

Trabajo Fin de Máster
Máster en Ingeniería Aeronáutica

Estudio del estado tensional en las esquinas del
espécimen “Off-Axis” mediante modelos FEM 2D y 3D

Autor: Aurelio Jesús Piña Méndez

Tutor: Alberto Barroso Caro

Juan Carlos Marín Vallejo

Dpto. Mecánica de Medios Continuos y
Teoría de Estructuras
Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla, 2021



Trabajo Fin de Máster
Máster en Ingeniería Aeronáutica

**Estudio del estado tensional en las esquinas del
espécimen “Off-Axis” mediante modelos FEM 2D y
3D**

Autor:

Aurelio Jesús Piña Méndez

Tutor:

Alberto Barroso Caro

Juan Carlos Marín Vallejo

Dpto. Mecánica de Medios Continuos y

Teoría de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021

Trabajo Fin de Máster: Estudio del estado tensional en las esquinas del espécimen “Off-Axis” mediante modelos FEM 2D y 3D

Autor: Aurelio Jesús Piña Méndez

Tutor: Alberto Barroso Caro

Juan Carlos Marín Vallejo

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2021

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

Con este trabajo pongo fin a una etapa muy importante de mi vida. Y quería agradecer a todas esas personas que han hecho posible que haya llegado hasta aquí.

Ante todo, me gustaría agradecer a todos los profesores que he tenido, tanto en la universidad como fuera de ella. En especial a Alberto Barroso y Juan Carlos Marín por toda su ayuda, esfuerzo y dedicación.

A mis amigos y compañeros, por llenar esta etapa de buenos recuerdos y por acompañarme siempre. Señalar a Carlos y José Luis por esos buenos momentos compartidos durante el Máster.

Reservo el último párrafo para agradecer a las personas más importantes en mi vida, mi familia, a los cuales les debo todos mis logros. Mariángeles, Tula y Aurora, mis hermanas, gracias por vuestro apoyo, por estar siempre ahí, por animarme y por ser esa pieza tan fundamental en mi vida. A mis padres, Aurora y Aurelio, por creer siempre en mí, darme todas todas oportunidades y apoyarme en todo momento.

GRACIAS

Aurelio Jesús Piña Méndez

Sevilla, 2021

Resumen

Este trabajo está motivado por la observación de fallos prematuros en las probetas “Off-Axis” de tracción para la caracterización de la resistencia a cortadura intralaminar en materiales compuestos unidireccionales. Dichos fallos se concentran en muchos casos, en el entorno de las esquinas que forma la probeta con el taco de agarre a las mordazas de la máquina de ensayos. Se ha realizado un estudio del estado tensional singular en estos puntos críticos y su dependencia con los parámetros geométricos y mecánicos que caracterizan el problema. Así como la dependencia con el módulo de cizalladura, dado la no uniformidad de éste a lo largo del ensayo.

El análisis se ha llevado a cabo empleando herramientas semianalíticas y MEF 2D y 3D, simulando las condiciones que tendría el espécimen en un ensayo “Off-Axis” de un compuesto grafito-epoxi. A partir de dichos modelos se han calculado los ordenes de singularidades en tensión (δ), así como el cálculo de los factores de intensificación de tensiones (K), para los distintos parámetros geométricos y módulos de cortaduras. Obteniendo mediante este estudio los gráficos de variación de los parámetros que definen el estado singular con los parámetros geométricos del problema (ángulo de la fibra, ángulo de los tacos y ratio longitud/ancho del espécimen).

Índice

Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Índice	xi
Índice de Tablas	xiii
Índice de Figuras	xv
1 Introducción	1
1.1 Ensayos mecánicos	1
1.2 Singularidad de Tensión	3
2 Modelado con elementos finitos	5
2.1 Modelo 2D	8
2.1.1 Cálculo del orden de singularidad para ratio 10, orientación de fibra 10° y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$	8
2.1.2 Variación del orden de singularidad con el ratio	10
2.1.3 Variación del orden de singularidad con la orientación de la fibra	11
2.1.4 Variación del Fator de Intensificaciones de Tensiones con el Ratio	13
2.1.5 Variación del Factor de Intensificaciones de Tensiones con el ángulo.	26
2.2 Modelo 3D	31
2.2.1 Variación del orden de singularidad con el ratio	37
2.2.2 Variación del orden de singularidad con la orientación de la fibra	38
2.2.3 Variación del Factor de Intensificaciones de Tensiones con el Ratio	40
2.2.4 Variación del Factor de Intensificaciones de Tensiones con la orientación de las fibras	49
3 Conclusiones	53
Anexo	55
Referencias	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Ángulos teóricos de los tacos y orden de singularidad correspondiente para las distintas orientaciones de las fibras.	13
Tabla 2.2. Ángulo de inclinación del taco teórico y singularidad nula. Las columnas tres y cuatro corresponden a las singularidades obtenidas mediante los modelos MEF realizados en este trabajo, mientras que la última columna corresponde con las singularidades calculadas en [8].	13
Tabla 2.3. K1 para $\phi=90^\circ$ y $\theta = 10^\circ$	17
Tabla 2.5. K12 para $\phi=90^\circ$ y $\theta = 10^\circ$	17
Tabla 2.6. K2 para $\phi=90^\circ$ y $\theta = 10^\circ$	17
Tabla 2.7. Valores de FITG correspondientes a los ángulos teóricos para $G12 = 4.28$ GPa y distintas orientaciones.	30
Tabla 2.8. Valores de FITG correspondientes a los ángulos teóricos para $G12 = 2$ GPa y distintas orientaciones.	30
Tabla 2.9. Ángulos teóricos de los tacos y orden de singularidad correspondiente para las distintas orientaciones de las fibras.	40
Tabla 2.10. Ángulos teóricos y ángulos del taco con $\delta = 0$.	40
Tabla 2.11. Valores de FITG correspondientes a los ángulo teóricos. Modelo 3D	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Esquema de la probeta del ensayo Off-Axis	1
Figura 1.3. Esquema de la deformada de la probeta del ensayo Off-Axis. El caso (a) corresponde a la deformada ideal, el caso (b) corresponde a la deformada debido al sistema de cogida real, y por último, el caso (c) es la solución propuesta de Pagano para aproximar la configuración real. [4]	3
Figura 1.4 Esquema de la configuración geométrica del extremo de la probeta	3
Figura 2.1. Módulo de cortadura	5
Figura 2.2. Detalle del mallado del modelo de elementos finitos en el espécimen	6
Figura 2.3. Detalle del mallado del modelo de elementos finitos en el extremo de la probeta	6
Figura 2.4. Detalle del mallado del modelo de elementos finitos en el modelo 3D	7
Figura 2.5. Detalle del mallado en la unión taco-probeta modelo 3D	7
Figura 2.6. Distribución de tensiones σ_1 (MPa) ratio 10, taco recto y $G_{12} = 2$ GPa	8
Figura 2.7. Zoom distribución de tensiones σ_1 (MPa) ratio 10, taco recto y $G_{12} = 2$ GPa	8
Figura 2.8. Evolución de las tensiones σ_1 (MPa)	9
Figura 2.9. Recta de regresión. Evolución de las tensiones σ_1 (MPa) en la esquina en escala logarítmica.	9
Figura 2.10. Variación del orden de singularidad con el ángulo del taco para distintos ratios. $\theta = 10^\circ$ y $G_{12} = 4.28$ GPa	11
Figura 2.11. Variación del orden de singularidad con el ángulo del taco para distintos ratios.	11
Figura 2.12. Variación del orden de singularidad con el ángulo del taco para distintas orientaciones de las fibras. Ratio 10 y $G_{12} = 4.28$ GPa	12
Figura 2.13. Variación del orden de singularidad con el ángulo del taco para distintas orientaciones de las fibras. Ratio 10 y $G_{12} = 2$ GPa	12
Figura 2.14. Variación del FITGs respecto a σ_1 para distintos ratios $\theta = 10^\circ$ y $G_{12} = 4.28$ GPa	14
Figura 2.15. Variación del FITGs respecto a σ_{12} para distintos ratios $\theta=10^\circ$ y $G_{12} = 4.28$ GPa	14
Figura 2.16. Variación del FITGs respecto a σ_2 para distintos ratios $\theta=10^\circ$ y $G_{12} = 4.28$ GPa	15
Figura 2.17. Variación del FITGs respecto a σ_1 para distintos ratios $\theta = 10^\circ$ y $G_{12} = 2$ GPa	15
Figura 2.18. Variación del FITGs respecto a σ_{12} para distintos ratios $\theta = 10^\circ$ y $G_{12} = 2$ GPa	16
Figura 2.19. Variación del FITGs respecto a σ_2 para distintos ratios $\theta = 10^\circ$ y $G_{12} = 2$ GPa	16
Figura 2.20. Variación del FITGs respecto a σ_1 para distintos ratios $\theta = 5^\circ$ y $G_{12} = 4.28$ GPa	18
Figura 2.21.. Variación del FITGs respecto a σ_{12} para distintos ratios $\theta = 5^\circ$ y $G_{12} = 4.28$ GPa	18
Figura 2.22. Variación del FITGs respecto a σ_2 para distintos ratios $\theta = 5^\circ$ y $G_{12} = 4.28$ GPa	19
Figura 2.23. Variación del FITGs respecto a σ_1 para distintos ratios $\theta = 5^\circ$ y $G_{12} = 2$ GPa	19
Figura 2.24. Variación del FITGs respecto a σ_{12} para distintos ratios $\theta = 5^\circ$ y $G_{12} = 2$ GPa	20
Figura 2.25. Variación del FITGs respecto a σ_2 para distintos ratios $\theta = 5^\circ$ y $G_{12} = 2$ GPa	20
Figura 2.26. Variación del FITGs respecto a σ_1 para distintos ratios $\theta = 15^\circ$ y $G_{12} = 4.28$ GPa	21

Figura 2.27. Variación del FITGs respecto a σ_{12} para distintos ratios $\theta = 15^\circ$ y $G_{12} = 4.28$ GPa	21
Figura 2.28. Variación del FITGs respecto a σ_2 para distintos ratios $\theta = 15^\circ$ y $G_{12} = 4.28$ GPa	21
Figura 2.29. Variación del FITGs respecto a σ_1 para distintos ratios $\theta = 15^\circ$ y $G_{12} = 2$ GPa	22
Figura 2.30. Variación del FITGs respecto a σ_2 para distintos ratios $\theta = 15^\circ$ y $G_{12} = 2$ GPa	22
Figura 2.31. Variación del FITGs respecto a σ_{12} para distintos ratios $\theta = 15^\circ$ y $G_{12} = 2$ GPa	22
Figura 2.32. Variación del FITGs respecto a σ_1 para distintos ratios $\theta = 20^\circ$ y $G_{12} = 4.28$ GPa	23
Figura 2.33. Variación del FITGs respecto a σ_{12} para distintos ratios $\theta = 20^\circ$ y $G_{12} = 4.28$ GPa	23
Figura 2.34. Variación del FITGs respecto a σ_2 para distintos ratios $\theta = 20^\circ$ y $G_{12} = 4.28$ GPa	24
Figura 2.35. Variación del FITGs respecto a σ_1 para distintos ratios $\theta = 20^\circ$ y $G_{12} = 2$ GPa	24
Figura 2.36. Variación del FITGs respecto a σ_{12} para distintos ratios $\theta = 20^\circ$ y $G_{12} = 2$ GPa	25
Figura 2.37. Variación del FITGs respecto a σ_2 para distintos ratios $\theta = 20^\circ$ y $G_{12} = 2$ GPa	25
Figura 2.38. Variación del FITGs respecto a σ_1 para distintas orientaciones de fibra y Ratio 10 y $G_{12} = 4.28$ GPa	26
Figura 2.39. Variación del FITGs respecto a σ_{12} para distintas orientaciones de fibra y Ratio 10 y $G_{12} = 4.28$ GPa	26
Figura 2.40. Variación del FITGs respecto a σ_2 para distintas orientaciones de fibra y Ratio 10 y $G_{12} = 4.28$ GPa	27
Figura 2.41. Variación del FITGs respecto a σ_1 para distintas orientaciones de fibra y Ratio 10 y $G_{12} = 2$ GPa	27
Figura 2.42. Variación del FITGs respecto a σ_{12} para distintas orientaciones de fibra y Ratio 10 y $G_{12} = 2$ GPa	28
Figura 2.43. Variación del FITGs respecto a σ_2 para distintas orientaciones de fibra y Ratio 10 y $G_{12} = 2$ GPa	28
Figura 2.44. Comparación del FITGs respecto a σ_1 $G_{12} = 2$ GPa y $G_{12} = 4.28$ GPa	29
Figura 2.45. Comparación del FITGs respecto a σ_{12} $G_{12} = 2$ GPa y $G_{12} = 4.28$ GPa	29
Figura 2.46. Comparación del FITGs respecto a σ_2 $G_{12} = 2$ GPa y $G_{12} = 4.28$ GPa	30
Figura 2.47. Geometría y mallado del modelo 3D	31
Figura 2.48. Desplazamientos u_{1mm} ratio 10, taco recto, $G_{12} = 2$ GPa y modelo 2D	32
Figura 2.49. Desplazamientos u_{1mm} ratio 10, taco recto, $G_{12} = 2$ GPa y modelo 3D	32
Figura 2.50. Desplazamientos u_{2mm} ratio 10, taco recto, $G_{12} = 2$ GPa y modelo 2D	33
Figura 2.51. Desplazamientos u_{2mm} ratio 10, taco recto, $G_{12} = 2$ GPa y modelo 3D	33
Figura 2.52. Distribución de tensiones σ_1 (MPa), ratio 10, taco recto, $G_{12} = 2$ GPa y modelo 2D	33
Figura 2.53. Distribución de tensiones σ_1 (MPa), ratio 10, taco recto, $G_{12} = 2$ GPa y modelo 3D	33
Figura 2.54. Zoom en la esquina A, distribución de tensiones σ_1 (MPa) modelo 2D	34
Figura 2.55. . Zoom en la esquina A, distribución de tensiones σ_1 (MPa) modelo 3D	34
Figura 2.56. Distribución de tensiones σ_2 (MPa), ratio 10, taco recto, $G_{12} = 2$ GPa y modelo 2D	35
Figura 2.57. Distribución de tensiones σ_2 (MPa), ratio 10, taco recto, $G_{12} = 2$ GPa y modelo 3D	35
Figura 2.58. Zoom en la esquina A, distribución de tensiones σ_2 (MPa) modelo 2D	35
Figura 2.59. Zoom en la esquina A, distribución de tensiones σ_2 (MPa) modelo 3D	35
Figura 2.60. Distribución de tensiones σ_{12} (MPa), ratio 10, taco recto, $G_{12} = 2$ GPa y modelo 2D	36

Figura 2.61. Distribución de tensiones σ_{12} (MPa), ratio 10, taco recto, $G_{12} = 2$ GPa y modelo 3D	36
Figura 2.62. Zoom en la esquina A, distribución de tensiones σ_{12} (MPa) modelo 2D	36
Figura 2.63. . Zoom en la esquina A, distribución de tensiones σ_{12} (MPa) modelo 3D	37
Figura 2.64. Variación del orden de singularidad con el ángulo del taco para distintos ratios $\theta = 10^\circ$ y $G_{12} = 2$ GPa	38
Figura 2.65. Comparación modelo 3D y 2D del orden de singularidad con el ángulo del taco para ratio 10, $\theta = 10^\circ$ y $G_{12} = 2$ GPa	38
Figura 2.66. Variación del orden de singularidad con el ángulo del taco para distintas orientaciones de las fibras. Ratio 10 y $G_{12} = 2$ GPa	39
Figura 2.67. Comparación modelo 3D y 2D del orden de singularidad con el ángulo del taco. Ratio 10 y $G_{12} = 2$ GPa	39
Figura 2.68.. Variación del FITGs respecto a σ_1 para distintos ratios $\theta = 10^\circ$ y $G_{12} = 2$ GPa	41
Figura 2.69. Comparación FITGs de los modelos 3D y 2D. para σ_1 , distintos ratios $\theta = 10^\circ$ y $G_{12} = 2$ GPa	41
Figura 2.70. Variación del FITGs respecto a σ_{12} para distintos ratios $\theta = 10^\circ$ y $G_{12} = 2$ GPa	41
Figura 2.71. Comparación FITGs de los modelos 3D y 2D. para σ_{12} , distintos ratios $\theta=10^\circ$ y $G_{12}=2$ GPa	42
Figura 2.72. Variación del FITGs respecto a σ_2 para distintos ratios $\theta = 10^\circ$ y $G_{12} = 2$ GPa	42
Figura 2.73. Comparación FITGs de los modelos 3D y 2D. para σ_2 , distintos ratios $\theta=10^\circ$ y $G_{12}=2$ GPa	42
Figura 2.74. Variación del FITGs respecto a σ_1 para distintos ratios $\theta = 5^\circ$ y $G_{12} = 2$ GPa	43
Figura 2.75. Comparación FITGs de los modelos 3D y 2D. para σ_1 , distintos ratios $\theta=5^\circ$ y $G_{12}=2$ GPa	43
Figura 2.76.. Variación del FITGs respecto a σ_{12} para distintos ratios $\theta = 5^\circ$ y $G_{12} = 2$ GPa	43
Figura 2.77. Comparación FITGs de los modelos 3D y 2D. para σ_{12} , distintos ratios $\theta=5^\circ$ y $G_{12}=2$ GPa	44
Figura 2.78. Variación del FITGs respecto a σ_2 para distintos ratios $\theta = 5^\circ$ y $G_{12} = 2$ GPa	44
Figura 2.79. Comparación FITGs de los modelos 3D y 2D. para σ_2 , distintos ratios $\theta=5^\circ$ y $G_{12}=2$ GPa	44
Figura 2.80. Variación del FITGs respecto a σ_1 para distintos ratios $\theta = 15^\circ$ y $G_{12} = 2$ GPa	45
Figura 2.81. Comparación FITGs de los modelos 3D y 2D. para σ_1 , distintos ratios $\theta=15^\circ$ y $G_{12}=2$ GPa	45
Figura 2.82. Variación del FITGs respecto a σ_{12} para distintos ratios $\theta = 15^\circ$ y $G_{12} = 2$ GPa	45
Figura 2.83. Comparación FITGs de los modelos 3D y 2D. para σ_{12} , distintos ratios $\theta=15^\circ$ y $G_{12}=2$ GPa	46
Figura 2.84. Variación del FITGs respecto a σ_2 para distintos ratios $\theta = 15^\circ$ y $G_{12} = 2$ GPa	46
Figura 2.85. Comparación FITGs de los modelos 3D y 2D. para σ_2 , distintos ratios $\theta=15^\circ$ y $G_{12} = 2$ GPa	46
Figura 2.86. Variación del FITGs respecto a σ_1 para distintos ratios $\theta = 20^\circ$ y $G_{12} = 2$ GPa	47
Figura 2.87. Comparación FITGs de los modelos 3D y 2D. para σ_1 , distintos ratios $\theta=20^\circ$ y $G_{12}=2$ GPa	47
Figura 2.88. Variación del FITGs respecto a σ_{12} para distintos ratios $\theta = 20^\circ$ y $G_{12} = 2$ GPa	47
Figura 2.89. Comparación FITGs de los modelos 3D y 2D. para σ_{12} , distintos ratios $\theta=20^\circ$ y $G_{12}=2$ GPa	48
Figura 2.90. Variación del FITGs respecto a σ_2 para distintos ratios $\theta = 20^\circ$ y $G_{12} = 2$ GPa	48

- Figura 2.91. Comparación FITGs de los modelos 3D y 2D, para σ_2 , distintos ratios $\theta=20^\circ$ y $G_{12}=2 \text{ GPa}$ 48
- Figura 2.92. Variación del FITGs respecto a σ_1 para distintas orientaciones de fibra y Ratio 10 y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$ 49
- Figura 2.93. Comparación de FITGs de los modelos 2D y 3D, para σ_1 , distintas orientaciones de fibra y Ratio 10 y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$ 49
- Figura 2.94. Variación del FITGs respecto a σ_{12} para distintas orientaciones de fibra y Ratio 10 y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$ 50
- Figura 2.95. Comparación de FITGs de los modelos 2D y 3D, para σ_{12} , distintas orientaciones de fibra y Ratio 10 y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$ 50
- Figura 2.96. Variación del FITGs respecto a σ_2 para distintas orientaciones de fibra y Ratio 10 y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$ 50
- Figura 2.97. Comparación de FITGs de los modelos 2D y 3D, para σ_2 , distintas orientaciones de fibra y Ratio 10 y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$ 51

1 INTRODUCCIÓN

Este trabajo está motivado por la observación de fallos prematuros en las probetas off-axis de tracción para la caracterización de la resistencia a cortadura intralaminar en materiales compuestos unidireccionales. Dichos fallos se concentran en muchos casos, en el entorno de las esquinas que forma la probeta con el taco de agarre a las mordazas de la máquina de ensayos. Se ha realizado un estudio del estado tensional singular en estos puntos críticos y su dependencia con los parámetros geométricos y mecánicos que caracterizan el problema.

Este análisis se realizó empleando herramientas semianalíticas y modelos de elementos finitos 2D simulando las condiciones que tendría el espécimen en un ensayo off-axis de un compuesto grafito-epoxi [1]. A través de dicho modelo se determinaron el orden de singularidad en tensiones (δ), así como el cálculo de los factores de intensificación de tensiones (K). Obteniendo mediante este estudio los gráficos de variación de los parámetros que definen el estado singular con los parámetros geométricos del problema (ángulo de la fibra, ángulo de los tacos y ratio longitud/anchura del espécimen).

Pero, ahora bien, el modelo anterior se realizó para un módulo de cizalladura constante lo cual no es correcto dado al comportamiento no lineal de este. Por ello, dado que al ir variando el valor de este constantemente sería un trabajo muy elaborado, este trabajo tiene como finalidad analizar la influencia que tiene el estado tensional que se genera en las esquinas del espécimen en el ensayo "Off-Axis" en el momento en que se produce el fallo, por lo que se ha empleado el módulo de cortadura secante para analizar esa situación de manera aproximada. Los resultados se compararán con los correspondientes al módulo inicial del material.

Otro objetivo de este trabajo es simular el ensayo off-axis lo mejor posible mediante herramientas numéricas, por ello, se llevará a cabo un modelado 3D del ensayo para conseguir una simulación de este lo más realista posible, y posteriormente comparar los resultados obtenidos con el modelo 2D realizado.

1.1 Ensayos mecánicos

El ensayo de tracción fuera de ejes ("Off- Axis") es uno de los ensayos más destacados de método indirecto para el cálculo de la rigidez a cortadura (G_{12}). Este ensayo está basado en someter una probeta con las fibras orientadas un ángulo θ respecto al eje x, a una carga de tracción (dicha carga en la dirección x).

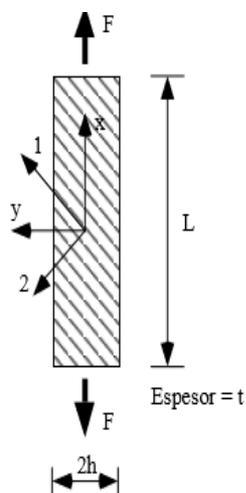


Figura 1.1 Esquema de la probeta del ensayo Off-Axis

El laminado es unidireccional, estando todas las capas con las fibras en la misma dirección, dichas capas están orientadas un cierto ángulo θ respecto de la vertical, de modo que la tracción será soportada en gran medida por la fibra, no obstante, una parte de la carga también será resistida por la matriz. Gracias a esto, el comportamiento del material es aparentemente anisótropo y será posible calcular los valores deseados.

Una galga situada según la dirección del eje x permite obtener el valor de ϵ_x , y a partir de éste, y del valor de la carga aplicada, es posible obtener E_x .

$$\sigma_x = \frac{F}{A} = E_x \epsilon_x \quad \rightarrow \quad E_x = \frac{F}{A \epsilon_x} \quad (1)$$

Donde A es el área de la sección transversal de la probeta.

Una vez conocido los valores E_{11} , E_{22} , y ν_{12} obtenidos mediante los ensayos correspondientes y el valor de E_x , se puede determinar de forma indirecta el valor de G_{12} a partir de la ecuación siguiente:

$$G_{12} = \frac{\cos^2 \theta \sin^2 \theta}{\frac{1}{E_{11}} \cos^4 \theta - \frac{1}{E_x} - \frac{2\nu_{12}}{E_{11}} \cos^2 \theta \sin^2 \theta + \frac{1}{E_{22}} \sin^4 \theta} \quad (2)$$

En el método indirecto descrito anteriormente, pueden producirse errores asociados a la obtención de los parámetros de rigidez, como redondeos o mal posicionamiento de las galgas extensométricas, lo que conlleva a un arrastre de los mismos en el cálculo de la rigidez a cizalladura.

A objeto de minimizar este problema, se procede a pegar, orientada en la dirección de carga, una roseta de tres galgas en el centro de la probeta, obteniendo gracias a ella la deformación tangencial que sufre el espécimen. Una vez se tiene este valor, dando uso de la relación entre tensión y deformación tangencial se logra obtener un valor de la rigidez a cortadura G_{12} , independiente del resto de propiedades.

$$G_{12} = \frac{\sigma_{12}}{\gamma_{12}} \quad \sigma_{12} = -\frac{F}{A} \sin \theta \cos \theta \quad (3)$$

Como consecuencia de que la carga aplicada no actúa en las direcciones de ortotropía y debido también a las restricciones de desplazamientos aparecen acoplamientos entre las tensiones tangenciales y normales causando deformaciones tangenciales figura 2.b originando un complejo estado tensional y dificultando el cálculo preciso de G_{12} .

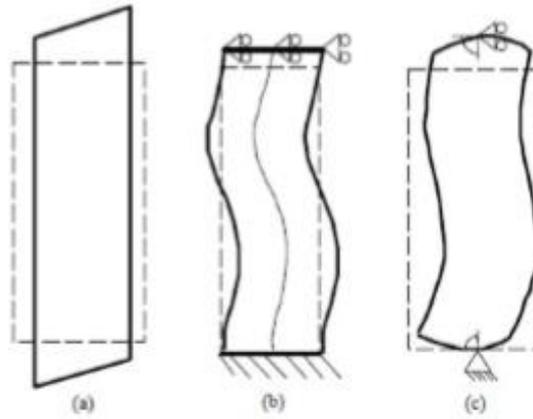


Figura 1.2. Esquema de la deformada de la probeta del ensayo Off-Axis. El caso (a) corresponde a la deformada ideal, el caso (b) corresponde a la deformada debido al sistema de cogida real, y por último, el caso (c) es la solución propuesta de Pagano para aproximar la configuración real. [4]

Para solventar este problema de acoplamiento, se han planteado varias propuestas. La más simple consiste en aumentar el ratio de las probetas y de este modo conseguir que los efectos de la acción de las mordazas en los extremos se vean atenuados en el centro del espécimen (zona de medida), consiguiendo así una deformación parecida a la ideal (figura 2.a) en el centro de la probeta.

Otra opción para la eliminación de estas deformaciones fue propuesta por Sun y Chung [6] la cual consiste en inclinar los tacos para que coincidieran con las líneas de isodesplazamiento, reproduciendo así la configuración ideal de manera aproximada.

La configuración de tacos oblicuos consiste en imponer una condición de desplazamientos iguales sobre las líneas de isodesplazamientos de la configuración ideal. Esta configuración se ha comprobado que reproduce un estado tensional muy aproximado al ideal, es decir uniforme.

1.2 Singularidad de Tensión

En los ensayos de tracción fuera de ejes (“off-axis”), los cuales son empleado para determinar la resistencia intralaminar en materiales compuestos de fibra unidireccionales, la existencia de la concentración de tensiones en las esquinas puede provocar que la rotura se inicie demasiado cerca de las mordazas o incluso en esta, provocando así un ensayo no válido y se debe cancelar esa muestra. Por tanto, se quiere conseguir que la rotura se produzca por el esfuerzo homogéneo en todo el ancho de la probeta y no por concentración de tensiones en las esquinas.

Una posibilidad para la disminución de concentración de tensiones en la esquina es la utilización de tacos oblicuos. El problema radica en que el ángulo que minimiza esta concentración de tensiones depende de las propiedades mecánicas del material, entre ellas el módulo de cortadura el cuál se quiere calcular mediante este ensayo.

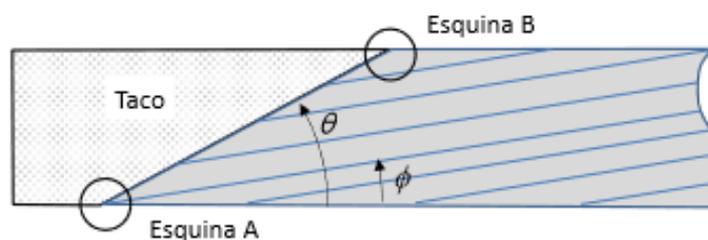


Figura 1.3 esquema de la configuración geométrica del extremo de la probeta

Una vez comprendido que la esquina más favorable para el fallo, debido a concentraciones de tensiones, es la esquina A del espécimen, habría que determinar las singularidades de tensiones en esa esquina. Lo cual se llevará a cabo utilizando la expresión mostrada a continuación (obtenida de [7]). Donde se ha tomado como origen la esquina y utilizando coordenadas polares (r, θ) .

$$\sigma_{\alpha\beta}(r, \theta) = \sum_k K_k \frac{r^{-\delta_k}}{L^{-\delta_k}} f_{\alpha\beta}^{(k)}(\theta) \quad (4)$$

Siendo r es la distancia al vértice, δ_k son los órdenes de singularidades de tensión, K_k los Factores de Intensificación de Tensiones Generalizados (FITGs), $f_{\alpha\beta}^{(k)}(\theta)$ son las funciones angulares características y L una distancia característica del problema utilizada para expresar K_k siempre en las mismas unidades independientemente del valor δ_k (en nuestro proyecto tomaremos $L=1$ mm).

Para el caso estudiado en este proyecto se puede estimar que la distribución de tensiones en las proximidades de la esquina viene dada por:

$$\sigma_{\alpha\beta} = \sum_k K_k f_{\alpha\beta}^{(k)}(\theta) r_{\alpha\beta}^{-\delta_k} = K_{\alpha\beta}^I r_{\alpha\beta}^{-\delta_k} \quad (5)$$

Esta aproximación se puede realizar debido a que si estamos muy próximo a la esquina $r \ll 1$, y dado que el primer Factor de Intensificación de Tensiones generalizado corresponde con $\delta > 0$ y los FITGs siguientes corresponden con $\delta < 0$, esto da lugar a que el término predominante es el que contiene a la K del modo I. Y por otro lado, debido a que estamos estudiando las tensiones en el eje horizontal $\theta = 0$ da lugar a $f_{\alpha\beta}^{(k)}(\theta = 0)$ constante, por consiguiente, vamos a considerar para poder simplificar el estudio que el término que multiplica a r es el Factor de Intensificación de Tensión generalizado, aunque en realidad no corresponda exactamente con este, sino del FITGs multiplicado por una constante, es decir:

$$K_{\alpha\beta}^I = K_k f_{\alpha\beta}^{(k)}(0) \quad (6)$$

De este modo, teniendo en cuenta este modelo simplificado de distribución de tensiones (ec. 5) en las proximidades de una esquina y mediante un código ANSYS de elementos finitos, que nos permite obtener el estado tensional en puntos muy próximos a la esquina de estudio, se puede obtener el FITG ($K_{\alpha\beta}$) y δ .

