

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

Profesores Patrocinantes:  
Dr. Ing. Paulo Flores Vega  
Dr. Ing. Emilio Dufeu Delarze

Identificación de parámetros en modelos de daño para materiales  
compuestos

**Carlos Andrés Medina Muñoz**

Informe de Memoria de Título  
para optar al Título de  
Ingeniero Civil Aeroespacial

Concepción, Marzo del 2011

# Sumario

Este trabajo se enfoca a los modelos de daño a meso escala. Estos modelos son capaces de predecir completamente el comportamiento mecánico no lineal y la degradación de propiedades mecánicas de los materiales compuestos cuando existen esfuerzos de corte. Los modelos de daño son vanguardistas con respecto a métodos utilizados para el diseño de estructuras y componentes fabricados con materiales compuestos, ya que optimiza sus características como la relación resistencia/peso en su uso.

Actualmente el uso de modelos de daño esta siendo aplicado en la industria aeroespacial, donde altos requerimientos de seguridad imponen un estudio profundo en el comportamiento mecánico con vista al mejor uso y servicio del material, y dentro de estas propiedades es la resistencia residual uno de los más importantes aspectos a considerar en la evaluación de la tolerancia al daño. Adicionalmente, el desarrollo de un nuevo aeroplano está influenciado por el incentivo de reducir los costos operativos de la aeronave, lo que se logra reduciendo el peso estructural y las operaciones de mantenimiento, aspectos también directamente relacionados con el daño.

Para predecir el comportamiento mecánico, estos modelos requieren una serie de parámetros propios del material, por lo tanto, es necesario contar con diversos ensayos mecánicos para la caracterización de estas propiedades.

En esta investigación se describen los ensayos mecánicos necesarios para determinar los parámetros de daño en el plano y además se incluye las ecuaciones para sus cálculos, de esta manera se obtiene una completa caracterización mecánica de un material. Utilizando un modelo de daño implementado en un código de elementos finitos se demuestra la capacidad de predecir el comportamiento del material, la degradación de propiedades y la deformación permanente bajo distintas cargas, específicamente esfuerzos de corte y estado de cargas combinada.

# Índice general

|                                         |             |
|-----------------------------------------|-------------|
| <b>Agradecimientos</b>                  | <b>I</b>    |
| <b>Sumario</b>                          | <b>II</b>   |
| <b>Índice general</b>                   | <b>III</b>  |
| <b>Índice de figuras</b>                | <b>V</b>    |
| <b>Índice de tablas</b>                 | <b>VIII</b> |
| <b>Nomenclatura</b>                     | <b>IX</b>   |
| <b>1. Introducción</b>                  | <b>1</b>    |
| 1.1. Marco General . . . . .            | 1           |
| 1.2. Objetivos . . . . .                | 6           |
| 1.3. Contenidos . . . . .               | 6           |
| <b>2. Marco teórico</b>                 | <b>7</b>    |
| 2.1. Evidencia experimental . . . . .   | 7           |
| 2.2. Modelo de daño . . . . .           | 9           |
| 2.2.1. Ley elástica del daño . . . . .  | 9           |
| 2.2.2. Ley de plasticidad . . . . .     | 11          |
| 2.3. Propiedades a determinar . . . . . | 12          |
| 2.4. Conclusiones . . . . .             | 12          |
| <b>3. Estrategia de caracterización</b> | <b>13</b>   |

|                                                                                   |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.1. Estado de corte puro . . . . .                                               | 13        |
| 3.2. Evaluación de ensayos en estado de corte puro . . . . .                      | 15        |
| 3.2.1. Ensayos mecánicos . . . . .                                                | 15        |
| 3.2.2. Resultados de la simulación de ensayos de corte para materiales compuestos | 18        |
| 3.2.3. Conclusión . . . . .                                                       | 22        |
| 3.3. Ensayos de corte . . . . .                                                   | 23        |
| 3.3.1. Material y fabricación . . . . .                                           | 23        |
| 3.3.2. Método de caracterización . . . . .                                        | 25        |
| 3.3.3. Maquinaria y descripción de ensayos . . . . .                              | 27        |
| 3.3.4. Resultados experimentales . . . . .                                        | 32        |
| 3.4. Conclusiones . . . . .                                                       | 34        |
| <b>4. Identificación de parámetros</b>                                            | <b>35</b> |
| 4.1. Parametrización . . . . .                                                    | 35        |
| 4.1.1. Ley elástica del daño . . . . .                                            | 35        |
| 4.1.2. Ley de plasticidad . . . . .                                               | 37        |
| 4.1.3. Simulación ensayo de corte . . . . .                                       | 40        |
| 4.1.4. Factor de acoplamiento $\alpha$ ensayo de corte . . . . .                  | 41        |
| 4.1.5. Caracterización factor de acoplamiento $\alpha$ . . . . .                  | 42        |
| 4.2. Validación de resultados . . . . .                                           | 44        |
| 4.3. Conclusiones . . . . .                                                       | 46        |
| <b>5. Conclusiones y perspectivas</b>                                             | <b>47</b> |
| 5.1. Conclusiones . . . . .                                                       | 47        |
| 5.2. Perspectivas a futuro . . . . .                                              | 48        |
| <b>Bibliografía</b>                                                               | <b>49</b> |
| <b>Anexo</b>                                                                      | <b>53</b> |