

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID



INGENIERÍA INDUSTRIAL
PROYECTO FIN DE CARRERA

ANÁLISIS PARAMÉTRICO DEL CORTE
ORTOGONAL DE MATERIALES COMPUESTOS
MEDIANTE MODELIZACIÓN NUMÉRICA

AUTOR Rubén de Blas Luna
TUTOR Carlos Santiuste Romero
Xavier Soldani

**DEPARTAMENTOS DE INGENIERÍA MECÁNICA Y
MECÁNICA DE MEDIOS CONTINUOS
Y TEORÍA DE ESTRUCTURAS**

ABRIL 2010

Índice

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Objetivos.....	3
1.3	Contenido del proyecto.....	4
2	ANTECEDENTES.....	5
2.1	Los materiales compuestos. Base teórica.....	5
2.1.1	Matrices.....	6
2.1.2	Fibras.....	11
2.2	Mecanizado.....	18
2.2.1	Tecnología del mecanizado.....	18
2.2.2	Corte ortogonal.....	22
2.3	Elementos finitos.....	27
3	ESTUDIOS EXPERIMENTALES.....	30
3.1	[1] (Takeyama y Iijima, 1988).....	30
3.2	[2] (Bhatnagar et al., 1994).....	30
3.3	[3] (Wang et al., 1995).....	32
3.4	[4] (Arola, et al, 1997).....	33
3.5	[5] (Inoue y Yugue, 1999).....	34
3.6	[6] (Wang y Zang, 2003).....	34
3.7	[7] (Bhatnagar et al., 2004).....	38
3.8	[8] (R.Zitoune et al., 2004).....	41
3.9	[10] (Nayak et al., 2005).....	44
3.10	[11] (Nayak et al., 2005).....	51
3.11	[12] (Venu Gopala et al., 2006).....	57
3.12	[13] (Mkaddem et al., 2008).....	63
3.13	[14] (Mkaddem et al., 2008).....	66
3.14	[15] (Lasri et al., 2009).....	71
4	MODELO NUMÉRICO.....	78
4.1	Introducción.....	78
4.1.1	Geometría, malla y análisis.....	78
4.1.2	Materiales y modelización del daño.....	80
4.1.3	Contacto herramienta-material.....	84
4.1.4	Condiciones de contorno.....	86
4.1.5	Tiempo y paso de la simulación.....	88
4.2	Parámetros analizados.....	89
4.2.1	Variación de la orientación de fibra.....	89
4.2.2	Variación del ángulo de desprendimiento de la herramienta.....	90
4.2.3	Variación de la malla.....	93
4.2.4	Variación del tamaño del elemento de malla.....	96
4.2.5	Variación de la energía de deformación.....	96
4.2.6	Variación del coeficiente de fricción.....	98
4.2.7	Tabla resumen de parámetros.....	98
5	VALIDACIÓN Y RESULTADOS.....	100
5.1	Validación.....	100
5.1.1	Fuerza de corte.....	100

5.1.2	Fuerza de avance	102
5.1.3	Extensión del daño en profundidad.	105
5.2	Resultados.....	107
5.2.1	Influencia de la orientación de fibra.....	114
5.2.2	Influencia del ángulo de desprendimiento.....	124
5.2.3	Influencia de la malla	128
5.2.4	Influencia del tamaño del elemento de malla	137
5.2.5	Influencia de la energía.....	139
5.2.6	Influencia del coeficiente de fricción.	142
6	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	144
6.1	Conclusiones.....	144
6.2	Trabajos futuros.....	145
7	BIBLIOGRAFÍA	147

Capítulo I

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación.

Los materiales compuestos reforzados por fibras experimentan un incremento constante en cuanto a su utilización en componentes estructurales. Sus interesantes propiedades ante fatiga y corrosión, unidas a su ligereza, alta rigidez y resistencia, posibilitan su empleo en una amplia gama de aplicaciones aeronáuticas, automovilísticas, marítimas o deportivas.

Sin embargo, desde el comienzo de su uso se han encontrado diversos problemas relacionados con la precisión y la eficacia en el corte. A pesar de que los materiales compuestos se suelen presentar en la forma final deseada, procesos como el fresado o taladrado son necesarios para conseguir requerimientos de montaje o ajustadas tolerancias.

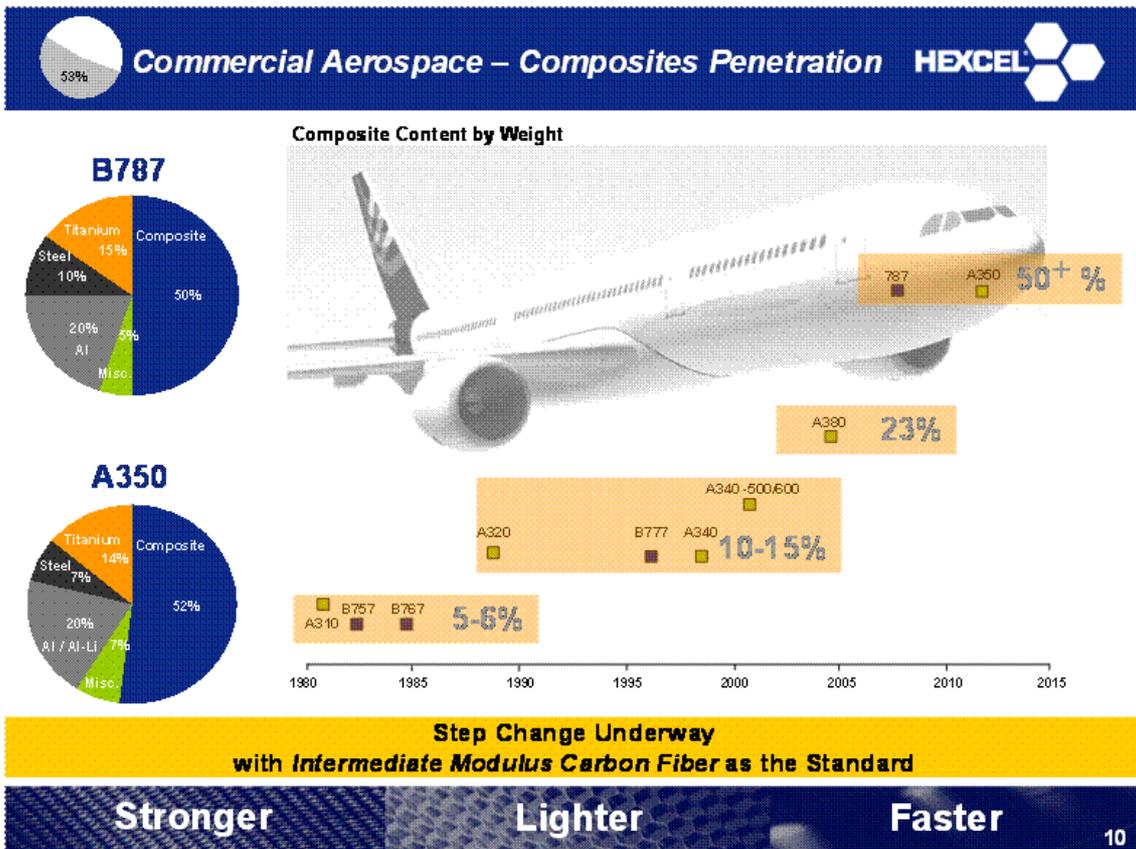


Fig 1.1: Evolución del empleo de materiales compuestos en las dos grandes multinacionales aeronáuticas. El objetivo es que en 2015 tanto el B787 como el A350 tengan un porcentaje del 50 y 52% respectivamente de material compuesto en su composición.

La presencia de las fibras, caracterizadas por su resistencia y rigidez, dificultan estas operaciones, provocando la aparición del daño, desunión en la interfase fibra-matriz, rotura de las fibras y degradación de la matriz.

Los ensayos e investigaciones experimentales de materiales de baja maquinabilidad como son los materiales compuestos suponen un importante consumo de tiempo y dinero, además de riesgos en cuanto a problemas de salud por inhalación o contacto directo con la piel de estos materiales. El hecho de ser materiales heterogéneos y con propiedades anisotrópicas los hacen más difíciles de estudiar que a los metales.

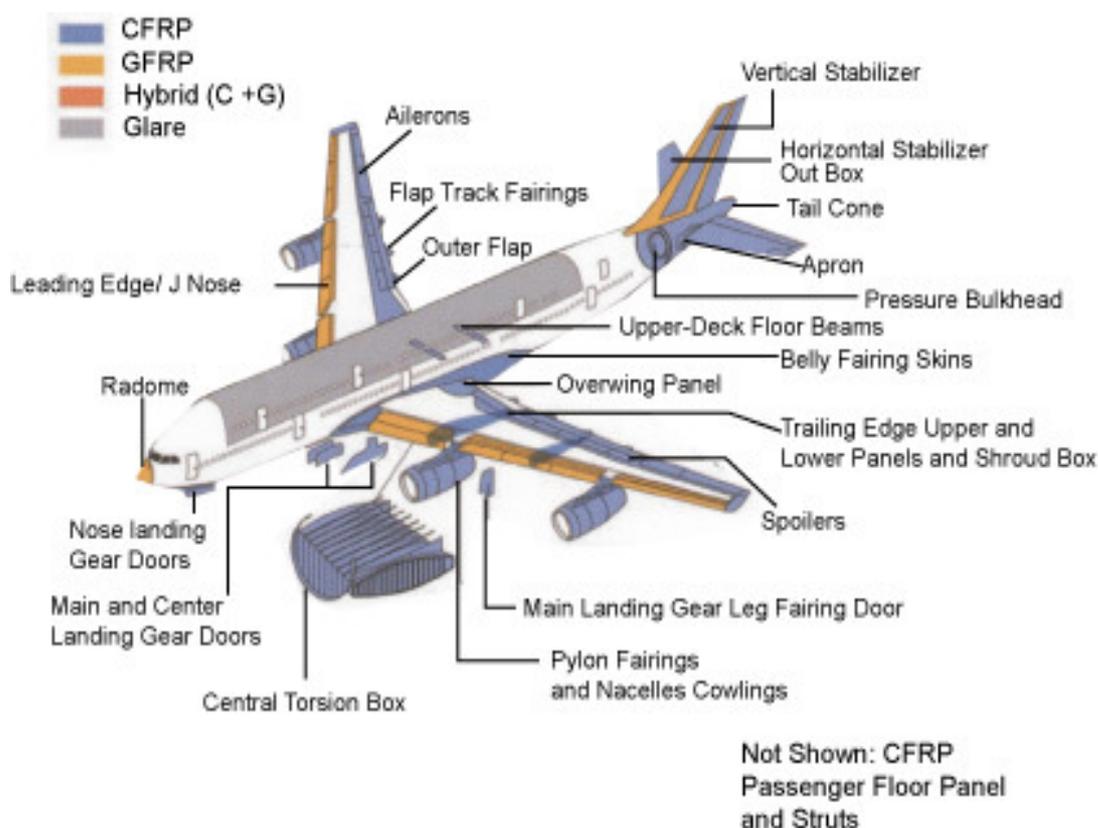


Fig 1.2: Diseño de la maqueta del A350 y partes que serán construidas por materiales compuestos.

Por otro lado, la forma de los materiales compuestos, generalmente formados por capas delgadas, complica la ejecución de los ensayos experimentales, que suelen realizarse a bajas velocidades de corte después de un complejo posicionamiento en la máquina-herramienta.

Los elementos finitos son un método numérico potente que posibilita estudios completos de los fenómenos que, combinados con los estudios experimentales, reducen los costes y tiempos de realización de los ensayos.

El presente proyecto está centrado en estas simulaciones de corte ortogonal del material compuesto por una matriz epoxídica y reforzado por fibras largas de vidrio (conocido como GFRP por sus siglas en inglés: Glass Fibre Reinforced Plastic), considerándolo

necesario debido al limitado número de artículos referidos al corte ortogonal de este tipo de material comparados con los estudios realizados para el metal, información que contrasta con el uso cada vez más frecuente de los materiales compuestos.

Además, el empleo de un modelo combinado macro-micro mecánico como el que se ha realizado en este proyecto complementa a los modelos macromecánicos (modelos de material equivalente homogéneo) y micromecánicos de la bibliografía.

En general, estos modelos numéricos de la bibliografía están basados en análisis cuasiestáticos, centrados en el instante inicial del proceso de corte. En el modelo propuesto en este proyecto se realiza una aproximación dinámica del proceso completo de formación de la viruta gracias a las posibilidades que ofrece actualmente el método de los elementos finitos mediante la integración explícita, un estudio que permite analizar una longitud suficientemente grande de corte para permitir analizar la superficie mecanizada, tiempos de convergencia de fuerzas y formación de la viruta.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este proyecto consiste en validar el modelo de elementos finitos propuesto para simular el mecanizado con corte ortogonal de la fibra de vidrio.

Para ello se ha partido de un modelo numérico generado en el programa de simulación ABAQUS/Explicit con parámetros que se tomarán como fijos, como la elasticidad y la resistencia del material, y otros que se han ido modificando ya que se consideran difíciles de analizar, tales como la orientación de fibra, ángulo de desprendimiento, o complicados de predecir, como el coeficiente de fricción o la energía de deformación.

Utilizar un parámetro fijo que simula un fenómeno que en la realidad es difícil de predecir o dependiente de otras variables o condiciones iniciales es arriesgado y limita las posibilidades de validar un modelo.

Con el objetivo de diseñar un modelo lo más válido posible para su posterior utilización en el estudio del corte de los materiales compuestos, estos parámetros han sido modificados en búsqueda de su grado de influencia en los resultados finales, consiguiendo de esta manera un modelo más elaborado.

La validación permitirá conocer las fuerzas generadas en el proceso del mecanizado y mejorar los conocimientos de los mecanismos de formación de la viruta y su evolución, además de la generación de daño interno, añadiendo la influencia de los parámetros del modelo.

Aunque operaciones como el taladrado o el fresado son las más frecuentes en los materiales compuestos, se ha utilizado el corte ortogonal por simplicidad.

Los resultados del modelo propuesto tras las simulaciones se han comparado con los obtenidos experimentalmente por los investigadores de la bibliografía, para considerar

su validez. Esto simplificará futuros análisis y el alto coste de los ensayos experimentales.

1.3 Contenido del proyecto.

El contenido del proyecto se divide en los siguientes capítulos:

Capítulo 2: se realiza un análisis teórico de los materiales compuestos, describiendo las propiedades y aplicaciones de las distintas matrices y fibras que se pueden encontrar. A continuación se introduce el tema del mecanizado y se explica la hipótesis de corte ortogonal y sus parámetros, que son con los que se han trabajado en el modelo.

Para finalizar el capítulo se describe el método matemático de elementos finitos y sus principales ventajas respecto a los análisis experimentales. Se presenta el programa ABAQUS con el que se trabajará y sus principales módulos.

Capítulo 3: se hace una revisión de los principales estudios publicados sobre el mecanizado de materiales compuestos (vidrio y carbono). El objetivo es conocer qué se ha estudiado previamente al trabajo presente y recopilar datos experimentales para posteriormente comparar con los resultados del modelo propuesto y proceder a su validación.

También se han comentado los modelos propuestos por estos investigadores para comprobar las dificultades encontradas a la hora de validarlos y las distintas posibilidades que ofrecen dependiendo del modelado (macromecánico o micromecánico) y los parámetros fijados.

Capítulo 4: se describe el modelo paramétrico de elementos finitos propuesto para el mecanizado de los compuestos reforzados con fibra de vidrio, y se indica qué parámetros han permanecido fijos en todas las simulaciones y cuales variables y por qué. Se explica como introducir en ABAQUS/CAE los inputs del modelo.

Capítulo 5: todos los resultados de las simulaciones se exponen en este capítulo. Se han comparado con los resultados experimentales descritos en el capítulo 3 para proceder a la validación del modelo. Posteriormente se analizan los resultados en profundidad divididos por parámetros variables para comprobar el grado de influencia de cada uno de ellos en fuerzas de corte, fuerzas de avance, daño a tracción y compresión bajo la superficie mecanizada y formación de la viruta.

Capítulo II

2 ANTECEDENTES

2.1 Los materiales compuestos. Base teórica.

Se define como material compuesto una combinación de materiales que difieren en composición o forma a escala macroscópica. Los constituyentes mantienen su identidad en el compuesto, es decir, no se disuelven o funden entre ellos aunque funcionan conjuntamente. Los componentes pueden identificarse físicamente y muestran una interfase definida entre ellos.

Generalmente, los materiales compuestos constan de una fase continua o *matriz* y de una fase discontinua o *refuerzo*, que presentan diferente composición y morfología según la funcionalidad o propiedades que se pretenden conseguir

El material que se ha tratado en este proyecto es la fibra de vidrio, conocido como GFRP por sus siglas en inglés “Glass Fiber Reinforced Polymer”, material compuesto por una matriz polimérica y un refuerzo de fibra continua de vidrio. A continuación se ha analizado la composición y características de las distintas matrices y fibras que existen, y en particular la fibra de vidrio.

Las principales ventajas de los materiales compuestos reforzados con fibras son las siguientes:

- Altas características mecánicas específicas.
- Diseño a medida.
- Isotropía / anisotropía.
- Reducción del número de componentes /elementos de unión.
- Buen comportamiento a fatiga.
- No existen problemas de corrosión.
- Gran estabilidad dimensional.
- Ahorro en peso.

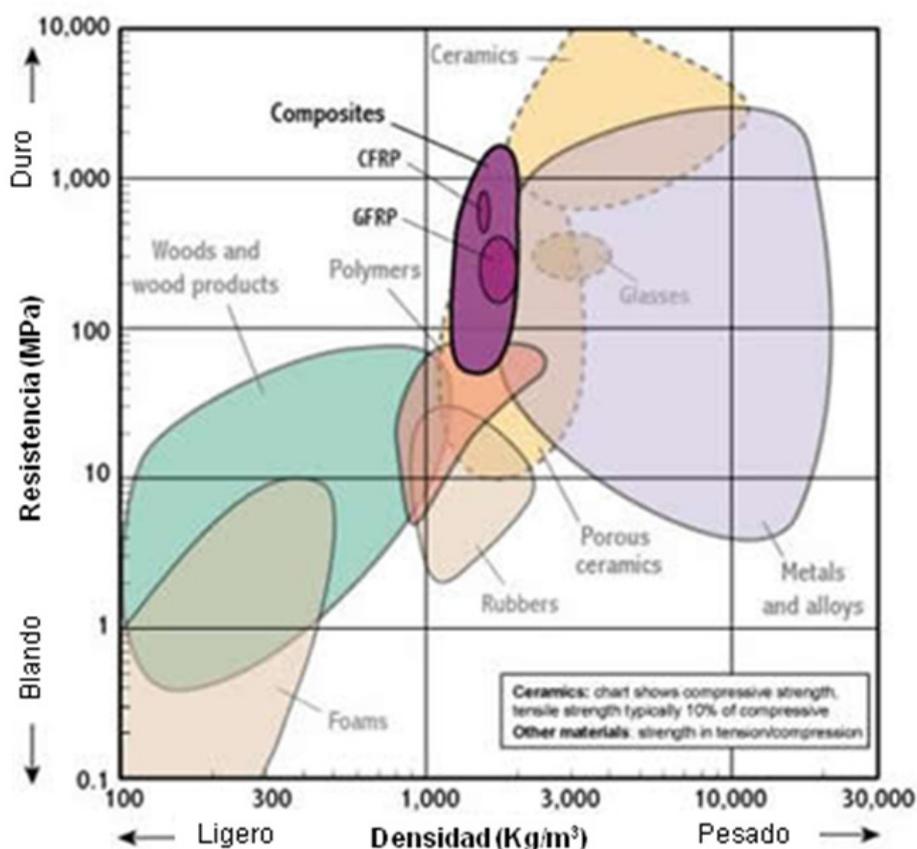


Fig 2.1: Situación de los materiales compuestos frente al resto de materiales

2.1.1 Matrices

Una matriz es un material homogéneo e isótropo, cuyas características se mejoran por la incorporación de refuerzos, sean granulares, fibras o tejidos. El conjunto es el material compuesto, heterogéneo y anisótropo con propiedades que dependen de la matriz, los refuerzos y de algo fundamental que es la asociación entre ambos.

Las matrices son materiales resistentes y dúctiles, que se refuerzan con fibras, material más resistente, rígido y frágil. La matriz es una fase sólida continua, en la que se embeben los refuerzos, en una o más fases discontinuas, dependiendo las propiedades del conjunto de la composición química de sus componentes, de su forma, distribución y tamaño.

Las funciones principales de las matrices son dar estabilidad el compuesto, transferir las cargas de unas fibras a otras, mantener su alineación y protegerlas del deterioro, mecánico y químico, evitando también la propagación de grietas. Determinan también la temperatura de servicio del material compuesto y controlan la resistencia del material compuesto frente al medio ambiente y agentes externos.

Se pueden lograr también, dependiendo del tipo de matriz escogida, resistencia al impacto, baja pérdida de características al aumentar la temperatura, evitando la fluencia (“creep”), logrando resistencia a la humedad y al medio ambiente.

En todos los casos debe de haber una buena adherencia entre la matriz y las fibras, para lo cual es necesario que la matriz moje la superficie de las fibras, logrando así un completo contacto. Cuando esto no sucede, es preciso tratar las fibras con agentes puente.

Las matrices pueden ser de muy diferentes materiales. Existen por un lado las **matrices orgánicas**, subdivididas en matrices de carbón, cerámicas y metálicas. El presente estudio no se orienta a este tipo de matrices, pero si se añade un breve resumen de sus propiedades.

La matriz de carbón, que da lugar a los materiales compuestos denominados C/G, se aplica para altas temperaturas, por ejemplo en los conos de protección de vehículos espaciales, cohetes y misiles, frenos para ruedas de aviones, toberas de motores, plantas nucleares, etc. Los materiales compuestos que se obtienen tienen gran estabilidad térmica y poco peso. Son química y biológicamente inertes, poseen excelente atenuación al choque térmico, baja expansión y resistencia elevada al impacto y a la fatiga.

Las matrices cerámicas son matrices refractarias que emplean como refuerzos, entre otros, carbón, sílice, alúmina, carburo de silicio, sea en forma de fibras continuas o cortadas. Se caracterizan por su estabilidad a altas temperaturas, unidos a su baja densidad. Tienen baja resistencia a tracción y a los choques mecánicos y térmicos, dada su baja deformación plástica antes de la fractura (trabajo de fractura del orden de 10 J m^{-2} , frente al de un medio dúctil, del orden de 10^4 o 10^6 J m^{-2}). Los materiales compuestos a que dan lugar se caracterizan por su alta resistencia mecánica a altas temperaturas y a la oxidación y agentes químicos. Los refuerzos aumentan la resistencia y corrigen la fragilidad. Las propiedades mecánicas están muy influenciadas por la porosidad de la matriz y los daños producidos durante el proceso. Se utilizan para fabricar aislamientos térmicos, en toberas de salida o piezas que deba trabajar en ambientes corrosivos.

Con la matriz metálica se utiliza un nuevo tipo de fibra, que debe soportar altas temperaturas sin disminuir sus características mecánicas. El principal problema es que estas altas temperaturas pueden degradar las fibras. Poseen mala resistencia a la propagación de grietas.

Las **matrices poliméricas**, las de mayor uso e importancia, fueron definidas en 1900 por J. Scheiber como “sustancias vítreas y amorfas, es decir, un estado líquido-sólido”. Usadas en masa, todos los tipos de polímeros tiene resistencias mecánicas bajas, del orden de 50 a 80 MPa, valores que decrecen mucho en los termoplásticos al aumentar la temperatura.

De modo general, se considera que deben soportar temperaturas de 95° de modo continuado, salvo para aplicaciones aeronáuticas, donde deben llegar a los 130° .

Además de ser utilizadas como matrices, estas resinas poliméricas tienen otras aplicaciones en el campo industrial, constituyendo grupos con características especiales que las hacen apropiadas para aplicaciones como resinas para laminación, resinas para superficie, resinas de colada o resinas de relleno.

Sin duda alguna, es la fibra de vidrio el refuerzo más utilizado en la fabricación de materiales compuestos de matriz polimérica. Esto es posible gracias a sus buenas características, que después se citarán.

Atendiendo a sus propiedades tecnológicas, las resinas pueden ser tanto termoplásticas como termoestables.

Los termoplásticos están formados por moléculas lineales, unidas por enlaces secundarios, y son deformables llegando a fundir, convirtiéndose en líquidos viscosos. Se presentan en estado sólido ya polimerizadas. Se ablandan por el calor. Pueden moldearse y reprocesarse.

Cuando se emplean como matrices, se clasifican en los siguientes grupos:

- Plásticos de producción masiva, de gran difusión, como por ejemplo el polietileno, poliestileno y policloruro de vinilo (PVC);
- Tecnopolímeros: plásticos con propiedades específicas que dan lugar a productos de mayor calidad, con aplicaciones industriales incluso de sustituir a metales. Ejemplos son los acetales, policarbonatos y nylon.
- Elastómeros, comprende polímeros que tienen deformaciones elásticas apreciables, que permiten la fabricación de piezas que requieran esta propiedad.
- Para alta temperatura: llamados en algunas ocasiones termoplásticos-termoestables, soportan temperaturas muy altas, debiendo soportarlas también las fibras. Se emplean, en lugar de fibras de vidrio, de carbono, ya que la de vidrio a partir de 300° pierde tenacidad.

Los materiales compuestos que tienen como matriz materiales termoplásticos, contienen, en general, fibras, y se procesan por inyección o por estampación. En el primer caso se prepara previamente la matriz agregándole fibras cortas. Con fibras de vidrio (con hasta un 50%) se obtienen mejoras de 1, 2 a 3 veces las propiedades mecánicas de la resina, de 1,8 a 3 veces la rigidez, mejorándose también las temperaturas de utilización de 10 a 30° y hasta 200° algunos polímeros de estructura cristalina.

Con la fabricación por estampación para los termoplásticos se consiguen ventajas de sencillez y rapidez, con mejoras de propiedades mecánicas y térmicas, conseguidas por la asociación de fibras, largas o continuas (LFRP, Long Fiber Reinforced Polymer) Además la pequeña mano de obra necesaria y la rapidez del proceso hacen que este procedimiento está ampliamente desarrollado en la industria por ejemplo del automóvil.

Los polímeros termoestables o resinas termoendurecibles, en su estado final, es decir, una vez elevado la temperatura hasta conseguir un endurecimiento completo sin llegar a degradación o descomposición química, son frágiles, y para evitarlo se asocian a otros materiales. Se presentan sin polimerizar, polimerizando durante el proceso de fabricación de la pieza final (curado), formando una red tridimensional.

Las resinas de este grupo más empleadas son poliésteres no saturados, condensación del formol con el fenol y la melanina, y epoxis. Claramente la producción mayor y la mejor evolución es la de los poliésteres.

Los polímeros termoestables se sitúan por delante de los termoplásticos a la hora de la producción de materiales compuestos de matriz polimérica, tratándose en la mayoría de los casos de resinas termoestables orgánicas de poliéster, viniléster, fenólicas, epoxi y poliuretano. Las resinas de poliéster representan en torno al 75% del total. Dentro de ellas, las más utilizadas son las ortoftálicas, las isoftálicas y las bisfenólicas. En la actualidad se está desarrollando un esfuerzo considerable para intentar sustituirlas por matrices de tipo termoplástico, con mejor resistencia a impacto y humedad, tiempo de vida ilimitado y reprocesabilidad.

En la siguiente tabla podemos ver una relación de las características de los tres tipos principales de matriz termoestables.

Matriz	Disposición	Refuerzos			Polimerización	Precio	Productos
		Celulosa	SiO	Kevlar			
Poliéster	Fibras cortas. Tejidos	-	Sí	-	Relativamente rápida	Relativamente bajo	Plásticos reforzados, materiales compuestos de gran difusión
Fenólico	Fibras, todos tipos y orientaciones	Sí	Sí	-	Relativamente rápida	Relativamente bajo	Industriales. Materiales compuestos de gran difusión y resistencia térmica.
Epóxido	Fibras largas. Tejidos	-	Sí	Sí	Muy lenta, requiere alta temperatura	Alto a muy alto	Industrial. Materiales compuestos de altas características (aviación)

Tabla 2.1: Principales tipos de matrices termoestables. Características.

Se han descrito los polímeros más utilizados como matrices. El sistema de producción más empleado es la impregnación de la resina matriz a las fibras de refuerzo, sean sueltas o tejidas, si bien la utilización de los preimpregnados, tejidos preparados por los fabricantes impregnados con las resinas en estado de prepolimerización o polimerización parcial, son cada vez más comunes.

Para la fabricación de materiales compuestos de resistencias reducidas como decoración, estructuras secundarias, etc., pueden utilizarse bien termoplásticos, con los refuerzos apropiados, o bien lo que es más frecuente, los termoestables o termoendurecibles, de más caro procesado, con fibras de mediana resistencia.

Cuando se trata de estructuras más resistentes, deben utilizarse termoestables con fibras de gran resistencia y elasticidad, acopladas a matrices que además de poseer las condiciones de resistencia química tenga características mecánicas en consonancia con las fibras, para obtener las máximas resistencias con los menores pesos. Haciendo revista de alguno de ellos, hay termoplásticos, como los policarbonatos, que poseen una

Tg (temperatura por encima del límite elástico) alta, de 150°, y por ello requieren también temperaturas altas para el conformado.

Entre los termoestables, los poliésteres estéreos tienen contracciones fuertes durante el curado, que originan tensiones internas que disminuyen su resistencia. Los fenólicos, y de melamina, con fibras de alta resistencia, no tienen tampoco características mecánicas apropiadas, además de precisar presiones altas para su conformado. Sin embargo, debido a que no arden ni producen gases tóxicos, se aplican cuando se requieren estas propiedades.

Las resinas epoxídicas son las que se utilizan con las fibras de gran resistencia, como la de vidrio, grafito, kevlar o baro, empleando agentes de curado, amidas, aminas, anhídridos, fenólicos...consiguiendo con ello los materiales compuestos de más altas características, útiles para la industria aeronáutica (la temperatura de servicio puede variar entre 60-150°C). Son polímeros con uno o más grupos reactivos. Presentan baja contracción y buena adhesión a la mayoría de las fibras. Son bastante resistentes a disolventes, ácidos y álcalis. Son las más utilizadas en aplicaciones estructurales.

Cuando se trata de elementos que deben soportar temperaturas elevadas, se deben utilizar matrices de polímeros para alta temperatura, como son las poliamidas, de los que existen preimpregnados, que deben curar a temperaturas y presiones elevadas, lo que obliga a disponer de equipos e instalaciones apropiadas.

	Termoplásticos			Termoestables				Alta temperatura	
	En masa	Termoplásticos	Elastopolímeros	Poliésteres no saturados	Fenólicos	Melamina	Epóxidos	Poliamidas	Termoplásticos/estables
Propiedades									
Mecánicas	1	3	1	3	2	2	4	3	2
Térmicas	0	1	1	2	3	3	3	4	3
Toleración	3	4	2	3	2	2	3	3	3
Duración									
Envejecimiento	1	2	4	4	2	2	1	2	2
Fatiga	2	3	2	3	2	2	4	4	3
Fuego	1	1	0	1	3	3	2	3	3
Coste									
Materias primas	4	2	2	3	3	2	1	0	0
Fabricación	4	3	1	4	2	2	3	0	2
Inversión	1	1	2	4	2	2	3	0	1

Tabla 2.2: Valores comparativos de polímeros usados como matrices. 0: malo; 1: medio; 2: aceptable; 3: bueno; 5: muy bueno.



2.1.2 Fibras

Las fibras sirven de refuerzo a las matrices. Se denominan fibras a los materiales que tienen una relación de longitud frente a diámetro mayor que 100. Las fibras sintéticas se obtienen por procesos de hilado, en cualquier relación l/d . En el análisis presente, las fibras que se han tenido en cuenta son las de alta resistencia, procedentes de polímeros orgánicos, y que se utilizan como refuerzos en materiales compuestos, como son vidrio, aramidas (kevlar, nomex, kynol), carbono y boro.



Fig 2.2: Diferentes tipos de fibras.

Ventajas de los materiales compuestos reforzados por fibras:

- Altas características mecánicas específicas.
- Diseño a medida
- Isotropía / anisotropía
- Reducción del número de componentes /elementos de unión
- Buen comportamiento a fatiga.
- No existen problemas de corrosión.
- Gran estabilidad dimensional
- Ahorro en peso.

Se detallan a continuación las características y propiedades de la fibra de vidrio.

En los años 30 se fabrican ya varios productos: emparedados entre dos láminas de vidrio, con fibras coloreadas entre ellas, filtros de aire, filamento continuo, y tejidos que serán la base de los polímeros reforzados.

Los vidrios son materiales amorfos, que se forman por no poder situarse las partículas constituyentes en la posición ordenada, de mínima energía, que corresponde a un cristal. Los vidrios industriales están formados por tres componentes: un óxido ácido y dos óxidos metálicos, que según la proporción en la que se encuentran presentes confieren al vidrio unas determinadas características. Los primeros son los llamados generadores de vidrio, que son los iones pequeños, de valencia 3 o mayor, que dan lugar a números de coordinación pequeños. La transición de líquido a sólido se hace con un gran aumento de la viscosidad del líquido. Generadores típicos son SiO_2 , B_2O_3 , P_2O_5 ...

Los primeros óxidos metálicos de fórmula MtO , que se denominan modificadores o estabilizadores, dan características peculiares a los vidrios. Son, entre otros, CaO , BaO , PbO , CuO . Por último los óxidos llamados fundentes, de fórmula Mt_2O , varían las condiciones del vidrio disminuyendo su punto de fusión. Son: Na_2O , K_2O , Li_2O .

El SiO₂, el más frecuente, tiene alta temperatura de fusión, es muy viscoso y tiene pequeña dilatación térmica. Entre los modificadores, los CaO y MgO, mejoran la resistencia al agua, ácidos y álcalis, el ZnO mejora su resistencia química, el PbO disminuye la viscosidad de producto fundido, y aumenta la densidad y da brillo, y el BaO aumenta la densidad.

El proceso de fabricación completo se puede ver en la Fig 2.3.