Por lo tanto, en este trabajo se va a realizar como se mencionó anteriormente un estudio del estado tensional singular que se genera en la esquina A del espécimen, y su dependencia con los parámetros geométricos y mecánicos que caracterizan la configuración del espécimen (ángulo de las fibras θ , ángulo de los tacos ϕ y ratio de la probeta L/w). Este análisis se ha realizado mediante herramientas semianalíticas y modelos de elementos finitos simulando las condiciones que tendría el espécimen en un ensayo "Off-Axis". Pero ahora bien, dado al comportamiento no lineal del módulo de cizalladura, se ha realizado el estudio para diferentes valores de este. Además, para simular lo mejor posible las condiciones del ensayo, se ha realizado tanto un modelo 2D como un modelo 3D. Pudiendo obtener de esta manera como resultado los gráficos de variación de los parámetros que definen el estado tensional en la esquina A del espécimen (δ y K) con los parámetros geométricos (θ , ϕ y L/w).

2 MODELADO CON ELEMENTOS FINITOS

Una vez explicado el método de tracción fuera de ejes (“Off-Axis”), mediante el cual nos permite el cálculo del módulo de cortadura intralaminar como vimos anteriormente, así como la existencia de concentraciones de tensiones en la esquina A del espécimen, los cuales dan lugar a fallos prematuros en los ensayos. Se va a analizar el estado tensional en dicha esquina, para ello, se realizará un modelo mediante el software ANSYS, que nos permitirá el cálculo de FITG (K) y los ordenes de singularidad (δ) en función de los parámetros geométricos θ , ϕ y L/w .

El material que se va a considerar para el estudio es un compuesto de grafito-epoxy con denominación AS4/8552, cuyas propiedades son: $E_{11} = 125.159$ GPa, $E_{22} = 8.112$ GPa, $\nu_{12} = 0.3$. Ahora bien, otro parámetro necesario para la realización del estudio es el módulo de cizalladura G_{12} , pero dado al comportamiento no lineal de este a lo largo del ensayo, no sería del todo cierto tomar este valor como una constante. Por lo que se realizará el estudio para varios valores de G_{12} y se analizará la influencia de variar este valor.

Si se presentase la evolución de σ_{12} frente a γ_{12} de un compuesto grafito-exposi, obtendríamos la figura 4, obtenida experimentalmente mediante ensayos “off-Axis” [3]. Y tal como se vio en (ec. 3) la pendiente de esta curva corresponde con el módulo de cizalladura.

En la siguiente figura se muestra la evolución de la rigidez a cortadura frente a la deformación angular.

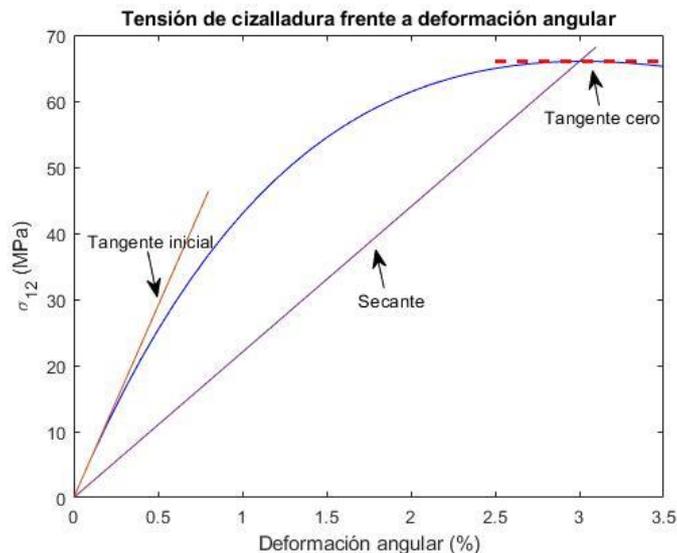


Figura 2.1. Módulo de cortadura

Como se puede observar en el gráfico la evolución es no lineal, por lo cual el módulo de cortadura (G_{12}) no se mantendrá constante durante el ensayo, variará dependiendo de los puntos que se tomen para calcularlo, disminuyendo conforme aumenta la deformación de la probeta y la tensión que soporta. El valor de cortadura que se tomó en análisis anteriores del estado tensional en la esquina A [1] es el valor correspondiente a la tangente inicial ($G_{12} = 4.28$ GPa). Pero como hemos dicho, este varía según los puntos que se tomen para su cálculo, por lo que considerar un valor constante de G_{12} no sería del todo cierto. Por ello realizaremos los cálculos con otro valor de módulo de cortadura y observaremos como cambia según el punto que se tome.

Por lo tanto, como hemos comentado, dado la evolución no lineal del módulo de cortadura, suponer un valor constante de este no sería totalmente adecuado. Por ello en la primera parte de este trabajo se va a estudiar como varía el estado tensional singular que se genera en la esquina A del espécimen para dos valores distintos del

módulo de cortadura y así poder analizar los errores que se cometen al realizar estudios con un único valor del módulo de cortadura. Concretamente compararemos los casos correspondientes al módulo de tangente inicial (fue el tomado en el TFG [1], pero aquí se completará con los valores de FITGs correspondiente a σ_2) y valor del módulo de cizalladura correspondiente a la pendiente secante, $G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$ y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$ respectivamente.

Los valores detallados para $G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$ se muestra en el TFG [1] aunque a continuación haremos un pequeño resumen para recopilar los datos, además de completarlo con más valores no calculados anteriormente.

El modelo realizado para la evaluación de los Factores de Intensificación de Tensiones Generalizados (FITG) se ha realizado confeccionado con modelos de Elementos Finitos a través del Software comercial ANSYS. Se ha confeccionado un modelo 2D usando elementos SHELL63 y refinando convenientemente la malla en la zona de interés (esquinas). Este modelo se puede observar en las figuras 5 y 6, el cual corresponde al caso particular de una lámina de ratio $L/w=10$, con ángulo de fibra $\phi=10^\circ$ y ángulo de taco $\theta = 20^\circ$. Este caso en particular tiene 21943 nodos, y la distancia del primer nodo, sobre el eje horizontal, a la esquina A es de $3.809 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$.

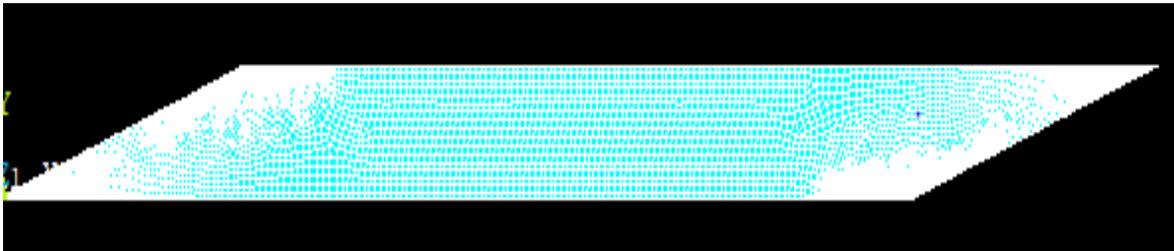


Figura 2.2. Detalle del mallado del modelo de elementos finitos en el espécimen

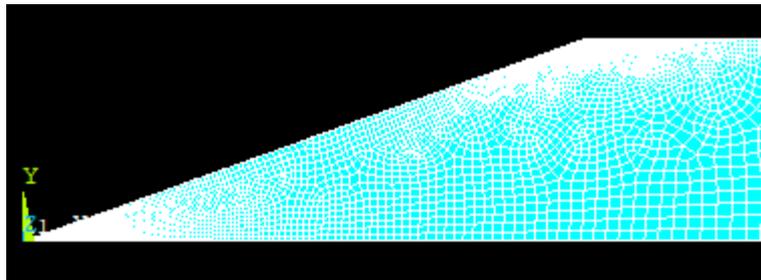


Figura 2.3. Detalle del mallado del modelo de elementos finitos en el extremo de la probeta

Por último, los modelos realizados en ANSYS hasta ahora corresponden a modelos 2D en el que, aunque se realiza una buena simulación de las condiciones del ensayo “off-axis”, los tacos eran considerados como una recta. Por ello, para intentar mostrar unos resultados más realistas realizamos un modelo en 3D mediante herramientas semianalíticas como se muestra en la figura 7, la cual corresponde al caso particular de una lámina de ratio $L/w=10$, con ángulo de fibra $\phi=10^\circ$ y ángulo de taco $\theta = 90^\circ$. Este caso tiene 40963 nodos, y la distancia del primer nodo, sobre el eje horizontal, a la esquina A es de $6 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$.

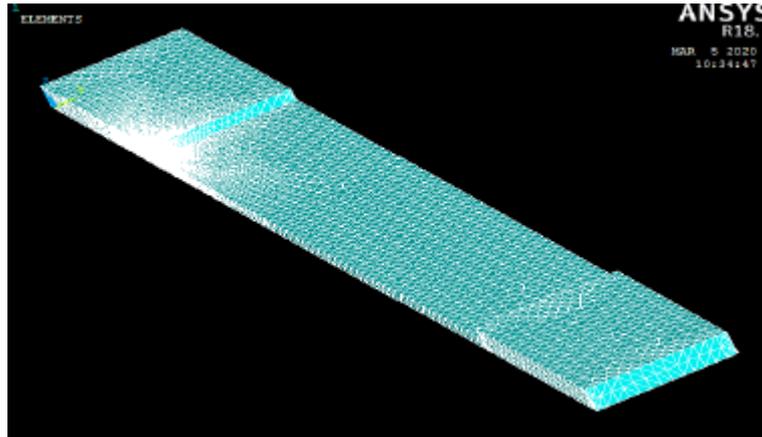


Figura 2.4. Detalle del mallado del modelo de elementos finitos en el modelo 3D

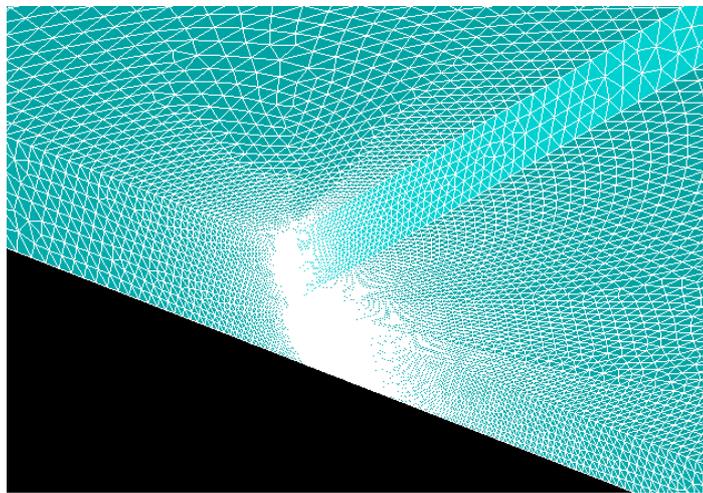


Figura 2.5. Detalle del mallado en la unión taco-probeta modelo 3D

En estas figuras se muestra un modelo más realista del ensayo, en el cual ahora los tacos no corresponden a una línea, sino que se representa tal como son en el ensayo. Al igual que en el modelo 2D, se ha realizado un modelo de Elementos Finitos con ANSYS. En el cual, también se ha refinado convenientemente la malla en la zona de interés (esquina A).

Por ello, el modelo 3D corresponde a un modelo bi-material, donde las propiedades de la probeta son idénticas a las del caso 2D, corresponde a un compuesto grafito-epoxy. El otro material añadido a este modelo es el correspondiente al taco, el cual tiene las siguientes propiedades $E_{11} = 25.2 \text{ GPa}$, $E_{22} = E_{33} = 17.6 \text{ GPa}$, $G_{12} = G_{13} = 4.4 \text{ GPa}$, $G_{23} = 2 \text{ GPa}$, $\nu_{12} = 0.7$, $\nu_{13} = 0.07$, $\nu_{23} = 0.03$.

Dado que el mallado en 2D se necesita menos número de nodos y por tanto se tiene un mallado más sencillo, se refinaron todas las esquinas, a pesar de que sólo nos era de interés la esquina A. Refinar una sola esquina o todas no influiría en los resultados, pero dado que el modelo 3D se necesita un mayor número de nodos para su elaboración se ha refinado solamente la esquina A, para evitar problemas de saturación en el programa. Cada uno de los modelos se analizará con más detalle en los siguientes apartados.

Por tanto, en este trabajo se ha realizado la simulación de un ensayo “Off-Axis” mediante ANSYS de un compuesto de grafito-epoxy con denominación AS4/8552, con propiedades $E_{11} = 125.159 \text{ GPa}$, $E_{22} = E_{33} = 8.112 \text{ GPa}$, $\nu_{12} = \nu_{13} = 0.3$, $\nu_{23} = 0.07$, $G_{23} = 3.571 \text{ GPa}$, y varios valores de G_{12} ($G_{12} = G_{13}$), concretamente $G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$ y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$. Además, se ha realizado tanto un modelo 2D como 3D, (para el modelo 3D solo se ha analizado para $G_{12} = 2 \text{ GPa}$). Para cada uno de estos casos se irá variando los valores geométricos ángulo de taco, orientación de fibra y ratio (ϕ , θ , y L/w) obteniendo como resultado los gráficos de variación de los parámetros que definen el estado tensional en la esquina A del espécimen (δ y K).

2.1 Modelo 2D

Para simular el ensayo, se ha realizado mediante ANSYS el modelo 2D usando el método de los elementos finitos de una lámina de longitud L , ancho w , por tanto, ratio L/w , orientación de la fibra θ y ángulo del taco ϕ . Utilizando las condiciones de contorno de empotramiento en el lado izquierdo de la lámina y aplicando un desplazamiento longitudinal en el lado izquierdo de la lámina.

Una vez realizado el modelo y obtenido los valores para los dos módulos de cortadura indicados, se muestran como varían estos al variar el ratio y la orientación de la fibra así como la variación debido al cambio del módulo de cortadura.

2.1.1 Cálculo del orden de singularidad para ratio 10, orientación de fibra 10° y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$

En primer lugar, a modo de ejemplo, se muestra como hemos calculado el orden de singularidad y el Factor de Intensificación de Tensiones generalizado para el caso de una lámina de $L=100 \text{ mm}$, $w=10 \text{ mm}$, ratio =10, $\theta = 10^\circ$, taco recto $\phi=90^\circ$, modelo 2D y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$.

Para poder obtener estos valores se ha hecho uso del Método de Elementos Finitos y realizando un refinado de la malla cerca de la esquina A, tal como se observó en las figuras 5 y 6. Para este caso concreto, el espécimen se ha modelado utilizando 30729 nodos, y estando el primer nodo a $1.32 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$ de la esquina A.

Una vez realizado el mallado, se ha simulado el ensayo off-Axis empotrando un extremo y aplicando un desplazamiento longitudinal uniforme, de valor 0.075 mm , en el otro extremo. Obteniendo en las siguientes figuras el mapa de tensiones σ_1 en el espécimen. Donde se observa al realizar un aumento sobre la esquina de interés, un aumento de la tensión.

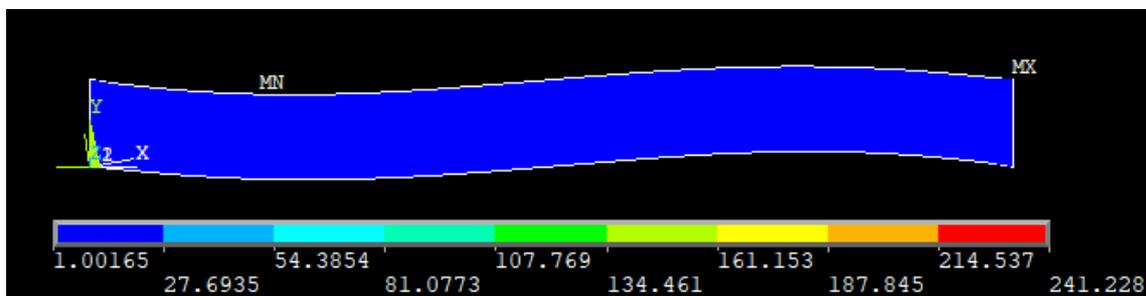


Figura 2.6. Distribución de tensiones σ_1 (MPa) ratio 10, taco recto y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$

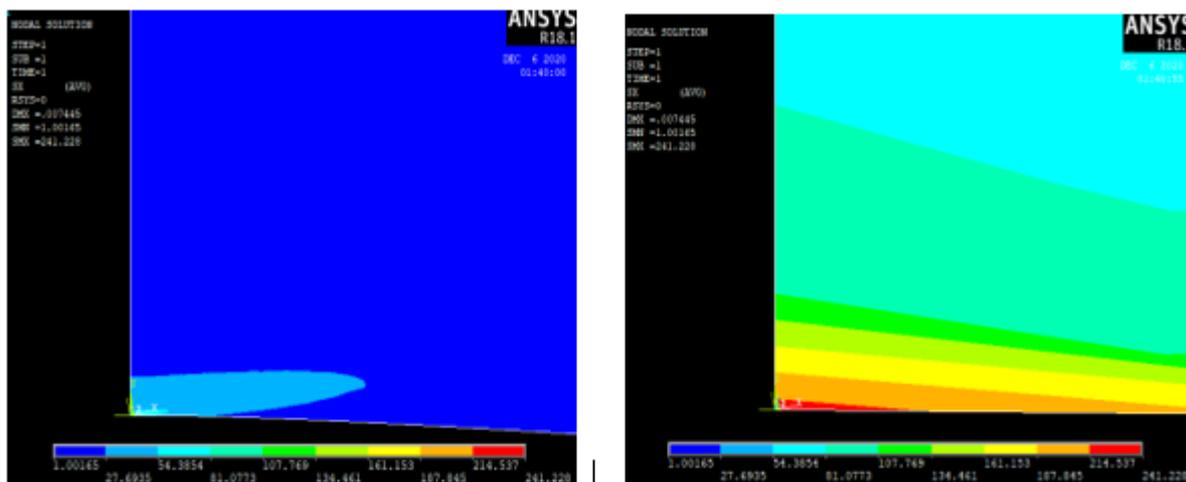


Figura 2.7. Zoom distribución de tensiones σ_1 (MPa) ratio 10, taco recto y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$

Para la obtención del valor de singularidad y el factor de intensificación de tensiones generalizado representamos las tensiones σ_1 en la esquina en función de la distancia a esta.

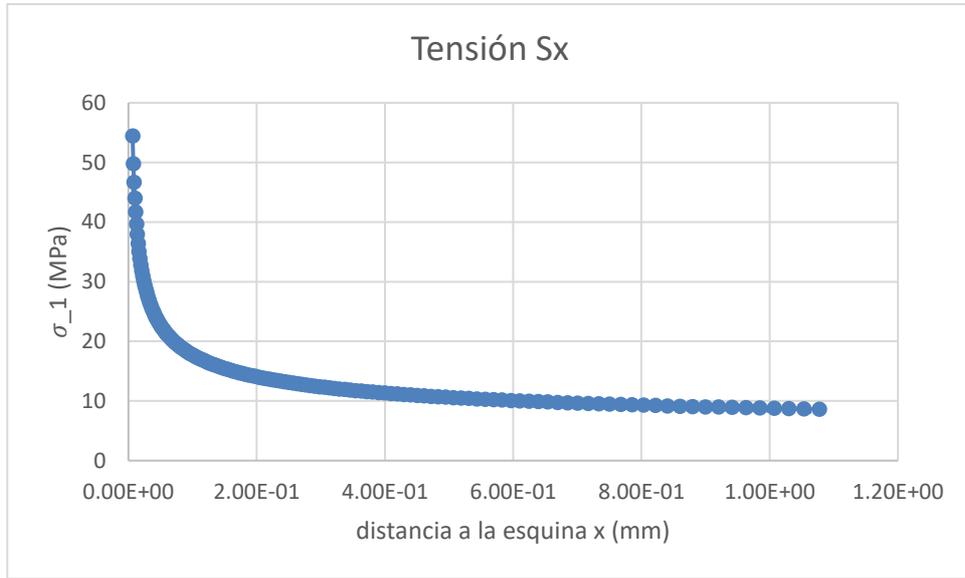


Figura 2.8. Evolución de las tensiones σ_1 (MPa)

Tomando logaritmos en la expresión (5)

$$\log \sigma_{\alpha\beta} = \log K_{\alpha\beta}^I - \delta \log r \quad (7)$$

Por tanto, expresando la figura anterior en logarítmica, figura 12, y eliminando los valores de los extremos, dado que las tensiones normales obtenidas en los nodos más cercanos están demasiado afectadas por la presencia de la singularidad, permite obtener la recta de regresión lineal en escala logarítmica y a partir de esta obtener el orden de singularidad y el FITGs.

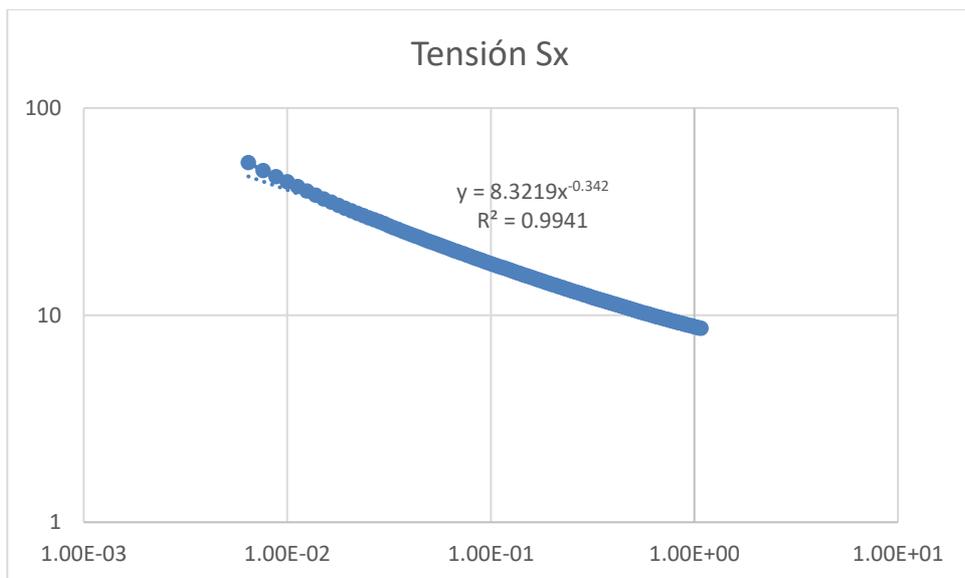


Figura 2.9. Recta de regresión. Evolución de las tensiones σ_1 (MPa) en la esquina en escala logarítmica.

Dado que la acción externa en todo momento es un desplazamiento longitudinal uniforme a lo largo del extremo derecho, de valor 0.0074 mm. Este valor de desplazamiento va a equivaler a una tensión distinta si se varía el

ratio, la orientación de la fibra o el ángulo del taco. Por consiguiente, para poder comparar los Factores de Intensificaciones de Tensiones generalizados vamos a dividirlo por la reacción que se origina en el extremo al aplicar tal desplazamiento, en este caso particular de ratio 10, taco recto $\phi=90$, $\theta = 10^\circ$, y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$, la reacción es 38.683 MPa .

El orden de singularidad y el Factor de Intensificación de Tensiones generalizado (normalizado el FITG con la reacción) para el este caso particular, son los siguientes:

$$K_{11} = \frac{8.3219}{38.683} = 0.215$$

$$\delta = 0.342$$

donde el FITGs está dividido entre la reacción que origina el desplazamiento en el extremo como se ha mencionado, a partir de ahora llamaremos a este factor K_{11} , donde el subíndice hace referencia a la tensión utilizada para su cálculo.

Decir que el FITGs no variaría con la tensión si lo calculásemos mediante la expresión (4) mostrada en el capítulo 3, por ejemplo la tensión tangencial, pero debido a que en nuestro proyecto hemos considerado la simplificación realizada en (6), donde habíamos introducido al FITGs la función $f_{\alpha\beta}^{(k)}(\theta = 0)$, la cual si cambia según la componente de la tensión tomada, por lo que los valores de FITGs tomado en este proyecto si cambiarían según la componente de la tensión utilizada para su cálculo. Por ello se ha calculado también el FITGs correspondiente a la tensión tangencial σ_{12} y σ_2 .

$$K_{12} = 0.03741$$

$$K_{22} = 0.006613$$

Decir que entre estos tres FITG, el que más influye en la rotura del espécimen es K_{12} , ya que si se produce un fallo en la esquina estudiada debido a la concentración de tensiones esta se puede propagar mediante cortadura a lo largo de la matriz.

Los valores obtenidos anteriormente corresponden al caso de taco recto, ratio 10, $\theta = 10^\circ$, y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$. Como se mencionó anteriormente existe un ángulo de inclinación del taco que provoca que el orden de singularidad sea nulo por lo que vamos a ir disminuyendo este ángulo desde 90° hasta el que origina la anulación del orden de singularidad.

Realizando un procedimiento análogo a este, se calculará los FITG y δ para láminas de distintos ratios, ϕ , θ , y G_{12} .

2.1.2 Variación del orden de singularidad con el ratio

En las figuras 8 y 9 se muestra la variación de los órdenes de singularidad de tensiones (δ) en la esquina A frente al ángulo del taco (ϕ) manteniendo la orientación de la fibra constante ($\theta = 10^\circ$) y para cuatro ratios distintos (L/w 10, 12.5, 15 y 20). La primera figura corresponde para el caso de $G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$ y la segunda para el caso de $G_{12} = 2 \text{ GPa}$.

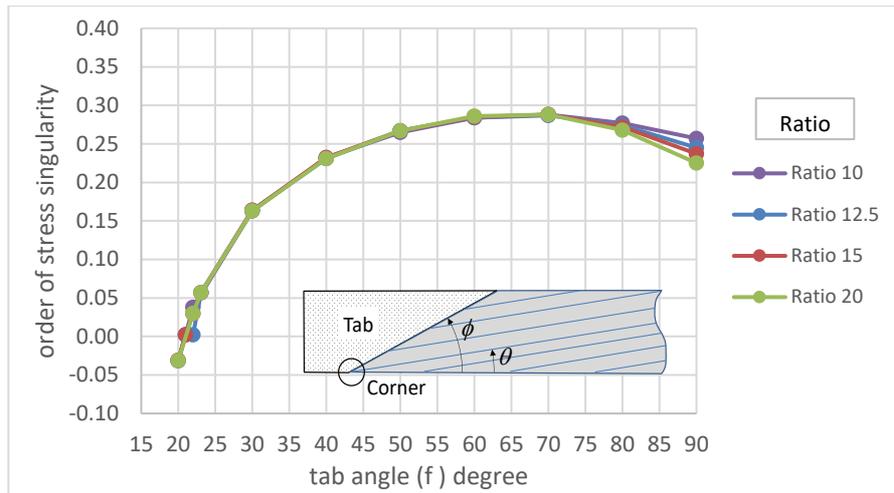


Figura 2.10. Variación del orden de singularidad con el ángulo del taco para distintos ratios. $\theta = 10^\circ$ y $G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$

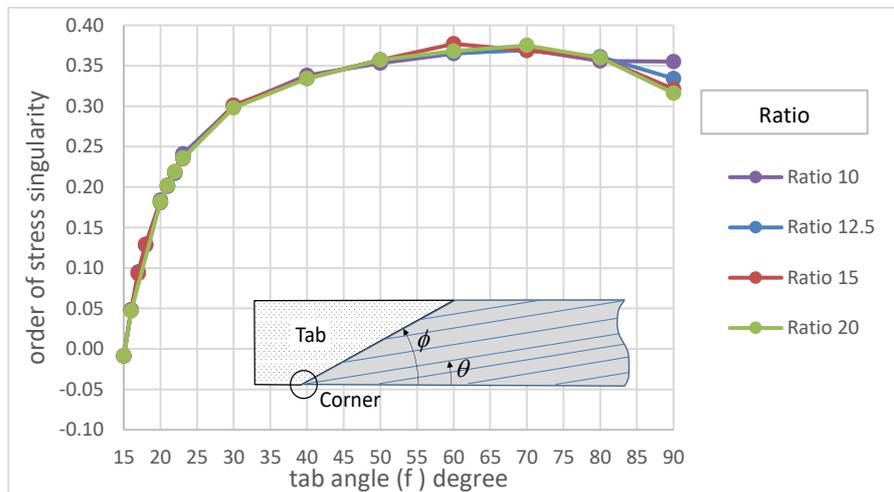


Figura 2.11. Variación del orden de singularidad con el ángulo del taco para distintos ratios. $\theta = 10^\circ$ y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$

Se puede observar en primer lugar que, si la orientación de la fibra no varía, da igual que ratio tenga el espécimen que el orden de singularidad de tensiones no varía, sólo habiendo una pequeña discrepancia cuando el ángulo del taco es recto. Lo cual es lógico, dado que el valor de las singularidades depende exclusivamente del problema local, y las variaciones en el ratio no altera las condiciones locales en la esquina.

Sin embargo, se puede observar que el orden de singularidad si varía si el módulo de cortadura cambia, concretamente en este caso si disminuye G_{12} se observa un incremento del δ , provocando esto, que el ángulo del taco que da lugar a un orden de singularidad nulo sea menor. El ángulo del taco que da lugar a un δ nulo para $\theta = 10^\circ$ es 21° si $G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$ y 15° si $G_{12} = 2 \text{ GPa}$.

2.1.3 Variación del orden de singularidad con la orientación de la fibra

En las figuras 10 y 11 se muestran los órdenes de singularidades de tensiones δ en la esquina A con respecto al ángulo del taco (ϕ) para cuatro ángulos de fibras diferentes ($\theta = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°). Al igual que en el caso anterior, la primera figura corresponde al caso de $G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$ y la segunda al de $G_{12} = 2 \text{ GPa}$.

Los valores mostrados son los correspondiente al caso de $L/w=10$, pero tal como hemos visto en el apartado

anterior δ no depende del ratio, por lo cual, estos valores serían independientes del ratio de estudio.

