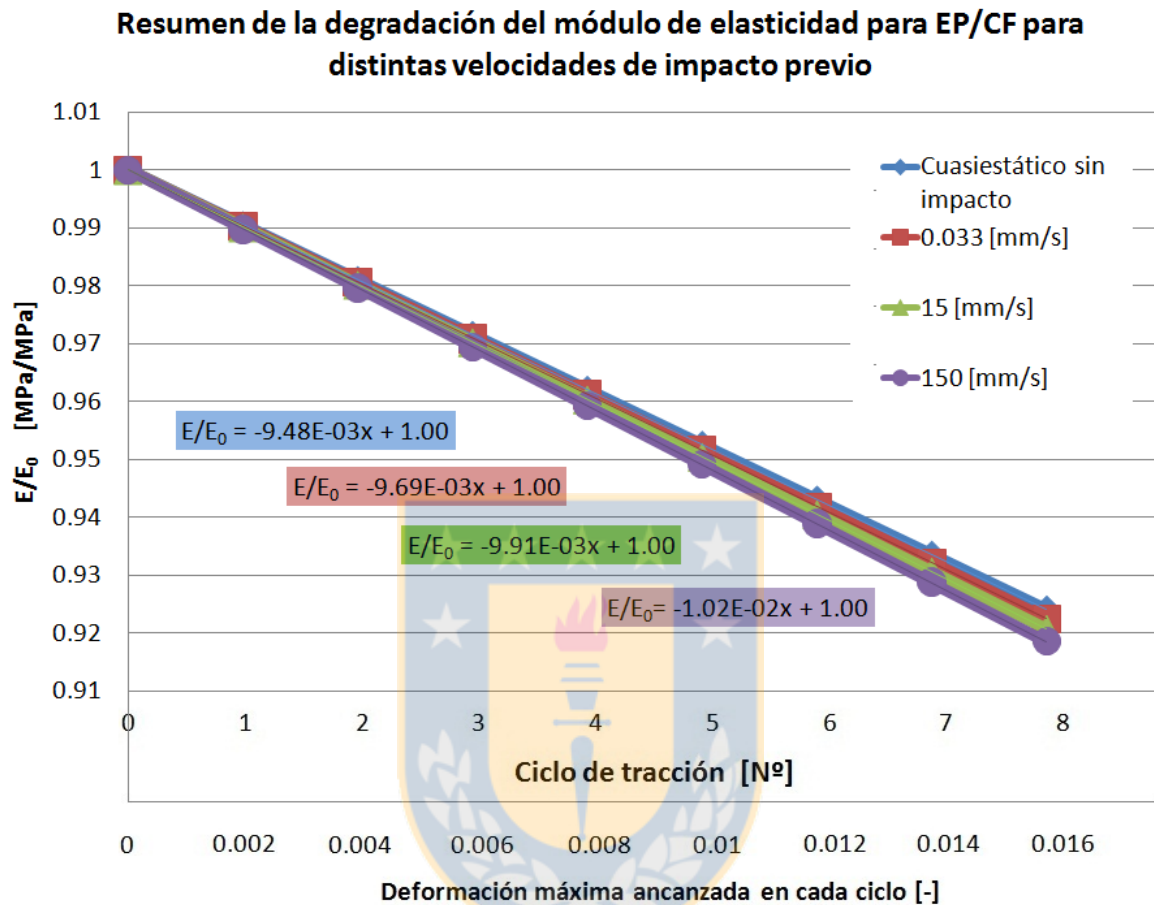


Figura 4.4: Resumen de los promedios y linealizaciones de los resultados de daño para EP/CF considerando un módulo de elasticidad inicial constante

Esta figura muestra que la sensibilidad que posee el compuesto de carbono a un impacto es mínimo, estableciendo que un impacto a determinada velocidad afectará muy poco en el posterior daño que pueda presentar tras ciclos de carga y descarga. Sin embargo la disminución existe y un impacto inicial con un movimiento de tracción de parte del cabezal de 150[mm/s] degradará el módulo de elasticidad un 7,3 % más por ciclo de deformación, que cuando el material no recibe un impacto y se lleva a cabo el mismo ensayo de daño.