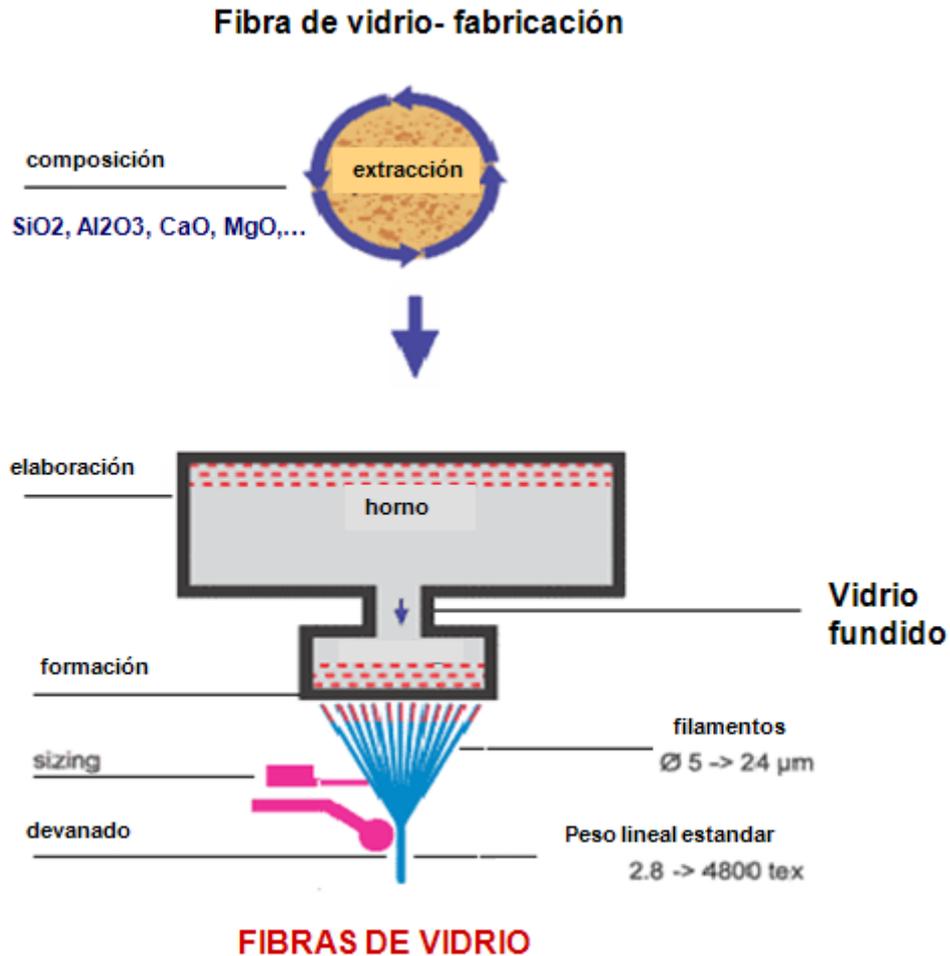


Fig 2.3 : Proceso de fabricación de la fibra de vidrio

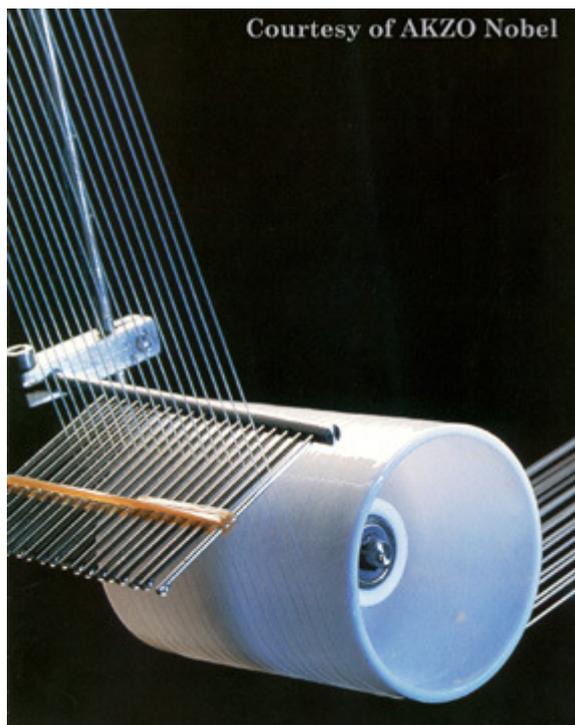


Fig 2.4: Las fibras de vidrio son muy sensibles al daño y deben ser protegidas durante el proceso de fabricación mediante la aplicación de sizing

Son características las propiedades mecánicas de los vidrios; resistencia a la tracción y modulo elástico altos, con el consiguiente pequeño alargamiento, no presentando fluencia a la temperatura ordinaria. Son incombustibles, inalterables a la luz UV, inmunes al ataque microbiano y con buena resistencia a agentes químicos y humedad.

De forma general presentan buena resistencia a impacto y son buenos aislantes. Son más baratas que la fibra de carbono o kevlar

Como se ha comentado, la fibra de vidrio es el refuerzo más utilizado en la fabricación de materiales compuestos de matriz polimérica. Esto es posible gracias a la excelente adherencia fibra-matriz:

- Resistencia mecánica específica (resistencia a tracción/densidad) superior a la del acero en la dirección de la fibra
- Buenas propiedades dieléctricas que la hacen ideal para aislamiento eléctrico.
- Incombustibilidad
- Estabilidad dimensional
- Débil conductividad térmica
- Buena resistencia a los agentes químicos
- Fácil procesamiento
- Propiedades isotropas

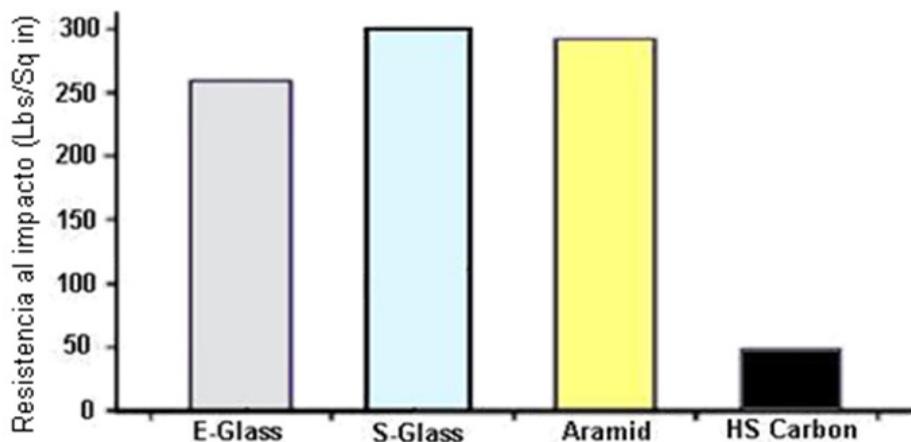


Fig 2.5: Comparación de la Resistencia al impacto de las fibras

Las denominaciones de los vidrios corresponden a:

- “A”: vidrio corriente, alcalino
- “E”: vidrio eléctrico, resistente a la humedad y los álcalis, buenas propiedades físicas y eléctricas.
- “C”: vidrio químico, resistente a los ácidos.
- “D”: dieléctrico, con baja constante dieléctrica.
- “S”: vidrio de alta resistencia
- “YM-31A”: de alto módulo.

Propiedades	A	E	C	D	S	YM-31A
Densidad (g/cm ³) (21º)	2.50	2.54	2.49	2.16	2.49	2.89
Resistencia a tracción (MPa)						
A 21º	2410	3440	3100	2400	4580	3440
A 260º	-	2960	-	-	4200	2890
A 500º	-	1720	-	-	2430	1200
Módulo Elástico a tracción (GPa)(27º)	67.56	72.5	68.94	51.71	84	109.62
Temperatura de ablandamiento (ºC)	700	846	749	771	860	-
Constante dieléctrica (10 ⁶ Hz)	6.90	5.80	6.24	3.56	4.53	-
Propiedad característica		Precio	Resistencia a ácidos	Rigidez dieléctrica	Resistencia tracción	

Tabla 2.3: Propiedades medias de distintos tipos de fibras de vidrio.

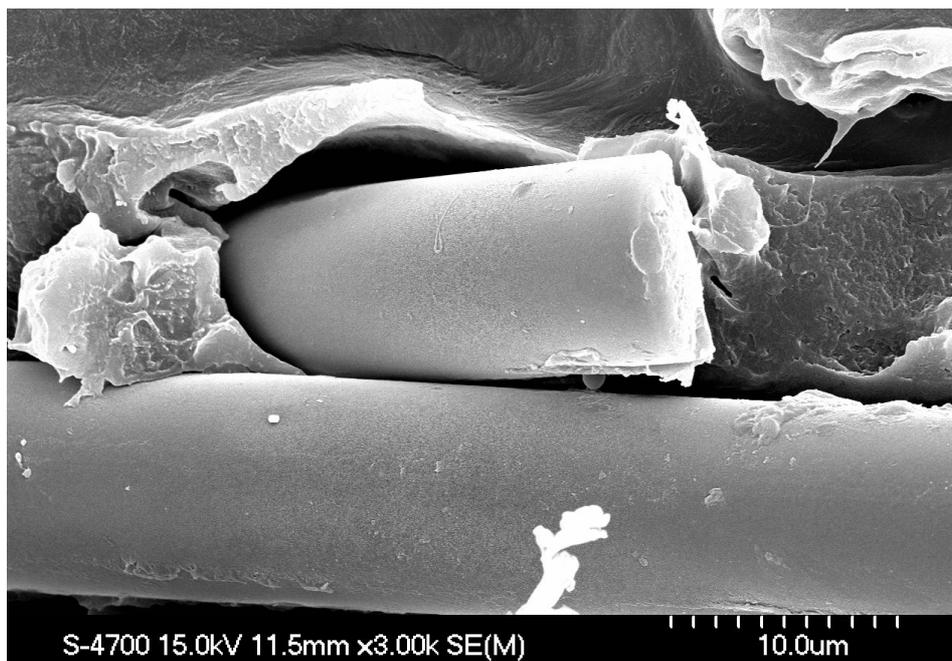


Fig 2.6: Imagen microscópica de la fibra de vidrio

Con fibras de carbono se mejoran aún más las propiedades mecánicas, siendo el mayor aumento en el módulo, que duplica el valor que se obtiene con fibra de vidrio. Mejoran también la conductividad térmica, reduciéndose el coeficiente de fricción, tanto más cuanto más grafitada esté la fibra. La resistencia eléctrica es pequeña, y con adiciones del 15% de fibras de carbono, se evitan las cargas electrostáticas. La resistencia al choque es menor que con fibras de vidrio, y el precio es mayor, por eso de la extensión de la utilización de la fibra de vidrio. Un material compuesto, por ejemplo, con nylon 6,6 y fibras de carbono, alcanza valores de resistencia a tracción similar a la de aleaciones de aluminio.

Las fibras de aramida (Kevlar) son el nombre genérico de las fibras de poliamida aromática. Son fibras poliméricas de alta resistencia mecánica.

Las características positivas de este tipo de fibras son:

- Excelente resistencia a impacto
- Buena resistencia a tracción, superior que la de vidrio
- Menor densidad que la fibra de vidrio y carbono
- Buena resistencia al fuego
- Mantienen sus propiedades a temperaturas relativamente altas
- Buena resistencia a disolvente y aceites

Entre las características negativas de estas fibras hay que reseñar:

- Baja resistencia a compresión
- Compuestos difíciles de mecanizar y reparar
- Fácilmente atacables por ácidos y bases fuertes
- Difícilmente “mojables” por las resinas
- Se degradan al exponerse a radiación UV

**ANÁLISIS PARAMÉTRICO DEL CORTE ORTOGONAL DE MATERIALES COMPUESTOS MEDIANTE
MODELIZACIÓN NUMÉRICA**

- A diferencia de la fibra de carbono y vidrio, presentan una gran absorción de humedad en condiciones ambientales, en detrimento de sus propiedades mecánicas (12% a 70°C/65%H.R)

No todo son ventajas con respecto a los materiales compuestos. Suponen costosos programas de evaluación, calificación y certificación de estructuras, la realización de inversiones en instalaciones y equipos, además de un coste elevado de los materiales. En cuanto a las características y propiedades, tienen baja resistencia al impacto y presentan el problema de la anisotropía.

Como ejemplos particulares, las estructuras tipo sándwich tienen problemas con la entrada de agua, y se necesitan protecciones adicionales ante rayos en la industria aeronáutica.

	Densidad (Gr/cm ³)	Resistencia a tracción (MPa)	Módulo Elástico (GPa)	Alargamiento (%)	Punto fusión (C°)
Vidrio E	2.54	2410-3440	72.5	4.8	850
Vidrio S	2.49	3780-4600	84	5.4	990
Carbono. Fibra HR (T300)	1.75	3500	230	1,5	
Carbono. Fibra IM (T800 H)	1.80	5600	294	1,8	
Daxron (Poliéster)	1.98	1120	13.8	14.5	
Nylon-728 (Poliamida)	1.15	990	5.5	18.3	
Kevlar 49	1.45	2760	138	2.5	
Grafito (HT-S)	1.77	2820	234-253	1.0	
Grafito (UHM-S)	1.96	1860	485-517	0.5	
Boro	2.50	3500	410	0.8	2000
Aluminio	2.8	450	70		
Acero	7.8	1720	200	2	
Titanio	4.5	1000	110		

Tabla 2.4: Características de las fibras

	VIDRIO	CARBONO	KEVLAR
PRECIO	Medio	Muy caro	Caro
RESISTENCIA ESPECÍFICA	Media	Alta	Muy Alta
RIGIDEZ	Baja	Alta	Media
DENSIDAD (Comparando con el aluminio)	Similar	Más baja	Mucho más baja
APLICACIONES GENERALES	Estructuras secundarias	Estructuras primarias y secundarias	Estructuras secundarias

Tabla 2.5: Tabla resumen de características generales de las fibras



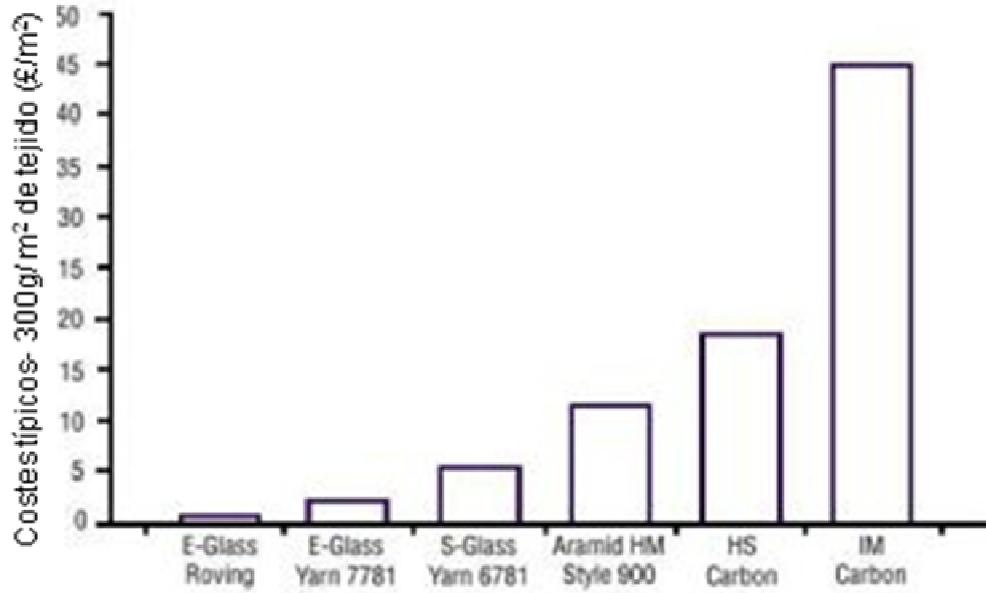


Fig 2.7: Costes típicos de diferentes fibras

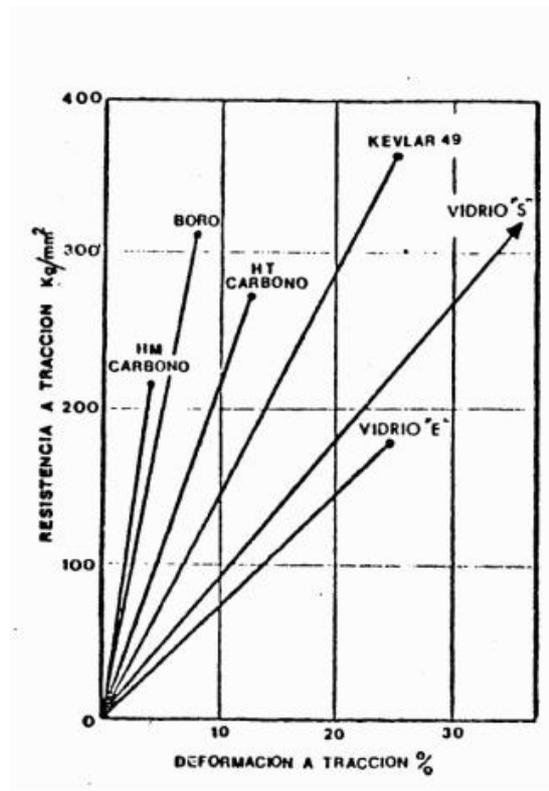


Fig 2.8: Gráfica tracción-alargamiento de algunas fibras

2.2 Mecanizado.

Se han desarrollado a continuación, los principales puntos de la tecnología del mecanizado y el corte ortogonal, atendiendo a todas aquellos parámetros que se han utilizado en la simulación y la validación del modelo propuesto.

2.2.1 Tecnología del mecanizado.

En la fabricación por mecanizado se obtienen las dimensiones y la naturaleza superficial deseada de la pieza separando partes del material (virutas) por medios mecánicos y herramientas de filo.

La clasificación del mecanizado según el tipo de filo de la herramienta es la siguiente:

- Mecanizado con filos geoméricamente determinados (cepillado, fresado...)
- Mecanizado con filos no determinados (finas virutas con granos abrasivos, como el rectificado).

En el mecanizado se suelen establecer condiciones de corte ortogonal: tecnología de mecanizado donde el filo de la herramienta es perpendicular al desplazamiento relativo herramienta- pieza. En la mayoría de los casos reales de mecanizado por simplicidad se suponen estas condiciones.

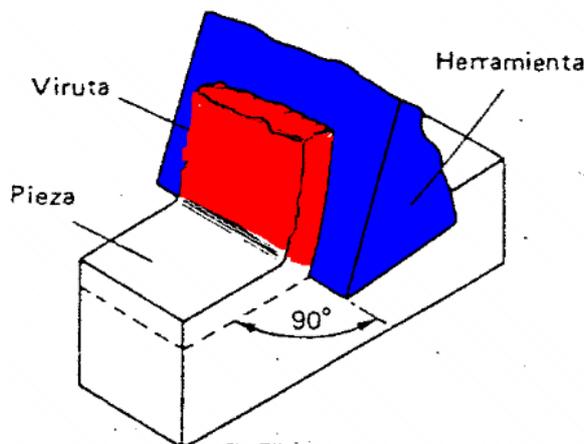


Fig 2.9: Esquema del corte ortogonal.

Son tres los elementos que intervienen en el proceso de arranque de viruta; máquinas herramienta, herramientas de corte y elementos de sujeción.

Máquinas herramienta: donde se sujetan las piezas a mecanizar. Los elementos comunes a toda máquina-herramienta son:

- Bancada: estructura portante sobre la que se dispone el resto de elementos.
- Guías: permiten desplazamiento de elementos móviles.
- Accionamientos: motores y transmisiones
- Elementos de maniobra: volantes, palancas...
- Instalaciones de refrigeración y lubricación.

Herramientas de corte: son las encargadas de cortar el material en forma de viruta. Deben producir viruta discontinua, evacuar el calor producido por el corte, soportar las fuerzas producidas, poseer dureza y resistencia al desgaste.

Elementos de sujeción: permiten la unión sólida entre pieza- máquina y herramienta- máquina.

En el arranque de la viruta debe realizarse movimiento relativo entre herramienta y pieza, con interacción, posibilitando movimientos en las tres dimensiones.

Tipos de movimiento:

- **Movimiento de corte:** aquel que sin movimiento de avance, solo arranca viruta durante una revolución (movimiento circular) o durante una carrera (movimiento rectilíneo, cepillado).
- **Movimiento de avance:** combinado con el de corte hace posible el arranque continuo de virutas.
- **Movimiento de penetración:** determina la profundidad de corte.
- **Movimiento de aproximación:** no es un movimiento de mecanizado.

Se denominan magnitudes de corte a los valores o parámetros que hay que ajustar en el proceso de arranque de viruta para que éste se realice de forma óptima.

- **Velocidad de corte:** velocidad lineal relativa de la herramienta respecto de la pieza en la dirección y sentido del movimiento de corte.
Es un dato experimental, los catálogos de los fabricantes indican los valores orientativos adecuados para cada material. Depende del material de la pieza, de la herramienta, sección de la viruta, refrigeración...
A partir de V_c se calculan las revoluciones por minuto a las que debe girar la pieza o la herramienta, según sea el proceso, en la máquina.

$$V_c = \frac{\pi d n}{1000} \quad (1)$$

donde V_c [m/min], d (diámetro de pieza en torneado y herramienta en fresado) [mm], n (revoluciones de la pieza en torneado y herramienta en fresado)[rpm]



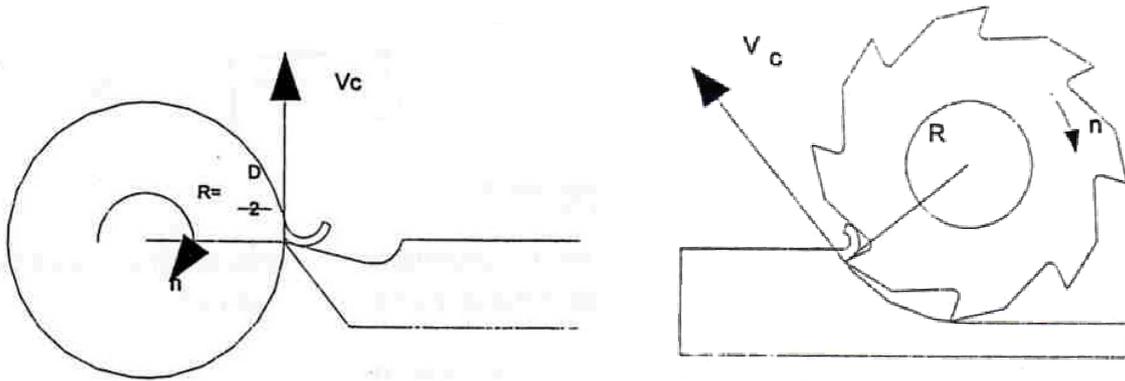


Fig 2.10: Velocidad de corte en torneado y fresado.

- Avance: camino recorrido por la herramienta en cada revolución.

$$Va = a n \text{ [mm]} \quad (2)$$

- Profundidad en el corte: distancia que penetra la herramienta en la pieza. [mm]

- Sección de la viruta: $S = a p \text{ [mm}^2\text{]} \quad (3)$

Nos influye en la fuerza a aplicar (mayor sección, mayor fuerza). Es distinta la magnitud de viruta que se arranca (S) que la magnitud de viruta obtenida (S'), debido a la deformación producida en el corte.

La viruta se separa del material por la combinación de cortadura o recalcado, corte y fluencia o salida de la viruta.

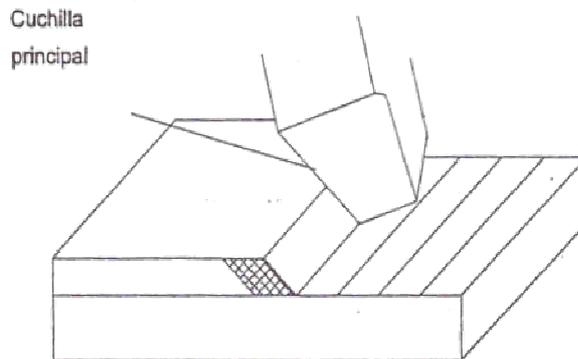


Fig 2.11: Avance, profundidad de pasada y sección de la viruta en el mecanizado

Cortadura o recalcado: el material es desplazado por el filo, que va penetrando en él.

Corte: llega un momento en que el esfuerzo cortante es mayor que la resistencia al corte del material, por lo que resulta cortada una parte de viruta.

Fluencia o salida de viruta: dependiendo de cómo sea el material se produce bien el desprendimiento de la viruta, bien la unión de unas con otras, formando viruta continua.

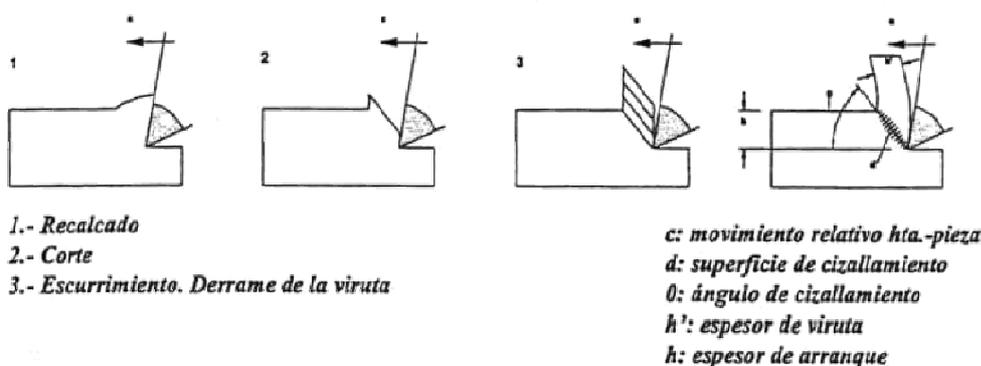


Fig 2.12: Proceso de arranque de viruta en el mecanizado.

Atendiendo a la forma de la salida de la viruta, los dos tipos de que se pueden encontrar son:

- Viruta discontinua o arrancada: se produce en materiales frágiles, duros y quebradizos, fácil evacuación, también con velocidades de corte bajas.
- Viruta continua o plástica: en materiales dúctiles. Molesta, se intenta evitar. También con pequeños avances y gran velocidad de corte. Una solución frente a la viruta continua es el rompevirutas, que obliga a la viruta a salir con un radio más pequeño provocando su ruptura por tensión. Deben venir incorporados a la geometría de filo de la herramienta.
- Viruta semicontinua o cortada: para materiales tenaces y bajas velocidades de corte.

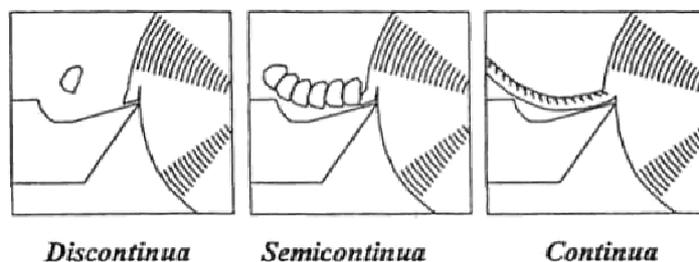


Fig 2.13: Diferentes tipos de viruta en el mecanizado

En materiales dúctiles y bajas velocidades, se generan altas presiones en la zona de contacto viruta- herramienta que producen una soldadura de partículas de viruta con la cuchilla, fenómeno que da lugar al filo recrecido: este filo al

desprenderse, bien se adhiere a la superficie mecanizada o bien provoca un desgaste o rotura de la herramienta. Se puede provocar acabado de mala calidad, zonas duras en la pieza, vibraciones...

Las mejores soluciones para acabar con este inconveniente son aumentar la velocidad de corte, lubricar, utilizar materiales de herramienta adecuados (metales duros, cerámicas...) o aumentar el ángulo de desprendimiento.

2.2.2 Corte ortogonal

Como se ha comentado, el corte ortogonal es aquel en el que el filo es perpendicular a la velocidad relativa herramienta-pieza. En los casos reales de corte siempre suele existir un ángulo de inclinación de arista, aunque se suele desprestigiar al ser en la mayoría de los casos inferior a 15° y se supone un corte ortogonal.

Los parámetros que pueden variar en el corte ortogonal son los siguientes:

- Filo, o arista cortante.
- Superficie de desprendimiento: cara de la herramienta sobre la que desliza el material desprendido. Lugar donde se produce la temperatura máxima del mecanizado.
- Superficie de incidencia: cara de la herramienta que queda frente a la superficie trabajada de la pieza.

Ángulos:

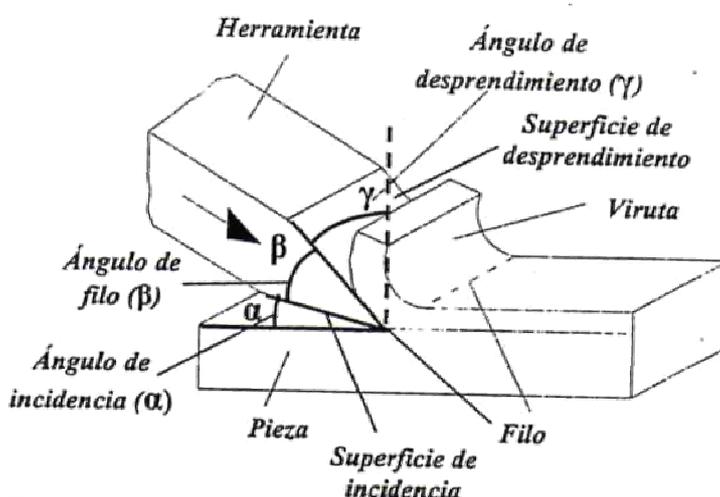


Fig 2.14: Ángulos y superficies en el mecanizado con corte ortogonal

Ángulo de incidencia α : comprende entre la superficie de incidencia y el plano que contiene al filo y a la velocidad de corte.

Ángulo de desprendimiento γ : formado por la superficie de desprendimiento y plano normal a la velocidad de corte y que contiene al filo.

Si es muy pequeño, el contacto con la pieza aumenta, produciéndose un roce excesivo, aumento de temperatura y desgaste. Si es demasiado grande se debilita el filo.

Si el material y la pieza son duros, las fuerzas son elevadas y la herramienta frágil luego habrá que trabajar con herramientas de ángulo menor. Con materiales dúctiles y herramientas de acero rápido (baja dureza), se usan ángulos de incidencia mayores.

Un ángulo de desprendimiento grande hace que la herramienta penetre y corte bien, dando mejor acabado superficial, pero debilita el filo. Si es pequeño favorece la resistencia de la herramienta, pero la energía consumida y el calentamiento aumentan. El ángulo de desprendimiento será el mayor que la herramienta pueda soportar sin romperse. Su elección también viene determinada por el avance, con un avance elevado γ y α deben reducirse para obtener un filo más robusto, ya que espesor de la viruta y fuerzas aumentan.

Si el material de la herramienta es poco resistente, se emplearán ángulos de desprendimiento pequeños ya que las fuerzas actúan en una zona que se aleja del filo según disminuye γ .

Si el material a mecanizar es duro, mayor fuerza de corte y sección de herramienta para resistirla, con lo que disminuye γ .

Así, se conocen como herramientas de geometría positiva aquellas cuyo ángulo de desprendimiento es mayor que cero (acero rápido...) y herramientas de geometría negativa las que el ángulo de desprendimiento es menor que cero (metal duro...)

HERRAMIENTA						
	Acero rápido (HSS)			Metal duro (HM)		
MATERIAL	α_n	β_n	γ_n	α_n	β_n	γ_n
Acero HB<175	8	67	15	6	74	10
Acero 175<HB<250	8	74	8	5	77	8
Acero HB>250	6	84	0	5	79	6
Acero Inoxidable	8	67	15	5	82	3
Fundición HB<250	8	74	8	6	74	10
Fundición HB>250	6	84	0	5	82	3
Latón	10	70	10	6	78	6
Bronce	8	72	10	7	77	6
Cobre	10	50	30	8	67	15
Aluminio	10	45	35	9	66	15

Tabla 2.6: Valores recomendados para los ángulos de herramienta.

Para iguales materiales a mecanizar, γ y α serán más grandes para una herramienta destacada por tenacidad (acero rápido) que para una herramienta destacada por dureza (metal duro). Además, irán aumentando según el material a mecanizar sea más blando

Ángulo de filo o herramienta β : formado por las superficies de incidencia y desprendimiento.

Además de la velocidad de corte (V_c) o desplazamiento relativo de la herramienta respecto a la pieza, en el proceso de arranque de viruta intervienen otras dos velocidades, la velocidad de deformación o de cizallamiento (V_s), que es la velocidad de rotura de la viruta, y la velocidad de salida de la viruta (V_v):

$$V_s = V_c + V_v \quad (4)$$

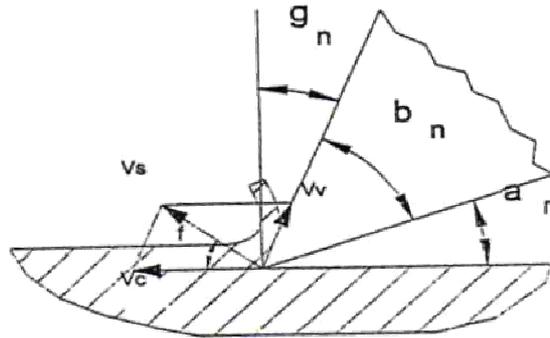


Fig 2.15: Velocidades en el corte ortogonal.

Ángulo de cizallado(ψ): Ángulo según el cual se corta el material para formar la viruta.

$$tg \psi = \frac{\cos \gamma}{Cr - \text{sen} \gamma} \quad (5)$$

Donde Cr es el factor de recalado.

Las fuerzas de reacción del material no actúan en el mismo filo, sino en una zona tanto más alejada de él cuanto más pequeño sea el ángulo de desprendimiento. Se tienen las siguientes fuerzas una vez comenzado el mecanizado:

- F_c = fuerza de corte, que nos permitirá conocer la potencia necesaria.
- F_d = fuerza de deslizamiento, permite calcular las tensiones cortantes en el plano donde se produce la viruta.
- F_r = fuerza de rozamiento entre viruta y herramienta.

$$R = F_c + N_c = F_d + N_d = F_r + N_r \quad (6)$$

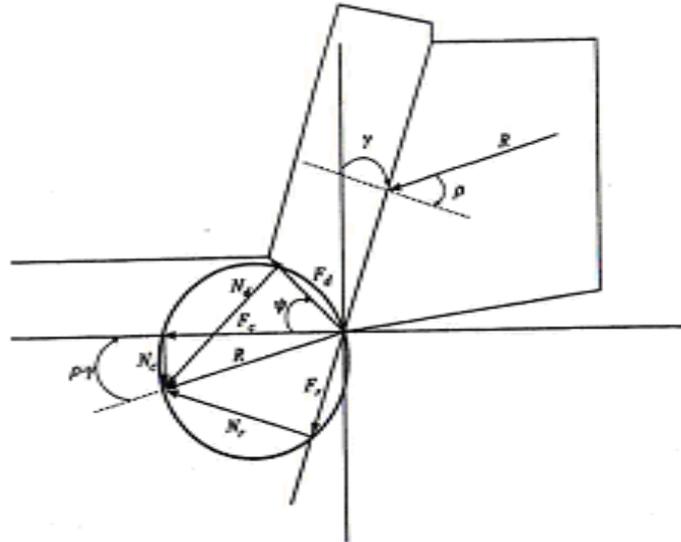


Fig 2.16: Fuerzas en el corte ortogonal

$$F_c = R \cos(\rho - \gamma) \quad (7)$$

$$N_c = R \operatorname{sen}(\rho - \gamma) \quad (8)$$

$$F_d = R \cos(\psi + \rho - \psi) \quad (9)$$

$$N_d = R \operatorname{sen}(\psi + \rho - \gamma) \quad (10)$$

$$F_r = R \operatorname{sen} \rho \quad (11)$$

$$N_r = R \cos \rho \quad (12)$$

De estas expresiones se puede obtener que el coeficiente de rozamiento entre viruta y herramienta viene dado por:

$$\mu = \frac{F_r}{N_r} \quad (13)$$

La zona de soldadura está formada por puntos de la superficie de la herramienta cercanos al filo, donde se producen las microsoldaduras. Se requiere una fuerza de rozamiento que produzca un cizallado entre las uniones soldadas:

$$F_r = \tau_R A \quad (14)$$

Donde τ_R es la tensión de cortadura.

Las microsoldaduras provocan un peor acabado superficial, además al cizallarse se provocan desgastes de cráter y si hay muchas, filo recrecido.

Los puntos más alejados de esta zona forman la zona de deslizamiento, donde no se producen soldaduras. Estas zonas son independientes del área de contacto.

$$Fr = \mu N \quad (15)$$

El arranque de viruta se produce por deformación, llegando a alcanzar en la viruta 1000°, calor causado por la deformación del metal (75%) y por la fricción entre viruta y herramienta (25%), y es el mayor enemigo de la duración de la herramienta. La generación de calor depende del espesor de la viruta.

La temperatura en el corte afecta al rendimiento de la herramienta y a la calidad de la pieza. Las mayores temperaturas se alcanzan en la superficie de desprendimiento, cercano al filo. Parte del calor generado se disipa a través del ambiente y fluido de corte. El resto del calor se disipa:

- Por la viruta (80%)
- Por la herramienta (15%), interesa que sea rápido.
- Por la pieza (5%), lo evacua bien al tener mucha masa.

El reparto entre estos tres medios de disipación depende de la velocidad de corte, al aumentarla disminuye el porcentaje evacuado por la pieza y herramienta y aumenta el calor evacuado por la viruta, hecho que se considera deseable. Para disminuir la temperatura de la herramienta se aumenta su sección o se refrigera adecuadamente. Esto último se consigue mediante los fluidos de corte, que son capaces de alargar la vida de las herramientas, y conseguir un mejor acabado dado que permiten aumentar la velocidad de corte.