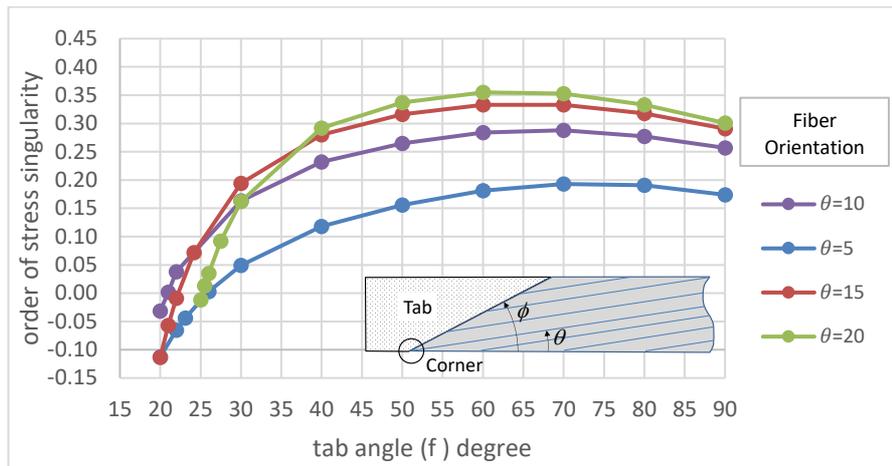


Figura 2.12. Variación del orden de singularidad con el ángulo del taco para distintas orientaciones de las fibras. Ratio 10 y $G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$

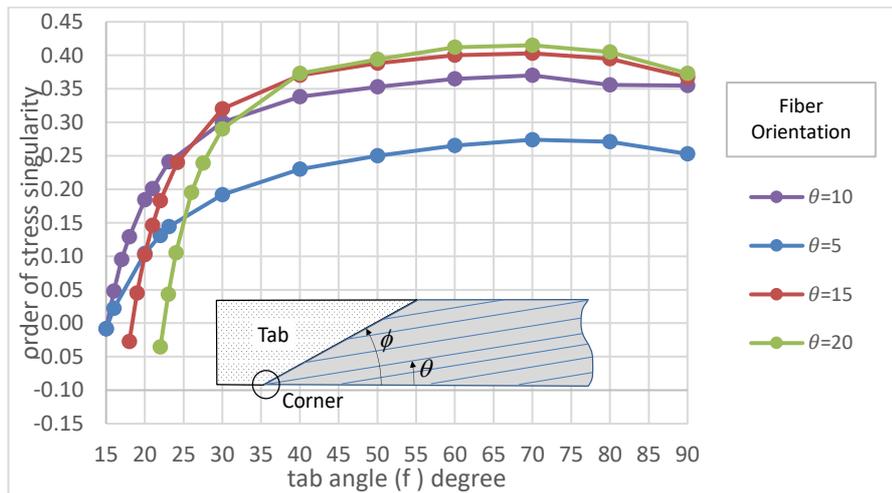


Figura 2.13. Variación del orden de singularidad con el ángulo del taco para distintas orientaciones de las fibras. Ratio 10 y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$

En general, el comportamiento es análogo para todas las orientaciones de las fibras, δ crece al aumentar ϕ , hasta alcanzar su máximo con un ángulo de taco 50° - 70° a partir del cual δ vuelve a disminuir.

La diferencia al considerar un módulo de cortadura u otro es un aumento del δ . Se puede observar que el aumento es parecido para cada uno de los casos (orientación de la fibra) por lo que en la gráfica se refleja como un desplazamiento vertical de esta, pero con el mismo comportamiento en una y otra gráfica.

Se puede deducir que para $\phi \geq 40^\circ$, el orden de singularidad δ aumenta con el ángulo de las fibras. Para $\phi < 40^\circ$ no se produce un comportamiento tan evidente. Al tener un comportamiento análogo para los dos valores del módulo de cortadura como hemos indicado anteriormente, este comportamiento se cumple para los dos casos con la única salvedad que en el caso de $G_{12} = 2 \text{ GPa}$, los valores de δ son mayores, tal como hemos indicado anteriormente.

El objetivo de usar tacos oblicuos es pretender que el ángulo de estos siga la dirección de las líneas de isodesplazamientos correspondientes a la configuración ideal del ensayo de tracción "off-axis" (ángulos teóricos). En la siguiente tabla se muestra para cada orientación de fibra, los ángulos teóricos de los tacos, así como el orden de singularidad asociado para ambos valores de módulo de cizalladura.

θ (°)	ϕ teórico (°)	δ	δ
		($G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$)	($G_{12} = 2 \text{ GPa}$)
5	29.6	0.046	0.161
10	23.1	0.06	0.241
15	24.2	0.072	0.24
20	27.5	0.092	0.239

Tabla 2.1. Ángulos teóricos de los tacos y orden de singularidad correspondiente para las distintas orientaciones de las fibras.

Se aprecia en la tabla anterior que los δ asociados a los ángulos teóricos, son mayores para el caso de $G_{12} = 2 \text{ GPa}$, dado al aumento del valor de δ comentado anteriormente.

En la tabla siguiente se muestran los ángulos de taco que dan lugar a δ nulo para cada una de las orientaciones de fibra, para los casos de $G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$ y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$ realizado con ANSYS, así como los valores que se obtuvieron en el caso analítico, calculados en [8].

Podemos decir que los valores correspondientes al caso $G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$ se acercan más tanto a los ángulos teóricos como a los ángulos calculado numéricamente, lo cual es lógico, dado que los valores numéricos se calcularon para este valor de G_{12} . Por otro lado, para el caso $G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$, la orientación de $\phi = 10^\circ$ resulta más favorable, por ser aquella en la que el ángulo teórico ϕ se encuentra más próximo al que produce $\delta = 0$. Mientras que para $G_{12} = 2 \text{ GPa}$ la configuración más favorable es $\phi = 20^\circ$.

θ (°)	ϕ teórico (°)	ϕ singularidad nula (°)	ϕ singularidad nula (°)	ϕ singularidad nula analíticos (°)
		$G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$	$G_{12} = 2 \text{ GPa}$	
5	29.6	27.0	15.1	26.0
10	23.1	22.0	15.3	21.0
15	24.2	22.5	18.4	22.5
20	27.5	26.0	22.3	25.5

Tabla 2.2. Ángulo de inclinación del taco teórico y singularidad nula. Las columnas tres y cuatro corresponden a las singularidades obtenidas mediante los modelos MEF realizados en este trabajo, mientras que la última columna corresponde con las singularidades calculadas en [8].

Por tanto, observando las tablas anteriores podemos decir que el módulo de cizalladura correspondiente al módulo de la tangente inicial, o sea $G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$, se asemeja más a los valores de ángulo teórico y los valores obtenidos numéricamente en [7], que si se toma el módulo de cizalladura correspondiente a la secante, $G_{12} = 2 \text{ GPa}$, hecho que ocurre debido a que los valores numéricos son calculados con $G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$.

2.1.4 Variación del Fator de Intensificaciones de Tensiones con el Ratio

En los siguientes apartados, se ha evaluado el estado tensional sobre el eje horizontal, obteniendo los valores de $\sigma_{\alpha\beta} = K_k \cdot f_{\alpha\beta}^{(k)}(\theta = 0) \cdot r_{\alpha\beta}^{-\delta_k}$, tal como se obtuvo en el apartado 3, donde llamamos al FITG como $K_{\alpha\beta}^I = K_k \cdot f_{\alpha\beta}^{(k)}(\theta = 0)$ y que tiene valores diferentes para cada componente de tensión. Por lo que mostraremos los resultados para las diferentes componentes de la tensión.

Dado que la acción externa en todo momento es un desplazamiento longitudinal uniforme a lo largo del extremo derecho, tal como comentamos anteriormente. Este valor de desplazamiento va a equivaler a una tensión distinta si se varía los parámetros geométricos. Por ello, para poder comparar los FITGs se ha normalizado el valor $K_{\alpha\beta}^I$

dividiendo este por la tensión que se origina en el extremo al aplicar el desplazamiento en cada configuración, así que a partir de ahora cuando hablemos de FITG o de $K_{\alpha\beta}^I$ nos referiremos al valor normalizado.

En primer lugar, se mostrará los resultados variando el ratio manteniendo la orientación de la fibra y posteriormente al revés, variando la orientación de la fibra manteniendo el ratio constante.

FITG para fibras con orientación 10°

En las siguientes figuras se han representado las variaciones de los FITG con el ratio longitud/ancho (L/w) del espécimen para ángulos de orientación de las fibras de $\theta = 10^\circ$. Las figuras 18, 19 y 20 corresponden a K_1^I, K_{12}^I, K_2^I , respectivamente, obtenidos para el caso de $G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$.

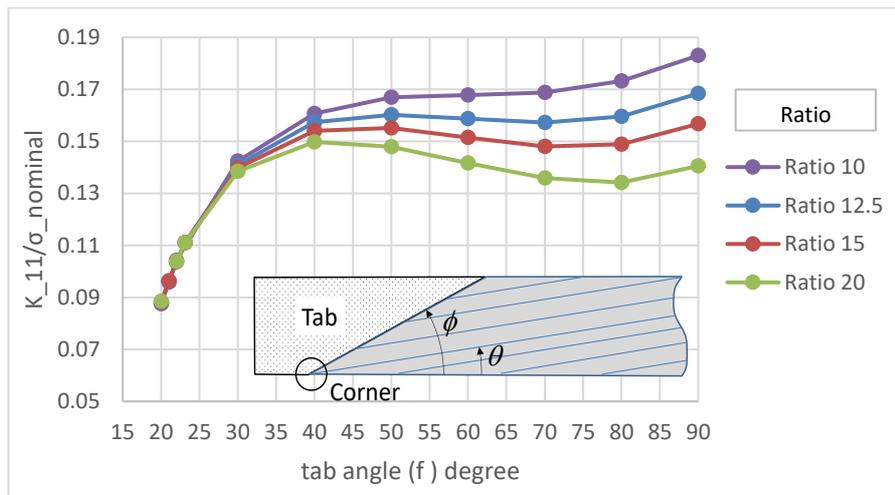


Figura 2.14. Variación del FITGs respecto a σ_1 para distintos ratios $\theta = 10^\circ$ y $G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$

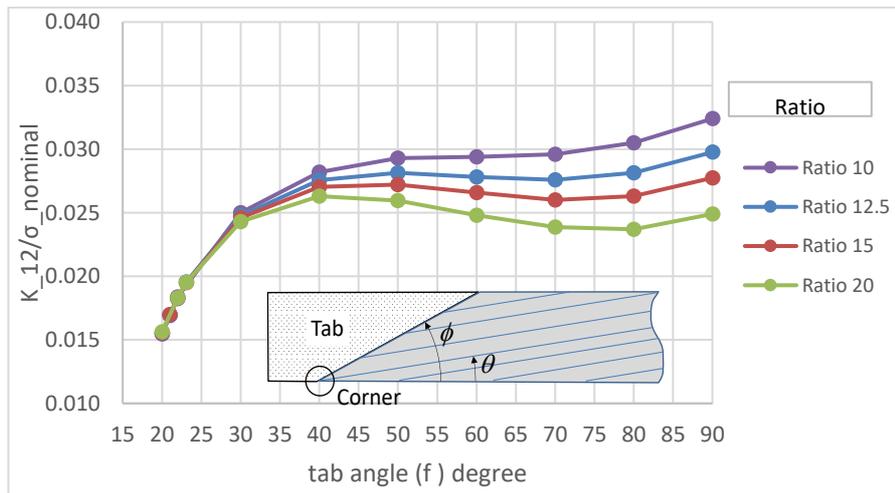


Figura 2.15. Variación del FITGs respecto a σ_{12} para distintos ratios $\theta=10^\circ$ y $G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$

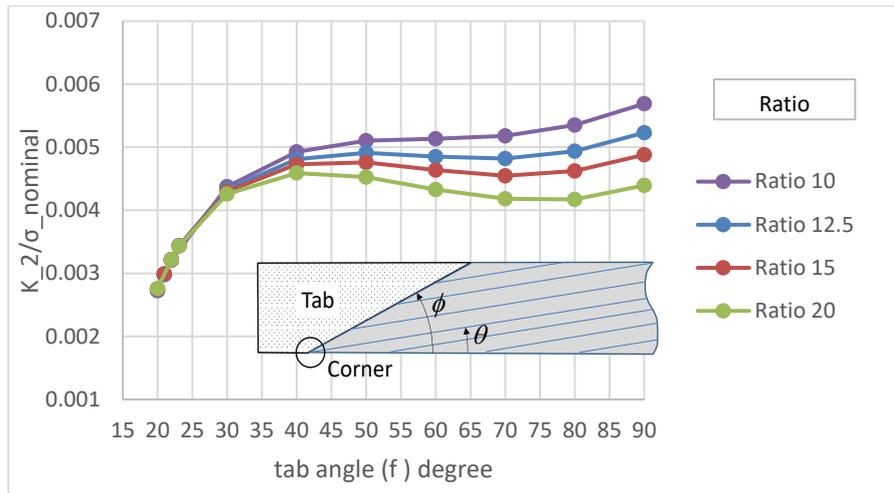


Figura 2.16. Variación del FITGs respecto a σ_2 para distintos ratios $\theta=10^\circ$ y $G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$

Se puede observar que para ángulos de tacos menores que 30° el ratio del espécimen no influye en los valores de FITG, aunque si influye la orientación de las fibras, tal como se verá en apartados siguientes y tal como se puede observar si se compara las figuras de $\theta = 10^\circ$ de este apartado con las de los apartados siguientes que corresponden a otros θ .

Por tanto, no hay influencia del ratio L/w para ángulos de los tacos $\phi < 30^\circ$. Sin embargo, para ángulos de tacos mayores los FITGs son menores cuanto mayor es el ratio L/w del espécimen. Este hecho se ha comprobado experimentalmente para la configuración de tacos rectos ($\phi=90^\circ$) y orientación de las fibras $\theta = 10^\circ$, en numerosos trabajos como en [8]. En dichos casos experimentales se realizó ensayos ‘Off-Axis’ con probetas del material de estudio, compuesto grafito-epoxy con denominación AS4/8552, ángulo de taco recto, orientación de fibra 10° y diferentes ratios (L/w de 10, 15 y 20) y tras numerosos ensayos se observó que en el caso de la probeta de ratio 10 el fallo se producía mayoritariamente en la esquina A, y a medida que se aumentaba el ratio crecía el número de fallos que se localizaban en la zona central de la probeta. Por tanto, podemos concluir que una posible solución para evitar los fallos prematuros en los ensayos ‘off-axis’ es aumentar el ratio de la probeta.

En las siguientes figuras 18,19 y 20 se muestra las variaciones de los FITG con el ratio. Las figuras corresponden a K_1^I, K_{12}^I, K_2^I , respectivamente, obtenidos para el caso de ángulos de orientación de las fibras de $\theta = 10^\circ$ y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$.

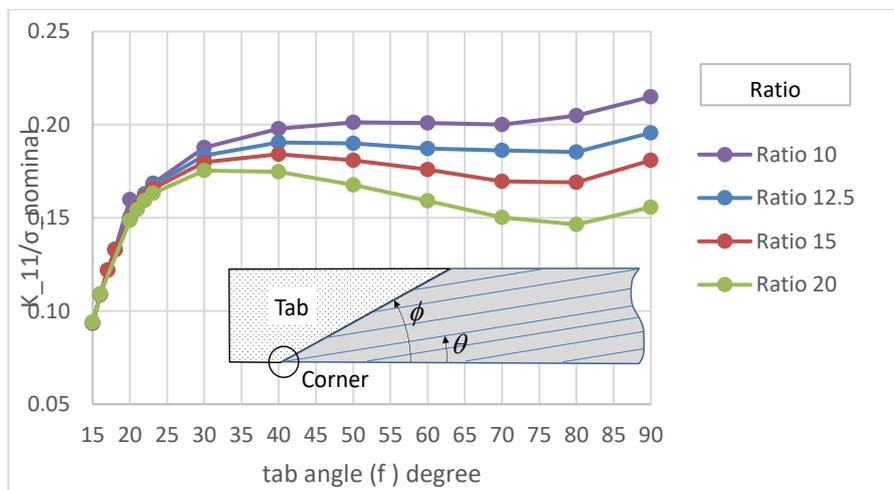


Figura 2.17. Variación del FITGs respecto a σ_1 para distintos ratios $\theta = 10^\circ$ y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$

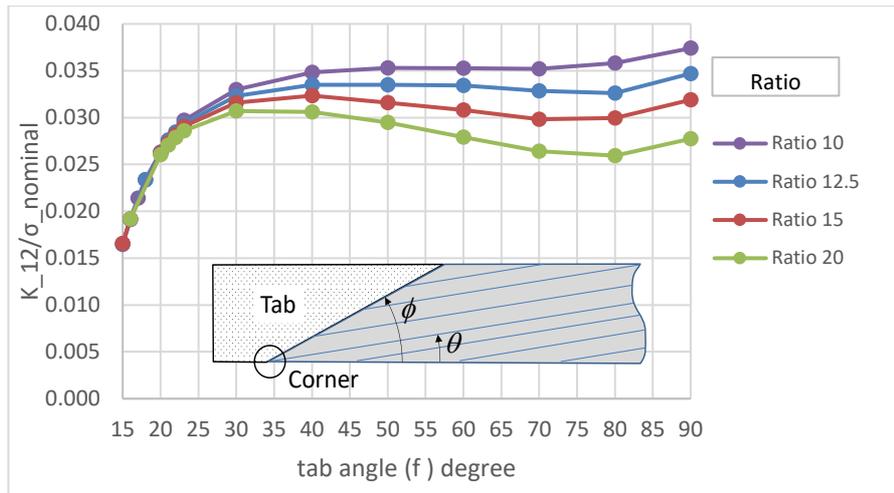


Figura 2.18. Variación del FITGs respecto a σ_{12} para distintos ratios $\theta = 10^\circ$ y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$

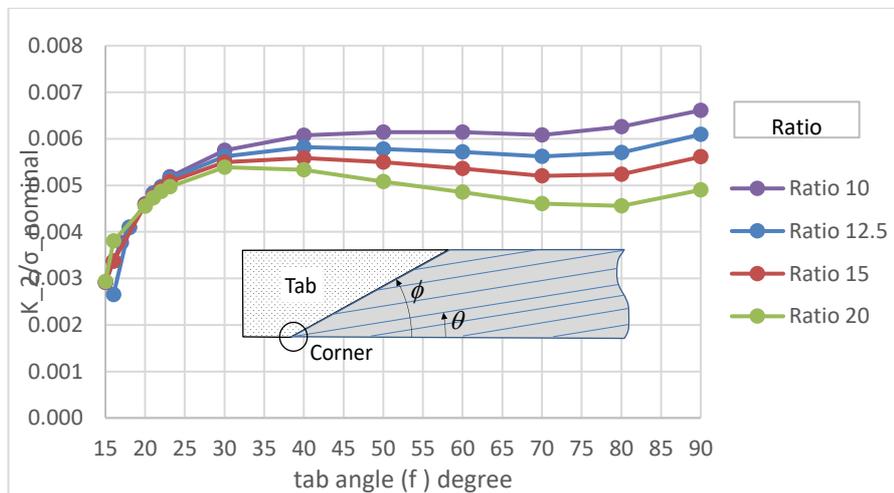


Figura 2.19. Variación del FITGs respecto a σ_2 para distintos ratios $\theta = 10^\circ$ y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$

Si se comparan los resultados de $G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$ y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$, se observa que el comportamiento es prácticamente análogo. Para $G_{12} = 2 \text{ GPa}$, el ratio del espécimen no influye en FITG para ángulos de tacos menores de 25° , mientras que para ángulos mayores los FITG disminuyen al aumentar el ratio del espécimen.

Se observa también como al disminuir módulo de cizalladura, los valores de $K_{\alpha\beta}^1$ aumenten al igual que ocurría con δ , lo que conlleva que al disminuir G_{12} los fallos se produzcan mayoritariamente en la esquina A del espécimen.

En particular, se muestra en las siguientes tablas, los valores de $K_{\alpha\beta}^1$ para una orientación de fibra de ($\theta = 10^\circ$), para tacos rectos ($\phi=90^\circ$) y para los distintos valores de G_{12} y ratios, y se puede observar que efectivamente hay una diferencia en los valores de K según se tome un G_{12} u otro. Concretamente, los valores de K son mayores para el caso de $G_{12} = 2 \text{ GPa}$, pudiéndose observar que a medida que aumenta los ratios la diferencia entre los valores se van haciendo menor al tomar un G_{12} u otro.

$K_1^I (\theta = 10^\circ)$	K_1^I $G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$	K_1^I $G_{12} = 2 \text{ GPa}$
Ratio 10	0.183	0.215
Ratio 12.5	0.1684	0.2085
Ratio 15	0.15673	0.1712
Ratio 20	0.1406	0.1316

 Tabla 2.3. K_1 para $\phi=90^\circ$ y $\theta = 10^\circ$

$K_{12}^I (\theta = 10^\circ)$	K_{12}^I $G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$	K_{12}^I $G_{12} = 2 \text{ GPa}$
Ratio 10	0.0324	0.0372
Ratio 12.5	0.02787	0.0347
Ratio 15	0.03025	0.0319
Ratio 20	0.0264	0.02773

 Tabla 2.4. K_{12} para $\phi=90^\circ$ y $\theta = 10^\circ$

$K_2^I (\theta = 10^\circ)$	K_2^I $G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$	K_2^I $G_{12} = 2 \text{ GPa}$
Ratio 10	0.00569	0.00661
Ratio 12.5	0.0049	0.00609
Ratio 15	0.00532	0.00561
Ratio 20	0.00464	0.0049

 Tabla 2.5. K_2 para $\phi=90^\circ$ y $\theta = 10^\circ$

Dado que el valor de G_{12} va disminuyendo a medida que avanza el ensayo, tal como vimos en la figura 4, este hecho conlleva que el fallo en la esquina sea más propenso a medida que avanzamos en el ensayo y hay más deformación angular, lo cual es comprensible.

FITG para fibras con orientación 5°

Al igual que en el apartado anterior, en las siguientes figuras se muestran las variaciones de los FITG con el ratio longitud/ancho (L/w) del espécimen, pero esta vez se muestra para ángulos de orientación de las fibras de $\theta = 5^\circ$. Las figuras tres figuras corresponden a K_1^I, K_{12}^I, K_2^I , respectivamente, obtenidos para el caso de $G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$.

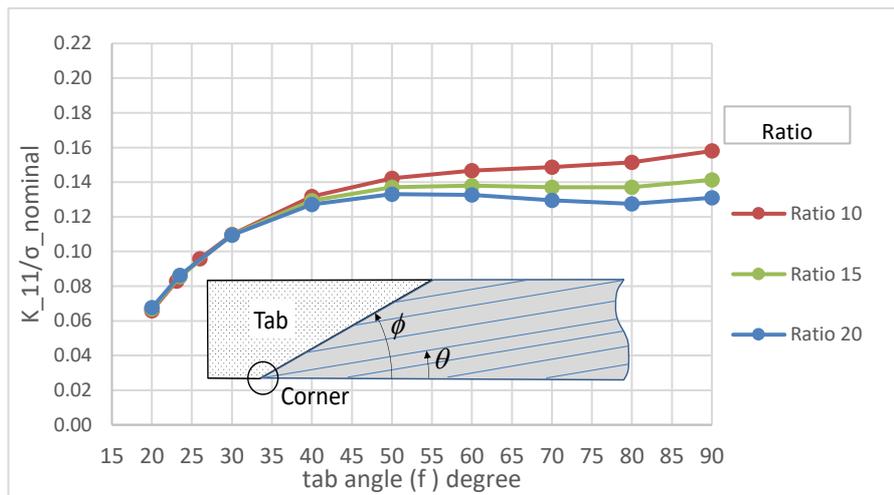


Figura 2.20. Variación del FITGs respecto a σ_1 para distintos ratios $\theta = 5^\circ$ y $G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$

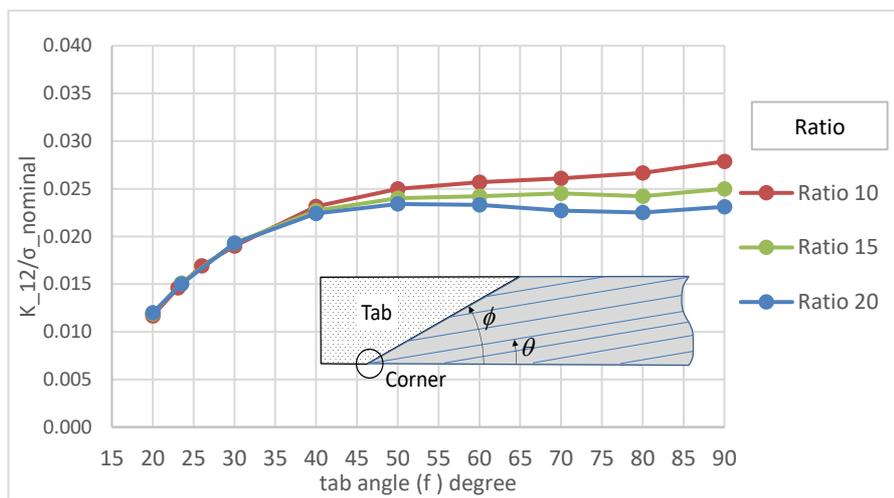


Figura 2.21.. Variación del FITGs respecto a σ_{12} para distintos ratios $\theta = 5^\circ$ y $G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$

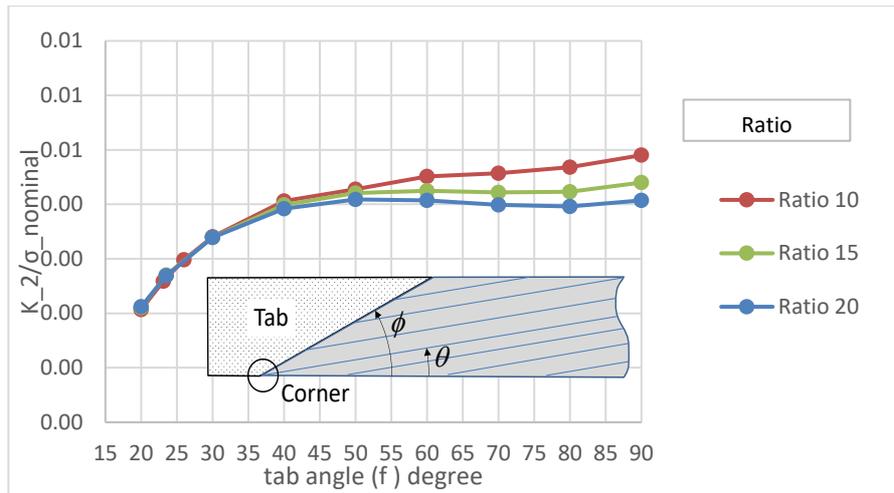


Figura 2.22. Variación del FITGs respecto a σ_2 para distintos ratios $\theta = 5^\circ$ y $G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$

Para el caso de $\theta = 5^\circ$ y $G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$ no hay influencia del ratio L/w para ángulos de los tacos $\phi < 40^\circ$. Sin embargo, para ángulos de tacos mayores los FITGs son menores cuanto mayor es el ratio L/w del espécimen, misma tendencia que se observó para el caso de $\theta = 10^\circ$.

En las siguientes figuras 18,19 y 20 se muestran las variaciones de los FITG con el ratio pero para el valor de G_{12} secante. Las figuras corresponden a $K_{11}^I, K_{12}^I, K_2^I$, respectivamente, obtenidos para el caso de ángulos de orientación de las fibras de $\theta = 5^\circ$ y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$

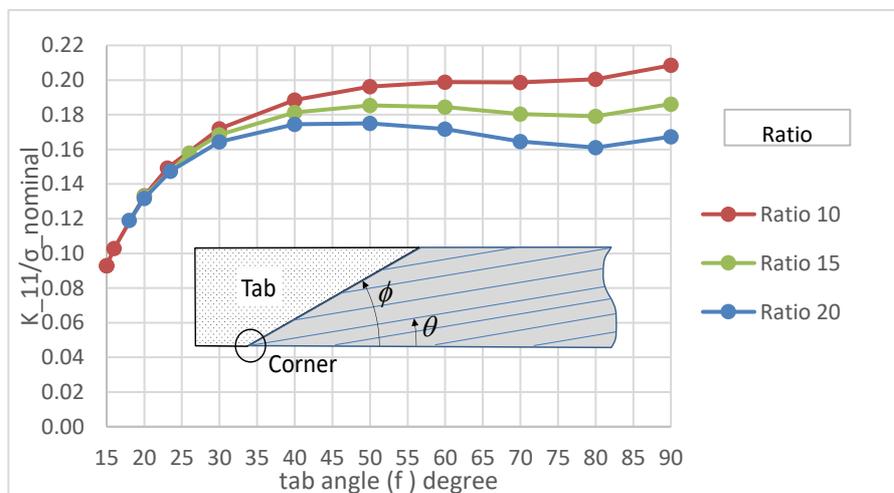


Figura 2.23. Variación del FITGs respecto a σ_1 para distintos ratios $\theta = 5^\circ$ y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$

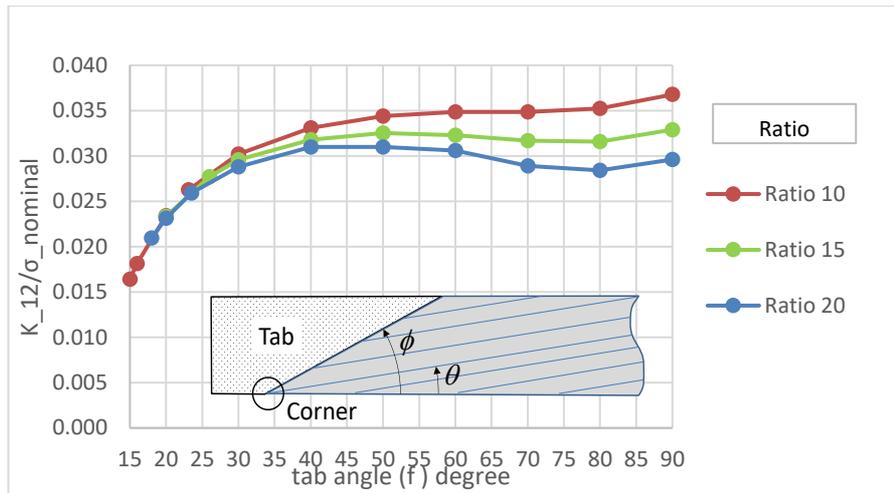


Figura 2.24. Variación del FITGs respecto a σ_{12} para distintos ratios $\theta = 5^\circ$ y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$

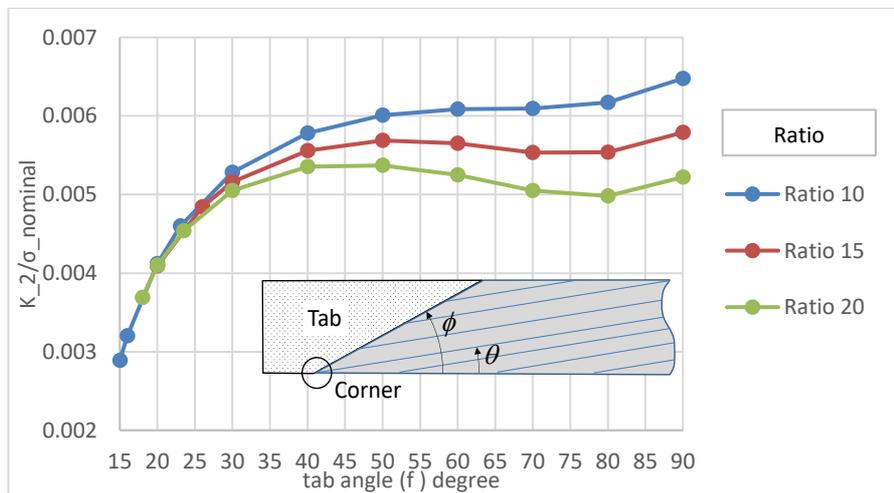


Figura 2.25. Variación del FITGs respecto a σ_2 para distintos ratios $\theta = 5^\circ$ y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$

Si se comparan los resultados de $G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$ y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$ tal como se realizó en el apartado anterior, se observa que para el caso de $G_{12} = 2 \text{ GPa}$ el ratio del espécimen no influye en FITG para ángulos de tacos menores de 30° , mientras que para ángulos mayores los FITG disminuyen al aumentar el ratio del espécimen.