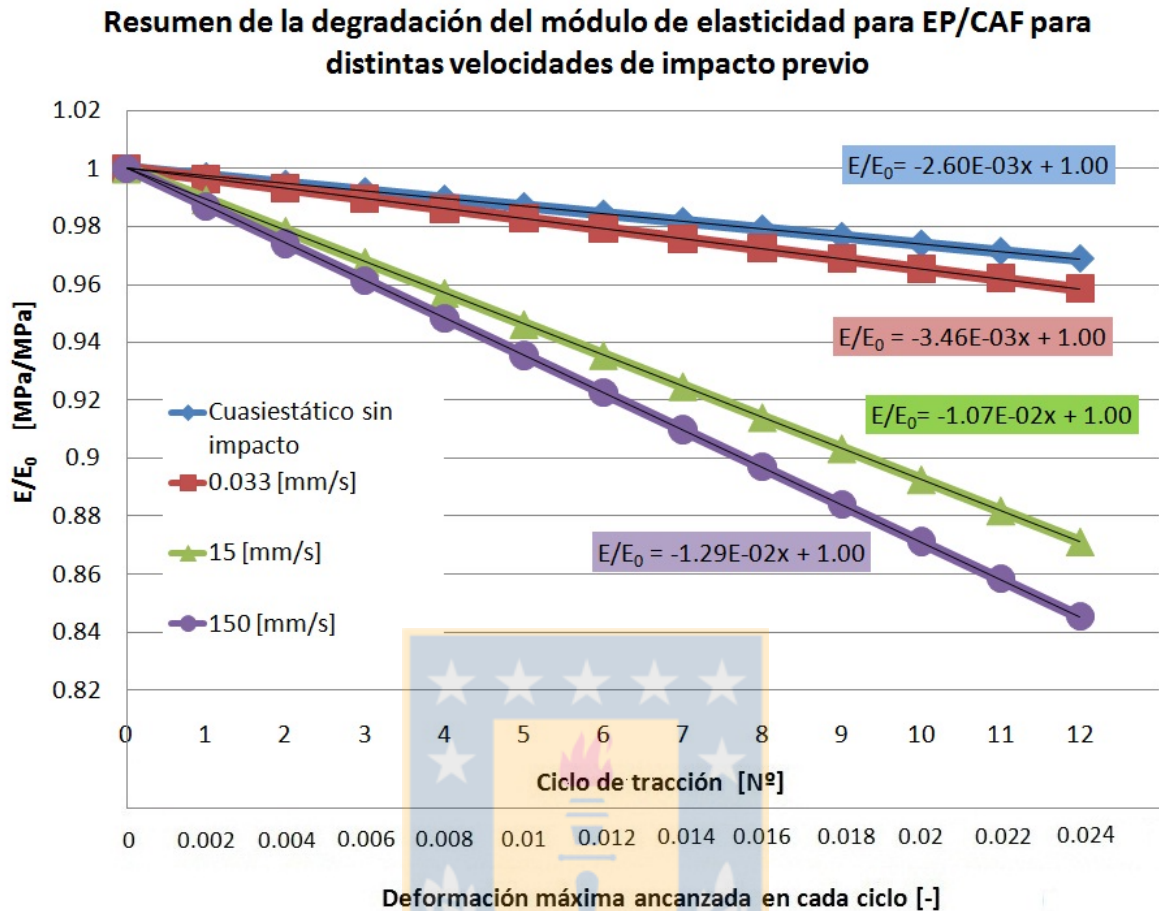


Figura 4.5: Resumen de los promedios y linealizaciones de los resultados de daño para EP/CF considerando un módulo de elasticidad inicial constante

El compuesto de carbono-aramida es distinto al anterior, presenta una mayor sensibilidad al impacto inicial, y su pendiente es más pronunciada conforme se aumenta la velocidad de la tracción previa al ensayo de daño. Los valores son capaces de disminuir un 394,98 % más rápido al existir un impacto a 150[mm/s] que si no existiere impacto previo.

Sin embargo la siguiente tabla muestra que los valores de la pendiente son siempre menores para este material por sobre la fibra de carbono sola. Es decir, la degradación siempre será menor, aun cuando este material sea sensible al impacto.