El agua es el mejor refrigerante, pero no un buen lubricante. Si lo primordial es refrigerar, se usa agua con aceites solubles (emulsiones o taladrinas), y si interesa lubricar, aceites de corte. Importante factor es que el líquido sea abundante, continuo y vaya dirigido al punto de contacto herramienta-pieza-viruta.

Además, otras funciones de los fluidos de corte son eliminar las virutas y proteger a la pieza y máquina del óxido. Debe ser una emulsión estable y tener un buen control bacteriológico.

Tipos de aceites de corte: la selección dependerá del tipo de operación, condiciones, material... la clasificación regulada por la DIN 51385 y la ASTM D 2881 es la siguiente:

- Aceites de corte: aceites minerales, poco poder de refrigeración. Operaciones severas, con grandes caudales de viruta.
- Taladrinas de aceite solubles: emulsiones de agua y aceites minerales o vegetales. Aspecto lechoso, operaciones de mecanizado medio y ligero.
- Taladrinas semisintéticas: llevan inhibidores de oxidación, bactericidas...
- Taladrinas sintéticas: no incluyen aceite. Refrigeración y control de la corrosión.

El fluido de corte es un elemento que se debe evitar utilizar siempre que sea posible, por razones medioambientales, ya que es altamente contaminante. En la actualidad la tendencia a seguir es el mecanizado en seco.



2.3 Elementos finitos.

El método de elementos finitos se ha convertido en una solución para investigadores y científicos, basado en la discretización de un problema que limita su continuidad a un número determinado de elementos a estudiar, de ahí el nombre de elementos “finitos”.

El método se basa en elegir una unidad concreta y definida a partir de la cual crear un modelo que simule de una manera más o menos acertada el comportamiento de un material, un sistema o cualquier problema físico que se pueda discretizar. Dada la imposibilidad práctica de encontrar la solución analítica a problemas de transmisión de calor, mecánica de fluidos para calcular campos de velocidades y presiones o de campo electromagnético, con frecuencia en la práctica ingenieril de los métodos numéricos y, en particular, los elementos finitos, se convierten en la única alternativa práctica de cálculo.

A través de un ordenador, se resuelven sistemas de ecuaciones diferenciales (constitutivas y de evolución temporal) que el propio programa de elementos finitos asocia al problema que el usuario plantea, a través de parámetros que lo definen unívocamente. Al ser la capacidad de los ordenadores finita, los problemas continuos solo se pueden resolver de manera exacta mediante manipulaciones matemáticas que lo aproximen, lo cual se convierte en una decisión del investigador considerar lo aproximado de su modelo. El problema de modelos demasiado simplificados es que limita sus posibilidades.

El ordenador resuelve estas ecuaciones teniendo en cuenta las propiedades físicas de los materiales empleados, los elementos del entorno, las condiciones de contorno y las fuentes generadoras de campo. La resolución de estas ecuaciones de forma discreta se realiza de forma iterativa hasta que se alcanza convergencia en la solución. Esta convergencia es un factor extremadamente importante; si se consideran particiones de elementos finitos sucesivamente más finas, la solución numérica calculada converge rápidamente hacia la solución exacta del sistema de ecuaciones.

La principal ventaja de un sistema de elementos finitos frente a un prototipo es el ahorro económico y la simplicidad. Sin embargo, estas ventajas tienen un precio a pagar y no es otro que el grado de fiabilidad y fidelidad del modelo de elementos finitos con la realidad o los resultados experimentales que ya existan del proceso procedente de otros estudios. No deja de ser un método aproximado de cálculo debido a las hipótesis básicas del método.

Uno de los principales objetivos de los investigadores una vez que generan un modelo en elementos finitos, consiste en validarlo, esto es, realizar una serie de simulaciones que revelen la proximidad de los resultados con los experimentales. Desde que este método se empezó a utilizar, siempre se ha buscado por los diversos científicos encontrar una solución de compromiso en cuanto a su validación, ya que una vez conseguida una aproximación aceptable el resto de trabajo se simplifica enormemente.

Los prototipos, por lo tanto, siguen siendo necesarios, pero una buena modelización en elementos finitos nos puede acercar más a un modelo óptimo y teórico del fenómeno, con condiciones ideales de las que un prototipo puede no disponer.

El método como se ha dicho se basa en una discretización de un problema continuo mediante el uso de “nodos”, que son puntos representativos sobre los que el programa



trabaja para hallar la solución. El conjunto de nodos y las relaciones entre ellos constituyen los contornos de los elementos finitos, y estos a su vez generan una malla sobre la que se realizan los cálculos. Esta malla por tanto debe estar construida antes de ninguna simulación u obtención de resultados, en la etapa previa llamada de pre-proceso.

Sobre cada nodo, se establecen las relaciones con otros nodos mediante los grados de libertad, a partir de las ecuaciones diferenciales que se han comentado, que forman la matriz de rigidez del sistema y que dependiendo de su magnitud y dificultad el microprocesador tardará más o menos tiempo en resolver. Estas ecuaciones definirán de manera unívoca el campo de desplazamientos dentro de cada elemento finito en función de los desplazamientos nodales de dicho elemento. El estado de tensiones de cada elemento quedará definido en función de esos desplazamientos nodales.

En la práctica se dice que es un método aproximado debido a que la solución exacta solo se da en esos nodos que se han definido, siendo la solución en el resto de puntos una interpolación realizada a partir de los resultados de los nodos.

Las tareas necesarias para llevar a cabo un cálculo mediante un programa de elementos finitos consisten en:

Preproceso, que consta de las siguientes tareas:

- Definición de geometría mediante una herramienta CAD, en 2D o 3D.
- Generación de la malla
- Asignación de las condiciones de contorno. Las condiciones de contorno más típicas que se aplican en la frontera del problema suelen ser de temperatura constante (isoterma), superficies adiabáticas (flujo de calor nulo) o condiciones de simetría. Asimismo, en el caso de la frontera entre sólidos y entre sólidos y el ambiente, suele aplicarse alguna condición de contorno del tipo de conducción, y de convección o de convección y radiación respectivamente.
- Asignación de propiedades a los materiales que se han generado, tales como la conductividad térmica, la densidad y el calor específico. Las herramientas de elementos finitos suelen tener una base de datos de propiedades de materiales, de forma que la asignación de propiedades térmicas se realice de forma más cómoda.

Cálculo. Al tratarse generalmente de casos de un nivel mínimo de complejidad de problemas no-lineales o problemas dependientes del tiempo, el cálculo suele consistir en una sucesión finita de sistemas de N ecuaciones y N incógnitas que deben resolverse uno a continuación de otro, y cuya entrada depende del resultado del preproceso.

Postproceso. En el postproceso se calculan magnitudes derivadas de los valores obtenidos para los nodos en la fase de cálculo, y en ocasiones se realizan operaciones complementarias a partir de las soluciones como métodos de suavizado, interpolación o determinación de errores. Una vez obtenida la solución, es posible representar en esta fase gráficamente la distribución que se quiera tratar.

En el presente estudio se ha utilizado la herramienta de software ÁBAQUS. Se utiliza para simular la respuesta física de estructuras y cuerpos sólidos ante cargas, temperatura, contacto, impacto, y otras condiciones de borde y carga. El programa

realiza las tres tareas que se han expuesto básicas en la resolución de problemas de elementos finitos (preproceso, cálculo y postproceso) a través de varios módulos:

ÁBAQUS / CAE: Es en esta aplicación donde se define el problema, tal como puede ser el material, las condiciones de contorno, las condiciones iniciales y el mallado. El propio usuario introduce estos parámetros, mediante los módulos “part” (diseño de los elementos), “property” (propiedades de los materiales), “assembly” (contacto entre los elementos), “interaction” (interacciones entre las piezas), “load” (condiciones iniciales y de contorno), “mesh” (aplicación del mallado), “step” (selección de una serie de zonas donde poder visualizar los resultados) y “job” (creación de un caso y lanzarlo). Se genera el archivo de extensión “.cae”.

ABAQUS / Standard: módulo de cálculo, se realiza el análisis de elementos finitos. Incluye todas las capacidades de análisis excepto el análisis dinámico no lineal usando integración del tiempo explícita, tarea que realiza el módulo ABAQUS/Explicit.

ABAQUS / Explicit: Provee análisis dinámico, no lineal de sólidos y estructuras usando integración del tiempo explícita. Es poderoso por sus capacidades de contacto, confiabilidad, y eficiencia computacional en grandes modelos, también es altamente efectivo para aplicaciones cuasi-estáticas que involucran comportamiento discontinuo no lineal.

ÁBAQUS / Post: se trata de un postprocesador que muestra la configuración de la geometría deformada tras la simulación, gráficos de contorno y evolución con el tiempo, así como la animación de los resultados. Genera un archivo de extensión “.odb” donde se almacenan todos estos resultados de la simulación y que es el fruto de todo el tiempo de cálculo.

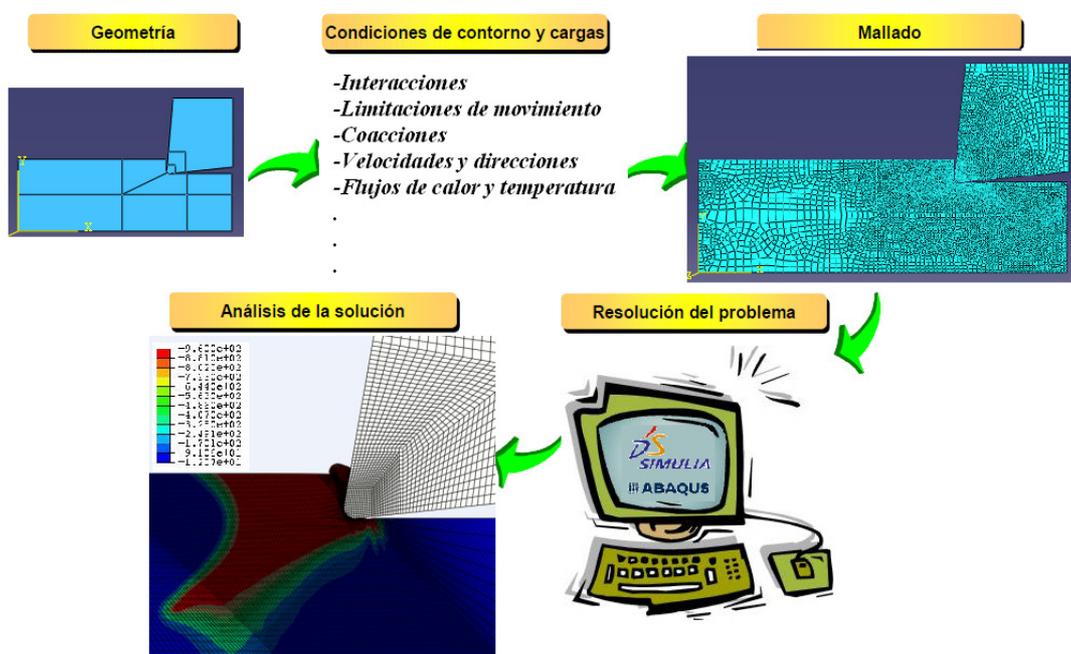


Fig 2.17: Proceso de obtención de los resultados mediante análisis por elementos finitos.

Capítulo III

3 ESTUDIOS EXPERIMENTALES

En este tercer capítulo se ha realizado un análisis de la documentación existente relativa al mecanizado de los materiales compuestos, en particular de la fibra de vidrio. Se presentan un buen número de resultados experimentales con los que posteriormente se ha podido realizar la validación del modelo de elementos finitos propuesto en este proyecto, además de los principales fenómenos observados en estos estudios durante el mecanizado.

También se exponen algunos modelos validados de la bibliografía con el objeto de mostrar el diseño y la evolución de los mismos (aportando ideas para trabajos futuros) y las dificultades encontradas para conseguir su validación.

3.1 [1] (Takeyama y Iijima, 1988)

Uno de los primeros informes que trata sobre los materiales compuestos investigó el deterioro de la superficie mecanizada durante el corte ortogonal de los compuestos de fibra de vidrio (UD-GFRP). El daño se determinó mediante una fotografía ampliada de la vista de perfil del plano de corte. Éste se comprobó que era máximo para orientaciones de fibra positivas y en el rango de 30 a 60°, mientras que el daño se consideró insignificante para orientaciones de fibra negativas.

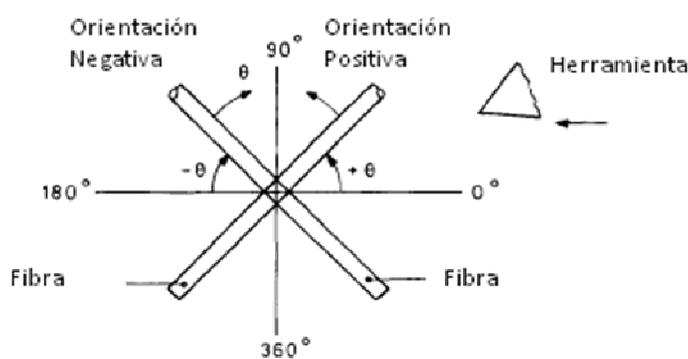


Fig 3.1: Nomenclatura para las orientaciones de fibra.

3.2 [2] (Bhatnagar et al., 1994)

Bhatnagar y otros investigadores realizan un estudio donde se profundiza algo más en el estudio de las orientaciones de fibra para el mecanizado de la fibra de carbono. En el caso de orientaciones positivas, por encima de 10°, experimentan que las fibras doblan en la parte inferior del borde de la herramienta, se levantan hacia arriba por la acción de la fuerza de corte y las fibras que sobresalen del plano de corte no se cortan. Por tanto la viruta se forma con mucha dificultad. La superficie de mecanizado se llena de fibras que no se cortan. En este caso, las grietas internas se propagan de manera profunda en la pieza.

En el caso de disponer de una orientación negativa de las fibras, observan que el corte superficial es limpio, se produce una superficie relativamente lisa y las grietas no son visibles en la superficie. La viruta se abre camino a lo largo de la dirección de la fibra y su formación es inmediata, produciéndose durante el corte ortogonal un sonido de fractura proveniente de las fibras y pequeños fragmentos de viruta saliendo despedidos de la zona de corte. El plano de propagación del daño para orientaciones negativas se produce también en la dirección de la orientación de fibra.

Por el contrario, para orientaciones positivas este sonido de corte no se producía durante el experimento, ya que la fibra no se corta, y la viruta permanece adherida a la superficie.

Se obtienen en el estudio dos conclusiones para el corte con orientación negativa:

- Las fibras rompen por tensión.
- La viruta se forma por delante de la herramienta en un plano que contiene a la orientación de las fibras.

Los resultados experimentales que se obtuvieron en el estudio fueron los siguientes: en cuanto a las fuerzas de corte, éstas son mayores para orientaciones de fibra negativa que para sus correspondientes orientaciones positivas, produciéndose un mínimo de 0 a 30°, como nos muestran en la Fig 3.2 .

Los resultados de la fuerza de avance para las orientaciones de fibra negativas fueron superiores que en el caso de las positivas.

Obtienen la conclusión de que las fuerzas totales (corte + avance) son muy superiores para la orientación negativa de las fibras que para la positiva, produciéndose un máximo en el rango de -30 a -60°. Las mínimas se encuentran para el mismo rango pero en orientación positiva. La conclusión es que existe prácticamente un 100% de aumento en la fuerza total cuando la orientación de fibra es invertida de positiva a negativa.

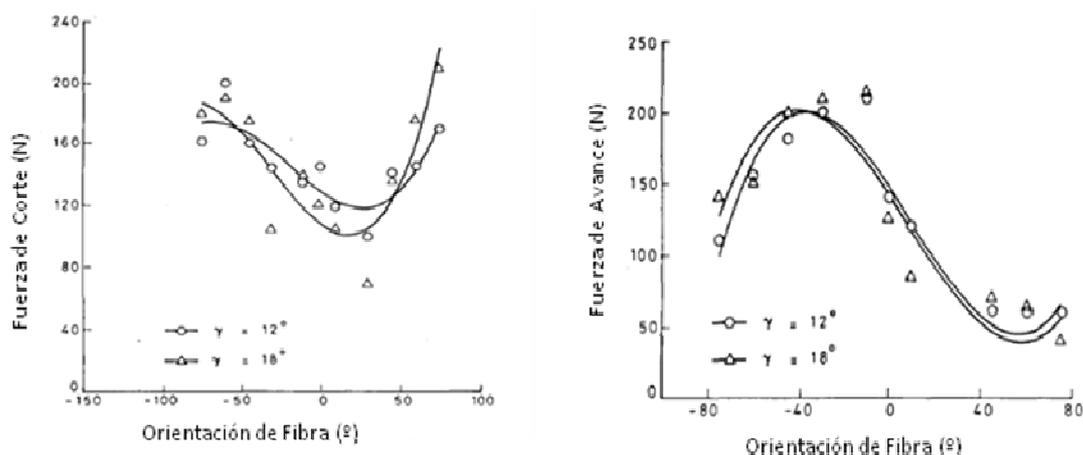


Fig 3.2: Variación de la fuerza de corte y la fuerza de avance con la orientación de la fibra y el ángulo de desprendimiento de la herramienta.

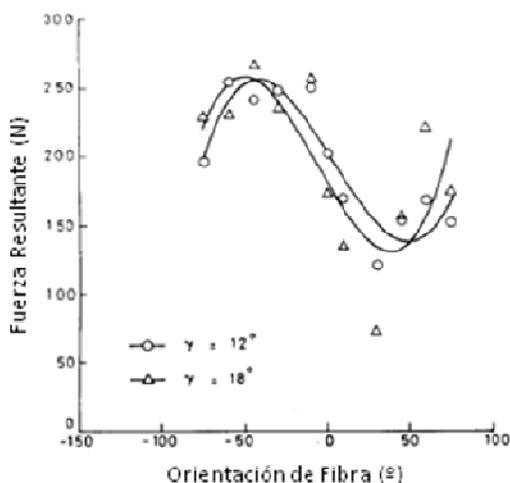


Fig 3.3: Variación de la fuerza total con la orientación de la fibra y el ángulo de desprendimiento de la herramienta.

Para la orientación de fibra positiva, las fibras experimentan compresión y flexión y rompen en su mayoría por la acción de corte al paso de la herramienta. En el caso de la orientación de fibra negativa, las fibras experimentan flexión al estar orientadas en la dirección de corte y acaban rompiendo por tensión. Estos autores atribuyen la diferencia de magnitudes entre las fuerzas de corte entre orientaciones negativas y positivas de fibra al modo de corte en cada caso. La resistencia al esfuerzo cortante de las fibras es del 20 o 30 % de su resistencia a tracción, por tanto al mecanizar con orientaciones positivas de fibra, la fuerza a emplear es menor.

Establecen las siguientes hipótesis para la orientación negativa de las fibras:

- Propagación de las grietas (plano de corte) a lo largo de la dirección de la fibra (mientras que la propagación para orientaciones positivas es difícil de predecir y requiere un estudio laborioso)
- La fuerza de corte dependerá de la resistencia al corte de la respectiva orientación de fibra.
- El efecto de la temperatura es despreciable.
- El coeficiente de fricción entre la herramienta y la viruta varía para cada orientación de fibra, el conocimiento de su valor correcto es de vital importancia para el análisis de cada caso.
- La formación de la viruta se realiza de tal manera que busca minimizar la energía de corte.
- El ángulo del plano de corte en la matriz es independiente del ángulo de desprendimiento de la herramienta.

3.3 [3] (Wang et al., 1995)

El siguiente artículo del que se comentan sus resultados trata también sobre la fibra de carbono.

Observaron que la formación de viruta continua se producía para orientación de fibra igual a 0° , ya que la propagación de la viruta tomaba camino a lo largo de la dirección longitudinal de la fibra. Para el resto de orientaciones, la viruta era discontinua, por

encima de -15° la fibra rompe por flexión (tracción), y a partir de -75° grados se someten a esfuerzos cortantes transversalmente y a compresión.

La dimensión total de la viruta disminuyó a partir de -45° de orientación de fibra y confirmaron que la geometría de la herramienta tiene una influencia mucho más limitada.

Un aporte importante es el estudio de la forma de la fuerza de corte y avance con el tiempo, que está muy relacionado con la formación de la viruta. A 0° fueron observadas grandes fluctuaciones en la fuerza de corte debido al inicio y propagación de la viruta, y posterior separación y reinicio del ciclo. Por encima de -75° , estas fluctuaciones se suavizaron debido a la dificultad de generar la viruta y la disminución de su tamaño.

Ángulos mayores de desprendimiento mejoraban la calidad superficial.

3.4 [4] (Arola, et al, 1997)

En el informe de Arola se generan un modelo de elementos finitos en ABAQUS basando en dos distintos criterios de fallo: el criterio de máxima tensión y el de Tsai-Hill;

Máxima tensión $\sigma_{ij} = |\sigma_{ij(crit)}|$ (16)

Tsai-Hill $\left(\frac{\sigma_{11}}{X}\right)^2 - \frac{\sigma_1\sigma_2}{X^2} + \left(\frac{\sigma_{22}}{Y}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 \geq 1$ (17)

Donde σ representa el modulo de elasticidad del material y X, Y y S los parámetros de resistencia.

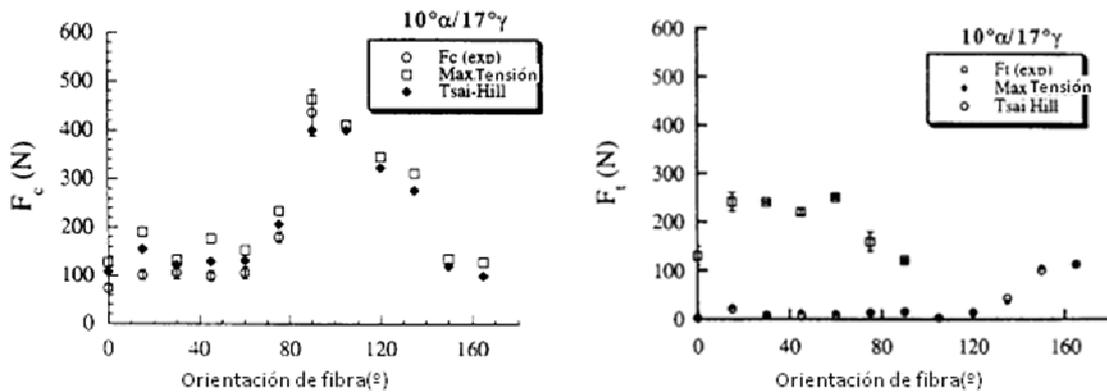


Fig 3.4: Fuerza de corte (izquierda) y fuerza de avance (derecha). Comparación de resultados experimentales con los modelos construidos con criterio de máxima tensión y de Tsai-Hill.

Como conclusión al modelado se comenta que los dos modelos reproducen bien las fuerzas de corte y que el modelo de Tsai-Hill reproduce mejor las fuerzas de avance que el de máxima tensión. Sin embargo, para reproducir la separación de la viruta en el plano de corte es preferible modelar con el criterio de máxima tensión con los valores apropiados de resistencia a tensión.



Se comenta que la geometría de la herramienta tuvo una limitada influencia en la dimensión de la viruta y el mecanismo de formación de la misma, sin embargo también se mencionó que la naturaleza de la fractura puede variar con la geometría de la herramienta, luego se trata de una contradicción que los siguientes investigadores tratan de aclarar con estudios del ángulo de desprendimiento y radio de punta de la herramienta.

3.5 [5] (Inoue y Yugue, 1999)

El estudio presenta una investigación sobre la calidad superficial y el daño interno, esta vez detallado para el corte ortogonal de compuestos de fibra de vidrio con varias orientaciones de fibra. Mediante una luz blanca iluminando la superficie mecanizada, que quedaba reflejada o transmitida, y una fotografía microscópica de la zona dañada, fueron determinados los daños, quedando oscurecidas las partes donde las fibras estaban rotas y donde la interfase fibra- matriz había sido modificada y la luz no podía atravesarla.

De acorde con los estudios anteriores, el daño más severo fue observado para la orientación de fibra positiva, especialmente de 30 a 45°. Fue recomendado de nuevo un mecanizado con orientaciones de fibra negativas, observando un daño insignificante para este caso.

Se documentaron tres modos distintos de daño; dislocación de la interfase fibra-matriz para las orientaciones positivas de las fibras, corte limpio de las fibras para orientaciones negativas de las fibras, y ruptura por flexión de la fibra para orientaciones negativas muy bajas de la fibra, entre 0 y -15°.

3.6 [6] (Wang y Zang, 2003)

Wang y Zang divulgaron un estudio para el corte ortogonal de la fibra de carbono. Corroboran este daño interno para orientaciones de fibra positivas, especialmente de 30 a 60°. Sin embargo afirman que la orientación de la fibra y la profundidad de corte no tienen apenas influencia en el daño para orientaciones negativas de la fibra, y es un dato que va a ser contradicho y objeto de motivación en posteriores estudios.

La propuesta es estudiar la maquinabilidad de los compuestos de époxi reforzados con fibra de carbono, a fin de determinar los cambios en la rugosidad superficial y las fuerzas de corte con la orientación de las fibras. Se hace otro estudio con otras condiciones de corte para analizar el curado de la pieza y efectos de temperatura, del que no se ha recogido ningún dato por no entrar dentro de nuestro campo de análisis.

Se realizan experimentos con las siguientes condiciones:

- Orientaciones de fibra: 0, -30, -60, -90, -120, -150 (°)
- Ángulo de desprendimiento: -20, 0, 20, 40 (°)
- Profundidad de corte: 0.001, 0.050, 0.100 (mm)

En cuanto a la rugosidad la Fig 3.5 indican que existe un umbral de orientación de fibra, -90 °, más allá del cual la rugosidad de la superficie varía notablemente, aumentando y



luego disminuyendo cuando llega a 120°. Esto ocurre cuando la profundidad de corte es menor que el ancho de la fibra (de 7 a 9 μm). Es coherente con los estudios anteriores, que detectaban una calidad superficial mala para orientaciones de fibra positivas. Se puede ver además que excepto para -120°, obtienen que la rugosidad es prácticamente independiente de la orientación de fibra y del ángulo de desprendimiento de la herramienta.

Cuando la profundidad de corte es mayor que el diámetro de fibra (por ejemplo 50 μm) observan que no existe la disminución final de la rugosidad. Sin embargo, las figuras muestran que -90° es un ángulo crítico a ambas profundidades, por debajo del cual los efectos de la orientación de las fibras son nulos ya que la rugosidad de la superficie está en el rango de 1 μm a 1,5 μm.

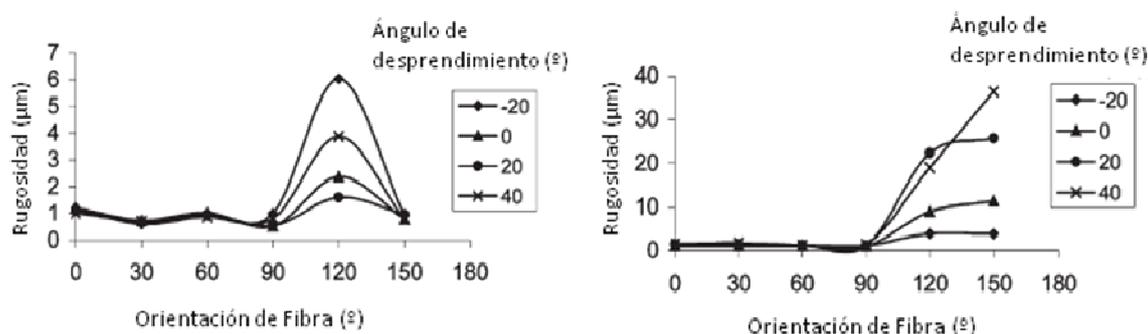


Fig 3.5: Variación de la rugosidad para distintas orientaciones de fibra y ángulo de desprendimiento a 0,001 mm (izquierda) y 0,050 mm (derecha) de profundidad de corte.

La explicación para este fenómeno es similar a la ofrecida en el estudio [2] (Bhatnagar et al., 1994), pero un poco más detallada. Hay que tener en cuenta que han tomado el sentido de la Fig 3.1 como referencia para la orientación de fibra, y dividen la fuerza de corte en una componente perpendicular a la dirección de la fibra (F1) y otra paralela (F2)

Para las orientaciones menores que -90°, caso más favorable, independientemente de la profundidad de corte, experimentan que la fibra es soportada por el resto del material antes de que se introduzca la herramienta, y por tanto en ese momento la flexión es mínima. Mientras tanto, la componente de la fuerza a lo largo del eje de la fibra (F2) crea una tensión de tracción que hace que las fibras puedan romper en las cercanías de la zona de corte, debido a su fragilidad. Como resultado, la rugosidad superficial y los daños bajo la superficie son pequeños.

Cuando la orientación es -90°, la situación se vuelve más complicada. Si la profundidad de corte es menor que $d \sin(\theta - 90^\circ)$ (18) donde d es el diámetro de las fibras, la fibra es sometida a una compresión axial. En este caso, es poco probable que rompa. Así, al no romper, la superficie mecanizada normalmente tiene muchas fibras que sobresalen lo que se convierte en rugosidad superficial.

Si la profundidad de corte es mayor que $d \sin(\theta - 90^\circ)$, la herramienta ejerce un conjunto diferente de fuerzas. La fuerza F1 perpendicular al eje de la fibra se orienta hacia el exterior de la pieza y por lo tanto, la fibra consigue un débil apoyo del material, llevando a una más severa flexión de la fibra y a despegarse de la matriz. Esto, a su vez, provoca un acabado de superficie más rugosa y daño más profundo. Hay que tener en

cuenta que el experimento se realiza con fibra de carbono, que es un material frágil. En el caso de la fibra de vidrio, estas grietas no serían tan profundas ya que el mecanismo predominante a altas orientaciones es la compresión de las fibras.

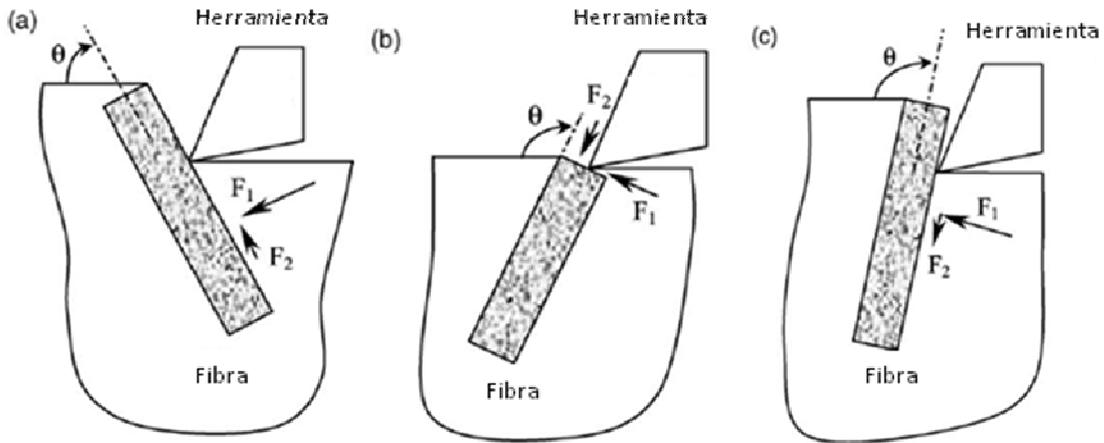


Fig 3.6: Modelo de mecanizado con una sola fibra con distintas orientaciones. Fuerzas.

Se pretende demostrar con el experimento la variación de las fuerzas con el ángulo de desprendimiento, la orientación de la fibra y la profundidad de corte.

Encuentran que el efecto de ángulo de desprendimiento no es tan significativo si se compara con la influencia de las otras dos variables. Para una pequeña profundidad de corte (por ejemplo, 1 μm), un ángulo de incidencia entre 0 $^\circ$ y 20 $^\circ$ da lugar a las pequeñas fuerzas de corte (Fig 3.7). En una mayor profundidad de corte (por ejemplo, 50 μm), observan que la fuerza horizontal disminuye ligeramente a medida que aumenta el ángulo de desprendimiento, excepto en los casos con fibra de orientación -120 $^\circ$ y -150 $^\circ$ (Fig 3.8).

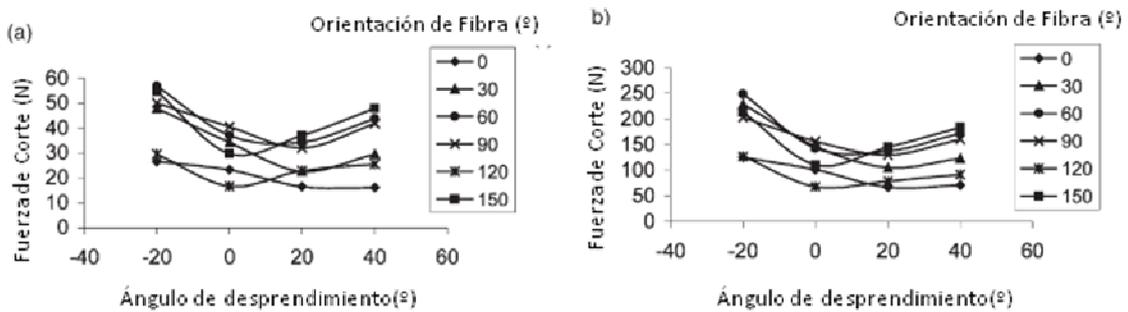


Fig 3.7: Efecto del ángulo de desprendimiento para la componente horizontal (a) y componente vertical (b) de la fuerza de corte (profundidad de corte 0,001 mm)

ANÁLISIS PARAMÉTRICO DEL CORTE ORTOGONAL DE MATERIALES COMPUESTOS MEDIANTE MODELIZACIÓN NUMÉRICA

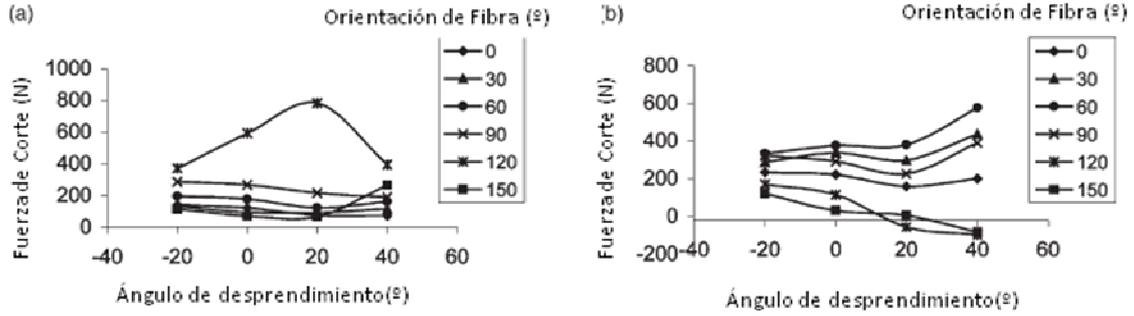


Fig 3.8: Efecto del ángulo de desprendimiento para la componente horizontal (a) y componente vertical (b) de la fuerza de corte (profundidad de corte 0,050 mm)

Un fenómeno interesante que recogen es que las fuerzas verticales en las orientaciones de fibra de -120 y -150 ° disminuyen con el incremento de ángulo de desprendimiento. Con una mayor orientación de las fibras, un ángulo de ataque grande y una mayor profundidad de corte, el material tira de la herramienta y por lo tanto, la fuerza vertical pasa a ser negativa, por lo que la fuerza horizontal disminuye su valor, como se puede ver en la Fig 3.9 y Fig 3.10. Cuando esto sucede disminuye la calidad de la pieza mecanizada aumentando la rugosidad y el daño.

