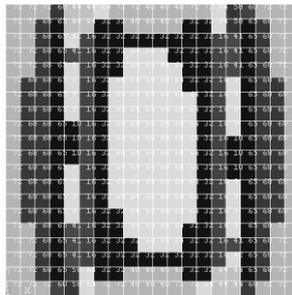


Desarrollo de un método de optimización de secuencia de apilado en componentes laminados con criterios de rotura de la última lámina.



Presentada por: Peter Scholten

Dirigida por: Dr. D. José Albelda Vitoria

Valencia, Septiembre de 2011

En ANSYS 11.0 se desarrolla macros para analizar componentes laminados, sus roturas con el criterio de Tsai-Wu, y la optimización de los materiales para aumentar sus coeficientes de seguridad.



Resumen

En esta Tesis de Máster se desarrolla un método de optimización de secuencia de apilado en componentes laminados con criterios de rotura de la última lámina. Se ha implantado una macro con el lenguaje interno del programa ANSYS que permite la comprobación de rotura de la última lámina en componentes laminados mediante el uso de dicho programa. Posteriormente, utilizando el módulo de optimización del propio programa ANSYS 11.0 y la macro de verificación con criterio de rotura de la última lámina, se ha analizado varios problemas de optimización de la secuencia de apilado de laminados.

En primer lugar se desarrolla una macro independiente del problema del usuario, que comprueba en cada elemento de cada capa si el elemento ha fallado o no. Para esto se utiliza los criterios de TSAI-WU y el modelo de degradación del DIMM. Si el elemento ha fallado se cambia el material solo en este elemento modificando su constante real. Este procedimiento se realiza automáticamente en múltiples iteraciones hasta que no se rompen más elementos.

En segundo lugar se desarrollo otra macro independiente que optimiza las orientaciones de las laminas para conseguir un laminando con un coeficiente de seguridad mayor. Para esto se implementa parámetros en la macro anterior, que son necesarios para la optimización. Se crea automáticamente varios diseños para encontrar una solución óptima.

Las macros deben ser independientes del problema del usuario para asegurar una solución a problemas distintos sin forzar al usuario la utilización de un método específico de crear su modelo.



Abstract

In this master thesis is a optimization method of stacking sequence developed to optimization of laminated components with a failure criteria of the last layer. The macro allows the verification of the breakage of the last layer of laminate components using the finite element program ANSYS 11.0. Then, using the optimization program also based on 11.0 ANSYS, another macro is created with an optimization strategy for the stacking sequence.

First, a macro independent from the user problem is developed, which controls in each element of each layer, if the element has failed or not. For this the failure criteria of Tsai-Wu is used and the degradation model of the DIMM. If the element has failed the material of this element is changed by modifying its real constant. This is done automatically in multiple iterations until no more elements break.

Secondly another macro is developed, which optimizes the orientations of the layers to achieve a higher safety factor. For this parameters are implemented in the previous macro, which are necessary for the optimization. It automatically creates several designs to find an optimal solution.

The macros must be independent of the user's problem to ensure a solution to various problems without forcing the user to use a specific method of creating the model.



Resum

En aquesta Tesi de Màster es desenvolupa un mètode d'optimització de seqüència de apilat en components laminats amb criteris de ruptura de l'última làmina. S'ha implantat una macro amb el llenguatge intern del programa ANSYS que permet la comprovació de trencament de l'última làmina en components laminats mitjançant l'ús d'aquest programa. Posteriorment, utilitzant el mòdul d'optimització del propi programa ANSYS 11.0 i la macro de verificació amb criteri de ruptura de l'última làmina, s'ha analitzat diversos problemes d'optimització de la seqüència d'apilament de laminats.

En primer lloc es desenvolupa una macro independent del problema de l'usuari, que comprova en cada element de cada capa si l'element ha fallat o no. Per això s'utilitza els criteris de Tsai-WU i el model de degradació del DIMM. Si l'element ha fallat es canvia el material només en aquest element modificant la seva constant real. Aquest procediment es realitza automàticament en múltiples iteracions fins que no es trenquen més elements.

En segon lloc es desenvolupa una altra macro independent que optimitza les orientacions de les làmines per aconseguir un laminant amb un coeficient de seguretat major. Per això s'implementa paràmetres en la macro anterior, que són necessaris per a l'optimització. Es crea automàticament diversos dissenys per trobar una solució òptima.

Les macros han de ser independents del problema de l'usuari per assegurar una solució a problemes diferents sense forçar a l'usuari la utilització d'un mètode específic de crear el seu model.



Agradecimientos

Debo agradecer la paciencia y dedicación de mi tutor y profesor José Albelda Vitoria, tanto en problemas técnicos como en problemas lingüísticos. En muchas horas me ha explicado las dificultades de la tesis, me ha dado muchas informaciones y me ha ayudado mucho encontrar el camino correcto para superar las dificultades existentes. La programación en ANSYS con ayuda de APDL era totalmente nueva para mí y me ha dado el tiempo necesario para encontrar varias complicaciones, para entenderlas, solucionarlas y comprobar las soluciones.

Sin sus clases en materiales compuestos y elementos finitos y además su dedicación realizando este trabajo no habría sido posible para mí. En aquellas mi interés a materiales compuestos ha sido intensificado.



Contenido

Resumen.....	I
Abstract	II
Resum.....	III
Agradecimientos	IV
Contenido.....	V
Índice de ilustraciones.....	IX
Índice de formulas.....	XI
Índice de tablas	XII
Índice de abreviaturas y símbolos.....	XIII
1. Introducción.....	1
1.1. ANSYS	1
1.1.1. <i>Preprocessor</i>	1
1.1.2. <i>Solution</i>	4
1.1.3. <i>Postprocessor</i>	5
1.2. Teoría clásica de laminados.....	6
1.2.1. Estudio de tipos de laminados.....	7
1.2.2. Efectos de borde	8
1.2.3. Efectos de borde en laminado angular.....	9
1.2.4. Conclusiones	10
1.3. Criterio de fallo multiaxial de Tsai-Wu	11



Tesis de Máster

1.4.	Criterios de degradación.....	15
1.5.	Criterio de fallo de laminados por rotura de la ultima lamina.....	17
1.6.	Optimización	19
2.	Desarrollo de un modulo de evaluación de rotura de ultima lamina con ANSYS.....	21
2.1.	APDL	21
2.1.1.	Línea de comandos / menú.....	21
2.1.2.	Diseño paramétrico	22
2.1.3.	<i>Array parameters</i>	23
2.1.4.	*GET	24
2.1.5.	APDL como lenguaje de macro	24
2.1.5.1.	Bucles en la macro	25
2.2.	Procedimiento para ejecutar las macros	29
2.3.	El problema en ANSYS.....	33
2.4.	La macro LAM_RUL.MAC.....	34
2.5.	Las variables	61
2.6.	Verificación de la macro LAM_RUL	62
2.7.	Ejemplos con placa con seis capas sometida a flexión.....	63
3.	Optimización de diseño en Ansys.....	72
3.1.	Procedimiento.....	72
3.1.1.	Variables de optimización.....	72



Tesis de Máster

3.1.2.	Terminología de optimización del diseño en ANSYS	74
3.2.	Métodos / Herramientas de optimización.....	77
3.2.1.	<i>Subproblem approximation method</i>	77
3.2.1.1.	Aproximación	78
3.2.1.2.	Conversión.....	79
3.2.1.3.	Control de convergencia (SAM)	79
3.2.1.4.	Consideraciones especiales para la aproximación del sub-problema	80
3.2.2.	<i>First order method</i>	81
3.2.2.1.	Control de convergencia (FOM)	81
3.2.2.2.	Consideraciones especiales para el método de primer orden.....	82
3.2.3.	Comparación de métodos de optimización	84
3.2.4.	Herramientas de optimización	86
3.3.	Elección de las variables de la optimización	88
3.3.1.	Elección de las variables del diseño	88
3.3.2.	Elección de las variables del estado	89
3.3.3.	Elección de la función objetivo	90
3.4.	La macro LAM_RUL_OPT.MAC	91
4.	Ejemplos de optimización de secuencia de apilado con resistencia máxima	96
4.1.	Placa con tres capas.....	96



Tesis de Máster

4.2.	Placa con seis capas	99
4.3.	Cúpula	102
5.	Conclusiones	108
5.1.	Algunas consideraciones finales	108
5.2.	Valoración	111
6.	Trabajos futuros	113
7.	Bibliografía	114
8.	Anexo	115
8.1.	Macro DEF_MAT sin comentarios	115
8.2.	Macro NRCON sin comentarios	119
8.3.	Macro RNEW sin comentarios	122
8.4.	Macro LAM_RUL_OPT sin comentarios	127
8.5.	Placa_c3	129
8.6.	Placa_c6_sfa	133
8.7.	Cúpula	137



Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Modeling	2
Ilustración 2: Meshing	2
Ilustración 3: Loads	3
Ilustración 4: Material Props	3
Ilustración 5: Solution	4
Ilustración 6: Postprocessor	5
Ilustración 7: Laminado	6
Ilustración 8: "Sandwich"	6
Ilustración 9: Laminados simétrico	6
Ilustración 10: Laminado cruzado simétrico	8
Ilustración 11: Deformaciones en el borde	8
Ilustración 12: Tensiones en las capas	8
Ilustración 13: Tensiones de cortadura interlaminares	9
Ilustración 14: Secuencia de apilado	9
Ilustración 15: Efecto de término de interacción	14
Ilustración 16: Degradación hasta la rotura de la última lamina (RUL)	16
Ilustración 17: Procedimiento de análisis resistente de un laminado	18
Ilustración 18: Representación gráfica de un array 2-D	23



Tesis de Máster

Ilustración 19: Representación gráfica de un array 3-D.....	23
Ilustración 20: Representación grafica de un array 5-D.....	23
Ilustración 21: Codificación que identifica la combinación de capas falladas en el laminado con modelo de degradación de dos estados	30
Ilustración 22: Iteraciones de degradación en elemento i.....	31
Ilustración 23: Resultado de iteraciones.....	31
Ilustración 24: Organigrama.....	32
Ilustración 25: Codo característico con evolución de rotura	62
Ilustración 26: Tsai-Wu en deformaciones.....	62
Ilustración 27: Placa con seis capas, “apoyado” por 2 lados	64
Ilustración 28: LAM_RUL; “apoyado” [0/45/-45]s	65
Ilustración 29: LAM_RUL; “apoyado” [0/90/0]s.....	65
Ilustración 30: Planteamiento: Placa con seis capas, “empotrado” por 2 lados	66
Ilustración 31: LAM_RUL; “empotrado” [0/45/-45]s	68
Ilustración 32: LAM_RUL; “empotrado” [0/90/0]s	68
Ilustración 33: Planteamiento: Placa con seis capas, apoyado por 4 lados	69
Ilustración 34: LAM_RUL; “apoyado” [0/90/0]s.....	69
Ilustración 35: Planteamiento: Placa con seis capas, empotrado por 4 lados.....	70
Ilustración 36: LAM_RUL; “empotrado” [0/90/0]s	70
Ilustración 37: Velocidad de convergencia en distintos modelos.....	71
Ilustración 38: Comparación de un diseño y un diseño óptimo.....	75
Ilustración 39: Flujo de datos de una optimización	76
Ilustración 40: Mínimo local / Mínimo Global	83
Ilustración 41: Método de la aproximación del sub-problema.....	85



Tesis de Máster

Ilustración 42: Método del primer orden	85
Ilustración 43: Placa_c3: Planteamiento	97
Ilustración 44: Placa_c3: LAM_RUL	97
Ilustración 45: Placa_c3: LAM_RUL_OPT	97
Ilustración 46: LAM_RUL_OPT: “empotrado” [0/90/0]s -> [48,4/19,7/117,4/]	99
Ilustración 47: Cúpula: Planteamiento	103
Ilustración 48: Cúpula: LAM_RUL	104
Ilustración 49: Cúpula: LAM_RUL_OPT	105
Ilustración 50: Efectos del modelo a la macro	110

Índice de formulas

Formula 1: Criterio de Von Mises	11
Formula 2: Criterio de Tsai-Hill (ejes orientados)	11
Formula 3: Planteamiento tensorial en el espacio de tensiones según Tsai-Wu	12
Formula 4: Forma matricial del planteamiento del criterio de Tsai-Wu	12
Formula 5: Criterio de Tsai-Wu en una lamina ortótropa en tensión plana:	12
Formula 6: Modo I: Tracción y compresión longitudinal	12
Formula 7: Modo II: Tracción y compresión transversal:	13
Formula 8: Modo III: Cortadura	13
Formula 9: Criterio de Tsai-Wu con tensión hidrostática	13
Formula 10: Termino de interacción	13
Formula 11: Término de interacción normalizado	13
Formula 12: Variables del diseño	73
Formula 13: Variables del estado	73



Tesis de Máster

Formula 14: Función objetivo 74

Índice de tablas

Tabla 1: Tipos de laminados 7

Tabla 2: Planteamiento de optimización..... 20

Tabla 3: Sobrevista sobre comandos de bucles 28

Tabla 4: Distinción de Degradaciones 29

Tabla 5: Sobrevista sobre las variables 61

Tabla 6; Propiedades del Material 63

Tabla 7: Constantes Reales de la placa con seis capas, apoyada por dos lados 64

Tabla 8: Constantes Reales de la placa con seis capas, empotrada por dos lados 67

Tabla 9: Constantes Reales de la placa con seis capas, apoyada por cuatro lados..... 69

Tabla 10: Constantes Reales de la placa con seis capas, empotrada por cuatro lados 70

Tabla 11: Comparación de métodos de optimización..... 85

Tabla 12: Placa_c3: Diseños de optimización..... 98

Tabla 13: Constantes Reales del diseño óptimo de la placa con seis capas, empotrado por cuatro lados 100

Tabla 14: Coeficiente de seguridad mínimo antes y después de la optimización 100

Tabla 15: “empotrado” [0/90/0]s: Diseños de optimización 101

Tabla 16: Constantes Reales de la cúpula 104

Tabla 17: Cúpula: Diseños de optimización con limites 0 - 180/0 - 180/0 - 180..... 106

Tabla 18: Diseños de optimización con limites 0-60/60-120/120-180 107



Índice de abreviaturas y símbolos

Abreviatura	Significado
[a°/b°]s	Laminado simétrico con los ángulos a y b
[A]	Matriz de rigidez en el plano
[B]	Matriz del acoplamiento de rigideces
[D]	Matriz de rigidez a flexión y torsión
[Q]	Matriz de rigidez reducida en tensión plana
ANSYS	Analysis System
APDL	<i>ANSYS Parametric Design Language</i>
F _i	Componentes de vector de parámetros de resistencia
F _{ii}	elementos de matriz de parámetros de resistencia
F ₁₂	Término de interacción
FOM	<i>First Order Method</i>
GUI	<i>Graphic User Interface</i>
M.E.F.	Métodos de elementos finitos
N _i	Carga en dirección i
n.d.	No definido
p.e.	Por ejemplo
PRFC	Polímeros reforzados con fibras de carbono
PRFV	Polímeros reforzados con fibras de vidrio
RPL	Rotura de la primera lamina
RUL	Rotura de la última lamina
S	Resistencia
SAM	<i>Subproblem Approximation Method</i>
TCL	Teoría clásica de laminados
σ	Tensión normal
τ	Tensión cortante



1. Introducción

1.1.ANSYS

ANSYS, forma abreviada de *ANalysis SYstem*, es un programa de Elementos Finitos, que sirve para la solución de problemas lineales y no lineales de mecánica estructural, mecánica de fluidos, acústica, termodinámicas y otras. Existen dos versiones, el ANSYS *classic* y el ANSYS *Workbench*.

El ANSYS *classic* dispone de un pre-procesador gráfico para definir el problema del cálculo y un post-procesador gráfico para mostrar los resultados. ANSYS *Workbench* debe facilitar al usuario la introducción de problemas de cálculo..

1.1.1. *Preprocessor*

El *preprocessor* o preprocesador sirve para producir datos necesarios de un problema que luego sirven como entrada para el siguiente menú *solution*. Los datos necesarios son:

- El tipo del análisis, estructural o térmico, estático o dinámico, lineal o no lineal
- El tipo del elemento
- Las constantes reales
- Las propiedades del material
- El modelo geométrico
- El modelo de mallado.
- Las cargas y las condiciones del contorno

El menú *Modeling* / modelar permite crear, operar, mover, etc. nodos, puntos, líneas, áreas volúmenes y además, también permite crear y manipular la geometría deseada.



Ilustración 1: Modeling

El menú *Meshing* / mallado permite definir una mala de elementos por encima de la geometría creada. Esto es necesario para calcular un problema. Número y forma de los elementos pueden ser influidos.



Ilustración 2: Meshing

Tesis de Máster

El menú *Loads* / cargas se utiliza para imponer las condiciones del contorno, es decir, restringir los grados de libertad y aplicar cargas a la geometría. Los grados de libertad se definen como la posibilidad de que un nodo sea capaz de trasladar o transmitir una carga. En los elementos placa considerados hay seis grados de libertad, 3 de translación y 3 de giro, y esto permite determinar el número de ecuaciones utilizado para resolver el problema matemático.

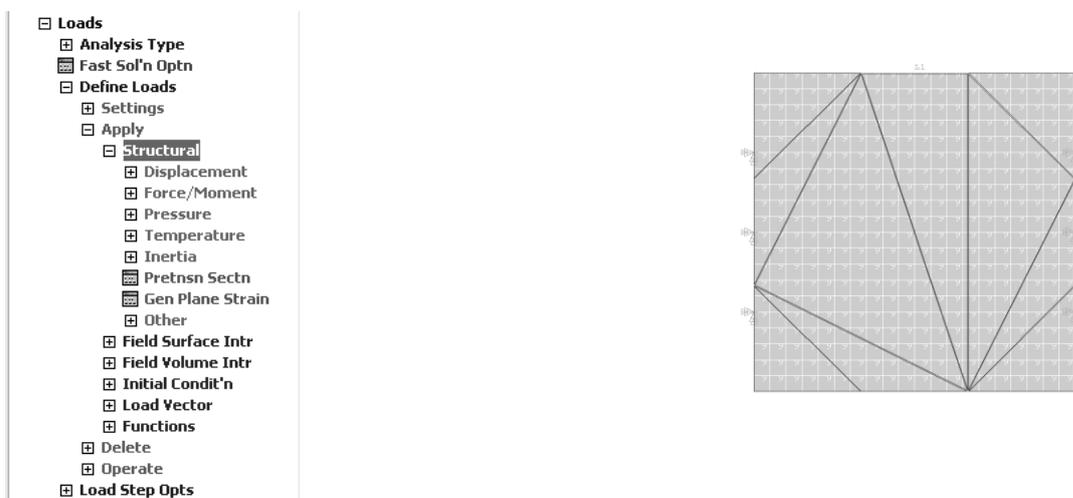


Ilustración 3: Loads

El menú de *Material Props* / Propiedades de materiales permite definir mediante el comando *Failure Criteria* / unos criterios del fallo, con las se puede comprobar si falla el componente.

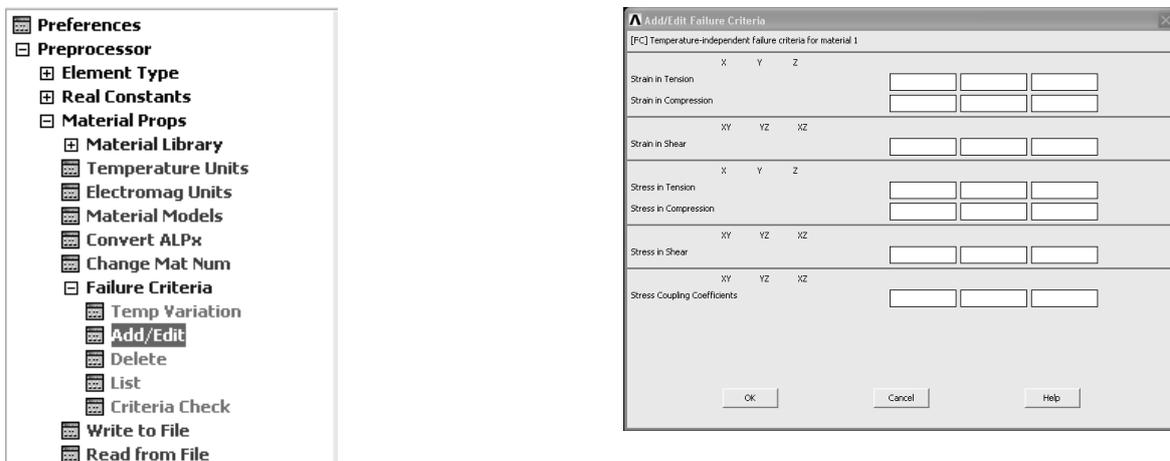


Ilustración 4: Material Props



1.1.2. *Solution*

Con el menú de *Solution* / solución se puede definir el tipo de análisis y después resolver el problema

La fase de solución es completamente automática. En base de los valores nodales y sus derivadas el análisis de elementos finitos genera matrices de elementos y guarda los resultados en ficheros. En la siguiente fase, el *postprocessor*, estos ficheros son utilizados para evaluar y analizar los resultados gráficamente o con ayuda de tablas.

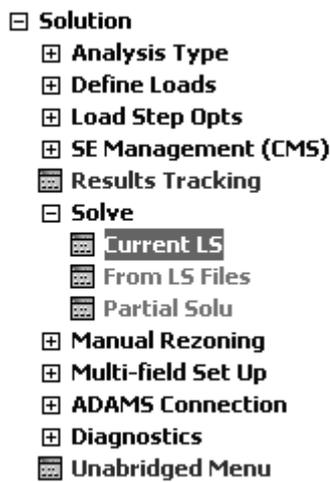


Ilustración 5: Solution

Tesis de Máster

1.1.3. *Postprocessor*

Básicamente se utiliza el *Postprocessor* / post-procesador para mostrar los resultados del cálculo gráficamente. Es posible visualizar diferentes tensiones, aquí las tensiones de *von Mises*, o también deformaciones de la geometría. Estos son interpretaciones de valores numéricos de nodos y sus derivados. Además de visualizaciones el post-procesador también permite el uso de tablas.

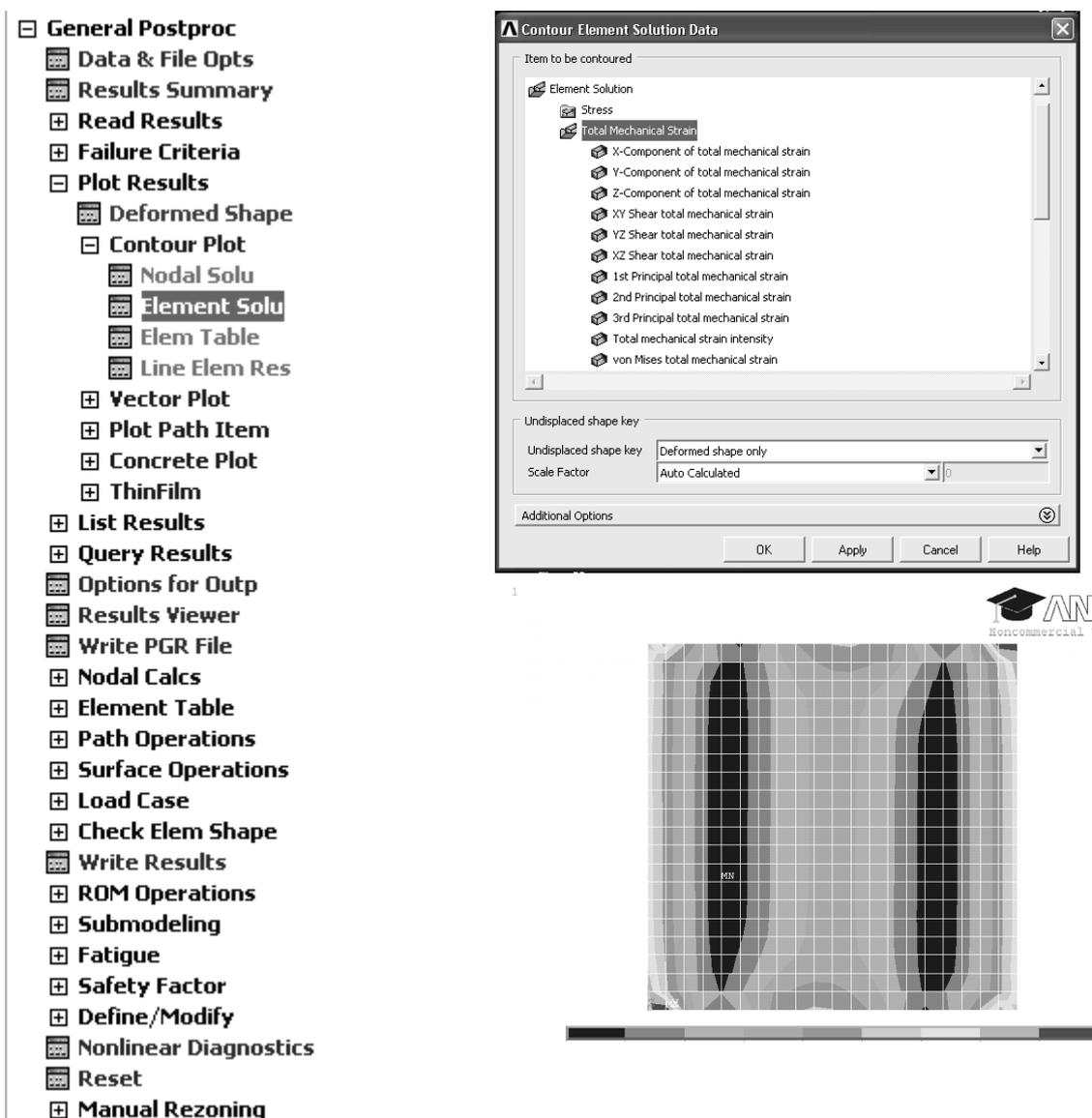


Ilustración 6: Postprocessor

1.2. Teoría clásica de laminados¹

La teoría clásica de laminados (TCL) es un modelo que permite la optimización de la geometría o de los materiales disponibles. Se puede estudiar laminados, que son la mejor opción cuando los esfuerzos principales están contenidos en el plano y estructuras emparedados ("Sandwich"), que son una buena opción para piezas con esfuerzos de flexión.

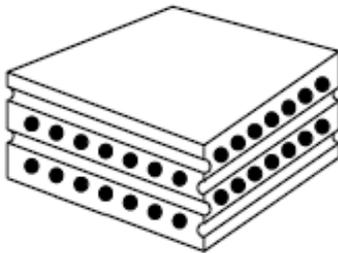


Ilustración 7: Laminado

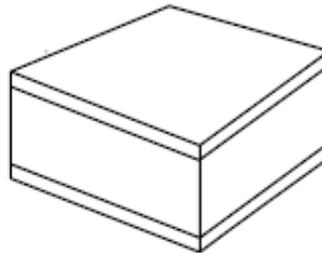


Ilustración 8: "Sandwich"

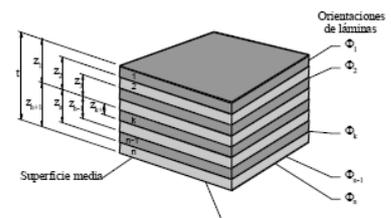


Ilustración 9: Laminados simétrico

La teoría clásica de laminados es el modelo más simple que se puede estudiar y aunque tiene grandes limitaciones, predice correctamente las tendencias de rigidez y resistencia.

Esta teoría relaciona esfuerzos por unidad de anchura con deformaciones en el plano ϵ y curvaturas κ . Además, representa la ecuación de comportamiento material del laminado, y en general no puede representar directamente la rigidez de una pieza. La Teoría Clásica de Laminados se puede utilizar directamente cuando se conocen los esfuerzos que actúan en problemas isostáticos. Gracias a eso, la teoría clásica de laminados sirve para pre-dimensionar piezas y seleccionar materiales. Con ayuda de sistemas basados en el Método de Elementos Finitos, como ANSYS se puede analizar componentes utilizando la TCL como modelo de material.

¹ Compara con [1], diapositivas de la asignatura "Diseño de materiales compuestos" del DIMM

1.2.1. Estudio de tipos de laminados

Un laminado se define por el número de sus laminas, espesores, materiales y orientaciones y por el orden de colocación de las láminas o secuencia de apilado. Existen diferentes tipos de laminados en función de las orientaciones: “Laminados equilibrados”, p. e. [30/-30], [0/45/-45]; “laminados simétricos” [0/40/-30/-30/40/0]; “laminados anti-simétricos”, cuales también son equilibrados [30/-30], [45/-45/0/90/0/45/-45]; “laminados unidireccionales” tienen todas las laminas del mismo material y orientación; “laminados angulares” con laminas arbitrarias [30/-60/30]; “laminados cruzados” con direcciones de 0 y 90 [0/0/90/0/90/90]; “laminados cuasi-ortótropos” cuales son similares a las ortótropas, son simétricos y equilibrados [0/30/-30/-30/30/0]; “laminados ortótropos” con tres planos de simetría ortogonales son cruzados y simétricos [90/0/90/0/90]; “laminados cuasi-isótropos” son simétricos y equilibrados con laminas igual de espesor y material [0/60/-60]s, [0/45/90/-45]s; “laminados isótropos” con todas las laminas de materiales isótropos.

Laminado	Equilibrado	Simétrico	Anti-simétrico	Cruzado	Cuasi-ortótropo	Ortótropo	Cuasi-isótropo	Isótropo (no simétrico)	Isótropo (simétrico)
[A]	$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{A_{11}-A_{22}}{2} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{A_{11}-A_{12}}{2} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{A_{11}-A_{12}}{2} \end{bmatrix}$
[B]	$\begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & 0 \\ B_{12} & B_{22} & 0 \\ 0 & 0 & B_{66} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & 0 \\ B_{12} & B_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{B_{11}-B_{12}}{2} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
[D]	$\begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{12} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{12} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{12} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{12} & D_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{D_{11}-D_{12}}{2} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{12} & D_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{D_{11}-D_{12}}{2} \end{bmatrix}$

[A]:= Rigidez en el plano; [B]:= Acoplamiento de rigideces; [D]:= Rigideces a flexión y torsión

Tabla 1: Tipos de laminados

1.2.2. Efectos de borde

La TCL tiene sus limitaciones. Una de sus hipótesis es que cada una de las láminas se comporta según un estado de tensión plana. Cuando consideramos el laminado cruzado $[0/90/90/0]$ de la Ilustración 10 sometido a la carga N_x , ésta tendría efectos diferentes en el borde de las distintas láminas. Las capas no se deformarían de la misma manera. Cuando las capas no estuviesen unidas se deformarían como en la Ilustración 11.