Esta tabla muestra que el compuesto de carbono presenta valores mayores de degradación por ciclo de tracción indicando que pérdida de integridad es continua y con muy poca dependencia de la velocidad de un impacto previo, mientras que el compuesto de carbono - aramida presenta una mayor dependencia a la velocidad de un impacto, y su aumento es proporcional conforme se aumenta

Tabla 4.1: Comparación en la pendiente de degradación del módulo de elasticidad por cada ciclo de daño sobre el material

	EP/CF	EP/CAF
$\Delta E/ciclos$	[MPa/ciclos]	[MPa/ciclos]
Sin impacto previo	-405,1	-88,73
Impacto a 0,033[mm/s]	-413,9	-118,0
Impacto a 15[mm/s]	-423,3	-365,9
Impacto a 150[mm/s]	-434,7	-439,2

la velocidad de estos eventos. Esto puede deberse al tipo de tejido, ya que se sabe que dentro de las propiedades de este último material, su resistencia al impacto es del doble que la del compuesto de carbono solo. Otra explicación es que un tejido mixto puede tener mejores propiedades frente a la velocidad de deformación presentando un proceso de alineación de la fibra durante la tracción un poco más lento que el otro compuesto, retrasando el proceso de daño. Por último, la fibra de carbono - aramida presenta mejores propiedades al daño aun cuando la tabla 2.1 muestra que sus esfuerzos últimos y la resistencia de este material es menor que el anterior.

## 4.4. Figuras complementarias y análisis comparativo

Las siguientes figuras muestran la comparación instantánea entre el mismo ensayo sobre ambos materiales. Cada una muestra el parámetro que determina el daño, la deformación permanente, y el módulo de elasticidad que presenta luego de alcanzar esos niveles de deformación inelástica.

La figura 4.6 muestra la comparación en el caso de un ensayo de carga y descargas sin influencia de predeformación por impacto previo. Se observa también la desviación estándar para cada resultado y la pronunciada tendencia que presenta el compuesto de carbono por sobre el otro compuesto.

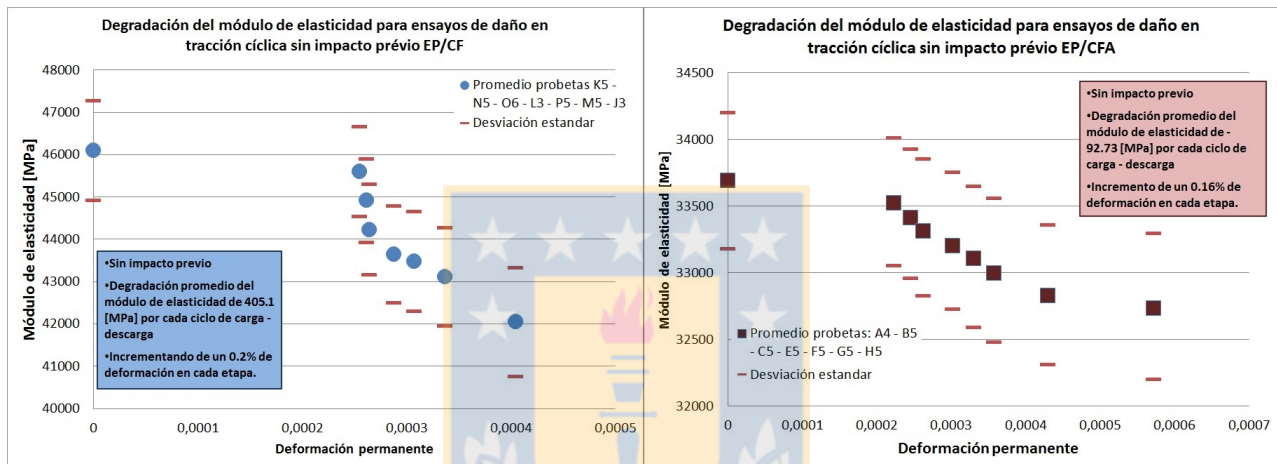


Figura 4.6: Degradación del módulo de elasticidad en ambos materiales para ensayos de daño en tracción cíclica sin impacto previo

La siguiente comparación en la figura 4.7 muestra que para el mismo ensayo, esta vez tras la aplicación de un ciclo de carga a velocidad cuasiestática, se observa que los datos del compuesto simple tienden a la baja agrupándose y mostrando una pérdida en el módulo mucho mayor al compuesto de carbono - aramida, el cual presenta un desarrollo lineal pero con una mayor dispersión.

Al aumentar la velocidad del ciclo previo al ensayo de daño se observa que el compuesto de carbono presenta deformaciones plásticas mayores y por ende una pérdida en el módulo de elasticidad mayor, sin embargo los resultados tienen poco desarrollo y se agrupan alrededor de los primeros resultados sin un aumento considerable en los primeros ciclos, sin embargo presentan una gran caída en las últimas dos mediciones.