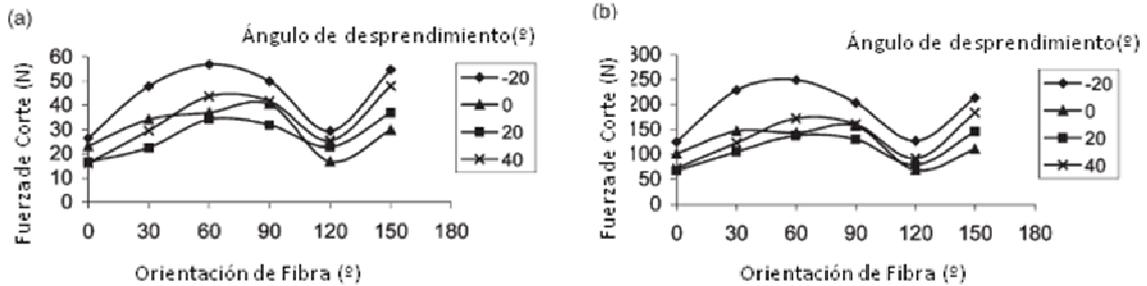


Fig 3.9: Efecto de la orientación de fibra para la para la componente horizontal (a) y componente vertical (b) de la fuerza de corte (profundidad de corte 0,001 mm)

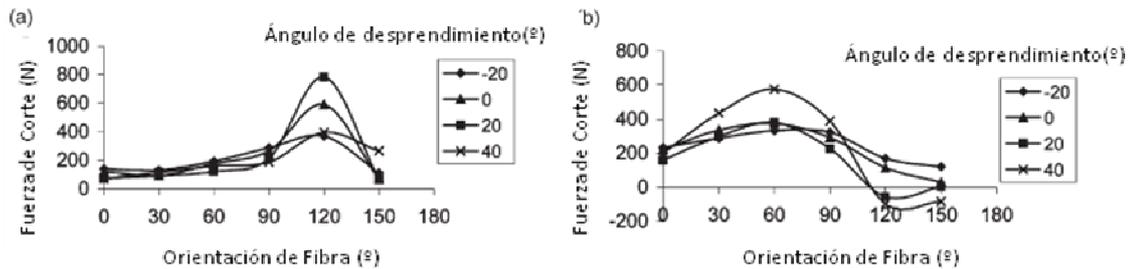


Fig 3.10: Efecto de la orientación de fibra para la para la componente horizontal (a) y componente vertical (b) de la fuerza de corte (profundidad de corte 0,050 mm)

En el artículo tratan el fenómeno conocido como “bouncing back” que se puede traducir como “rebote” o “recuperación”. Trata de la recuperación elástica debajo de la superficie mecanizada una vez la herramienta ha pasado por encima. Debido a esta recuperación la fuerza de corte experimenta un aumento proporcional al espesor de material que se recupera tras el paso de la herramienta. Por tanto este efecto es clave en la contribución a la generación de fuerzas. Un estudio demostró que cuando la orientación de la fibra era menor que -90° , la magnitud de recuperación estaba en torno al radio de punta de la herramienta, mientras que cuando era mayor que -90° , puede ser hasta más del doble.

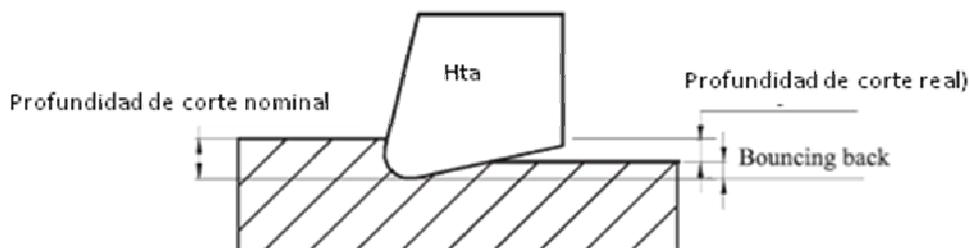


Fig 3.11: Efecto “bouncing back”

En cuanto a la profundidad de corte, observan que una menor profundidad genera menos daño. A mayor profundidad de corte (por ejemplo, $50\ \mu\text{m}$ y $100\ \mu\text{m}$), los daños se vuelven más graves cuando la orientación de la fibra está comprendida entre -120° y -150° . Esto explica por qué la rugosidad en la superficie en estas condiciones de corte también es alta.

Es interesante tener en cuenta que, en diferentes profundidades de corte, por ejemplo, $50\ \mu\text{m}$ y $100\ \mu\text{m}$, experimentan un daño similar, si la orientación de fibra y el ángulo de desprendimiento son los mismos. Esto parece indicar que la profundidad de corte no juega un papel importante en la generación de daño.

Como conclusión se indica en el artículo que con una fibra de orientación por debajo de -90° , la orientación de fibra, profundidad de corte y ángulo de desprendimiento no tienen una influencia excesiva en la superficie mecanizada. Esta afirmación va a suponer el punto de motivación para el artículo siguiente en el que consideran que la influencia de esos parámetros a orientaciones negativas no debe ser despreciada.

3.7 [7](Bhatnagar et al.,2004)

En primer lugar realizan un trabajo experimental en una máquina herramienta de corte ortogonal. Se lleva a cabo en fibra de vidrio con diferente orientación negativa de las fibras. Los efectos se visualizan por medio de un colorante no destructivo penetrante.

Posteriormente realizan un modelo de elementos finitos para validarlo con los resultados experimentales, con las siguientes características:

- Combinación de elemento cuadrilateral CPS4 y triangular CPS3
- Tamaño del elemento típico en las inmediaciones de trabajo de 0,05 x 0,05 mm
- Herramienta con radio de borde de 0,05 mm y ángulo de desprendimiento de 5°.
- Corte ortogonal
- Tres profundidades de corte (0,1, 0,2 y 0,3 mm).

Dos diferentes criterios de fallo son tomados para el modelo de elementos finitos. Uno para la deformación del elemento a lo largo del plano de corte (criterio de tensión crítica) y otro para utilizar por delante del elemento deformado para la formación de la viruta (criterio de Tsai-Hill).

La tensión desarrollada en el elemento una vez que la herramienta toca la pieza es comparada con una tensión crítica en el primero de los dos modos de fallo. La separación del elemento situado en frente de la herramienta de las superficies que le rodean es considerada cuando su tensión supera un determinado valor. Este valor viene dado por el factor de estrés siguiente:

$$f = \sqrt{\left[\left(\frac{\sigma_n}{\sigma_f} \right)^2 + \left(\frac{\tau_1}{\tau_1^f} \right)^2 \right]} \quad (19)$$

Donde σ_n es la tensión normal en el elemento cercano a la punta de la herramienta (N/mm^2), σ_f es la tensión normal en el plano de corte (N/mm^2), τ_1 es el esfuerzo cortante en el plano de corte (N/mm^2), y τ_2 es el esfuerzo cortante cercano a la punta de la herramienta (N/mm^2).

El elemento que alcanza el valor 1 o está dentro del rango de tolerancia (0,9-1,1), se puede decir que ha alcanzado el nivel crítico de tensión.

Este elemento deformado y separado tiende a salir hacia fuera del material bajo la presión de la herramienta. El criterio de fallo de Tsai-Hill se utiliza como criterio de rotura del material. Esto significa que la región para la cual el valor de Tsai- Hill supera la unidad ha fallado. Se expresa de la siguiente manera:

$$\left(\frac{\sigma_1}{X} \right)^2 - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{X^2} + \left(\frac{\sigma_2}{Y} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S} \right)^2 \geq 1 \quad (20)$$

Donde σ_1 es la tensión en una de las dos direcciones principales del material (x), σ_2 es la tensión en la otra dirección principal del material (y), τ_{12} es la tensión en el plano de corte, X es el parámetro de resistencia en la dirección x, Y el parámetro de resistencia en la dirección y, y S el parámetro de resistencia en el plano x-y.

El contorno de Tsai-Hill va a indicar en el modelo qué zonas están dañadas, marcando con un contorno aquellas zonas donde la expresión de Tsai-Hill es igual a la unidad. Recoge el daño tanto en tracción como en compresión, dependiendo de la naturaleza de la tensión aplicada sobre el material, siempre en un análisis de 2D.

La formación de viruta tiene lugar cuando en el contorno de Tsai- Hill dos elementos consecutivos superan el nivel crítico de tensión.

Un aspecto interesante que se comenta, es que el contorno de Tsai-Hill se extiende a lo largo de la dirección de cada orientación de fibra, lo que da una clara indicación de los daños y su propagación simplemente con conocer cual va a ser esta orientación en el material que se disponga. Esto es un indicador de que el daño es producido en su mayor parte por la separación de la interfase fibra-matriz.

Tanto en los experimentos como en las simulaciones, observan que el daño tiene un mínimo generalmente para una orientación de fibra entre -15 y -30° , e incrementa su valor en ambas direcciones a partir de esos valores. Hasta -60° el daño crece lentamente y para orientaciones de -70 y -90° crece de manera exponencial.

La fuerza de corte y fuerza de avance también presenta valores mínimos para esas orientaciones de fibra.

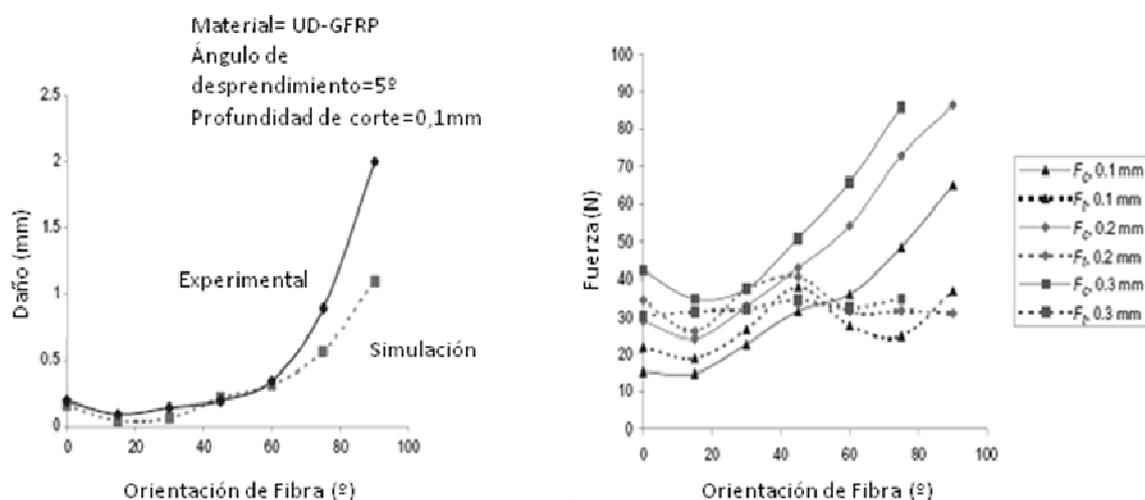


Fig 3.12: Comparación daño del modelo con el caso experimental. Fuerzas para distintas orientaciones de fibra.

En cuanto a la comparación entre su experimento y su modelo de elementos finitos, el daño para cada orientación de fibra es prácticamente el mismo cuando la profundidad de corte es de 0,1mm, aumentándose la diferencia de manera constante a medida que la profundidad de corte del experimento es mayor (0,2 y 0,3mm). En cualquier caso aunque los valores simulados de los daños son siempre inferiores a los los valores observados experimentalmente, la tendencia es la misma en el modelo y en el experimento, obteniendo buenos resultados numéricos hasta -60° en los casos de 0,2 y 0,3 mm de profundidad, orientación a partir de la cual la diferencia se acentúa.

Las razones que dan Bhatnagar y el resto de investigadores acerca de estas diferencias es que la simulación considera que el material modelado está carente de cualquier tensión residual y defectos internos, no teniendo en cuenta posibles defectos como bolsas de aire, microfisuras, etc., que siempre están presentes aun en los mejores materiales. Además el material ha sido considerado en la simulación como anisótropo pero homogéneo, luego no hay cambio de rigidez entre fibra y matriz a lo largo de la

dirección de corte en la simulación. Otro motivo de la desviación propuesto es la falta de exactitud de los parámetros (ángulo de desprendimiento, orientación de fibra...) en un experimento.

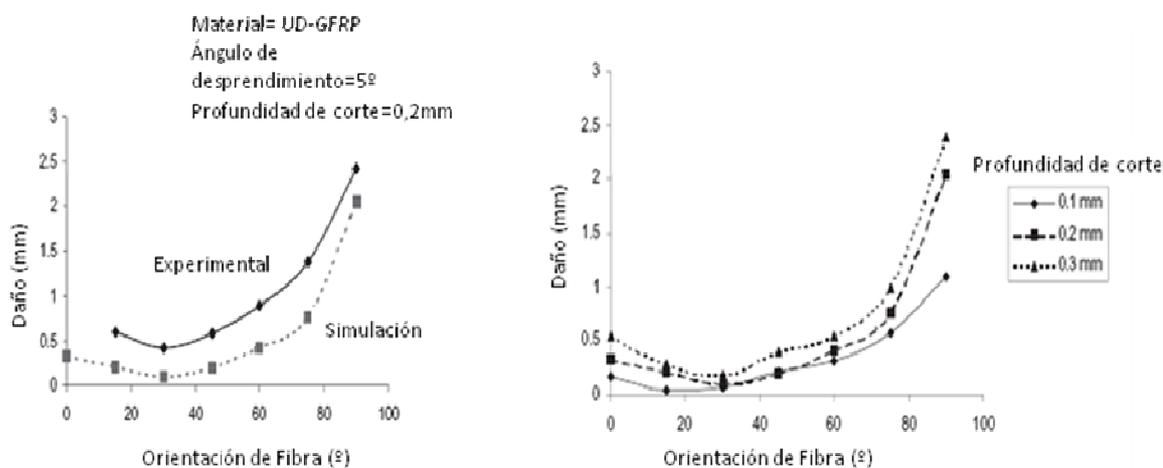


Fig 3.13: Comparación daño para modelo y caso experimental (izquierda). Comparación de daños experimentales para distintas profundidades de corte (derecha).

3.8 [8] (R.Zitoune et al., 2004)

En la siguiente investigación, se realiza el análisis experimental del corte ortogonal aplicado a la fibra de carbono para varios ángulos comprendidos entre la dirección de la fibra y la dirección de corte de la herramienta. En la segunda parte del estudio se realiza un modelado numérico de corte ortogonal para el caso de fibras orientadas a 0° con respecto a la dirección de corte de la herramienta mediante el programa de elementos finitos SAMCEF.

Aunque se trata de fibra de carbono y no de vidrio, el estudio que realizan es interesante en el sentido de observar qué orientaciones de fibra son más favorables y cuales menos a la hora de mecanizar el material compuesto, sin entrar en datos concretos de daño o fuerzas, si no en la forma de la viruta y el mecanismo de ruptura.

Al tratarse de fibra de carbono, se produce una fractura frágil y no dúctil como en el caso del vidrio.

Al trabajar experimentalmente con una herramienta con ángulo de desprendimiento 0°, fue observado que el modo dominante de la ruptura se producía por compresión.

En el caso de orientación de fibra 0°, al avanzar la herramienta se crea una abertura que se propaga en forma de grieta, y se crea una viruta de un grueso similar a la profundidad de corte. A mayor profundidad de corte, mayor es la abertura. Comentan que es similar al fenómeno de flexión de una viga, cargada a compresión debido al avance de la herramienta. La rotura se produce por tanto por compresión de las fibras, que no pueden permanecer más tiempo sujetas a la matriz. Al aumentar la grieta en la interfase matriz-fibra una longitud crítica, la “viga” se rompe y la grieta deja de propagar (fractura frágil), formándose una viruta. Esto se produce de una manera cíclica hasta el final del mecanizado. La forma en que la fibra de vidrio rompe en este mismo caso de

orientación de fibra es muy similar, con la diferencia de que al ser un material dúctil la viruta formada es de mayor longitud al propagarse más tiempo la grieta.

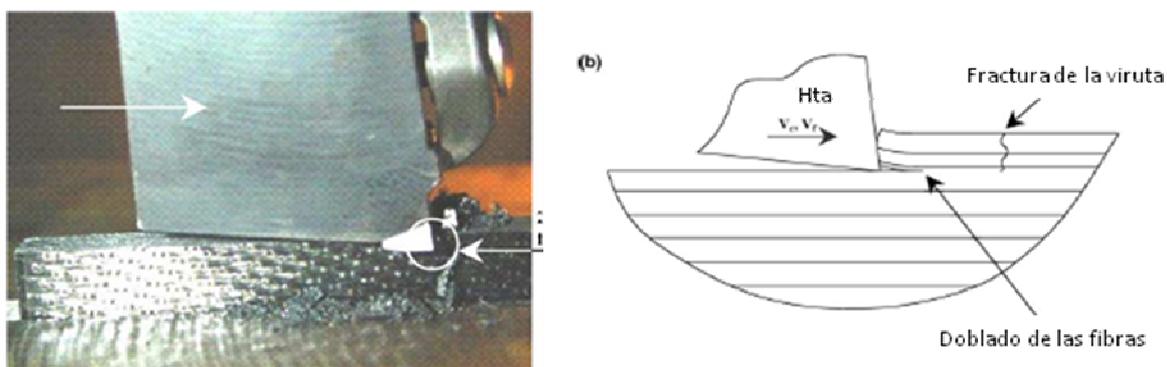


Fig 3.14: Formación de la viruta para orientación de fibra $=0^\circ$ y profundidad de corte 0,25mm.
Esquema del proceso

En el caso de realizar el experimento con una orientación de fibras igual a 90° , además de la compresión las fibras soportan un efecto de flexión en la dirección de la velocidad de corte. El esfuerzo de compresión aumenta con el desplazamiento de la herramienta, y la matriz, de comportamiento frágil, se agrieta y falla en la interfase fibra-matriz. Con una profundidad de corte baja, las fibras se doblan levemente con lo que se obtiene viruta muy fina. Una profundidad mayor (mayor de 0,3 mm) provoca grietas más profundas y que las fibras se rompan y la viruta se obtiene en forma de pequeñas agujas. Observaron que era el caso que requería la mayor fuerza a aplicar con la herramienta. La superficie mecanizada quedaba bastante deteriorada. La diferencia existente en este caso con la fibra de vidrio es que al ser un material dúctil, no se produce esa magnitud de grieta tan profunda y si se genera una mayor compresión de las fibras en la dirección de la velocidad de corte.

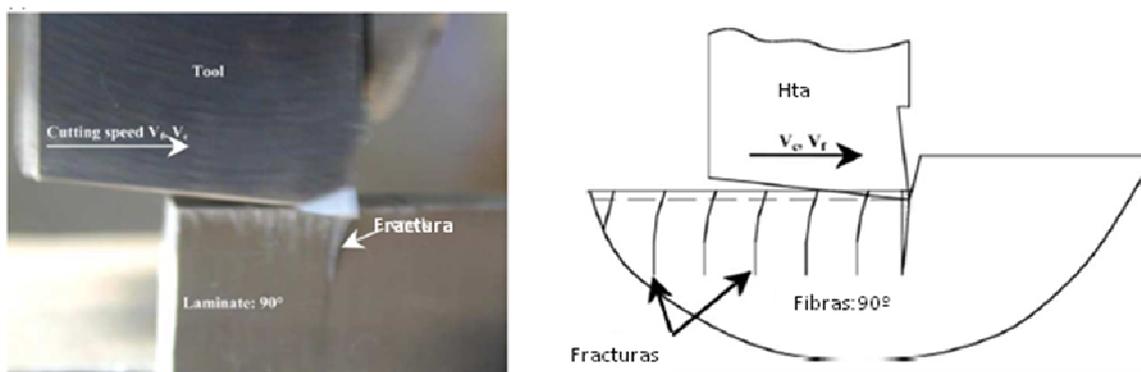


Fig 3.15: Formación de la viruta para orientación de fibra $=90^\circ$ y profundidad de corte 0,25mm.
Esquema del proceso

Con las fibras en una orientación de -45° , la viruta se forma por pura laminación, obteniendo una viruta continua para bajas profundidades de corte (hasta 0,07 mm) y una superficie limpia.

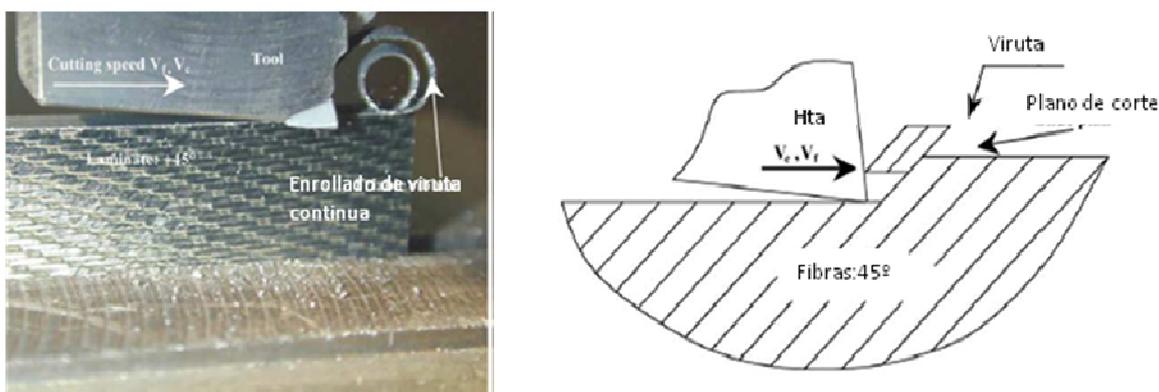


Fig 3.16: Formación de la viruta para orientación de fibra = -45° y profundidad de corte 0,125mm. Esquema del proceso

En el caso de mecanizado con orientación 45° , se puede ver en la Fig 3.17 como las grietas se propagan en la dirección de la fibra, ésta queda sin cortar y genera una superficie muy deteriorada.

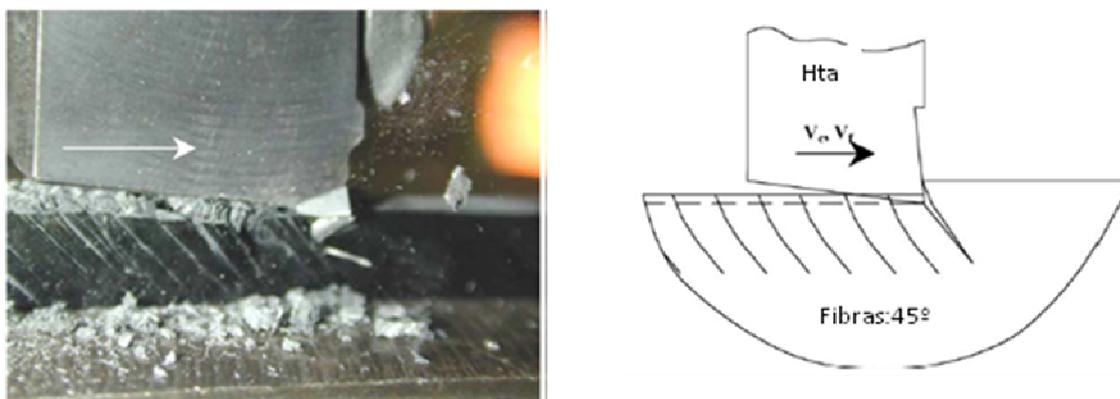


Fig 3.17: Formación de la viruta para orientación de fibra = 45° y profundidad de corte 0,25mm. Esquema del proceso.

La simulación numérica se realizó con fibras de orientación 0° y fue validada en cuanto a la formación de viruta. Por otra parte, demostraron que era posible trazar la evolución de la fuerza de corte variando los parámetros de profundidad del corte, ángulo de desprendimiento y orientación de fibra.

Además se comprueba una influencia mucho mayor del ángulo de desprendimiento de la herramienta en la fuerza de corte que el ángulo de incidencia.

No se han expuesto estas medidas de fuerzas ya que se trata de fibra de carbono que es un material frágil, pero si es reseñable como la disposición de las fibras también influye de la misma manera que en los compuestos de vidrio y como el caso más desfavorable en cuanto a la fuerza de corte es de nuevo el de orientación de fibra igual a 90° .

Diversos aspectos como el modo de fractura de la fibra y la formación de la viruta, la gama de ángulos de desprendimiento preferibles para cada caso, y la afirmación de Koplev [9] (Koplev et al., 1983), de que la fuerza de avance no está influida por la

profundidad de corte, sirven de motivación para los investigadores del siguiente artículo.

3.9 [10](Nayak et al.,2005)

Nayak y el resto de colaboradores de este artículo consideran que el efecto del radio de punta en el mecanizado de materiales compuestos no se ha investigado suficientemente hasta el momento, especialmente con respecto a la fuerza de avance, que puede eventualmente afectar al comportamiento de fricción.

El estudio experimental se realizó para atender los efectos de los ángulos de desprendimiento positivos de herramienta de hasta 40° con fibra de vidrio orientada de 0 a -90° . Son investigados en detalle los parámetros de formación de viruta, las fuerzas de corte y daños en la superficie.

Los experimentos se hacen en una fresadora de CNC modificada para la realización de corte ortogonal.

Observaron que la viruta que se generó fue generalmente de naturaleza discontinua. Aparentemente, en frente de la cara de la herramienta se formaba una viruta continua que realmente estaba compuesta por el apilamiento y compresión de muchas virutas discontinuas.

Las virutas observadas a -75 o -90° grados de orientación de fibra, con un ángulo de desprendimiento bajo, crecían en forma de fibras rotas a lo largo de la dirección de la fibra.

Una fotografía microscópica típica del bloque de la viruta se muestra en la Fig 3.18.

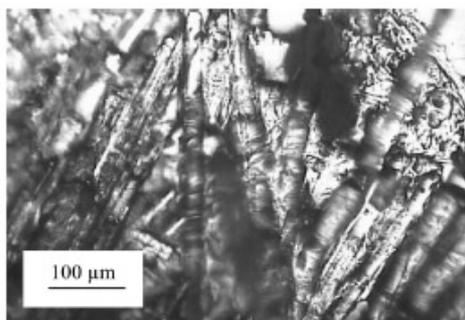


Fig 3.18: : Bloque de viruta con fibras visibles (orientación de fibra= -15° y ángulo de desprendimiento= 10°)

Se puede ver la fractura de las fibras, la mayoría a lo largo de su eje transversal. Nos indican que existe una disminución general del tamaño de la viruta y longitud de los trozos de fibra rota con la orientación creciente de la fibra. Las virutas y las fibras rotas son más largas para la orientación de la fibra de -15° con respecto al resto de orientaciones para las mismas condiciones.

Por otra parte observaron que la longitud de la fibra y el tamaño de la viruta decrecían rápidamente con la orientación creciente de la fibra y las virutas pequeñas y

discontinuas se obtenían para orientación de la fibra de -75 y de -90° . Comentan que puede ser debido al hecho que cuando el ángulo de desprendimiento positivo de la herramienta es bajo (10° en este caso) las fibras cortadas a ángulos de orientación grandes no tienen el suficiente espacio para resbalar y desplazarse por la cara de la herramienta después de ser separadas del material y acaban rompiéndose en diminutos trozos. Esto es mucho más predominante para la orientación de -75 y -90° y especialmente cuando el ángulo de desprendimiento positivo de la herramienta es bajo.

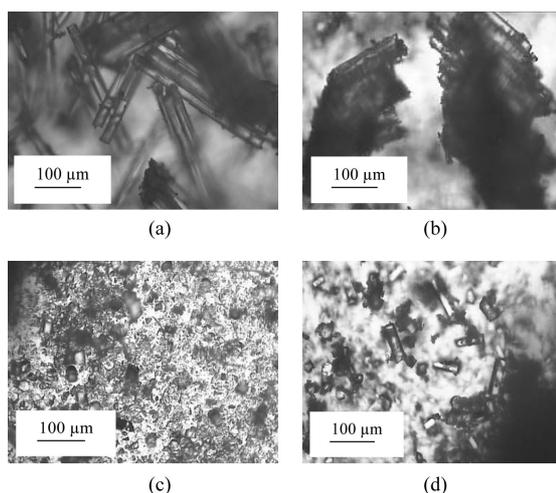


Fig 3.19: Viruta y fibras rotas para ángulo de desprendimiento = 10° ; a) fibra= -30° , b) fibra= -60° , c) fibra= -75° , d) fibra= -90°

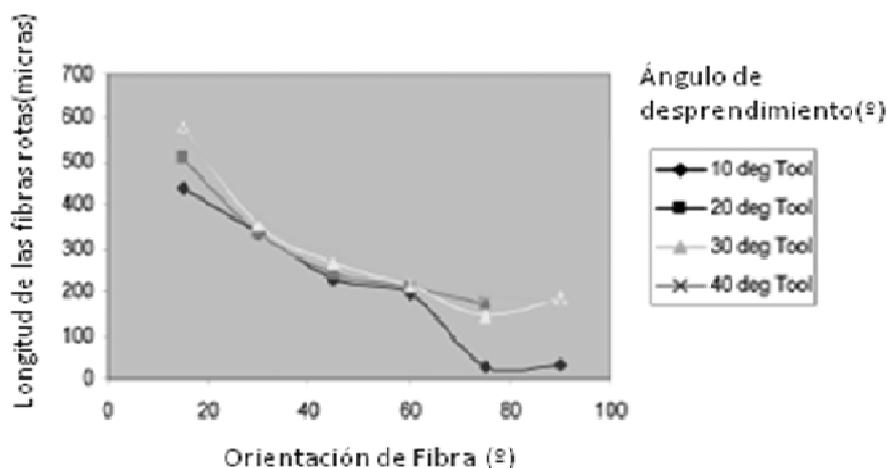


Fig 3.20: Longitud de la fibra rota respecto a la orientación de la fibra

En el primer bloque del artículo se analizan la influencia de los parámetros en las fuerzas.

Como análisis de la fuerza de corte, cuando la herramienta se enfrenta contra el material, la matriz y las fibras se cortan alternativamente por laminado. Como las fibras son más resistentes comparadas con la matriz polimérica, la fuerza que se requiere para

cortarlas da lugar a las fluctuaciones dinámicas de las señales de la fuerza. Cuando una fibra está a punto de ser cortada se dispara la magnitud de la fuerza y ésta cae cuando se corta.

Se observa que la fuerza de avance es siempre más alta que la de corte para una profundidad de corte de 0.1mm cuando la orientación de la fibra es igual o menor que -45° . Sin embargo, la fuerza de corte llega a ser mayor que la fuerza del avance con orientaciones superiores a -45° . Cuando la profundidad del corte es 0,2 milímetros, la fuerza de avance se mantiene mayor que la fuerza de corte para las orientaciones de la fibra por debajo de -45° , pero la diferencia relativa es menor.

Por otra parte, la fuerza de corte es siempre más alta que la fuerza del avance para profundidad de 0.3mm.

Por tanto, el efecto observado en el experimento es que la fuerza de corte aumenta cuando aumenta la profundidad de corte, mientras que la fuerza de avance se mantiene casi constante. Esto es similar a la conclusión de Koplev [9] que se ha señalado antes.

Cuando la orientación de la fibra está por encima de -45° , observan que la fuerza de corte es siempre más alta que la fuerza de avance para todas las profundidades. Esto es contrario a los resultados anteriores de Wang, que indicaron que la fuerza de avance es siempre más alta que la fuerza de corte para todas las orientaciones excepto -90° .

Un dato importante que muestran es que para -45° , las fuerzas de corte son casi iguales para todos los ángulos de desprendimiento y profundidades de corte.

Luego en cuanto al efecto de la fuerza de corte con la orientación de fibra, los resultados fueron consecuentes con los de Takeyama y de Iijima [1] (Takeyama y de Iijima, 1988)

La magnitud de la fuerza requerida para romper una fibra es independiente de la profundidad de corte ya que las fibras sólo se rompen cuando se supera su resistencia. Por otra parte, la fuerza requerida para cortar la matriz es sensible al volumen de material que se quita y por lo tanto, depende de la profundidad de corte. Por lo tanto, es probable que la fuerza de corte vaya en aumento, en comparación con la de avance cuando la profundidad de corte se eleva más allá de un valor crítico que es alrededor de 0,2 mm. Sin embargo, con menor profundidad de corte, por ejemplo 0,1 mm, la fuerza debida al corte de la fibra predomina a la fuerza de corte de la matriz, lo que conduce a la mayor fuerza de avance.

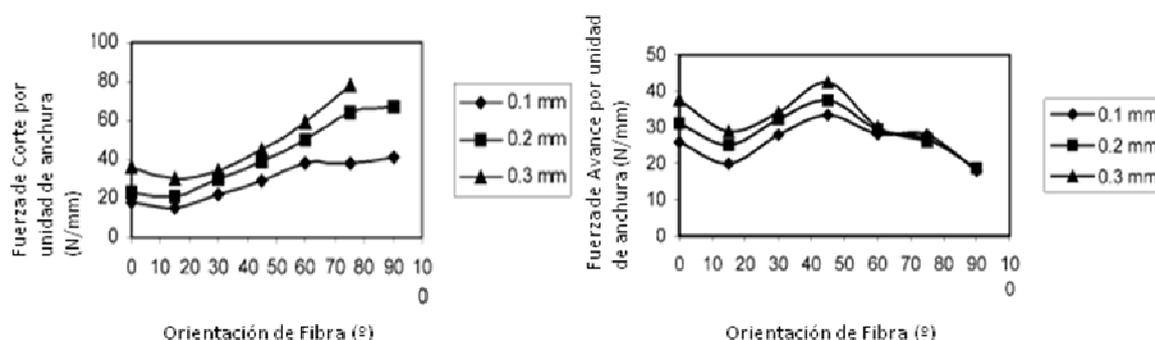


Fig 3.21: Variación de la fuerza de corte y la fuerza de avance con la orientación de fibra (ángulo de desprendimiento = 10°)

Se muestra a continuación el estudio que realizan sobre el efecto del ángulo de desprendimiento. Las fuerzas de corte en general, muestran una tendencia a la baja con el aumento del ángulo de desprendimiento de la herramienta. Se hizo el análisis porque los estudios previos eran muy limitados. La presente investigación muestra que las fuerzas de corte disminuyen con el aumento de ángulo de desprendimiento de 30° después de lo cual se eleva de nuevo. Esto implica que un ángulo de ataque de 30° es la herramienta óptima para cualquier orientación de la fibra. Es un hecho muy importante en materiales dúctiles y blandos, aunque también en duros y frágiles pero en menor medida.