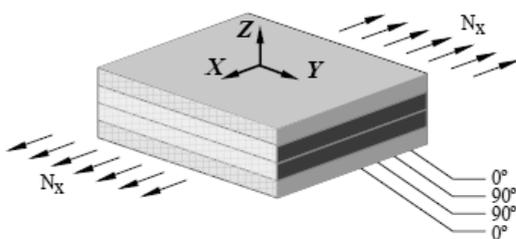


Ilustración 10: Laminado cruzado simétrico

Las tensiones en las capas según la Teoría Clásica de Laminados (Ilustración 12) están asociadas a deformaciones que no son las verdaderas.

La TCL obtiene en el borde un valor de N_y correcto pero las tensiones σ_y no son nulas, lo que es físicamente imposible. La razón de este error es que la TCL promedia las propiedades de los materiales en el espesor y se obtiene un laminado que está en equilibrio con las características medias del material.

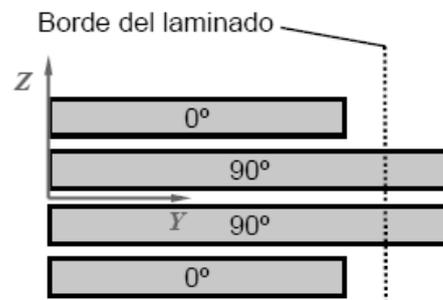


Ilustración 11: Deformaciones en el borde

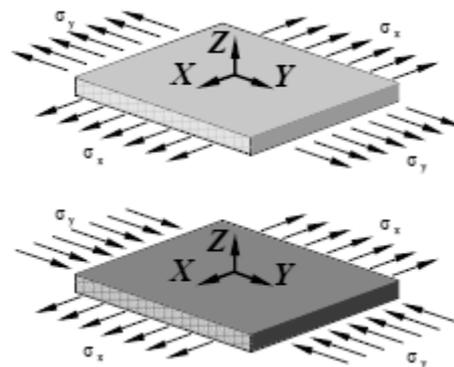


Ilustración 12: Tensiones en las capas

Tesis de Máster

1.2.3. Efectos de borde en laminado angular

Además del efecto explicado anteriormente, que es debido el coeficiente de Poisson en las láminas, existe otro debido a la diferencia de deformación angular.

En un laminado ($\pm 45^\circ$)s esta cada lamina sometida a una tensión σ_x y una tensión cortante τ_{xy} . La tensión cortante debe anularse en el contorno libre. Esto resulta en la aparición de una nueva tensión τ_{xz} cual será equilibrada por tensiones normales interlaminares.

La tensión interlaminar máxima varía con el ángulo de las capas en el laminado. El máximo aparece con unos 35° .

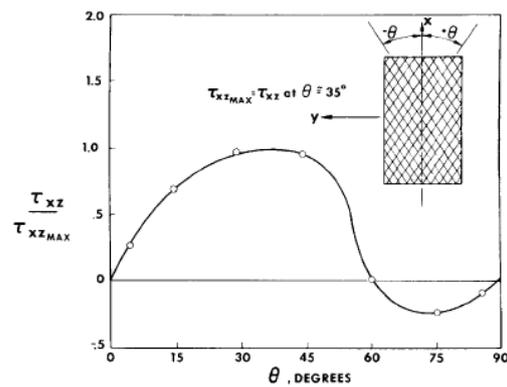


Ilustración 13: Tensiones de cortadura interlaminares

Las tensiones normales interlaminares cambian su signo debido al efecto de secuencia de apilado.

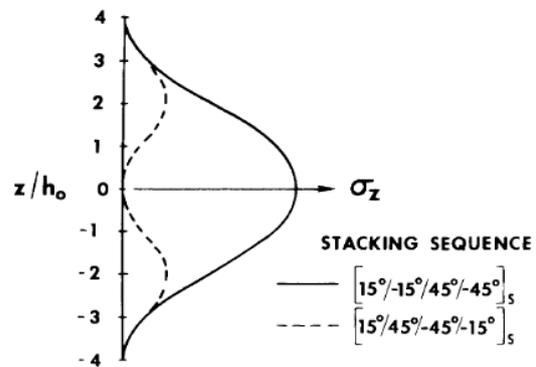


Ilustración 14: Secuencia de apilado.



1.2.4. Conclusiones

Con ayuda de la TCL se puede calcular los esfuerzos lejos del borde, es decir en las zonas lejos de los contornos libres, donde la distribución de tensiones es bidimensional. Por el contrario, la TCL falla cerca de los bordes, donde hay tensiones tridimensionales y las tensiones tangenciales y normales interlaminares producen la aparición de delaminaciones.

La secuencia de apilado controla el signo de las tensiones normales interlaminares.



1.3. Criterio de fallo multiaxial de Tsai-Wu²

Los criterios de fallo de láminas bajo tensiones multiaxiales se pueden dividir en dos grupos: Criterios de rotura no interactivos y los criterios de rotura interactivos.

Algunos de los criterios de fallo no interactivos son el de máxima tensión y el de máxima deformación. Ninguno de ellos tiene en cuenta la interacción de los modos de fallo y por eso sobreestiman la resistencia.

Entre los criterios de fallos interactivos cabe señalar, el criterio de Tsai-Hill, el criterio de Tsai-Wu en tensiones y el criterio de Tsai-Wu en deformaciones

Formula 1: Criterio de Von Mises

$$S_y = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2 + 3\tau_{12}^2}$$

A partir del criterio de la energía de distorsión de von Mises, válido para un material isótropo, (que se puede mostrar gráficamente en el postprocesador de ANSYS), Hill introduce su criterio de fluencia en materiales anisótropos y Tsai lo aplica a materiales anisótropos. La condición de no fallo en tensión plana es:

Formula 2: Criterio de Tsai-Hill (ejes orientados)

$$\frac{\sigma_1^2}{S_{1T}^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{S_{1T}^2} + \frac{\sigma_2^2}{S_{2T}^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S_{12,S}^2} < 1$$

² Compara con [2] diapositivas de la asignatura "Diseño de materiales compuestos" del DIMM

Tesis de Máster

Otro criterio, que es muy utilizado, es el criterio cuadrático o criterio de la función potencial de resistencia, más conocido como criterio de Tsai-Wu en tensiones. Este criterio permite una estimación mejor de la interacción entre los modos de fallo.

$$F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j = 1 \quad i, j = 1, 2, \dots, 6$$

Formula 3: Planteamiento tensorial en el espacio de tensiones según Tsai-Wu

F_i = Componentes de vector de parámetros de resistencia

F_{ij} = elementos de matriz de parámetros de resistencia

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix}^T \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ F_5 \\ F_6 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix}^T \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} & F_{14} & F_{15} & F_{16} \\ F_{12} & F_{22} & F_{23} & F_{24} & F_{25} & F_{26} \\ F_{13} & F_{23} & F_{33} & F_{34} & F_{35} & F_{36} \\ F_{14} & F_{24} & F_{34} & F_{44} & F_{45} & F_{46} \\ F_{15} & F_{25} & F_{35} & F_{45} & F_{55} & F_{56} \\ F_{16} & F_{26} & F_{36} & F_{46} & F_{56} & F_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = 1$$

Formula 4: Forma matricial del planteamiento del criterio de Tsai-Wu

En una lamina ortótropa tensión plana el planteamiento es el siguiente:

$$F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + F_6 \sigma_6 + F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + F_{66} \sigma_6^2 + F_{12} \sigma_1 \sigma_2 = 1$$

Formula 5: Criterio de Tsai-Wu en una lamina ortótropa en tensión plana:

Cuando distinguimos los tres modos de fallo, se obtiene los siguientes parámetros de resistencia.

$$\left. \begin{aligned} F_1 S_{1T} + F_{11} S_{1T}^2 = 1 \\ F_1 S_{1C} + F_{11} S_{1C}^2 = 1 \end{aligned} \right\} \Rightarrow F_1 = \frac{1}{S_{1T}} + \frac{1}{S_{1C}}; F_{11} = -\frac{1}{S_{1T} S_{1C}}$$

Formula 6: Modo I: Tracción y compresión longitudinal



Tesis de Máster

$$F_2 = \frac{1}{S_{2T}} + \frac{1}{S_{2C}}; F_{22} = -\frac{1}{S_{2T}S_{2C}}$$

Formula 7: Modo II: Tracción y compresión transversal:

$$\left. \begin{aligned} F_6 S_{12,S} + F_{66} S_{12,S}^2 &= 1 \\ -F_6 S_{12,S} + F_{66} S_{12,S}^2 &= 1 \end{aligned} \right\} \Rightarrow F_6 = 0; F_{66} = -\frac{1}{S_{12,S}^2}$$

Formula 8: Modo III: Cortadura

En el estado de tensión hidrostática en el plano las tensiones σ_1 y σ_2 son iguales, es decir $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$.

El criterio de Tsai-Wu en esta situación será:

$$(F_1 + F_2)\sigma + (F_{11} + F_{22} + 2F_{12})\sigma^2 = 1$$

Formula 9: Criterio de Tsai-Wu con tensión hidrostática

El F_{12} es el llamado "Termino de interacción". Resulta como:

$$F_{12} = \frac{1}{2\sigma^2} \left[1 - \left(\frac{1}{S_{1T}} + \frac{1}{S_{1C}} + \frac{1}{S_{2T}} + \frac{1}{S_{2C}} \right) \sigma + \left(\frac{1}{S_{1T}S_{1C}} + \frac{1}{S_{2T}S_{2C}} \right) \sigma^2 \right]$$

Formula 10: Termino de interacción

Aunque es necesario conocer su valor para utilizar el criterio de Tsai-Wu en programas de M.E.F. como el ANSYS, el término de interacción, cuando se estima con Formula 11, tiene poco influencia a la rotura como mostrado en Ilustración 15.

$$F_{12} = F_{12}^* \sqrt{F_{11}F_{22}} \text{ siendo } -0.5 \leq F_{12}^* \leq 0$$

Formula 11: Término de interacción normalizado

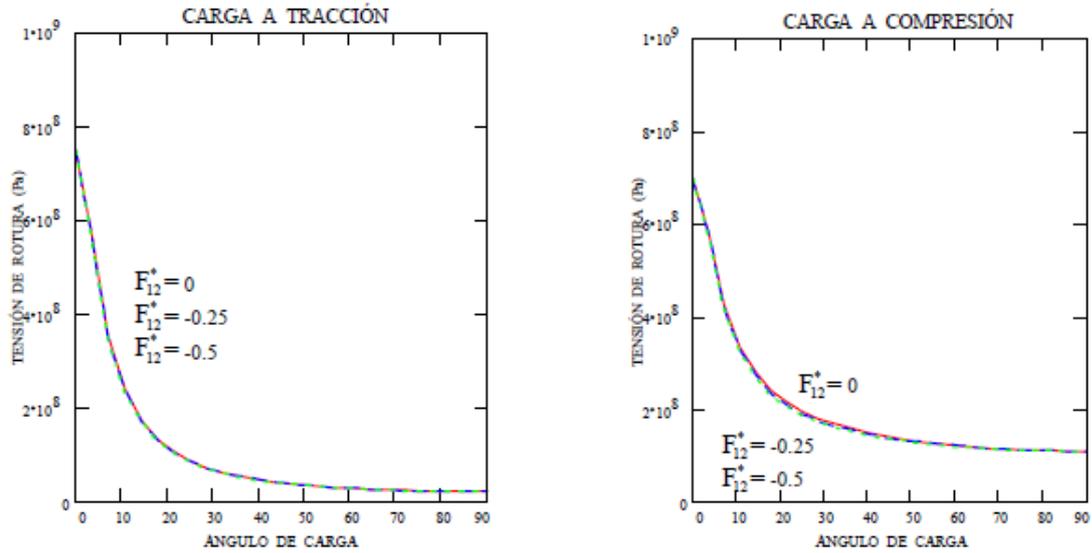


Ilustración 15: Efecto de término de interacción

Como las interacciones son muy generales con una definición tensorial sin influencia por giros, el criterio de Tsai-Wu se utiliza extensamente y también es aplicable a estados de tensiones tridimensionales, Existe una superficie de fallo única, tanto para tracción como para compresión.



1.4. Criterios de degradación³

En elemento falla, cuando no está capaz de cumplir su función designada. Se distinguen los siguientes tipos de fallo:

- Fallo por agrietamiento
- Fallo por deflexión
- Fallo por degradación del material
- Fallo por fractura o separación en dos partes
- Fallo por inestabilidad

En este trabajo se ha considerado un fallo de material con cierta degradación. Antes de que se rompa la última lámina se estudian los fallos de previos de otras láminas. Este problema es muy complicado porque una lámina, aunque haya fallado, puede seguir soportando otro tipo de cargas. Un enfoque simple es la degradación por rigidez. Para tener en cuenta que un material ha fallado se pueden utilizar diferentes modelos de degradación del material:

1. Reducir la rigidez de la lamina fallada a 0 $\Rightarrow [Q]_k = 0$
2.
 - a. Si fallan las fibras $\Rightarrow Q_{11,k} = Q_{12,k} = 0$ (suele llevar a la rotura de la ultima lamina)
 - b. Si falla la matriz $\Rightarrow Q_{22,k} = Q_{12,k} = Q_{66,k} = 0$
3.
 - a. Si fallan las fibras $\Rightarrow Q_{11,k} = Q_{12,k} = 0$ (suele llevar a la rotura de la ultima lamina)
 - b. Si falla la matriz (PRFC), se reduce $Q_{22,k}$, $Q_{12,k}$, $Q_{66,k}$ a 50 %
 - c. Si falla la matriz (PRFV), se reduce $Q_{22,k}$, $Q_{12,k}$, $Q_{66,k}$ a 10 %

³ Compara con [3] diapositivas de la asignatura "Diseño de materiales compuestos" del DIMM

Tesis de Máster

En este trabajo se utiliza la primera opción. Si una lámina o un elemento se rompe, su matriz de rigidez se hace nula, es decir, ya no soporta ninguna carga y las tensiones se distribuyen entre las otras capas, lo que puede llevar a la rotura inmediata de otras láminas o elementos vecinos.

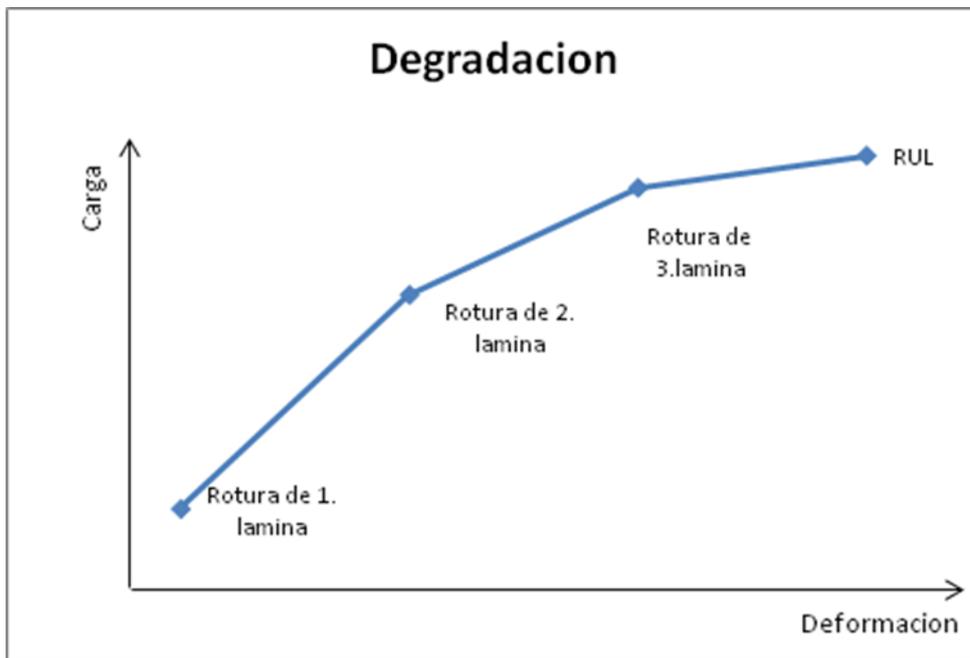


Ilustración 16: Degradación hasta la rotura de la última lámina (RUL)



1.5. Criterio de fallo de laminados por rotura de la última lamina⁴

Como se ve en la Ilustración 16 las láminas se rompen bajo diferentes cargas tras diferentes deformaciones. Se pueden distinguir dos tipos de criterio de fallo de laminados:

1. Rotura de la primera lamina (RPL)
2. Rotura de la última lamina (RUL)

El primer caso se considera que la rotura de la primera lamina produce el fallo del laminado. Usualmente, no produce un fallo catastrófico, porque las tensiones se pueden distribuir entre las otras laminas. Si se sigue incrementando la carga aplicada, más láminas se rompen hasta el fallo catastrófico del laminado cuando falla la última lamina.

Si el fallo de la lámina se produce con un nivel de carga alto, puede fallar la fibra y esto produce normalmente el fallo del laminado completo. En este caso, los dos criterios de fallo de laminado comentados se cumplen al mismo tiempo, es decir $RPL = RUL$.

Si no falla la fibra sino la matriz, el laminado podrá resistir más carga. En el caso del fallo de la matriz distintos laminados se comportan de diferentes maneras. El laminado angular (1.2.1) no puede soportar más carga en la dirección del plano de la simetría y rompe. Laminados que pueden soportar cargas más elevadas son el laminado cruzado o con más de dos direcciones.

⁴ Compara con [3] diapositivas de la asignatura “Diseño de materiales compuestos” del DIMM

Tesis de Máster

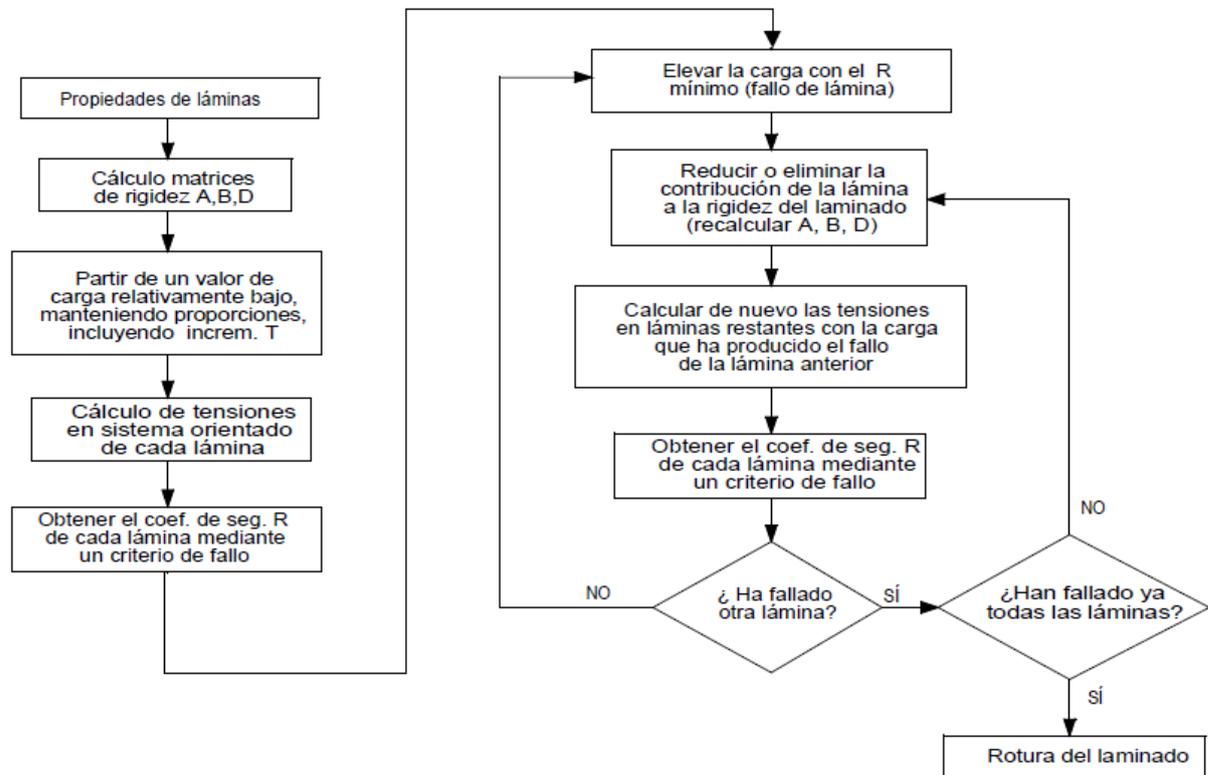


Ilustración 17: Procedimiento de análisis resistente de un laminado⁵

⁵ Diapositivas de la asignatura “Diseño de materiales compuestos” del DIMM Tema 8, Pagina 9



1.6.Optimización

La optimización es una parte de la matemática aplicada que trata de encontrar los parámetros óptimos de un sistema complejo. Para exponer el problema general de optimización se utilizará la terminología siguiente:

- El espacio de diseño X
- El espacio objetivo Y
- Función objetivo
- Funciones de restricción

La imagen del espacio de de diseño X es el espacio objetivo Y . Se llega de X a Y mediante la función objetivo $f(X) \rightarrow Y$, teniendo en cuenta las funciones de restricción $g_i(X)$ con $i = 1, \dots, r$. La optimización siempre es un problema de minimización para encontrar el valor óptimo $x^* \in X$.

Si el problema a resolver es de maximización puede transformarse en uno de minimización si se tiene en cuenta que:

1. $\text{Max}(x) \Rightarrow \text{Min}(-x)$
2. $\text{Max}(x) \Rightarrow \text{Min}(1/x)$
3. $\text{Max}(x) \Rightarrow \text{Min}(C - x)$ con C mucho más alto que x

En la siguiente Tabla 2 se puede ver los efectos de la variación de x para los diferentes planteamientos. X será un coeficiente de seguridad. Como estos coeficientes no suelen ser muy elevados, se toma un valor de 100 para la constante del planteamiento tres.

Todos los planteamiento permiten obtener el máximo de la función objetivo en el punto x^* .

Tesis de Máster

x	Planteamiento 1		Planteamiento 2		Planteamiento 3	
	Min (-x)	Tendencia	Min (1/x)	Tendencia	Min(C - x)	Tendencia
0	0	↓	n.d.	↑	100	↑
1/4	-1/4		4		99,75	
1/3	-1/3		3		99,66	
1/2	1/2		2		99,5	
1	-1		1		99	
2	-2		1/2		98	
3	-3		1/3		97	
4	-4		1/4		96	

Tabla 2: Planteamiento de optimización

Cada planteamiento tiene sus inconvenientes:

1. El primer planteamiento puede tener asociados problemas matemáticos ya que no siempre pueden evaluarse ciertas operaciones. Por ejemplo, con valores negativos (p.e. $\sqrt{-x}$; $\log -x$). $\sqrt{(-x)}$; $\log \lfloor -x \rfloor$)
2. El segundo planteamiento es problemático, porque puede resultar en una división por 0 y la inversión puede ser menos precisa (p.e. $x = 9 \Rightarrow 0,1111111111$) .
3. El tercer planteamiento también es problemático, porque si no se conocen bien los espacios X y Y o el rango de x la elección del C puede ser complicado. (p.e. $C < x \Rightarrow$ problemas del planteamiento 1)

El tema 0 trata específicamente de la optimización en ANSYS.



2. Desarrollo de un modulo de evaluación de rotura de ultima lamina con ANSYS

2.1.APDL⁶

2.1.1. Línea de comandos / menú

En comparación al menú, la utilización de la línea de comandos puede ser algo más complicada, pero tiene muchas ventajas. Mediante el menú, el usuario puede utilizar ANSYS para resolver fácilmente varios problemas. Sin embargo la línea de comandos permite utilizar comandos que no existen en el menú y con ayuda de un “*Batchfile*” permite automatizar procedimientos del preprocesador y del postprocesador. Un batchfile puede contener desde una línea hasta múltiples macros enteras.

El usuario del ANSYS *classic* también puede utilizar el APDL, el ANSYS *Parametric Design Language*, un lenguaje propio de ANSYS, que se puede utilizar para introducir comandos y automatizar procedimientos. Para crear un batchfile se puede utilizar los comandos usuales de ANSYS, los comandos de APDL disponen de muchas posibilidades de repetir comandos, macros, bucles, operaciones con escalares, vectores y matrices.

⁶ Compara con [4] Release 11.0 Documentation for ANSYS



Tesis de Máster

2.1.2. Diseño paramétrico

Los variables de ADL son Parámetros. En ANSYS no hace falta ninguna declaración del tipo de parámetro. Todos los valores numéricos son guardados como reales de doble precisión. ANSYS distingue escalares y vectores (arrays) como dos tipos de variables. Valores numéricos, caracteres y tablas pueden ser guardados como arrays. Parámetros pueden ser utilizados como argumento de cualquier comando de ANSYS.

Por ejemplo: Se quiere definir el primer Nodo, Nodo 1, en las coordenadas X = 2 y Y = 3.

```
AAAA = 2
```

```
N, 1, AAAA, 3
```

Esta línea será interpretada como N,1,2,3. También es posible volver a utilizar el mismo parámetro con otros valores:

```
AAAA = 4
```

Esto no afectará al nodo 1. Sin embargo en siguientes usos el valor de AAAA ya no es 2, sino 4.

APDL también permite operaciones como +, -, *, /, >, < y exponenciación **.

Los parámetros tienen que empezar con una letra y sólo deben contener letras, números y el guion bajo, por ejemplo QWE, RT1, Y_U. Nombres inválidos serán por ejemplo 1I2O (empieza con un número) o P&A (carácter inválido "&").

Todos los parámetros y también sus valores definidos pueden ser listados en *STATUS. Si no son necesarios ya, es posible borrarlos si se les asigna un valor blanco:

```
"AAAA = " "
```

Otra posibilidad es ocultar los parámetros en el *STATUS terminándolo con un guion bajo:

```
AAAA_
```

Tesis de Máster

2.1.3. *Array parameters*

En ANSYS un parámetro no tiene porque ser de un sólo valor. También se puede utilizar parámetros para guardar un array con múltiples valores. Estos pueden ser de una sola columna (1-D), de filas y columnas (2-D), de filas, columnas y planos (3-D), de filas, columnas, planos y libros (4-D) o de filas, columnas, planos, libros y estantes (5-D).

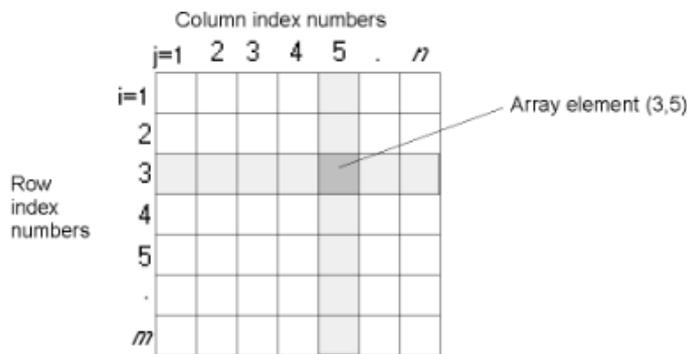


Ilustración 18: Representación gráfica de un array 2-D

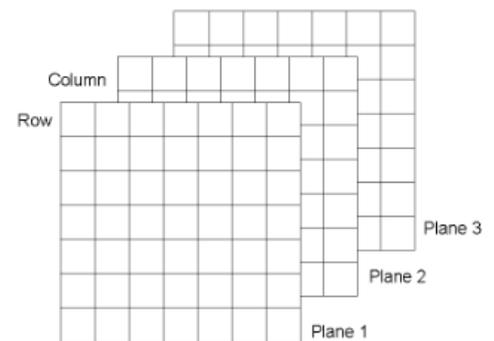


Ilustración 19: Representación gráfica de un array 3-D

Las ilustraciones de la Ilustración 18 hasta la Ilustración 20 explican gráficamente la organización de un array de múltiples dimensiones.

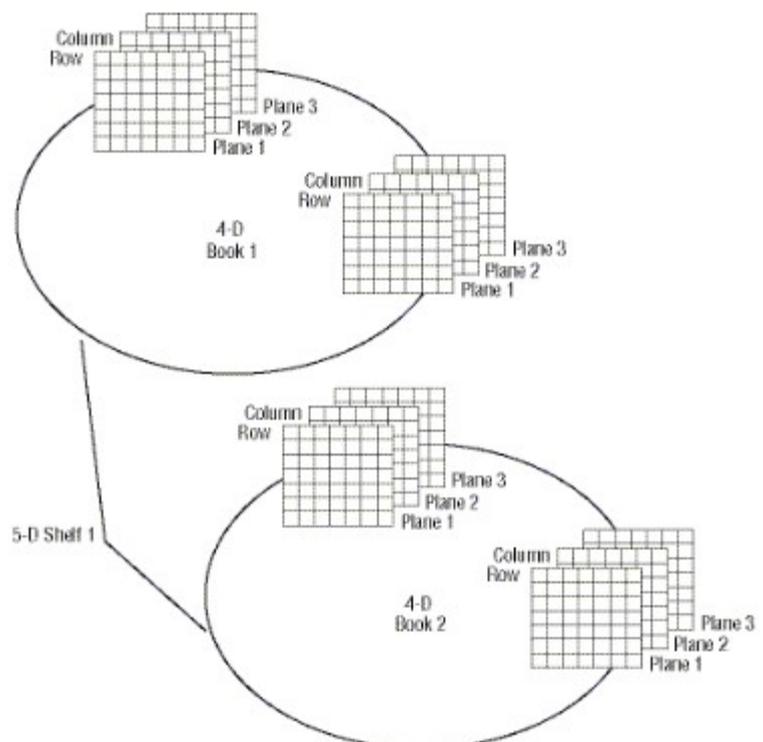


Ilustración 20: Representación gráfica de un array 5-D



Tesis de Máster

2.1.4. *GET

Para sacar un valor de la base de datos de ANSYS y asignárselo a un ítem (nodo, elemento, área, etc.) y guardarla como parámetro de usuario, se puede utilizar el comando *GET.

El *GET tiene el formato siguiente:

*GET, Par, Entity, ENTNUM, Item1, IT1NUM, Item2, IT2NUM

El nombre del parámetro nuevo es Par. La palabra clave para el ítem es *Entity*. Entities o entidades validos son por ejemplo NODE, ELEM, KP, LINE, AREA, VOLU, entre otros. ENTNUM es el número de la entidad, cuando el usuario pone un cero, todas las entidades serán elegidas. El nombre de un ítem de una entidad particular es el Item1.

Si, por ejemplo, la entidad es ELEM, Item1 puede ser NUM (para el número máximo o el mínimo) o COUNT (para contar el número de elementos).

2.1.5. APDL como lenguaje de macro

Secuencias de comandos de ANSYS frecuentemente utilizadas pueden ser guardadas en un macro. Esto permite al usuario crear un comando o múltiples comandos de ANSYS personalizados. De este modo es posible ejecutar múltiples comandos en una sola línea. Dentro de una macro el usuario también puede llamar a otras macros. De este modo es posible incluir hasta veinte niveles de macros.