Al igual que sucedía en el caso anterior, se observa que para el caso de $G_{12} = 2 \text{ GPa}$, los valores de $K_{\alpha\beta}^I$ son mayores que para el caso $G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$.

Por último, si se comparan las gráficas de $\theta = 5^\circ$ con las de $\theta = 10^\circ$, se observa a simple vista que los FITG son menores para el caso de $\theta = 5^\circ$. Este hecho se verá con mayor detalle posteriormente, donde comparemos la variación del FITG con θ .

FITG para fibras con orientación 15°

En este apartado se analizan los valores de $K_{\alpha\beta}^I$, para el caso de $\theta = 15^\circ$ y los dos valores de G_{12} de estudios.

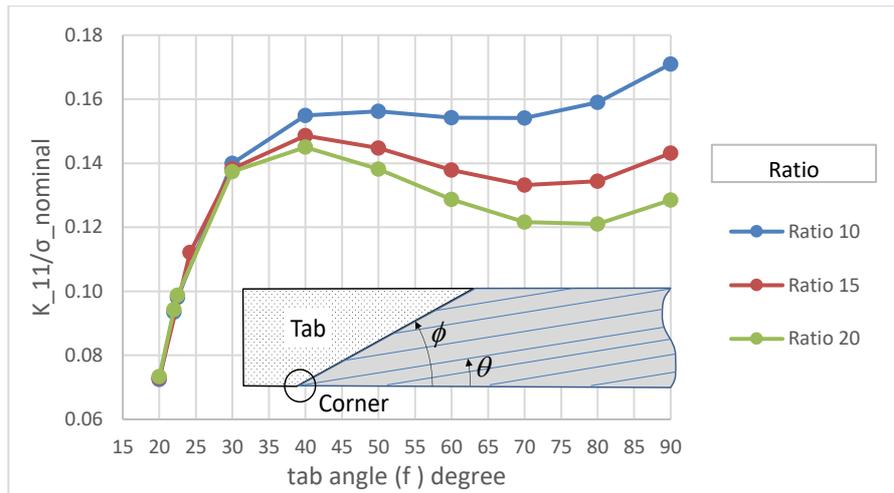


Figura 2.26. Variación del FITGs respecto a σ_1 para distintos ratios $\theta = 15^\circ$ y $G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$

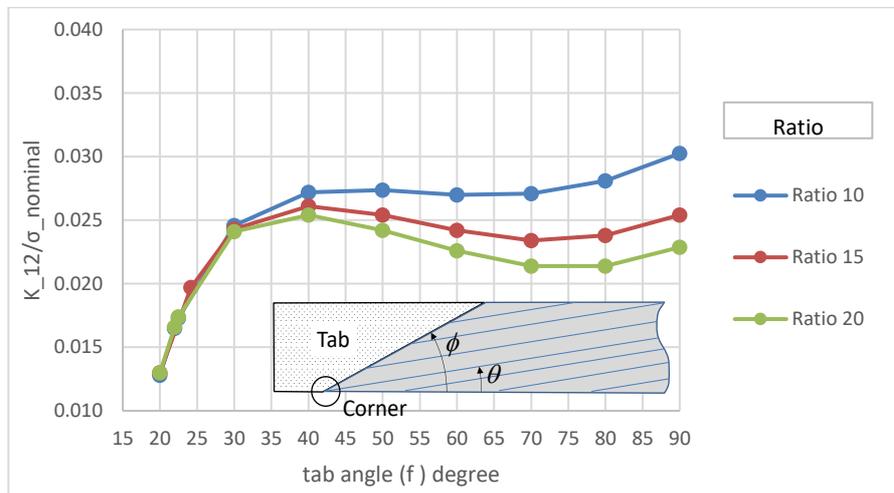


Figura 2.27. Variación del FITGs respecto a σ_{12} para distintos ratios $\theta = 15^\circ$ y $G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$

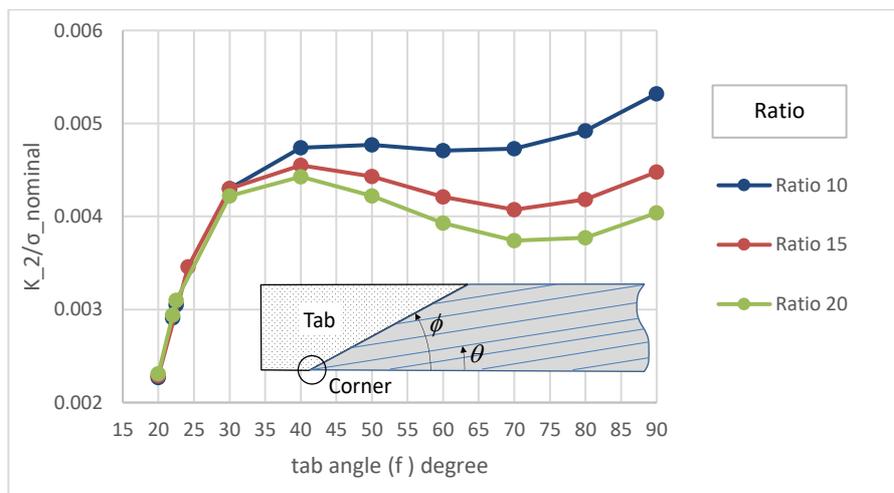


Figura 2.28. Variación del FITGs respecto a σ_2 para distintos ratios $\theta = 15^\circ$ y $G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$

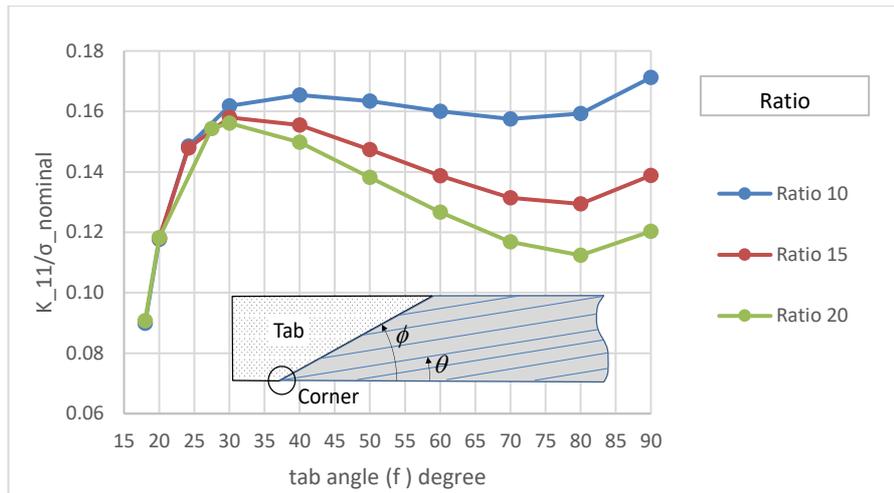


Figura 2.29. Variación del FITGs respecto a σ_1 para distintos ratios $\theta = 15^\circ$ y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$

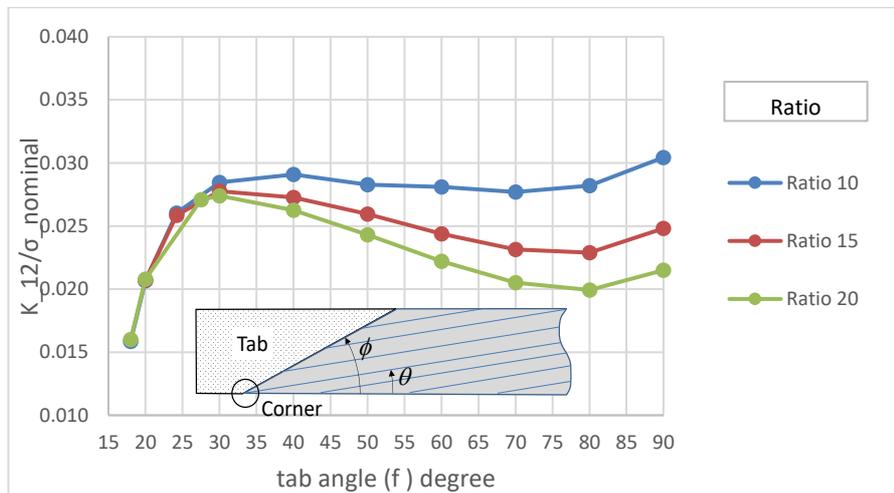


Figura 2.30. Variación del FITGs respecto a σ_2 para distintos ratios $\theta = 15^\circ$ y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$

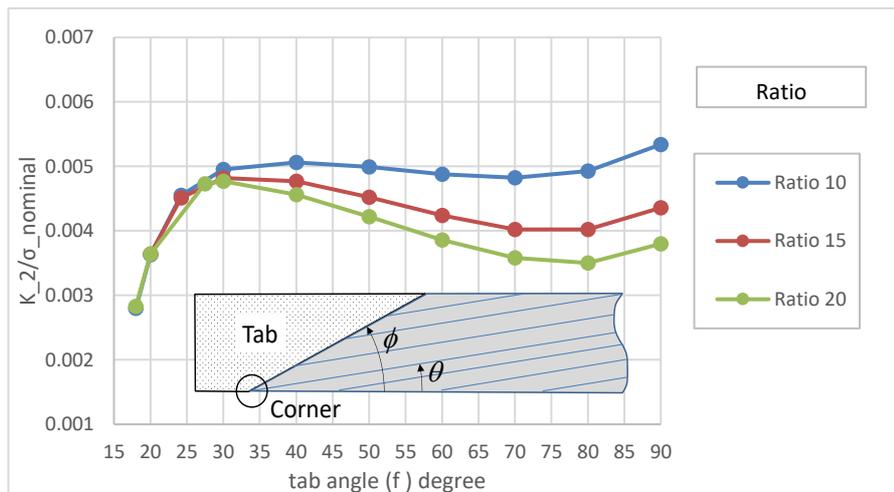


Figura 2.31. Variación del FITGs respecto a σ_{12} para distintos ratios $\theta = 15^\circ$ y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$

Para ambos valores de G_{12} se observa que no hay influencia del ratio del espécimen en el FITG para ángulos de tacos menores de 30° , mientras que para ángulos de tacos mayores los K disminuyen al aumentar el ratio.

Se observa que para el caso de $G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$, una orientación de fibra de 15° y ángulos de tacos grandes

tiene valores de FITG intermedios a orientaciones de fibra 10° y 5° , concretamente los K para $\theta = 15^\circ$ son mayores que en el caso de $\theta = 5^\circ$ y menores que $\theta = 10^\circ$.

Mientras que para el caso de $G_{12} = 2 \text{ GPa}$, una orientación de fibra de 15° y ángulos de tacos grandes, tiene valores menores que para $\theta = 5^\circ$ y 10° . Por lo que podemos decir que las variaciones que se aprecian en el FITG al variar G_{12} son mayores a medida que disminuye la orientación de la fibra.

Esto se analizará con mas detalles en los apartados siguientes. Para el caso de ángulos de tacos pequeños, la variación con el ratio no es tan intuitiva, por lo que se analizará con mejor detalles en apartados siguientes.

FITG para fibras con orientación 20°

La última orientación de la fibra que se va a analizar para ambos valores de G_{12} , es $\theta = 20^\circ$

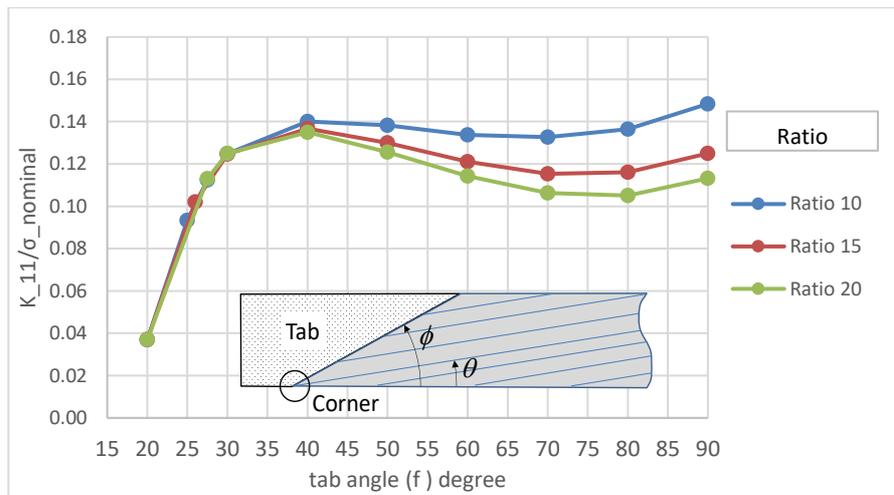


Figura 2.32. Variación del FITGs respecto a σ_1 para distintos ratios $\theta = 20^\circ$ y $G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$

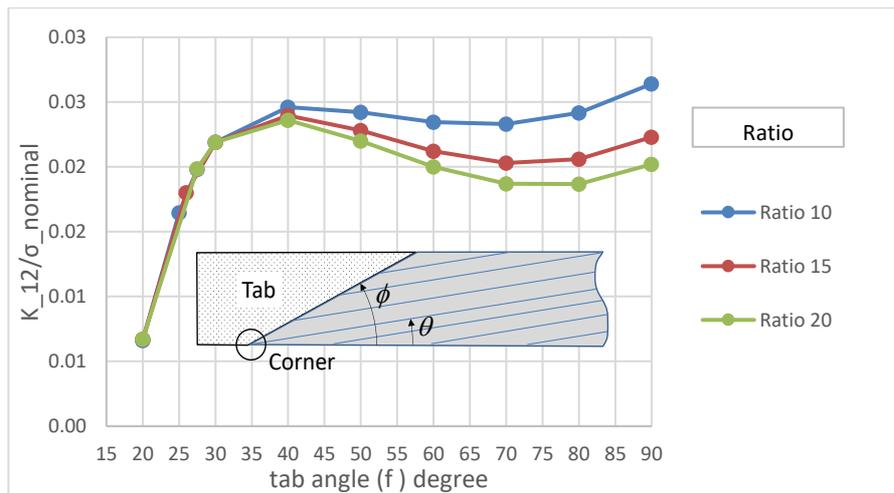


Figura 2.33. Variación del FITGs respecto a σ_{12} para distintos ratios $\theta = 20^\circ$ y $G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$

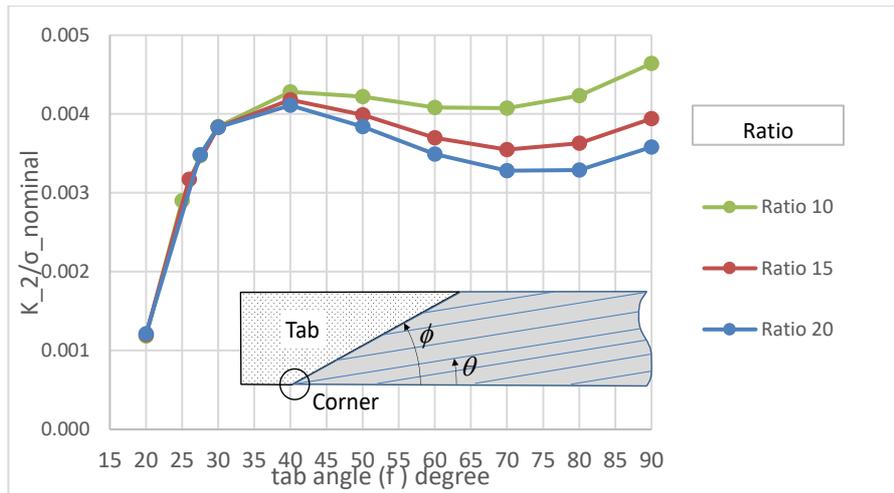


Figura 2.34. Variación del FITGs respecto a σ_2 para distintos ratios $\theta = 20^\circ$ y $G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$

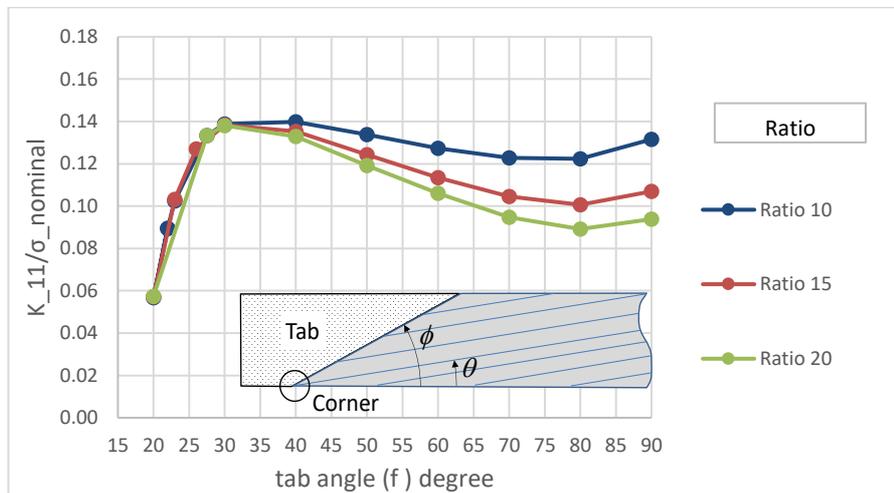


Figura 2.35. Variación del FITGs respecto a σ_1 para distintos ratios $\theta = 20^\circ$ y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$

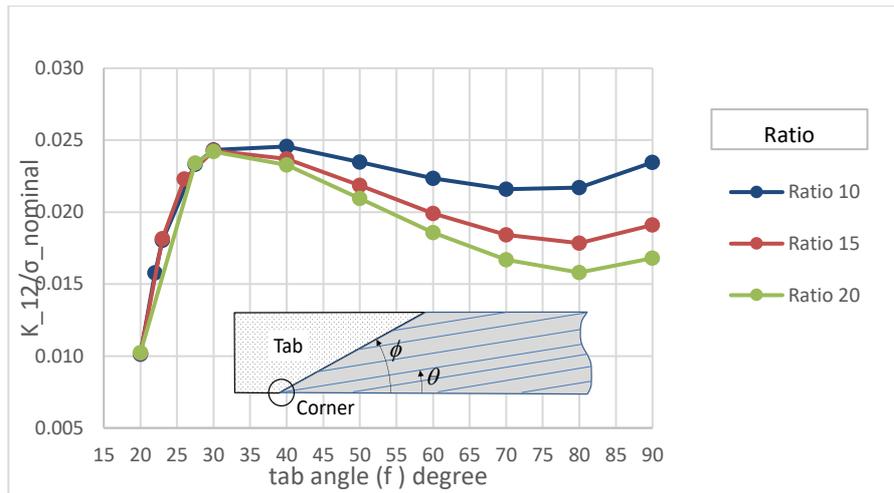


Figura 2.36. Variación del FITGs respecto a σ_{12} para distintos ratios $\theta = 20^\circ$ y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$

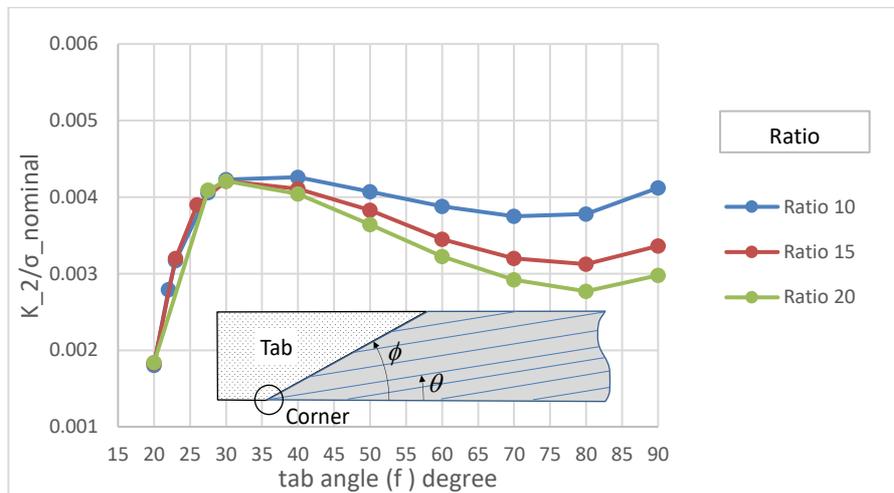


Figura 2.37. Variación del FITGs respecto a σ_2 para distintos ratios $\theta = 20^\circ$ y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$

Para este caso de estudio, $\theta = 20^\circ$, podemos comentar prácticamente algo similar a los apartados anteriores. No hay influencia del ratio del espécimen en el FITG para $\phi < 30^\circ$, mientras que para ángulos de tacos mayores los K disminuyen al aumentar el ratio.

Se observa si se comparan las gráficas que para $\theta = 20^\circ$ y ángulos de tacos grandes, se tienen valores de K menores que para los tres casos anteriores. Para ángulos de taco pequeño habría que realizar un análisis con más profundidad, lo que se verá en apartados porteros.

También sucede, al igual que en los casos anteriores, que al disminuir el módulo de cortadura, los valores de FITG en este caso han disminuido, algo diferente a lo que ocurría en los casos de $\theta = 5$ y 10° .

Por tanto, en resumen, se puede decir que para ángulos de tacos pequeños no hay influencia del ratio del espécimen para cualquiera que sea la orientación de la fibra, y para ángulos de tacos grandes los valores de k aumentan a medida que disminuye el ratio, para cualquiera que sea la orientación de la fibra. Además, también se ha observado que un valor de G_{12} menor da lugar a valores más mayores de FITG. La influencia de la variación de K con la orientación de la fibra se comenta en el siguiente apartado con más detalle.

2.1.5 Variación del Factor de Intensificaciones de Tensiones con el ángulo.

Una vez mostrados los K para cada una de las orientaciones de fibra de interés y para los valores de G_{12} de estudio. Se va a analizar como varían los K con la orientación de la fibra, concretamente nos centraremos para el caso de ratio 10 y para los dos valores de G_{12} .

En las figuras siguientes se representa los valores de K , para ratio $L/w=10$, $G_{12} = 4.28 \text{ MPa}$ y distintos valores de la orientación de fibras θ (5° , 10° , 15° y 20°).

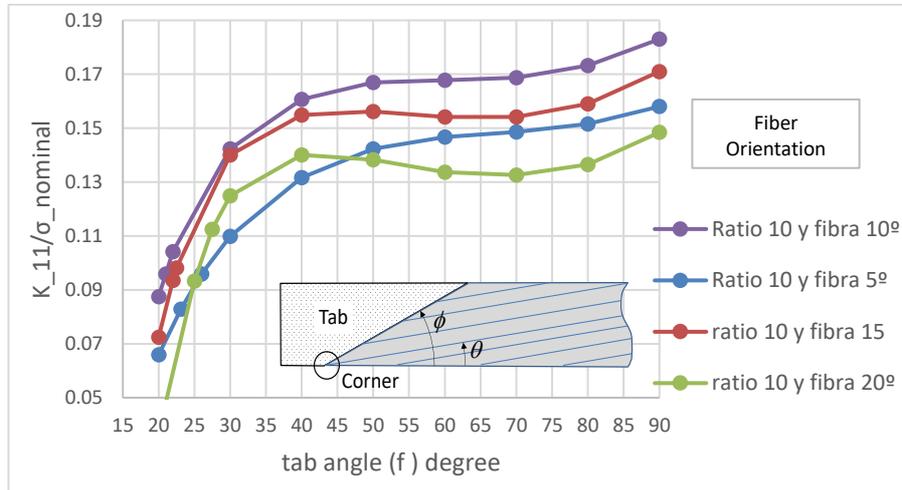


Figura 2.38. Variación del FITGs respecto a σ_1 para distintas orientaciones de fibra y Ratio 10 y $G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$

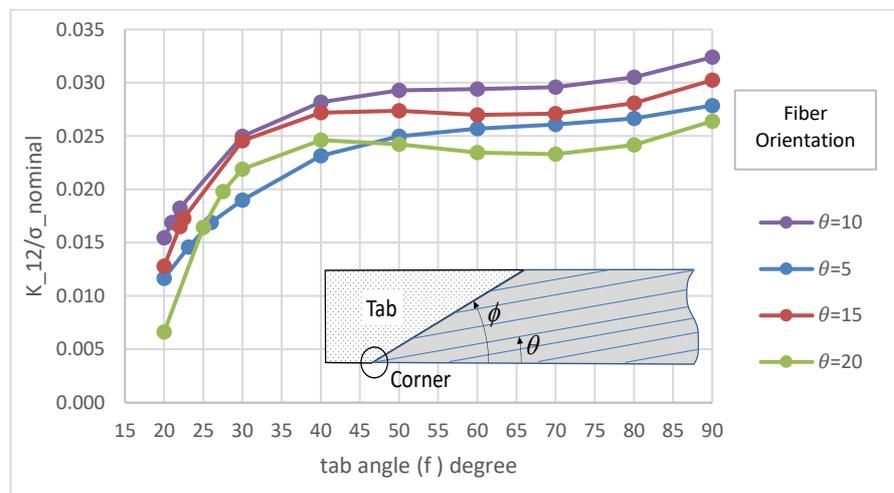


Figura 2.39. Variación del FITGs respecto a σ_{12} para distintas orientaciones de fibra y Ratio 10 y $G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$

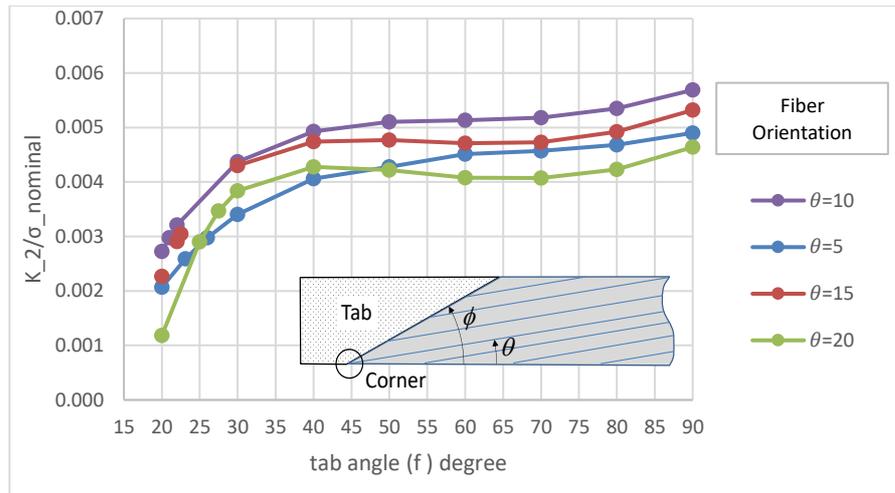


Figura 2.40. Variación del FITGs respecto a σ_2 para distintas orientaciones de fibra y Ratio 10 y $G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$

En las tres figuras anteriores, correspondiente al caso de ratio $L/w=10$ y $G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$, se puede apreciar una tendencia general distinta para ángulos de tacos inferiores y superiores a 45° . Así, para $\phi > 45^\circ$ los K crecen respecto del ángulo de orientación de las fibras θ de acuerdo al siguiente orden: $20^\circ, 5^\circ, 15^\circ$ y 10° , siendo mínimos en 20° y máximos en 10° . Para $25^\circ < \phi < 45^\circ$ los K crecen según el siguiente orden, $5^\circ, 20^\circ, 15^\circ$ y 10° , siendo mínimos en 5° y máximos en 10° . Mientras que para $\phi < 25^\circ$, el orden es: $20^\circ, 5^\circ, 15^\circ$ y 10° , siendo mínimos en 20° y máximo en 10° .

Con el fin de comparar los resultados y analizar como estos cambian al variar G_{12} , en las figuras siguientes se representa los valores de K , para ratio $L/w=10$, $G_{12} = 2 \text{ GPa}$ y distintos valores de la orientación de fibras θ ($5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°).

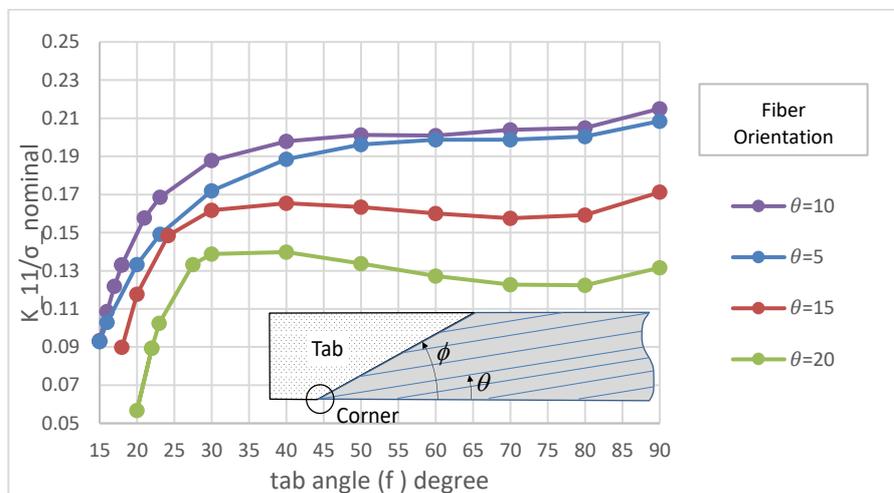


Figura 2.41. Variación del FITGs respecto a σ_1 para distintas orientaciones de fibra y Ratio 10 y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$

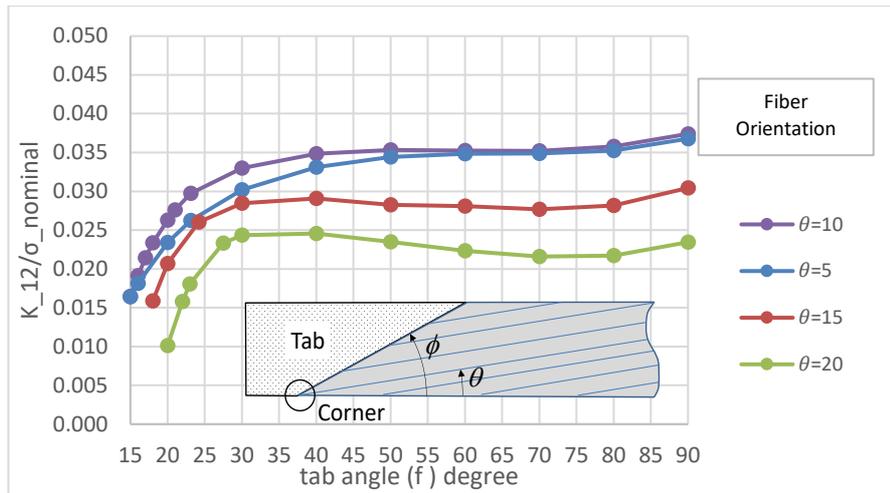


Figura 2.42. Variación del FITGs respecto a σ_{12} para distintas orientaciones de fibra y Ratio 10 y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$

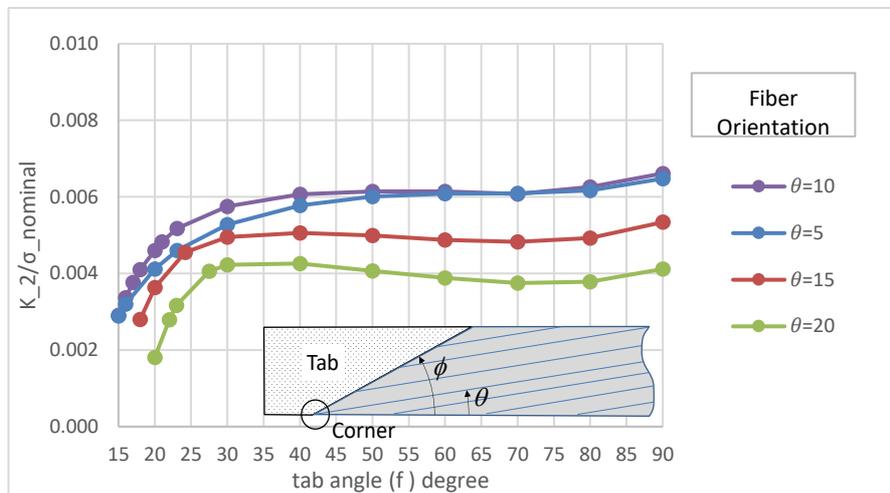


Figura 2.43. Variación del FITGs respecto a σ_2 para distintas orientaciones de fibra y Ratio 10 y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$

En las tres figuras anteriores, correspondiente al caso de ratio $L/w=10$ y $G_{12} = 2 \text{ MPa}$, se puede apreciar que los K crecen respecto del ángulo de orientación de las fibras θ de acuerdo al siguiente orden: 20° , 15° , 5° y 10° , siendo mínimos en 20° y máximo en 10° , para cualquiera que sea el ángulo del taco.