Un ángulo mayor además puede provocar daño de cráter en la punta, demasiado afilada, además de aumento de la rugosidad. Esto fue observado también por otros investigadores como Wang y Zang [6] (Wang y Zang, 2003)

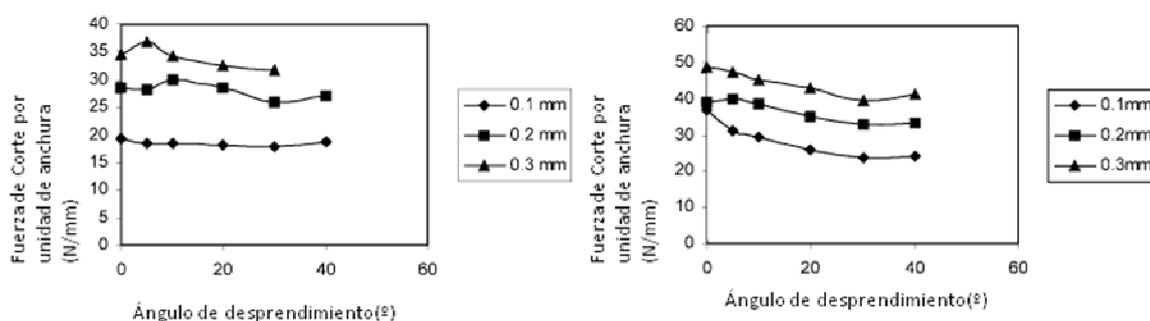


Fig 3.22 : Variación de la fuerza de corte con el ángulo de desprendimiento, orientación de fibra -30° (izquierda) y -45° (derecha)

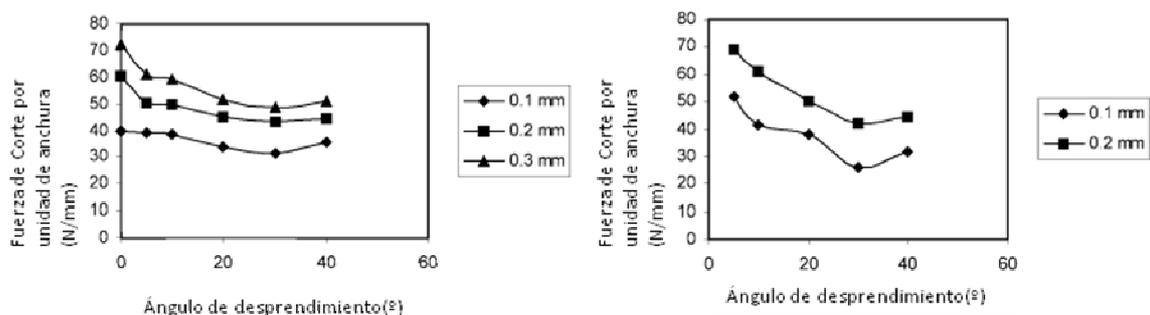


Fig 3.23: Variación de la fuerza de corte con el ángulo de desprendimiento, orientación de fibra -60° (izquierda) y -90° (derecha)

Como se ha comentado realizan un estudio del radio de punta de la herramienta. El desgaste de flanco de incidencia en la punta de la herramienta hace aumentar las fuerzas de corte en metales, y además en materiales compuestos este efecto puede ser más importante ya que contiene el refuerzo que generalmente es abrasivo, por naturaleza, y pueden redondear la punta de la herramienta. Con el fin de estudiar el efecto del radio del borde herramientas de carburo (K10) éstas fueron diseñadas especialmente teniendo

el radio controlado de 20, 50 y 80 μm . El corte y las fuerzas se registraron con los tres instrumentos a 0,1 y 0,2 mm de profundidad de corte para todas las orientaciones de fibra. Ambos valores de las fuerzas se vieron afectados por el radio de punta y muestran una tendencia al alza con mayor radio de borde.

Se observa el efecto del radio de punta de 80 μm donde la fuerza es mayor en comparación con 20 y 50 μm a 0,1 mm de profundidad de corte, sin embargo, este efecto disminuye a medida que la profundidad de corte aumenta a 0,2 mm.

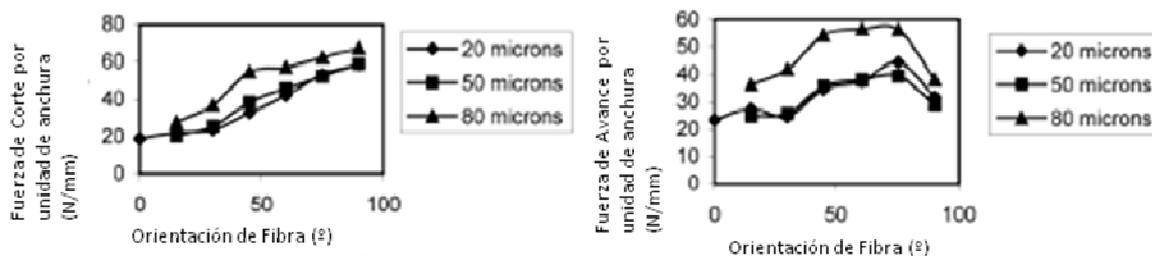


Fig 3.24: Variación de la fuerza de corte (izquierda) y la fuerza de avance (derecha) con el radio de punta (profundidad de corte =0,1 mm). Angulo de desprendimiento =10°

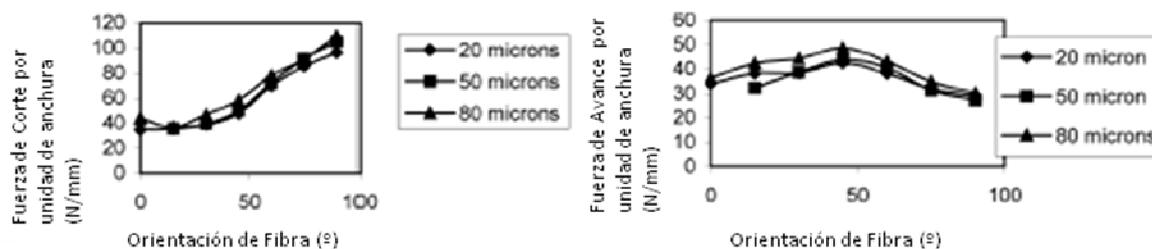


Fig 3.25: Variación de la fuerza de corte (izquierda) y la fuerza de avance (derecha) con el radio de punta (profundidad de corte =0,2 mm) Angulo de desprendimiento =10°

Un segundo bloque del artículo está dedicado al estudio del daño y qué parámetros le afectan.

Estudian la profundidad del daño con el grado de la extensión del tinte fluorescente en el material. La magnitud del daño es determinada analizando la imagen digital mediante el uso de un software de análisis de imagen. Fueron tomadas diez lecturas en intervalos aproximadamente iguales y después se hizo un promedio para el valor final del daño.

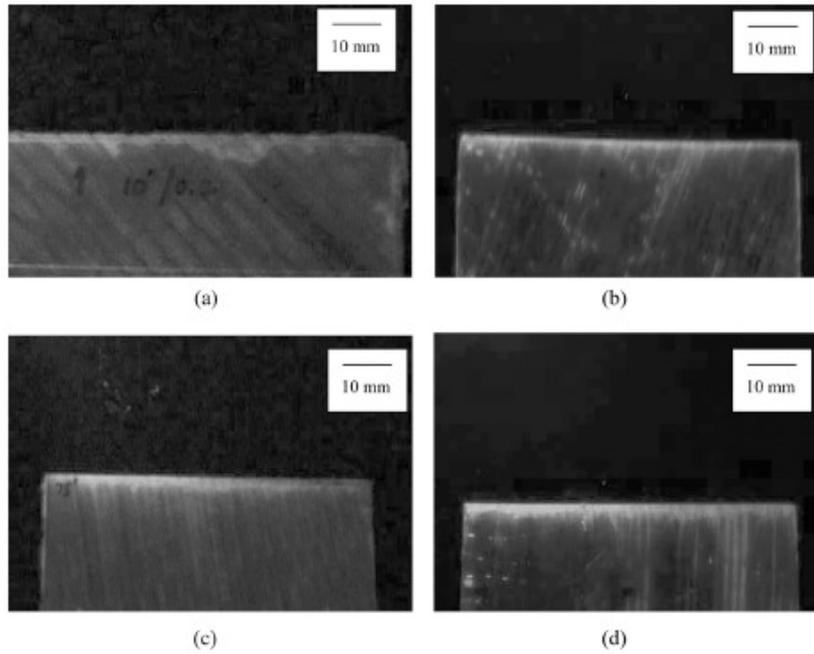


Fig 3.26: Fotografías digitales mostrando la penetración fluorescente en la fibra de vidrio con orientación de fibra (a) -45° , (b) -60° , (c) -75° , (d) -90°

El valor mínimo local del daño está observado generalmente para una orientación de la fibra de alrededor de la gama de -15 a -30° .

El crecimiento del valor del daño se observa lento inicialmente, hasta -45° ; a partir de entonces crece rápidamente hasta -90° .

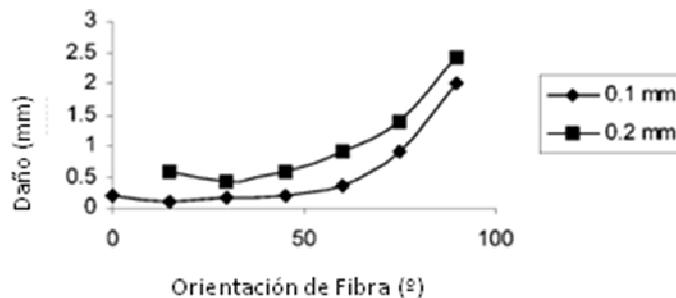


Fig 3.27: Variación del daño con la orientación de fibra para dos profundidades de corte distintas.

La propagación del daño se produce, como ya se había comentado en estudios anteriores, en la dirección de la interfase fibra-matriz. La forma en la que se mide el daño se puede observar en la Fig 3.28. Aunque los valores absolutos de la separación son idénticos en ambos los casos, el daño es mayor para una orientación más alta de la fibra, ya que se mide en la dirección del eje vertical (en profundidad).

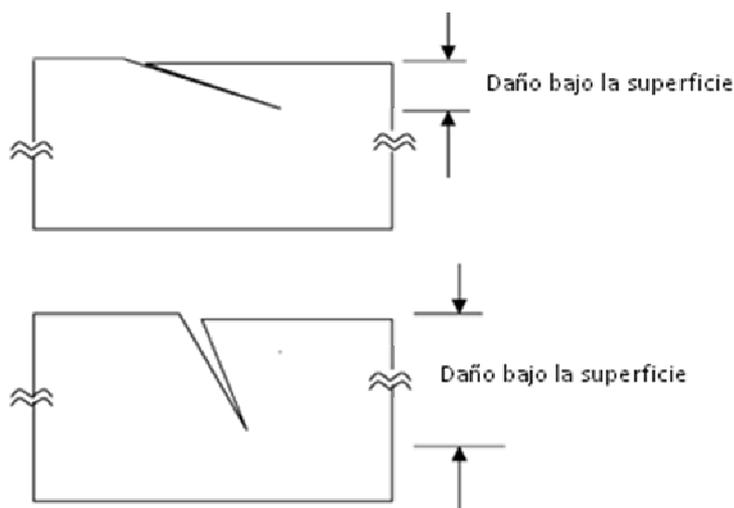


Fig 3.28: Medición del daño en profundidad.

El efecto del ángulo de desprendimiento de la herramienta sobre el daño también fue estudiado. Se extrae la conclusión de que tiene poca influencia para las orientaciones de la fibra hasta -45° , donde los valores del daño varían en una gama estrecha. Sin embargo, para una orientación más alta de -60° , se observa una disminución sensible del daño con el ángulo de desprendimiento creciente de la herramienta.

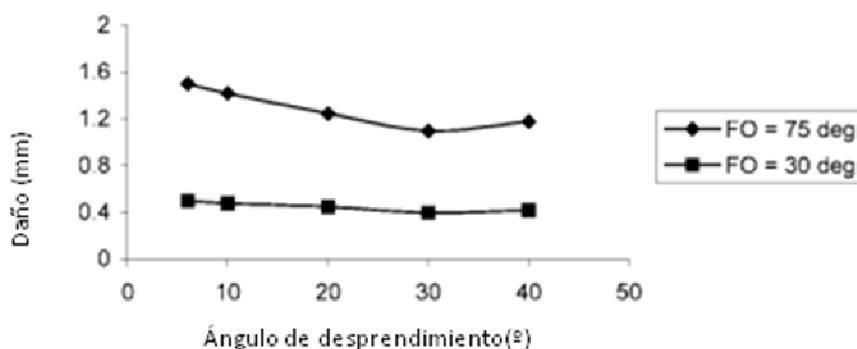


Fig 3.29: Variación de daño con el ángulo de desprendimiento para dos orientaciones de fibra distintas.

Los mismos autores realizan un segundo documento que se dedica a construir un modelo de elementos finitos que validar con los resultados experimentales obtenidos en el anterior trabajo. Se comenta a continuación.

3.10 [11] (Nayak et al., 2005)

El programa utilizado para la simulación con elementos finitos es ÁBAQUS, igual que el que se ha utilizado en el presente proyecto, y se construye un modelo macromecánico con corte ortogonal y los siguientes supuestos:

- El material es anisótropo y homogéneo.
- La herramienta de corte es un cuerpo rígido.
- No se considera efectos de calor debido a la baja velocidad de corte (0,5 m/min).
- El efecto del coeficiente de fricción se considera entre el borde de la herramienta y el material.

Para determinar el coeficiente de fricción realizan un experimento Pin-on-Disc ya que se supone dependiente de la orientación de la fibra. Se registra cuando el proceso alcanza un valor estacionario. Obtienen un resultado creciente con la orientación de fibra.



Fig 3.30: Variación del coeficiente de fricción con la orientación de fibra.

Se utiliza para construir el modelo una combinación de elementos cuadriláteros (CPS4) formados por cuatro nodos y de elementos triangulares (CPS3) con tres nodos. Modelan la malla con mayor detalle en la zona de contacto herramienta pieza, con un valor de $5 \times 5 \mu\text{m}$. Van a tomar dos criterios de fallo diferentes, uno para el elemento que se deforma por delante de la herramienta a lo largo del plano de corte para especificar el nivel crítico de tensión (criterio de tensión máxima) y otro criterio para el estudio del fenómeno ocurrido por delante de ese elemento con la formación de la viruta, el criterio de Tsai –Hill. Son los mismos criterios que se utilizaron en el artículo ya comentado de Bhatnagar [7](Bhatnagar et al., 2004).

Los parámetros de la simulación son los siguientes:

- Orientaciones de fibra: 0, -15, -30, -45, -60, -75, -90°.
- Ángulo de desprendimiento de la herramienta: 0, 5, 10, 20, 30 y 40.°
- Radio de punta: 50 y 80 μm
- Profundidad de corte: 0.1, 0.2 y 0.3 mm.

Tomando los valores de las fuerzas una vez que se ha formado completamente la viruta, comprueban que los resultados experimentales y simulados coinciden para la fuerza de corte pero no tanto para la de avance, donde hay una desviación del 10% y del 38% respectivamente.

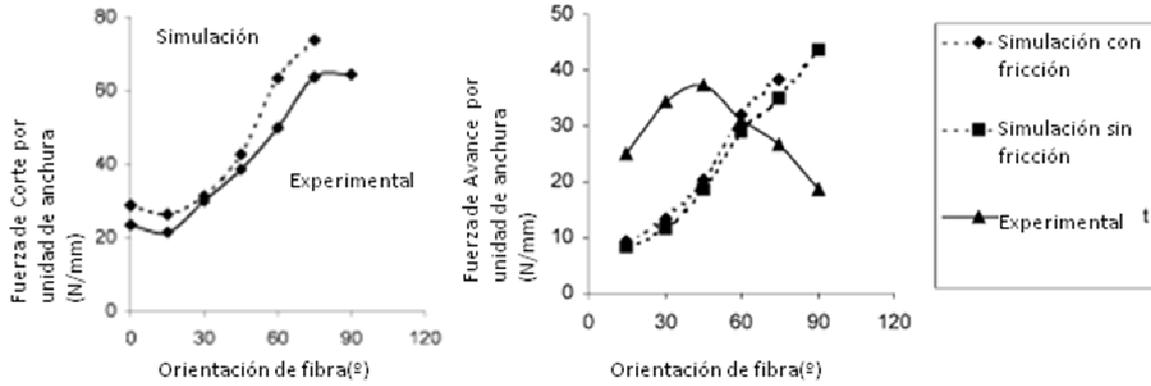


Fig 3.31: Comparación de los valores experimentales y simulados de fuerza de corte(izquierda), fuerza de avance (derecha) con y sin fricción, para ángulo de desprendimiento 10° y profundidad de corte 0,2 mm.

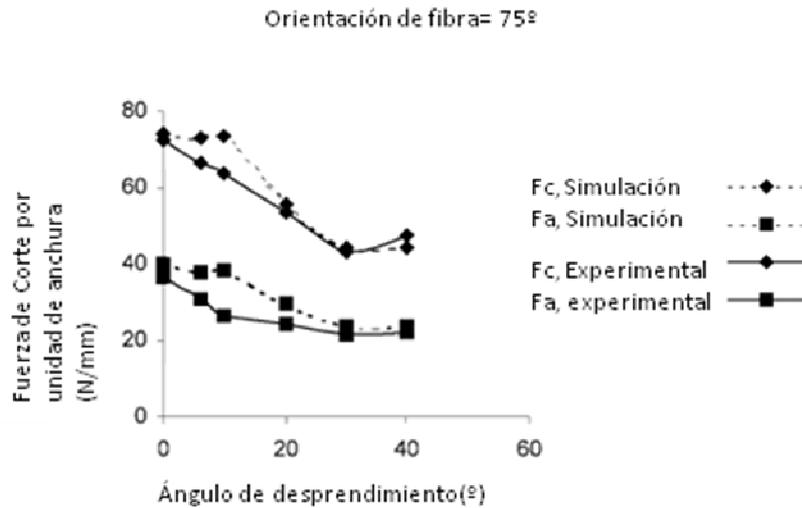


Fig 3.32: Comparación de los valores experimentales y simulados de fuerza de corte y de fuerza de avance respecto al ángulo de desprendimiento.

La simulación para estudiar el efecto del radio de punta termina con estos resultados:

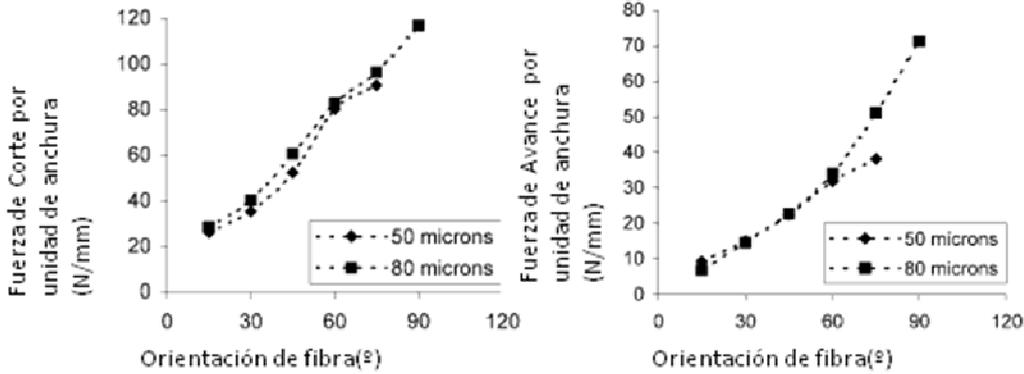


Fig 3.33: Variación de la fuerza de corte y avance con la orientación de fibra para 50 y 80µm de radio de punta (simulación), con ángulo de desprendimiento 10° y profundidad de corte 0,2mm..

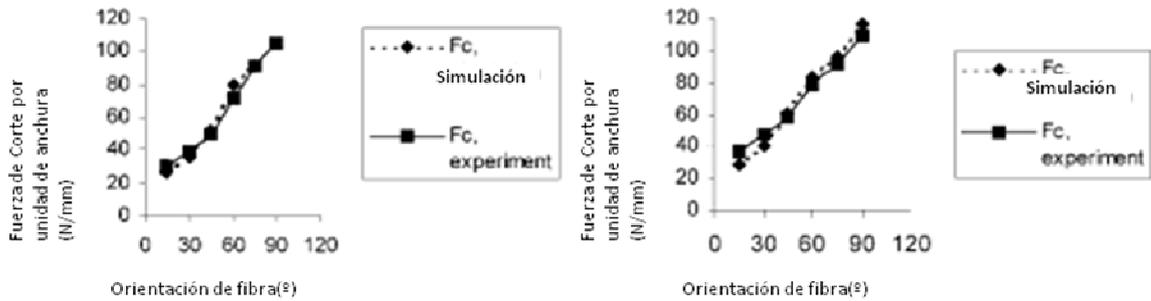


Fig 3.34: Variación de la fuerza de corte experimental y de la simulación con la orientación de fibra para 50 µm (izquierda) y 80µm (derecha) de radio de punta, con ángulo de desprendimiento 10° y profundidad de corte 0,2mm

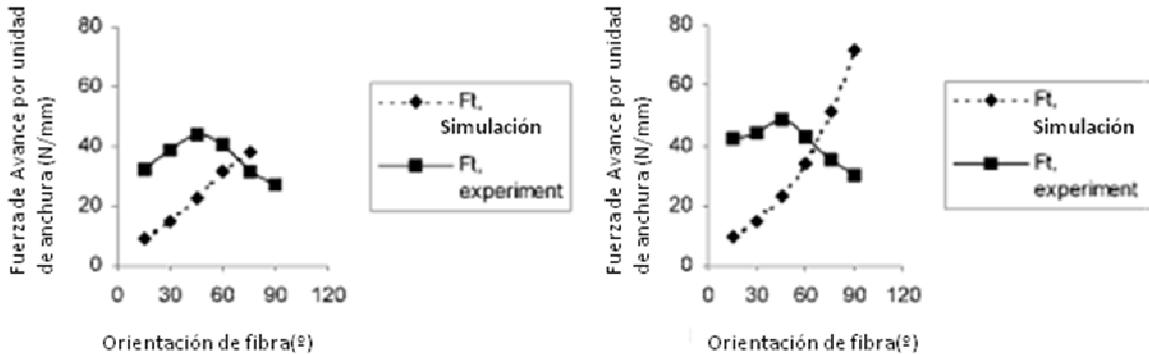


Fig 3.35: Variación de la fuerza de avance experimental y de la simulación con la orientación de fibra para 50 µm (izquierda) y 80µm (derecha) de radio de punta, con ángulo de desprendimiento 10° y profundidad de corte 0,2mm

Se realizaron simulaciones para 50 y 80µm, siendo imposible realizarlo para 20 µm ya que dicho radio es más pequeño que el elemento más pequeño del modelo.

El motivo que exponen para justificar la desviación en la fuerza de avance es atribuido a la utilización en el modelo del material equivalente homogéneo. En los experimentos la herramienta encuentra fluctuaciones debidas a la alternancia de fibras y matriz, hecho que en el modelo no ocurre. Otra razón es que no se haya tenido en

consideración el daño producido en el modelo experimental a medida que aumenta la orientación de fibra en el cálculo del avance, factor que hace disminuir la fuerza de avance experimental.

La solución a esta desviación que proponen los investigadores es un nuevo modelo, esta vez micromecánico, heterogéneo, con dos elementos distinguidos, fibra (refuerzo) y matriz, cada uno de ellos con sus propiedades mecánicas. El problema de este tipo de modelo es que es muy grande y pesado para un microprocesador, y lo solucionan colocando una única fibra para modelar el compuesto. Se combinan elementos triangulares (CPS3) y cuadriláteros (CPS4) de nuevo para construir la malla, con mayor detalle en la zona de contacto de la herramienta.

Los supuestos utilizados son:

- Herramienta de ángulo de desprendimiento de 6° y radio de punta $50\mu\text{m}$.
- Profundidad de corte $100\mu\text{m}$.

Se toman por separado las propiedades módulo de elasticidad y resistencia a tracción de fibra y matriz, y resistencia de la interfase, al tratarse de un modelo micromecánico heterogéneo.

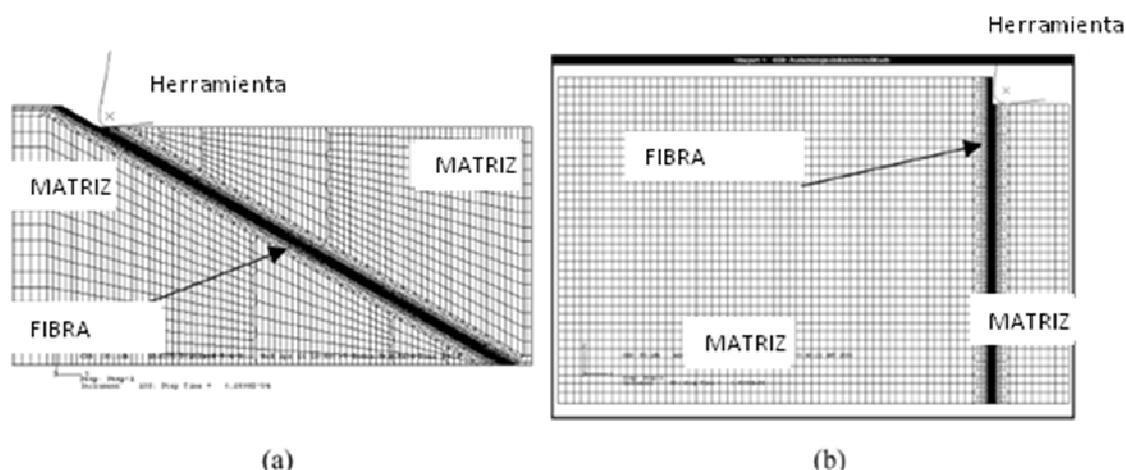


Fig 3.36: Malla del modelo en elementos finitos con una sola fibra; (a) orientación de fibra -30° (b) orientación de fibra 90° .

Se tiene en cuenta en el documento que los valores de fuerza de la simulación no son comparables con los reales, ya que se lleva a cabo con una única fibra. Pero se busca la tendencia. Con este modelo logran hacer coincidir los resultados con los del experimento del artículo primero, salvando pequeñas diferencias debidas a la naturaleza ideal de los materiales, sobre todo en el caso de la fuerza de avance, ya que se consigue reproducir la caída de los resultados a partir de la orientación de fibra -45° .

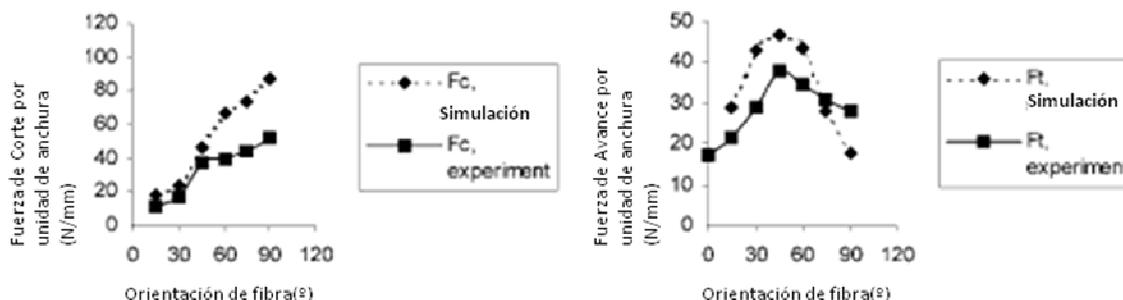


Fig 3.37: Comparación de la simulación del modelo micromecánico con el resultado experimental.

En cuanto a la formación de la viruta, este estudio ofrece una novedad, ya que permite estudiarla en un sistema de dos fases fibra-matriz.

La fibra, al ser presionada, se comprime por el lado de la herramienta, mientras que el lado opuesto se encuentra bajo una carga de tracción. Fuera de la región de la zona de contacto con la herramienta, la tensión principal es la tracción. La fibra se considera que falla cuando la tensión excede la resistencia a la tracción longitudinal de la de la fibra. Este criterio se cumple antes para zonas de la fibra lejanas a la herramienta que para la zona de contacto, luego la grieta puede empezar a producirse por ahí. Esto también influye en la formación de la viruta, para una herramienta con un ángulo de desprendimiento grande, el contacto con la fibra será menor y por tanto esa zona de compresión menor, aumentando la longitud de las fibras rotas.

Para todos los casos, la dirección de máxima tensión se encuentra a lo largo de la dirección longitudinal de fibra, esto implica que lo más probable es que se rompa lo largo de un plano paralelo a la dirección transversal de la fibra, de acuerdo con la afirmación experimental.

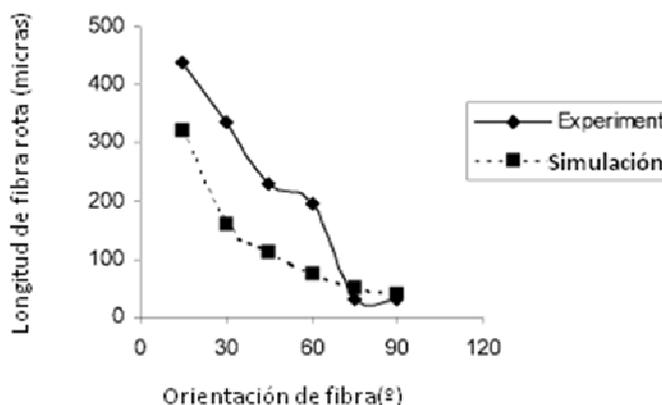


Fig 3.38: Influencia de la orientación de fibra en la longitud de la fibra cortada. Experimental: ángulo de desprendimiento 10°, profundidad de corte 0,2 mm; Simulación: ángulo de desprendimiento 6°, profundidad de corte 0,1 mm.

Utilizan de nuevo el primer modelo homogéneo equivalente para la determinación numérica del daño interno en la matriz.

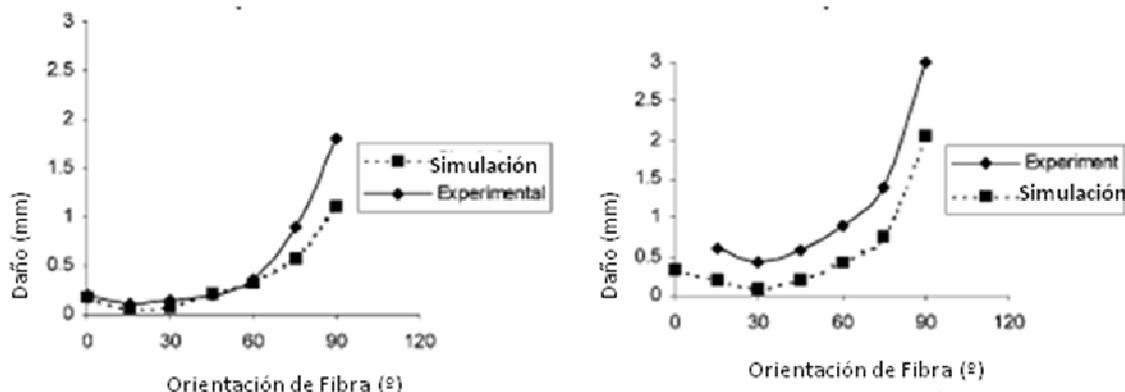


Fig 3.39: Variación del daño con la orientación de la fibra con profundidad de corte de 0,1 mm, (izquierda) y de 0,2 mm (derecha) para modelo y caso experimental.

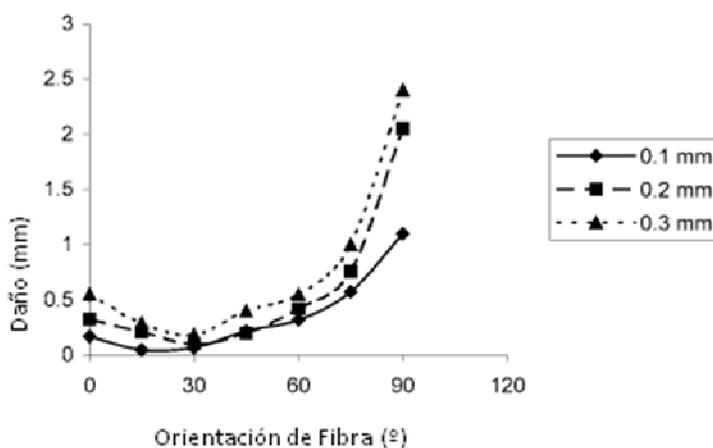


Fig 3.40: Variación del daño con la orientación de la fibra con distintas profundidades de corte en el modelo homogéneo equivalente.

Se corrobora la fuerza de corte y el daño mínimo para orientaciones de -15 y -30° .

Observan que el valor del daño experimental para 0.2 mm de profundidad de corte se encuentra siempre por encima del simulado. Esto podría deberse a la utilización de un material homogéneo equivalente. Tendencia similar se observa también a 0,3 mm de profundidad.

El efecto del ángulo de desprendimiento de la herramienta en el daño también lo estudian con el modelo EHM. Para las orientaciones altas de la fibra se muestra una variación significativa para bajos y altos ángulos de desprendimiento.

El más favorable es 30° como en el caso experimental.

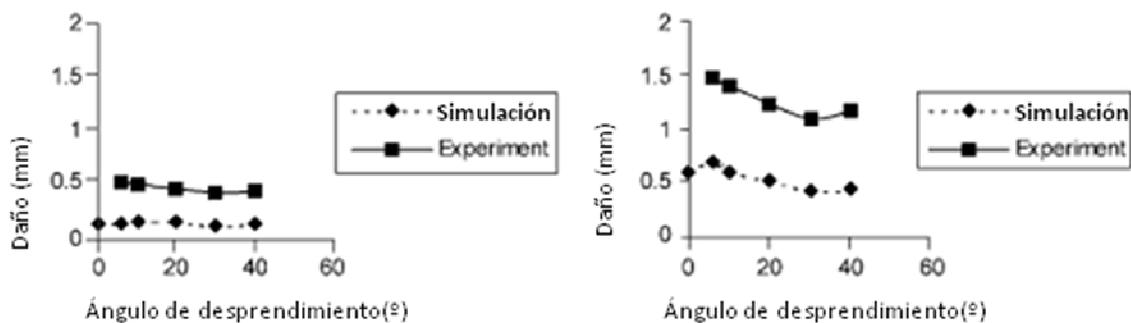


Fig 3.41: Comparación de los valores simulados y experimentales del daño respecto al ángulo de desprendimiento, para orientación de fibra (izquierda) -30° y (derecha) -75° .

La comparación del daño obtenido en el modelo EHM (equivalente homogéneo) y el de dos fases (micromecánico) se muestra en la Fig 3.42. Por encima de -45° , el modelo EHM da valores más altos que el de dos fases.

Los resultados del modelo de micro-mecánica son también comparados en el artículo con el trabajo experimental de Inoue y Yugue [5] que llevaron a cabo un estudio del corte ortogonal de hilados simples de fibra de vidrio en similares condiciones. La concordancia en los datos indica que el modelo micromecánico basado en el sistema de dos materiales es muy acertado con los resultados de este tipo de experimentos.

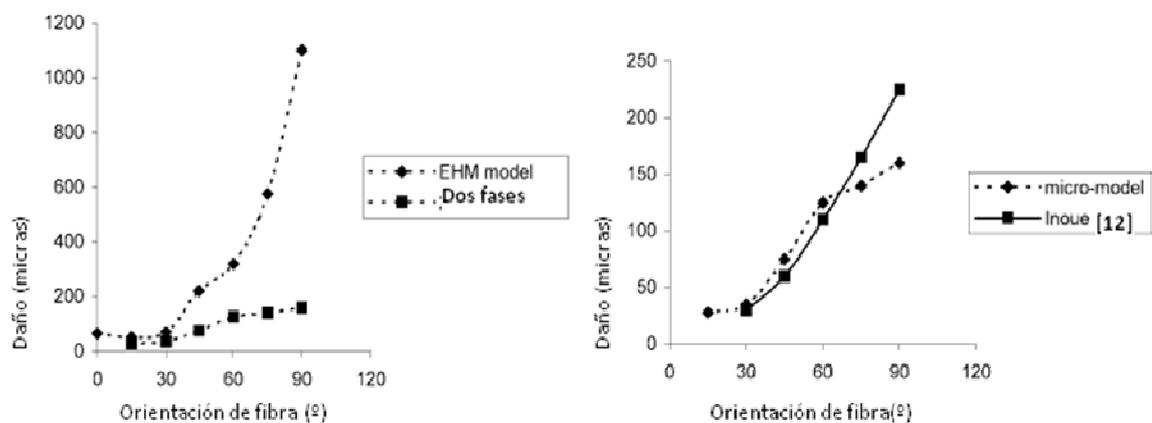


Fig 3.42: Comparación de los valores simulados y experimentales del daño respecto a la orientación de fibra, entre el modelo EHM, el de dos fases y el de Inoue (Inoue y Yugue, 1999) [5].

3.11 [12] (Venu Gopala et al., 2006)

El siguiente artículo tiene como motivación la necesidad de investigar más en el modelo micro-mecánico, siendo la utilización del modelo equivalente homogéneo la principal razón de los desvíos de los resultados de las simulaciones con los experimentales.