Una macro puede ser creada en ANSYS o también en un fichero mediante algún editor de texto. Las macros simples se pueden crear en ANSYS directamente, pero las macros más largas es recomendable hacerlo con un editor de texto. Algunas líneas o comandos pueden ser copiados directamente del fichero log de ANSYS. El nombre del marco tiene que cumplir las mismas reglas que el nombre de un parámetro.



Tesis de Máster

2.1.5.1. Bucles en la macro

Macro en APDL también permiten ejecutar bucles de distintos tipos. Bucles muy utilizados son el *DO y el *IF

El comando *IF permite al usuario evaluar condiciones comparando dos valores numéricos, que también pueden ser parámetros. El formato del comando *IF es el siguiente:

*IF, VAL1, Oper, Val2, Base

El primer valor numérico o parámetro de la comparación es el VAL1, el operador de la comparación es el Oper, el segundo valor o parámetro es el VAL2 y la acción que ocurre, si la comparación es verdad, es la Base.

Los operadores, que se puede utilizar son EQ para *equal* o igual, NE para *Not equal* o no igual, LT para *Less than* o menor que, GT para *greater than* o mayor que, LE para *less or equal* o menor o igual, GE para *greater or equal* o mayor o igual, ABLT para valores absolutos antes del LT, ABGT para valores absolutos antes de GT.

Para ejecutar un bucle *IF hace falta terminar el bucle con *ENDIF, pero también es posible utilizar el *ELSEIF o el *ELSE para crear otras opciones por el caso, que el IF no es verdad.

El otro bucle común es el *DO, que permite ejecutar un comando varias veces, por ejemplo:

*DO, AAAA, 1, 5

.....

*ENDDO

Este bucle ejecuta los comandos dentro del *DO y el *ENDDO y mientras tanto cambia los valores de AAAA de 1 a 5.



Tesis de Máster

Comando de APDL	Acción que ejecuta	Consejos de uso	Ejemplo
*DO	Define el comienzo de un bucle *DO. Los comandos siguiendo del comando *DO hasta el comando *ENDDO se ejecuta repitiéndose hasta que el control del bucle se satisfaga.	<ul style="list-style-type: none">• También se puede controlar el bucle mediante el comando *IF.• ANSYS permite hasta 20 niveles de bucles *DO.• *DO, *ENDDO, *CYCLE y *EXIT comandos en un bucle *DO deben leer todos del mismo fichero.• No se puede incluir selección mediante picado de ratón en un bucle *DO.• Se debe tener cuidado si se incluye /CLEAR en un bucle *DO. El /CLEAR no borra el bucle *DO, pero si borra todos los parámetros, incluso los parámetros de control del mismo bucle *DO. Este problema se puede evitar utilizando los comandos *PARSEV para guardar y *PARRES para	*DO,IMAT,1,100,1



Tesis de Máster

		restaurar los parámetros.	
*ENDDO	Termina el bucle *DO y empieza la acción del bucle.	Para cada nivel de *DO hace falta un *ENDDO.	*ENDDO
*CYCLE	Cuando ejecutando un bucle *DO, ANSYS evita todos los comandos dentro del *CYCLE y el *ENDDO y inicia el próximo bucle.	Se puede utilizar el comando *CYCLE bajo condiciones con ayuda del bucle *IF.	No aplicado
*EXIT	Sale del bucle *DO.	El comando siguiendo del comando *ENDDO se ejecuta. Los comandos *EXIT y *DO para un bucle tienen que ser en el mismo fichero. Como el comando *CYCLE se puede ejecutar el comando *EXIT bajo condiciones con ayuda del comando *IF.	No aplicado



Tesis de Máster

*IF	Causa ejecución de comandos bajo ciertas condiciones.	<ul style="list-style-type: none">• Se puede tener hasta 10 niveles de bloques del bucle *IF.• Se puede utilizar /CLEAR dentro de una construcción if-then-else. El comando /CLEAR no borra el bucle *IF ni el número de niveles retenidos del *IF.• El comando *ENDIF hace falta para terminar el bucle *IF.	*IF,A,GT,10,THEN B = 0
*ELSEIF	Termina la construcción de If-Then-Else.	Los comandos *IF y *ENDIF deben aparecer en el mismo fichero.	*ELSEIF,A,LT,5,THEN B = 1
*ELSE	Crea un último bloque separado en una construcción de If-Then-Else.	Los comandos *ELSE y *ENDIF deben aparecer en el mismo fichero.	*ELSE B = 2
*ENDIF	Crea otra condición separada en una construcción de If-Then-Else.	Si Oper = EQ o NE, VAL1 y VAL2 también pueden ser parámetros. Los comandos *IF y *ELSEIF deben aparecer en el mismo fichero.	*ENDIF

Tabla 3: Sobrevista sobre comandos de bucles



2.2. Procedimiento para ejecutar las macros

El usuario define el problema y ejecuta la macro LAM_RUL. La macro LAM_RUL ejecuta primero una macro llamada DEF_MAT, que define las propiedades de los materiales degradados. Después ejecuta la macro NRCO, que lee el número de constantes reales.

El próximo paso es la ejecución de múltiples iteraciones de cálculos hasta que se llega al máximo número de iteraciones o hasta que no se rompen más elementos. Dentro de estas iteraciones se realiza la fase de solución y de postprocesador. El postprocesador comprueba con el criterio de Tsai-Wu si alguna capa de los elementos falla. Después compara los fallos localizados con los de la iteración anterior y guarda codificado el fallo de cada elemento y el número de elementos fallados. Si hay fallos en los elementos, cambia el tipo de material en estos elementos a materiales degradados con ayuda de la macro RNEW. La macro RNEW crea nuevos constantes reales si esa combinación de capas falladas no existe aún. Por último la macro LAM_RUL vuelve a resolver el problema y realiza una nueva iteración para comprobar, después de la redistribución de tensiones entre los elementos adyacentes a los fallados, si ha fallado algún otro elemento.

La degradación del laminado está calculada para cada uno de los elementos y el estado del elemento está guardado en un código. La tabla siguiente, junto con la ilustración muestra el principio de la codificación de cada elemento en función del criterio de degradación utilizados (en este trabajo se ha considerado el caso de un modelo de degradación de dos estados). Indicar que al código indicado en la ilustración realmente se añade un número igual al de tipos de laminados inicial del problema (estos laminados también hay que definirlos y se utiliza un tipo de constante real para cada uno).

	Nº de estados = 2	código		Nº de estados = 4	código
Degradación	no fallo	0		no fallo	0
	fallo	1		fallo en fibra	1
				fallo en matriz	2
				fallo en fibra y matriz	3

Tabla 4: Distinción de Degradaciones

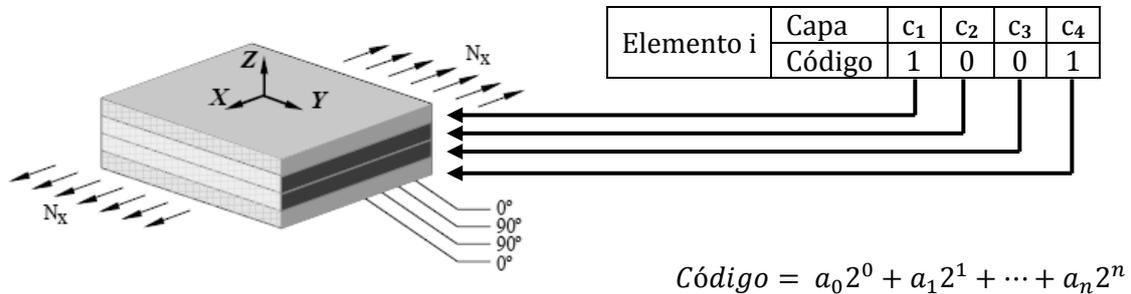


Ilustración 21: Codificación que identifica la combinación de capas falladas en el laminado con modelo de degradación de dos estados

La ilustración 22 muestra el procedimiento usado para evaluar el criterio de fallo de última lámina. Una vez fijado un nivel de carga, se Comprueba si se ha superado el nivel de carga en alguna capa. En concreto en la figura se ve que se han roto dos láminas. Entonces utilizando el criterio de degradación seleccionado se define un nuevo laminado con los materiales degradados en las capas que han fallado. Con ese nuevo material, que es menos rígido, se calcula otra vez el problema (línea de trazos roja) y se comprueba si después de pasar la carga que soportaban las capas que han roto a los elementos vecinos, los elementos son capaces de soportar las nuevas tensiones. Si no es así y falla, tal como sucede en la figura, se vuelve a degradar y se repite el proceso con el material degradado hasta que no se detecta ya ningún fallo.

Tesis de Máster

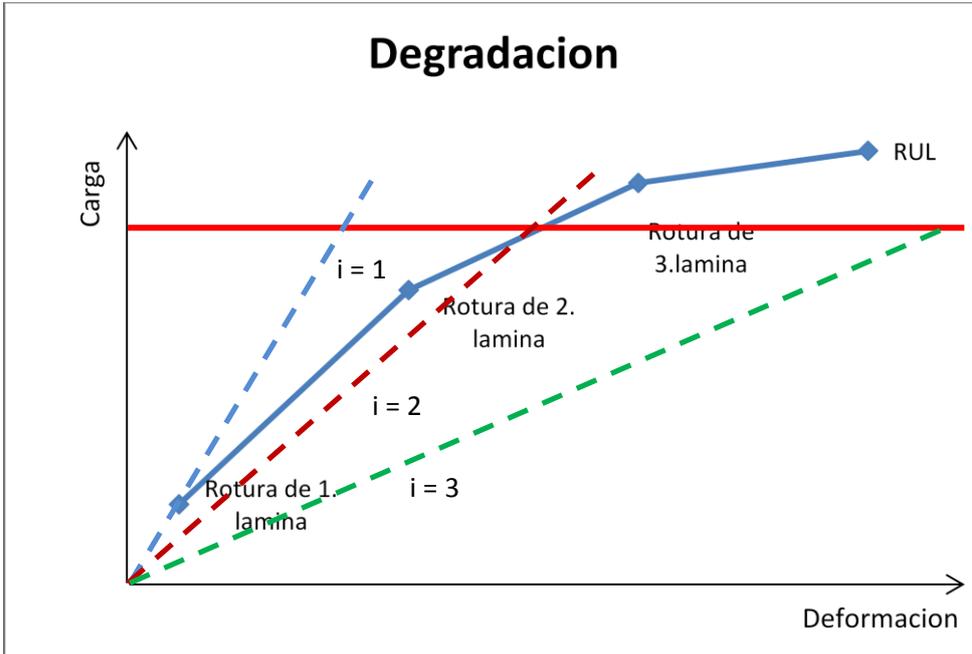


Ilustración 22: Iteraciones de degradación en elemento i

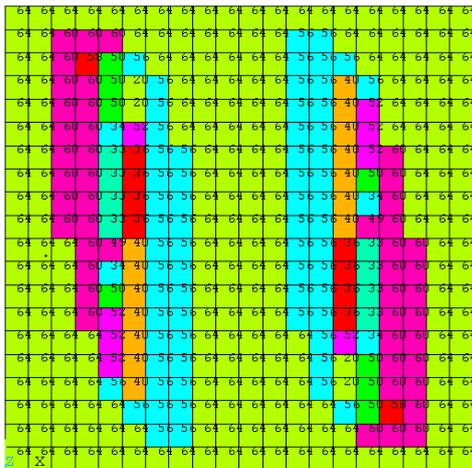


Ilustración 23: Resultado de iteraciones



Tesis de Máster

La macro LAM_RUL_OPT realiza optimizaciones del modelo cambiando las orientaciones de las capas a orientaciones que maximizan el coeficiente mínimo de los elementos. La Ilustración 24 muestra el procedimiento y los distintos niveles de las macros.

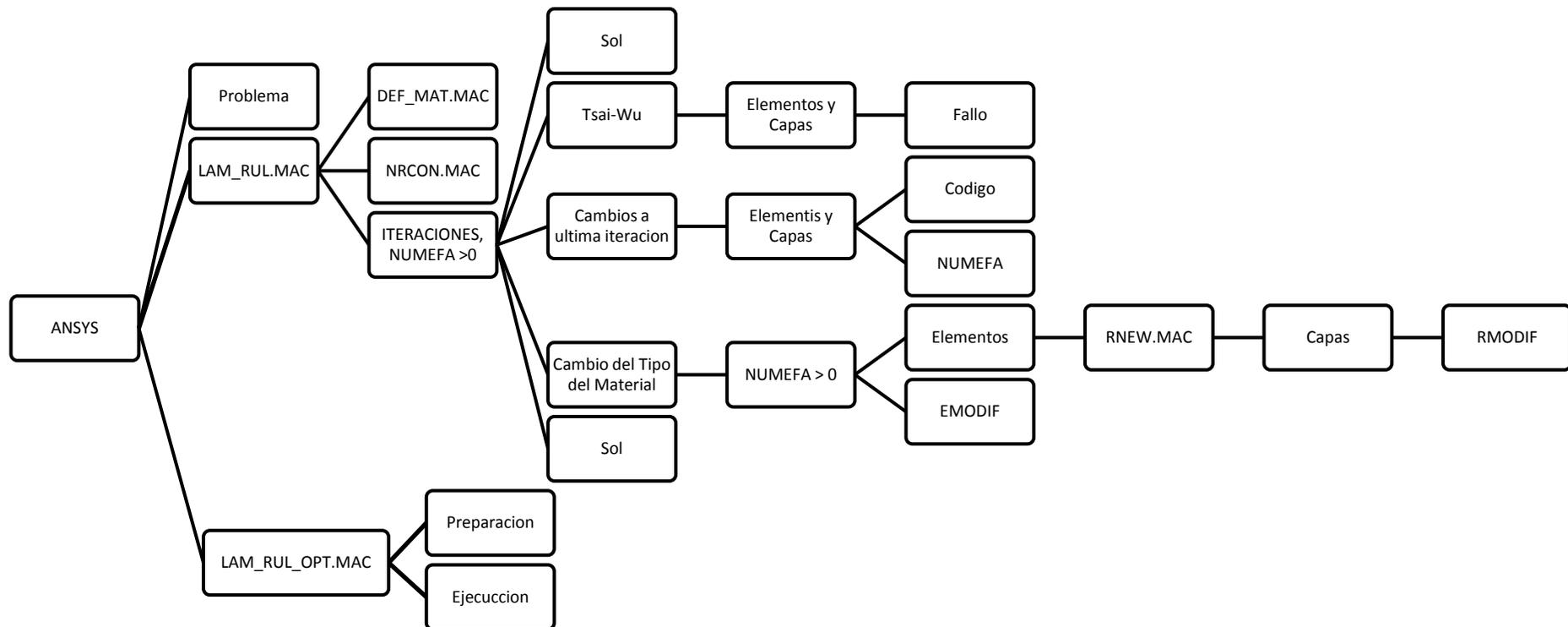


Ilustración 24: Organigrama



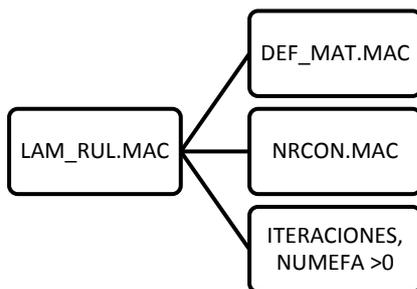
2.3.El problema en ANSYS

Problema

Se puede definir el problema del cálculo dentro de ANSYS con ayuda del GUI o simplemente con un batchfile. La ejecución de las macros es independiente del problema estudiado.

La macro LAM_RUL asume que se utiliza en el cálculo el elemento tipo SHELL99. Luego se crea la constante real con el número de capas, el material, los espesores y las orientaciones de las láminas. La macro está preparada para hasta tres espesores, T1, T2 y T3 y tres orientaciones TETA1 TETA2 y TETA3. Se puede crear un laminado con más que tres capas, pero el número de espesores y orientaciones diferentes está limitado a tres. Después de crear las constantes reales se define las propiedades del material con los criterios de fallo y la geometría. Se aplica las condiciones de contorno y las cargas, la resolución del problema no es necesaria.

Por último se ejecuta la macro LAM_RUL que automáticamente crea la base de datos para la optimización. Se realiza la optimización llamando a la macro LAM_RUL_OPT.





2.4.La macro LAM_RUL.MAC

Antes de ejecutar la macro se debe definir una base de datos de materiales y de geometrías. Después de crear la geometría y las condiciones del contorno se ejecuta la macro. La macro es independiente de estos datos y por eso muy versátil y puede utilizarse para diferentes cálculos.

Para asegurar, que no quedan ficheros creados de una ejecución anterior de la macro, se borran los ficheros siguientes para evitar confusiones.

El siguiente paso es la resolución del problema definido. Antes de poder hacerlo, la macro entra en el preprocesador y ejecuta la macro DEF_MAT

Borra el fichero EDMIN.DAT

Borra el fichero NUMEFA.DAT

Borra el fichero RLIST.DAT

Termina

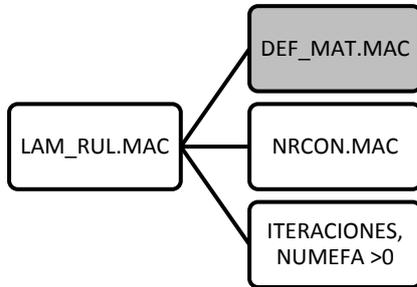
Entra al preprocesador

Numera los elementos con el número de constante real

Ejecuta la macro DEF_MAT



Tesis de Máster



La macro DEF_MAT crea las propiedades de rigidez y resistencia de los materiales existentes en el modelo cuando ha fallado la matriz y cuando ha fallado la fibra. Se ha utilizado el criterio de degradación utilizado en la asignatura de “Diseño de Materiales Compuestos” del Máster IMM.

Luego, en la macro RNEW se aplica el criterio de degradación al problema.

Dimensiona una tabla de materiales MATTABLA como un parámetro del tipo array

Los dos variables siguientes, los factores de reducción, sirven para crear los materiales degradados.

Para IMAT = 1 hasta 100

Lee un parámetro auxiliar de IMAT

Si el parámetro auxiliar existe

Lee las propiedades elásticas del material inicial IMAT

Crea el material degradado JMAT

Guarda las propiedades degradadas en JMAT

Copia la tabla de datos a IMAT + 100



Crea la tabla nueva MATTABLA

Fin del bucle Si

Fin del bucle Para

Borra el parámetro auxiliar EE

En el primer caso, se crea con ayuda del parámetro de degradación FACT_RED1 las propiedades elásticas del material JMAT con fallo en la matriz.

En el segundo caso, se crea con ayuda del parámetro de degradación FACT_RED2 las propiedades elásticas del material JMAT con fallo en la fibra.

En el último caso se utiliza los dos parámetros de degradación FACT_RED1 y FACT_RED2 para crear las propiedades elásticas del material JMAT con fallo en la fibra y matriz o con fallo a cortadura.

Con los comandos TBCOPY y MATTABLA se copian los valores y se crean nuevas tablas de resistencias de los materiales que han fallado. Aunque la macro sólo aplica la primer opción de degradación, el programa está preparado para poder introducir fácilmente otros tipos de degradación.



Tesis de Máster

Después de crear los materiales necesarios, se ha de definir el laminado a partir de los datos de las capas. Esto lo debería haber hecho el usuario antes de ejecutar la macro, pero aquí volvemos a definirlos para asegurar que ANSYS guarda todos los datos y criterios importantes para los pasos siguientes.

Activa el KEYOPT 5 del elemento uno para el criterio de fallo en tensiones.

Activa el KEYOPT 6 para que ANSYS guarde todos los resultados para todos los criterios de fallos.

Activa el KEYOPT 8 para que ANSYS guarde los resultados para todas las capas.

Antes de seguir aseguramos que todos los elementos están seleccionados. Se inicializa el parámetro EREAL en que luego guardamos valores importantes como la constante real, el código de fallo, el número de capas y otros. Para dimensionar bien el EREAL se evalúa el número total de elementos y se almacena en NTELEM, el número total de elementos.

Selecciona todos los elementos

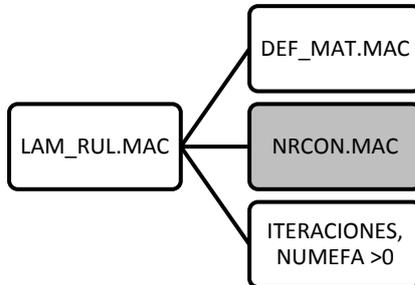
Lee el número total de los elementos

Inicializa el parámetro EREAL

Llama a la macro NRCON



Tesis de Máster



NRCON

El paso siguiente es ejecutar la macro NRCON. Esta macro lee el número de conjuntos de constantes reales y los guarda en el vector VRCON. Si ya lo ha calculado antes (RNUM diferente a cero), no lo vuelve a hacer. Se comprime la numeración de las constantes reales iniciales (cuidado, porque se puede modificar la numeración de constantes reales iniciales conocida por el usuario, si no empiezan en 1 o si hay huecos en la numeración).

Lee el número de constantes reales

Lee el número de constantes reales más alto.

Comprima la numeración de los conjuntos de propiedades reales iniciales.

Después de salir del bucle, se borra AUXVEC.

Borra VRCON

Dimensiona el vector de conjunto de propiedades reales VRCON

Dimensiona un vector auxiliar AUXVEC para guardar valores necesarios para el bucle siguiente.



Tesis de Máster

Se busca los conjuntos de propiedades reales. IRCON es el número del constante real. Antes no se comprimían los conjuntos de propiedades reales y era necesario hacerlo de este modo. Ahora como están comprimidos, simplemente sería necesario un bucle. Sin embargo, se ha mantenido de este modo para poder manejar el caso en que el usuario no quiera comprimir los conjuntos para seguir manteniendo la numeración inicial.

Borra el parámetro JCON

Para IRCON =1 hasta RMAX

Crea el parámetro RRAUX para asegurar que el material existe

Si RRAUX mayor que 1

JCON = JCON + 1

Guarda la constante real en VRCON(JCON,1,1)

Lee el número de capas de la constante real

Guarda el número de capas en el vector VRCON(JCON,2,1)

Guarda el número de capas el vector auxiliar.

Selecciona un nuevo set de constantes reales

Borra JELEM

Lee el número máximo de los elementos de la constante real IRCON

Para IELEM = 1 hasta MXELEM



Tesis de Máster

Guarda el valor de IRCON de todos los elementos en el parámetro array EREAL(JELEM,1)

Guarda el valor de IRCON de todos los elementos en el parámetro array EREAL(JELEM,2)

Guarda un valor de control 0 en EREAL(JELEM,3)

Guarda el número de capas en EREAL(JELEM,4)

FIN del bucle para

Se comprueba si sólo existen uno, o más conjuntos de constantes reales. Si sólo existe uno, guarda un código inicial INICOD como el número de la constante real más alta más uno y un código final FINCOD como el número de constante real menos 1 más 2 elevado al número de capas.

Si JCON igual a 1

Guarda RMAX + 1 en INICOD

*Guarda RMAX - 1 + 2**NCAPAS en FINCOD*

Si no

Guarda FINCOD + 1 en INICOD

*Guarda FINCOD - 1 + 2**NCAPAS en FINCOD*



Tesis de Máster

Fin del bucle Si

Se guarda el código inicial INICOD en VRCON(JCON,3,1)

Se guarda el código final FINCOD en VRCON(JCON,4,1).

Fin del bucle Si

Fin del bucle Para

Crea el vector MM como el máximo del AUXVEC

Guarda MM en MXCAPAS

Borra AUXVEC

Borra MM

Borra ELEFAL

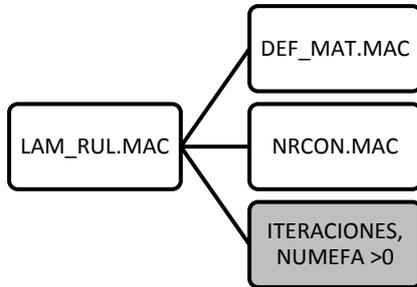
Borra ELESEC

Dimensiona con NTELEM y MXCAPAS el parámetro ELECOEF, el coeficiente de seguridad de cada elemento, como un parámetro del tipo array

Dimensiona con NTELEM y MXCAPAS +1 el parámetro ELEFAL, el valor de fallo de cada elemento, como un parámetro del tipo array

Con esto, se termina la macro NRCON.

Tesis de Máster



Antes de empezar el próximo bucle *DO hace falta crear las siguientes tres variables, CTFIN, KITER y MXKITER. El CTFIN es el parámetro de control para terminar los cálculos en la iteración siguiente. KITER define el valor inicial y el MXKITER el número máximo de iteraciones, es decir, se finalizan los cálculos si el parámetro CTFIN aún no se ha cambiado.

Guarda un 0 en el parámetro CTFIN

Guarda un 0 en el parámetro KITER

Guarda un 10 en el parámetro MXITER

Se empieza la iteración comprobando si el parámetro de control sigue siendo 0. En la primera iteración siempre es así porque lo acabamos de definir así. El CTFIN puede cambiar en dos casos: 1. Si el número de elementos fallados, NUMEFA (aun no definido) está igual a 0, es decir, que no se rompan más elementos, o 2. Si el número de iteraciones KITER esta mayor que MXKITER. Esto no puede ser el caso porque acabamos de definir estos dos parámetros. El parámetro EFAUX es un valor auxiliar de fallo del elemento. Será explicado más adelante cuando se utilice.

Para KITER = 1 hasta MXITER

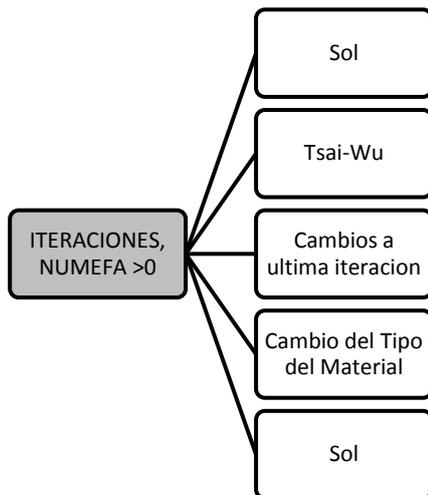
Si CTFIN está igual a 0



Tesis de Máster

Guarda un el parámetro EFAUX, el valor auxiliar en el fallo del elemento.

Selecciona todos los elementos





Tesis de Máster

Todos los pasos anteriores, parámetros creados, etc. aún no se han aplicado al problema y sólo sirven para preparar el postprocesador del problema.

Entra en la solución,

Defina el tipo de análisis

Soluciona el problema

Termina la solución

Entra en el postprocesador.

Borra el último valor del parámetro NUMEFA, el número de elementos fallados.

Para IRCON = 1 hasta RNUM

Guarda el VRCON(IRCON,1,1) en JRCON

Guarda el VRCON(IRCON,2,1)

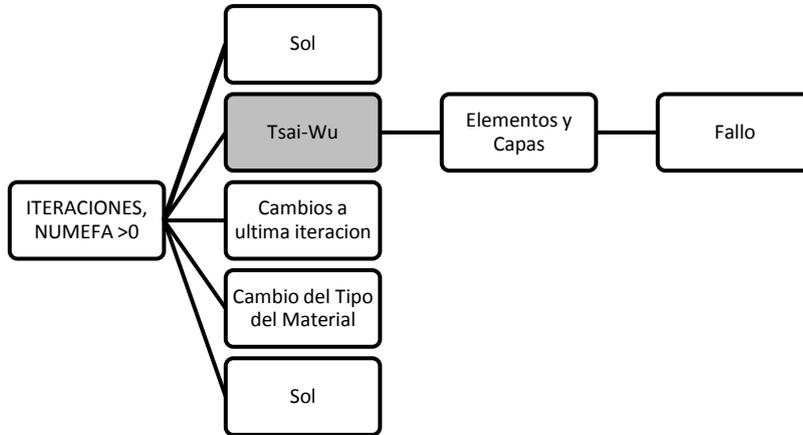
Guarda el VRCON(IRCON,3,1)

Guarda el VRCON(IRCON,4,1)

Selecciona un nuevo set de constantes reales

Lee el número de elementos NUMELE

Tesis de Máster



El siguiente procedimiento sirve para comprobar si ha fallado alguna capa en el algún elemento de este tipo de laminado. Para comprobarlo se utiliza el criterio de fallo de TSAI-WU que se ha explicado en la introducción del punto 1.3.

Borra el ICAP

Para ICAP = 1 hasta NCAPAS

Si ICAP esta menor o igual a NCAPAS

Guarda la posición $2(NCAPAS+ICAP)+8$ en IPOS*

Crea una tabla de elementos ETABLE,FALLO,NMISC,IPOS

**GET,NUMTAB,ETAB,0,NCOL,MAX*

Busca la columna asociada a la tabla FALLO

Para ITAB = 1 hasta NUMTAB

Lee la etiqueta de las columnas



Tesis de Máster

Si la etiqueta es FALLO

Guarda ITAB en JTAB

Fin del bucle Si

Fin del bucle para

Se comprueba la capa ICAP para todos los elementos de este tipo de laminado. Si el parámetro ELEFAL(elemento,capa,1) está igual a 0 el elemento no falla, si esta igual a 1 el elemento falla. El ELESEC(elemento,1,1) guarda el número de capas que ha fallado, (elemento,i+1,1) el orden del fallo de CAPA i. El bucle *DO comprueba todos los elementos.

Borra JELEM

Para IELEM = 1 hasta NUMELE

Lee el valor de JELEM

Lee el valor de fallo EFALLO

El parámetro ELECOEF(JELEM,ICAP,1) guarda el coeficiente de seguridad del elemento dividiendo 1 por el valor del fallo proporcionado por ANSYS. Si el valor del EFALLO es mayor que el anterior, guarda el valor actual en el parámetro auxiliar EFAUX. De este modo EFAUX guarda el valor más alto de EFALLO, el valor más alto de fallo de los elementos.