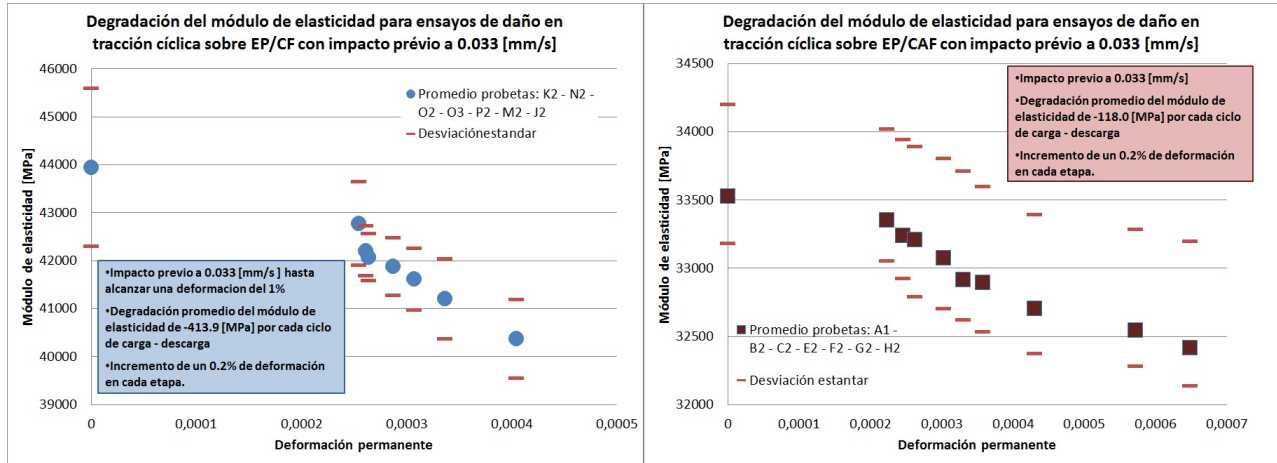


Figura 4.7: Degradación del módulo de elasticidad en ambos materiales para ensayos de daño en tracción cíclica con impacto previo a  $0,033[mm/s]$

En el compuesto de carbono - aramida ya no se observa un desarrollo lineal, si no más bien cúbico. Sin embargo aun es posible establecer que la relación entre las deformaciones inelásticas y el módulo de elasticidad para cada caso de carga y descarga tiene un decrecimiento menor que para el otro material, aun cuando los niveles de deformación plástica sean mayores que en la figura previa.

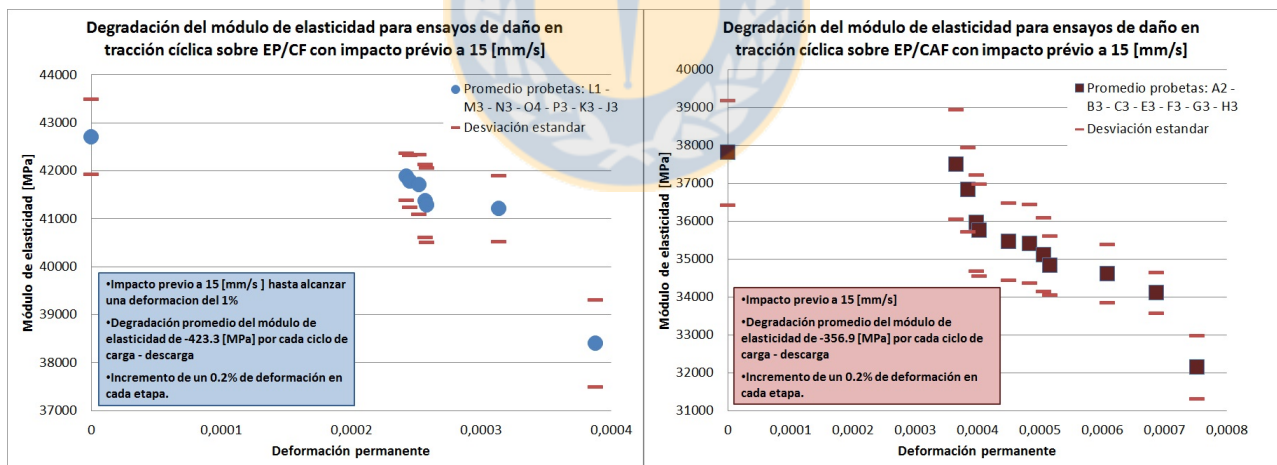


Figura 4.8: Degradación del módulo de elasticidad en ambos materiales para ensayos de daño en tracción cíclica con impacto previo a  $15[mm/s]$