Primeramente se realiza un trabajo experimental basado en mecanizados de fibra de vidrio y carbono con herramienta de ángulos de desprendimiento 5° , 10° y 15° , radio de

punta $50\ \mu\text{m}$, profundidades de corte 0.1, 0.15 y 0.2, orientaciones de fibra 15, 30, 45, 60, 75 y 90 (negativas) y velocidad de corte 0,5 m/min:

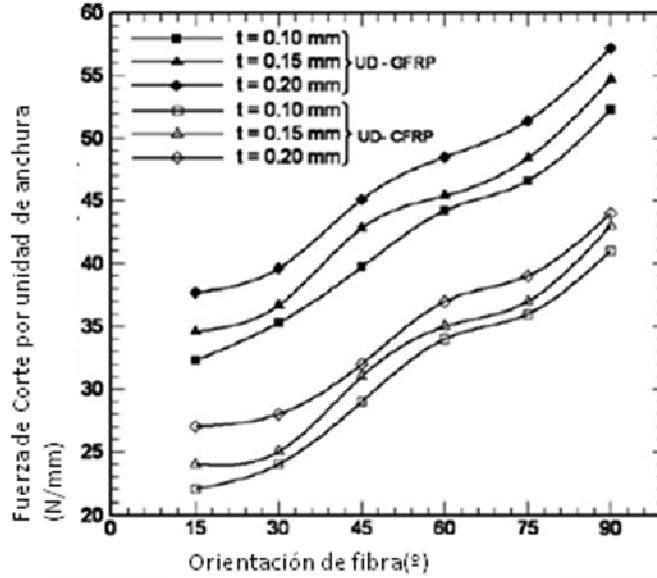


Fig 3.43: Fuerza de corte con la orientación de fibra para distintas profundidades, ángulos de desprendimiento y materiales

Los resultados son bastante coherentes con todo lo que se ha visto anteriormente, sabiendo que las fuerzas aumentan cuando disminuye el ángulo de desprendimiento de la herramienta. Sin embargo este hecho no es tan claro en los resultados experimentales, y solo puede ser observado para orientaciones mayores que -45° y no para todo el intervalo. La justificación que aportan estos autores está relacionada con la zona de contacto entre la fibra y la herramienta, menor a mayor ángulo de desprendimiento.

Una vez finalizado el experimento, el método a seguir es realizar primeramente un modelo con dos fibras para compararlo con el experimental basado en las siguientes propiedades y características:

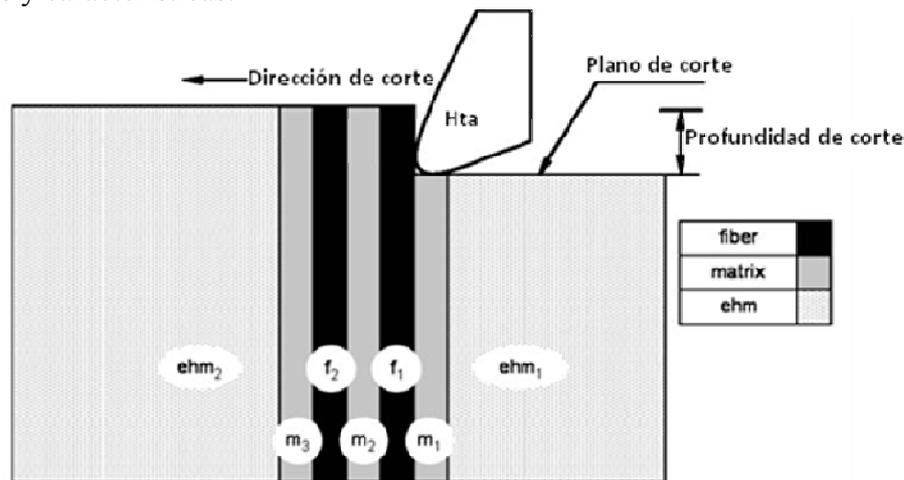


Fig 3.44: Material, Geometría de la herramienta y parámetros del proceso experimental

La herramienta la modelan como EHM (material equivalente homogéneo), al igual que el resto de matriz fuera de la zona de las dos fibras.

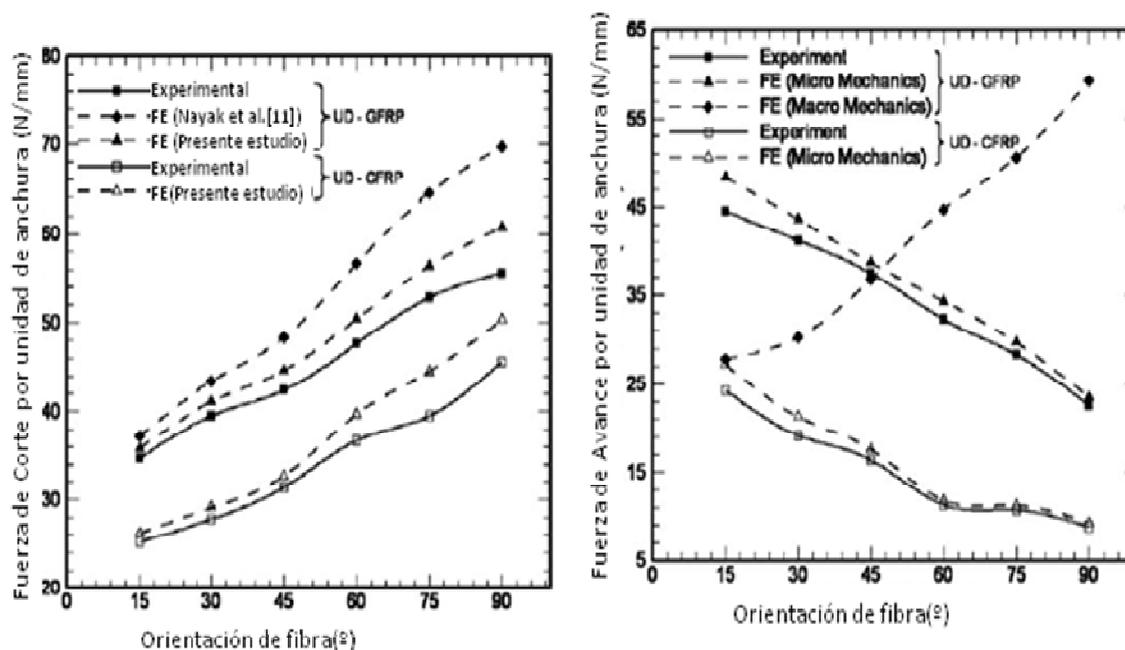


Fig 3.45: Comparación de resultados experimentales con los del modelo micromecánico y el de Nayak [11] (Nayak et al., 2005).

Es evidente que la tendencia y los valores numéricos de la fuerza de avance obtenidos por el modelo equivalente homogéneo de Nayak no son acordes con los experimentos, sin embargo estos concuerdan bien con la predicción del micro-mecánico.

En cuanto a la distribución de la tensión, encuentran que tanto para la fibra de vidrio como la de carbono la compresión máxima se encuentra en la parte frontal de la fibra y la tensión máxima en la parte trasera en contacto con la matriz, produciéndose máximos similares hasta aproximadamente 15 mm por debajo del punto donde toca la herramienta. La magnitud de la tensión depende de la unión en la interfase fibra-matriz, si la unión se prevé perfecta la tensión principal de tracción aumenta hasta 1,4 GPa. Sin embargo si se intenta representar la dislocación de los elementos de la interfase (fallo en la interfase) el valor de la tensión disminuye a 0,7 GPa.

El mecanismo de inicio del fallo que observan en el modelo es primeramente debido a la compresión de la fibra por la herramienta, y posteriormente por superar la resistencia a tracción de la fibra en su cara posterior al ataque de la herramienta. La grieta crece desde esa cara en adelante con mayor o menor aislamiento. En el caso de la fibra de carbono, para la que los valores de resistencia a compresión y tracción son similares, ambos mecanismos actúan en la misma proporción. En la fibra de vidrio, cuya resistencia a la compresión es de cinco veces su resistencia a tracción, observan que el mecanismo de fallo predominante es la flexión. Estos fallos se dan a lo largo de un plano paralelo a la dirección transversal de la fibra, con lo que coincide con la afirmación experimental.

Como la fibra desliza a lo largo de la superficie de la herramienta, observan que la tensión máxima de compresión es menor para bajas orientaciones de fibra. Para mayores orientaciones, se comprueba que para ambos compuestos la tensión de doblado de las fibras supera antes su valor límite que la componente de compresión, luego la flexión de la fibra es el principal factor de fallo para orientaciones e fibra desde -15° a -90° . A medida que disminuye la orientación desde -90° a -15° la flexión se hace más significativa.

El efecto “bouncing back” enunciado ya por Wang y Zhang [3] también es corroborado por estos autores, que observaron una recuperación de $50\ \mu\text{m}$ para una profundidad de corte de $100\ \mu\text{m}$.

Para observar el desplazamiento o flujo del material sobre la herramienta han utilizado el modelo ya que experimentalmente es más dificultoso de ver. El desplazamiento toma su mayor valor para -15° de orientación de fibra, y queda demostrado que este desplazamiento es mayor para la fibra de vidrio que para la fibra de carbono. El tamaño de la viruta a lo largo de la dirección de la fibra depende totalmente del flujo de material de la zona de contacto con la herramienta.

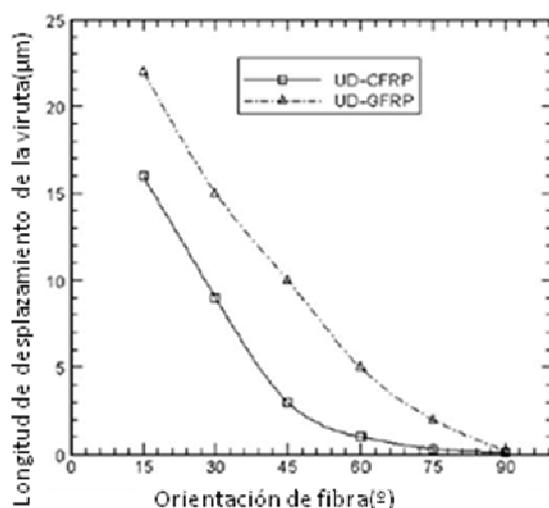


Fig 3.46: Variación del desplazamiento en la zona de contacto con el material para distintas orientaciones de fibra durante la simulación con ángulo de desprendimiento 10° y profundidad $0,1\ \text{mm}$.

Se observó que el daño se produjo tanto en la matriz como en la interfase donde las uniones entre fibra y matriz se rompieron, siendo este el principal modo de fallo.

Comprobaron que el máximo daño se produce para -90° , propagándose en modo de fallo I (apertura en la interfase y propagación por delante de la herramienta) y en modo de fallo II (ruptura inducida por compresión y deslizamiento de la interfase)

Hay que tener en cuenta que como se ha comentado para la fibra de carbono a -90° la flexión entre la fibra y la matriz y la compresión entre la herramienta y la fibra causan a partes iguales la fractura de la fibra, mientras que para la fibra de vidrio la flexión es el principal mecanismo. Según la orientación cambia desde -90° a -15° , la flexión se va volviendo más importante para ambos compuestos.

A 0° , el modo I es el principal mecanismo de fallo, entre -15° y -45° (orientaciones bajas) el modo II se convierte en el principal y desde -60° a -90° el modo I de apertura es principal pero también es importante el modo II. Esto es común para ambos compuestos, aunque en la fibra de vidrio con orientaciones cercanas a -90° el modo I es mucho menos influyente, al tratarse de un material mucho más dúctil que el carbono y producirse menos grietas y sí más compresión entre las fibras y deslizamiento en la interfase.

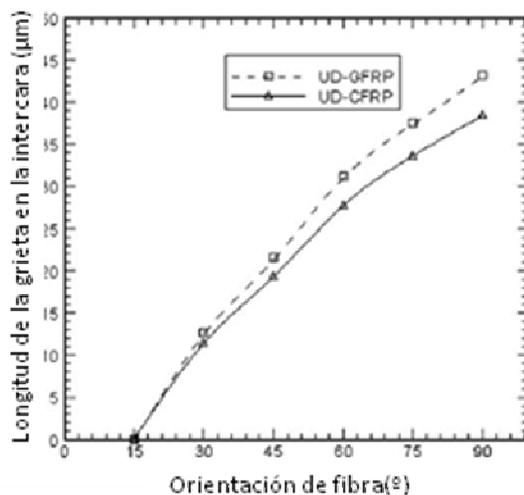


Fig 3.47: Variación de la grieta de la interfase fibra-matriz con la orientación de fibra, para ángulo de desprendimiento = 10° y profundidad de corte = 0,1 mm

Se realizó en el mismo estudio un segundo modelo para analizar hasta donde llega el daño realmente producido en la pieza, con las siguientes características:

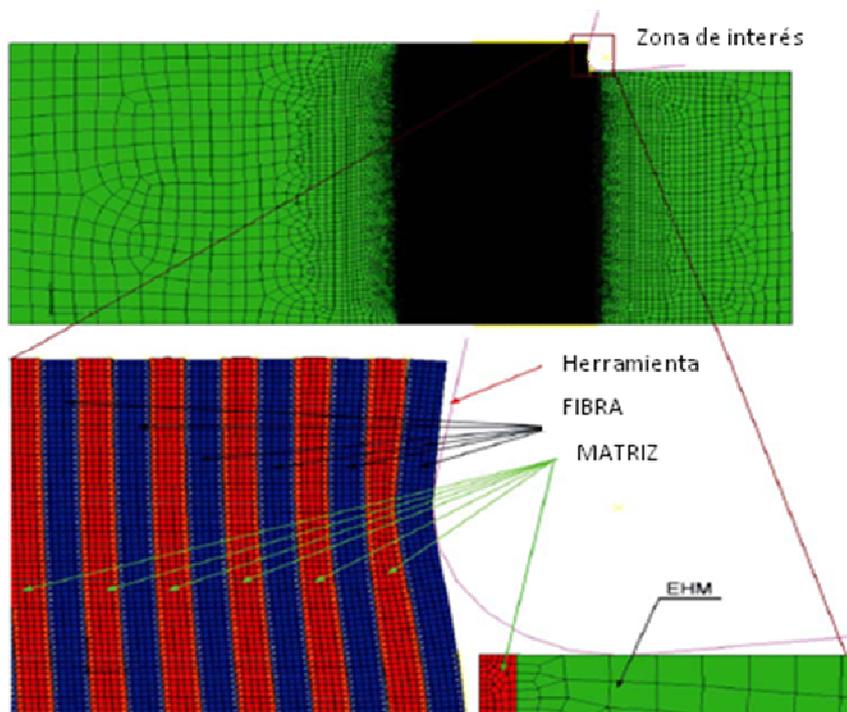


Fig 3.48: Esquema del segundo modelo utilizado con 25 fibras, 26 matrices y dos capas de EHM, con orientación de fibra -90° , ángulo de desprendimiento 10° y profundidad 0,1mm.

Se observó que para la fibra de vidrio con una orientación de -90° , mientras por encima del plano de corte el daño en la matriz se extendía bien hasta la quinta capa de la matriz, el daño por debajo del plano de corte solo se extendió hasta la tercera capa. Para ambos compuestos, el daño en profundidad en la segunda capa ($48 \mu\text{m}$) es mucho mayor que en la tercera capa ($11 \mu\text{m}$). Como se puede ver en la Fig 3.49, el daño máximo por debajo del plano de corte para ambos compuestos se produce a -90° y para la fibra de vidrio es de $48 \mu\text{m}$ mientras que para la de carbono es solo de $30 \mu\text{m}$. Se observa también que el crecimiento es más rápido a partir de -45° para la fibra de vidrio.

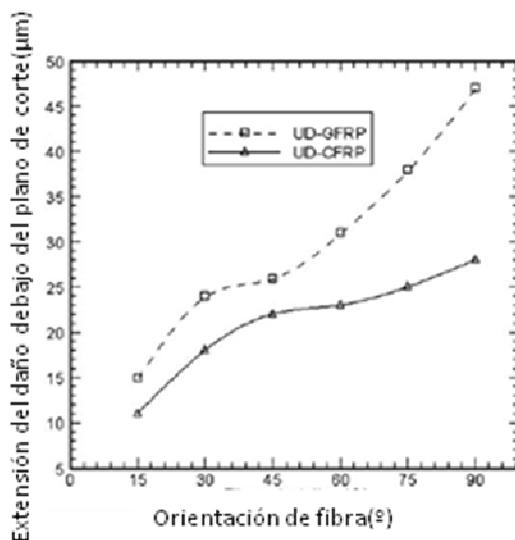


Fig 3.49: Variación del daño en la matriz por debajo del plano de corte con la orientación de la fibra para ángulo de desprendimiento = 10° y profundidad de corte = $0,1 \text{ mm}$

No encuentran significativo el efecto del ángulo de desprendimiento sobre el daño, comparado con la orientación de fibra, aunque éste se reduce aumentando el ángulo para todas las profundidades de corte.

En lo que se refiere al mecanismo de formación de viruta, observan de nuevo con este modelo que para orientación de fibra de -90° la compresión de las fibras es predominante a la flexión. La fibra se puede romper debido a la combinación de ambos efectos que superen a las propiedades correspondientes de la de la fibra.

Para las orientaciones de fibra baja, el efecto de flexión es más importante que la compresión.

La longitud de la viruta también cambia con la orientación de las fibras incluso para la misma profundidad de corte, ya que el punto de contacto inicial entre la herramienta y la fibra varía; para un radio de punta de la herramienta de $50 \mu\text{m}$ el punto inicial de contacto es $50 \mu\text{m}$ debajo del plano de corte, si la orientación de la fibra es -90° . Sin embargo es de $6,6 \mu\text{m}$ si la orientación es de -15° , independientemente de la profundidad de corte y el ángulo de desprendimiento.

3.12 [13] (Mkaddem et al., 2008)

El siguiente trabajo del que se van a comentar sus conclusiones se trata del artículo publicado en prensa de Mkaddem y sus colaboradores.

Trata sobre el análisis de la fibra de vidrio utilizando de nuevo un modelo en elementos finitos, modelado como un equivalente homogéneo (EOHM), y utilizando el criterio de fallo de Tsai-Hill, justificando que este modelo sirve bien para predecir razonablemente las fuerzas de corte. La solución ideal parece ser utilizar un modelo macro-micro, que recoja las ventajas de cada tipo de modelo, y que permita analizar la micromecánica de mecanismos como la formación de la viruta. Este artículo es, por tanto, un intento de presentar un modelo micro-macro, mediante un modelo que utiliza un equivalente homogéneo EOHM (macro-aproximación) y la técnica incorporada de malla adaptativa “adaptive mesh” y efecto de la densidad (micro-aproximación) que permite un análisis dinámico del problema. La malla utiliza la técnica de adaptación de “ABAQUS / Explicit”, módulo que se ha comentado en el apartado de elementos finitos.

Los parámetros de la simulación son los siguientes:

- Orientaciones de fibra: 0, -15, -30, -45, -60, -75, -90°.
- Ángulo de desprendimiento de la herramienta: 0, 10, 20, 30 y 40°
- Radio de punta: 50 μm
- Profundidad de corte: 0.1, 0.2, 0.3 y 0.4 mm.

Definen el radio de corte R como el cociente entre l_c y d_c , donde l_c y d_c son respectivamente la longitud de la viruta y la distancia de corte medida sobre la herramienta. (Ver Fig 3.50).

Con el modelo corroboran la afirmación de que la viruta se crea de una manera discontinua, especialmente para orientaciones altas de fibra, donde el corte transversal se hace cada vez más difícil y la viruta se convierte en pequeñas partículas.

Se confirma también que para 0° y bajas orientaciones el espesor de corte es prácticamente la profundidad de corte, la fractura ocurre lejos de la punta de la herramienta y la viruta es producida con una longitud relativamente importante. Además, observan que a esas orientaciones se propaga una fractura de modo I si la herramienta tiene un ángulo de incidencia positivo a lo largo de la dirección de corte. El proceso continúa dependiendo de la apertura de la grieta, y la ruptura se inicia cuando se alcanza el límite de esfuerzo de compresión de las fibras. La diferencia entre la resistencia de la matriz y la fibra conduce a una inestabilidad en la zona activa de mecanizado. Esto da como resultado una ruptura perpendicular a la dirección de las fibras en un determinado momento.

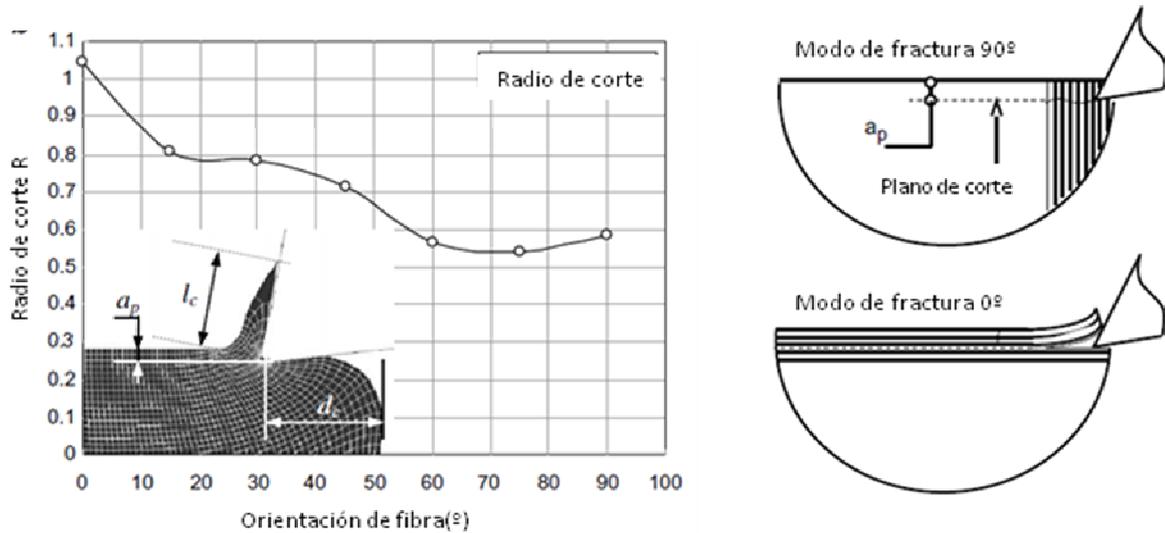


Fig 3.50: Radio de corte frente a la orientación de fibras

Las conclusiones obtenidas en cuanto a las fuerzas son que se lleva a cabo una mejora frente a los resultados que obtuvo Nayak [10] y [11] (Nayak et al.) en sus dos artículos antes comentados. Refiriéndose a la curva experimental, el error medio registrado para el modelo actual es de aproximadamente 6%, mientras que alcanza el 17% para el modelo de Nayak. Apuntan que puede ser debido al análisis dinámico con introducción de densidad llevado a cabo en el modelo. El modelo supone una buena aproximación ya que experimentalmente la fuerza de corte a -90° es 2,73 veces la fuerza en 0° , mientras que en el modelo se aproxima a 2,65 veces.

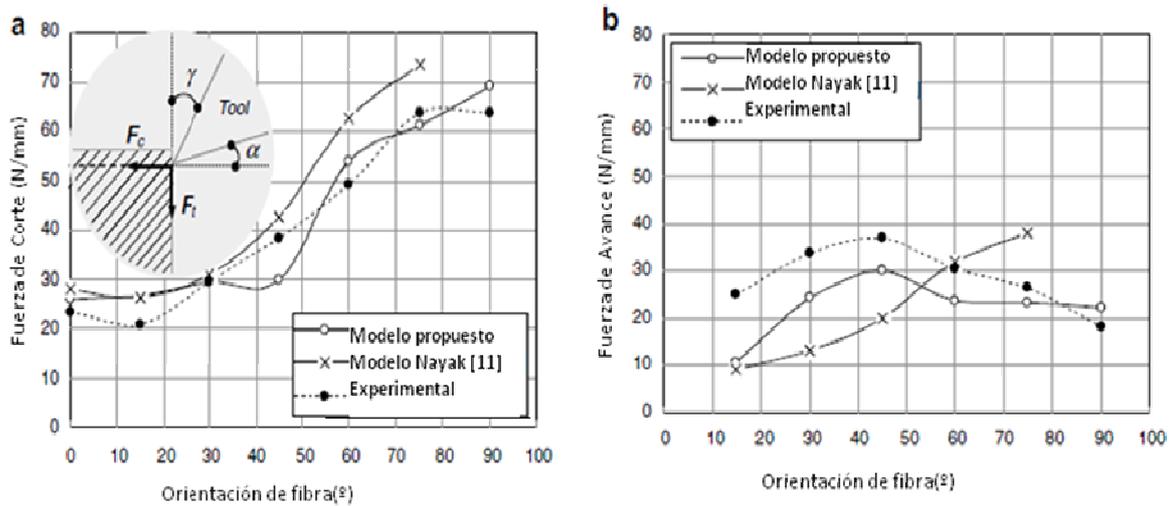


Fig 3.51: Valores experimentales y numéricos de la fuerza de corte y de avance para ángulo de desprendimiento 10° y profundidad de corte 0,2 mm

Teniendo en cuenta que el error para la simulación de Nayak es de 44% con respecto a los datos experimentales, y para los autores del presente artículo solo del 26%, estamos en un claro avance en cuanto a los resultados del modelado con elementos finitos.

Explican a que se debe el efecto de la caída de la fuerza de avance a partir de -45° . En el caso de orientaciones bajas, el corte tiene lugar en dos pasos: una flexión de las fibras que se produce en el momento que la herramienta toca el material, acompañada de el modo I de fallo (grieta o apertura, en dirección x) y una posterior compresión que conduce a un fallo combinado (modo I + modo II, compresión y deslizamiento de la interfase, en la dirección y). Cuando la orientación es mayor de -45° , el modo I va poco a poco disminuyendo al contrario del modo II, que ocurre con facilidad y comienza tan pronto como la herramienta toca la pieza. Esto explica la disminución de la fuerza de avance y el continuo incremento de la de corte.

La fuerza de corte, salvo para profundidad 0,1mm, supera a la de avance en todos los casos. Se comprueba que la fuerza de corte aumentará considerablemente con la profundidad de corte y se debe esencialmente a la potencia de corte necesaria para la separación de la viruta que aumenta con el volumen de material a extraer.

La fuerza de corte y la fuerza de avance se convierten, respectivamente, 3,3 y 2,3 veces mayor cuando la profundidad de corte pasa de 0,2 a 0,4 mm.

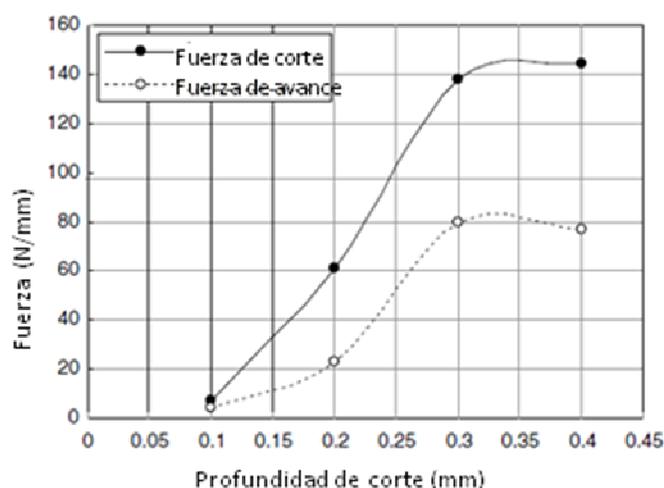


Fig 3.52: Fuerza de corte y fuerza de avance frente a la profundidad de corte (ángulo de incidencia 10° y orientación de fibra -75°)

Realizan un último estudio de la influencia del ángulo de desprendimiento. Cuando el ángulo de desprendimiento aumenta, la superficie de contacto entre la superficie de ataque de la herramienta y el volumen de material a cortar, disminuye, así, la fuerza desarrollada disminuye en la superficie de contacto. Corroboran el hecho de que para ángulos altos, la longitud de la viruta es mayor y se desliza sobre la herramienta, mientras que para ángulos bajos la viruta se comprime y el corte se dificulta.

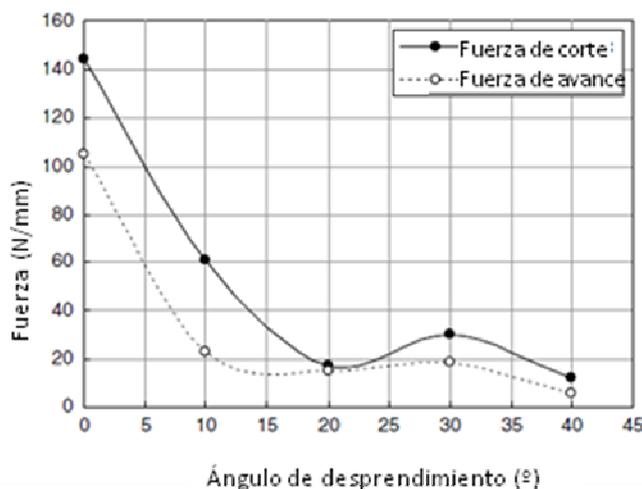


Fig 3.53: Fuerza de corte y fuerza de avance frente al ángulo de desprendimiento (profundidad de corte 0,2 mm y orientación de fibra -75°)

3.13 [14] (Mkaddem et al., 2008)

Los mismos autores del anterior trabajo vuelven a publicar a final de 2008 un segundo artículo sobre los compuestos reforzados de fibra. Se comenta que su anterior artículo es el paso inicial de la construcción de un modelo híbrido con el que se mejoraban, por ejemplo, los resultados de Nayak [11]. En este estudio se trata de ampliar el ámbito de aplicación del modelo dinámico de elementos finitos anteriormente presentado.

El modelo actual demostró mejora real sobre el modelo propuesto por Nayak [11], cuya construcción de la malla realizan de la misma dimensión, manteniendo la región de la interacción con la herramienta más detallada y combinando elementos CPS3 y elementos CPS4. Se utilizó el criterio de fallo de Tsai- Hill.

En la simulación, se hizo hincapié en actualizar el coeficiente de fricción de cada caso estudiado de orientación de fibra. Nayak [10] y sus colaboradores encontraron que este coeficiente aumenta con el crecimiento de la orientación de la fibra, sin embargo la mayoría de los modelos lo consideran constante (aproximadamente 0,3). Crean que sería una fuente de discrepancia descuidar los efectos de orientación sobre el coeficiente de fricción.

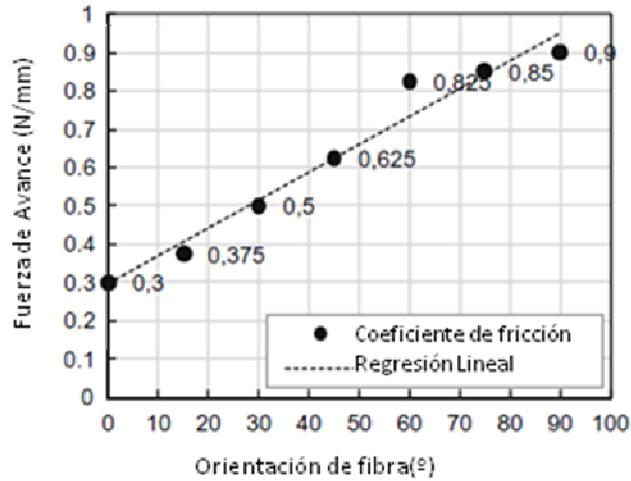


Fig 3.54: Variación del coeficiente de fricción con la orientación de fibra

Contrariamente a los modelos cuasiestáticos, este trabajo considera un efecto de inercia introduciendo al mismo tiempo la velocidad de corte y la densidad gracias a la utilización del módulo ABAQUS/ Explicit.

Como resultados obtienen las siguientes fotografías de la izquierda de la Fig 3.55, que comparan con los dibujos donde se muestran los mecanismos teóricos de formación de la viruta.

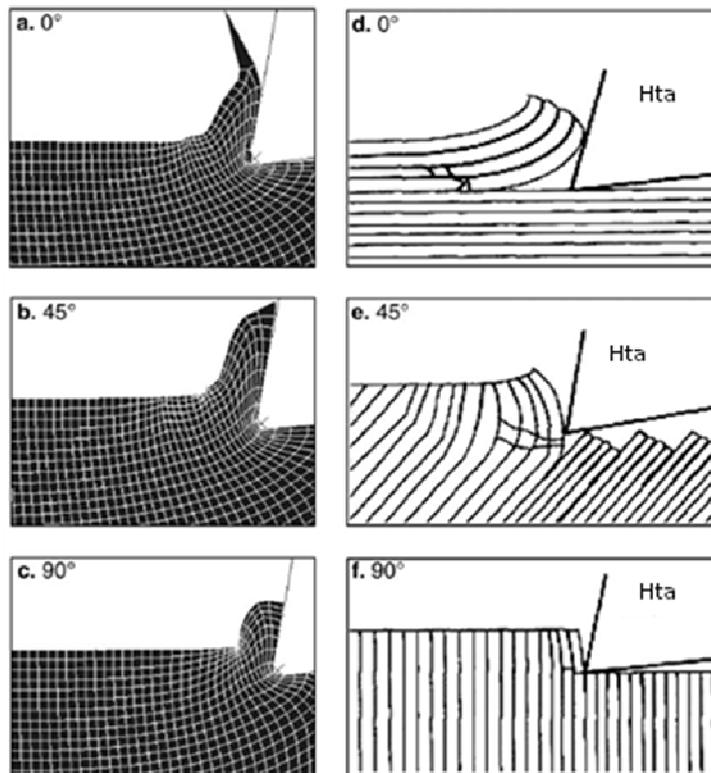


Fig 3.55: Forma de la viruta en el modelo (ángulo de desprendimiento 10°, profundidad de corte 0,2 mm, orientación de fibra (a) 0°, (b) -45°, (c) -90°) y comparación con figuras de la bibliografía

Los resultados de la forma son muy coherentes, con efecto principal de flexión a bajas orientaciones de fibra, de compresión a altas y una mezcla de ambas a -45° . La viruta se presenta más corta a mayor orientación de fibra como consecuencia de ese aumento de compresión y disminución de flexión, convirtiéndose en más difícil de formar.

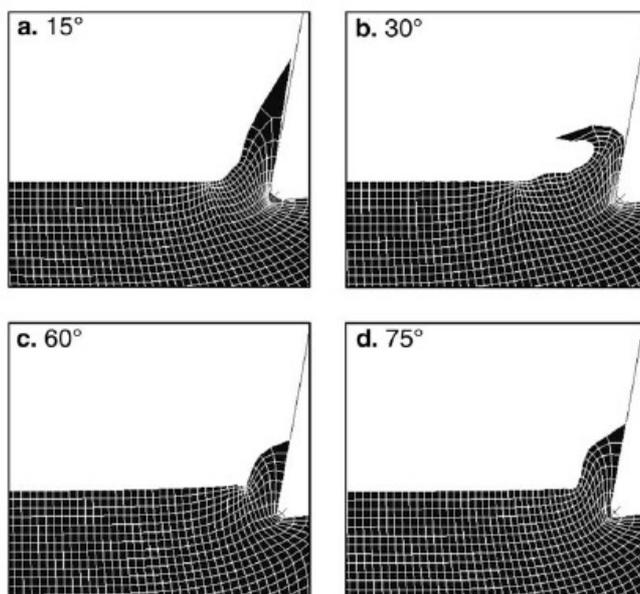


Fig 3.56: Simulación de la viruta con ángulo de desprendimiento 10° y profundidad de corte 0,2 mm

Se puede ver incluso en la imagen de la Fig 3.56 como en la orientación de fibra -15° se produce un “rollo” de viruta que desliza sobre la herramienta, debido a ese mecanismo predominante de flexión. A partir de -45° la fibra es cortada transversalmente, y la viruta se producirá con una longitud comparable a la profundidad de corte. En parte, esto explica la disminución de la dimensión de la viruta.

Una gran aportación de este estudio es la manera en que se muestra el mecanismo de propagación de las grietas a través de unas fotografías tomadas en la simulación. A orientación 0° la grieta parece comenzar en la superficie en libre contacto con la herramienta donde la flexión de las fibras se hace complicada. Para una orientación de fibras de -90° , la grieta se localiza detrás de la viruta, en un plano perpendicular a la dirección de corte, debido al efecto de la compresión logrado por la resistencia que ofrecen las fibras al avance de la herramienta. El mecanismo general que desarrollan las grietas en el resto de orientaciones de fibra es el observado para -75° , que es el resultado de una combinación de ambos.