Tesis de Máster

Guarda la inversa de EFALLO como coeficiente de seguridad ELECOEF(JELEM,ICAP,1)

Si EFALLO esta mayor que EFAUX

Guarda EFALLO en EFAUX

Fin del bucle Si



Si el valor de EFALLO es mayor que 1, el elemento se ha roto. En este caso, se guarda el número del elemento que se ha roto y la secuencia en la se ha roto el laminado en ese elemento

Si EFALLO esta mayor que 1

Si ELEFAL(JELEM,ICAP,1) es igual a 0

Guarda 1 en ELEFAL(JELEM,ICAP,1)

*Guarda ELESEC(JELEM,1,1) + 1 en
ELESEC(JELEM,1,1)*

*Guarda ELESEC(JELEM,1,1) en
ELESEC(JELEM,ICAP+1,1)*

Fin del bucle Si

Fin del bucle Si



Tesis de Máster

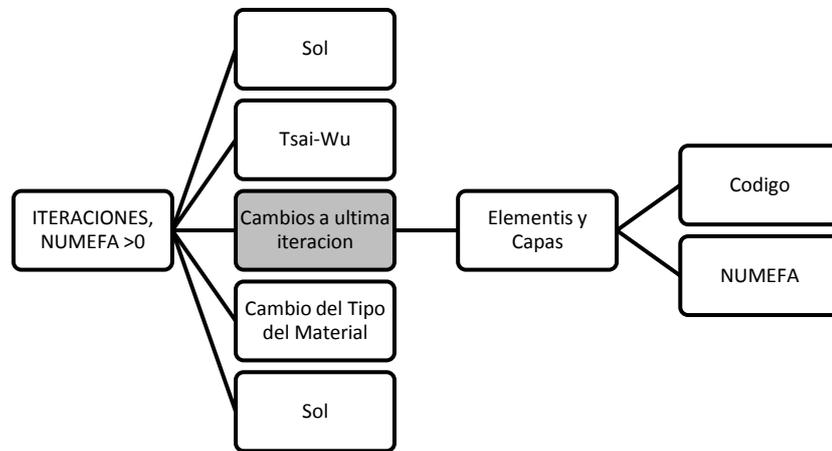
Fin del bucle Para

Fin del bucle Si

Fin del bucle Para

Borra la tabla FALLO

Tesis de Máster



Se comprueba si ha fallado un elemento respecto a la última iteración. La codificación utilizada solo es válida para el caso de un solo tipo de laminado inicial. Si se quiere utilizar más de un laminado inicial se debe modificar el código, por ejemplo: utilizar dos bits del código para saber a qué laminado inicial se corresponde.

Se guarda para cada elemento el CODIGO que es igual al código inicial INICOD menos uno.

Para cada capa se guarda la codificación del elemento fallado.

Borra JELEM

Para IELEM = 1 hasta NUMELE

Lee el valor de JELEM

Guarda INICOD – 1 en CODIGO

Para ICAP = 1 hasta NCAPAS

*Guarda CODIGO + ELEGAL(JELEM,ICAP,1)*2**(ICAP-1) en CODIGO*



Tesis de Máster

Si no ha fallado ninguna capa el código debe ser el número de propiedad real inicial, tal como se ha definido antes de empezar este bucle *DO.

Si el código no es igual al EREAL(JELEM,2), como definido antes en el macro NRCON, se ha roto el elemento. Se incrementa en 1 el NUMEFA, número de elemento fallado, se guarda el CODIGO del elemento fallado en EREAL(JELEM,2) para la siguiente iteración y se guarda un 1 en EREAL(JELEM,3) como parámetro del control que se ha roto este elemento.

Si CODIGO está igual a INICOD –

Guarda JRCON en CODIGO

Fin del bucle Si

Si CODIGO no está igual a EREAL(JELEM,2)

Incrementa el NUMEFA por 1

Guarda el CODIGO en EREAL (JELEM,2)

Guarda 1 en EREAL(JELEM,3)

Fin del bucle Si

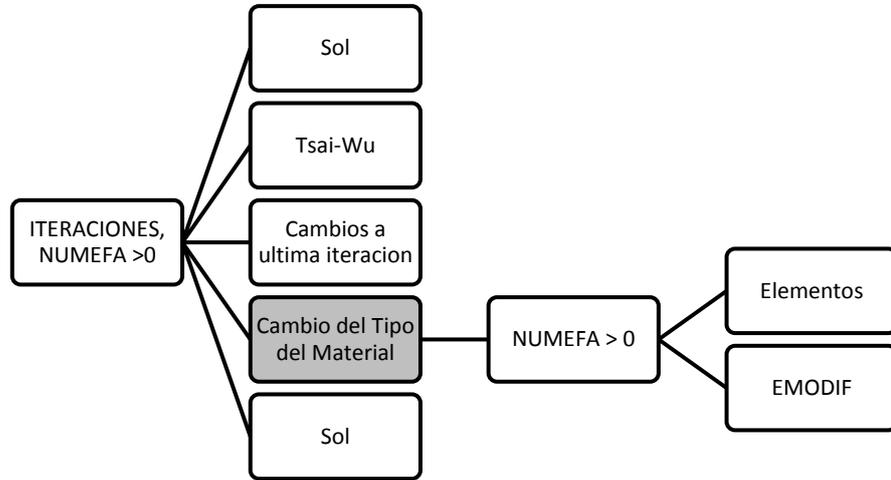
Fin del bucle Para

Fin del bucle Para

Fin del bucle Para

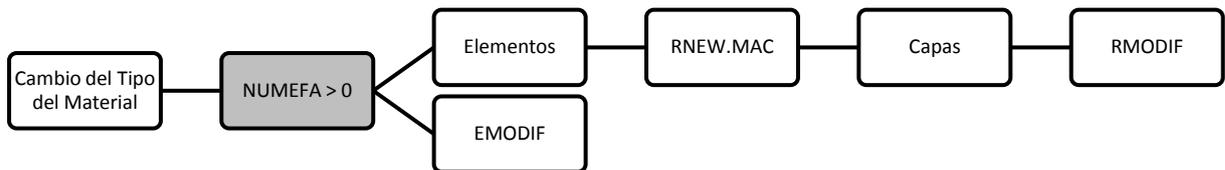
Se termina el postprocesador

Tesis de Máster



El siguiente paso es modificar el laminado. Se consigue esto cambiando los tipos de los materiales de los elementos que han fallado, pero solo en los elementos que han fallado. Se controla si se ha roto un elemento comprobando el parámetro NUMEFA. Si el número de elementos fallados NUMEFA es mayor que 0. Para poder modificarlo se vuelve a entrar en el preprocesador.

Se vuelve a elegir todos los elementos y con el comando *GET se lee el parámetro MXELEM, el número máximo de los elementos. Este valor se ha leído anteriormente en el macro NRCON, pero como ya han fallado elementos, el valor actual es diferente al primero.



Si NUMEFA esta mayor que 0

Entra al preprocesador

Selecciona todos los elementos

Borra el JELEM



Tesis de Máster

Lee el número máximo de los elementos

Se comprueba para todos los elementos si el valor del parámetro $EREAL(JELEM,3)$ es igual a 1. Este significa, como se ha definido antes, que este elemento se ha roto. En este caso se ejecuta el macro RNEW.

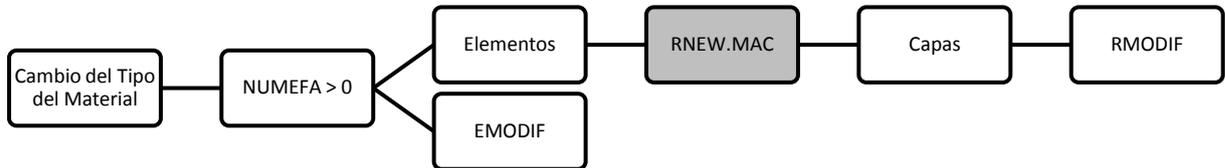
Para IELEM = 1 hasta MXELEM

JELEM = JELEM + 1

Si EREAL(JELEM,3) está Igual a 0

Ejecuta la macro RNEW

Tesis de Máster



Si se ha roto el elemento se ejecuta la macro RNEW. Esta macro define una nueva propiedad real en el elemento que se ha roto. Si el material ya existe, no se crea de nuevo.

Se leen los datos del tipo de laminado del elemento considerado. En el parámetro EREAL(IELEM,1) está guardada la constante real inicial del elemento, en EREAL(IELEM,2) está guardada la constante real actual, en EREAL(IELEM,3) está guardado un 0 cuando no se ha roto el elemento o un 1 cuando se ha roto. En la primera iteración EREAL(IELEM,3) es igual a 1 ya que la macro RNEW lo ha impuesto así. En EREAL(IELEM,4) se guarda el número de capas del laminado.

RNEW

Variables globales: JELEM, EREAL(MXELEM,4)

Si la constante real no existe

Define el nuevo laminado (número de constante real y número de capas)

Si el número de capas total es par

NCAP <= (Número de capas total -2)/2

Si no



Tesis de Máster

$NCAP \leq (\text{Número de capas total} - 1) / 5$

Para ICAP = 1, hasta NCAP

*Lee el material de la capa 2 * ICAP - 1 de la constante real actual*

*Lee el material de la capa 2 * ICAP de la constante real actual*

Define con comando de ANSYS R los materiales degradados

Fin del bucle para

Si el número total de capas es par

*Lee el material de la capa 2 * ICAP - 1 de la constante real actual*

*Lee el material de la capa 2 * ICAP de la constante real actual*

Define con comando de ANSYS R los materiales degradados

Si el número total de capas es impar

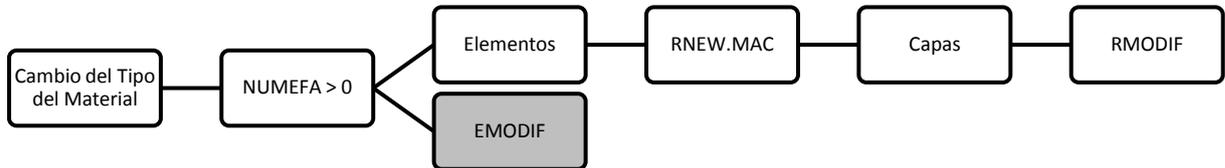
*Lee el material de la capa 2 * ICAP - 1 de la constante real actual*

Define con comando de ANSYS R los materiales degradados

Fin de selección

Fin de la macro RNEW

Tesis de Máster



Después de ejecutar la macro RNEW, se modifica el elemento con el comando EMODIF y se guarda un 0 como EREAL(JELEM,3). De este modo el elemento modificado aparece como no roto y se vuelve a comprobarlo en la siguiente iteración. En el caso que se rompe de nuevo, se vuelve a ejecutar el macro RNEW y se vuelve a modificar el elemento.

Modifica el elemento JELEM que se ha roto

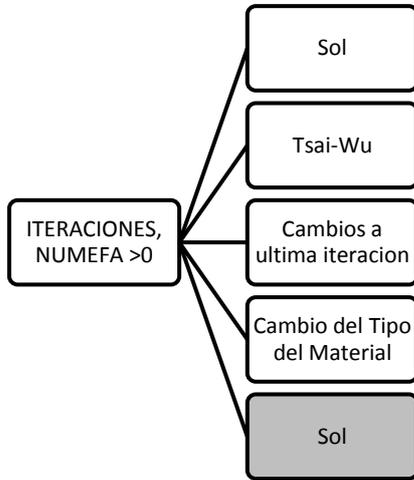
Guarda un 0 en EREAL(JELEM,3)

Fin del bucle Si

Fin del bucle Para

Se sale del preprocesador y se vuelve al módulo de solución para resolver de nuevo el problema, pero ahora con los elementos modificados.

Tesis de Máster



El siguiente comando `*ELSE`, forma parte del bucle `*IF,NUMEFA,GT,0,THEN`. Si esta condición no se cumple, es decir, si `NUMEFA` es igual a 0 y no se ha roto ningún elemento, se guarda un 1 en el parámetro de control `CTFIN`. Si este valor de control está igual a 1, en la siguiente iteración no se volverá a resolver el problema. Para saber cuántos cálculos son necesarios para resolver el problema hasta que no fallan más elementos, se guarda el valor de esta iteración `KITER` en el parámetro `CT1ITER`.

Si no

Guarda un 1 en CTFIN

Guarda el número actual de iteraciones en CT1ITER

Fin del bucle Si

Para que no se produzca un bucle infinito, si se llega al máximo de iteraciones `MXKITER` sin converger, también se guarda un 1 en el parámetro de control para terminar los cálculos.



Tesis de Máster

Si KITER esta mayor que MXKITER

CTFIN = 1

Fin del bucle Si

Fin del bucle Si

Con los comandos siguientes se abre (*CFOPEN) un fichero nuevo llamado NUMEFA.dat y se añade (APPEND) los valores nuevos. Puesto que se va a añadir un nuevo valor sin sobrescribir el valor antiguo, en uno de los primeros pasos de la macro se borra el fichero por si ya existe de una ejecución previa. Con el comando *VWRITE se guarda las variables KITER y NUMEFA, el número de iteración actual y el número de elementos fallados. De este modo el fichero NUMEFA.dat permite al usuario revisar los avances de cada iteración, es decir cuántos elementos se rompen en cada iteración y también comprobar, si la macro se ha ejecutado correctamente.

Abre un fichero NUMEFA.DAT y añade las informaciones siguientes

*Escriba el KITER y el NUMEFA *VWRITE,KITER,NUMEFA*

Cierra el fichero NUMEFA

Si los cálculos se han ejecutado bien, a partir del valor de EFAUX, definido antes como el valor máximo de EFALLO, se obtiene el coeficiente de seguridad mínimo ECMIN de todos los elementos invirtiendo el EFAUX. Se resta a 100 el valor de ECMIN y se guarda en VOBJ. El VOBJ es el valor actual de la función objetivo.



Tesis de Máster

Si el valor absoluto de EFAUX esta mayor que 1.0e-8

Guarda la inversa de EFAUX en ECMIN

Guarda 100 – ECMIN en VOB

Se crea otro fichero ECMIN.dat con el número de iteración actual KITER y el coeficiente de seguridad mínimo de los elementos. Los ficheros ECMIN.dat y NUMEFA.dat permiten al usuario revisar los avances del análisis cada iteración, es decir, el cambio del coeficiente de seguridad en cada iteración y comprobar, si el macro se ha ejecutado correctamente. En la misma iteración en la que NUMEFA se pone 0, el coeficiente de seguridad mínimo debe superar 1.

Abre un fichero ECMIN.DAT y añade las informaciones siguientes

Escriba el KITER y el ECMIN

Cierre el fichero ECMIN.Dat

Si la condición anterior no se cumple, el parámetro ECMIN devuelve un valor de fallo 123456789.

Si no

Guarda 123456789 en ECMIN

Fin del bucle Si

Fin del bucle Para

Hasta aquí se ejecuta el bucle *DO,KITER,1,MXKITER,1 bajo de la condición *IF,CTFIN,EQ,0,THEN.



Tesis de Máster

Se entra en el postprocesador, se selecciona todo y se muestra los resultados de la macro gráficamente. Como al principio de la macro esta puesto el comando PNUM,REAL,1 todos los elementos llevan el color de su constante real actual (como máximo 11 colores), pero es más importante el número de la constante real actual RCONACT.

Si todos los elementos tienen asociado un valor de 1 en RCONACT, o el número de constante real de un elemento es mayor que el máximo número de propiedades reales inicialmente definidas en el problema, ninguno de los elementos ha fallado. Si todos los elementos tienen asociado un valor diferente de 1, es posible que todas las capas de todos los elementos hayan fallado, aunque no tiene porque ser necesariamente así. En este caso el número de constante real mostrado en los elementos RCONACT es igual a RMAX.

Entra al postprocesador

Selecciona todo

PLDISP,0

El siguiente comando crea el fichero RLIST.dat con todas las constantes reales utilizadas. Esto es interesante para poder comprobar el estado de las cada capa de un elemento concreto e identificar si ha fallado.

Guarda el siguiente Output en RLIST.DAT

Alista todos los constantes reales

Cierra el Output



Tesis de Máster

*Ejecuta la macro BOR_PAR para borrar los parámetros auxiliares y para “limpiar” el *STATUS.*

Se puede crear el fichero de análisis de diferentes modos, bien utilizando la interfaz gráfica GUI, que es el *Graphic User Interface* o mediante un *batchfile*. Puesto que no se sabe que método que va a utilizar el usuario para definir los datos de su problema, para poder automatizar la optimización es necesario que la macro sea independiente de la definición del problema por parte del usuario. Por eso se crea un fichero de análisis antes de entrar en el optimizador. Se utiliza el comando LGWRITE para crear el fichero de análisis llamado AFOPT (Analisis file optmization o optimización del fichero de análisis). El comando guarda los datos del log en un fichero, quitando comentarios y comandos no esenciales mediante REMOVE.

Escriba en el fichero AFOPT la base de datos que es necesaria para crear un fichero de analisis, incluyendo todas las informaciones y comandos del problema y del macro LAM_RUL.



2.5.Las variables

La siguiente tabla contiene una sobrevista de las variables para ayudar diferenciarlas.

Grupo	Variable	Significado	Macro
Capa	CAPAS	Número de capas del laminado	RNEW
	ICAP	Número iterando las capas del laminado	LAM_RUL
	IRCAP	Número de capas en la constante real	RNEW
	MXCAPAS	Número de capas de todos los laminados	NRCON
	NCAP	$NINT(CAPAS/2)$	RNEW
	NCAPAS	Número de capas del laminado	LAM_RUL
Constante Real	IRCON	Número iterando las constantes reales	NRCON
	RCONACT	Número de constante real actual	RNEW
	RCONINI	Número de constante real inicial	RNEW
	RMAX	Número más alto de los constantes reales	NRCON
	RNUM	Número de constantes reales	NRCON
	RNUM2	Número de constantes reales al final de LAM_RUL	LAM_RUL
	VRCON	Vector guardando informaciones, IRCON/NCAPAS/INICOD/FINCOD	NRCON
Elementos	IELEM	Número iterando los elementos	LAM_RUL
	MXELEM	Número máximo de los elementos en una capa	LAM_RUL
	NTELEM	Número total los elementos en una capa	LAM_RUL
	NUMEFA	Número de los elementos fallados	LAM_RUL
	NUMELE	Número de los elementos no fallados de todas las capas	LAM_RUL

Tabla 5: Sobrevista sobre las variables

2.6.Verificación de la macro LAM_RUL

La Ilustración 25 muestra la evolución de la curva $N_x-\varepsilon_x$ en un laminado cruzado $[0/90/0]_s$. Esta curva presenta un codo característico. Por las tracciones transversales se rompe la matriz en las láminas de 90° . Después de la rotura de esta matriz, el laminado pierde rigidez y las tensiones se redistribuyen. Si se aumenta la carga, también se rompen las láminas de 0° por restricción de la deformación transversal.

Laminas rotas no soportan la carga aplicada y esto resulta en el fallo total del laminado.

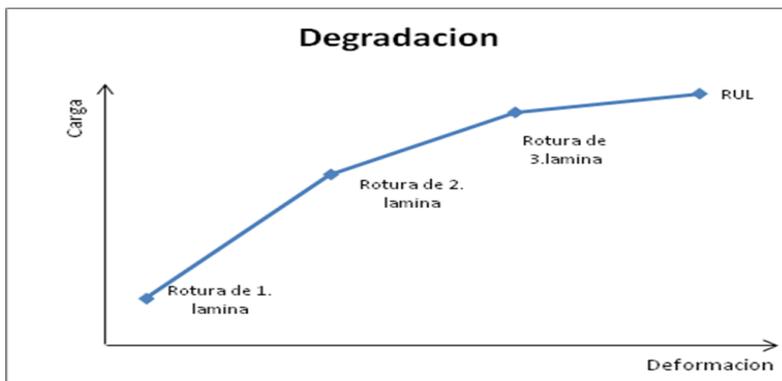


Ilustración 25: Codo característico con evolución de rotura

Una elipse representa el criterio de fallo para láminas a 0° y a 90° grados con el criterio de Tsai-Wu en deformaciones. En la intersección de las dos superficies no aparece fallo de rotura de la primera lamina RPL en ninguna de las láminas.

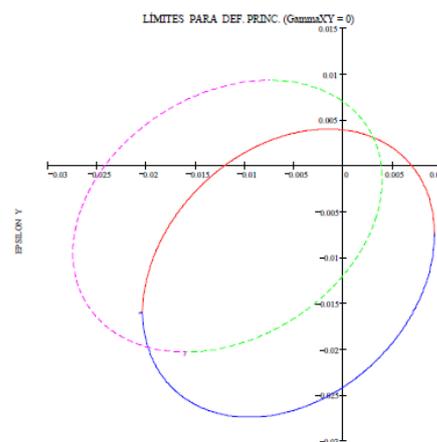


Ilustración 26: Tsai-Wu en deformaciones

Compara también con el tema 4.1.



2.7. Ejemplos con placa con seis capas sometida a flexión

El modelo placa_c6_sfa es una placa cuadrada definida por las coordenadas: $K1 = (0;0)$, $K2 = (1;0)$, $K3 = (1;1)$, $K4 = (0;1)$. El laminado tiene seis capas y los espesores son $T1, T2$ y $T3 = 2,12e-3$. Sobre todo el área se aplica una presión distribuida $1.1e6$.

Las ilustraciones siguientes muestran los diferentes tipos de laminado calculados para cada elemento con la macro LAM_RUL. Cada laminado se corresponde con una combinación de capas del material inicial del laminado o de material degradado en caso de haber fallado la lámina.

En la placa no se permiten desplazamientos según x y z en las líneas de la izquierda y de la derecha. El nodo de la izquierda y abajo tampoco puede moverse según Y . La Ilustración 27 muestra el planteamiento del problema, en el anexo, bajo 8.6, se encuentra el fichero utilizado para el cálculo.

Tanto en este ejemplo como en los ejemplos siguientes de placas con seis capas y la cúpula, se utiliza el mismo material, definido en el fichero MAT_PROP.DAT

E_x	200 E+9	G_{xy}	3 E+9	Nu_{xy}	0.676 E-02
E_y	5,2 E+9	G_{xz}	3 E+9	Nu_{xz}	0.676 E-02
E_z	5,2 E+9	G_{yz}	3 E+9	Nu_{yz}	0.676 E-02

Tabla 6; Propiedades del Material

Tesis de Máster

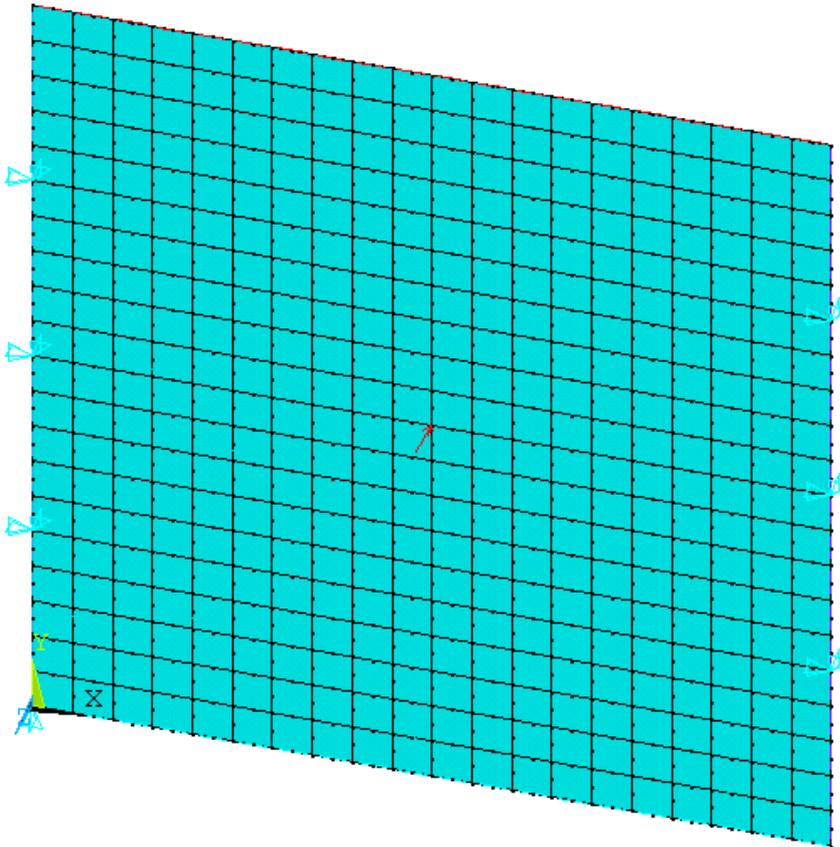


Ilustración 27: Placa con seis capas, “apoyado” por 2 lados

[0/45/-45]s						
R	C1	C2	C3	C4	C5	C6
1	0	0	0	0	0	0
34	1	0	0	0	0	1
36	1	1	0	0	0	1
40	1	1	1	0	0	1
44	1	1	0	1	0	1
48	1	1	1	1	0	1
52	1	1	0	0	1	1
56	1	1	1	0	1	1
64	1	1	1	1	1	1

[0/90/0]s						
R	C1	C2	C3	C4	C5	C6
1	0	0	0	0	0	0
34	1	0	0	0	0	1
40	1	1	1	0	0	1
48	1	1	1	1	0	1

Tabla 7: Constantes Reales de la placa con seis capas, apoyada por dos lados

Tesis de Máster

A la derecha se ve el resultado de la ejecución de LAM_RUL con un laminado cuasi-ortótropo [0/45/-45]_s, apoyado como se ha explicado anteriormente.

Se nota que la degradación no es simétrica, lo que se esperaría de un material isótropo. Esto es debido a las orientaciones del laminado y los acoplamientos entre capas de 45° y -45°. La solución obtenida no era fácil de prever.

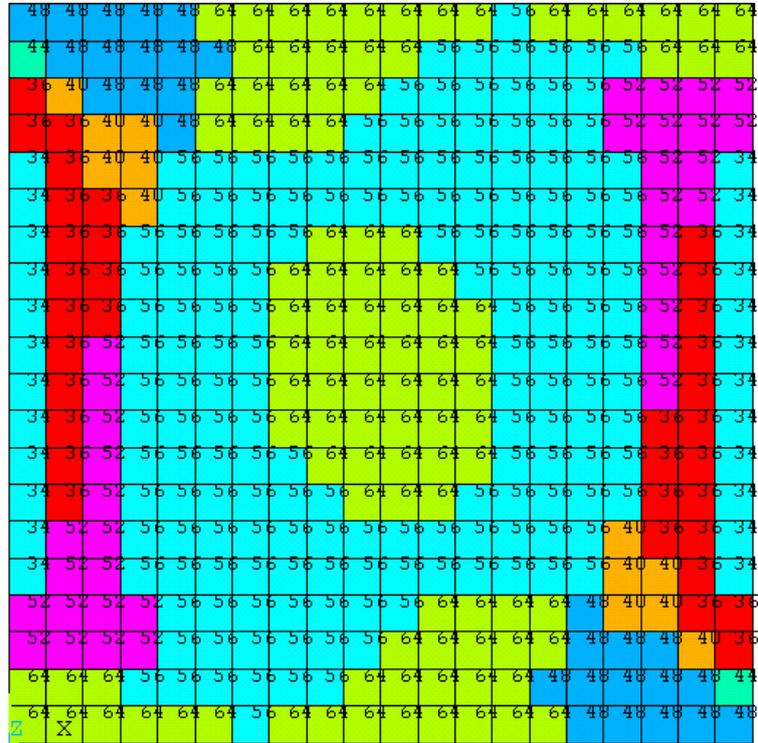


Ilustración 28: LAM_RUL; “apoyado” [0/45/-45]_s

Esta ilustración muestra la misma situación anterior pero esta vez con un laminado de [0/90/0]_s. El resultado es más fácil de entender ya que se parece mucho a un material isótropo al no haber acoplamiento entre las capas. Evidentemente se rompen más capas en los elementos de la zona central con más momento flector.

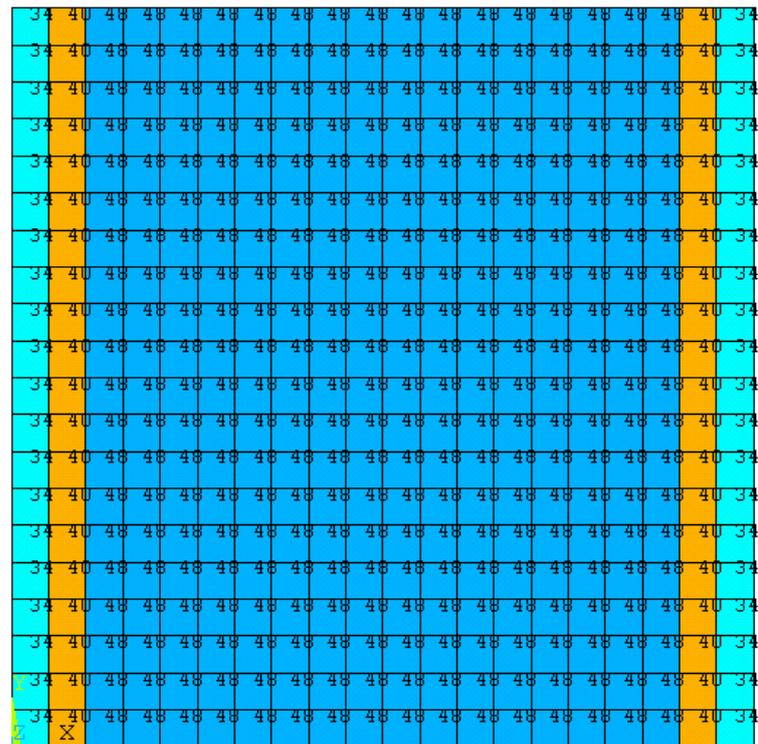


Ilustración 29: LAM_RUL; “apoyado” [0/90/0]_s

Tesis de Máster

El siguiente modelo se parece mucho al anterior. La única diferencia es, que esta placa está empotrada en los contornos de la derecha y de la izquierda, es decir, no se permite giros según Y en dichos contornos. La Ilustración 30 muestra el planteamiento del problema.

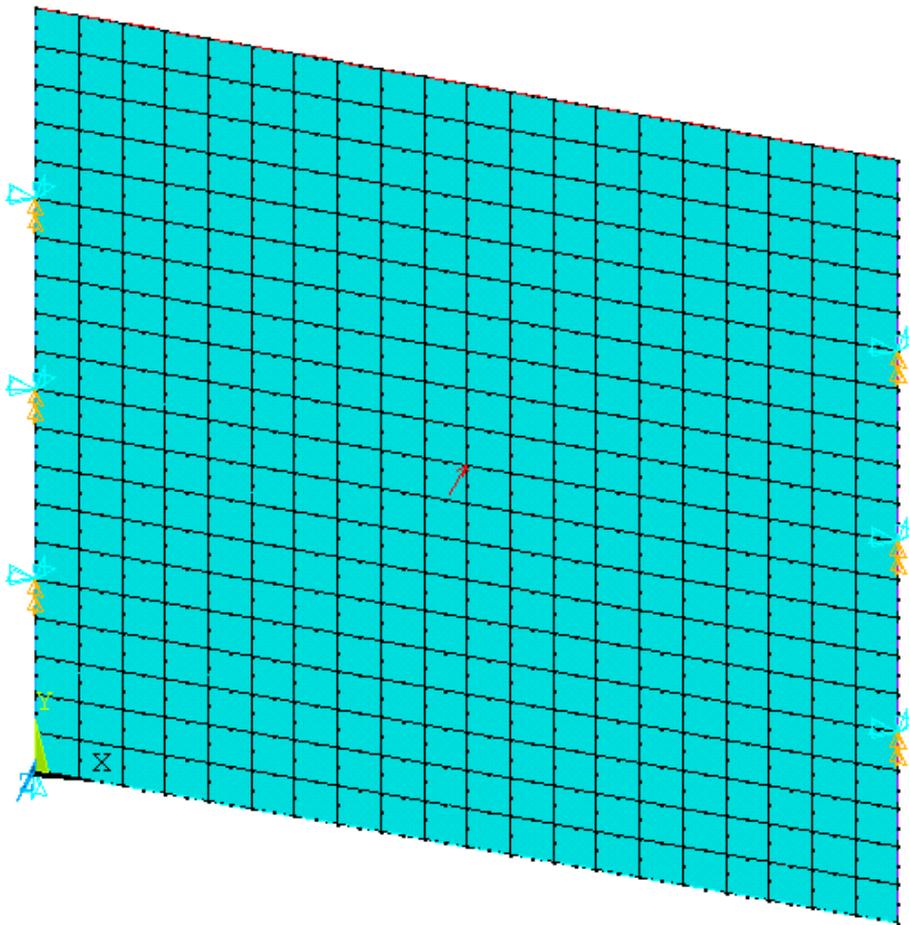


Ilustración 30: Planteamiento: Placa con seis capas, “empotrado” por 2 lados

La siguiente tabla muestra las constantes reales creadas por el macro.