Dado que las gráficas de K respecto a ángulo de taco variando la orientación de las fibras no son tan simples como las gráficas en las que mostramos \bar{K} para varios ratios, se va a realizar un análisis más profundo, para ver la variación que tiene G en K .

En las siguientes figuras, para mostrar una comparación más exhaustiva del efecto que tiene tomar un valor de cortadura u otro, se muestran en una misma gráfica los valores de K para ambos G_{12} , ratio 10 y orientaciones de fibra de 5° , 10° y 20° , no se muestra los valores correspondientes a $\theta = 15^\circ$ para una mayor claridad de los gráficos. En línea continua se muestran los valores correspondientes a $G_{12} = 2 \text{ MPa}$, mientras que en línea discontinua se muestran los correspondientes a $G_{12} = 4.28 \text{ MPa}$.

Se observa que al cambiar de $G_{12} = 4.28 \text{ MPa}$ con $G_{12} = 2 \text{ MPa}$, la tendencia no es tan evidente como sucedía cuando dejábamos constante la orientación de la fibra y variábamos los ratios. Se puede ver que los valores de K para ángulos de orientaciones pequeños han aumentado, sobretodo para el caso de 5° , aumentando un poco para el caso de 10° . Sin embargo, a pesar de no representarse, para ángulos de taco 15° permanece prácticamente constante para ángulos de tacos grandes y para ángulos de tacos pequeños se hace más pequeño, mientras que para orientaciones de 20° se nota una disminución de los valores de K .

Por lo que podemos decir que orientaciones pequeñas de las fibras los valores de K aumentan, aumentando más cuanto más pequeño sea θ , luego existe una transición para una orientación aproximadamente de 15° donde las variaciones son pequeñas y posteriormente a medida que aumentamos θ los valores de K disminuyen.

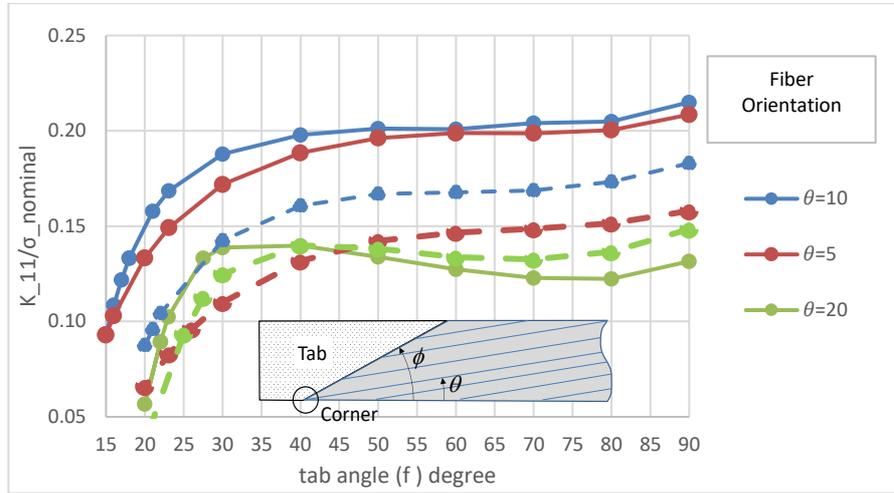


Figura 2.44. Comparación del FITGs respecto a σ_1 $G_{12} = 2 \text{ GPa}$ y $G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$

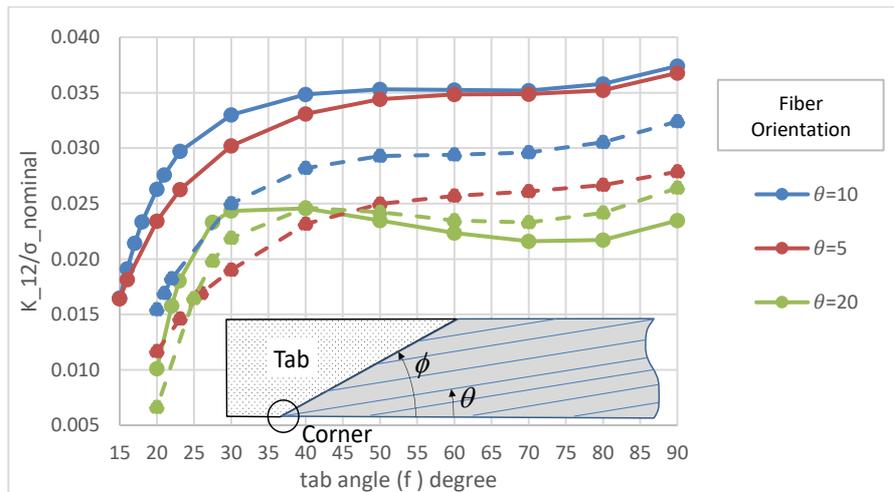


Figura 2.45. Comparación del FITGs respecto a σ_{12} $G_{12} = 2 \text{ GPa}$ y $G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$

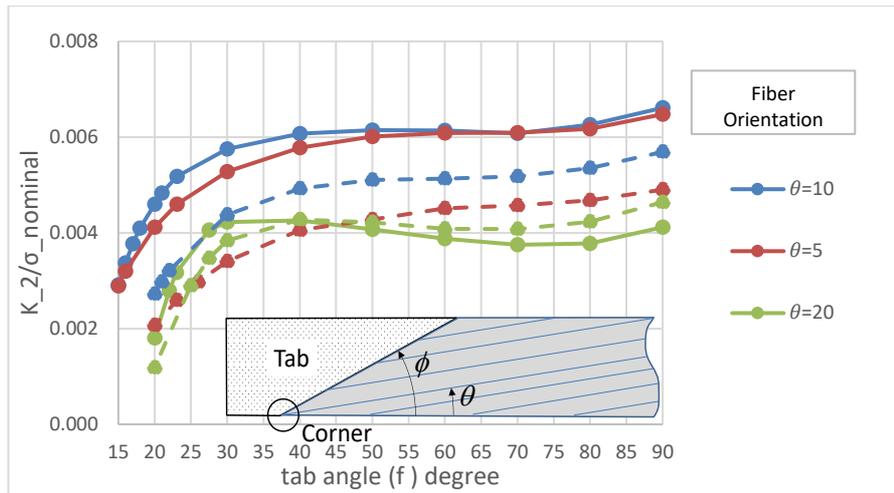


Figura 2.46. Comparación del FITGs respecto a σ_2 $G_{12} = 2 \text{ GPa}$ y $G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$

En apartados anteriores, se mostraron las tablas en las que se señalaban los ángulos teóricos para cada orientación de fibra y su orden de singularidad. A continuación, se muestran estos ángulos teóricos y sus FITG respectivos para las distintas orientaciones de fibras θ

θ (°)	ϕ teórico (°)	κ_1	κ_{12}	κ_2
5	29.6	0.106	0.0192	0.00337
10	23.1	0.109	0.0196	0.00342
15	24.2	0.111	0.0198	0.00347
20	27.5	0.112	0.0198	0.00347

Tabla 2.6. Valores de FITG correspondientes a los ángulos teóricos para $G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$ y distintas orientaciones.

θ (°)	ϕ teórico (°)	κ_1	κ_{12}	κ_2
5	29.6	0.166	0.0299	0.00521
10	23.1	0.16858	0.02972	0.00518
15	24.2	0.1485	0.02603	0.00455
20	27.5	0.1333	0.02333	0.00406

Tabla 2.7. Valores de FITG correspondientes a los ángulos teóricos para $G_{12} = 2 \text{ GPa}$ y distintas orientaciones.

Como se puede observar, los valores de las tablas anteriores, el FITG para el caso de $G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$ es menor cuanto menor es el ángulo de orientación de las fibras θ , siendo mínimo para 5° y máximo para 15° y 20° . Además, se observa, que a partir de 15° , el valor se estabiliza, tomando el mismo valor para $\theta = 15^\circ$ y $\theta = 20^\circ$.

Sin embargo, el FITG para el caso de $G_{12} = 2 \text{ GPa}$ sigue una evolución diferente, los valores de κ crecen prácticamente a medida que disminuye el ángulo de orientación de la fibra.

2.2 Modelo 3D

Una vez mostrado el modelo 2D, en este apartado se ha realizado mediante ANSYS un modelo 3D usando el método de los elementos finitos, a diferencia del modelo 2D, ahora se ha simulado tanto la lámina como los tacos, realizando de esta manera un modelo más realista.

El material de la probeta que se va a considerar para el estudio es un compuesto de grafito-epoxy con denominación AS4/8552. Las propiedades tanto de este como de los tacos son las que aparecen al principio del capítulo 4.

El modelo 3D elaborado consiste en unos tacos de longitud de valor a , espesor e y ancho w y una lámina de Longitud $L+2a$ mm, y de ancho y espesor igual que los tacos. Dado su simetría respecto al plano paralelo a la lámina, solamente se ha elaborado la mitad del modelo y posteriormente como condición de contorno se ha aplicado simetría respecto en la superficie inferior de la lámina.

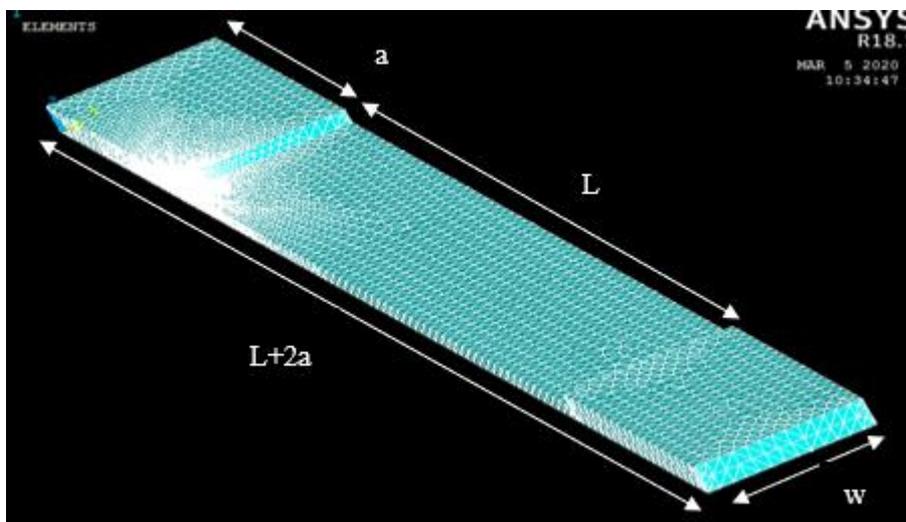


Figura 2.47. Geometría y mallado del modelo 3D

Una vez realizado la geometría y el mallado adecuado, refinando en la esquina de interés tal como se muestra en la figura de arriba, las condiciones de contorno que se han considerado para simular de forma correcta el ensayo “Off-Axis” son un empotramiento total del taco de la izquierda y permitiendo únicamente en el taco de la derecha un desplazamiento longitudinal uniforme sobre la cara superior del taco, además como se ha indicado anteriormente se ha aplicado una condición de simetría, permitiéndonos de esta manera realizar el mallado solamente de la mitad del espécimen. Además, para modelar la acción de las mordazas se ha aplicado una compresión sobre las superficies superiores de los tacos.

Este modelo 3D nos permitirán obtener los valores de δ y K en la esquina de estudio para los distintos valores geométricos.

Como dijimos anteriormente, el módulo de cortadura no es constante con la deformación angular, en este modelo se tomará el valor del módulo de cortadura secante. Dado que este es un valor más representativo, en términos de fallos de lámina, que el módulo de cortadura correspondiente a la tangente inicial.

Se comentó anteriormente que el valor de las singularidades depende exclusivamente del problema local, ahora bien, se ha podido comprobar que hay diferencias entre el modelo 2D y el 3D. En el modelo 2D los tacos eran una recta, además la esquina de estudio (esquina A) era uni-material libre-empotrada, sin embargo, en el modelo 3D los tacos se han modelado de forma más realista, tal como se puede observar, de modo que la esquina de estudio es bi-material, con condiciones libre-libre. Esto va a implicar que, aunque a nivel global los resultados de ambos modelos coincidan, a nivel local los valores de singularidades en la esquina difieran. Por ello, en los siguientes apartados se irán comparando el valor de las singularidades de ambos modelos para el caso de $G_{12} = 2 \text{ GPa}$.

Por tanto, antes de todo, se comprobará que ambos modelos son equivalentes a nivel global, por ello a continuación se muestran los mapas de desplazamientos y de tensiones en la lámina, para ambos modelos. Concretamente, se muestran los resultados correspondientes a láminas de $L/w = 10$, $\theta = 10^\circ$, $\phi = 90$ y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$.

Ahora bien, para poder comparar ambos modelos además de tener las mismas propiedades mecánicas y geométricas, el desplazamiento longitudinal que se aplica para simular el ensayo ‘Off-Axis’, debe de originar el mismo estado tensional en las secciones transversales. Para los valores geométricos y mecánicos anteriormente indicados, en el modelo 2D se ha aplicado un desplazamiento en el lado derecho de la lámina de 0.0074 mm , que equivale a un estado tensional de $38.683/A \text{ MPa}$, siendo A la sección transversal de la lámina en mm^2 , mientras que para el modelo 3D se ha aplicado un desplazamiento sobre la superficie del taco derecho, de valor 0.0078 mm , que equivale a un estado tensional de $38.58/A \text{ MPa}$, siendo A la sección transversal de la probeta, que al tener la misma geometría que en el caso 2D, esta sección transversal coinciden, y por tanto se puede observar que este estado tensional es muy similar en ambos modelos y por tanto los resultados 2D y 3D son comparables.

Como se ha comentado anteriormente se va a realizar una comparación a nivel global de ambos modelos. En primer lugar, las figuras siguientes corresponden al mapa de desplazamiento longitudinal de la lámina, la primera figura corresponde al modelo 2D, y la segunda al modelo 3D, para los valores anteriormente indicado. Y se puede observar que efectivamente, el desplazamiento longitudinal de la lámina a nivel global es prácticamente igual para ambos modelos.

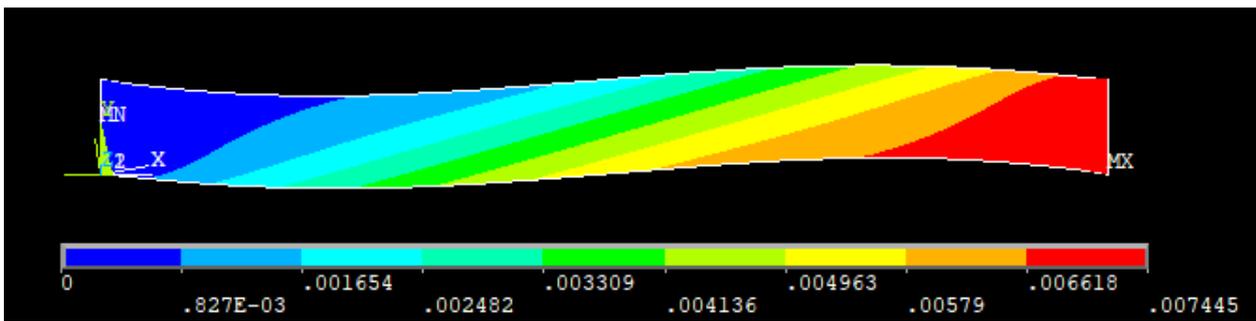


Figura 2.48. Desplazamientos u_1 (mm) ratio 10, taco recto, $G_{12} = 2 \text{ GPa}$ y modelo 2D

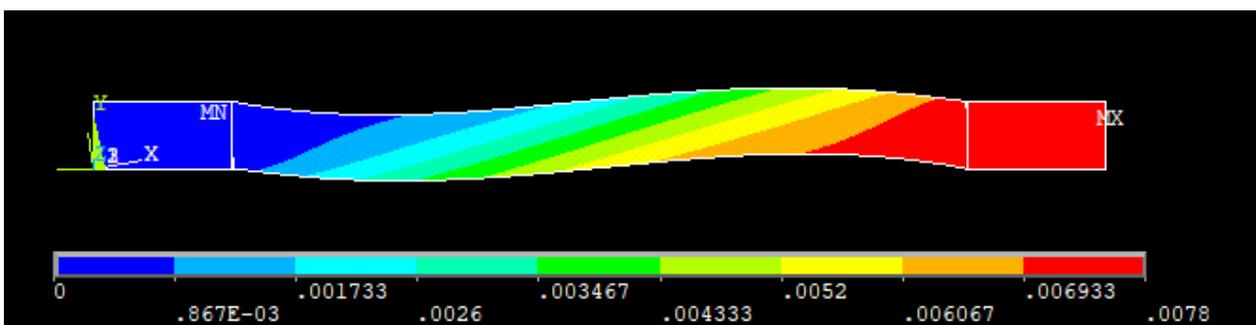


Figura 2.49. Desplazamientos u_1 (mm) ratio 10, taco recto, $G_{12} = 2 \text{ GPa}$ y modelo 3D

Las figuras siguientes corresponden a los desplazamientos u_2 de ambos modelos. Donde se puede observar, al igual que con u_1 , que los valores de ambos modelos son muy similares.

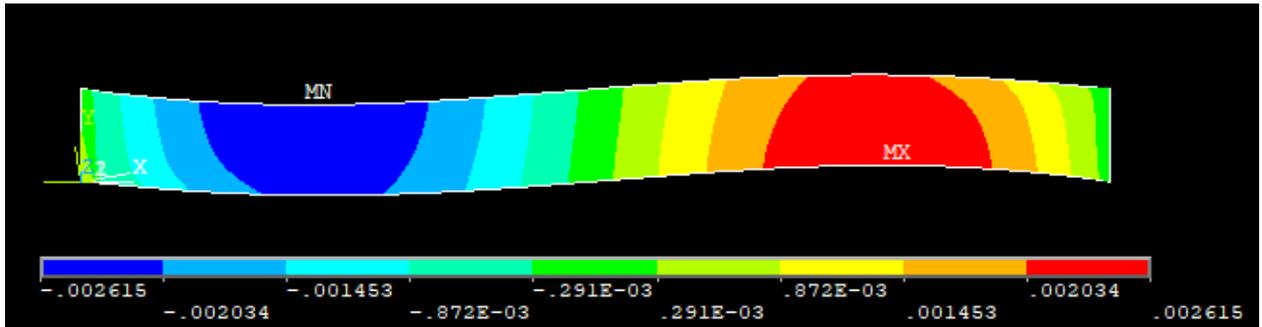


Figura 2.50. Desplazamientos $u_2(mm)$ ratio 10, taco recto, $G_{12} = 2 GPa$ y modelo 2D

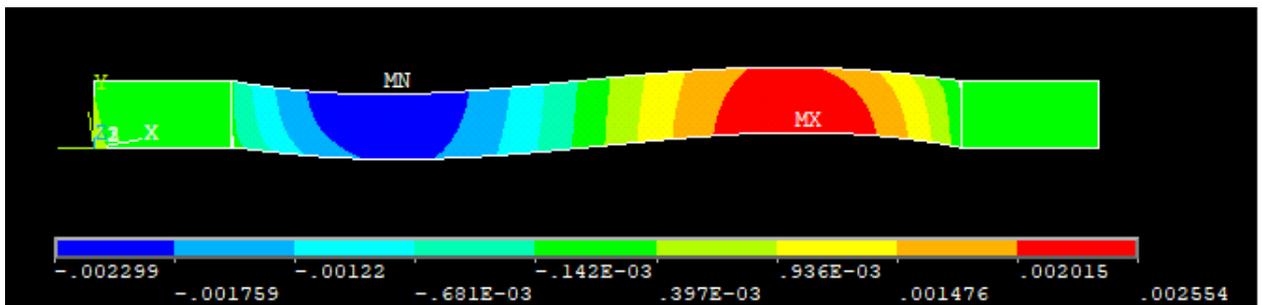


Figura 2.51. Desplazamientos $u_2(mm)$ ratio 10, taco recto, $G_{12} = 2 GPa$ y modelo 3D

En cuanto al mapa de tensiones σ_1 , se observa que en el centro de la probeta ambos modelos tienen un valor muy similar.

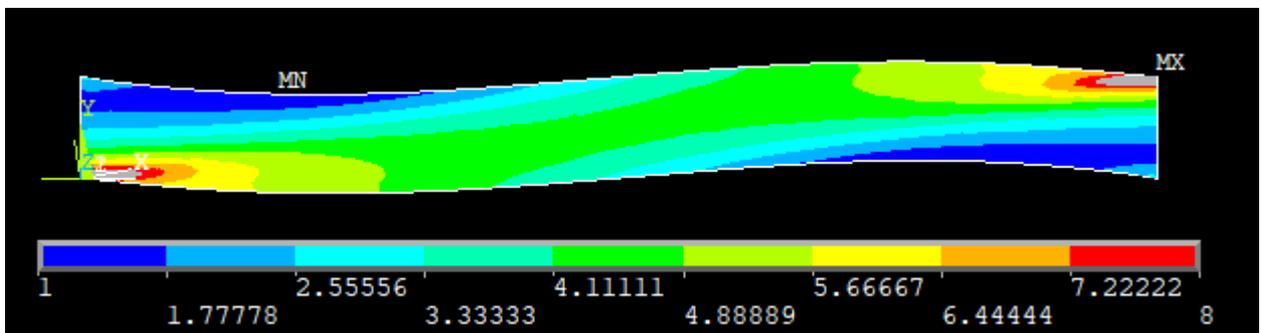


Figura 2.52. Distribución de tensiones $\sigma_1(MPa)$, ratio 10, taco recto, $G_{12} = 2 GPa$ y modelo 2D

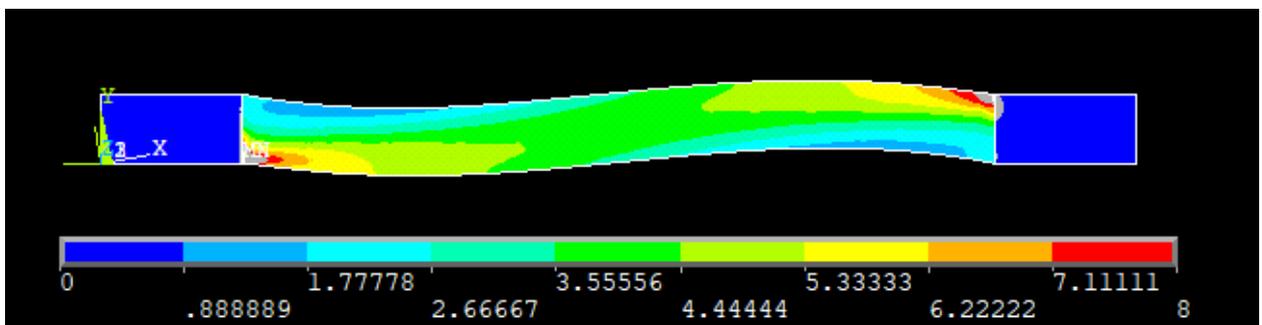


Figura 2.53. Distribución de tensiones $\sigma_1(MPa)$, ratio 10, taco recto, $G_{12} = 2 GPa$ y modelo 3D

Sin embargo, aunque a nivel global ambos modelos sean similares, a nivel local hay discrepancia tal como comentamos anteriormente. Si realizamos un zoom en la esquina A en ambos modelos, se observa que

efectivamente la distribución de tensiones varía entre ambos modelos (hay diferencia entre los valores máximos, en el modelo 2D se alcanza un valor máximo de σ_1 de 241.22 MPa, mientras que en el 3D el valor máximo es de 206.232 MPa, valores máximos que se alcanzan en las esquinas dada las singularidades que tienen lugar en ellas, por lo tanto, a nivel local hay diferencias entre ambos modelos).

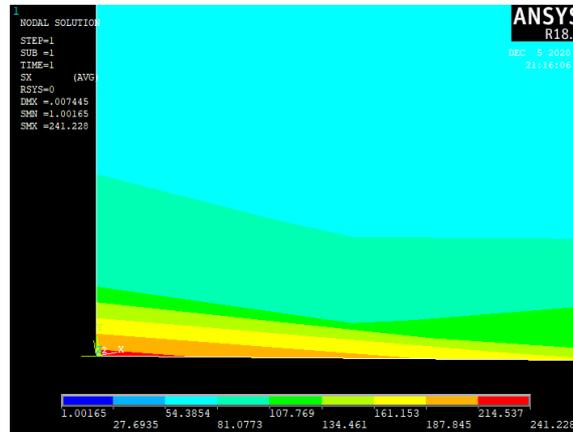


Figura 2.54. Zoom en la esquina A, distribución de tensiones σ_1 (MPa) modelo 2D

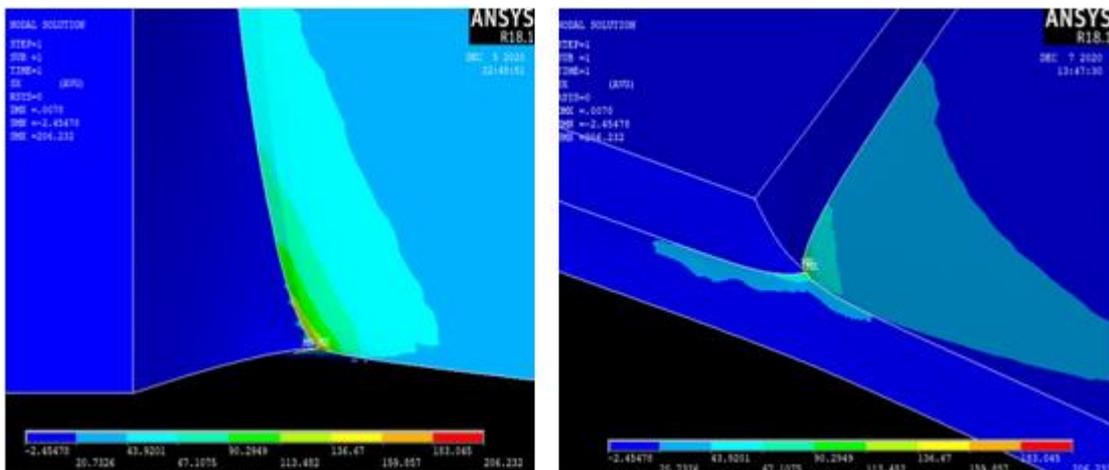


Figura 2.55. . Zoom en la esquina A, distribución de tensiones σ_1 (MPa) modelo 3D

Si observamos ahora el mapa de tensiones σ_2 , se puede comentar prácticamente lo mismo. En el centro de las probetas ambos modelos tienen valores similares, sin embargo, a nivel local existen diferencias. En el modelo 2D se alcanza una σ_2 máxima de 10.853 MPa, mientras que en el modelo 3D se alcanza un máximo de 7.039 MPa, valores máximos que se alcanzan en las esquinas debido a la singularidad existente en estas.