Por último, la figura 4.9 muestran mayores niveles de deformación y su desarrollo es consistente con las figuras anteriores. EL módulo de elasticidad presenta una pérdida similar por cada ciclo o deformación remanente alcanzada en ambos materiales. Es posible notar que en ninguno de los dos materiales el desarrollo es lineal y que existen ciclos dentro de los cuales no existe mucha variación

luego de alcanzar niveles de deformación plástica. No quiere decir que se alcance un límite, si no más bien un punto de inflexión para el caso del compuesto de carbono - aramida.

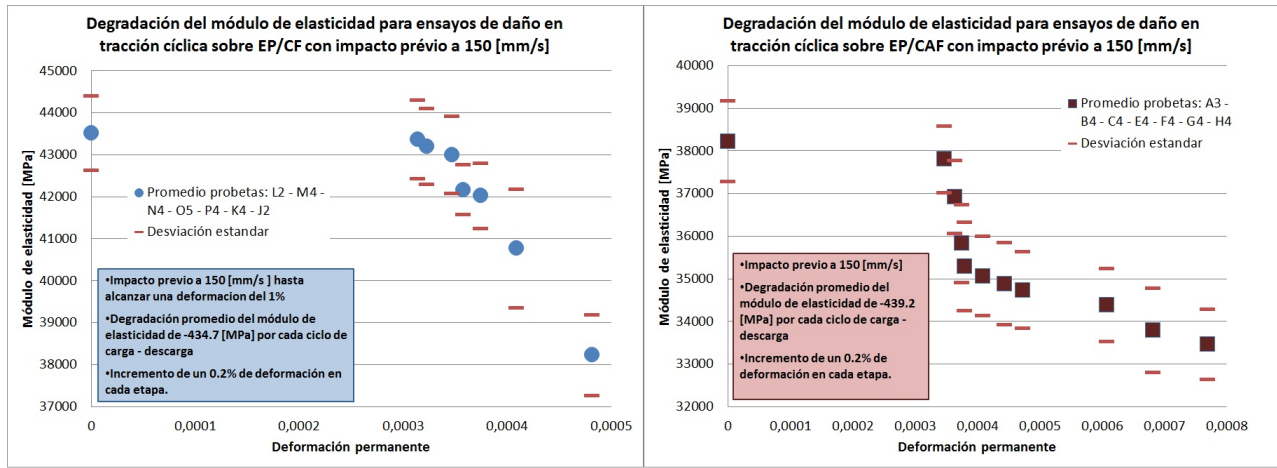


Figura 4.9: Degradación del módulo de elasticidad en ambos materiales para ensayos de daño en tracción cíclica con impacto previo a 150[mm/s]



## 4.5. Conclusiones

El desarrollo de este informe permite obtener las siguientes conclusiones:

- El desarrollo de un protocolo de fabricación es básico para asegurar la repetitividad de los resultados. La utilización de muestras de distintas placas, fabricadas por separado, permite asegurar que aun cuando el material sea el mismo, los detalles en los procesos de fabricación no afectan el resultado experimental.
- El diseño del protocolo experimental también asegura que los resultados sean fiables, minimizando el error, lo que junto con otorgar el menor tratamiento al procesamiento de datos otorga una visión más precisa de lo que sucede con los materiales estudiados.
- Los resultados en la caracterización del parámetro de elasticidad, para la orientación de laminado seleccionado en ambos materiales, difieren en un 0,73 % para el compuesto de carbono y en un 3,50 % para el compuesto de carbono - aramida en comparación con la teoría de laminados, debido principalmente a la disminución en el porcentaje de volumen de fibra obtenidos en el proceso de fabricación.
- Ante el impacto es posible observar que los efectos de endurecimiento señalados por otros autores son reales. Para ambos materiales se observa que ante el mismo estado de deformación la magnitud del esfuerzo es mayor al aumentar la velocidad de deformación con la que se alcanza aquel punto. Sin embargo la diferencia entre las velocidades seleccionadas debe ser exponencial entre sí para notar diferencias en los resultados, es por eso que en este trabajo se seleccionaron velocidades de 0,033[mm/s], 15[mm/s] y 150[mm/s] para el desplazamiento del cabezal en la máquina de tracción.
- Los resultados de los ensayos de daño cuasiestáticos muestran que, para la orientación de laminado seleccionado, no existe zona plástica en la curva esfuerzo deformación y casi no se puede notar el daño producto de cada ciclo de carga. Es por eso que se utilizó un gráfico en donde se mostrara el módulo de elasticidad tras cada ciclo de tracción propinado a la muestra, con el fin de cuantificar numéricamente la pérdida o degradación de este parámetro en [MPa/ciclo].
- Los resultados para los ensayos de daño cuasiestáticos muestran que el laminado de