Tesis de Máster

[0/45/-45]s						
R	C1	C2	C3	C4	C5	C6
1	0	0	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	1
34	1	0	0	0	0	1
36	1	1	0	0	0	1
50	1	0	0	0	1	1
58	1	0	0	1	1	1
60	1	1	0	1	1	1
64	1	1	1	1	1	1

[0/90/0]s						
R	C1	C2	C3	C4	C5	C6
1	0	0	0	0	0	0
34	1	0	0	0	0	1
36	1	1	0	0	0	1
40	1	1	1	0	0	1
50	1	0	0	0	1	1
62	1	0	1	1	1	1

Tabla 8: Constantes Reales de la placa con seis capas, empotrada por dos lados

Tesis de Máster

A la derecha se ve el resultado de la ejecución de LAM_RUL con un laminado [0/45/-45]_s, apoyado como explicado en la ilustración anterior. Se ve otra vez hay acoplamiento entre las capas 45° y -45°.

Las columnas marcados con un 1 son elementos en los que no se ha roto ninguna capa.

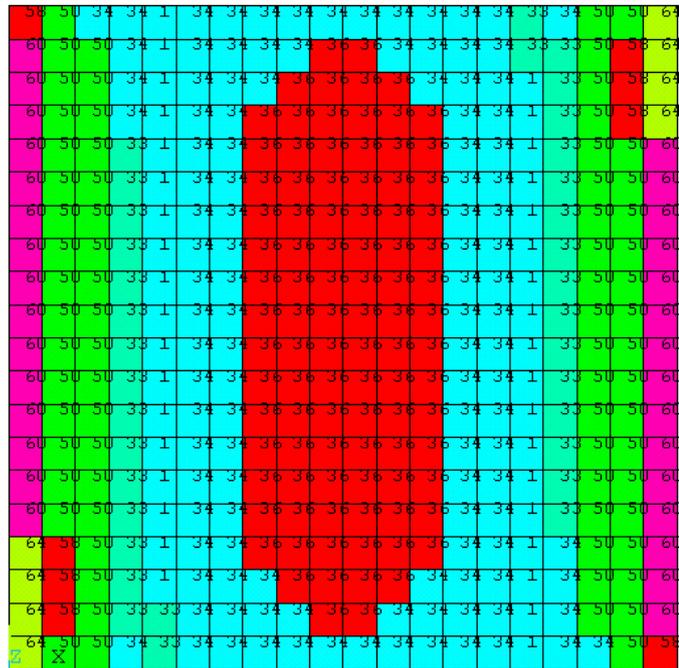


Ilustración 31: LAM_RUL; “empotrado” [0/45/-45]_s

Este ilustración muestra los tipos de laminados par el mismo problema con una placa con orientaciones [0/90/0]_s.

El resultado se parece otra vez a un material isótropo. En la parte inferior se ha puesto la deformada de la placa y se ve que en las líneas de inflexión (zonas de momento flector nulo) el laminado no ha fallado (constante R de laminado 1 que es el inicial).

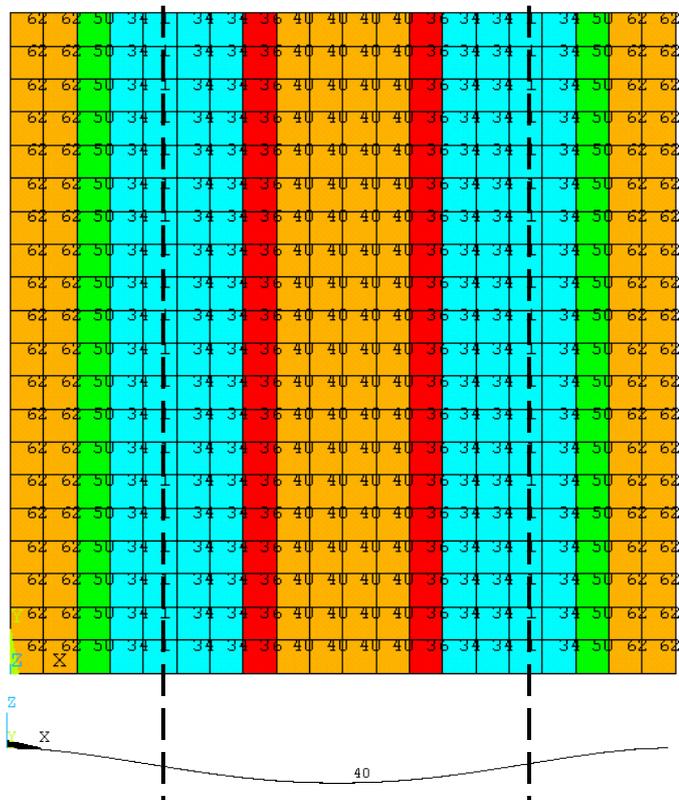


Ilustración 32: LAM_RUL; “empotrado” [0/90/0]_s

Tesis de Máster

A la derecha se ve el planteamiento con un laminado [0/90/0]_s, pero esta vez apoyado en las cuatro líneas del contorno.

R	C1	C2	C3	C4	C5	C6
1	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0
4	1	1	0	0	0	0
36	1	1	0	0	0	1
40	1	1	1	0	0	1
52	1	1	0	0	1	1
56	1	1	1	0	1	1
64	1	1	1	1	1	1

Tabla 9: Constantes Reales de la placa con seis capas, apoyada por cuatro lados

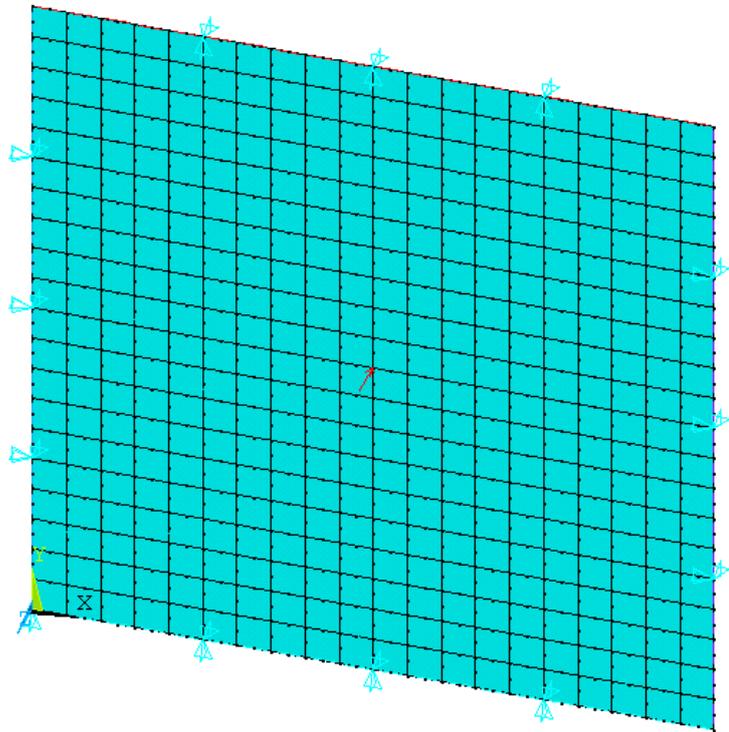


Ilustración 33: Planteamiento: Placa con seis capas, apoyado por 4 lados

El resultado no es exactamente simétrico porque el laminado no tiene igual número de capas a 0° que a 90°. En la zona central, con constante real 64, fallan todas las capas de los elementos ya que el momento flector es máximo. Alrededor de esta zona los elementos con constante real 56 rompen todas sus capas menos la cuarta.

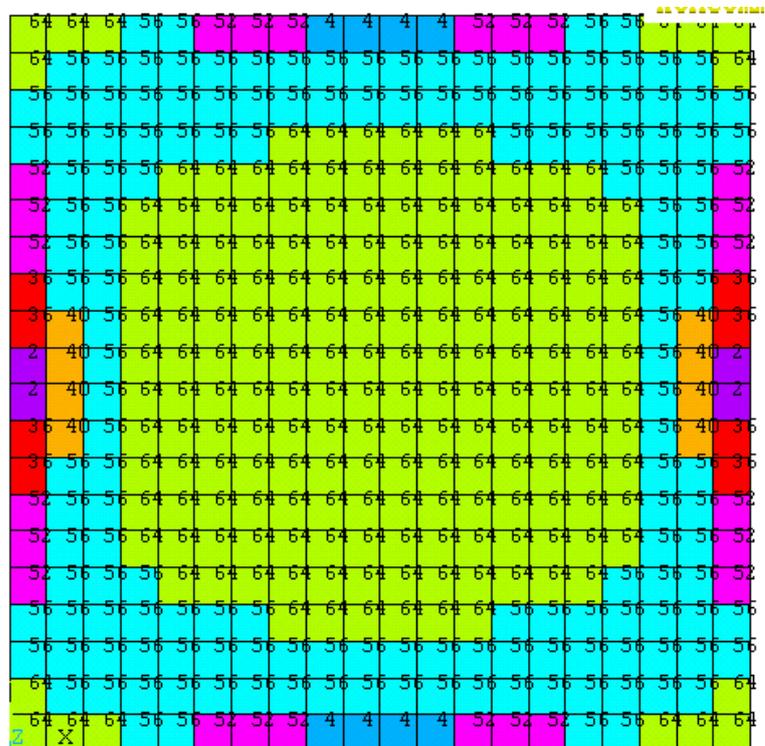


Ilustración 34: LAM_RUL; "apoyado" [0/90/0]_s

Tesis de Máster

A la derecha se ve el planteamiento de un laminado [0/90/0]_s, pero esta vez empotrado en las cuatro líneas del contorno.

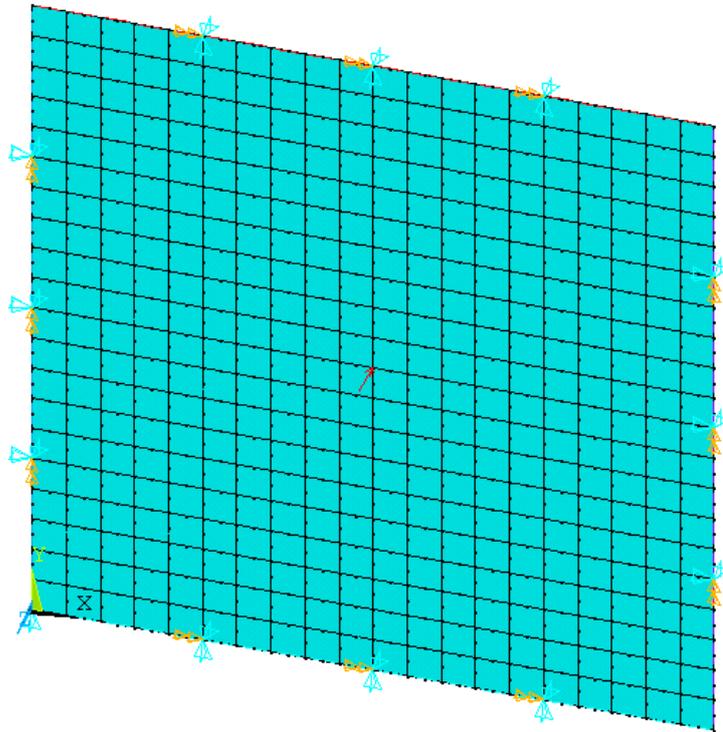


Ilustración 35: Planteamiento: Placa con seis capas, empotrado por 4 lados

EL resultado es casi simétrico.

R	C1	C2	C3	C4	C5	C6
1	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0
4	1	1	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	1
34	1	0	0	0	0	1
36	1	1	0	0	0	1
40	1	1	1	0	0	1
49	0	0	0	0	1	1
50	1	0	0	0	1	1
51	0	1	0	0	1	1
56	1	1	1	0	1	1
58	1	0	0	1	1	1
59	0	1	0	1	1	1
62	1	0	1	1	1	1

Tabla 10: Constantes Reales de la placa con seis capas, empotrada por cuatro lados

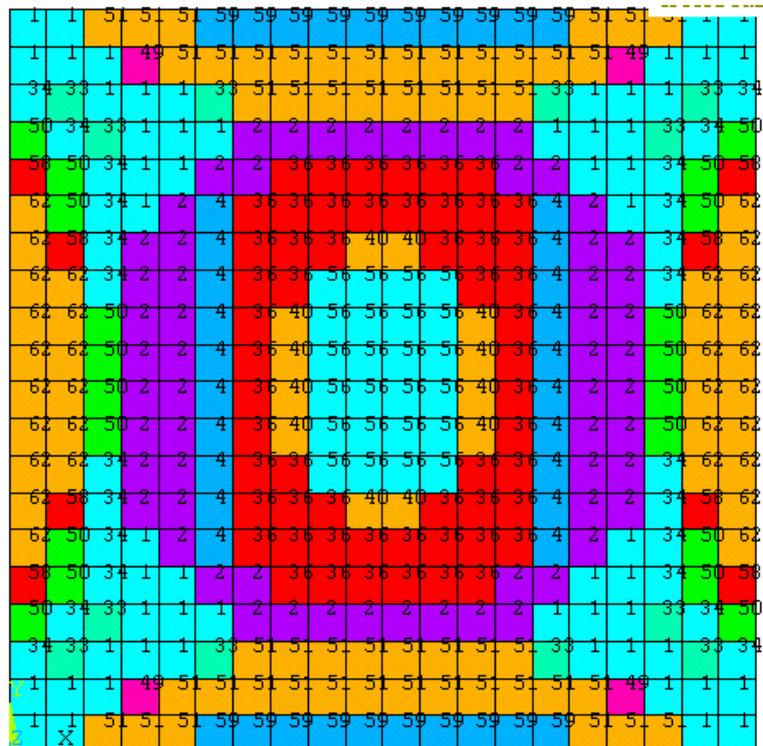


Ilustración 36: LAM_RUL; "empotrado" [0/90/0]_s

Tesis de Máster

La Ilustración 37 muestra la velocidad de convergencia en los diferentes problemas estudiados y puede observarse que el procedimiento utilizado converge muy rápidamente.

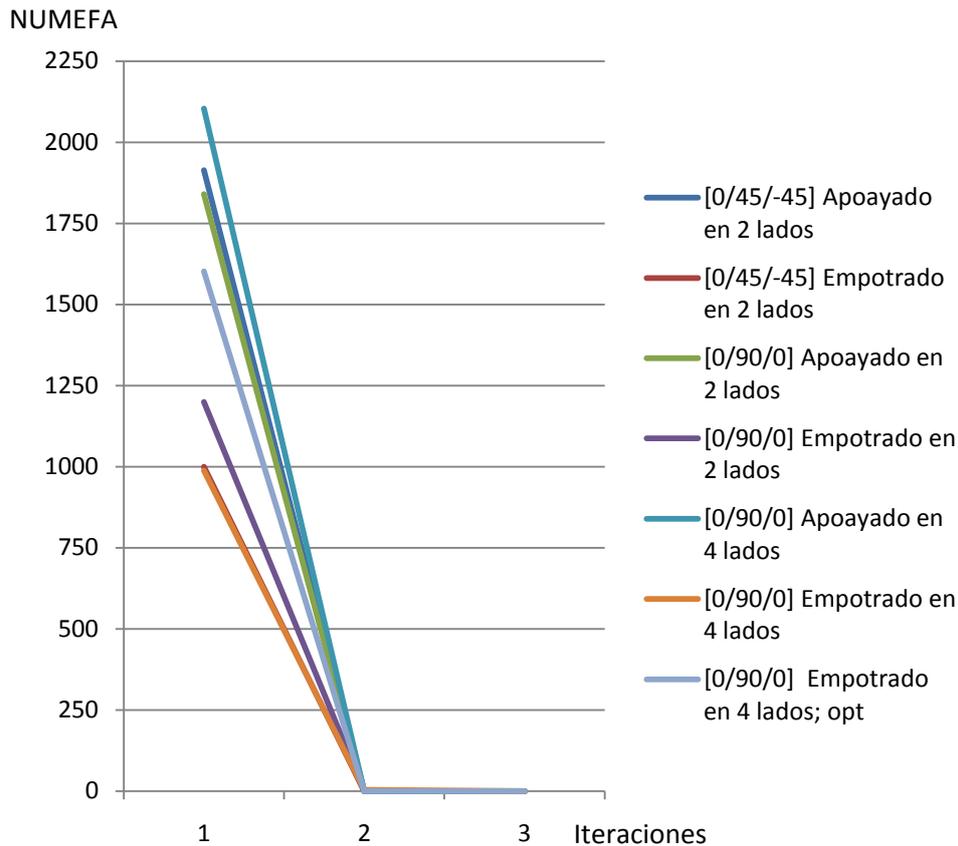


Ilustración 37: Velocidad de convergencia en distintos modelos



3. Optimización de diseño en Ansys⁷

3.1.Procedimiento

Para obtener un diseño óptimo se puede utilizar técnicas de optimización. El diseño debe cumplir todas las condiciones y requisitos especificados, minimizando al mismo tiempo un factor o parámetro deseado. Estos parámetros pueden ser el peso, el volumen, las tensiones, espesores, formas, radios, geometrías, etc. Para poder minimizar estos parámetros, ANSYS requiere la definición de algunas variables y funciones.

3.1.1. Variables de optimización

En ANSYS hay distintos tipos de variables de optimización. Estas se representan mediante parámetros definidos por el usuario:

- Variables del diseño
- Variables del estado
- Función objetivo

Para conseguir el diseño óptimo ANSYS necesita la definición de parámetros independientes, las *Design Variables* (DVs) o variables de diseño. ANSYS variará estas variables y comparará el efecto de la variación en el comportamiento del diseño. Hace falta establecer unos límites superior e inferior de las variables de diseño. Si las variables de diseño son ángulos, será aconsejable limitarlas desde 0° a 180°, si son espesores unos límites válidos desde un punto de vista práctico, por ejemplo en función de la geometría como el ancho. Hay que tener en cuenta, que ANSYS también maneja valores negativos. Por eso también pueden salir espesores negativos si los límites están mal elegidos. En un problema de optimización en ANSYS se puede definir hasta 60 variables de diseño. La definición de

⁷ Compara con [5] Release 11.0 Documentation for ANSYS



Tesis de Máster

demasiadas variables de diseño puede resultar en tiempos de cálculos no manejables o un colapso del programa.

$$\text{limite inferior} < X < \text{limite superior} \quad i = 1, \dots, m$$

Formula 12: Variables del diseño

Se utiliza el formato OPVAR, Par, DV, límite inferior, límite superior, tolerancia.

ANSYS también permite ejecutar una optimización con restricciones. Estas restricciones se pueden definir con las *State Variables* (SVs) o variables de estado. Estos parámetros no son independientes como las variables de diseño. Normalmente estas variables dependen de parámetros o valores que son función de las variables de diseño. Por esto también se llaman variables dependientes. Estas variables también pueden tener límites superior e inferior o sólo uno de los dos. Un ejemplo de variable del estado es la tensión total, que no debe superar cierto nivel para que no falle el material. Otra posibilidad son los coeficientes de seguridad. ANSYS permite definir hasta 100 variables de estado.

$$\text{limite inferior} \leq s_j(X) \leq \text{limite superior}; \quad j = 1, \dots, n$$

Formula 13: Variables del estado

Se utiliza el formato OPVAR, Par, SV, límite inferior, límite superior, tolerancia.

Otra variable dependiente es la *Objective Function* o función objetivo. Este variable es diferente de las variables de estado, porque es la que el usuario desea minimizar y debe ser una función de las variables de diseño, para que, cuando se cambian estas variables, también cambie el valor de la función. El peso total puede ser la función objetivo o también las tensiones críticas. Se puede maximizar un valor minimizando el parámetro negativo, por ejemplo el coeficiente de seguridad. Solo se puede definir una función objetivo.



Tesis de Máster

$$\min f(X) \rightarrow Y; \quad o = \{X\}$$

Formula 14: Función objetivo

Se utiliza el formato OPVAR, Par, OBJ,,,tolerancia.

3.1.2. Terminología de optimización del diseño en ANSYS

Para entender mejor el proceso de optimización del diseño en ANSYS hace falta explicar más de la terminología.

Un conjunto de parámetros de una configuración del problema se llama *design* o diseño. Este diseño es caracterizado por todas las variables de optimización, pero también de los otros parámetros del problema.

Un diseño que cumple con todas las condiciones puestas con las variables del estado y también las del diseño se llama *feasible design* o diseño factible. Un *infeasible design* o diseño no factible es un diseño en lo que solo uno o más condiciones no son cumplidas.

El diseño que cumple todas las condiciones con el valor de la función objetivo está marcado con estrellas en la lista de todos los diseños y llamado *best design* o diseño mejor/optimo. En el caso que todos los diseños no son factibles, el diseño que es más cerca al ser factible es el óptimo, aunque no cumple todas o incluso ninguna de las condiciones.

Tesis de Máster

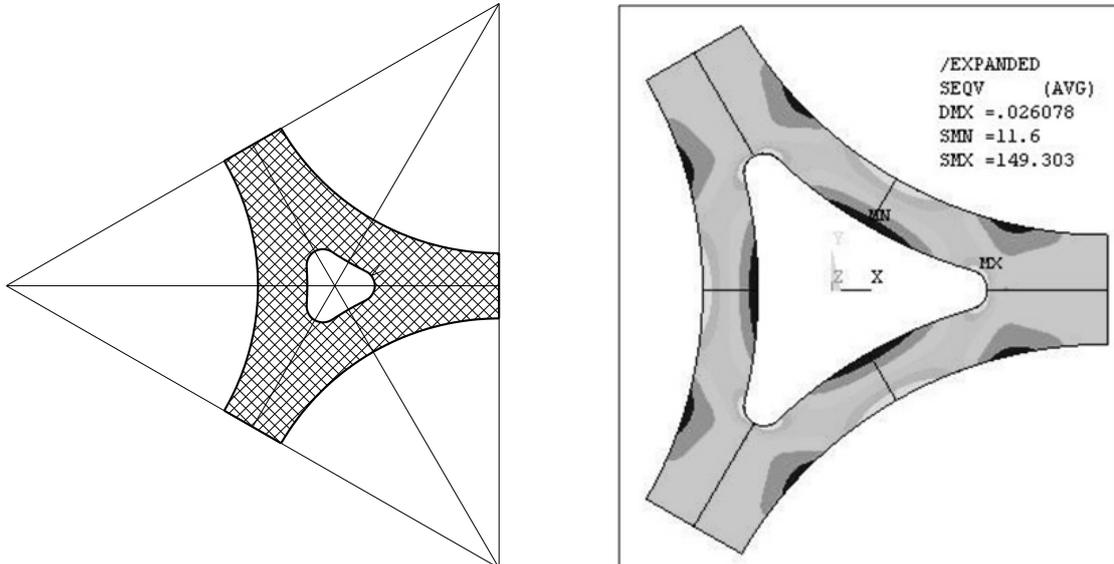


Ilustración 38: Comparación de un diseño y un diseño óptimo

Un fichero de ANSYS de tipo input se llama *analysis file* o fichero de análisis. Este incluye el análisis completo del componente con *preprocessor*, *solution* y *postprocessor* y debe contener el modelo entero del problema con todos los parámetros y toda la información de entrada y salida, que luego podrá ser utilizada como variables de optimización.

Un *loopfile* o fichero de iteración es automáticamente creado a partir del fichero de análisis y utilizado por las herramientas y procesos de optimización para realizar bucles de análisis.

Un conjunto de ejecución de un ciclo de análisis se llama *loop* o iteración. Esto es como una ejecución entera de un fichero de análisis. En el fichero *jobname.OPO* se guarda el output de la última iteración realizada.

Una o más iteraciones de análisis que resultan en un diseño nuevo se llaman *optimización iteration* o iteración de optimización o simplemente iteración. Normalmente un nuevo diseño está creado por una sola iteración, pero en el *first order method* o método de primer orden necesita más que una iteración.

Todas las definiciones de variables de optimización, los parámetros, los especificaciones de diseño y todos los diseños se guardan en la *optimization database* o base de datos de optimización que puede guardarse en *Jobname.OPT* y permite continuar un proceso de optimización detenido en un punto.

El flujo de informaciones mientras se ejecuta una optimización en ANSYS se muestra en la Ilustración 39 de la página siguiente.

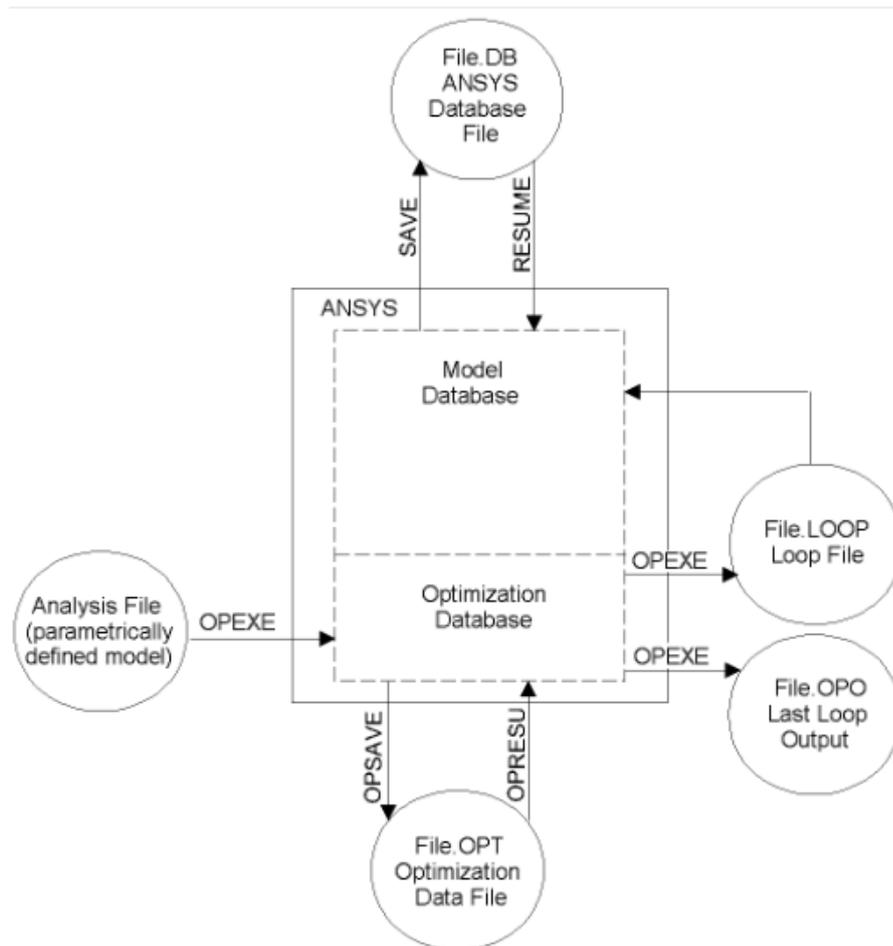


Ilustración 39: Flujo de datos de una optimización⁸

⁸ ANSYS help file, Design optimization, Capitulo 1. ilustracion 1.2, Optimización



3.2. Métodos / Herramientas de optimización

Para resolver muchos tipos de problemas ANSYS dispone de dos métodos de optimización, el *subproblem approximation method (SAM)* o el método de aproximación mediante sub-problemas y el *first order method (FAM)* o el método del primer orden.

ANSYS realiza múltiples ciclos de análisis, modificación y evaluación en los dos métodos. Se realiza el análisis del diseño inicial y se evalúa el resultado con los criterios del diseño especificados, es decir, verificando las variables del estado y la función objetivo, y luego, si hace falta, se modifica el problema con las variables de diseño. Hasta que el diseño cumple todos los criterios o se llegue al máximo de ciclos especificado, se repite el proceso de análisis-evaluación-modificación.

El usuario también puede aplicar su propio método de optimización en lugar de los implantados en ANSYS.

3.2.1. *Subproblem approximation method*

El subproblem approximation method puede ser aplicado a la mayoría de los problemas de ingeniería. Es un método del *advanced zero order* o método de orden avanzado que utiliza aproximaciones de todas las variables dependientes, es decir las variables de estado y la función objetivo, para resolver el problema.

En estos métodos hay dos conceptos muy importantes. El primero es el uso de *approximations* o aproximaciones a los variables dependientes, el segundo es la *conversion* o conversión del problema restringido en un problema sin restricciones.

El comando para aplicar este método es:

OPSUBP,NITR,NINFS

OPSUBP es el método de optimización, NITR define el número máximo de iteraciones y NINFS limita el número de los conjuntos de diseños no factibles consecutivos. (por defecto 7).



3.2.1.1. Aproximación

El programa calcula la función objetivo para múltiples conjuntos de variables de diseño y realiza un *least square fit* o un ajuste por mínimos cuadrados a los puntos de datos. La curva o superficie resultante se llama aproximación. Para poder hacer esto, ajustando la curva ANSYS establece una relación entre la función objetivo y las variables de diseño. Cada punto de datos esta generado por una iteración de optimización y la aproximación a la función objetivo se actualiza. Este concepto no minimiza la función objetivo sino si la aproximación.

De la misma manera se tratan las variables de estado. En cada iteración se genera una aproximación de cada variable del estado y las actualiza al final.

Para las aproximaciones de la optimización se puede controlar el ajuste de la curva requerida. Por ejemplo, un ajuste lineal o cuadrático, que es el estándar para las variables de estado, o el *quadratic plus cross terms fit*, que es el estándar para la función objetivo. Para controlar el ajuste se utiliza el comando:

OPEQN, KFOBJ, KFSV, KWGHT, KOPPR, INOPT

KFOBJ regla de ajuste de la curva de la función objetivo, KFSV regla para las variables de estado, KWGHT es un factor de ponderación, KOPPR define la impresión de los datos de aproximación e INOPT define la regla de actualización de las aproximaciones.



3.2.1.2. Conversión

La conversión de un problema restringido a un problema no restringido es otro concepto. Las restricciones en una optimización son los límites inferiores y superiores de las variables del estado y las de diseño. Las técnicas de minimización son más efectivas en un problema de optimización no restringido y por eso ANSYS puede convertir el problema de un tipo al otro. Para conseguir esto se añade las *penalties* o penalizaciones a la aproximación de la función objetivo. Aplicando una *Sequential Unconstrained Minimization Technique* (SUMT) o técnica de minimización secuencialmente no restringida a cada iteración se busca el mínimo de las aproximaciones de la función objetivo sin restricciones.