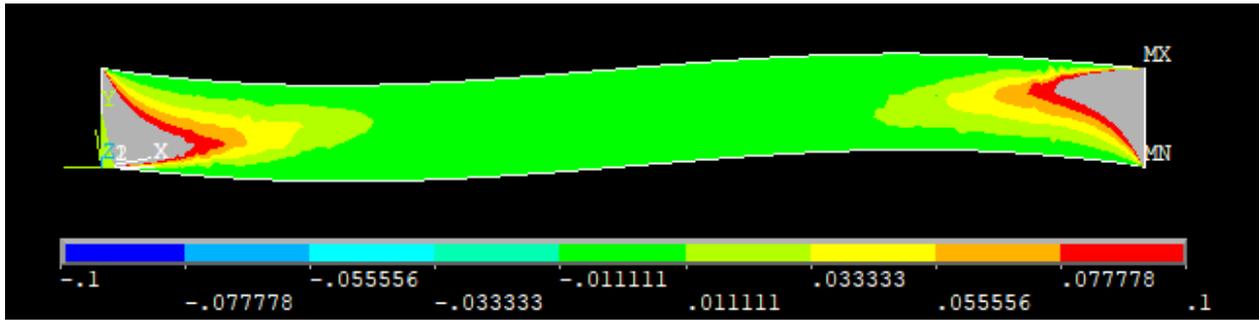


Figura 2.56. Distribución de tensiones σ_2 (MPa), ratio 10, taco recto, $G_{12} = 2$ GPa y modelo 2D

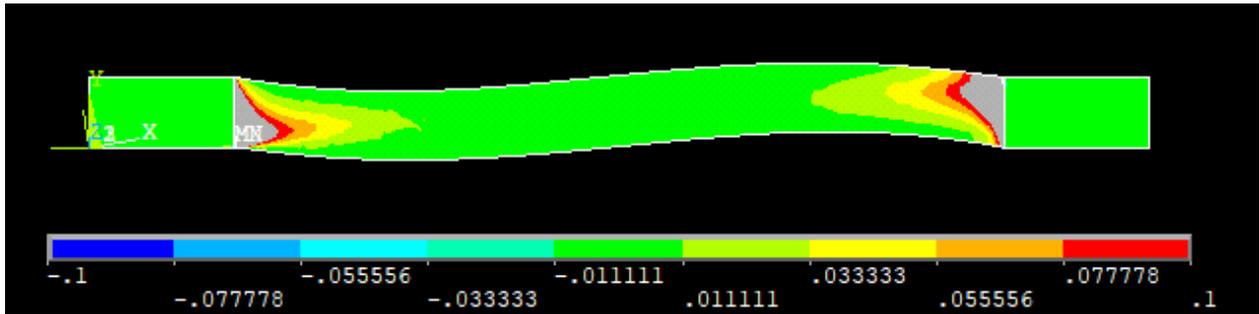


Figura 2.57. Distribución de tensiones σ_2 (MPa), ratio 10, taco recto, $G_{12} = 2$ GPa y modelo 3D

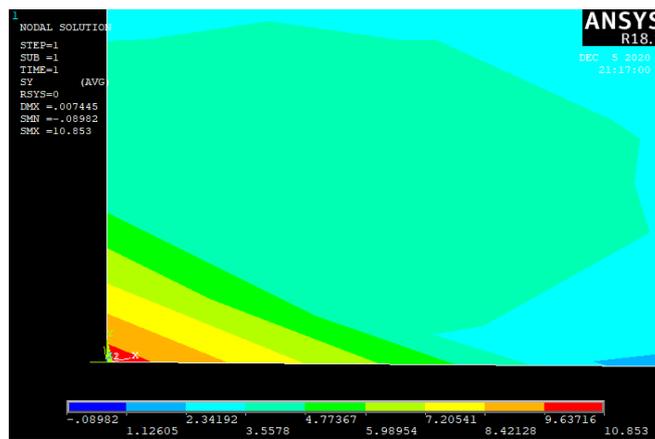


Figura 2.58. Zoom en la esquina A, distribución de tensiones σ_2 (MPa) modelo 2D

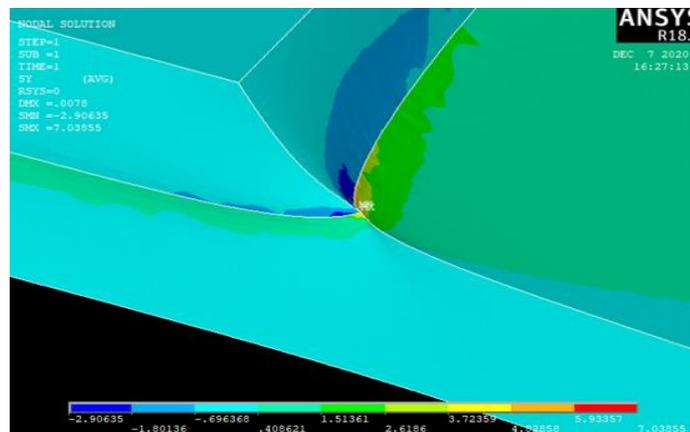


Figura 2.59. Zoom en la esquina A, distribución de tensiones σ_2 (MPa) modelo 3D

En cuanto a la tensión σ_{12} podemos comentar algo análogo a lo sucedido con las tensiones anteriores.

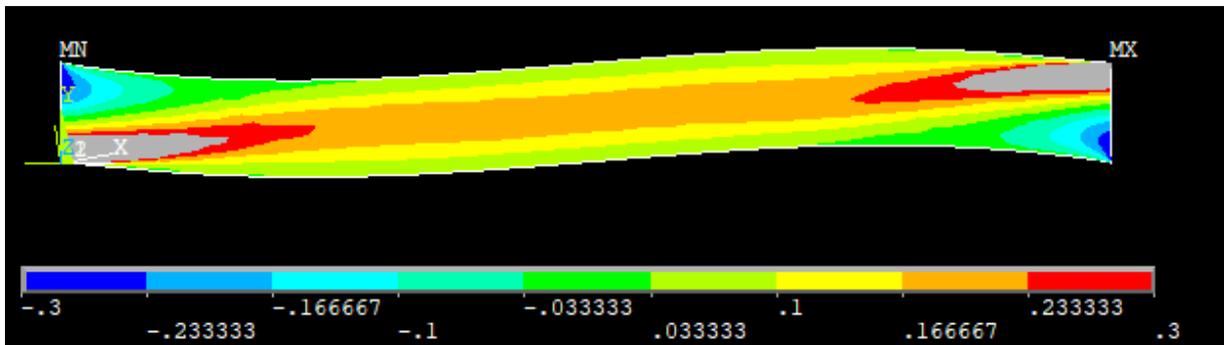


Figura 2.60. Distribución de tensiones $\sigma_{12}(MPa)$, ratio 10, taco recto, $G_{12} = 2 GPa$ y modelo 2D

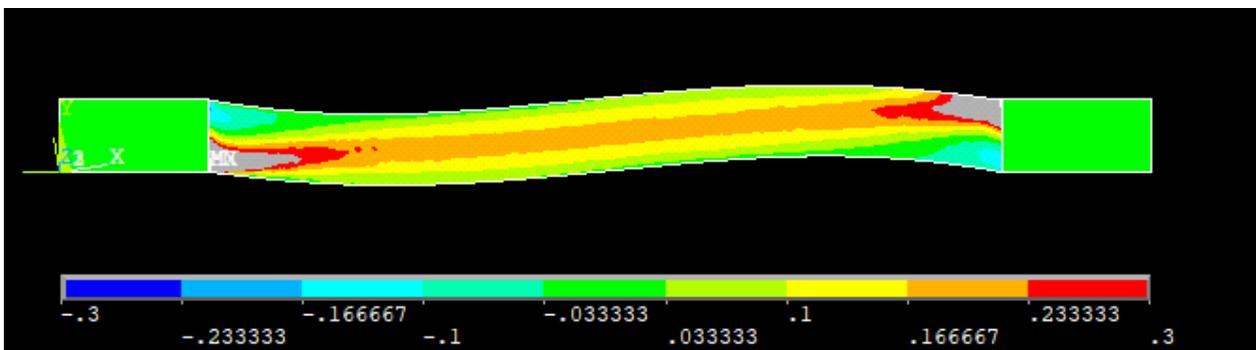


Figura 2.61. Distribución de tensiones $\sigma_{12}(MPa)$, ratio 10, taco recto, $G_{12} = 2 GPa$ y modelo 3D

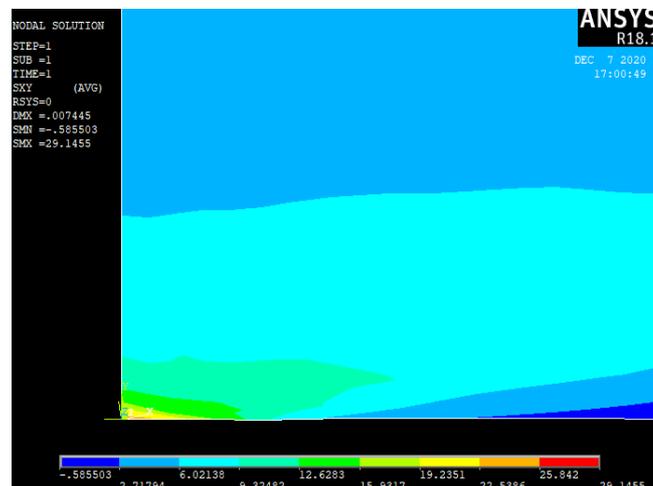


Figura 2.62. Zoom en la esquina A, distribución de tensiones $\sigma_{12}(MPa)$ modelo 2D

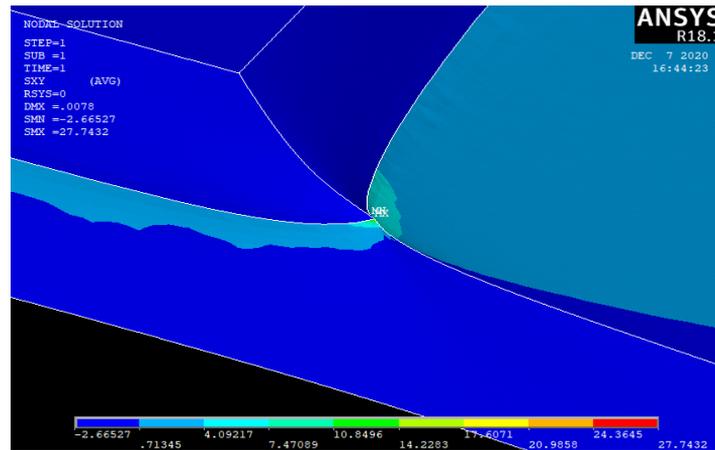


Figura 2.63. . Zoom en la esquina A, distribución de tensiones σ_{12} (MPa) modelo 3D

Después de ver los mapas de desplazamientos y de tensiones en las probetas para ambos modelos, podemos confirmar que efectivamente los resultados de ambos modelos coinciden a nivel global, sin embargo, a nivel local hay algunas diferencias, por lo tanto, tal como se comentó anteriormente, habrá pequeñas variaciones entre ambos modelos en los valores de las singularidades.

Se puede ver al comparar ambos modelos que, en primer lugar la inclusión de los tacos aporta una flexibilización del estado tensional 3D, y en segundo lugar que la geometría de la esquina 3D es más severa en cuanto a concentración de tensiones que la 2D.

Un hecho que se ve al analizar los mapas de tensiones es que el modelo 2D da lugar a tensiones máximas mayores en las esquinas, esto puede anticipar que el modelo 2D es más conservador y por tanto utilizar este al analizar singularidades no sería tan descavellado, en cuanto a termino de fallo de la lámina se refiere.

En los siguientes apartados se calcularán los valores de δ y K para el modelo 3D y los distintos parámetros geométricos, tal como se realizó en el 2D. El estudio se realizará para el valor secante del módulo de cortadura ($G_{12} = 2 \text{ GPa}$).

2.2.1 Variación del orden de singularidad con el ratio

Tras calcular todos los valores de δ y K, de manera análoga a como se hizo en el 2D, se muestran en primer lugar las variaciones de los órdenes de singularidad de tensiones (δ) en la esquina A frente al ángulo del taco (ϕ), manteniendo la orientación de la fibra constante ($\theta = 10^\circ$) y para cuatro ratios distintos (L/w 10, 12.5, 15 y 20).

Se observa en la figura siguiente, que, si la orientación de la fibra permanece constante, el orden de singularidad de tensiones no varía prácticamente con el ratio. Exactamente lo mismo que sucedía en el modelo 2D, lo cual es lógico tal como se comentó anteriormente, dado que el valor de las singularidades depende exclusivamente del problema local, y las variaciones en el ratio no alteran las condiciones locales en la esquina.

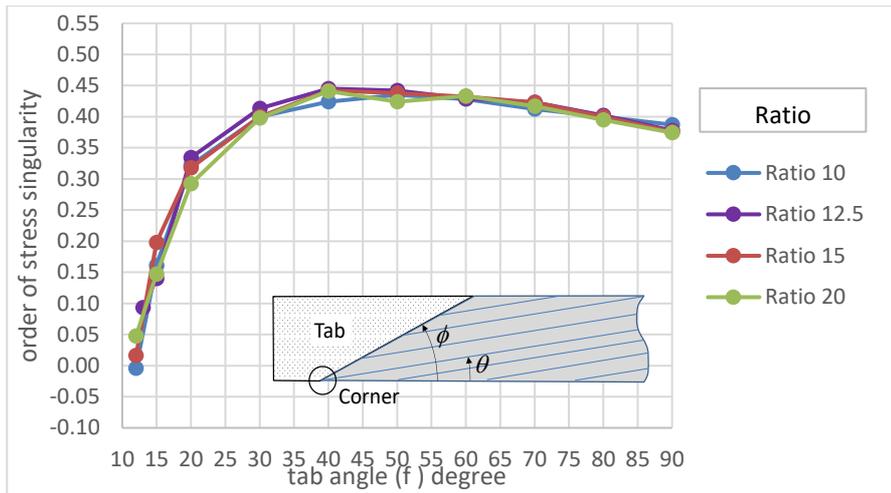


Figura 2.64. Variación del orden de singularidad con el ángulo del taco para distintos ratios $\theta = 10^\circ$ y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$

En la figura siguiente se representan los δ de ambos modelos, donde se observa que hay variaciones entre ambos, debido a como vimos anteriormente que existen diferencias entre los modelos a nivel local. Se observa al comparar ambos modelos que la tendencia es la misma para ambos valores, siendo los valores de δ superiores para el modelo 3D.

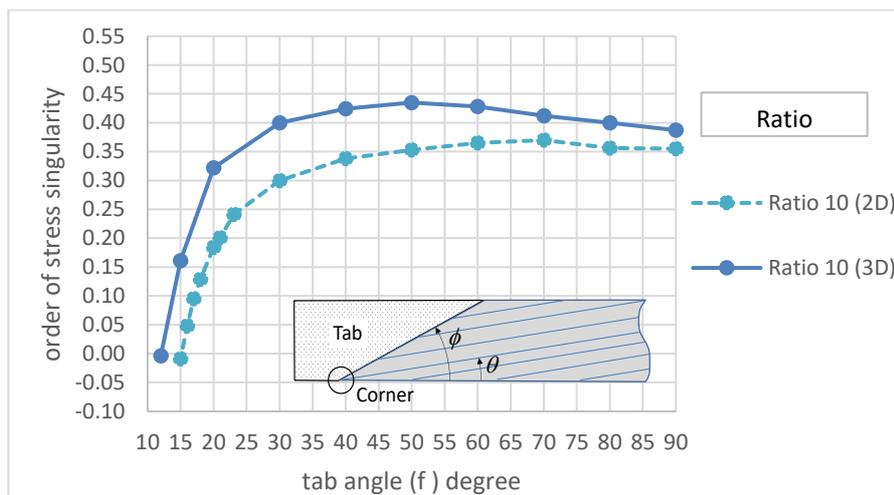


Figura 2.65. Comparación modelo 3D y 2D del orden de singularidad con el ángulo del taco para ratio 10, $\theta = 10^\circ$ y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$

2.2.2 Variación del orden de singularidad con la orientación de la fibra

Para ver como influye la orientación de la fibra en los valores de δ , se representa en la siguiente figura δ con respecto al ángulo del taco ϕ , para cuatro orientaciones de fibra diferentes ($\theta = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°). Los valores se representan solamente para el ratio 10, dado que como hemos visto en el apartado anterior este no influye en los valores de δ , al depender este solamente de la solución local.

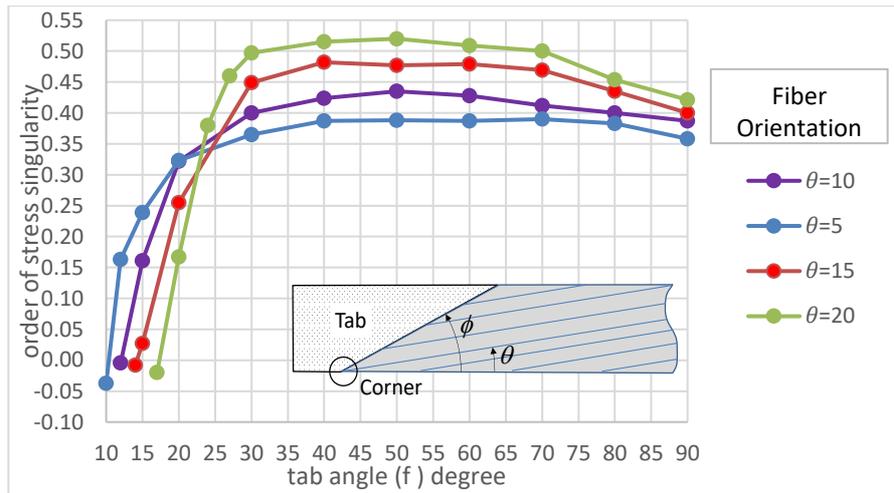


Figura 2.66. Variación del orden de singularidad con el ángulo del taco para distintas orientaciones de las fibras. Ratio 10 y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$

Esta gráfica tiene un comportamiento análogo al del modelo 2D. Los valores de δ crecen al aumentar ϕ hasta alcanzar su máximo para ángulos de taco entorno a 50° para después decrecer con ϕ .

Para $\phi \geq 25^\circ$, el orden de singularidad δ aumenta con el ángulo de las fibras θ . Sin embargo, $\phi < 25^\circ$ la dependencia con θ no es tan evidente, además para ángulo de tacos pequeños se pretende que el ángulo de los tacos siga la dirección de las líneas de isodesplazamientos correspondientes a la configuración ideal del ensayo de tracción "off-axis".

En la siguiente figura se ha representado δ para $\theta = 10^\circ$ y 20° y para ambos modelos. Si se compara δ de ambos modelos, se comprueba que los valores siguen un comportamiento muy similar, siendo mayores para el modelo 3D.

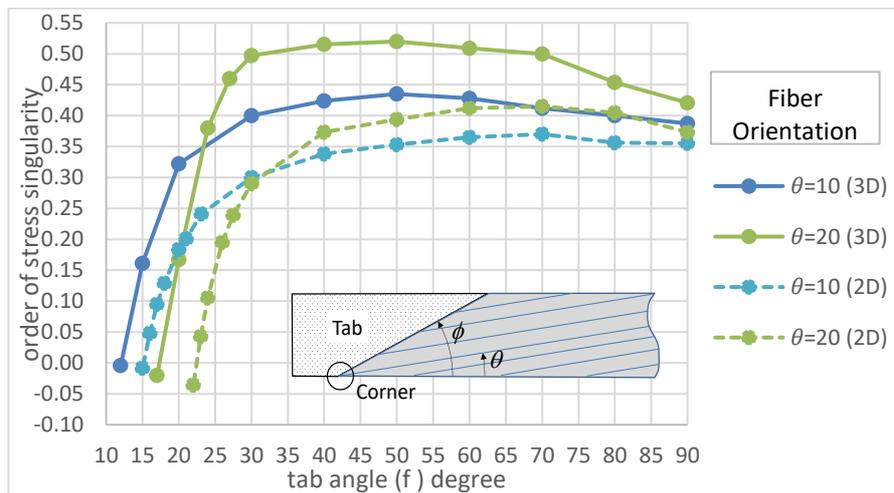


Figura 2.67. Comparación modelo 3D y 2D del orden de singularidad con el ángulo del taco. Ratio 10 y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$

El objetivo de los tacos oblicuos es que el ángulo de los tacos siga la dirección de las líneas de isodesplazamientos correspondientes a la configuración ideal del ensayo de tracción "off-axis". En la siguiente tabla se muestra para cada orientación de fibra, los ángulos teóricos de los tacos, así como el orden de singularidad asociado para ambos modelos.

θ (°)	ϕ teórico (°)	δ (Modelo 3D)	δ (Modelo 2D)
5	29.6	0.355	0.161
10	23.1	0.35	0.241
15	24.2	0.334	0.24
20	27.5	0.455	0.239

Tabla 2.8. Ángulos teóricos de los tacos y orden de singularidad correspondiente para las distintas orientaciones de las fibras.

Se puede observar que los valores de δ asociados a los ángulos teóricos, son mayores para el modelo 3D, dado al aumento de los valores de δ para dicho modelo con respecto al modelo 2D.

Existe un ángulo de los tacos, inferior al teórico, que provoca la desaparición de la singularidad de tensiones en el punto A, debido a que el orden de singularidad δ se anula. En este sentido, para el modelo 3D, la orientación $\theta=15^\circ$ es la más favorable, al ser la que el ángulo teórico se encuentra más próximo al que produce $\delta = 0$.

θ (°)	ϕ teórico (°)	ϕ singularidad nula (°) Modelo 2D	ϕ singularidad nula (°) Modelo 3D
5	29.6	15.1	11
10	23.1	15.3	13
15	24.2	18.4	14.7
20	27.5	22.3	17.5

Tabla 2.9. Ángulos teóricos y ángulos del taco con $\delta = 0$.

2.2.3 Variación del Factor de Intensificaciones de Tensiones con el Ratio

En este apartado se mostrarán al igual que se realizó con el modelo 2D la variación del FITG, en primer lugar dejaremos constante la orientación de la fibra y posteriormente el ratio.

Al igual que se realizó en el 2D, los valores se normalizarán con la tensión en la sección transversal equivalente al desplazamiento longitudinal aplicado en los tacos derechos.

FITG para fibras con orientación 10°

En la siguiente figura se representa la variación de los FITG (K_1^I, K_{12}^I, K_2^I) con el ratio para un ángulo de orientación de la fibra de 10°. Además, también se mostrarán en una misma gráfica los valores de FITG, de ambos modelos para poder realizar una mejor comparación.

Se puede observar que, para ambos modelos no hay influencia del ratio L/w para ángulos de tacos $\phi < 30^\circ$. Sin embargo, para ángulos de tacos mayores, los FITG son menores cuanto mayor es el ratio L/w del espécimen, por tanto, ambos modelos tienen la misma tendencia en este caso, con la única salvedad que los valores del modelo 3D son inferiores. Por tanto, este comportamiento en el modelo 3D también explica lo que sucede experimentalmente para configuraciones de tacos rectos ($\phi=90^\circ$) y orientación de las fibras $\theta=10^\circ$, tal como se comprobó en [8] y se comentó en el apartado 4.1.3.

Se ha comentado que a pesar de que la tendencia entre ambos modelos es similar, el modelo 3D tiene valores de FITG menores que el 2D, por tanto, aunque el modelo 3D es más realista (es un modelo más similar al real), el

modelo 2D nos proporciona valores más conservadores del FITG.

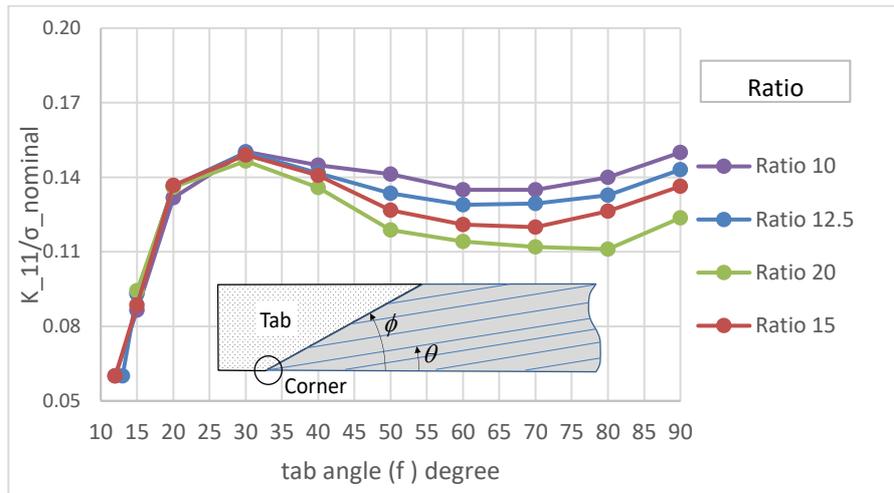


Figura 2.68.. Variación del FITGs respecto a σ_1 para distintos ratios $\theta = 10^\circ$ y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$

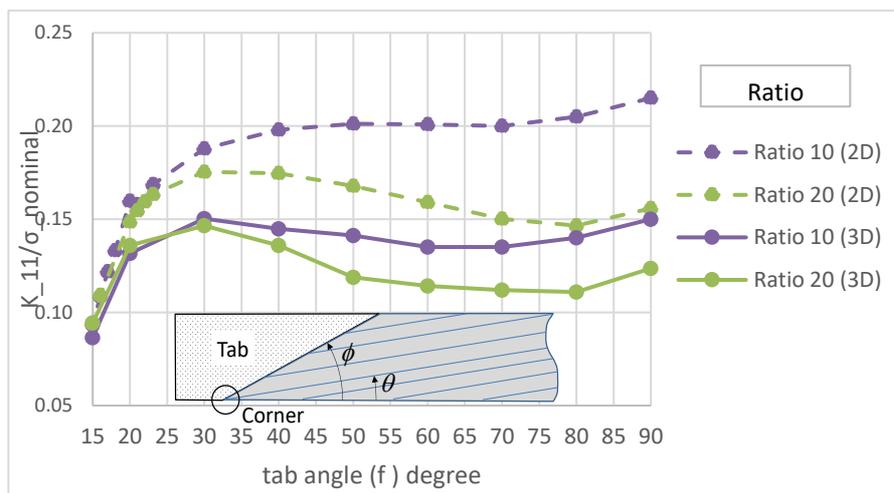


Figura 2.69. Comparación FITGs de los modelos 3D y 2D. para σ_1 , distintos ratios $\theta = 10^\circ$ y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$

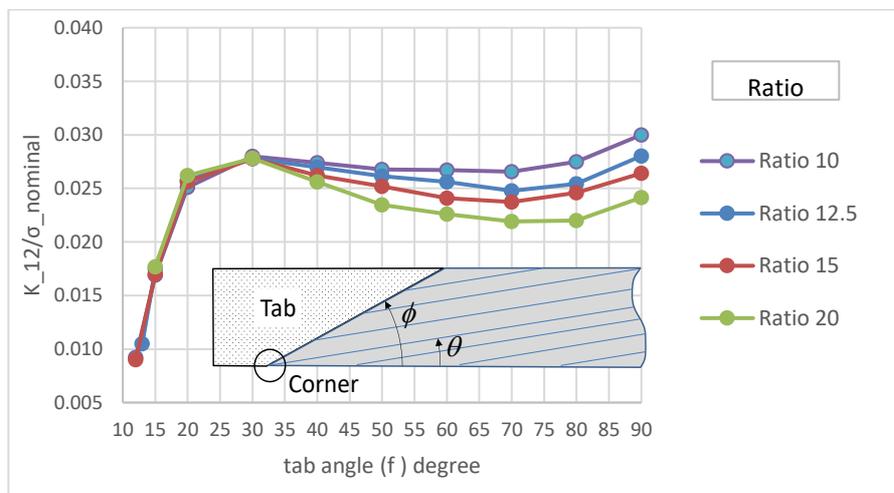


Figura 2.70. Variación del FITGs respecto a σ_{12} para distintos ratios $\theta = 10^\circ$ y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$

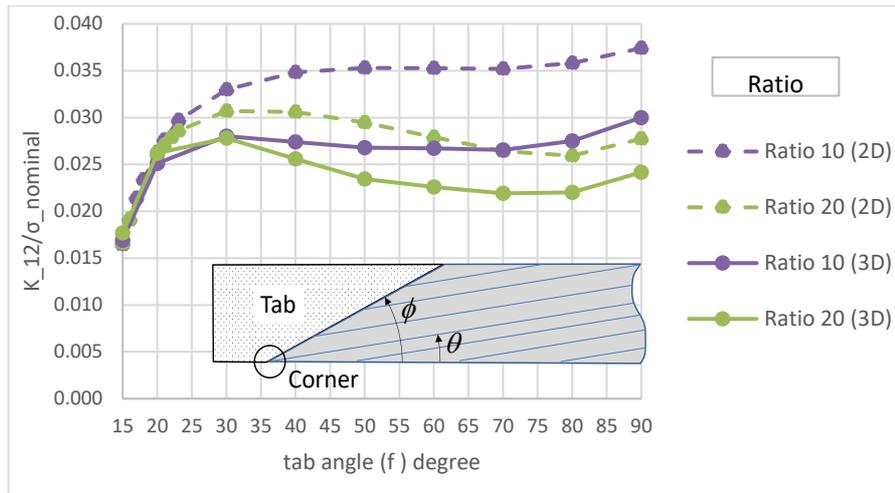


Figura 2.71. Comparación FITGs de los modelos 3D y 2D. para σ_{12} , distintos ratios $\theta=10^\circ$ y $G_{12}=2$ GPa

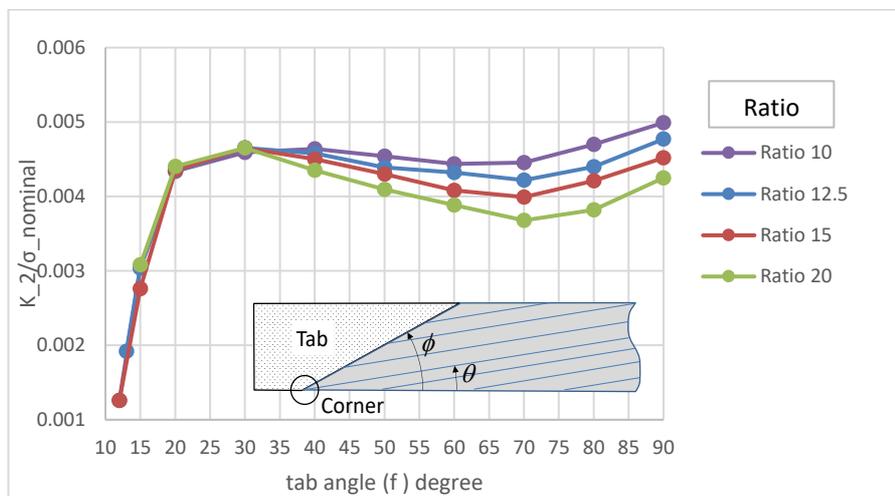


Figura 2.72. Variación del FITGs respecto a σ_2 para distintos ratios $\theta = 10^\circ$ y $G_{12} = 2$ GPa

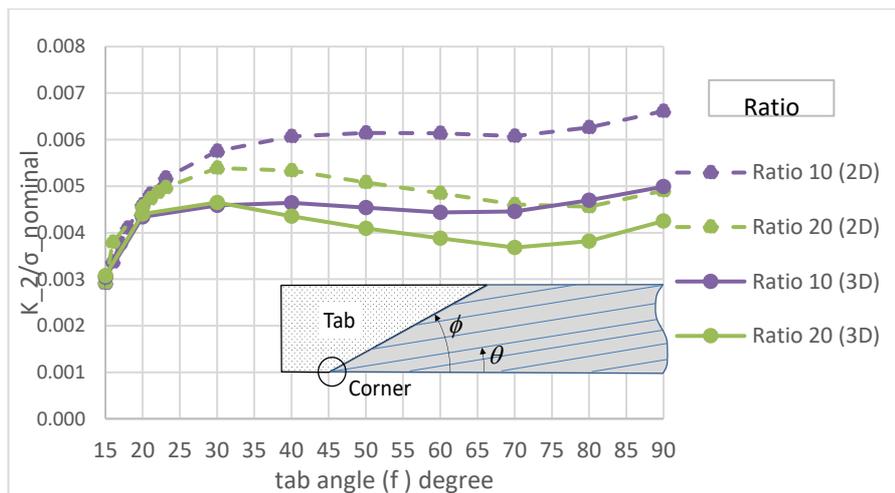


Figura 2.73. Comparación FITGs de los modelos 3D y 2D. para σ_2 , distintos ratios $\theta=10^\circ$ y $G_{12}=2$ GPa

FITG para fibras con orientación 5°

En este apartado, se analizarán las variaciones de los FITG con el ratio del espécimen para $\theta = 5^\circ$. Además, se muestran gráficas comparativas entre ambos modelos.

Para este caso se puede comentar exactamente lo mismo que en el caso de $\theta = 10^\circ$. No hay influencia del ratio

para ángulos de tacos $\phi < 30^\circ$. Sin embargo, para ángulos de tacos mayores los FITG son menores cuanto mayor es el ratio del espécimen. Si se compara ambos modelos, se observa una tendencia análoga, con la diferencia que en el 3D los valores de FITG son menores que para el 2D.