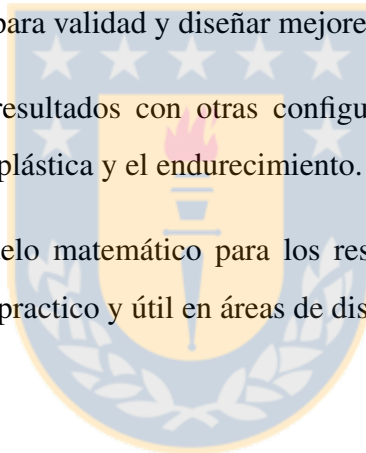
carbono/epoxi pierde en promedio  $405,1[MPa]$  por cada ciclo de daño, mientras que el compuesto de carbono - aramida/epoxi pierde solo  $88,73[MPa]$  por cada ciclo.

- Por otra parte, los resultados de daño para las muestras previamente impactadas a distintas velocidades, siempre es mayor que para el caso sin la tracción violenta propinada a las probetas. Mientras que el compuesto de carbono simple para impactos a velocidades de desplazamiento de cabezal de  $15[mm/s]$  y  $150[mm/s]$  tienen una degradación en el ensayo de daño de  $413,9[MPa]$  y  $423,3[MPa]$  por cada ciclo respectivamente, el material de carbono - aramida tienen una degradación de  $365,9[MPa]$  y  $439,2[MPa]$  por cada ciclo de daño a las mismas velocidades en el impacto previo.
- Dado los datos anteriores el compuesto de carbono/epoxi presenta una mayor degradación del módulo de elasticidad por ciclo de tracción que el compuesto de carbono - aramida, sin embargo es menos sensible al impacto previo. Es decir, la existencia o no de un impacto sobre el daño posterior que pueda recibir este compuesto simple, no tendrá mayor repercusión en la degradación del parámetro estudiado. Sin embargo el compuesto mixto, si es sensible al impacto previo, aumentando su degradación cuando se aumenta la velocidad del impacto previo, sin embargo su resistencia al daño en la mayoría de los casos es mejor que la del compuesto de carbono/epoxi, aun cuando sus propiedades mecánicas sean menores.
- Estos resultados permiten concluir que para un mejor diseño la utilización de carbono/epoxi brindará integridad sin cambios inesperados al someter las piezas de este materia a distintas velocidades de deformación por impactos, mientras que el material de carbono-aramida/epoxi si es sensible a la velocidad y su utilización debe estar ligada piezas que deban resistir mejor al daño dentro de velocidades de deformación durante impactos admisibles.

## 4.6. Perspectivas a futuro

Existen cabos desde donde es posible continuar la investigación y proceder para obtener mejores resultados o análisis paralelos

- Existe la posibilidad de mejorar los protocolos de fabricación con sistemas más profesionales de corte y apilamiento de los laminados.
- Es necesario hacer un estudio en el posible deslizamiento que puede existir en las mordazas de la máquina de tracción la cual puede afectar los resultados a grandes velocidades de desplazamiento del cabezal.
- La implementación de un modelo de elementos finitos sobre la influencia de la velocidad de deformación es importante para validad y diseñar mejores elementos con estos materiales.
- La comparación de estos resultados con otras configuraciones de laminado sería útil para observar el daño en la zona plástica y el endurecimiento.
- Un ajuste numérico o modelo matemático para los resultados entre deformación plástica y módulo de elasticidad sería practico y útil en áreas de diseño y control de daño.