3.2.1.3. Control de convergencia (SAM)

Se realiza un control de convergencia o terminación al finalizar cada iteración. Se consigue la convergencia del problema, si el diseño actual, el anterior o el mejor es factible y cualquier de las condiciones siguientes se cumplen:

- El cambio del mejor diseño factible al diseño actual en la función objetivo es menor que la tolerancia de la función objetivo.
- El cambio entre los últimos dos diseños en la función objetivo es menor que la tolerancia de la función objetivo.
- Los cambios del diseño actual al mejor diseño factible de todas las variables de diseño son menores que sus tolerancias respectivas.
- Los cambios entre los últimos dos diseños en todas las variables de diseño son menores que sus tolerancias respectivas.

Aunque haya convergencia no significa la obtención del mínimo global verdadero. La determinación de si el diseño está suficientemente optimizado es responsabilidad del usuario. Si no se ha obtenido el mínimo global, el usuario puede realizar análisis de optimización adicionales.



Tesis de Máster

Es posible que la optimización acabe antes de llegar a la convergencia. Esto puede pasar si el número de iteraciones realizadas o el número de diseños consecutivos no factibles alcanza el máximo valor permitido.

3.2.1.4. Consideraciones especiales para la aproximación del sub-problema

Como se ha explicado anteriormente, las aproximaciones no minimizan la función objetivo sino sus aproximaciones. Por lo tanto, el diseño óptimo obtenido no puede ser mejor que las aproximaciones. Para establecer aproximaciones de las variables del estado y la función objetivo el optimizador de ANSYS genera inicialmente diseños aleatorios y por eso, la convergencia puede ser muy lenta. Para soportar este proceso, a veces se puede proporcionar más de un diseño factible para empezar. Se puede ejecutar algunas iteraciones aleatorias (1.) y desechar todos los diseños que no son factibles (2.). Esto se hace con los comandos siguientes:

```
OPTYPE,RAND
```

```
OPSEL,NSEL
```

NSEL en el último comando es el número de los conjuntos de diseños óptimos que se quiere seleccionar. Si NSEL = -1 se selecciona todos los diseños factibles. Si no hay una función objetivo y NSEL es positivo se borra todos los diseños no factibles



3.2.2. *First order method*

El otro método, que funciona mejor en problemas, que requieren un grado alto de precisión, es el método de primer orden. Es un método basado en sensibilidades de diseño y utiliza información de las primeras derivadas, es decir, gradientes de las variables dependientes, respecto de las variables de diseño. Es la mejor opción si se requiere alta precisión y las variables dependientes varían mucho en un espacio grande de diseño. Sin embargo esta precisión tiene asociado mucho más tiempo de cálculo. El comando para aplicar este método es:

OPFRST,NITR,SIZE,DELTA

OPFRST es el método de optimización, NITR define el número de iteraciones máximo, el SIZE es un límite porcentual, que se aplica a cada paso de la búsqueda lineal, el DELTA es la diferencia porcentual aplicada al rango de la variable del diseño para computar el gradiente.

El método del primer orden también convierte el problema en un problema no restringido añadiendo funciones de penalización a la función objetivo. Al contrario que el método de aproximación de sub-problemas este método minimiza la representación de los elementos finitos y no la aproximación utilizando gradientes de los variables dependientes respecto a las variables de diseño. Para determinar una dirección de búsqueda se calcula el gradiente para cada iteración y se adopta una estrategia de la búsqueda lineal para minimizar el problema no restringido. Cada iteración mantiene varias sub-iteraciones incluyendo búsquedas de dirección y computaciones de gradiente.

3.2.2.1. Control de convergencia (FOM)

Hasta que se llega a la convergencia o se alcance el número máximo de iteraciones las iteraciones de primer orden continúan. Se alcanza la convergencia si comparando el conjunto actual de las iteraciones de diseño con el anterior y el óptimo, una de las siguientes condiciones se cumple:

- El cambio en la función objetivo del diseño óptimo al diseño actual es menor que la tolerancia de la función objetivo.
-



Tesis de Máster

- El cambio en la función objetivo del diseño anterior al diseño actual es menor que la tolerancia de la función objetivo.

3.2.2.2. Consideraciones especiales para el método de primer orden

El método de primer orden requiere más esfuerzo computacional pero es más preciso que el método de la aproximación mediante sub-problemas. Aunque este método es más preciso no siempre llega a la solución óptima. Hay que tener cuidado en las siguientes situaciones:

- El método de primer orden puede convergir a un diseño no factible. Probablemente se ha encontrado un mínimo local en este caso o no hay ningún espacio de diseño factible. Para obtener soluciones mejores es aconsejable ejecutar un análisis de la aproximación de sub-problema. También se puede buscar un espacio del diseño factible generando diseños aleatorios (OPTYPE,RAND) y luego utilizar estos como punto de partida para el método de primer orden.
- Como el método de primer orden empieza en un punto existente y va buscando el mínimo en el espacio del diseño, es más probable encontrar un mínimo local. Esto suele pasar si el punto inicial está más cerca de mínimo local que del mínimo global. En este caso, también es aconsejable ejecutar un análisis de la aproximación de sub-problema o una generación aleatoria de diseño.

Tesis de Máster

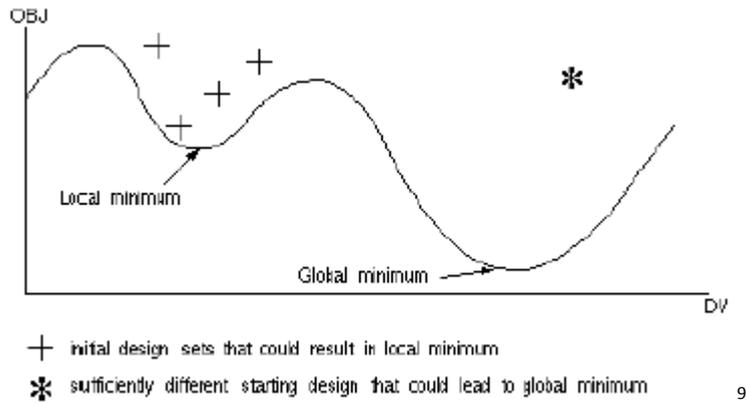


Ilustración 40: Mínimo local / Mínimo Global

- Un número alto de iteraciones y un coste computacional alto puede ser el resultado de una tolerancia de la función objetivo demasiado pequeña.

⁹ ANSYS help file, Design optimization, Capitulo 1. ilustracion 1.4,



Tesis de Máster

3.2.3. Comparación de métodos de optimización

Para evaluar los dos métodos se compara los resultados de una optimización de un problema. El problema elegido es la geometría “triangular” visto en la Ilustración 38 del tema 3.1.2. El planteamiento exacto y las unidades son menos importantes puesto que sólo se quiere comparar el proceso y los resultados.

Las variables de diseño son el espesor T1 con un límite inferior de 20,5 y un límite superior de 40 y el radio interior FIL con un límite inferior de 5 y un límite superior de 15. La variable del estado es la tensión máxima equivalente de Von Mises SMAX sin límite inferior y con un límite superior de 150. Se minimiza el volumen total VTOT con una tolerancia de 1.

OPVAR,T1,DV,20.5,40

OPVAR,FIL,DV,5,15

OPVAR,SMAX,SV,,150

OPVAR,VTOT,OBJ,,,1

En la Tabla 11, la Ilustración 41 y la Ilustración 42 de la página siguiente se muestran los resultados. Los valores de las variables de diseños óptimos están subrayados mientras que los de diseños no factibles están en cursiva. Los diseños no factibles superan el valor máximo de la restricción. El diseño óptimo del método de la aproximación del sub-problema también supera este valor, pero queda dentro de la tolerancia especificada.

En comparación al método del primer orden, el método de aproximación parece más aleatorio que sistemático, sin embargo llega a un resultado muy parecido al correcto, como puede verse en la parte superior de la tabla y en la Ilustración 41.

El procedimiento del método de primer orden es más fácil de comprender, disminuye el espesor al valor mínimo y baja sistemáticamente el radio interior hasta llegar al valor máximo de tensión, como puede verse en la parte inferior de la tabla y la Ilustración 42. Aunque este método parece más lógico, lleva más riesgo de encontrar un mínimo local, explicado en el punto anterior.



Variable	Tipo	Set 1	Set 2	Set 3	Set 4	Set 5	Set 6	Set 7	Set 8	Set 9	Set 10	Set 11	Set 12
Método de aproximación del sub-problema													
SMAX	SV	56,304	124,81	59,444	54,579	115,69	154,10	124,16	155,70	126,95	141,35	147,60	150,18
T1	DV	30,000	37,020	28,066	30,982	22,683	21,278	22,304	21,015	21,795	20,857	20,623	20,563
FIL	DV	10,000	9,5719	11,924	11,179	6,4033	5,3410	6,1850	5,6886	6,6032	6,6558	6,5326	6,5001
VTOT	OBJ	22.967	24.640	22.503	23.377	19.461	18.503	19.221	18.380	18.975	18.409	18.242	18.199
Método del primer orden													
SMAX	SV	56,304	117,20	135,00	130,87	141,92	142,62	146,81	147,19	147,66	147,95	148,41	
T1	DV	30,000	20,500	20,500	20,500	20,500	20,500	20,500	20,500	20,502	20,502	20,502	
FIL	DV	10,000	9,2883	7,5914	7,3652	7,0201	6,8380	6,7452	6,7080	6,6717	6,6508	6,6156	
VTOT	OBJ	22.976	18.578	18.317	18.284	18.233	18.207	18.193	18.188	18.184	18.181	18.176	

Tabla 11: Comparación de métodos de optimización

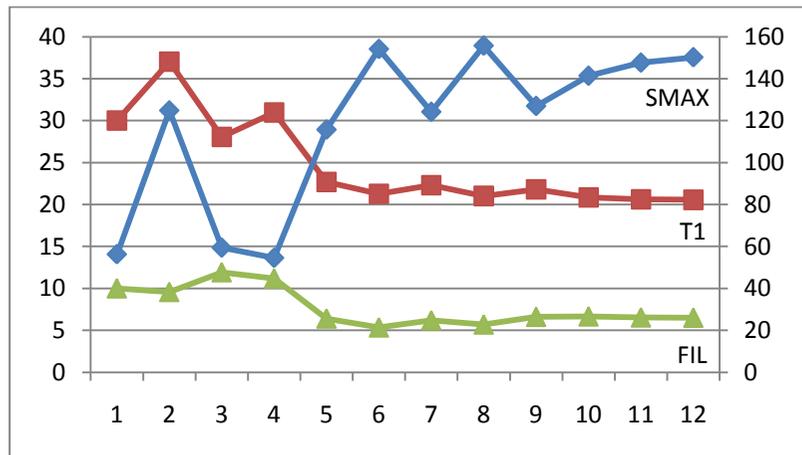


Ilustración 41: Método de la aproximación del sub-problema

Optimización

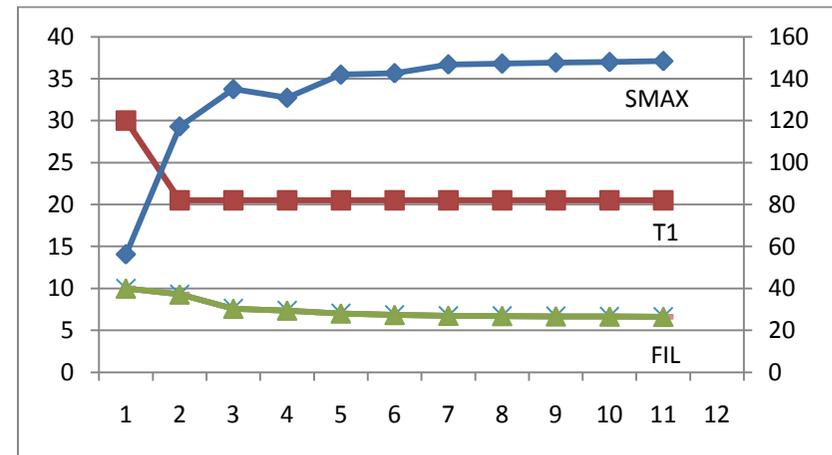


Ilustración 42: Método del primer orden

Comparación de métodos



3.2.4. Herramientas de optimización

Además de los métodos de optimización, ANSYS ofrece herramientas que se puede utilizar para mejorar el proceso de diseño. Se puede realizar varias iteraciones aleatorias de diseño y utilizar estos datos iniciales como puntos del inicio para los métodos anteriormente explicados.

Para medir y entender el espacio de diseño de un problema, ANSYS tiene ciertas herramientas de optimización. La función objetivo solamente permite minimizar o maximizar un parámetro, estas herramientas no requieren esta función objetivo o las variables de estado, sino solo las variables de diseño. ANSYS ofrece cinco herramientas.

La primera realiza una sola iteración y produce una solución de análisis de elementos finitos. El llamado *Single Loop Run*, o ejecución de una iteración, permite, utilizando múltiples ejecuciones con variables del diseño cambiados, estudios de “y si”.

Otra herramienta que utiliza varias iteraciones es el *Random Design Generation* o generación de diseño aleatorio. Se puede definir un número máximo de iteraciones y un número de iteraciones factibles. En cada iteración se cambia aleatoriamente los variables de diseño. Esta herramienta es muy útil para estudiar el espacio del diseño y establecer diseños factibles.

Una herramienta que empieza con un diseño de referencia, generando varias secuencias de diseño, se llama *Sweep Generation* o generación de barrido. Utilizando incrementos uniformes de las variables de diseño, esta herramienta cambia solo una variable en cada iteración. Se pueden evaluar la función objetivo y las variables de estado con ayuda de esta herramienta.

El *Factorial Evaluation* o evaluación factorial es una herramienta estadística. Se generan diseños variando las variables de diseño en sus combinaciones extremas. Esta técnica utiliza análisis total o fraccional factoriales como la tecnología conocida como *design of experiment* o diseño de experimentos. Con la evaluación factorial se puede estudiar las variables dependientes, la función objetivo y las variables de estado, sus efectos básicos y los efectos de sus interacciones.



Tesis de Máster

La última herramienta suministrada por ANSYS es el *Gradient Evaluation* o evaluación del gradiente que permite al usuario definir un diseño de referencia y calcula con respecto a las variables de diseño los gradientes de la función objetivo y las variables de estado. De este modo se puede estudiar sensibilidades locales de diseño.

Además también se puede definir herramientas propias con el *User-supplied Design Tool*.



3.3. Elección de las variables de la optimización

Cualquier variable de optimización debe ser positiva. Si la iteración del diseño empieza con una variable, por ejemplo un ángulo, negativo, el diseño es no factible y el valor se cambia en la próxima iteración por un valor positivo en el rango permitido.

3.3.1. Elección de las variables del diseño

Las variables de diseño son valores restrictivamente positivos como parámetros de geometría, por ejemplo longitudes, espesores, diámetros o coordenadas y también ángulos: Hay que tener en cuenta algunos aspectos:

- Demasiadas variables de diseño aumentan la posibilidad de encontrar un mínimo local en vez de un mínimo global o en el caso de un problema altamente no lineal incluso la posibilidad de divergencia. Por eso se debe utilizar el menor número posible de variables de diseño. Más variables aumentan también el coste computacional. Para bajar el número de variables se puede utilizar una técnica llamada *design variable linking* o enlace de variables de diseño.
- Un rango demasiado alto de las variables del diseño puede resultar en una representación mala del espacio del diseño, un rango demasiado bajo puede excluir el diseño óptimo. Como solo se permite valores positivos, se debe definir un límite superior.
- Hay que elegir variables del diseño que permitan encontrar un diseño óptimo válido desde el punto de vista práctico. Se puede, por ejemplo, elegir la longitud de una geometría para minimizar el peso o el volumen.



Tesis de Máster

3.3.2. Elección de las variables del estado

Normalmente el diseño está restringido por cantidades de repuesta. Estos son las variables de estado, como tensiones, deformaciones, temperaturas, frecuencias, energía adsorbida, tiempo, y muchas más. En teoría cualquier parámetro puede ser definido como variable de estado, no solamente cantidades calculadas por ANSYS. Hay que tener en cuenta algunos aspectos:

- ANSYS nunca interpreta como límite inferior o superior un cero, sino que debe haber límite mínimo o máximo no nulo. Tanto las variables de diseño como las de estado toman sólo valores positivos.
- Para restringir el diseño correctamente hay que definir suficientes variables de estado. Como el diseño cambia en cada iteración, también lo hacen la posición y la tensión máxima. Por eso no es aconsejable en un análisis de tensiones elegir solo la tensión máxima como variable de estado. Tampoco es aconsejable definir demasiados variables de estado.
- Si es posible, se deben elegir variables del estado que tengan una relación lineal o cuadrática con las variables de diseño con el método de la aproximación de sub-problemas. Un ejemplo: en un triángulo rectángulo, donde las variables de diseño pueden ser las longitudes a y b , la variable de estado la superficie del triángulo A , como $A = \frac{1}{2} ab$.
- Hay que especificar un rango razonable, es decir ni demasiado grande, ni demasiado pequeño, cuando la variable de estado tiene límite inferior y superior para poder encontrar un diseño factible.

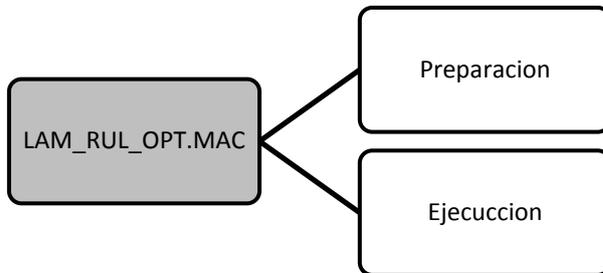


3.3.3. Elección de la función objetivo

La cantidad que se quiere minimizar o maximizar es la función objetivo. Hay que tener en cuenta algunos aspectos eligiendo esta función:

- ANSYS solo permite minimizar una función objetivo y como se ha indicado antes, todas las variables de optimización, la función objetivo incluida, debe ser positivas. Por lo tanto, no se puede utilizar el planteamiento usual para maximizar el parámetro x , de: $\min x_1 = -x$. En el optimizador de ANSYS existen dos conceptos para maximizar: $x_1 = Y - x$ (Y siendo un valor mucho mayor que x) o $x_1 = 1/x$. El primer concepto es preferible puesto que x también puede ser igual a cero y la utilización de la inversa es menos precisa con el método de sub-problemas.
- Para evitar problemas numéricos la función objetivo debe permanecer positiva. Para asegurar esto se puede tomar Y mucho mayor a x en el primer planteamiento.

3.4. La macro LAM_RUL_OPT.MAC



En esta macro se utiliza el método de aproximación de sub-problema, porque esta puede ser aplicada a la mayoría de problemas ingenieriles y tiene menos coste computacional. Por eso la macro sirve para la mayoría de usuarios. Con la macro se intenta maximizar el coeficiente de seguridad mínimo en los elementos por variación de las orientaciones de las capas.

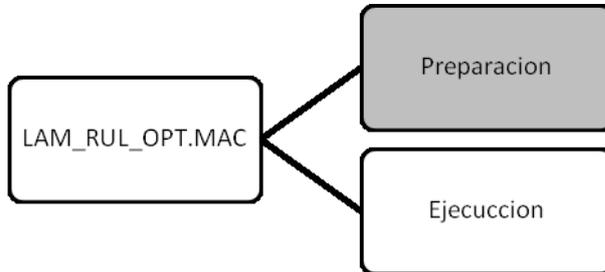
Antes de ejecutar esta macro debe ejecutarse la macro LAM_RUL. Para asegurar, que no quedan ficheros creados por una ejecución anterior de la macro, se borran algunos ficheros.

Se entra en el optimizador y se llama al fichero AFOPT, que se acaba de crear en la macro LAM_RUL.

Como se ha explicado antes, ANSYS sólo permite definir variables positivas para obtener diseños factibles. Esto tiene sentido si se quiere modificar valores de geometría como longitudes, espesores, etc. Sin embargo, en el caso presente, se quiere modificar las orientaciones de las capas representadas por los ángulos TETA1 a TETA3. Los ángulos si que pueden tomar valores negativos, por ejemplo [0/-45/45]s o [30/-30]s. Para empezar con un diseño factible hay que asegurar que estos ángulos tienen valores positivos. Esto se consigue con los bucles *IF siguientes.



Tesis de Máster



Entra al optimizador

Abre el fichero de analisis AFOPT

OPANL,'AFOPT',''

Si el angulo esta menor que 0

Guarda el angulo + 180 grados en el parametro del angulo para TETA1, TETA2 y TETA

3

Fin del bucle Si

Se definen las variables de optimización, empezando con los variables de diseño, los ángulos TETA1, TETA2 y TETA 3, restringidos al rango comprendido entre 0 y 180 grados con una tolerancia de 0,1.

Las variables de estado en una optimización del tipo aproximación del sub-problema deben tener una relación lineal o cuadrática con las variables del diseño. Como no se tiene ningún parámetro relacionado de esta manera, no se defina ninguna variable del estado para restringir la optimización innecesariamente.

El paramento de la función objetivo es el VOBJ, definido en la macro LAM_RUL como $VOBJ = 100 - EMIN$. Para evitar problemas numéricos, para valores negativos en las variables de optimización, no se minimiza EMIN para maximizar el coeficiente de seguridad, sino que se resta a



Tesis de Máster

un valor mucho más alto el valor del coeficiente $ECMIN$. Para minimizar $VOBJ$, ANSYS maximiza $ECMIN$. La función objetivo tiene una tolerancia de 0,01.

En la macro LAM_RUL se ha creado un parámetro auxiliar guardando el valor de fallo máximo:

```
*IF,EFALLO,GT,EFAUX,THEN --- > EFAUX = EFALLO --- > *ENDIF
```

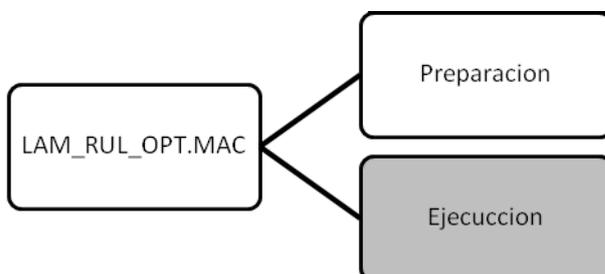
Se ha creado el coeficiente de seguridad mínimo de todo el laminado: $ECMIN = 1/EFAUX$

Se ha creado la variable de función objetivo: $VOBJ = 100 - ECMIN$

Defina los ángulos como variables del diseño con los límites 0.001 y 180 y una tolerancia de 0,1

Defina el parámetro $VOBJ = 100 - ECMIN$ como función objetivo

Guarda el diseño óptimo.



Para ayudar el método de aproximación de sub-problemas a encontrar el mínimo global, se utiliza la herramienta de *Random Design Generation* realizando un máximo de 15 iteraciones con cinco diseños factibles.



Tesis de Máster

Defina la herramienta OPRAND con un máximo de 15 operaciones y 5 diseños factibles deseados

Elija la herramienta Random Design Generation

Guarda todo los datos de la optimización en el fichero de análisis con la extensión OPT0

Ejecuta la optimización

Selecciona solo los diseños factibles

Defina el método de aproximación al sub-problema con un máximo de 30 iteraciones y un máximo de siete diseños no factibles consecutivos.

Elija el método de optimización

Guarda todo los datos de la optimización en el fichero de análisis con la extensión OPT0

Ejecuta la optimización

Para revisar los resultados se lista todos los diseños, tanto los factibles como los no factibles. El diseño óptimo está marcado como *FEASIBLE*.

Para mostrar las modificaciones en las iteraciones de las variables de diseño se muestra un gráfico con TETA1, TETA2, TETA3 y, como los cambios son de un rango mucho menor, en otro gráfico la función objetivo VOBJ. Con el comando PLVAROPT, se puede mostrar todas las variables de optimización.



Tesis de Máster

Lista todos los diseños de optimización

Muestra las variables de diseño

Muestra la función objetivo

Con esto se acaba la macro LAM_RUL_OPT. Si el usuario no está aprueba los resultados obtenidos, puede relanzar la optimización. Como en la base de datos ya hay diseños factibles con valores aproximados, una ejecución nueva debe mejorar los resultados.

Si antes de la optimización el usuario conoce aproximadamente los valores óptimos o el rango óptimo de las variables, se puede utilizar otras herramientas, por ejemplo algunas Single Loop Run para crear una base de datos, o cambiar los límites de las variables de 0 a 180 grados a un rango más pequeño cerca de los valores óptimos. Cambiar el método al primer orden también puede producir diseños mejores y más precisos.



4. Ejemplos de optimización de secuencia de apilado con resistencia máxima

4.1. Placa con tres capas

El modelo placa_c3 es una placa cuadrática de tres capas con las coordenadas: $K1 = (0;0)$, $K2 = (1;0)$, $K3 = (1;1)$, $K4 = (0;1)$, los espesores $T1$ y $T3 = 2,12e-3$ y $T2 = 21,2e-3$, la orientación de las capas $[0/90/0]$.

No se permite movimientos de la línea 4 en X, del punto 1 en Y e Z y del punto 4 en Z. Sobre la línea 2 se aplica una fuerza de tracción de $5.0e6$. La Ilustración 43 muestra el planteamiento del problema, en el anexo, bajo 8.5, se encuentra el fichero del planteamiento. La constante real inicial es la 9.

En la Ilustración 44 se ve la placa después de la ejecución del la macro LAM_RUL para la configuración inicial. El fallo total indicado por la ilustración anterior no es correcto. La constante real ha cambiado de 9 a 6. La lista de los constantes reales indica la utilización de los materiales degradados en las capas 1 y 3, la capa 2 sigue con el material inicial. El coeficiente mínimo de los elementos ECMIN es 0,681374303, el número capas de elementos que han fallados NUMEFA es 800 de 1200 elementos totales.

La optimización con la macro LAM_RUL_OPT cambia las orientaciones de las capas de $[0/90/0]$ a $[0,37/0,37/179,63]$ o bien $[0/0/0]$). Los nuevos ángulos tienen la misma orientación que la carga aplicada. La constante real utilizada con estos ángulos es la una, quiere decir que ninguno de los elementos ha roto. Esta solución es claramente la buscada. El ECMIN es 3,83433515, 5,6 veces mejor, el NUMEFA es igual a 0. Tabla 12 muestra todos los diseños del optimizador.

Los resultados parecen lógicos. El cambio de la orientación de la capa 2 con el espesor diez veces más alto que de las otras capas, resulta en un mejoramiento de las propiedades del material. La constante real 1, el ECMIN mayor que 1 y el NUMEFA igual a 0 son coherentes y confirman que la macros se han ejecutados bien.

Tesis de Máster

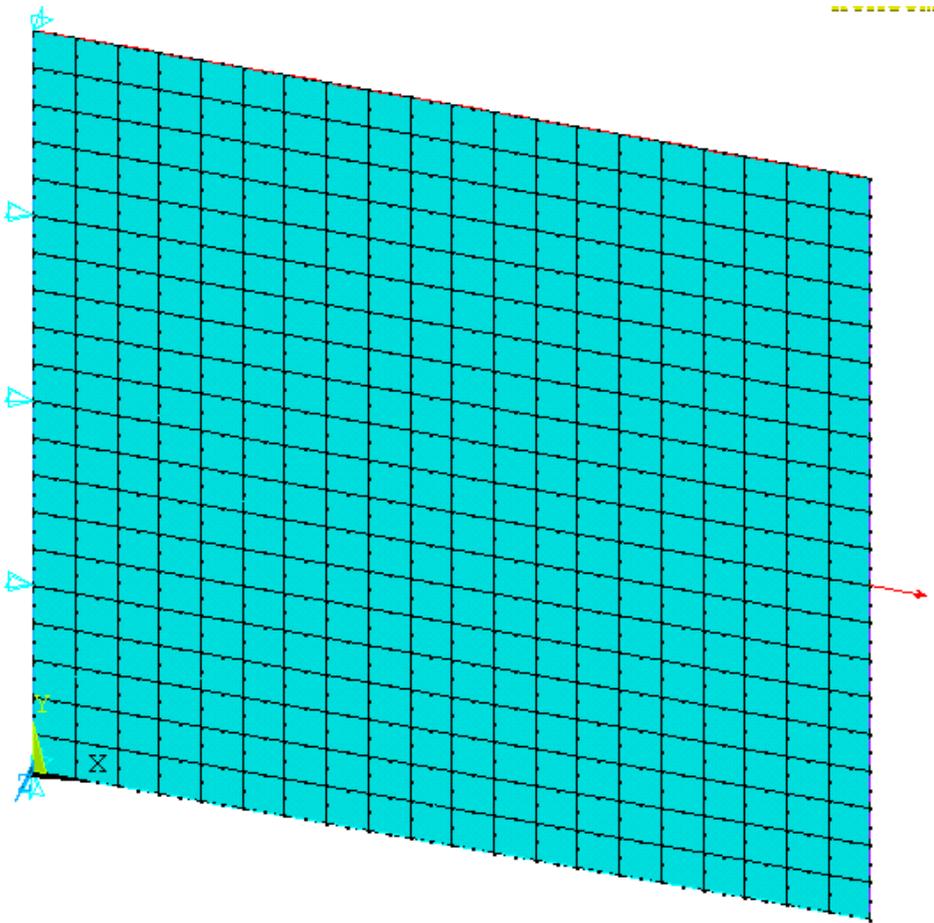


Ilustración 43: Placa_c3: Planteamiento

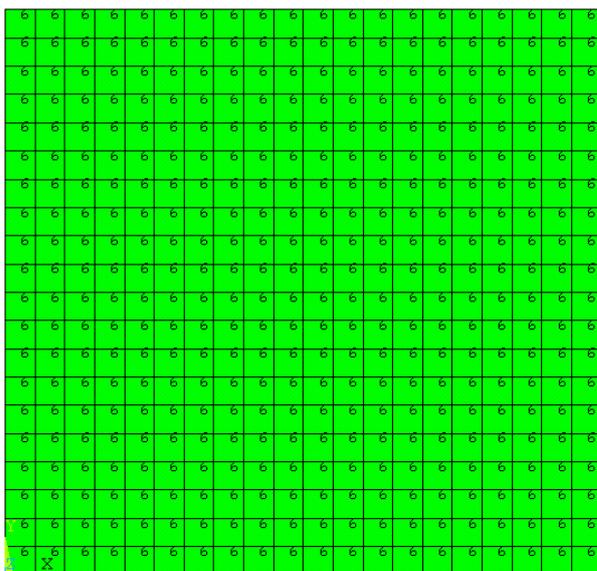


Ilustración 44: Placa_c3: LAM_RUL

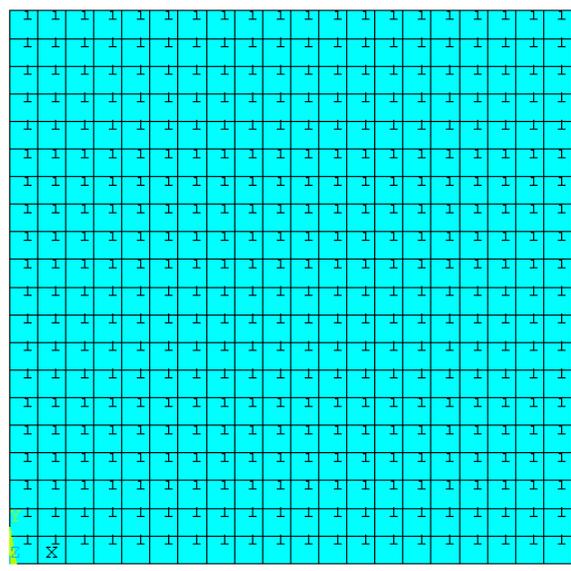


Ilustración 45: Placa_c3: LAM_RUL_OPT



Tesis de Máster

		SET 2	SET 3	SET 4	SET 5	SET 6	SET 7	SET 8	SET 9	SET 10	SET 11	SET 12
		(FEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)							
TETA1	DV	152.49	124.63	152.61	57.653	125.13	173.93	172.15	43.547	12.084	10.587	12.643
TETA2	DV	82.294	96.761	0.60020	142.69	12.602	113.70	144.76	0.41189	0.37420	65.486	0.37813
TETA3	DV	69.839	111.23	84.438	104.78	62.511	27.162	84.201	153.37	104.49	159.33	147.44
VOBJ	OBJ	99.889	99.860	97.173	99.785	99.434	99.635	99.794	97.064	97.185	99.678	96.850
		SET 13	SET 14	SET 15	SET 16	SET 17	SET 18	SET 19	*SET 20*			
		(FEASIBLE)	(FEASIBLE)									
TETA1	DV	37.717	35.313	10.071	0.49614	0.40270	0.40208	0.37572	0.36948			
TETA2	DV	0.37172	0.37143	0.36481	0.36481	136.63	0.36481	0.36481	0.36481			
TETA3	DV	138.46	173.00	177.95	179.19	179.51	179.52	179.61	179.63			
VOBJ	OBJ	97.004	96.436	96.204	96.172	99.243	96.167	96.166	96.166			

Tabla 12: Placa_c3: Diseños de optimización

4.2. Placa con seis capas

El modelo placa_c6_sfa es una placa cuadrada definida por las coordenadas: $K1 = (0;0)$, $K2 = (1;0)$, $K3 = (1;1)$, $K4 = (0;1)$. Se utiliza un laminado inicial $[0/90/0]_s$ con espesores $T1, T2$ y $T3 = 2,12e-3$. Sobre todo el área se aplica una presión distribuida $1.1e6$.

