



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

## **Estrategia Multiescala para Simulación de Compuestos Laminados, Utilizando Elementos Finitos Cuadráticos**

Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con  
mención en Ingeniería Mecánica

JORGE ANDRÉS FERNÁNDEZ GONZÁLEZ  
CONCEPCIÓN-CHILE  
2017

Profesor Guía: Dr. Ing. Paulo Flores Vega  
Dpto. de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería  
Universidad de Concepción  
Profesor Guía: Dra. Ing. Karin Saavedra Redlich  
Departamento de Tecnologías Industriales, Facultad de Ingeniería  
Universidad de Talca

# Resumen

Este trabajo se desarrolló en el marco del proyecto FONDECYT de iniciación  $N^{\circ}$  11130623, dirigido por la Dra Karin Saavedra, que tiene por objetivo estudiar el comportamiento de materiales compuestos mediante la utilización de una estrategia de descomposición de dominios multiescala. Dicha estrategia ha permitido simular la interacción entre delaminación y pandeo de materiales compuestos laminados [5, 42, 41], además considera las no linealidades geométricas a través de una formulación Lagrangiana, mientras que la delaminación y el contacto son introducidos por leyes de interfaz. Luego, el problema es resuelto mediante tres escalas: i) la micro-escala asociada a la discretización de cada sub-estructura, ii) la macro-escala asegurando la propagación de la parte de la solución con gran longitud de onda y iii) la supermacro-escala que resuelve el problema macroscópico.

Hasta ahora, para mejorar la eficiencia de la estrategia se ha trabajado sobre la modificación en el esquema iterativo y en la optimización de las direcciones de búsqueda utilizadas por el algoritmo de resolución LaTIn [42]. No obstante, para simular problemas con estructuras esbeltas, sensibles a pandeo y a delaminación, se requiere refinar el tamaño de la malla (versión- $h$ ) para aumentar la exactitud de la solución, logrando simular el comportamiento de las estructuras con un gran número de grados de libertad y a un alto costo computacional.

Sin embargo, estudios de los años 90' [7, 6] señalan que no solo disminuyendo el tamaño del elemento se puede reducir el error de la solución numérica. También, es posible obtener buenos resultados aumentando el grado del polinomio de las funciones bases de cada elemento, manteniendo fijo el tamaño de la malla (versión- $p$ ). Otro método corresponde a una combinación entre el refinamiento de la malla y el orden del polinomio base de cada elemento (versión- $hp$ ).

Si bien el código C++ en el que se ha implementado la estrategia [42], está habilitado para trabajar con diferentes tipos de elementos finitos 3D, son todos lineales. Por lo tanto, no es posible estudiar el efecto de las versiones  $p$  y  $hp$ , señaladas anteriormente, siendo muy difícil obtener resultados a un bajo costo computacional.

El presente trabajo tiene por objetivo implementar elementos finitos 3D de segundo orden en el código MULTI. Además, estudiar el efecto de estos elementos en la convergencia, error y tiempo de procesamiento en la simulación de placas 3D en flexión o pandeo.

La utilización de elementos cuadráticos en la discretización conduce a tiempos de cálculo menores, independiente del tipo de formulación o material utilizado. Además, disminuye el error respecto al resultado teórico. Por otro lado, particularmente con materiales ortotrópicos mejora la tasa de convergencia. Por lo tanto, esta implementación permite realizar simulaciones más complejas con menos grados de libertad y con menor costo computacional.