# Bibliografía

- [1] Rodríguez J. Estrategia para la predicción del daño acumulado en un tren de aterrizaje en material compuesto. Tesis Magister en Ciencia de la Ingeniería con mención Ingeniería Mecánica. Universidad de Concepción. (2012)
- [2] Mahmood M. Shokrieh, Majid Jamal Omid. Tension behavior of unidirectional glass/epoxy composites under different strain rates. *Composite Structures* 88 (2009) 595-601
- [3] Mahmood M. Shokrieh, Majid Jamal Omid. Investigation of strain rate effects on in-plane shear properties of glass/epoxy composites. *Composite Structures* 91 (2009) 95-102
- [4] Mahmood M. Shokrieh, Majid Jamal Omid. Investigating the transverse behavior of Glass-Epoxy composites under intermediate strain rates. *Composite Structures* 93 (2011) 690-696
- [5] Fitoussi J, Meraghni F, Jendli Z, Hug G, Baptiste D. Experimental methodology for high strain-rates- tensile behavior analysis of polymer matrix composites. *Composites Science and Technology* 65 (2005) 2174-2188
- [6] Al-Salehi FAR, Al-Hassani STS, Bastaki NM, Hinton MJ. Derived dynamic ply properties from test data on angle ply laminates. *Appl Compos Mater* 1997;4(3):157-72.
- [7] Daniel I.M, Werner B.T, Fenner J.S. Strain-rate dependent failure criteria for composites. *Composites Science and Technology* 71 (2011) 357-364
- [8] Raimondo L, Iannucci L, Robinson P, Curtis P.T. Modelling of strain rate effects on matrix dominated elastic and failure properties of unidirectional fibre-reinforced polymer-matrix composites. *Composites Science and Technology* 72 (2012) 819-827

- [9] Jendli Z, Meraghni F, Fitoussi J, Baptiste D. Micromechanical analysis of strain rate effect on damage evolution in sheet molding compound composites. *Composites Part A: Appl Sci Manufac* 2004;35(5):779-85.
- [10] Papadakis N, Reynolds N, Pharaoh M, Wood P, Smith C. Strain rate effects on the shear mechanical properties of a highly oriented thermoplastic composite material using a contacting displacement measurement methodology-part a: elasticity and shear strength. *Composite Science and Technology* 64 (2004) 729-738
- [11] Papadakis N, Reynolds N, Pharaoh M, Wood P, Smith C. Strain rate effects on the shear mechanical properties of a highly oriented thermoplastic composite material using a contacting displacement measurement methodology-part b: shear damage evolution. *Composite Science and Technology* 64 (2004) 739-748
- [12] Ladevéze P, Le Dantec E. Damage modelling of the elementary ply for laminated composites. *Composites Science and Technology* 1992;43:257-67.
- [13] Tasdemirci A, Hall I.W. Numerical and experimental studies of damage generation in a polymer composite material at high strain rates. *Polymer Testing* 25 (2006) 797-806
- [14] Qida Bing, Sun C.T. Modeling and testing strain rate-dependent compressive strength of carbon/epoxy composites. *Composite Science and Technology* 65 (2003) 2481-2491.
- [15] Ch. Hochard, Y. Thollon, 2010. A generalized damage model for woven ply laminates under static and fatigue loading conditions. *International Journal of Fatigue* (32) 158-165.
- [16] C. Medina, 2011. Identificación de parámetros en modelos de daño para materiales compuestos. Informe de Memoria de Título para optar al Título de Ingeniero Civil Aeroespacial.
- [17] ASTM D 7136/D 7136M-05. Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event. ASTM International. West Conshohocken PA, USA. 2005.
- [18] RG Faserverbundwerkstoffe. Catálogo en línea. <http://www.r-g.de/en/>
- [19] A. Miravete. *Materiales Compuestos I. : Z-2222-00* (2000) Centro Politécnico Superior Universidad de Zaragoza. España.

- [20] Ingeniería y maestría ORECAL. <http://www.orecal.cl/>
- [21] G. Pincheira, Ingeniería Civil de Materiales, Universidad de Concepción
- [22] ASTM D3039 / D3039M-08 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. ASTM International. West Conshohocken PA, USA. 2008.
- [23] GOM mbH. Aramis-deformation measurement using the grating method, User's Manual, V5.3.08, 2004 (Braunschweig)
- [24] A. Davidkov, M.K. Jain b, R.H. Petrova, D.S. Wilkinson, R.K. Mishrae. Strain localization and damage development during bending of Al–Mg alloy sheets. *Materials Science and Engineering A* 550 (2012) 395– 407