Se ha planteado el problema de optimizar las orientaciones de dicha placa para que la resistencia a rotura de la última lámina sea máxima.

A la derecha se ve el resultado de la optimización. Las orientaciones óptimas de este laminado son $[48,440/19,747/117,43]$. La Tabla 15 muestra todos los diseños de la optimización.

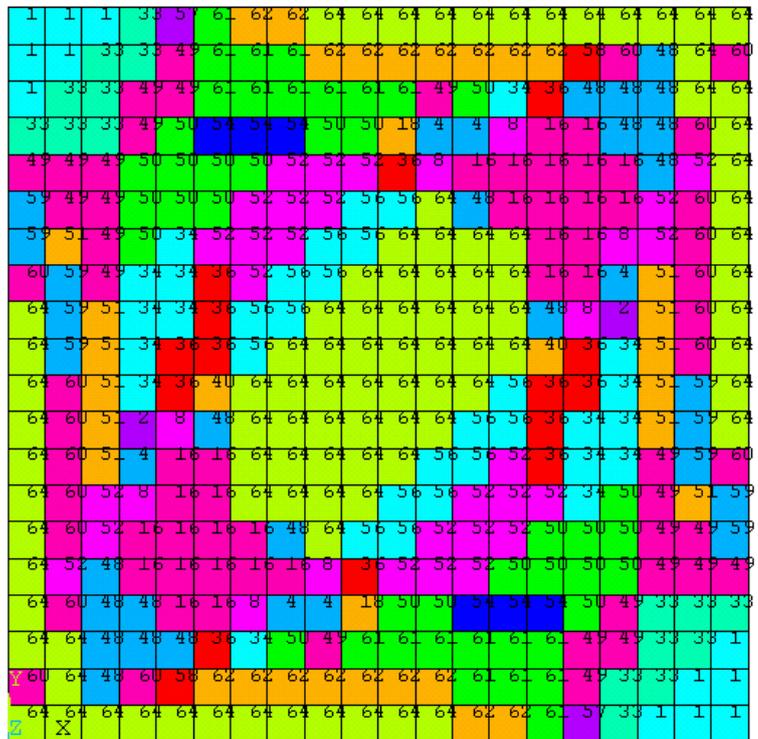


Ilustración 46: LAM_RUL_OPT: "empotrado" $[0/90/0]_s \rightarrow [48,4/19,7/117,4/]$



Tesis de Máster

R	C1	C2	C3	C4	C5	C6
1	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0
4	1	1	0	0	0	0
8	1	1	1	0	0	0
16	1	1	1	1	0	0
18	1	0	0	0	1	0
33	0	0	0	0	0	1
34	1	0	0	0	0	1
36	1	1	0	0	0	1
40	1	1	1	0	0	1
48	1	1	1	1	0	1
49	0	0	0	0	1	1

R	C1	C2	C3	C4	C5	C6
50	1	0	0	0	1	1
51	0	1	0	0	1	1
52	1	1	0	0	1	1
54	1	0	1	0	1	1
56	1	1	1	0	1	1
57	0	0	0	1	1	1
58	1	0	0	1	1	1
59	0	1	0	1	1	1
60	1	1	0	1	1	1
61	0	0	1	1	1	1
62	1	0	1	1	1	1
64	1	1	1	1	1	1

Tabla 13: Constantes Reales del diseño óptimo de la placa con seis capas, empotrado por cuatro lados

El número de constantes reales se ha aumentado de 14 después de la ejecución de la macro LAM_RUL a 24. Se nota que se ha utilizado casi todos los posibles constantes entre 48 y 64. Los números altos no implican que se han roto muchas capas, pero a partir del 33 se rompe la capa 6 – la más lejana de la fuera aplicada - en todas las constantes reales.

ECMIN inicial	ECMIN optimizado
1.08065683	1.48614855

Tabla 14: Coeficiente de seguridad mínimo antes y después de la optimización

En la tabla 9 se muestran los coeficientes de seguridad antes y después de la optimización. Antes de la optimización el laminado de la Ilustración 46 tiene las orientaciones [0/90/0]s. El ECMIN inicial es 1,08065683 con un número total de capas de elementos rotas de 988.

La optimización con la macro LAM_RUL_OPT cambia las orientaciones de las capas de [0/90/0]s a [48,4/19,7/117,4]s. Con estos ángulos solo se rompen 1602 capas en los elementos, más capas que con ángulos no optimizados que eran 992. El ECMIN en este caso es 1,48614855, casi el doble del coeficiente de seguridad inicial.



Tesis de Máster

		SET 2	SET 3	SET 4	SET 5	SET 6	SET 7	SET 8	SET 9	SET 10	SET 11	SET 12
		(FEASIBLE)										
TETA1	DV	152.52	124.68	152.64	57.774	125.18	12.631	83.142	62.461	61.908	17.196	141.38
TETA2	DV	82.391	96.844	0.77860	142.73	12.768	36.510	171.69	93.555	78.545	20.753	159.20
TETA3	DV	69.949	111.29	84.533	104.86	62.628	157.28	158.91	29.793	85.437	70.160	21.367
VOBJ	OBJ	98.958	98.912	98.971	98.907	98.950	98.917	98.964	98.901	98.722	98.877	98.808
		SET 13	SET 14	SET 15	SET 16	SET 17	SET 18	SET 19	SET 20	SET 21	SET 22	*SET 23*
		(FEASIBLE)	(FEASIBLE)									
TETA1	DV	81.549	49.045	71.072	70.816	61.011	53.230	52.397	47.684	42.173	47.575	48.440
TETA2	DV	62.322	21.668	55.764	57.524	48.726	56.136	47.956	50.632	54.299	31.556	19.747
TETA3	DV	61.894	112.42	151.02	148.81	129.41	122.82	122.18	117.35	114.17	161.53	117.43
VOBJ	OBJ	98.910	98.537	98.989	98.970	98.965	98.975	98.946	98.898	98.878	98.646	98.514
		SET 24	SET 25	SET 26	SET 27	SET 28	SET 29	SET 30	SET 31			
		(FEASIBLE)										
TETA1	DV	44.569	61.322	60.397	13.648	37.749	59.922	60.397	59.654			
TETA2	DV	53.004	38.808	39.268	76.184	24.747	37.654	39.268	37.382			
TETA3	DV	139.08	107.38	108.36	137.21	126.09	119.52	108.36	119.46			
VOBJ	OBJ	98.843	98.984	99.000	98.936	98.946	98.997	99.000	98.997			

Tabla 15: “empotrado” [0/90/0]s: Diseños de optimización



4.3. Cúpula

El modelo de cúpula esférica de radio 5 m está construido con un laminado con seis capas. Los espesores son T_1, T_2 y $T_3 = 1,5e-3$, la orientación de las capas son $[90/0/90]_s$ y se aplica una carga vertical asociada a la placa mediante una densidad equivalente de $3e3$.

No se permite movimientos de las líneas 5, 6, 7 y 8 en las direcciones radial y vertical. Sobre todo el área se aplica una fuerza de presión de $1.2e6$ y la aceleración de gravedad. La Ilustración 47 muestra el planteamiento del problema, en el anexo, bajo 8.7, se encuentra el fichero del planteamiento.

En la Ilustración 48 se ve la cúpula después de la ejecución del macro LAM_RUL. La constante real ha cambiado en la mayoría del área de 9 a 1. En las zonas de concentración de tensiones hay un cambio de constantes reales que indica una degradación por fallo de algunos elementos. En este problema también hay elementos que se rompan en diferentes iteraciones. El EMIN de la primera iteración es 0,917824375 y el NUMEFA es 464, el EMIN de la segunda iteración es 0,998953805 y se rompen 24 capas en elementos más. El último coeficiente de seguridad final EMIN es 1.00009427

La optimización con la macro LAM_RUL_OPT cambia las orientaciones de las capas de $[90/0/90]_s$ a $[125,13/12,602/62,511]_s$ o bien $[130/10/60]_s$. La constante real utilizada con estos ángulos es la una, quiere decir que ninguno de los elementos ha roto. El EMIN es 1,05470378 en todas las iteraciones, esto es 1,149 veces mejor que la primera y 1,055 veces mejor que la última iteración no optimizada. El NUMEFA es igual a 0 lo que indica que en la última iteración no se han roto ninguna capa y el procedimiento ha convergido. Tabla 17 muestra todos los diseños del optimizador.

Se puede mejorar mucho los resultados de la optimización modificando los límites de las variables de diseño a los valores esperados. La Tabla 18 muestra los diseños con TETA1 restringido de 0° a 60° , TETA2 de 60° a 120° y TETA3 de 120° a 180° grados. Con estos límites encontrar las orientaciones óptimas resulta menos costoso.

Tesis de Máster

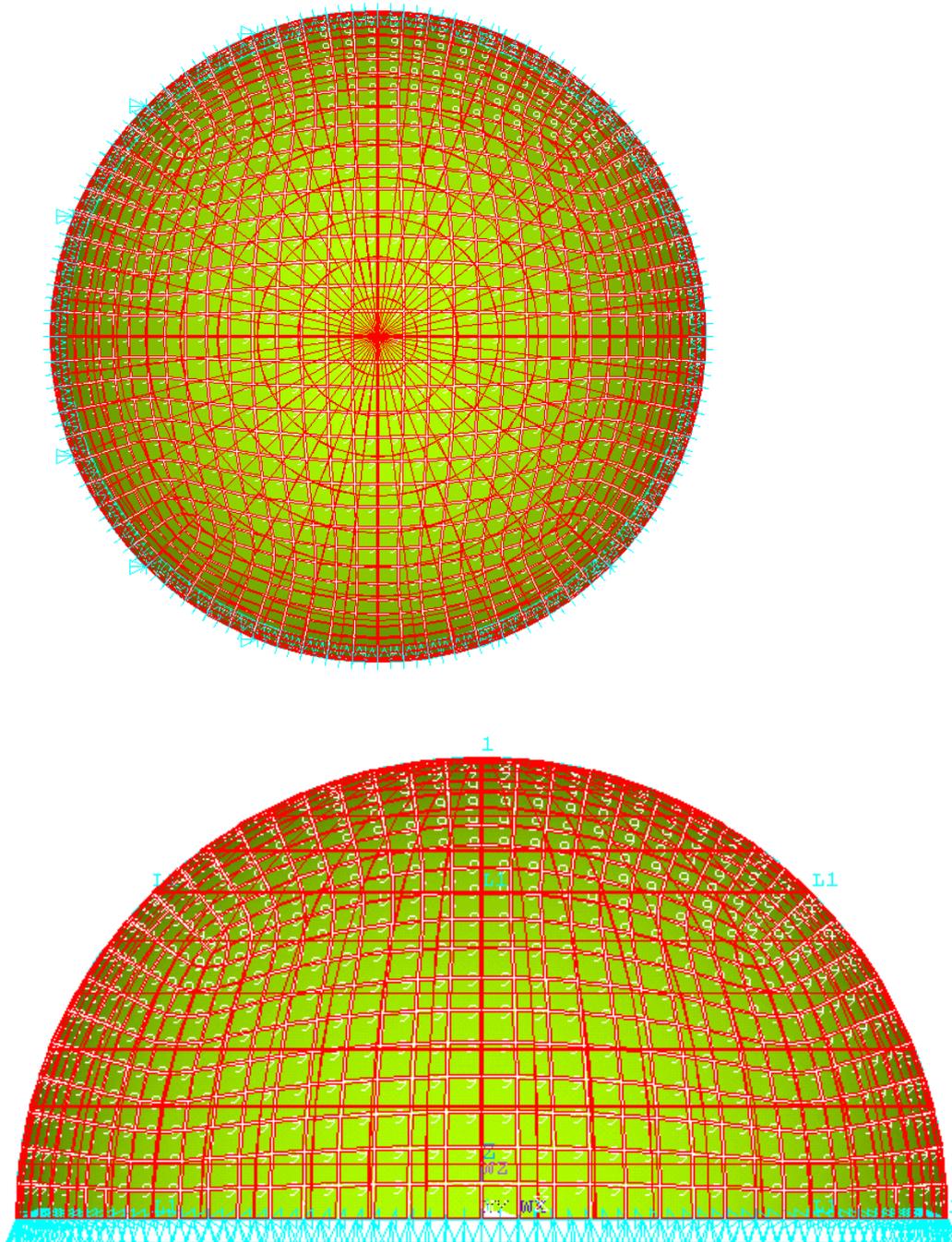


Ilustración 47: Cúpula: Planteamiento

Tesis de Máster

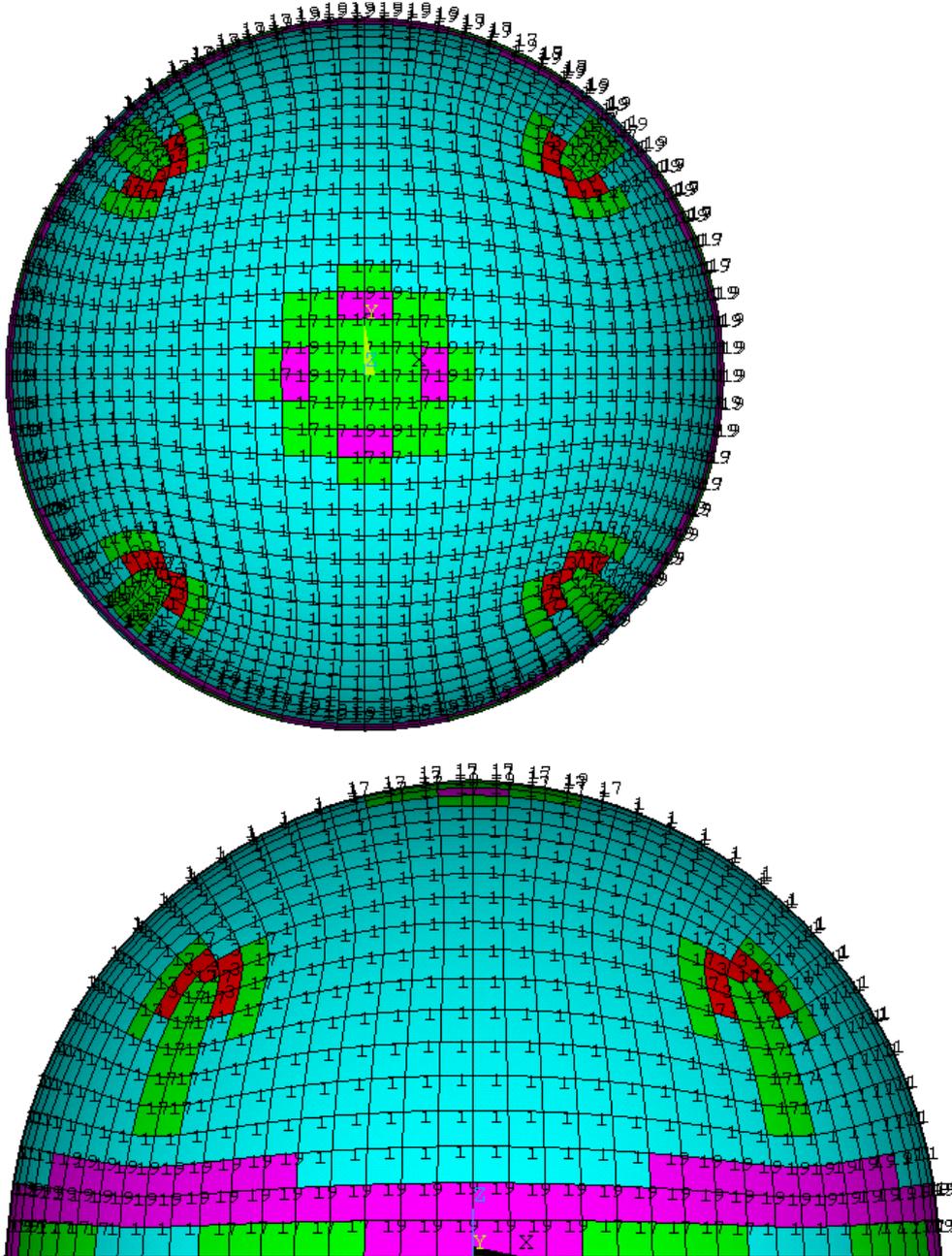


Ilustración 48: Cúpula: LAM_RUL

R	c1	c2	c3	c4	c5	c6
1	0	0	0	0	0	0
3	0	1	0	0	0	0
17	0	0	0	0	1	0
19	0	1	0	0	1	0

Tabla 16: Constantes Reales de la cúpula

Tesis de Máster

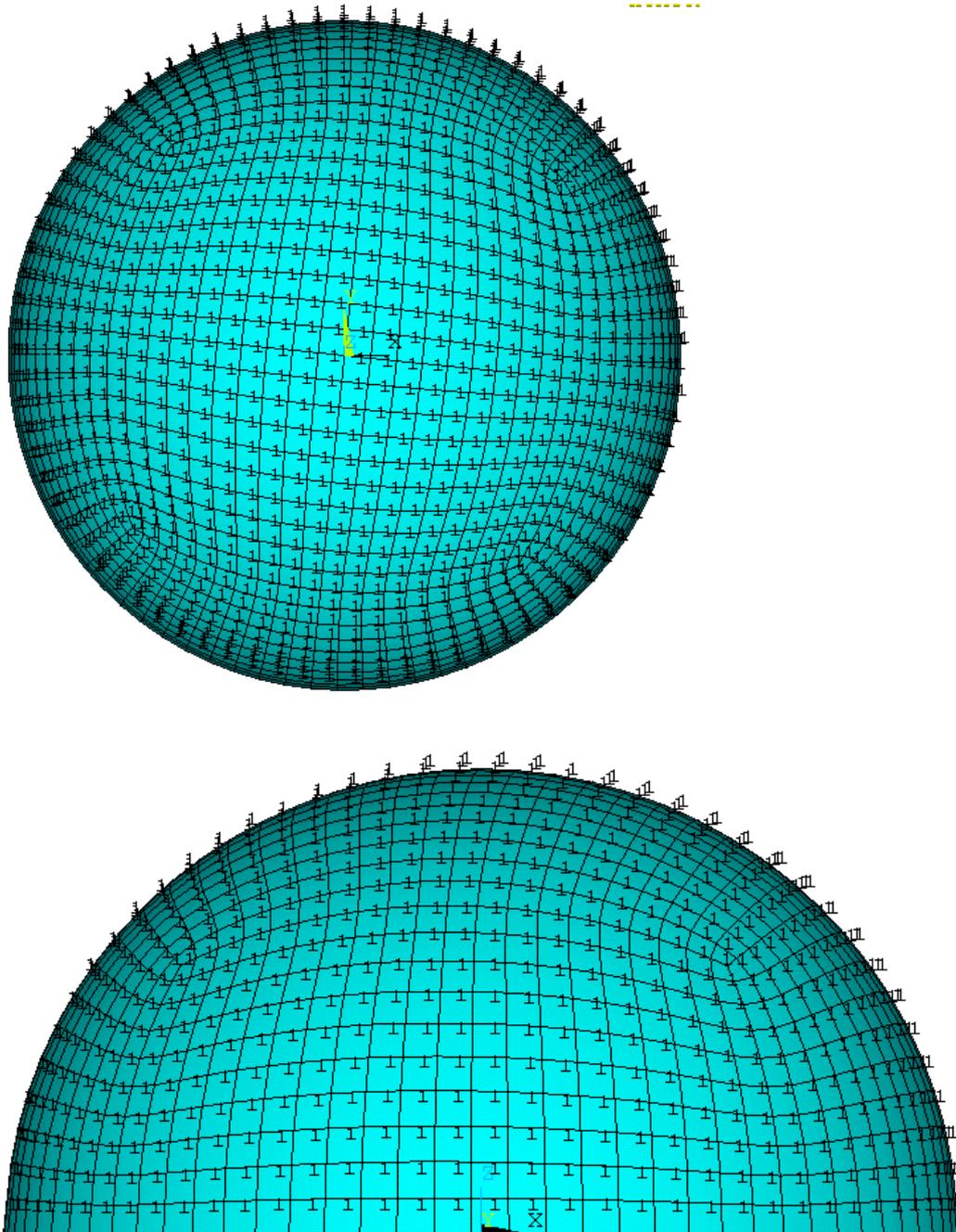


Ilustración 49: Cúpula: LAM_RUL_OPT



Tesis de Máster

		SET 2	SET 3	SET 4	SET 5	*SET 6*	SET 7	SET 8	SET 9	SET 10	SET 11	SET 12
		(FEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)
TETA1	DV	152.49	124.63	152.61	57.653	125.13	26.722	110.74	127.59	107.19	129.95	117.14
TETA2	DV	82.294	96.761	0.60020	142.69	12.602	34.624	29.989	138.25	29.590	35.371	28.412
TETA3	DV	69.839	111.23	84.438	104.78	62.511	18.943	147.17	17.792	77.129	13.187	76.737
VOBJ	OBJ	99.099	99.648	98.998	99.000	98.945	99.586	99.291	99.344	98.992	99.366	98.962
		SET 13	SET 14	SET 15	SET 16	SET 17	SET 18	SET 19	SET 20	SET 21	SET 22	SET 23
		(FEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)
TETA1	DV	35.869	82.968	165.57	25.598	94.077	96.156	96.618	95.162	96.781	98.585	99.273
TETA2	DV	128.53	74.085	47.102	138.45	75.118	72.778	75.994	74.998	73.629	69.645	72.725
TETA3	DV	19.689	68.862	17.568	61.003	68.436	68.156	68.200	68.476	68.306	68.509	68.518
VOBJ	OBJ	99.032	99.708	99.454	98.971	99.723	99.727	99.723	99.724	99.726	99.729	99.727
		SET 24	SET 25									
		(FEASIBLE)	(FEASIBLE)									
TETA1	DV	98.499	96.061									
TETA2	DV	69.842	70.802									
TETA3	DV	68.383	68.902									
VOBJ	OBJ	99.729	99.729									

Tabla 17: Cúpula: Diseños de optimización con límites 0 - 180/0 - 180/0 - 180

Los resultados parecen lógicos. Los cambios de las orientaciones a [125,1/12,6/62,5]s son próximos a las orientaciones esperadas [9/ 9 +60/ 9+120]s. La constante real 1, el EDMIN mayor que 1 y el NUMEFA igual a 0 son coherentes y confirman que la macros se han ejecutados bien.



Tesis de Máster

		SET 2	SET 3	SET 4	SET 5	SET 6	SET 7	SET 8	SET 9	SET 10	SET 11	SET 12
		(FEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)						
TETA1	DV	50.840	41.561	50.880	19.258	41.727	42.113	52.018	29.251	19.373	95.125	47.266
TETA2	DV	87.431	92.254	60.200	107.56	64.200	116.76	117.23	116.83	85.964	66.817	65.347
TETA3	DV	143.28	157.08	148.15	154.93	140.84	172.42	172.96	150.55	150.93	173.91	147.72
VOBJ	OBJ	98.999	98.977	99.000	98.961	98.998	99.432	99.428	98.996	98.743	99.299	98.921
		SET 13	SET 14	SET 15	SET 16	SET 17	SET 18	SET 19	SET 20	SET 21	SET 22	SET 23
		(FEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)						
TETA1	DV	56.374	55.073	23.489	25.886	24.934	24.912	24.886	24.948	24.869	24.277	71.714
TETA2	DV	66.112	110.70	80.623	78.312	79.395	79.183	79.098	79.153	79.190	81.595	111.85
TETA3	DV	159.84	131.78	150.30	150.29	149.70	149.73	149.72	149.69	149.71	148.73	127.82
VOBJ	OBJ	98.997	99.327	98.650	98.746	98.685	98.693	98.695	98.694	98.691	98.578	99.352
		SET 24	SET 25	SET 26	SET 27	SET 28	SET 29	*SET 30*	SET 31	SET 32	SET 33	SET 34
		(FEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)
TETA1	DV	70.359	16.787	24.551	28.794	12.945	28.851	25.348	24.057	33.480	25.173	25.088
TETA2	DV	110.40	104.05	84.877	88.201	90.471	89.781	85.127	73.010	95.794	85.633	85.524
TETA3	DV	128.29	134.20	147.16	142.55	145.58	144.94	145.52	135.56	143.80	144.31	144.45
VOBJ	OBJ	99.328	98.970	98.515	98.965	98.805	98.991	98.471	98.872	98.918	98.999	99.000

Tabla 18: Diseños de optimización con límites 0-60/60-120/120-180

Los resultados son mucho mejores que los anteriores, gracias a los límites refinados. Los cambios de las orientaciones a [25,3/85,1/145,5]s coinciden con las orientaciones esperadas [9/ 9 +60/ 9+120]s. El EMIN optimizado se mejora de 1,055 a 1,529, lo que confirma que la solución obtenida antes era un mínimo local.



5. Conclusiones

5.1. Algunas consideraciones finales

- Una limitación muy poco problemática, pero no despreciable, procede de la carga. Si la carga esta demasiada baja, es decir, si no se rompe ningún elemento o si la carga esta demasiada alta, es decir, se rompen todos los elementos en todas las capas, la aplicación de la macro LAM_RUL, que muestra la degradación del laminado tiene poco sentido. La única información que se puede sacar es que ningún elemento o bien todos los elementos se han roto y el coeficiente de seguridad mínimo para una posible modificación de carga que resulta algo más interesante. Aunque la aplicación de LAM_RUL_OPT para maximizar este coeficiente para modificar las orientaciones puede mejorar los resultados, en la mayoría de los casos, el efecto será muy bajo.
- La macro RNEW se ha implantado con un modelo de degradación de dos estados (material inicial o que ha fallado). Sin embargo, se ha concebido para poder incorporar con cierta facilidad otros modelos de degradación. La macro DEF_MAT está ya preparada para modelos de degradación con fallos en la fibra, en la matriz y la fibra o a cortadura.
- Se utiliza el método de aproximación mediante sub-problemas para cubrir una gran variedad de problemas. Si el usuario conoce aproximado los valores óptimos (después de la aplicación de herramientas del optimizador), el método de primer orden puede ser preferible.
- La optimización del modelo por la modificación de orientaciones está muy limitada. En la macro de optimización las tolerancias de las variables de diseño están pensadas con cinco



Tesis de Máster

grados para poder aplicarse en la práctica y para bajar el número de posibles modificaciones y no un sentido matemático. Pueden ser modificadas para llegar a resultados más exactos.

- Se consigue la maximización del coeficiente mínimo de seguridad por la minimización de la variable de función objetivo VOBJ. VOBJ está definida por el concepto $x_1 = Y - x$, con un valor Y mucho más alto que el valor más alto esperado de x, para evitar inexactitudes en las aproximaciones al problema inverso. Si se cambia al método de optimización de primer orden, se puede utilizar el método de $x_1 = 1/x$, excluyendo $x = 0$.
- El optimizador no muestra automáticamente el diseño óptimo, sino el último diseño creado. Esto puede resultar incómodo para los usuarios que solamente utilizan el interfaz gráfico GUI de ANSYS. La macro LAM_RUL acaba listando todos los diseños con el diseño óptimo marcado, y mostrando gráficamente los cambios en la función objetivo.
- Todas las macros están escritas en ANSYS 11.0, esto puede resultar en problemas en versiones posteriores.

Tesis de Máster

- Los resultados de las macros pueden ser poco exactos, si hay inexactitudes o errores en la geometría y/o la malla. Por ejemplo en la Ilustración 50 la diferencia de error de discretización asociada con el mallado puede producir inexactitudes e influir en los resultados de las macros.