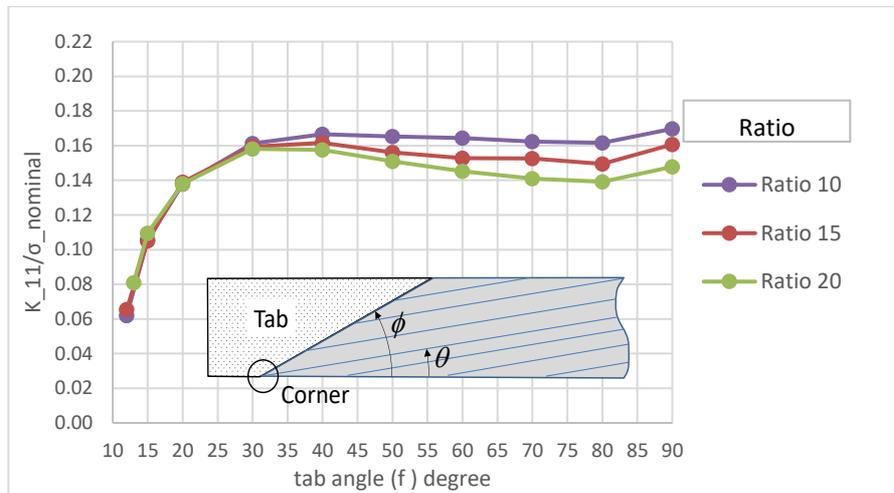


Figura 2.74. Variación del FITGs respecto a σ_1 para distintos ratios $\theta = 5^\circ$ y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$

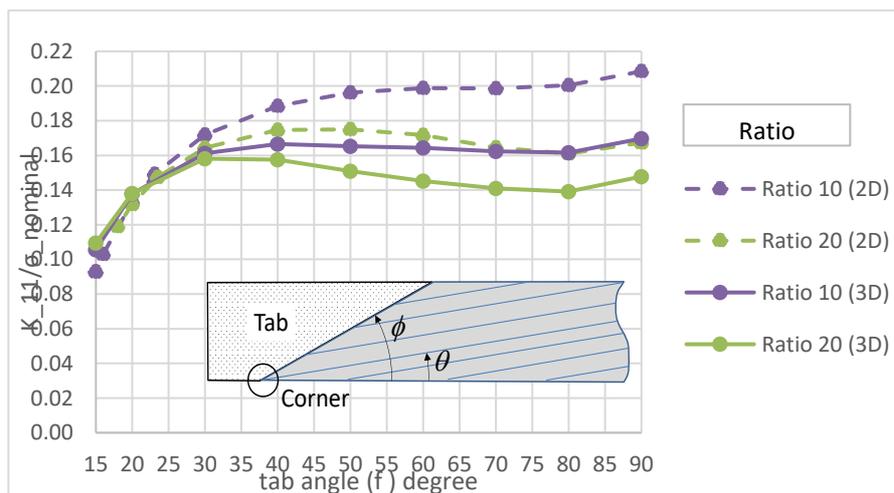


Figura 2.75. Comparación FITGs de los modelos 3D y 2D. para σ_1 , distintos ratios $\theta=5^\circ$ y $G_{12}=2 \text{ GPa}$

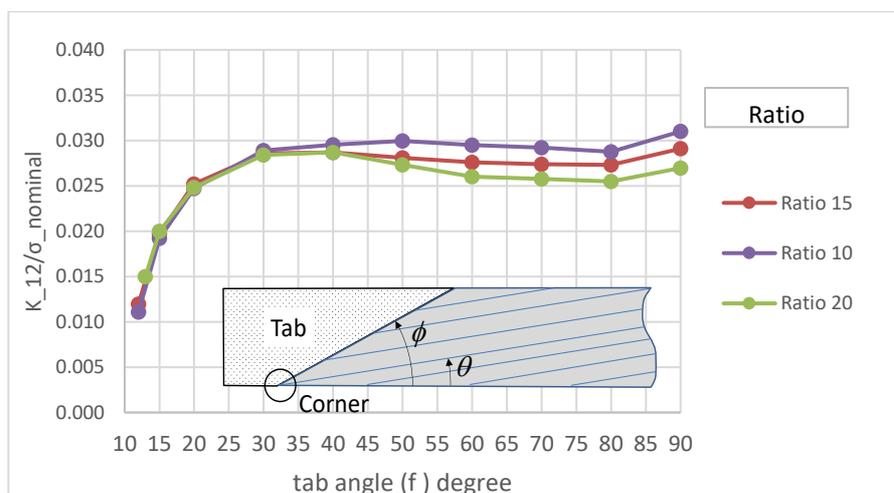


Figura 2.76.. Variación del FITGs respecto a σ_{12} para distintos ratios $\theta = 5^\circ$ y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$

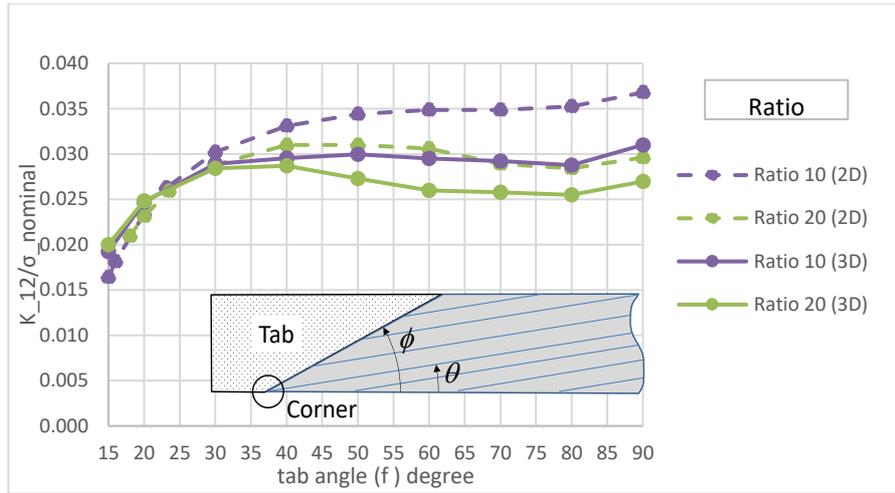


Figura 2.77. Comparación FITGs de los modelos 3D y 2D. para σ_{12} , distintos ratios $\theta=5^\circ$ y $G_{12}=2$ GPa

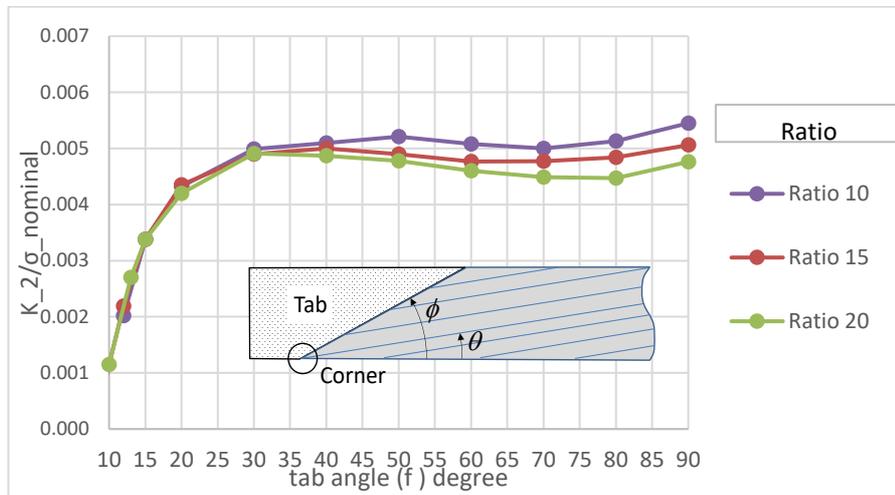


Figura 2.78. Variación del FITGs respecto a σ_2 para distintos ratios $\theta = 5^\circ$ y $G_{12} = 2$ GPa

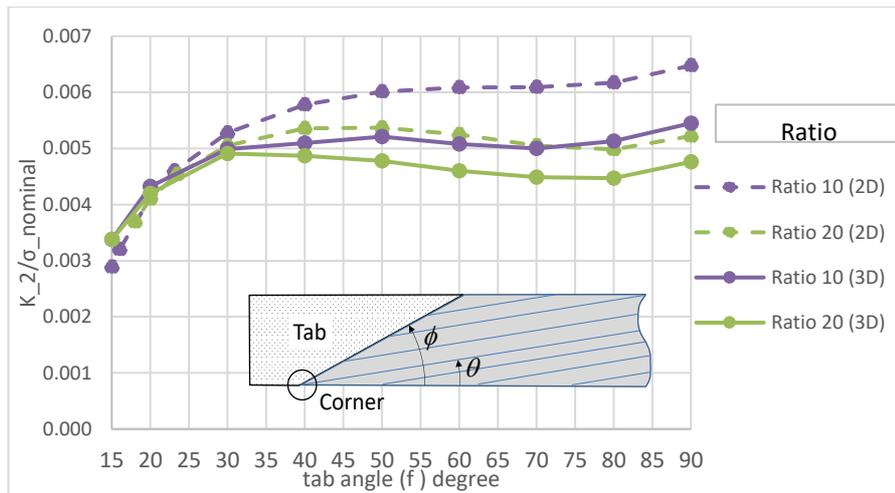


Figura 2.79. Comparación FITGs de los modelos 3D y 2D. para σ_2 , distintos ratios $\theta=5^\circ$ y $G_{12}=2$ GPa

FITG para fibras con orientación 15°

En este apartado se analiza los valores de FIG, para el caso de $\theta=15^\circ$.

Se observa que no hay influencia del ratio del espécimen en el FITG para ángulos de tacos menores a 30° , mientras que para ángulos de tacos mayores los K disminuyen al aumentar el ratio.

Se puede observar, que para el modelo 3D los valores de FITG han disminuido con respecto a los casos anteriores de orientaciones de fibras 5° y 10°, algo que no sucedía en el modelo 2D, ya que en el 2D, los valores de FIG para $\theta=15^\circ$ eran mayores que para el caso de 5° y menores de 10°. Este hecho se analizará con más detalles en el apartado 4.3.1.

Esto último además conlleva que los valores de FITG para $\theta=15^\circ$ son menores para el modelo 3D que para el 2D.

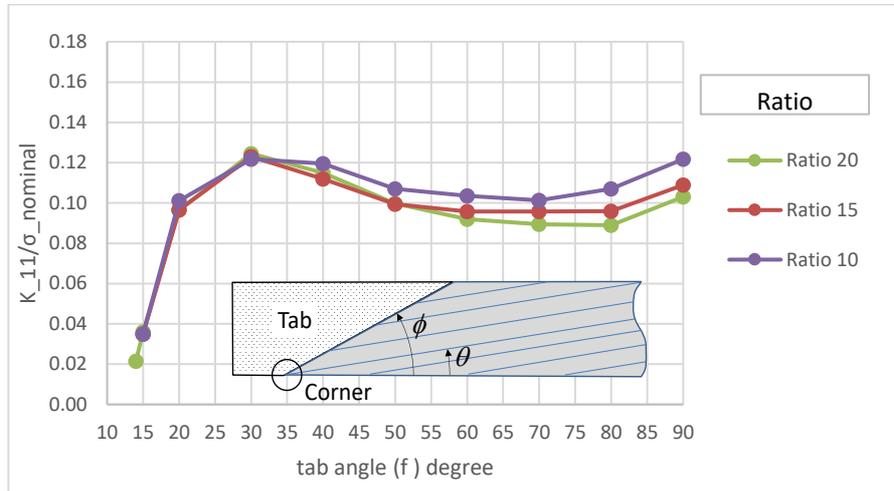


Figura 2.80. Variación del FITGs respecto a σ_1 para distintos ratios $\theta = 15^\circ$ y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$

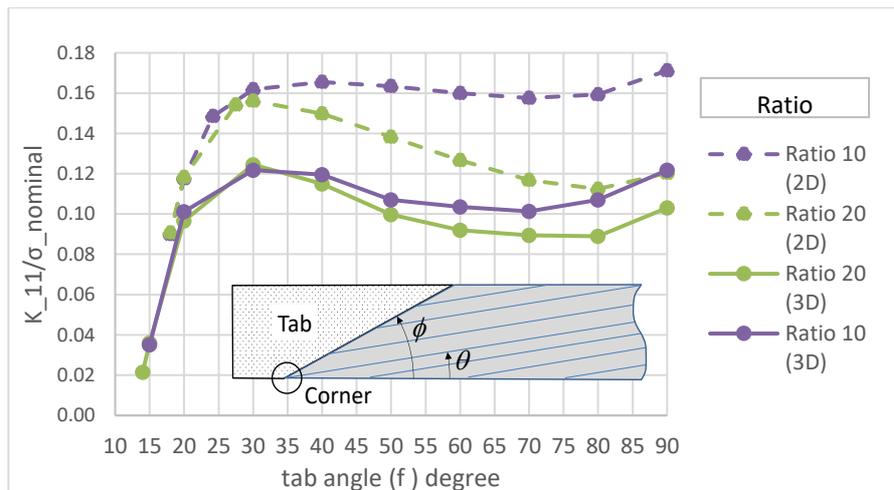


Figura 2.81. Comparación FITGs de los modelos 3D y 2D. para σ_1 , distintos ratios $\theta=15^\circ$ y $G_{12}=2 \text{ GPa}$

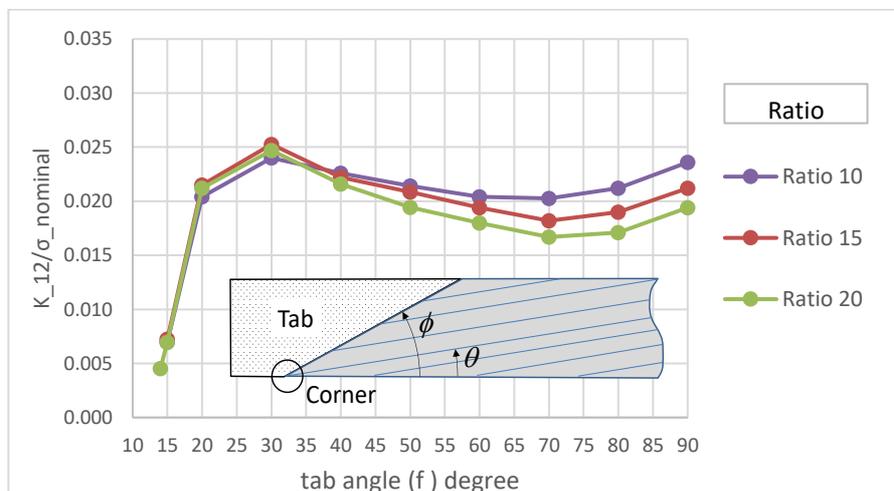


Figura 2.82. Variación del FITGs respecto a σ_{12} para distintos ratios $\theta = 15^\circ$ y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$

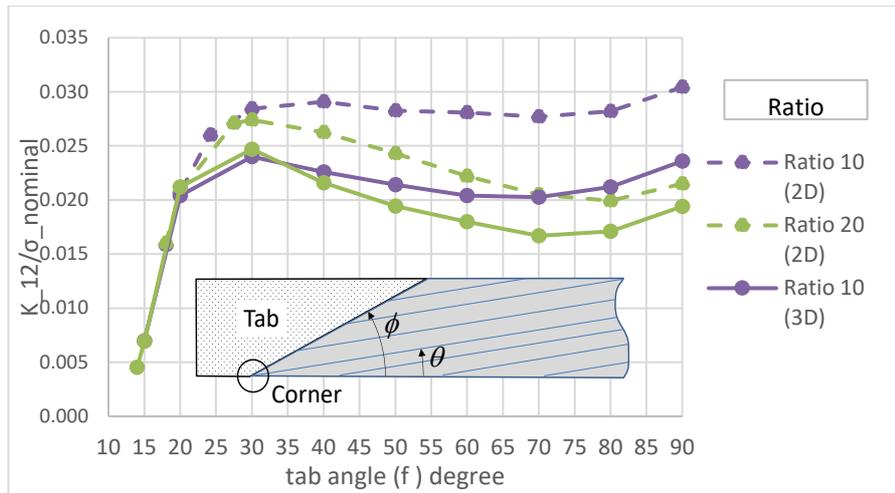


Figura 2.83. Comparación FITGs de los modelos 3D y 2D. para σ_{12} , distintos ratios $\theta=15^\circ$ y $G_{12}=2$ GPa

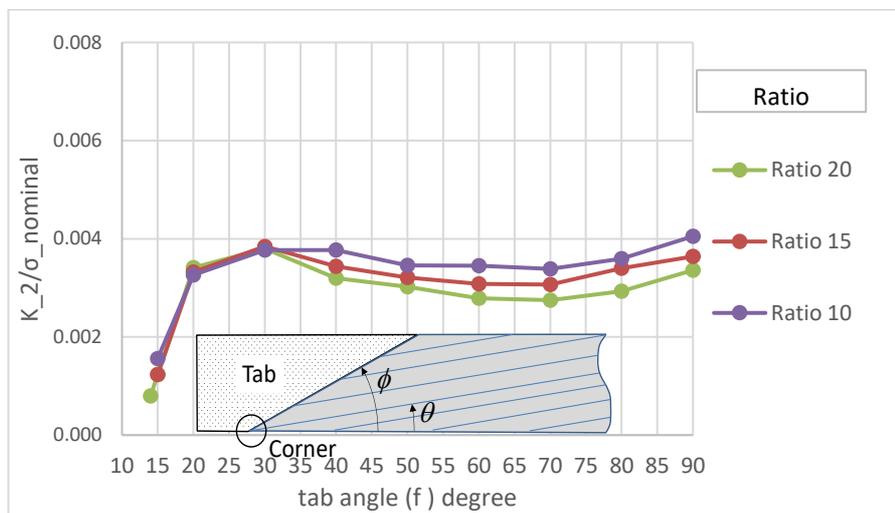


Figura 2.84. Variación del FITGs respecto a σ_2 para distintos ratios $\theta = 15^\circ$ y $G_{12} = 2$ GPa

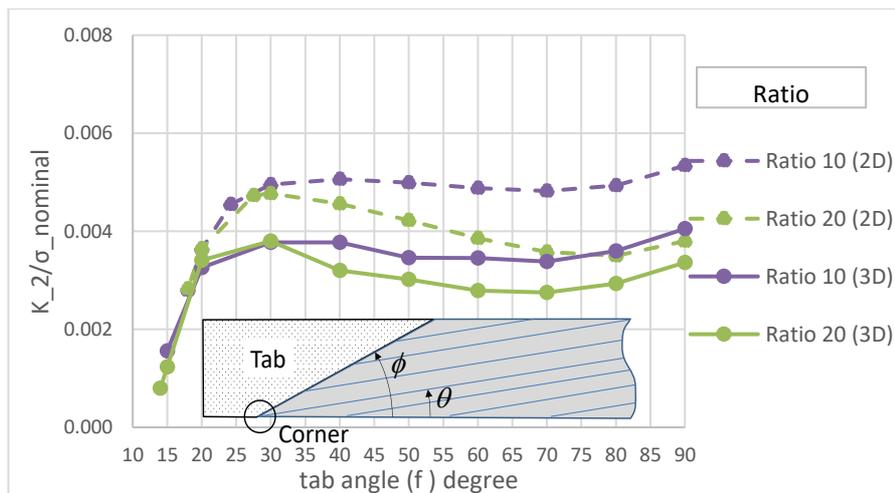


Figura 2.85. Comparación FITGs de los modelos 3D y 2D. para σ_2 , distintos ratios $\theta=15^\circ$ y $G_{12} = 2$ GPa

FITG para fibras con orientación 20°

La última orientación de fibra que se analiza es $\theta = 20^\circ$.

Donde se observa lo que se ha ido comentando durante los apartados anteriores. No hay influencia del ratio del

especimen en el FITG para ángulos de tacos inferiores a 30°, mientras que para ángulos mayores los FITG disminuyen con el ratio. Además, el modelo 3D proporciona unos valores inferiores a los que proporcionó el modelo 2D. Y por último, también se observa que los valores de los K para $\theta = 20^\circ$ son inferiores que para todos los casos anteriores, por tanto, podemos decir que los FITG disminuyen al aumentar la orientación de la fibra, algo que no sucedía en el modelo 2D.

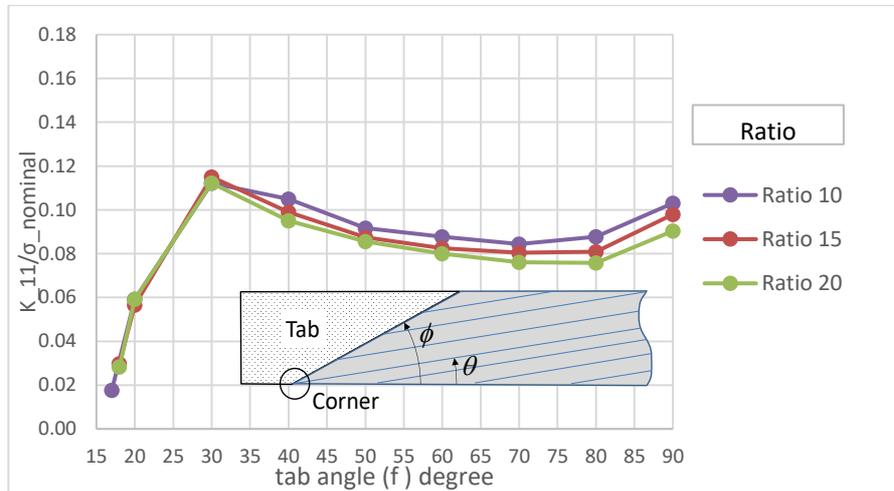


Figura 2.86. Variación del FITGs respecto a σ_1 para distintos ratios $\theta = 20^\circ$ y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$

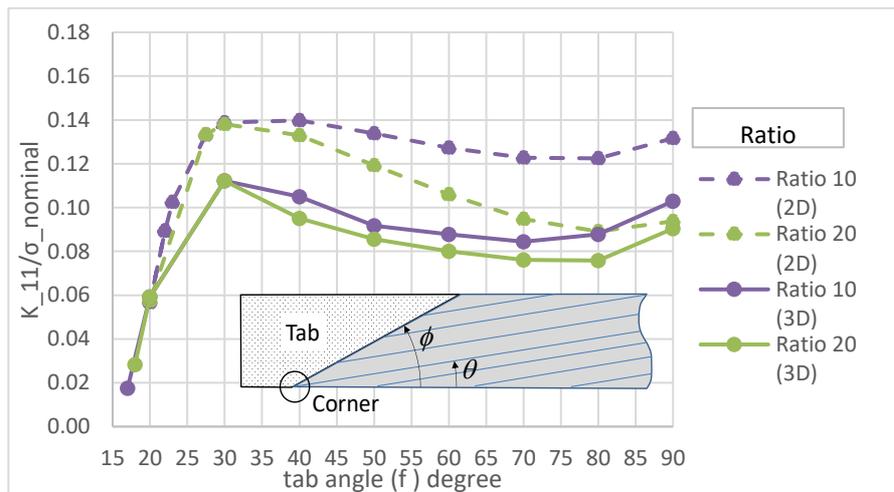


Figura 2.87. Comparación FITGs de los modelos 3D y 2D. para σ_1 , distintos ratios $\theta=20^\circ$ y $G_{12}=2 \text{ GPa}$

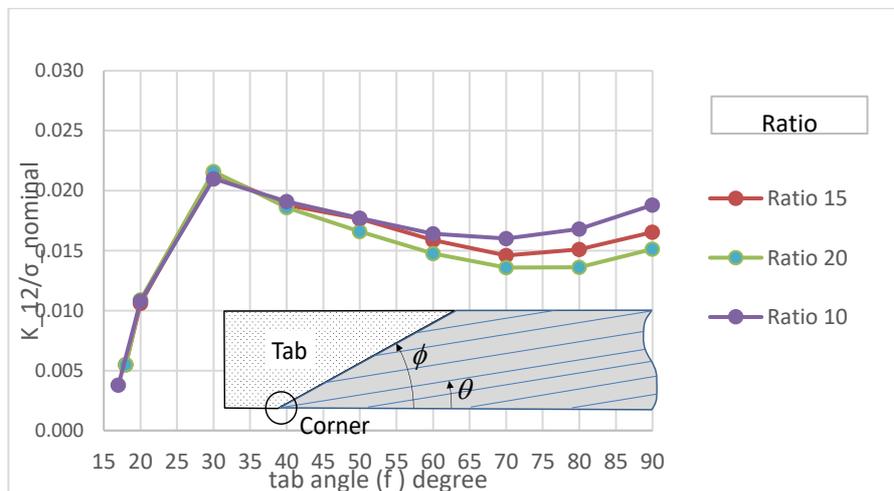


Figura 2.88. Variación del FITGs respecto a σ_{12} para distintos ratios $\theta = 20^\circ$ y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$

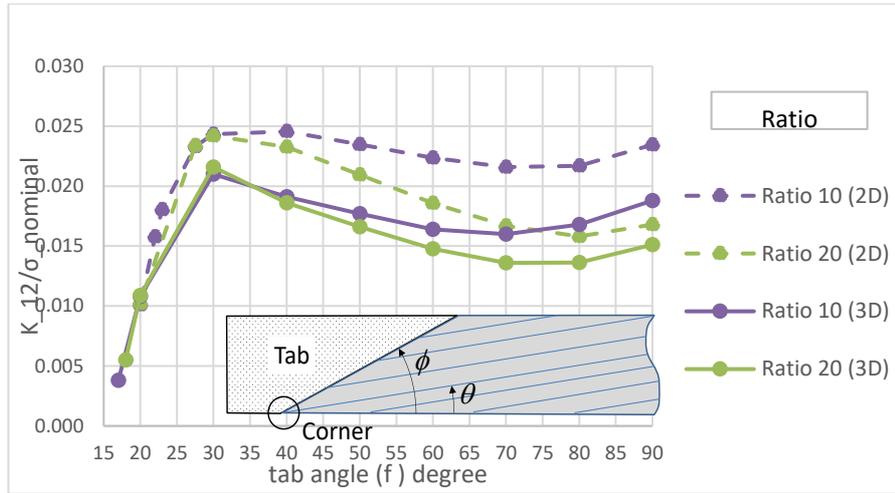


Figura 2.89. Comparación FITGs de los modelos 3D y 2D. para σ_{12} , distintos ratios $\theta=20^\circ$ y $G_{12}=2$ GPa

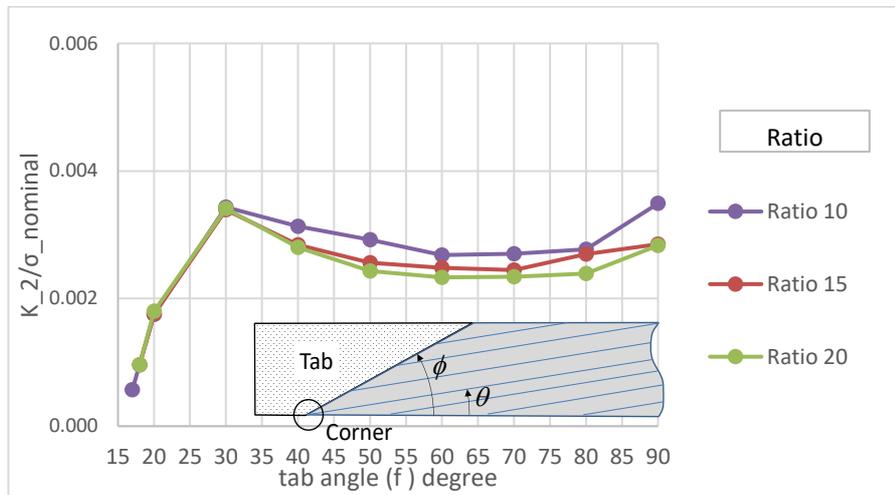


Figura 2.90. Variación del FITGs respecto a σ_2 para distintos ratios $\theta = 20^\circ$ y $G_{12} = 2$ GPa

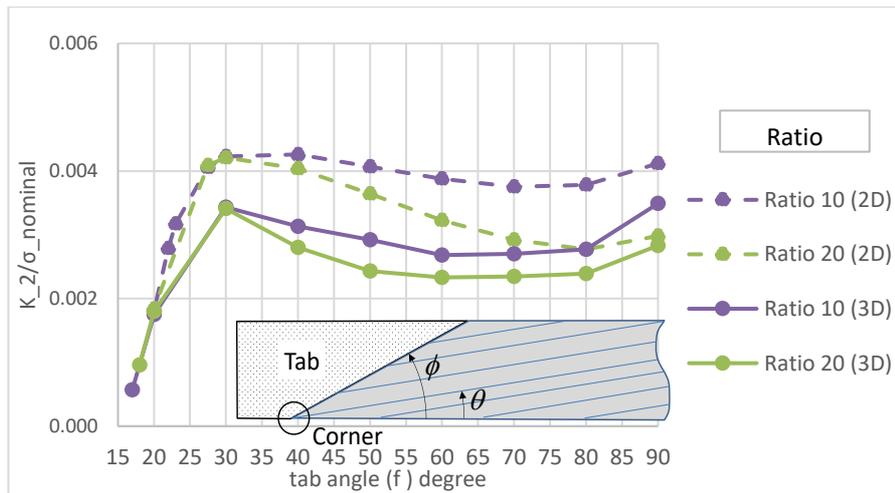


Figura 2.91. Comparación FITGs de los modelos 3D y 2D. para σ_2 , distintos ratios $\theta=20^\circ$ y $G_{12}=2$ GPa

2.2.4 Variación del Factor de Intensificaciones de Tensiones con la orientación de las fibras

En este apartado, se analiza la variación de los FITG con la orientación de la fibra, concretamente se muestran los valores correspondiente al caso de ratio 10.

Se puede observar, como se comentó en el apartado anterior, que los FITG disminuyen con la orientación de las fibras θ , para cualquiera que sea el ángulo del taco, algo que no sucedía en el modelo 2D, en el cual los K crecían en el siguiente orden 20°,15°,5°,10°, siendo mínimos en 20° y máximos en 10°. Además si se compara de nuevo los valores de ambos modelo, figura 96, se observa una disminución de los K en el modelo 3D.

Este hecho que ocurre en el modelo 3D, en el que los FITG disminuyen al aumentar la orientación de la fibra, nos indica que las orientaciones grandes resultan más favorables cuando hablamos de FITG.