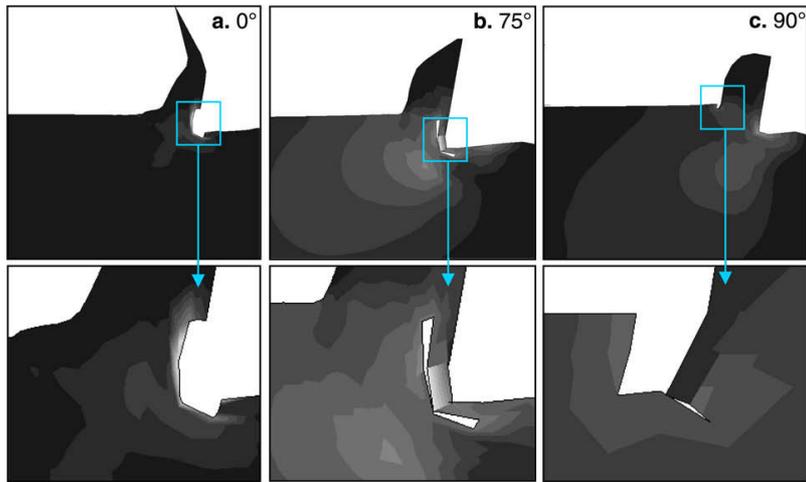


Fig 3.57: Forma típica de la viruta. Localización de las grietas a (a) 0°, (b) 75°, (c) 90° (ángulo de desprendimiento 10° y profundidad de corte 0,2 mm)

Las características del daño que observan son que su extensión, iniciada por la introducción de la herramienta en la matriz, avanza dependiendo de la interfase fibra matriz en cada caso, como en los resultados experimentales. La principal dirección del fallo es la dirección de las fibras, ya que una vez iniciada la desunión de la interfase fibra-matriz por uno de los dos modos de fallo, ésta se propaga en su misma dirección.

Los resultados para la evolución de los daños en función de otros parámetros les indican que es muy sensible al cambio de orientación de fibra pero muy poco sensible a la variación del ángulo de desprendimiento.

El estudio de Nayak [11] para esta evolución daba unos resultados que se desviaban un 31,5 % de los experimentales para -90°, mientras que en la simulación presente el error solo es del 10%. La tendencia es la misma, incluido un crecimiento exponencial a partir de -45°.

Las observaciones sobre los modos de fallo I y II para las distintas orientaciones de fibra coinciden con las de anteriores artículos.

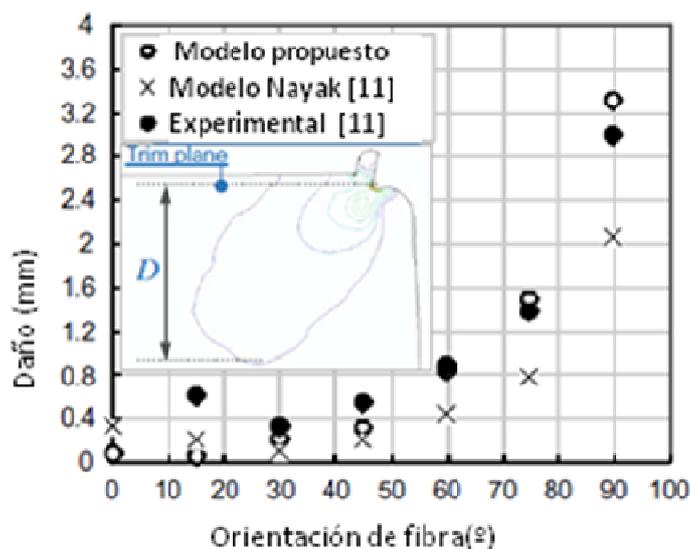


Fig 3.58: Daño frente a orientación de fibra (ángulo de desprendimiento 10°, profundidad de corte 0,2 mm)

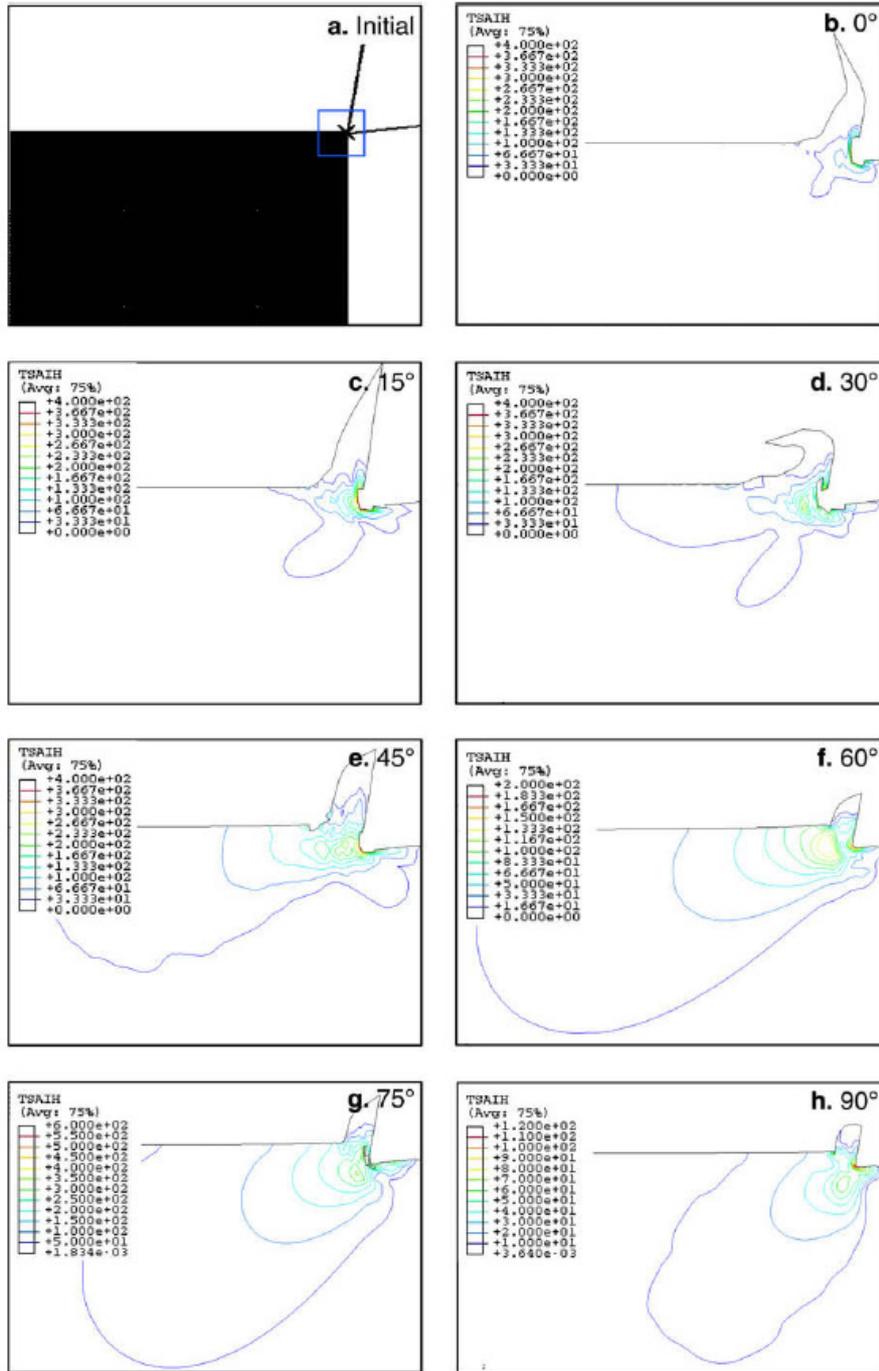


Fig 3.59: Contornos de Tsai- Hill obtenidos cuando la orientación varía de 0 a -90° (ángulo de desprendimiento 10°, profundidad de corte 0,2 mm), (a) configuración inicial, (b) 0°, (c) -15°, (d) -30°, (e) -45°, (f)-60°, (g) -75°, (h) -90°

3.14 [15] (Lasri et al., 2009)

El último estudio de la bibliografía del que se hace mención es el publicado por Lasri, en el que se desarrolla un modelo de elementos finitos para el mecanizado de compuestos, para mostrar el efecto de la orientación de fibra en la formación de la viruta y el daño. Se realiza un modelo en 2D incluyendo un redondeo en la parte del material alrededor de donde interaccionará con la herramienta, que intente reproducir el efecto de recuperación elástica del que hablaban Wang y Zhang [3] en su artículo que anteriormente se ha analizado. Se asume un proceso cuasiestático en este caso.

Tomaron, por coherencia con el trabajo experimental de Bhatnagar [2], un radio de punta de herramienta de 50 μm , una profundidad de corte de 0,2 mm y un ángulo de desprendimiento de 5°. El coeficiente de fricción lo toman constante de 0,5.

Establecen tres criterios de fallo, Hashin, criterio de tensión máxima y Hoffman, y se comparan los resultados entre ellos. Los fallos incluyen el daño de la matriz, desunión de interfase fibra-matriz y rotura de la fibra. El criterio que establece Hoffman para la generación de daño es el siguiente:

$$e_{Hoffman} = -\frac{\sigma_{11}^2}{X_t X_c} + \frac{\sigma_{11} \sigma_{22}}{X_t X_c} - \frac{\sigma_{22}^2}{Y_t Y_c} + \frac{X_t + X_c}{X_t X_c \sigma_{11}} + \frac{Y_t + Y_c}{Y_t Y_c \sigma_{22}} + \frac{\sigma_{12}^2}{S_c^2} \geq 1 \quad (21)$$

Donde σ_{ij} , X_t - Y_t , X_c - Y_c , y S_c son las principales tensiones en las direcciones principales del material (longitudinal-transversal en tensión, longitudinal-transversal en compresión, y cortante, respectivamente) Se asumió la formación de viruta completa cuando este criterio (21) se cumplía en la superficie libre de la pieza.

El criterio de Hashin se encuentra desglosado en el capítulo 3, en la descripción del modelo de elementos finitos, y el criterio de máxima tensión ya se ha descrito en el actual apartado.

Los resultados que obtuvieron sobre la formación de la viruta, en los casos de simulaciones con Hashin y criterio de máxima tensión, confirman que la separación en la interfase fue el primer daño desarrollado en la estructura durante el proceso de formación de viruta. Ésta se completó cuando la separación fue total, y la ruptura de fibra ocurrió por delante de la herramienta de corte.

Se inició por delante del borde de la herramienta a nivel del radio del borde. Al avanzar la herramienta, el fallo va avanzando en la dirección paralela a la fibra hasta que la fibra completa se despega de la matriz. El fallo en la matriz comienza y se desarrolla por el mismo camino que el fallo de la interfase, hasta la formación de la viruta.

Generalmente, la rotura de la fibra se produce en un plano más elevado que el plano de corte. Esto está de acuerdo con la teoría de “bouncing-back” enunciada previamente por Wang and Zhang [6], luego consigue reproducir el efecto con el redondeo del material mencionado.

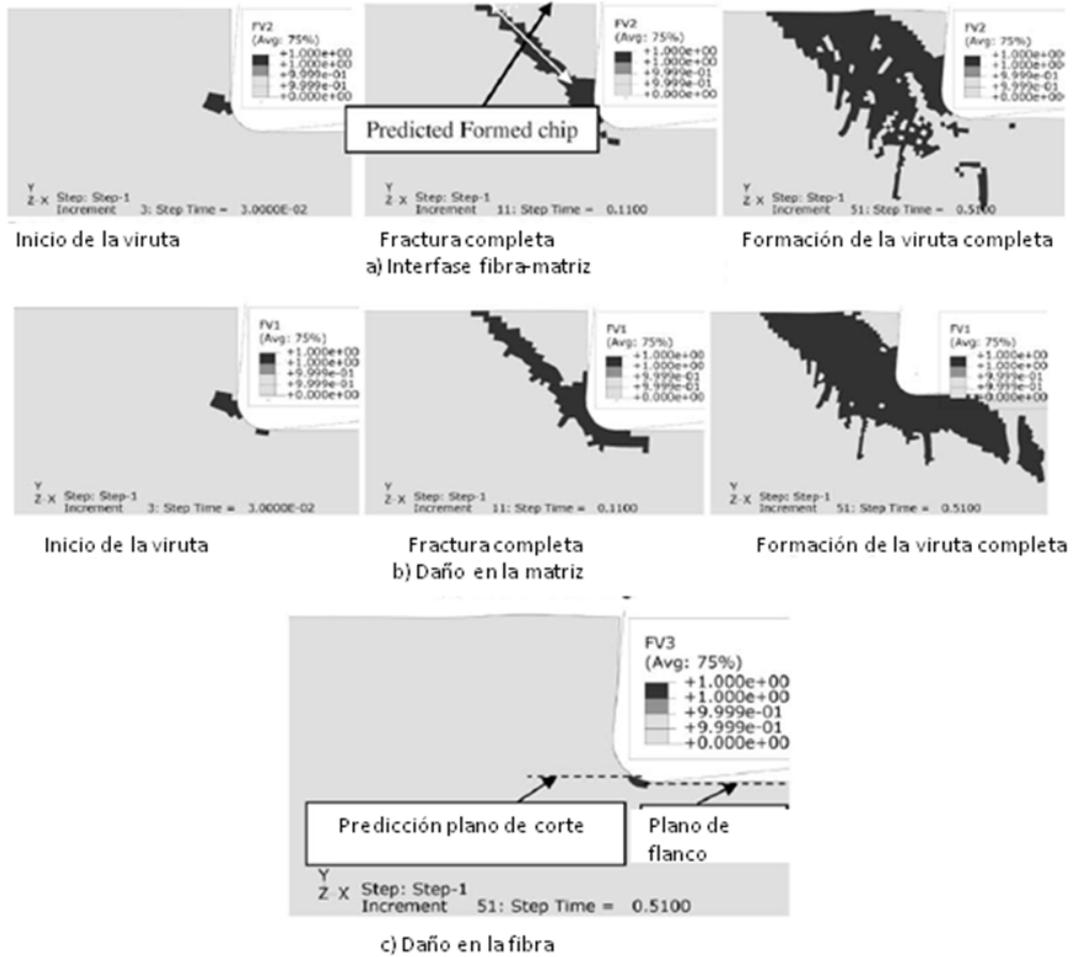


Fig 3.60: Análisis progresivo del fallo con el criterio de Hashin para orientación de fibra -45°

ANÁLISIS PARAMÉTRICO DEL CORTE ORTOGONAL DE MATERIALES COMPUESTOS MEDIANTE MODELIZACIÓN NUMÉRICA

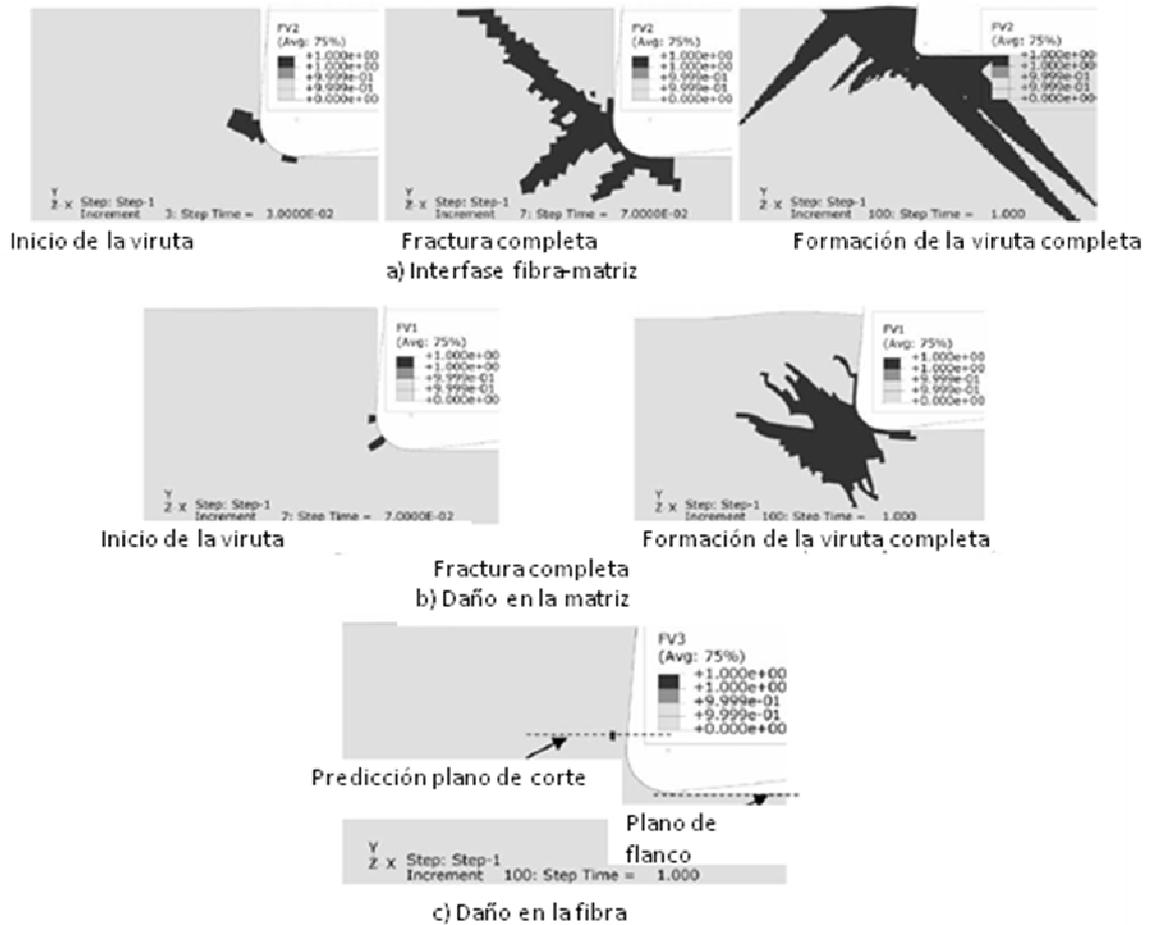


Fig 3.61: Análisis progresivo del fallo con el criterio de máxima tensión para orientación de fibra -45°

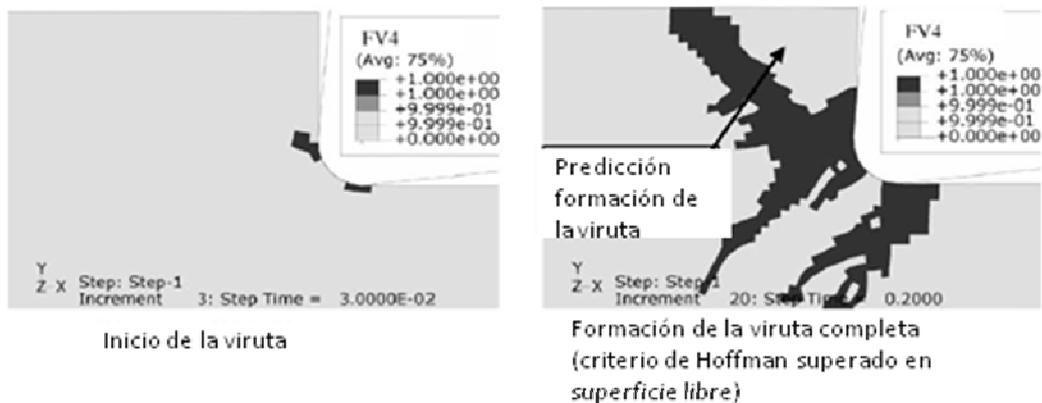


Fig 3.62: Análisis progresivo del fallo con el criterio de Hoffman para orientación de fibra -45°

Encontraron al analizar los resultados que el principal máximo de la fuerza de corte se produjo en la finalización de la formación de la viruta tanto para el criterio de Hashin, como el de la tensión máxima y el de Hoffman.

También puede ser visto en la Fig 3.63 que las fuerzas de corte calculadas con diferentes criterios de fallo tienen todas las mismas tendencias antes de completar la formación de viruta.

La viruta se inicia en el mismo momento en los tres casos. Sin embargo, la formación de la viruta completa se produce en diferentes momentos dependiendo del criterio de fallo. Primero ocurre para el criterio de Hoffman, después para Hashin, y, finalmente, para el criterio de máxima tensión. Esto se debe a la distinta naturaleza de estos criterios. Hoffman tiene en cuenta la interacción de todos los componentes de la tensión, mientras que Hashin sólo tiene en cuenta la interacción de dos componentes y no hay interacciones en el criterio de esfuerzo máximo.

En las siguientes figuras se muestra que las tendencias principales de las fuerzas de corte de los tres criterios son concordantes con los obtenidos por experimentación en el trabajo de Bhatnagar [7]. El modelo con el criterio de Hashin parece seguir más de cerca la tendencia experimental.

Sin embargo, las fuerzas de avance predichas no son coherentes con la medición obtenidos por Bhatnagar [7]. Esto puede ser debido según comentan los autores al efecto “bouncing back” de Wang y Zhang [6]. La recuperación elástica que sufre el material ante la pasada de la herramienta, contribuye a la generación de una fuerza hacia arriba que se opone a la fuerza de avance de la herramienta, haciendo que ésta aumente su valor. Este fenómeno no influye a la dirección x en la que se orienta la fuerza de corte, por eso los resultados son más aproximados a los experimentales. No consiguen por tanto reproducir el fenómeno en los resultados de las fuerzas de avance, cosa que si ocurría en la rotura de la fibra, que se producía en un plano más elevado que el plano de corte.

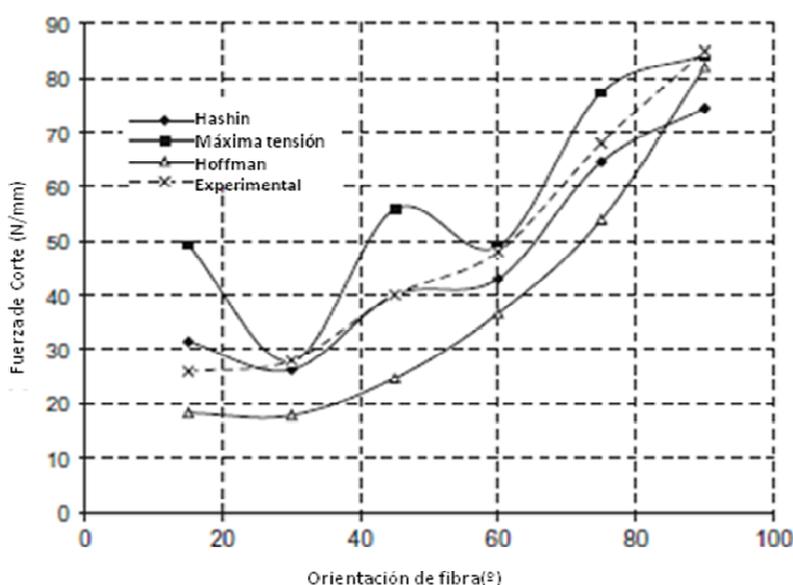


Fig 3.63: Evolución de las fuerzas de corte con la orientación de fibra. Resultados numéricos para los tres criterios de fallo y experimental

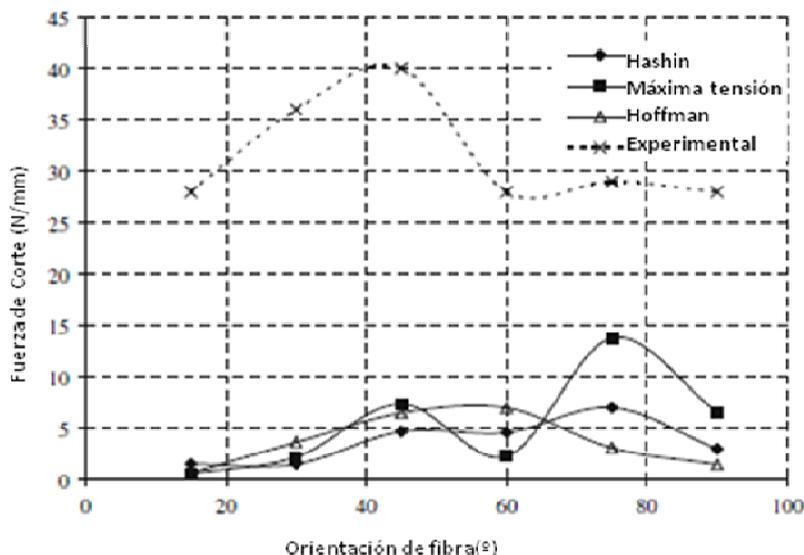


Fig 3.64: Evolución de las fuerzas de avance con la orientación de fibra. Resultados numéricos para los tres criterios de fallo y experimental

En cuanto a la propagación del daño, Lasri y compañía apuntan que parte de la herramienta y se propaga en direcciones paralelas y perpendiculares a la orientación de las fibras en los tres casos de modos de fallo. Los modos de fallo que se han visto para Hashin y tensión máxima estuvieron dominados por la tracción en la matriz y desunión en la interfase donde la fibra se despega de la matriz, siendo este segundo el principal modo de fallo durante el proceso de corte.

El alcance de los daños bajo la superficie muestra un aumento de profundidad de magnitud (ancho) con la orientación de la fibra. En la Fig 3.65, se puede ver una muestra del daño para orientación -15° en los tres criterios de daño. Para Hashin, los daños en la interfase y en la matriz son muy similares, mientras que para el criterio de máxima tensión es mayor el daño en la interfase fibra –matriz y mucho menor, solo localizado en la punta de la herramienta, el daño en la matriz. Este daño aumenta con la orientación de fibra, en concreto, la magnitud de los daños en la interfase y en la matriz con Hashin y máxima tensión fue mas que el doble de la profundidad del corte para las orientaciones más allá de -45° . El fenómeno anterior puede ser explicado por la variación de los mecanismos de deformación en la zona de corte, cuando se cambia la orientación de la fibra. Para orientación de las fibras más allá de -45° , la formación de viruta completa se hace más difícil por la resistencia de las fibras y el apoyo que les proporciona la matriz. Por lo tanto, para tener la formación de viruta completa, la herramienta de corte debe generar un aumento de carga.

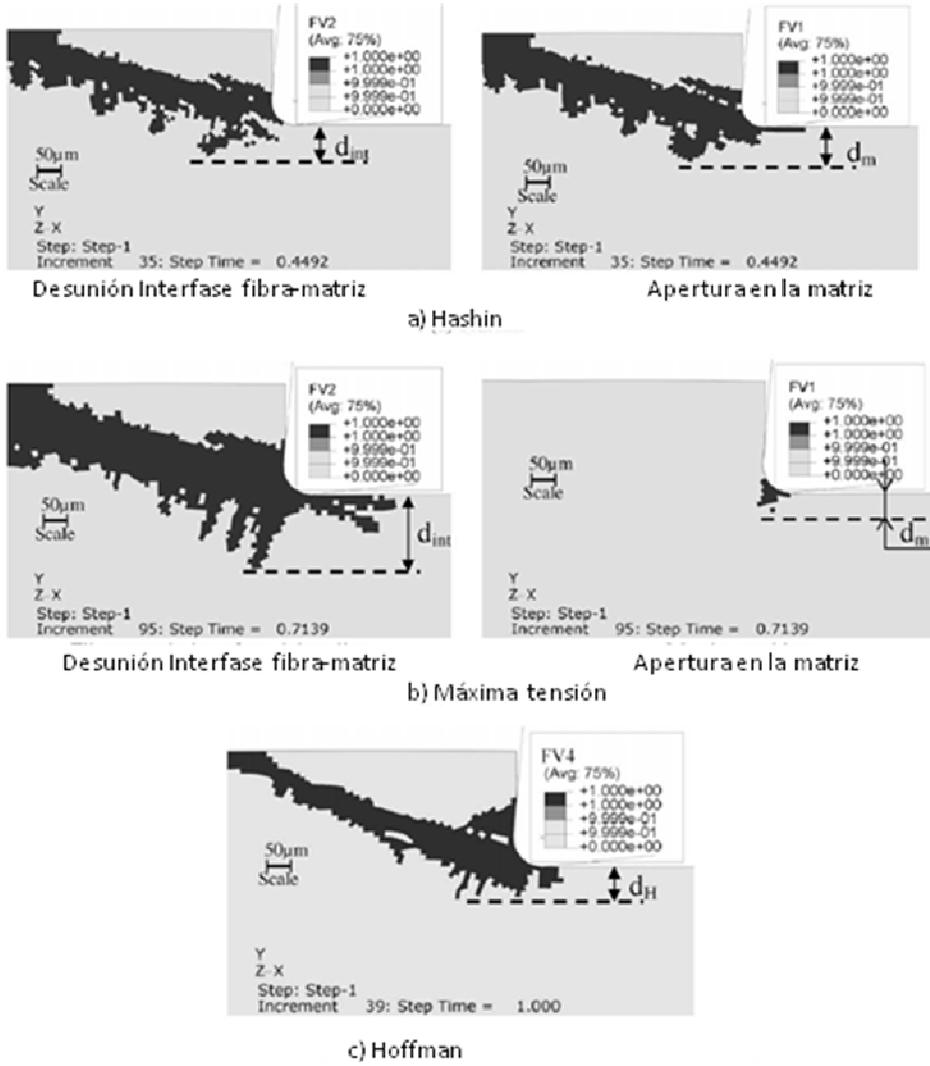


Fig 3.65: Modos de fallo (FV2: daño en la interfase, FV1: daño en la matriz, FV4: daño en criterio de Hoffman) para orientación de fibra de -15° . (a) Hashin, (b) Máxima tensión, (c) criterio de Hoffman

En las siguientes Fig 3.66, Fig 3.67, Fig 3.68, nos muestran como la tendencia del daño previsto para Hashin y el criterio de máxima tensión son similares.

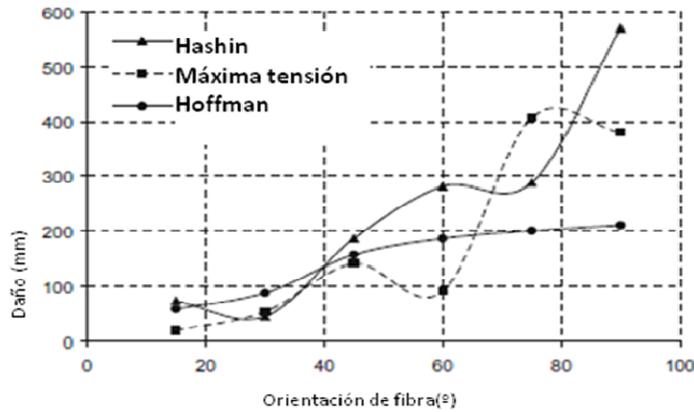


Fig 3.66: Variación del daño interno en la matriz con la orientación de la fibra para los tres criterios de daño

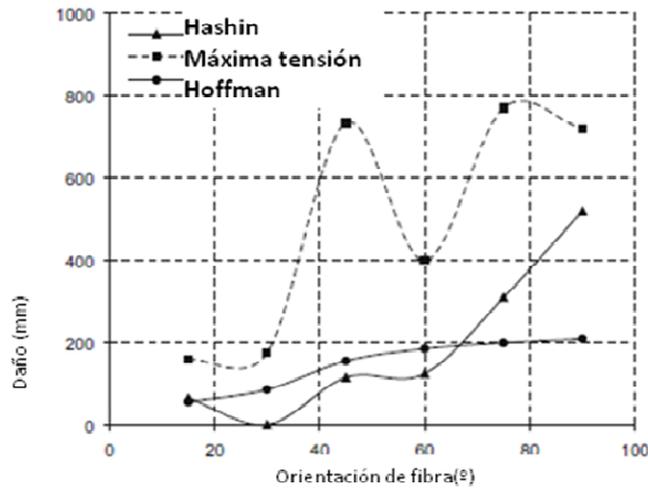


Fig 3.67: Variación del daño en la interfase fibra-matriz con la orientación de la fibra para los tres criterios de daño

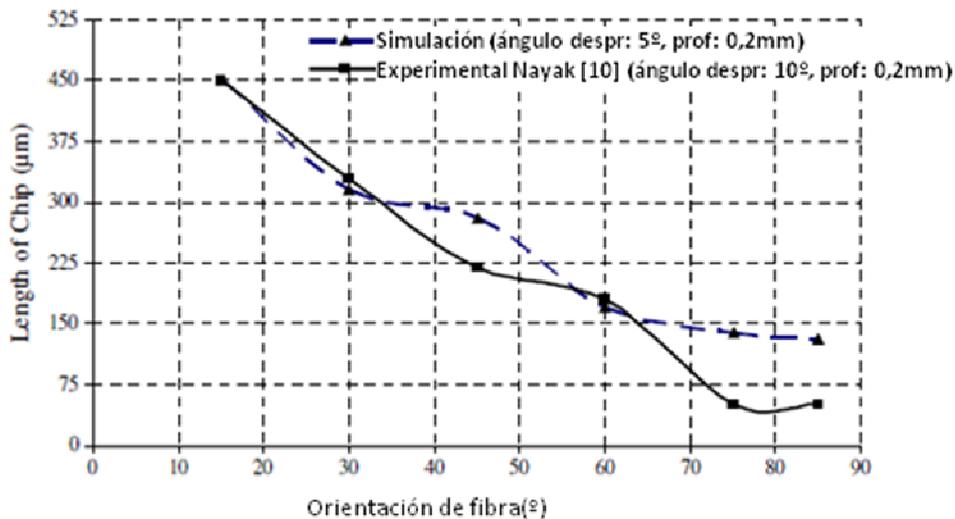


Fig 3.68: Evolución del espesor de la viruta con la orientación de fibra y comparación con los resultados experimentales obtenidos por Nayak

La tendencia que se muestra parece ser similar a los valores experimentales.

Observan además que existe una disminución de espesor de viruta con el aumento de la orientación de fibra. Esto confirma la fuerte relación entre el proceso de formación de la viruta y la orientación de las fibras como ya habían afirmado anteriores investigadores.

Capítulo IV

4 MODELO NUMÉRICO

4.1 Introducción

4.1.1 Geometría, malla y análisis

Se ha desarrollado un modelo de tensión plana en 2D usando el programa de elementos finitos ABAQUS/ Explicit, que supone una evolución a los análisis cuasiestáticos. Gracias a este módulo se ha podido desarrollar un análisis dinámico del proceso.

Se ha tomado para la construcción del mallado un elemento plano de cuatro nodos, que trabaja en tensión plana y que tiene un tamaño característico de $5 * 5 \mu\text{m}$, interpolado linealmente. ABAQUS lo nombra elemento tipo CPRS4.