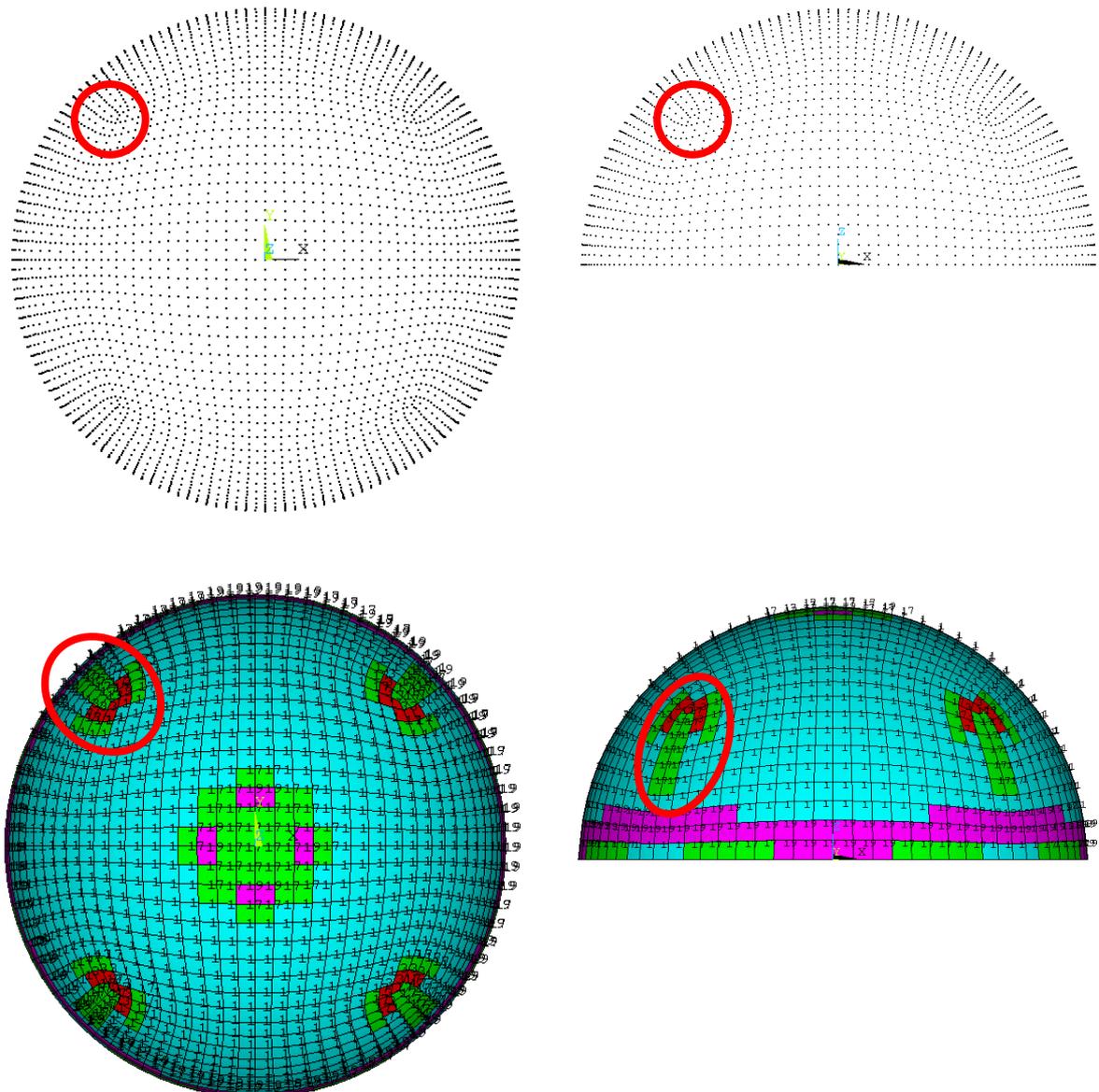


Ilustración 50: Efectos del modelo a la macro



5.2. Valoración

A lo largo del trabajo se ha puesto de manifiesto las posibilidades del programa ANSYS 11.0 classic cuando se utiliza el lenguaje interno de programación APDL.

Para poder visualizar la degradación y secuencia del apilado y poder conocer las constantes reales modificadas, se ha almacenado información adicional en parámetros del tipo vector.

Se ha separado en dos macros diferente el cálculo de la Secuencia del apilado en la macro LAM_RUL y la optimización en la macro LAM_RUL_OPT. Esto permite al usuario analizar fácilmente su problema con o sin optimización de orientaciones.

Se ha utilizado el criterio de la rotura de la última lamina que es no lineal y cuya implementación a nivel de un componente conlleva una cierta complejidad.

La herramienta y el método de optimización han sido elegidos para un rango amplio de aplicaciones para poder solucionar problemas de varios tipos. Este planteamiento permite obtener una gran flexibilidad. El método de aproximación mediante sub-problemas es menos preciso que el método de primer orden, pero en muchos casos esto es despreciable y se disminuyen el riesgo de encontrar un mínimo local del problema global.

La utilización de la macro LAM_RUL_OPT permite optimizar la secuencia de apilado con bastante facilidad. Además, pueden estudiarse fácilmente otros problemas de optimización simplemente modificando la función objetivo.

Las macros son casi completamente independientes del modelo. Lo único que hay que tener en cuenta es la utilización del tipo de elemento SHELL99. La macro LAM_RUL puede ser ejecutada si el problema está definido mediante la interfaz gráfica GUI o mediante un fichero batch. La macro LAM_RUL_OPT también es independiente, porque la macro LAM_RUL crea al final el fichero de análisis necesario para la realización de la optimización. No hace falta realizar cambios o modificaciones de las macros para resolver otros problemas.



Tesis de Máster

La verificación en el tema 4 muestra, que todas las macros funcionan bien y proporcionan buenos resultados. Los resultados de la optimización no son a 100% exactos, pero si muy aproximados. La variación como mucho de diez grados es aceptable teniendo en cuenta, que el rango de las variables de diseño, es decir las orientaciones, con 0° a 180° no están prácticamente limitadas para conseguir el máximo nivel de flexibilidad de la macro. La adaptación de la macro a otros problemas no es complicada en absoluto incluso para usuarios con muy poca experiencia en ANSYS. Solo hay que modificar las líneas de las variables del diseño (OPVAR, Par, DV, límite inferior, límite superior, tolerancia), poniendo limites cerca de las valores esperados. También se puede conseguir resultados mejores cambiando las tolerancias o aumentando el número de iteraciones, aunque aumenta el coste del cálculo.

Resumiendo hay que decir, que el trabajo ha satisfecho los objetivos previstos y dispone de muchas posibilidades para mejorar los resultados. Las macros son independientes y flexibles para la solución de problemas muy variados. El usuario puede aumentar el nivel de precisión sin complicaciones adaptando la macro a su problema.



6. Trabajos futuros

Todas las macros utilizadas en este trabajo se han creado y comprobado con la versión V 11.0 del programa ANSYS, lo que no permite asegurar que funciona correctamente en otras versiones, aunque en caso de no hacerlo cabe esperar que las modificaciones necesarias sean mínimas.

No todos los casos del fallo son cubiertos por la macro LAM_RUL, pero la macro DEF_MAT crea las propiedades de rigidez y resistencia de los materiales existentes en el modelo para fallos en la matriz y/o en la fibra y a cortadura. Con cambios se puede conseguir una aplicación de la macro LAM_RUL al fallo en la matriz, en la fibra, en fibra y matriz o a cortadura.

Los cálculos pueden extenderse a otros elementos incluso con modelos tridimensionales aunque será necesario llevar controles adicionales.



7. Bibliografía

- [1] Diapositivas de la asignatura “Diseño de materiales compuestos” del DIMM, Tema 5: Análisis de laminados, Teoría Clásica de Laminados
- [2] Diapositivas de la asignatura “Diseño de materiales compuestos” del DIMM, Tema 7: Criterios de fallo de lámina unidireccional bajo tensiones multiaxiales
- [3] Diapositivas de la asignatura “Diseño de materiales compuestos” del DIMM, Tema 8: Resistencia de laminados
- [4] Release 11.0 Documentation for ANSYS -> ANSYS Parametric Design Language
- [5] Release 11.0 Documentation for ANSYS -> Advanced Analysis Techniques Guide -> Design Optimizacion



Tesis de Máster

8. Anexo

8.1. Macro DEF_MAT sin comentarios

```
*DIM,MATTABLA,ARRAY,100,4,1
```

```
FACT_RED1 = 1.0E-7
```

```
FACT_RED2 = 1.0E-7
```

```
*DO,IMAT,1,100,1
```

```
*GET,EE,EX,IMAT,TEMP,20
```

```
*IF,EE,GE,1,THEN
```

```
*GET,EXK,EX,IMAT,TEMP,20
```

```
*GET,EYK,EY,IMAT,TEMP,20
```

```
*GET,EZK,EZ,IMAT,TEMP,20
```

```
*GET,NUXYK,NUXY,IMAT,TEMP,20
```

```
*GET,NUYZK,NUYZ,IMAT,TEMP,20
```

```
*GET,NUXZK,NUXZ,IMAT,TEMP,20
```

```
*GET,GXYK,GXY,IMAT,TEMP,20
```

```
*GET,GYZK,GYZ,IMAT,TEMP,20
```

```
*GET,GXZK,GXZ,IMAT,TEMP,20
```

```
JMAT = IMAT+100
```

```
MP,REFT,JMAT,20
```



Tesis de Máster

MP,EX,JMAT,EXK

MP,EY,JMAT,FACT_RED1*EYK

MP,EZ,JMAT,EZK

MP,NUXY,JMAT,FACT_RED1*NUXYK

MP,NUYZ,JMAT,NUYZK

MP,NUXZ,JMAT,NUXZK

MP,GXY,JMAT,FACT_RED1*GXYK

MP,GYZ,JMAT,GYZK

MP,GXZ,JMAT,GXZK

JMAT = IMAT+200

MP,REFT,JMAT,20

MP,EX,JMAT,FACT_RED2*EXK

MP,EY,JMAT,EYK

MP,EZ,JMAT,EZK

MP,NUXY,JMAT,FACT_RED2*NUXYK

MP,NUYZ,JMAT,NUYZK

MP,NUXZ,JMAT,NUXZK

MP,GXY,JMAT,FACT_RED2*GXYK

MP,GYZ,JMAT,GYZK



Tesis de Máster

MP,GXZ,JMAT,GXZK

JMAT = IMAT+300

MP,REFT,JMAT,20

MP,EX,JMAT,FACT_RED2*EXK

MP,EY,JMAT,FACT_RED2*EYK

MP,EZ,JMAT,EZK

MP,NUXY,JMAT,FACT_RED2*NUXYK

MP,NUYZ,JMAT,NUYZK

MP,NUXZ,JMAT,NUXZK

MP,GXY,JMAT,FACT_RED2*GXK

MP,GYZ,JMAT,GYZK

MP,GXZ,JMAT,GXZK

TBCOPY,ALL,IMAT+100,IMAT

TBCOPY,ALL,IMAT+200,IMAT

TBCOPY,ALL,IMAT+300,IMAT

MATTABLA(IMAT,1,1) = IMAT

MATTABLA(IMAT,2,1) = 100+IMAT

MATTABLA(IMAT,3,1) = 200+IMAT

MATTABLA(IMAT,4,1) = 300+IMAT

*ENDIF



Universidad Politécnica de Valencia
Departamento de Ingeniería Mecánica y Materiales



Tesis de Máster

*ENDDO



Tesis de Máster

8.2. Macro NRCON sin comentarios

```
*IF,RNUM,EQ,0,THEN

NUMCMP,REAL

*GET, RNUM, RCON, 0, NUM, COUNT,

*GET, RMAX, RCON, 0, NUM, MAX

VRCON =

*DIM,AUXVEC,ARRAY,RNUM,1,1

*DIM,VRCON,ARRAY,RNUM,4,1

JCON=0

*DO,IRCON,1,RMAX,1

*GET, RRAUX, RCON, IRCON, CONST, 1,

*IF,RRAUX,GE,1,THEN

JCON = JCON + 1

VRCON(JCON,1,1) = IRCON

*GET,NCAPAS,RCON,IRCON,CONST,1

VRCON(JCON,2,1) = NCAPAS

AUXVEC(JCON,1,1) = NCAPAS

ESEL,S,REAL,,IRCON

JELEM=0
```



Tesis de Máster

```
*GET,MXELEM,ELEM,0,COUNT

*DO,IELEM,1,MXELEM,1

    JELEM = ELNEXT(JELEM)

    EREAL(JELEM,1) = IRCON

    EREAL(JELEM,2) = IRCON

    EREAL(JELEM,3) = 0

    EREAL(JELEM,4) = NCAPAS

*ENDDO

*IF,JCON,EQ,1,THEN

    INICOD = RMAX + 1

    FINCOD = RMAX - 1 + 2**NCAPAS

*ELSE

    INICOD = FINCOD + 1

    FINCOD = FINCOD - 1 + 2**NCAPAS

*ENDIF

VRCON(JCON,3,1) = INICOD

VRCON(JCON,4,1) = FINCOD

*ENDIF

*ENDDO
```



Tesis de Máster

*VOPER, MM, AUXVEC, MAX

MXCAPAS=MM(1,1)

*DIM,ELECOEF,ARRAY,NTELEM,MXCAPAS,1

*ENDIF

AUXVEC=

MM =

ELEFAL=

ELESEC=

*DIM,ELEFAL,ARRAY,NTELEM,MXCAPAS,1

*DIM,ELESEC,ARRAY,NTELEM,MXCAPAS+1,1



Tesis de Máster

8.3. Macro RNEW sin comentarios

```
RCONINI = EREAL(JELEM,1)

RCONACT = EREAL(JELEM,2)

CAPAS = EREAL(JELEM,4)

*GET, RRAUX, RCON, RCONACT, CONST, 1,

*IF,RRAUX,LT,1,THEN

R,RCONACT,CAPAS,0,0,0,0,0

NCAP=NINT(CAPAS/2)

*DO,ICAP,1,NCAP-1,1

ICONST=12+6*(ICAP-1)+1

*GET,IMAT1,RCON,RCONINI,CONST,ICONST

IRCAP = 2*(ICAP-1)+1

*IF,ELEFAL(JELEM,IRCAP,1),EQ,0,THEN

MAT1 = MATTABLA(IMAT1,1,1)

*ELSEIF,ELEFAL(JELEM,IRCAP,1),EQ,1,THEN

MAT1 = MATTABLA(IMAT1,2,1)

*ELSEIF,ELEFAL(JELEM,IRCAP,1),EQ,2,THEN

MAT1 = MATTABLA(IMAT1,3,1)

*ENDIF
```



Tesis de Máster

```
ICONST=12+6*(ICAP-1)+2

*GET,TECTA1,RCON,RCONINI,CONST,ICONST

ICONST=12+6*(ICAP-1)+3

*GET,TC1,RCON,RCONINI,CONST,ICONST

ICONST=12+6*(ICAP-1)+4

*GET,IMAT2,RCON,RCONINI,CONST,ICONST

IRCAP = 2*(ICAP-1)+2

*IF,ELEFAL(JELEM,IRCAP,1),EQ,0,THEN

    MAT2 = MATTABLA(IMAT2,1,1)

*ELSEIF,ELEFAL(JELEM,IRCAP,1),EQ,1,THEN

    MAT2 = MATTABLA(IMAT2,2,1)

*ELSEIF,ELEFAL(JELEM,IRCAP,1),EQ,2,THEN

    MAT2 = MATTABLA(IMAT2,3,1)

*ENDIF

ICONST=12+6*(ICAP-1)+5

*GET,TECTA2,RCON,RCONINI,CONST,ICONST

ICONST=12+6*(ICAP-1)+6

*GET,TC2,RCON,RCONINI,CONST,ICONST

ICONST=12+6*(ICAP-1)+1
```



Tesis de Máster

```
RMODIF,RCONACT,ICONST,MAT1,TECTA1,TC1,MAT2,TECTA2,TC2
```

```
*ENDDO
```

```
*IF,CAPAS/2,EQ,NCAP,THEN
```

```
ICONST=12+6*(NCAP-1)+1
```

```
*GET,IMAT1,RCON,RCONINI,CONST,ICONST
```

```
IRCAP = 2*(NCAP-1)+1
```

```
*IF,ELEFAL(JELEM,IRCAP,1),EQ,0,THEN
```

```
MAT1 = MATTABLA(IMAT1,1,1)
```

```
*ELSEIF,ELEFAL(JELEM,IRCAP,1),EQ,1,THEN
```

```
MAT1 = MATTABLA(IMAT1,2,1)
```

```
*ELSEIF,ELEFAL(JELEM,IRCAP,1),EQ,2,THEN
```

```
MAT1 = MATTABLA(IMAT1,3,1)
```

```
*ENDIF
```

```
ICONST=12+6*(NCAP-1)+2
```

```
*GET,TECTA1,RCON,RCONINI,CONST,ICONST
```

```
ICONST=12+6*(NCAP-1)+3
```

```
*GET,TC1,RCON,RCONINI,CONST,ICONST
```

```
ICONST=12+6*(NCAP-1)+4
```

```
*GET,IMAT2,RCON,RCONINI,CONST,ICONST
```



Tesis de Máster

```
IRCAP = 2*(NCAP-1)+2

*IF,ELEFAL(JELEM,IRCAP,1),EQ,0,THEN

    MAT2 = MATTABLA(IMAT2,1,1)

*ELSEIF,ELEFAL(JELEM,IRCAP,1),EQ,1,THEN

    MAT2 = MATTABLA(IMAT2,2,1)

*ELSEIF,ELEFAL(JELEM,IRCAP,1),EQ,2,THEN

    MAT2 = MATTABLA(IMAT2,3,1)

*ENDIF

ICONST=12+6*(NCAP-1)+5

*GET,TECTA2,RCON,RCONINI,CONST,ICONST

ICONST=12+6*(NCAP-1)+6

*GET,TC2,RCON,RCONINI,CONST,ICONST

ICONST=12+6*(NCAP-1)+1

RMODIF,RCONACT,ICONST,MAT1,TECTA1,TC1,MAT2,TECTA2,TC2

*ELSE

    ICONST=12+6*(NCAP-1)+1

*GET,IMAT1,RCON,RCONINI,CONST,ICONST

IRCAP = 2*(NCAP-1)+1

*IF,ELEFAL(JELEM,IRCAP,1),EQ,0,THEN
```



Tesis de Máster

```
MAT1 = MATTABLA(IMAT1,1,1)

*ELSEIF,ELEFAL(JELEM,IRCAP,1),EQ,1,THEN

    MAT1 = MATTABLA(IMAT1,2,1)

*ELSEIF,ELEFAL(JELEM,IRCAP,1),EQ,2,THEN

    MAT1 = MATTABLA(IMAT1,3,1)

*ENDIF

ICONST=12+6*(NCAP-1)+2

*GET,TECTA1,RCON,RCONINI,CONST,ICONST

ICONST=12+6*(NCAP-1)+3

*GET,TC1,RCON,RCONINI,CONST,ICONST

    ICONST=12+6*(NCAP-1)+1

RMODIF,RCONACT,ICONST,MAT1,TECTA1,TC1

*ENDIF

*ENDIF
```



Tesis de Máster

8.4. Macro LAM_RUL_OPT sin comentarios

```
/opt
```

```
OPANL,'AFOPT',,,'
```

```
*IF,TETA1,LT,0,THEN
```

```
TETA1 = 180 + TETA1
```

```
*ENDIF
```

```
*IF,TETA2,LT,0,THEN
```

```
TETA2 = 180 + TETA2
```

```
*ENDIF
```

```
*IF,TETA3,LT,0,THEN
```

```
TETA3 = 180 + TETA3
```

```
*ENDIF
```

```
OPVAR,TETA1,DV,0.001,180,0.01
```

```
OPVAR,TETA2,DV,0.001,180, 0.01
```

```
OPVAR,TETA3,DV,0.001,180,0.01
```

```
OPVAR,VOBJ,OBJ,,, 0.001
```

```
opkeep,on
```

```
OPRAND,15,5
```



Tesis de Máster

OPTYPE,RAND

OPSAVE,anfile,opt0

OPEXE

OPSEL,-1

OPSUBP,30,7

OPTYPE,SUBP

OPSAVE,anfile,opt0

OPEXE

OPLIST,ALL,,,1

PLVAROPT,TETA1,TETA2,TETA3

PLVAROPT,VOBJ



Tesis de Máster

8.5. Placa_c3

```
/PNUM,REAL,1  
  
RNUM      = 0  
  
L = 1  
  
B = 1  
  
X1      = 0  
  
Y1      = 0  
  
X2      = L  
  
Y2      = 0  
  
X3      = L  
  
Y3      = B  
  
X4      = 0  
  
Y4      = B  
  
T1      = 2.12/1e3  
  
T2      = 21.2/1e3  
  
T3      = 2.12/1e3  
  
Teta1   = 0  
  
Teta2   = 90  
  
Teta3   = 0  
  
Pressure= -5.0e6  
  
PCM     = 0.05  
  
/PREP7  
  
ET,1,SHELL99  
  
KEYOPT,1,2,0  
  
KEYOPT,1,3,0
```



Tesis de Máster

```
KEYOPT,1,4,0
KEYOPT,1,5,1
KEYOPT,1,6,1
KEYOPT,1,8,1
KEYOPT,1,9,0
KEYOPT,1,10,0
KEYOPT,1,11,0

R,9

RMODIF,9,1,3,0,0,0,0,0
RMODIF,9,13,1,Teta1,T1,1,Teta2,T2,
RMODIF,9,19,1,Teta3,T3,

NVARIA = 45

*DIM,VV,ARRAY,15,3,1

*VREAD,VV,'MAT_PROP','DAT',,KIJ,1,15,3

(G9.4)

EX1 = VV(1,1)
EY1 = VV(2,1)
EZ1 = VV(3,1)
NUXY1 = VV(4,1)
NUYZ1 = VV(5,1)
NUXZ1 = VV(6,1)
GXY1 = VV(7,1)
GYZ1 = VV(8,1)
GXZ1 = VV(9,1)
SXT1 = VV(10,1)
```



Tesis de Máster

```
SXC1      = -VV(11,1)
SYT1      = VV(12,1)
SYC1      = -VV(13,1)
SXYS1     = VV(14,1)
FXYN1     = -VV(15,1)

VV =

NVARIA =

TB,FAIL,1,1

TBTEMP,,CRIT

TBDATA,1,0,0,2,0,0,0

TBTEMP,20

TBDATA,10,SXT1,SXC1,SYT1,SYC1,1E12,-1E12

TBDATA,,SXYS1,1E12,1E12,2*FXYN1,0,0

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,EX,1,,EX1

MPDATA,EY,1,,EY1

MPDATA,EZ,1,,EZ1

MPDATA,NUXY,1,,NUXY1

MPDATA,NUYZ,1,,NUYZ1

MPDATA,NUXZ,1,,NUXZ1

MPDATA,GXY,1,,GXY1

MPDATA,GYZ,1,,GYZ1

MPDATA,GXZ,1,,GXZ1
```



Tesis de Máster

```
K, 1, X1, Y1, ,  
K, 2, X2, Y2, ,  
K, 3, X3, Y3, ,  
K, 4, X4, Y4, ,  
  
LSTR,      1,      2  
LSTR,      2,      3  
LSTR,      3,      4  
LSTR,      4,      1  
  
A, 1, 2, 3, 4  
  
AATT, 1, 9, 1, 0  
  
AESIZE, ALL, PCM,  
  
MSHAPE, 0, 2D  
  
MSHKEY, 1  
  
AMESH, ALL  
  
DL, 4, , UX,  
  
DK, 1, UY, , , 0, UZ, , , , , ,  
DK, 4, UZ, , , 0, , , , , , ,  
  
SFL, 2, PRES, Pressure,  
  
FINISH  
  
LAM_RUL
```



Tesis de Máster

8.6. Placa_c6_sfa

```
/PNUM, REAL, 1  
  
L = 1  
  
B = 1  
  
X1      = 0  
  
Y1      = 0  
  
X2      = L  
  
Y2      = 0  
  
X3      = L  
  
Y3      = B  
  
X4      = 0  
  
Y4      = B  
  
T1      = 2.12/1e3  
  
T2      = 2.12/1e3  
  
T3      = 2.12/1e3  
  
Teta1   = 0  
  
Teta2   = 45  
  
Teta3   = -45  
  
Pressure= -1.25e6  
  
PCM     = 0.05  
  
VV =  
  
/PREP7  
  
ET, 1, SHELL99  
  
KEYOPT, 1, 2, 0  
  
KEYOPT, 1, 3, 0
```



Tesis de Máster

```
KEYOPT,1,4,0
KEYOPT,1,5,1
KEYOPT,1,6,1
KEYOPT,1,8,1
KEYOPT,1,9,0
KEYOPT,1,10,0
KEYOPT,1,11,0

R,9

RMODIF,9,1,6,0,0,0,0,0
RMODIF,9,13,1,Teta1,T1,1,Teta2,T2,
RMODIF,9,19,1,Teta3,T3,1,Teta3,T3
RMODIF,9,25,1,Teta2,T2,1,Teta1,T1

NVARIA = 45

*DIM,VV,ARRAY,15,3,1

*VREAD,VV,'MAT_PROP','DAT',,KIJ,1,15,3

(G9.4)

EX1 = VV(1,1)
EY1 = VV(2,1)
EZ1 = VV(3,1)
NUXY1 = VV(4,1)
NUYZ1 = VV(5,1)
NUXZ1 = VV(6,1)
GXY1 = VV(7,1)
GYZ1 = VV(8,1)
GXZ1 = VV(9,1)
```



Tesis de Máster

```
SXT1      = VV(10,1)
SXC1      = -VV(11,1)
SYT1      = VV(12,1)
SYC1      = -VV(13,1)
SXYS1     = VV(14,1)
FXYN1     = -VV(15,1)

VV =

NVARIA =

TB, FAIL, 1, 1

TBTEMP, , CRIT

TBDATA, 1, 0, 0, 2, 0, 0, 0

TBTEMP, 20

TBDATA, 10, SXT1, SXC1, SYT1, SYC1, 1E12, -1E12

TBDATA, , SXYS1, 1E12, 1E12, 2*FXYN1, 0, 0

MPTEMP, , , , , , , ,

MPTEMP, 1, 0

MPDATA, EX, 1, , , EX1

MPDATA, EY, 1, , , EY1

MPDATA, EZ, 1, , , EZ1

MPDATA, NUXY, 1, , , NUXY1

MPDATA, NUYZ, 1, , , NUYZ1

MPDATA, NUXZ, 1, , , NUXZ1

MPDATA, GXY, 1, , , GXY1

MPDATA, GYZ, 1, , , GYZ1

MPDATA, GXZ, 1, , , GXZ1
```



Tesis de Máster

K, 1, X1, Y1, ,

K, 2, X2, Y2, ,

K, 3, X3, Y3, ,

K, 4, X4, Y4, ,

LSTR, 1, 2

LSTR, 2, 3

LSTR, 3, 4

LSTR, 4, 1

A, 1, 2, 3, 4

AATT, 1, 9, 1, 0

AESIZE, ALL, PCM,

MSHAPE, 0, 2D

MSHKEY, 1

AMESH, ALL

DL, 2, , ALL

DL, 4, , ALL

SFA, 1, 1, PRES, Pressure

FINISH

LAM_RUL



Tesis de Máster

8.7. Cúpula

```
/PNUM,REAL,1  
  
RNUM      = 0  
  
RCIRC     = 5  
  
T1        = 1.5/1e3  
  
T2        = 1.5/1e3  
  
T3        = 1.5/1e3  
  
Teta1     = 90  
  
Teta2     = 0  
  
Teta3     = 90  
  
Pressure= 1.2e6  
  
DENS1 = 3e3  
  
PCM      = 0.4  
  
/PREP7  
  
ET,1,SHELL99  
  
KEYOPT,1,2,0  
  
KEYOPT,1,3,0  
  
KEYOPT,1,4,0  
  
KEYOPT,1,5,1  
  
KEYOPT,1,6,1  
  
KEYOPT,1,8,1  
  
KEYOPT,1,9,0  
  
KEYOPT,1,10,0  
  
KEYOPT,1,11,0
```



Tesis de Máster

R, 9

RMODIF, 9, 1, 6, 0, 0, 0, 0, 0

RMODIF, 9, 13, 1, Teta1, T1, 1, Teta2, T2,

RMODIF, 9, 19, 1, Teta3, T3, 1, Teta3, T3,

RMODIF, 9, 25, 1, Teta2, T2, 1, Teta1, T1,

*DIM, VV, ARRAY, 15, 3, 1

*VREAD, VV, 'MAT_PROP', 'DAT', , , KIJ, 1, 15, 3

(G9.4)

EX1 = VV(1,1)

EY1 = VV(2,1)

EZ1 = VV(3,1)

NUXY1 = VV(4,1)

NUYZ1 = VV(5,1)

NUXZ1 = VV(6,1)

GXY1 = VV(7,1)

GYZ1 = VV(8,1)

GXZ1 = VV(9,1)

SXT1 = VV(10,1)

SXC1 = -VV(11,1)

SYT1 = VV(12,1)

SYC1 = -VV(13,1)

SXYS1 = VV(14,1)

FXYN1 = -VV(15,1)

VV =



Tesis de Máster

```
TB, FAIL, 1, 1

TBTEMP, , CRIT

TBDDATA, 1, 0, 0, 2, 0, 0, 0

TBTEMP, 20

TBDDATA, 10, SXT1, SXC1, SYT1, SYC1, 1E12, -1E12

TBDDATA, , SXYS1, 1E12, 1E12, 2*FXYN1, 0, 0

MPTEMP, , , , , , , ,

MPTEMP, 1, 0

MPDATA, EX, 1, , EX1

MPDATA, EY, 1, , EY1

MPDATA, EZ, 1, , EZ1

MPDATA, NUXY, 1, , NUXY1

MPDATA, NUYZ, 1, , NUYZ1

MPDATA, NUXZ, 1, , NUXZ1

MPDATA, GXY, 1, , GXY1

MPDATA, GYZ, 1, , GYZ1

MPDATA, GXZ, 1, , GXZ1

MPDATA, DENS, 1, , DENS1

WPRO, , 90.000000,

/PREP7

CYL4, 0, 0, RCIRC

ADELE, 1

LDELE, 2

LDELE, 3

LDELE, 4
```



Tesis de Máster

```
K, , 0.0, 0.0, 0.0
AROTAT, 1, , , , , 2, 5, 360, ,
AGLUE, 1, 2, 3, 4,
WPCSYS, -1, 0
CSWPLA, 11, 2, 1, 1,
AATT, 1, 9, 1, 11
AESIZE, ALL, PCM,
MSHAPE, 0, 2D
MSHKEY, 1
AMESH, ALL
LSEL, S, LINE, , 5, 8, 1, 1
CM, CIRCUNFERNECIA INFERIOR, NODE
CSYS, 11
NROTAT, ALL
CSYS, 0,
ALLSEL, ALL
DL, 5, , UX,
DL, 6, , UX,
DL, 7, , UX,
DL, 8, , UX,
DL, 5, , UZ,
DL, 6, , UZ,
DL, 7, , UZ,
DL, 8, , UZ,
ACEL, 0, 0, -9.81,
```



Tesis de Máster

SFA, 1, 1, PRES, Pressure

SFA, 2, 1, PRES, Pressure

SFA, 3, 1, PRES, Pressure

SFA, 4, 1, PRES, Pressure

SAVE

LAM_RUL