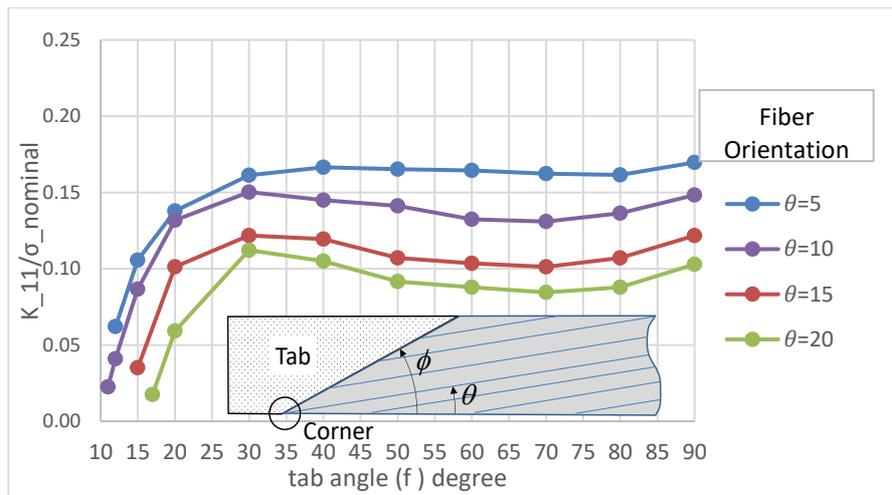


Figura 2.92. Variación del FITGs respecto a σ_1 para distintas orientaciones de fibra y Ratio 10 y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$

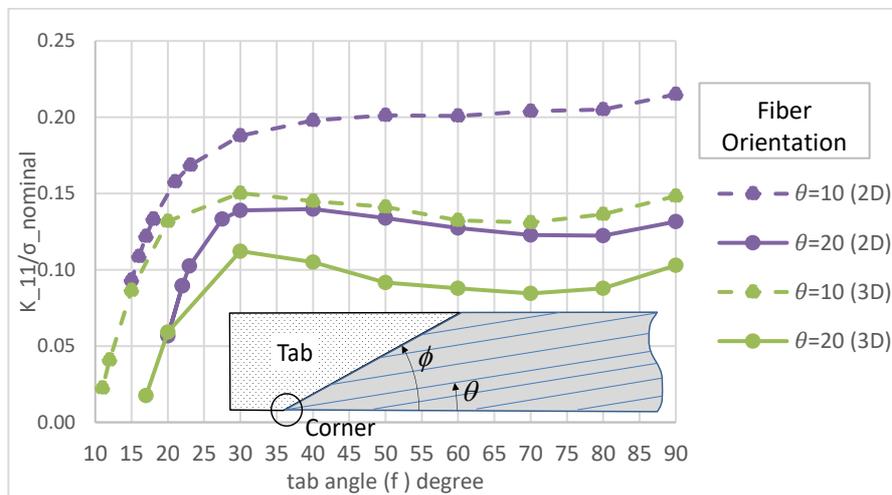


Figura 2.93. Comparación de FITGs de los modelos 2D y 3D, para σ_1 , distintas orientaciones de fibra y Ratio 10 y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$

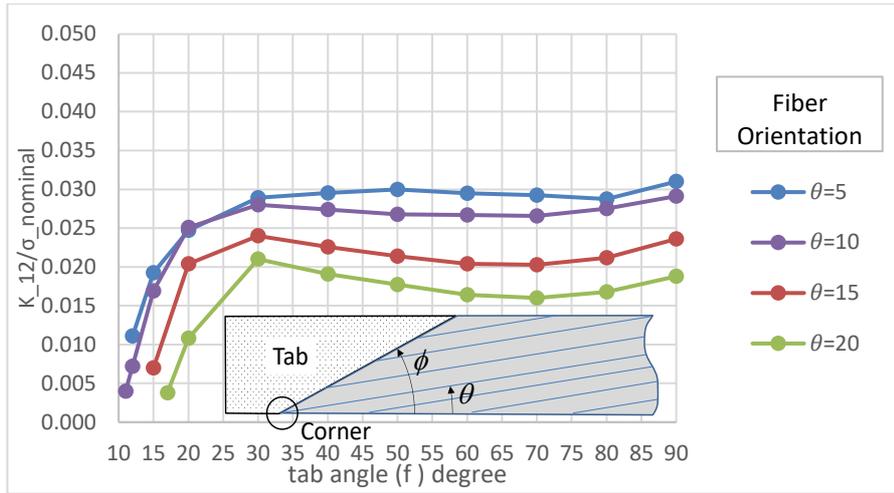


Figura 2.94. Variación del FITGs respecto a σ_{12} para distintas orientaciones de fibra y Ratio 10 y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$

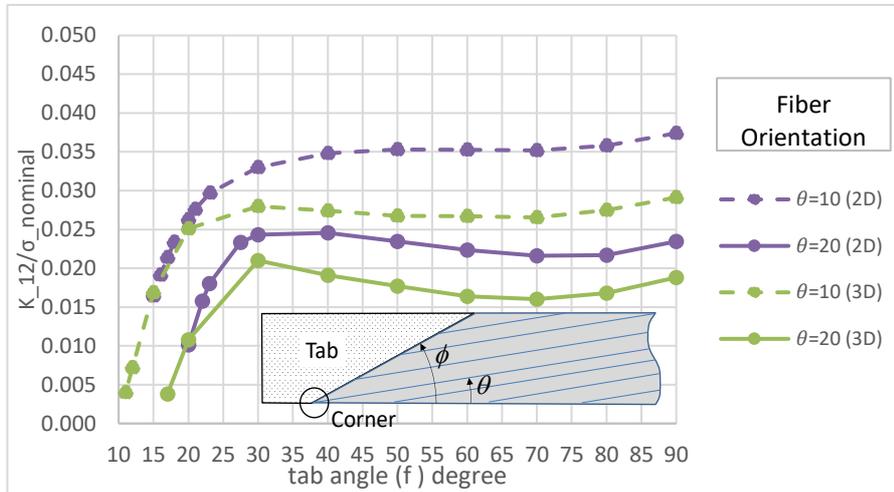


Figura 2.95. Comparación de FITGs de los modelos 2D y 3D, para σ_{12} , distintas orientaciones de fibra y Ratio 10 y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$

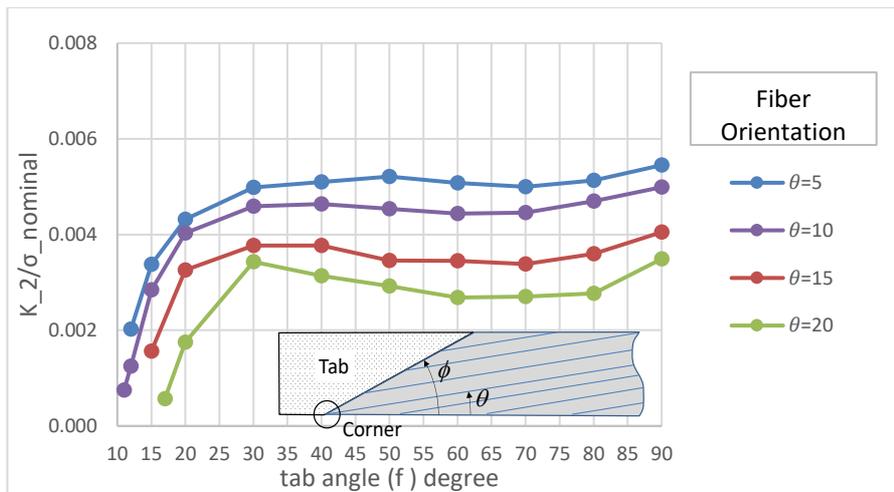


Figura 2.96. Variación del FITGs respecto a σ_2 para distintas orientaciones de fibra y Ratio 10 y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$

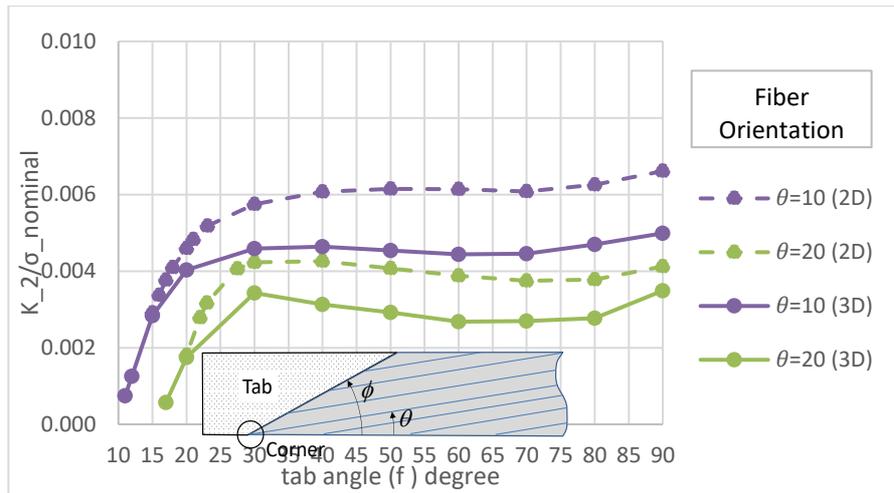


Figura 2.97. Comparación de FITGs de los modelos 2D y 3D, para σ_2 , distintas orientaciones de fibra y Ratio 10 y $G_{12} = 2 \text{ GPa}$

En la tabla 10, se recogen los valores de los FITG correspondientes a los ángulos teóricos para cada una de las orientaciones de fibras estudiadas. Se puede observar, que los FITG disminuyen a medida que aumenta los ángulos de orientación de las fibras, tal como sucedía para el modelo 2D, con valor de $G_{12}=2 \text{ GPa}$ (tabla 7). Además, si comparamos la tabla 7 y 10, observamos que los FITG para los ángulos de taco teóricos difieren muy poco de un modelo a otro. Es importante recalcar, que ángulos de tacos inferiores a los teóricos darían lugar a valores más pequeños de FITG y por tanto a configuraciones resistentes más favorables.

θ (°)	ϕ teórico (°)	κ_1	κ_{12}	κ_2
5	29.6	0.158	0.028	0.005
10	23.1	0.14	0.026	0.0045
15	24.2	0.11	0.023	0.0036
20	27.5	0.09	0.017	0.003

Tabla 2.10. Valores de FITG correspondientes a los ángulo teórico. Modelo 3D

Por tanto, en resumen podemos decir que ambos modelos son equivalentes a nivel global pero dado a las condiciones de contorno y a que los tacos no son iguales (en el modelo 2D tenemos una esquina uni-material libre-empotrada y en el 3D tenemos una esquina bi-material, con condiciones libre-libre), conlleva que la solución a nivel local en la esquina difieran tal como se vio en los mapas de tensiones de ambos modelos, donde se pudo observar que en el modelo 2D se alcanzaban mayores valores de tensiones en las esquinas.

En cuanto a los ordenes de singularidades, hemos visto que estos aumentan en el modelo 3D aunque el comportamiento es similar en ambos modelos. Y en cuanto a los FITG, podemos decir que el modelo 3D nos da unos valores más pequeños que el 2D, aunque para valores de ángulo del taco cercanos al teórico ambos modelos dan lugar a valores de FITG muy similares.

Además, en ambos modelos, en los FITG para una misma orientación de la fibra, no hay influencia del ratio del espécimen para ángulos de tacos inferiores a 30°, mientras que para ángulos de tacos mayores los k disminuyen al aumentar el ratio.

Otro hecho que se observa en el modelo 3D, es que los FITG disminuyen al aumentar la orientación de la fibra, algo que no sucedía en el caso 2D, en el que se alcanzaba valores máximos para el caso $\theta=10^\circ$. Además, también hemos comprobado que el modelo 2D y el 3D presentan comportamientos análogos con la salvedad que el 2D nos da siempre unos valores mayores de los FITG que el 3D, por lo tanto, el modelo 2D es un modelo más conservativo. Diferencia que es consecuencia de que las singularidades es un aspecto más local, tal como vimos anteriormente.

3 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha llevado a cabo un estudio del estado tensional singular que se origina en las esquinas de las probetas de material compuesto, grafito-epoxy, cuando se somete a ensayos de tracción "off-axis", y su dependencia con los parámetros geométricos (θ , ϕ y L/w) y mecánicos que caracterizan el problema. Dicho estudio se ha desarrollado mediante el software ANSYS una técnica semianalítica basada en el método de los elementos finitos. Para realizar dicho estudio se ha llevado a cabo en primer lugar un modelo 2D (uni-material), en el que se ha considerado una lámina de longitud L y ancho w , y considerando los tacos como los bordes de dicha lámina. Por otra parte, para obtener unos valores más representativos de la realidad se ha elaborado un modelo 3D (bi-material), en el que se ha considerado unos tacos de longitud a , ancho w , y una lámina de longitud $L+2a$ y ancho w .

Mediante el uso de ANSYS nos ha permitido el cálculo de los ordenes de singularidades en tensión δ , y los factores de intensificación de tensiones generalizados FITGs en la esquina de la probeta. Este estudio paramétrico ha permitido obtener gráficos de variación de los parámetros que definen el estado tensional (δ y FITG) con los parámetros geométricos del problema (θ , ϕ y L/w).

Como se ha comentado, se ha llevado a cabo un modelo 2D y 3D, pero, ahora bien, dado al comportamiento no uniforme del módulo de cortadura con la deformación angular, se ha analizado como influye este parámetros en el estado tensional singular en la esquina, para ello se ha tomado varios valores de módulo de cortadura, concretamente se ha tomado los valores de la tangente inicial (el cual se estudio en trabajos anteriores [1]) y el valor de la secante.

En cuanto al orden de singularidad se ha comprobado, para cualquiera que sea el valor de G_{12} y para ambos modelos 2D y 3D, que estos no varían con el ratio para una misma orientación de la fibra, dado que el valor de las singularidades dependen exclusivamente del problema local, y el ratio no altera dichas condiciones locales en la esquina. Además, se ha visto que δ crece con ϕ , siendo máximo para valores entornno a 50° y luego disminuye lentamente.

En cuanto a los FITG, se ha visto que no existe influencia con el ratio del espécimen para ángulos de tacos pequeños (en general para ángulos más pequeños que 30°), para ángulos mayores los FITG aumentan al disminuir el ratio del espécimen. Hecho que se ha comprobado experimentalmente con probetas y tacos rectos. Por lo que una solución para evitar la aparición de singularidades en las esquinas que originan el fallo prematuro de la probeta en los ensayos "off-axis" es el uso de ratios grandes. Esto ocurre para cualquier valor de G_{12} y modelo.

A pesar de tener un comportamiento parecido al variar el módulo de cortadura. Se ha visto que, al disminuir el módulo de cortadura, los valores de δ han aumentado, mientras que los K han aumentados para orientaciones de fibras pequeños (aumentando más cuanto más pequeño es el angulo hasta llegar a un valor en el que empieza a disminuir), mientras que, para ángulos de orientaciones de fibras grandes, para $\theta = 20^\circ$, se produce una disminución.

Esto ultimo ha originado que ocurra diferencias en la tendencia de ambos modelos en cuanto a la variación de los FITG con la orientación de la fibra, mientras que para $G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$ (valor correspondiente a la tangente inicial), cuando los ángulos de tacos son mayores de 45 y menores de 25 , los K crecen respecto del ángulo de orientación de las fibras de acuerdo al siguiente orden: 20° , 5° , 15° y 10° . Mientras que para ángulos de taco comprendidos entre 25 y 45 , los K crecen según el siguiente orden: 5° , 20° , 15° y 10° . Sin embargo, para $G_{12} = 2 \text{ GPa}$, los K crecen respecto a la orientación de las fibras de acuerdo al siguiente orden: 20° , 15° , 5 y 10° , independientemente del ángulo del taco.

Para obtener unos resultados más realistas, se ha realizado también un modelo 3D del ensayo "off-axis" para analizar con más detalles el estado tensional en la esquina. Al comparar el modelo 2D y el 3D, llegamos a la conclusión de que ambos modelos son equivalentes a nivel global, existiendo diferencias a nivel local debido a que en el modelo 2D se tomaron condiciones y unos tacos más simples para realizar un análisis más sencillo. Esta difencia se nota a nivel local, y dado que las singularidades dependen de la solución local, estas se han visto alteradas.

Al comparar ambos modelos, podemos decir que se obtiene un comportamiento muy similar, con la diferencia

que en el modelo 3D los valores de δ son mayores. Y en cuanto a los FITG, podemos decir que el modelo 3D nos da unos valores más pequeños que el 2D, aunque para valores de ángulos del taco cercanos al teórico ambos modelos dan lugar a valores de FITG muy similares.

Por último, también se observa que a diferencia del modelo 2D, en el 3D los FITG disminuyen al aumentar la orientación de la fibra, algo que no sucedía en el caso 2D, en el que se alcanzaba valores máximos para el caso $\theta=10^\circ$.

Por tanto, en resumen, podemos decir que el modelo 2D da un estado tensional de tensiones con un comportamiento muy similar al que ocurre en el modelo 3D, además se ha visto que el modelo 2D nos da unas tensiones máximas mayores que el modelo 3D, por lo que utilizar el modelo más simplificado (modelo 2D), no provocaría grandes problemas.

Cabe concluir pues que en los ensayos "off-axis" la presencia de fallos prematuros en el entorno de los tacos está inducido por el estado tensional singular de tensiones generado en la esquina, los cuales pueden ser eliminados como hemos visto con el uso de tacos oblicuos.

Por lo tanto, dado que la utilización de tacos oblicuos reduce el orden de singularidad, y por tanto fallos prematuros en los ensayos "off-axis", la utilización de estos tacos es más recomendable. Otro método para disminuir los problemas de las singularidades es utilizar lámina de ratios grandes. Además, en el modelo 3D, los FITG disminuye al aumentar la orientación de la fibra, por tanto, orientaciones pequeñas provocarían mayores fallos prematuros en la esquina, por lo tanto sería conveniente que cuanto más pequeño sea la orientación de la fibra mayor sea el ratio.

Este proyecto ha sido complementario a otros donde se han estudiado "la variación de la resistencia de una lámina unidireccional de grafito-epoxy sometida a tracción fuera de ejes (10°) con el ratio del espécimen" y "Variación con el ratio del espécimen de la intensificación de tensiones en la esquina en el ensayo de tracción Off-Axis mediante MEF 2D". Por lo que podría ser conveniente contrastar los resultados obtenidos con datos futuros de ensayos a tracción fuera de ejes distintos a 10° . Así como realizar un estudio de como influye la singularidad a medida que avanzamos en el ensayo, es decir, para los distintos módulos de cortaduras que se van obteniendo a lo largo del ensayo.

Los modelos Ansys 2D y 3D utilizados son los siguientes, donde para poder calcular la dependencia del estado singular tensional, simplemente hay que cambiar los siguientes parámetros: longitud de la lámina, ángulo del taco y ángulo de orientación de la fibra.

Además para cambiar de el modulo de cortadura, simplemente hay que cambiar dicho valor (GXY) por el que corresponda.

Código del programa. Modelo 2D

```
/PREP7
```

```
!1. Datos fijos.
```

```
!Dimensiones en mm
```

```
!cargas en N
```

```
!Tensiones en MPa
```

```
ancho=10
```

```
pi=3.1415926
```

```
espesor=1
```

```
desp=0.007444857453
```

```
elem=250
```

```
elem2=90
```

```
espaciado=210
```

```
!2. Datos geométricos variables
```

```
long=100
```

```
angulo_fibra=10
```

```
angulo_taco=90
```

```
ratio=long/ancho
```

```
!3. Elementos
```

```
!tipo de elementos
```

```
ET,1,SHELL63
```

```
KEYOPT,1,1,0
```

KEYOPT,1,2,0
 KEYOPT,1,3,0
 KEYOPT,1,5,0
 KEYOPT,1,6,0
 KEYOPT,1,7,0
 KEYOPT,1,8,0
 KEYOPT,1,9,0
 KEYOPT,1,11,0

!4. Propiedades del element

R,1,espesor,,,,,ang,
 MPTEMP,1,0
 MP,EX,1,125159
 MP,EY,1,8112
 MP,PRXY,1,0.3
 MP,GXY,1,2000

!4. Geometría

!puntos
 K,1,0,0,0,
 K,2,long,0,0,
 K,3,long+ancho/tan(pi*angulo_taco/180),ancho,0,
 k,4,ancho/tan(pi*angulo_taco/180),ancho,0
 K,5,ancho/tan(pi*angulo_taco/180)+ancho,0,0,
 K,6,long-ancho,0,0,
 K,7,long-ancho,ancho,0,
 K,8,ancho/tan(pi*angulo_taco/180)+ancho,ancho,0,
 K,9,ancho/2/tan(pi*angulo_taco/180),ancho/2,0,
 K,10,long+ancho/2/tan(pi*angulo_taco/180),ancho/2,0,

!rectas

LSTR, 1, 5
 LSTR, 5, 6
 LSTR, 6, 2
 LSTR, 2, 10

```
LSTR, 10, 3
LSTR, 3, 7
LSTR, 7, 8
LSTR, 8, 4
LSTR, 4, 9
LSTR, 9, 1
```

!sección

FLST,2,10,4

FITEM,2,1

FITEM,2,2

FITEM,2,3

FITEM,2,4

FITEM,2,6

FITEM,2,5

FITEM,2,7

FITEM,2,8

FITEM,2,9

FITEM,2,10

AL,P51X

!5. Mallado

!nodos

lesize,1,,elem,espaciado

lesize,2,,elem2

lesize,3,,elem,1/espaciado

lesize,4,,elem,espaciado

lesize,5,,elem,1/espaciado

lesize,6,,elem,espaciado

lesize,7,,elem2

lesize,8,,elem,1/espaciado

lesize,9,,elem,espaciado

lesize,10,,elem,1/espaciado

!mallar

local,11,0,0,0,0,0,0,0

esys,11

amesh,1

FINISH

/SOLU

!6.Condiciones de contorno

CSYS,0

DL,4,,ux,desp

DL,5,,ux,desp

DL,4,,uy,0

DL,5,,uy,0

DL,4,,uz,0

DL,5,,uz,0

DL,4,,rotx,0

DL,5,,rotx,0

DL,4,,roty,0

DL,5,,roty,0

DL,4,,rotz,0

DL,5,,rotz,0

DL,9,,all,0

DL,10,,all,0

SOLVE

Código del programa. Modelo 3D

/PREP7

!1. Datos fijos

!Dimensiones en mm, cargas en N, tensiones en MPa

!dimension de los tacos.

!a es la longitud, el espesor del taco es igual a espesor de la lámina, ancho del taco es igual al ancho de la lámina

a=20

!dimensiones de la lámina.

ancho=10

e=0.5

```
pi=3.1415926  
desplazamiento=0.0078  
compresion=-500  
ang_fibra_taco=0
```

!2. Variables a modificar según las propiedades geométricas

```
long=140  
ang_fibra_lamina=10  
angulo_taco=90  
ratio=long/ancho
```

!3. Elementos

!Tipo de elementos

```
ET,1,SOLID185
```

!Material 1 es el material de la lámina

```
local,11,0,0,0,0,ang_fibra_lamina
```

```
esys,11
```

```
MP,EX,1,125159
```

```
MP,EY,1,8112
```

```
MP,PRXY,1,0.3
```

```
MP,GXY,1,2000
```

```
MP,EZ,1,8112
```

```
MP,PRXZ,1,0.3
```

```
MP,PRYZ,1,0.07
```

```
MP,GXZ,1,2000
```

```
MP,GYZ,1,3571
```

!Material 2 es el material del Taco

```
local,12,0,0,0,0,ang_fibra_taco,
```

```
esys,12
```

```
MPTEMP,1,0
```

```
MP,EX,2,25200
```

```
MP,EY,2,17600
```

```
MP,PRXY,2,0.07
```

```
MP,GXY,2,4400
```

```
MP,EZ,2,17600
```

MP,PRXZ,2,0.07

MP,PRYZ,2,0.03

MP,GXZ,2,4400

MP,GYZ,2,2000

!3. Geometría

local,13,0,0,0,0,0

esys,13

!Puntos

K,1,0,0,,

K,2,a,0,,

K,3,a+ancho+ancho/tan(pi*angulo_taco/180),0,,

K,4,long-a,0,0,

K,5,long,0,0,

K,6,long+ancho/tan(pi*angulo_taco/180),ancho,0,

K,7,long-a+ancho/tan(pi*angulo_taco/180),ancho,0,

K,8,a+ancho+ancho/tan(pi*angulo_taco/180),ancho,,

K,9,a+ancho/tan(pi*angulo_taco/180),ancho,,

K,10,0+ancho/tan(pi*angulo_taco/180),ancho,,

K,11,0,0,e,

K,12,a,0,e,

K,13,a+ancho/tan(pi*angulo_taco/180),ancho,e,

K,14,0+ancho/tan(pi*angulo_taco/180),ancho,e,

K,15,long-a,0,e,

K,16,long,0,e,

K,17,long+ancho/tan(pi*angulo_taco/180),ancho,e,

K,18,long-a+ancho/tan(pi*angulo_taco/180),ancho,e,

!Áreas

FLST,2,10,3

FITEM,2,1

FITEM,2,2

FITEM,2,3

FITEM,2,4

FITEM,2,5
FITEM,2,6
FITEM,2,7
FITEM,2,8
FITEM,2,9
FITEM,2,10
A,P51X
FLST,2,4,3
FITEM,2,11
FITEM,2,12
FITEM,2,13
FITEM,2,14
A,P51X
FLST,2,4,3
FITEM,2,15
FITEM,2,16
FITEM,2,17
FITEM,2,18
A,P51X

!Extrude volumen de la lámina

VOFFST,1,e, ,

!Extrude volume del taco izquierdo

VOFFST,2,e, ,

!Extrude del volume del taco derecho

VOFFST,3,e, ,

!Operación Booleans Glue para pegar los tacos y la lámina

FLST,2,2,6,ORDE,2

FITEM,2,1

FITEM,2,-2

VGLUE,P51X

FLST,2,2,6,ORDE,2

FITEM,2,3

FITEM,2,5

VGLUE,P51X

!4. Mallado

!nodos

elem=80

espaciado=30

lesize,1,,elem,1/espaciado

lesize,19,,elem,1/espaciado

lesize,39,,elem,1/espaciado

elem1=240

espaciado1=280

lesize,2,,elem1,espaciado1

lesize,20,,elem1,espaciado1

elem7=40

lesize,9,,elem7,

lesize,27,,elem7,

lesize,41,,elem7,

elem8=30

lesize,26,,elem8,

lesize,8,,elem8,

elem6=80

espaciado6=40

lesize,55,,elem6,espaciado6

lesize,40,,elem6,espaciado6

!taco izquierdo aristas verticales lado derecho

elem0=50

espaciado0=4

elem5=1

lesize,57,,elem0

lesize,30,,elem0

lesize,58,,elem5

lesize,37,,elem5

!taco izquierdo aristas verticales

lesize,29,,elem5,

lesize,38,,elem5,

lesize,59,,elem5,

lesize,56,,elem5,

!taco izquierdo x=0

elem4=20

lesize,10,,elem4,

lesize,28,,elem4,

lesize,42,,elem4,

!lámina

elem2=90

espaciada3=1/2

lesize,3,,elem2,espaciada3

lesize,12,,elem2,espaciada3

lesize,44,,elem2,espaciada3

lesize,7,,elem2,espaciada3

!taco derecho

elem3=15

lesize,4,,elem3,

lesize,15,,elem3,

lesize,47,,elem3,

lesize,49,,elem3,

lesize,17,,elem3,

lesize,6,,elem3,

elem6=10

lesize,50,,elem6,

lesize,18,,elem6,

lesize,5,,elem6,

lesize,16,,elem6,

lesize,48,,elem6,

```
lesize,11,,elem5,  
lesize,51,,elem5,  
lesize,54,,elem5,  
lesize,43,,elem5,  
lesize,53,,elem5,  
lesize,14,,elem5,  
lesize,52,,elem5,  
lesize,13,,elem5,
```

```
!mallar  
TYPE, 1  
MAT, 1  
REAL,  
ESYS, 11  
SECNUM,  
MSHAPE,1,3D  
MSHKEY,0  
CM,_Y,VOLU  
VSEL, , , 1  
CM,_Y1,VOLU  
CHKMSH,'VOLU'  
CMSEL,S,_Y  
VMESH,_Y1  
CMDELE,_Y  
CMDELE,_Y1  
CMDELE,_Y2
```

```
TYPE, 1  
MAT, 2  
REAL,  
ESYS, 12  
SECNUM,  
FLST,5,2,6,ORDE,2  
FITEM,5,3  
FITEM,5,-4
```

```

CM,_Y,VOLU
VSEL,,,P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
VMESH,_Y1
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
    
```

```

FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,20
    
```

!5. Cargas y condiciones de contorno

```

CSYS,0
!taco de la izq empotrado
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,15
DA,P51X,ALL,0
    
```

```

!Desplazamiento en la dirección x en el tado de la der
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,20
DA,P51X,UX,desplazamiento
    
```

```

!desplazamiento en dirección Z=0 en el taco de la der
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,20
DA,P51X,UZ,0
    
```

```

!Desplazamiento en dirección Y=0 en el taco de la derecha
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,20
DA,P51X,UY,0
    
```

```

!Giro_x en el taco de la derecha
FLST,2,1,5,ORDE,1
    
```

FITEM,2,20

DA,P51X,rotx,0

!Giro_y en el taco de la derecha

FLST,2,1,5,ORDE,1

FITEM,2,20

DA,P51X,roty,0

!Giro_z en el taco de la derecha

FLST,2,1,5,ORDE,1

FITEM,2,20

DA,P51X,rotz,0

!carga de compresión sobre el taco de la derecha

FLST,2,1,5,ORDE,1

FITEM,2,20

SFA,P51X,1,PRES,compresion

!Carga de compresión sobre el taco de la izquierda

FLST,2,1,5,ORDE,1

FITEM,2,15

SFA,P51X,1,PRES,compresion

!simetría parte de abajo de la lámina

DA, 1,SYMM

FINISH

/SOL

/STATUS,SOLU

SOLVE

REFERENCIAS

- [1] Trabajo Fin de Grado: Variación con el ratio del espécimen de la intensificación de tensiones en la esquina en el ensayo de tracción ``Off-Axis'' (2018). Autor: Aurelio Jesús Piña Méndez
- [2] Influencia en el fallo de probetas off-axis de las singularidades del estado tensional. Anales de mecánica de la fractura, vol. 36, pp. 166-170, abril 2019. A. Piña, A.Barroso, J.C.Marín.
- [3] Trabajo Fin de Grado: Estudio comparativo del módulo y resistencia a cortadura intralaminar con diferentes tipologías de probetas Off-Axis para un material compuesto Grafito-Epoxi (2016). Autor: Emilio García Gil.
- [4] Introducción al análisis y diseño de materiales compuestos. F.paris, J.Cañas, J.C. Marín, A. Barroso.
- [5] Teoría de la Elasticidad. Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales. F. París (2000).
- [6] C.T. Sun, I. Chung, Composites. 24, 8, 1993, pág. 619-623 (2012). DOI: 10.1016/0010-4361(93)90124-Q.
- [7] Tesis Doctoral: Caracterización de estados singulares de tensión en esquinas multimateriales. Aplicación a uniones adhesivas con materiales compuestos. Universidad de Sevilla (2007). Barroso, A.
- [8] Revista de la Asociación Española de Materiales Compuestos vol 1, nº1 pag 91-96. Eliminación de singularidades en ensayos estándar de materiales compuestos. A .Barroso, J.C. Marín, V-Mantic, F. París.
- [9] Trabajo Fin de Grado: Variación de la resistencia de una lámina unidireccional de grafito-epoxy sometida a tracción fuera de ejes (10°) con el ratio del espécimen (2017). Autor: Alberto Baro Parra.