La geometría y condiciones de contorno del modelo numérico pueden ser vistas en la figura:

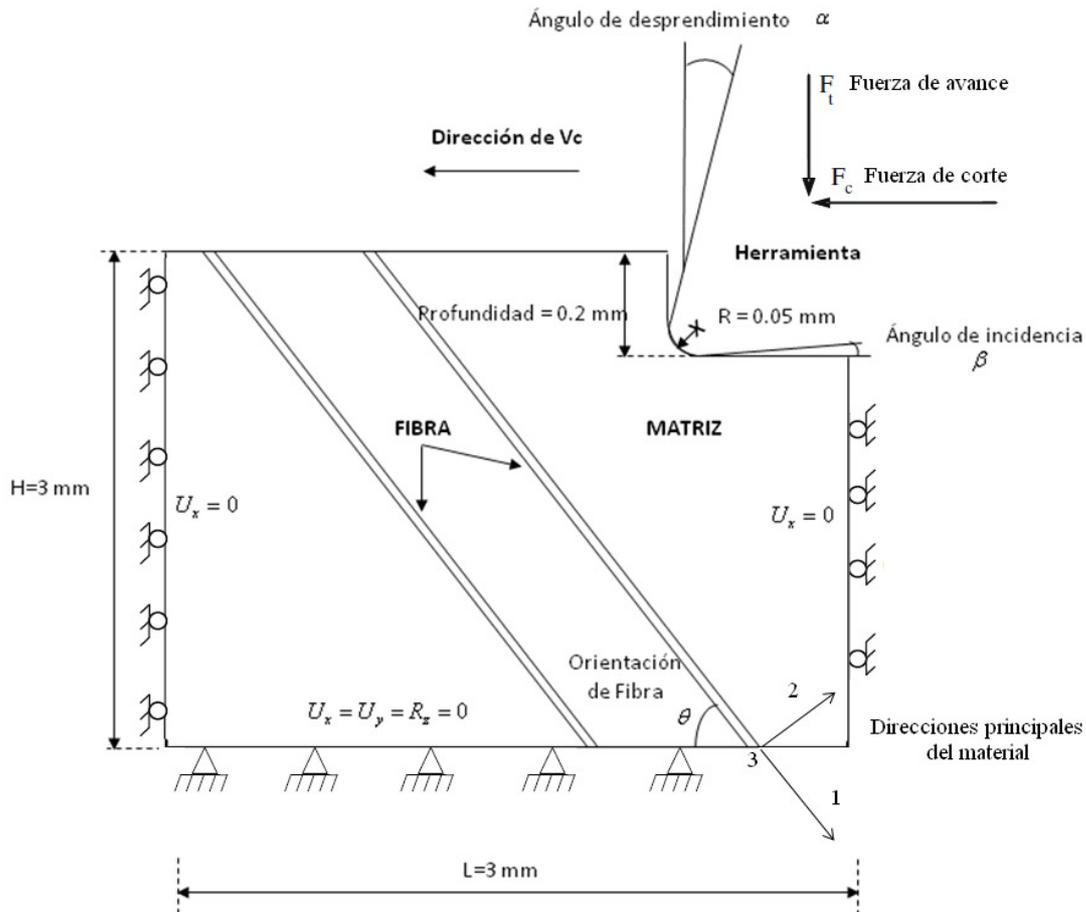


Fig 4.1: Representación del modelo numérico.

Los valores de los parámetros de corte y la geometría de la herramienta (profundidad de corte, velocidad de corte, ángulo de desprendimiento, ángulo de incidencia y radio de punta) han sido definidos de acuerdo a los experimentos de Bhatnagar [7](Bhatnagar et al., 2004) y Nayak [10] (Nayak et al., 2005), con el objetivo de validar los resultados numéricos.

El objetivo no consiste únicamente en analizar el inicio de la formación de la viruta, sino que se ha realizado un seguimiento de la evolución del proceso de corte, con el fin de determinar valores máximos de esfuerzos y daños.

La profundidad de corte, de 0,2 mm, se ha elegido teniendo en cuenta que es la mínima suficiente para encontrar condiciones estables durante el proceso de corte ortogonal. Este valor es muy pequeño comparado con la profundidad de corte necesaria a la hora de estudiar las condiciones estacionarias en los metales, dado que en el estudio del corte de materiales compuestos no se tiene en cuenta el calor generado ni las temperaturas en el material como ocurre en el corte de metales.

La problemática se presenta a la hora de establecer el paso de la simulación. El orden de tiempo requerido es el necesario para cruzar el elemento más pequeño en condiciones estables, y en el caso presente se mueve en torno a 10^{-10} y 10^{-9} segundos. Este hecho hace que los tiempos de simulación sean muy grandes. En ocasiones, el pequeño tamaño de elemento de malla y la excesiva deformación de los mismos ha llevado a que la simulación aborte. Es por ello que el tamaño de grano, de $5\ \mu\text{m}$, ha sido elegido como solución de compromiso entre precisión y validez de resultados y tiempo razonable de cálculo.

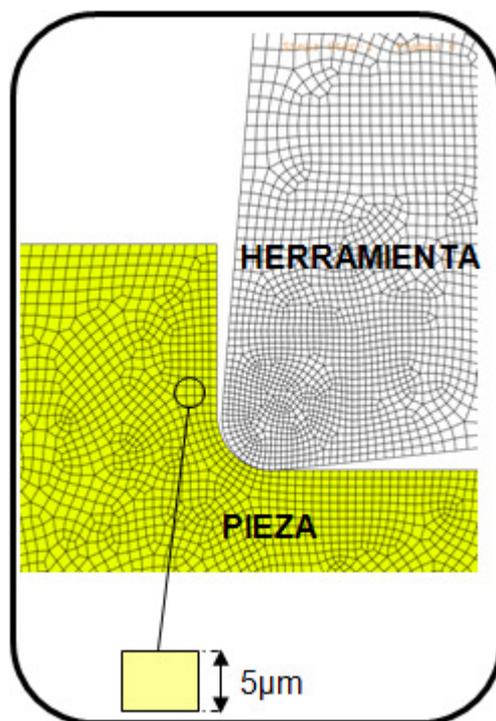


Fig 4.2: Representación del elemento de la malla.

4.1.2 Materiales y modelización del daño

Condiciones de contorno e hipótesis:

Se presenta un modelo micro-macro, mediante la utilización de un material equivalente homogéneo EOHM (macro-aproximación) y la técnica de malla adaptativa e incorporación de la densidad (micro-aproximación)

El material se ha modelado con un comportamiento elástico a rotura, teniendo en cuenta la anisotropía, según la Tabla 4.1:

Propiedades mecánicas	Fibra de vidrio
Módulo de elasticidad longitudinal, E_1	48 GPa
Módulo de elasticidad transversal, E_2	12 GPa
Módulo de elasticidad x-y, G_{12}	6 GPa
Coefficiente de Poisson, ν_{12}	0,19
Resistencia a tracción longitudinal, X^T	1200 MPa
Resistencia a compresión longitudinal, X^C	800 MPa
Resistencia a tracción transversal, Y^T	59 MPa
Resistencia a compresión transversal, Y^C	128 MPa
Resistencia al cortante longitudinal, S^T	25 MPa
Resistencia al cortante transversal, S^C	25 MPa

Tabla 4.1: Propiedades mecánicas del material compuesto.

Propiedades mecánicas	Herramienta
Densidad	14000Kg/m ³
Módulo de Young	100*100 N/m ²
Coefficiente de Poisson	0,3

Tabla 4.2: Propiedades mecánicas de la herramienta.

Se han definido por tanto las características y comportamiento del material, indicando el modo de fallo, densidad, elasticidad, resistencia a tracción y compresión (longitudinal y transversal) y coeficiente de Poisson. Estos parámetros han permanecido fijos durante todas las simulaciones. Por otra parte, se han definido otros parámetros difíciles de predecir como son la energía hasta rotura, la orientación de las fibras, coeficiente de fricción y disposición y tamaño del elemento de malla, que se han modificado dependiendo de la simulación.

Las características de la herramienta han sido también definidas. El parámetro variable que se ha tenido en cuenta en la herramienta es el ángulo de desprendimiento, que variará en función de la simulación. Se ha considerado un elemento rígido.

Los criterios de iniciación de la viruta para materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras largas se basan en la teoría de Hashin. El criterio de Hashin propone cuatro tipos de fallo del material: fallo por tensión en la fibra, fallo por compresión en la fibra, fallo por tracción en la matriz o fallo por compresión en la matriz.

Tracción en la fibra ($\sigma_{11} > 0$)
$$d^t_f = \left(\frac{\sigma_{11}}{X^t} \right)^2 + \alpha \left(\frac{\tau_{12}}{S^L} \right)^2 \leq 1 \quad (22)$$

Compresión en la fibra ($\sigma_{11} < 0$)
$$d^c_f = \left(\frac{\sigma_{11}}{X^c} \right)^2 \leq 1 \quad (23)$$

Tracción en la matriz ($\sigma_{22} > 0$)
$$d^t_m = \left(\frac{\sigma_{22}}{Y^t} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S^L} \right)^2 \leq 1 \quad (24)$$

Compresión en la matriz ($\sigma_{22} < 0$)
$$d^c_m = \left(\frac{\sigma_{22}}{2S^t} \right)^2 + \left[\left(\frac{Y^c}{2S^t} \right)^2 - 1 \right] \frac{\sigma_{22}}{Y^c} + \left(\frac{\tau_{12}}{S^L} \right)^2 \leq 1 \quad (25)$$

Donde σ_{11} indica la tensión en la dirección de la fibra, σ_{22} la tensión en la dirección transversal a la fibra, y τ_{12} la tensión en el plano de esfuerzo cortante.

Una vez el programa finaliza la integración bajo una carga determinada, el modo de fallo es evaluado, y si alguno de los criterios de fallo de Hashin alcanza la unidad significa que las propiedades elásticas de la pieza han sido deterioradas dependiendo del modo de fallo. La fibra falla en la dirección longitudinal y cortante, y la matriz en la dirección transversal y en la cortante.

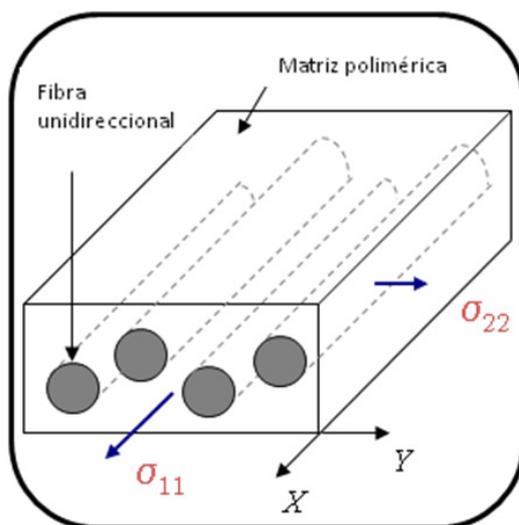


Fig 4.3: Principales tensiones y sus direcciones en el conjunto fibra-matriz

La iniciación del daño se refiere al comienzo del deterioro del material y se utiliza para predecir la ruptura y posterior arranque del elemento dañado.

La degradación de las propiedades del material ha sido modelada referenciándola a un nivel cero de rigidez. Este nivel cero no se alcanza inmediatamente después de la iniciación del daño, sino en el momento en que el elemento de la malla se rompe totalmente. El estado del nivel de energía es fundamental para simular el

comportamiento del material: cuando es implementado un nivel de energía bajo, el elemento es deteriorado justo después del comienzo del daño, mientras que un nivel alto de energía permite alta deformación del elemento antes de la rotura. En el caso de la fibra de vidrio, al tratarse de un material dúctil se presenta una erosión inmediata y progresiva los elementos de la malla una vez iniciado el daño hasta su degradación total. Materiales como la fibra de carbono permiten una alta deformación del elemento antes de romper, al tratarse de un material compuesto frágil, presentando fractura repentina.

Para introducir las propiedades de resistencia del material del criterio de Hashin en ABAQUS, se debe entrar en el módulo “Part”, y situándose en propiedades del material se elige “Mechanical/ Damage for fiber-reinforced materiales compuestos/ Hashin” (Fig 4.4) . Los valores de resistencia a introducir son los siguientes:

Longitudinal Tensile Strength: Resistencia a la tracción longitudinal.
Longitudinal Compressive Strength: Resistencia a la compresión longitudinal
Transverse Tensile Strength: Resistencia a tracción transversal
Transverse Compressive Strength: Resistencia a compresión transversal
Longitudinal Shear Strength: Resistencia longitudinal al esfuerzo cortante.
Transverse Shear Strength: Resistencia transversal al esfuerzo cortante.

En ABAQUS/ CAE, también es posible editar estos datos utilizando un Input File o archivo de entrada de extensión *.inp que crea el programa. Mediante el módulo “Job”, se selecciona en el apartado “Create / Model” el modelo creado, y si se pincha en “write input” ABAQUS/ CAE genera un archivo que se puede abrir con un editor de texto donde aparecen todos los parámetros establecidos. Una vez abierto el archivo, se puede encontrar:

```
*Damage Initiation, criterion=HASHIN  
1.2e+09, 8e+08, 5.9e+07, 1.28e+08, 2.5e+07, 2.5e+07
```

Donde aparecen todos los datos de resistencia. Este Input File es de gran utilidad a la hora de ahorrar tiempo ya que permite modificar rápidamente los parámetros deseados en vez de preparar un nuevo CAE y crear otro archivo de entrada cada vez que se modifique un dato o un parámetro del modelo. Esta opción también está disponible alternativamente para el resto de parámetros analizados, y se explica en los siguientes apartados en que parte del archivo de entrada se encuentra.

Para introducir el resto de propiedades del material en ABAQUS/CAE, se utiliza el módulo “Property”. Las figuras siguientes muestran donde introducir la densidad y el módulo de elasticidad (Fig 4.5 y Fig 4.6).

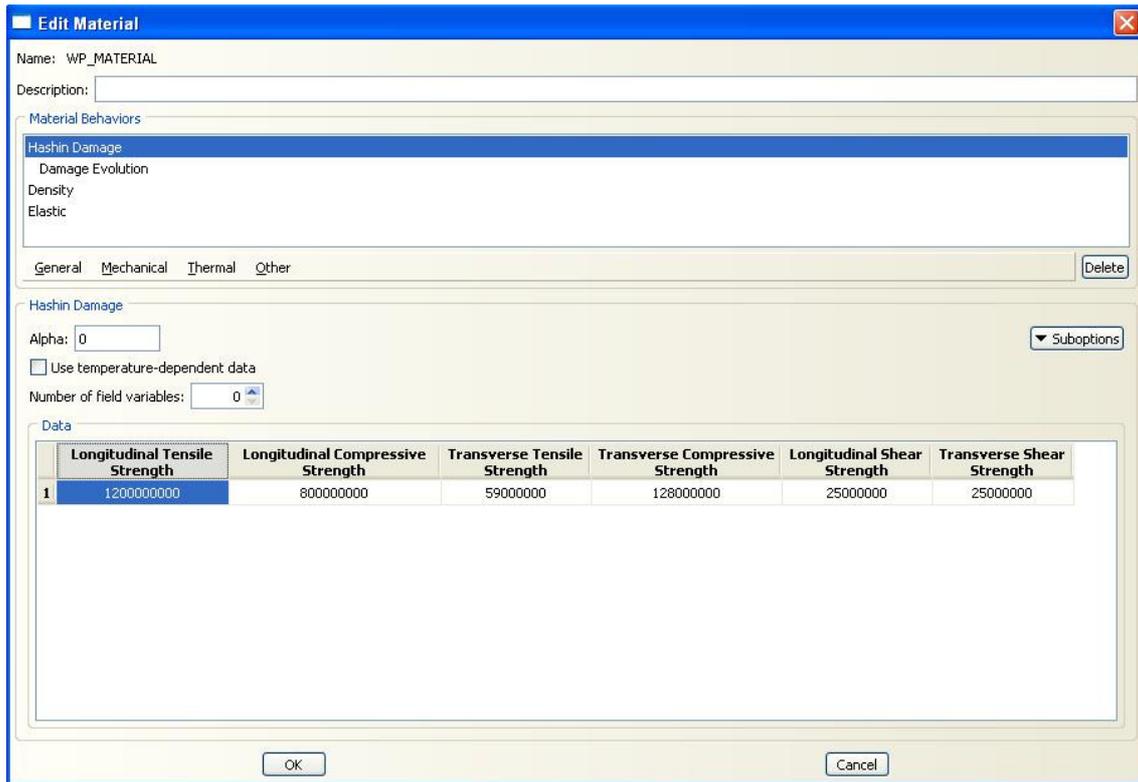


Fig 4.4: Introducción de las propiedades de resistencia del criterio de Hashin en ABAQUS.

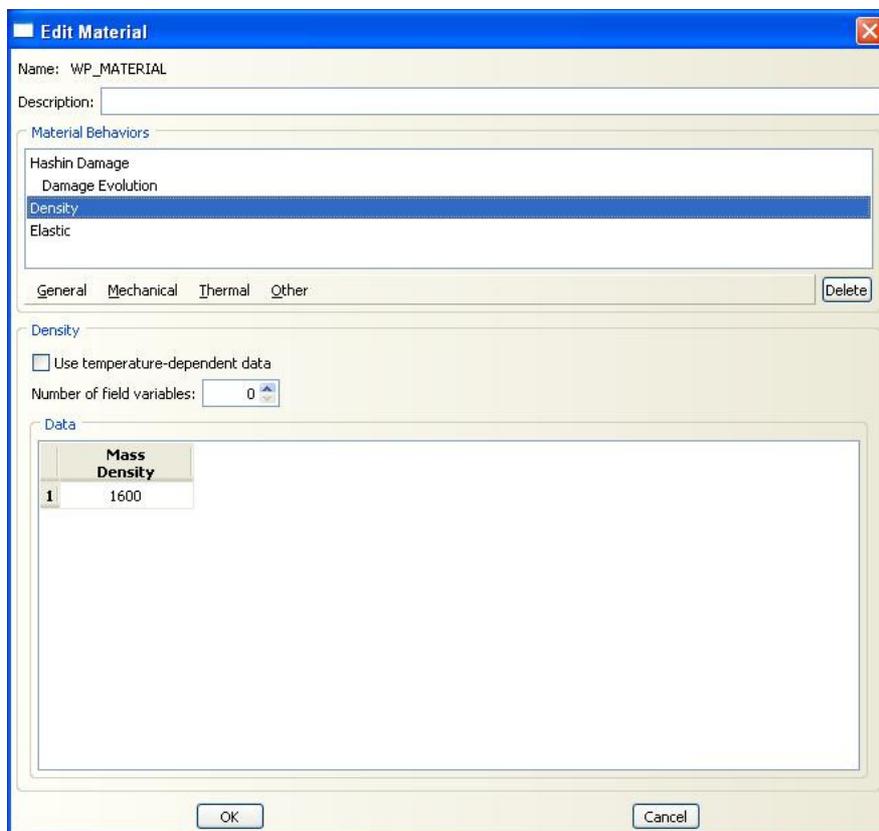


Fig 4.5: Introducción de la densidad del material en ABAQUS.

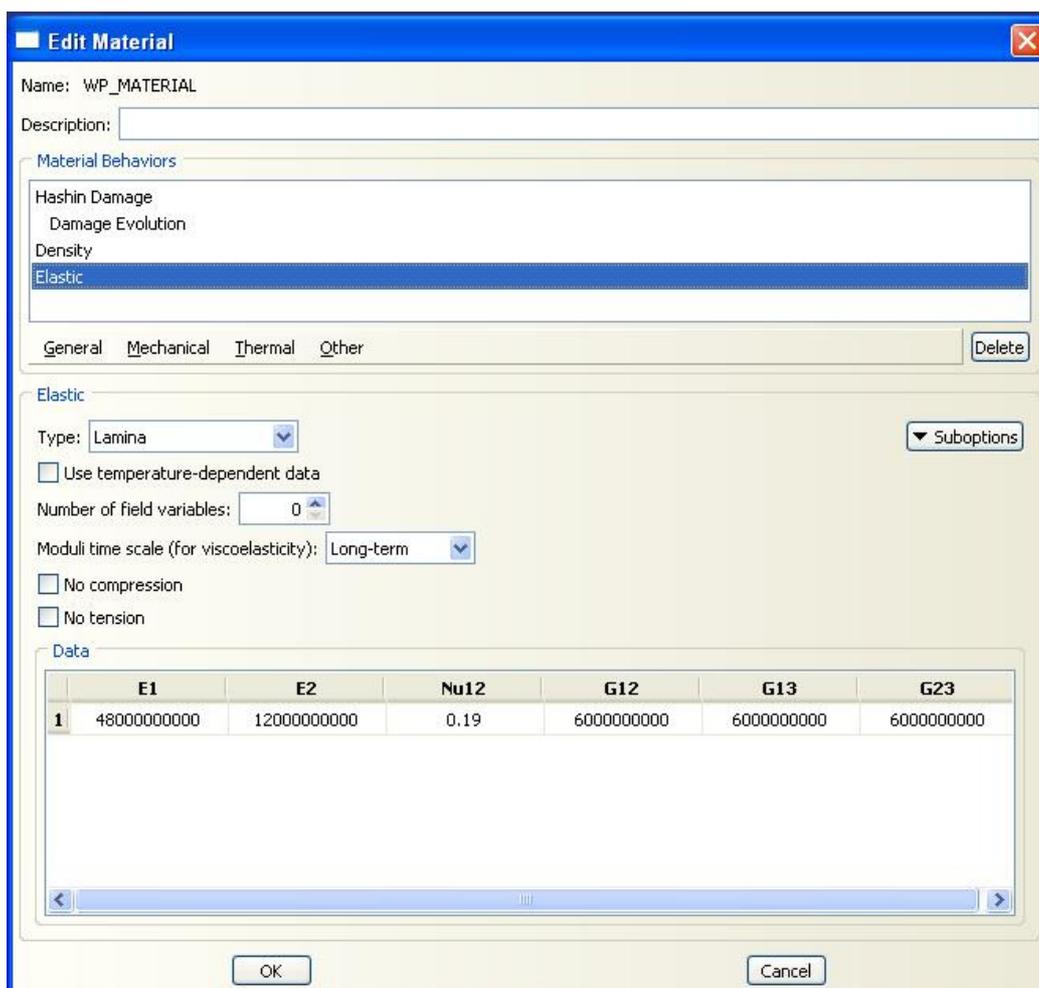


Fig 4.6: Introducción del módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson en ABAQUS

4.1.3 Contacto herramienta-material

La interacción entre el material y la herramienta se ha realizado con la opción disponible en ABAQUS/Explicit para el contacto entre la superficie de los nodos. La fricción y el contacto es uno de los más difíciles fenómenos a simular en el mecanizado.

Se han introducido tanto la herramienta como la pieza. Se utiliza el módulo “Assembly”, que sirve para trasladar una de las piezas respecto a la otra. Se traslada la herramienta hasta que esté en contacto con el material, el punto de contacto se establece en la punta de la herramienta.

Mediante el módulo “Interaction” se crea la interacción entre las dos piezas, seleccionando el tipo “Surface-to-surface contact (Explicit)”

Como coeficiente de fricción se ha establecido 0.5, posteriormente, y dada la incertidumbre de esta medida, se ha analizado la influencia de este parámetro modificando su valor inicial. Este valor se introduce en “Edit contact property”.

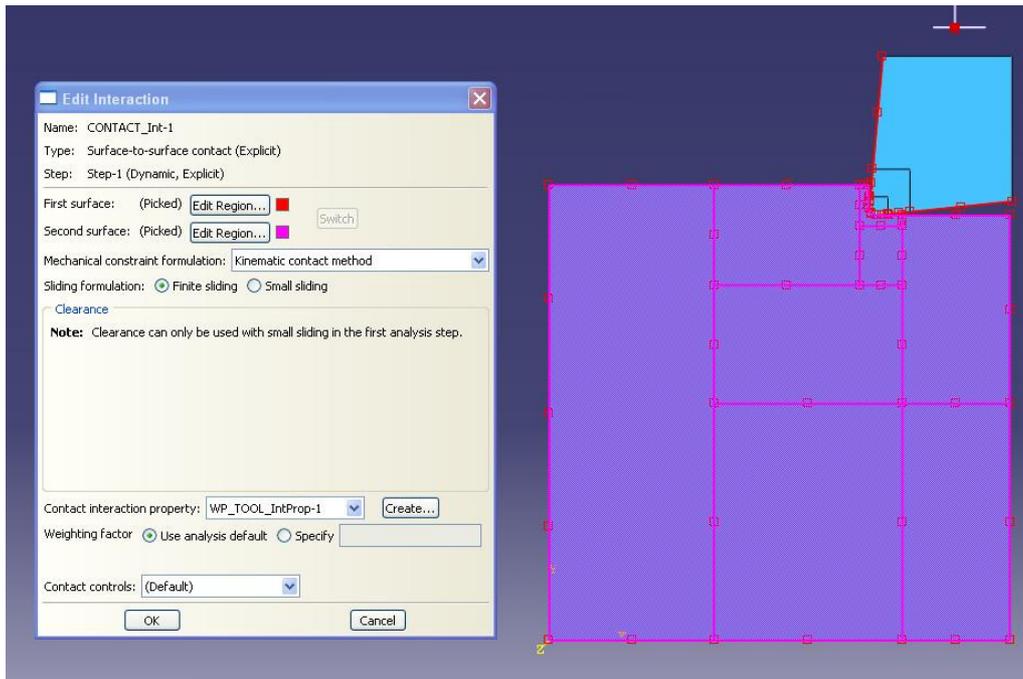


Fig 4.7: Modelización del contacto herramienta- material en ABAQUS

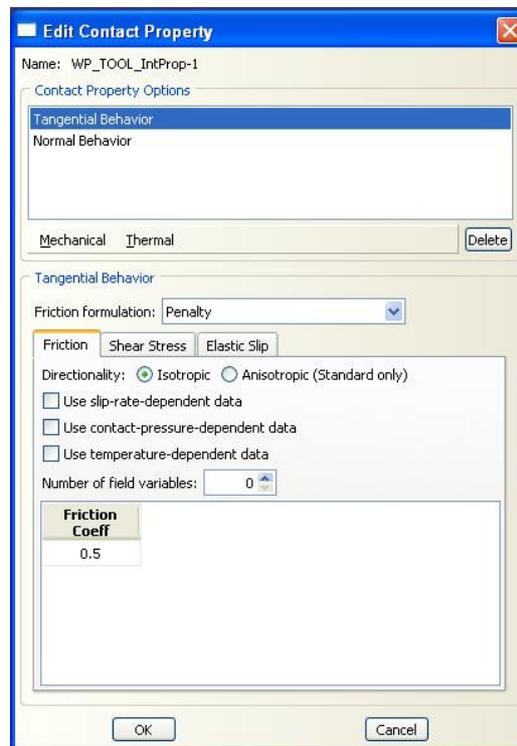


Fig 4.8: Introducción del coeficiente de fricción en ABAQUS

4.1.4 Condiciones de contorno

Es necesario establecer unas condiciones de contorno en la pieza y la herramienta para conocer su situación en el espacio y los desplazamientos que se van a permitir.

En este caso, para la pieza de fibra de vidrio a mecanizar se ha limitado el movimiento de forma que se evite su desplazamiento provocado la acción de la fuerza de corte una vez iniciado el contacto con la herramienta. Esto se consigue con un empotramiento, que, como se puede ver en la Fig 4.1, se puede lograr limitando el desplazamiento y el giro en las tres direcciones del espacio en la cara inferior del material opuesta al proceso de mecanizado y restringiendo únicamente el desplazamiento en la dirección x a las caras laterales de la pieza.

Para introducir los datos de las condiciones de contorno de la pieza en ABAQUS, en el módulo “Load”, se ha seleccionado “encastre” ($U_1=U_2=U_3=R_1=R_2=R_3=0$). Es necesario seleccionar los lugares donde se desea aplicar las coacciones, en este caso en el contorno inferior de la pieza. La segunda condición de contorno corresponde a las caras laterales o extremos de la pieza, donde seleccionando “displacement/rotation”, se marca $U_1=0$.

En el caso de la herramienta, las condiciones de contorno que se han establecido son que solo se permita desplazamiento en la dirección x. No limitar el movimiento en la dirección y supondría poder modificar el avance o profundidad de corte durante el proceso de mecanizado, cosa que no se contempla.

En la herramienta se ha utilizado “Velocity/ Angular velocity”, limitando el movimiento en la dirección “x” e introduciendo la velocidad de la herramienta. Se ha establecido como -0,01 m/s al establecerse la dirección de la velocidad de corte en el sentido negativo del eje x.

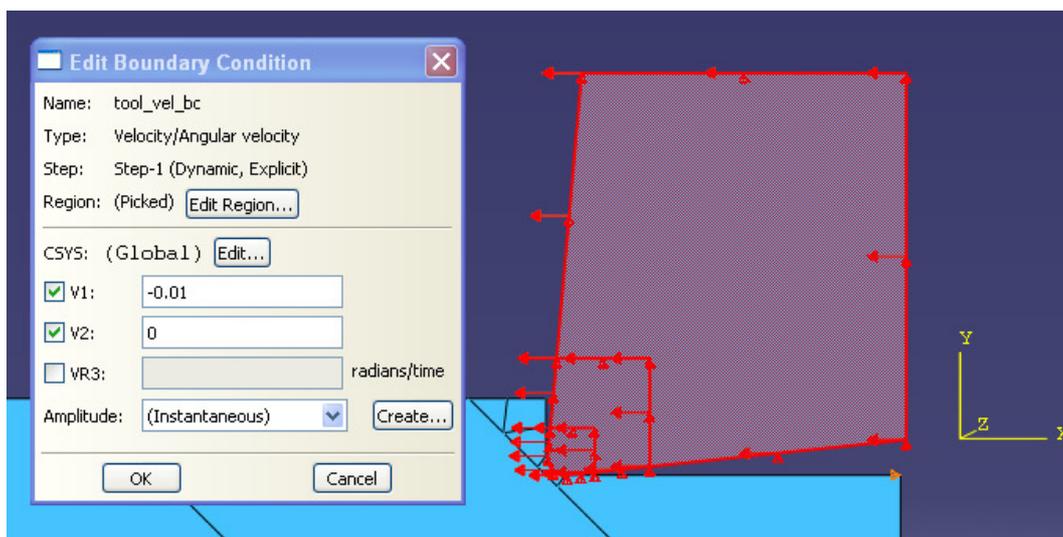


Fig 4.9: Introducción de las condiciones de contorno de la herramienta en ABAQUS

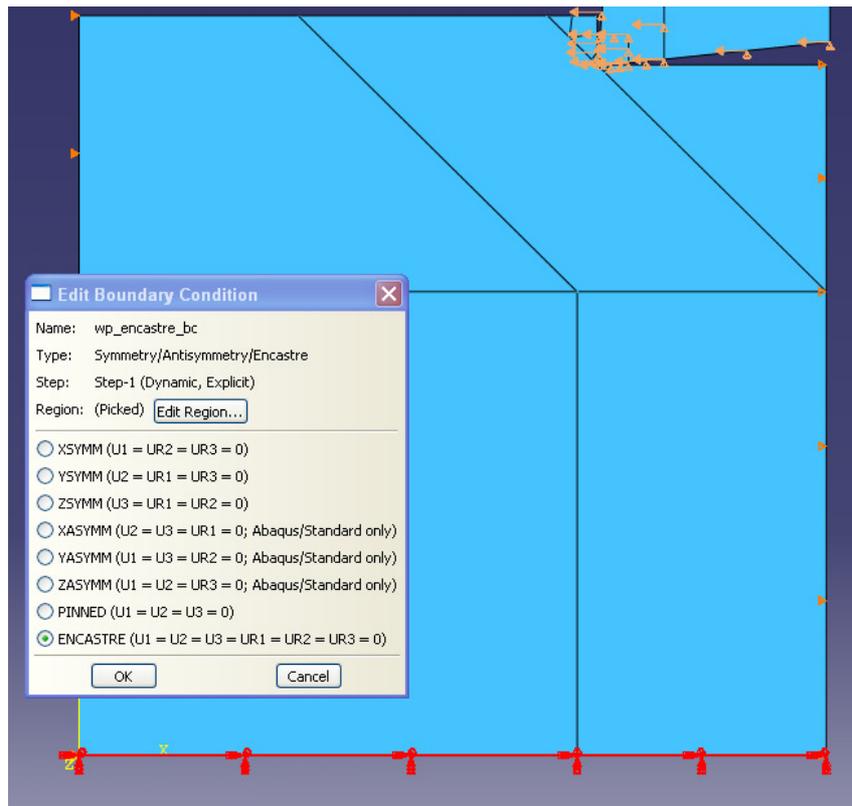


Fig 4.10: Introducción de las condiciones de contorno de la pieza en ABAQUS. Contorno inferior

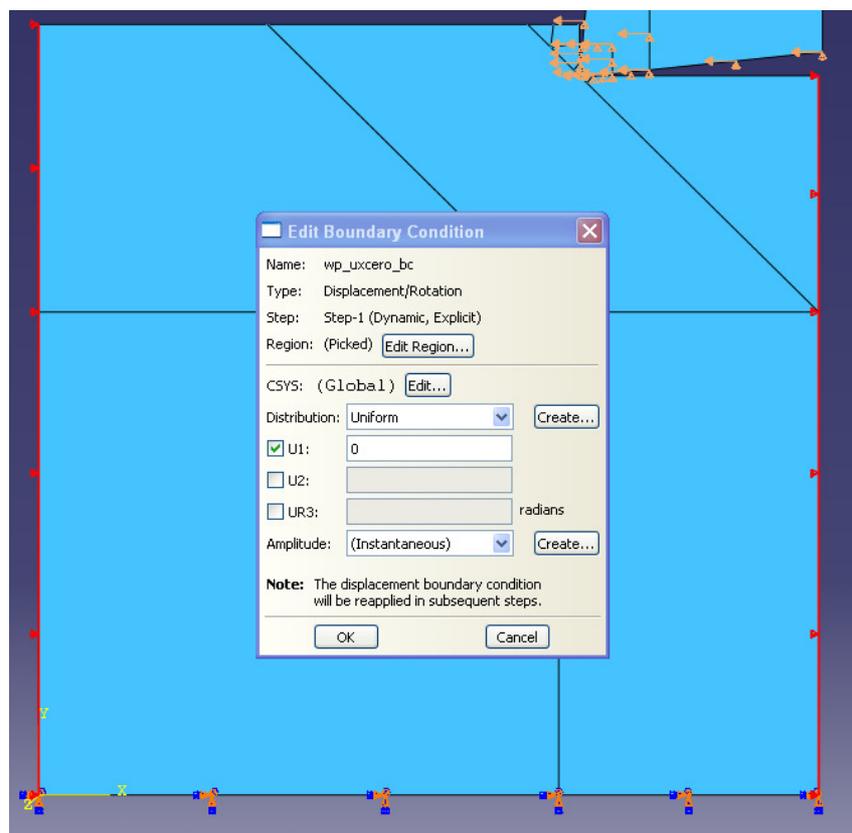


Fig 4.11: Introducción de las condiciones de contorno de la pieza en ABAQUS. Extremos

4.1.5 Tiempo y paso de la simulación

Para finalizar se debe establecer cual va a ser el tiempo de simulación y que paso o incremento de tiempo se va a utilizar.

Se recuerda que de estas dos variables va a depender el tiempo total de simulación, debiendo elegir una solución de compromiso entre conformidad de resultados y tiempo de proceso.

El tiempo de simulación que se ha elegido para los casos de este proyecto ha variado dependiendo del tipo de malla y de la orientación de fibra. En general, mallas libres y orientaciones de fibra bajas han necesitado de menos tiempo de convergencia con lo que se ha establecido un tiempo de simulación de 0.005 segundos. Mallas estructuradas y orientaciones de fibra altas, al presentar un mayor tiempo de convergencia, han necesitado en algunos casos de 0.015 hasta 0.02 segundos de simulación.

Si se tiene en cuenta que el paso de la simulación se ha tomado del orden de 10^{-9} o 10^{-10} , necesario para cruzar el elemento más pequeño de la malla, esto genera un alto tiempo de proceso del programa, pudiendo suponer de 1 millón a 10 millones de iteraciones o incrementos de tiempo.

Los valores de tiempo y paso de simulación han sido seleccionados en ABAQUS en el módulo “Step”, eligiendo un análisis “Dynamic Explicit”.

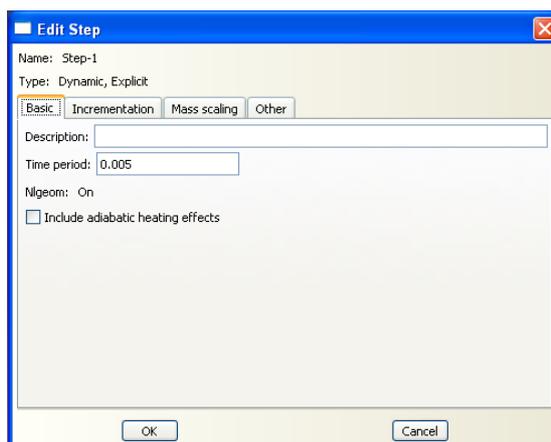


Fig 4.12: Selección en ABAUS del tiempo de simulación (“Time period”)

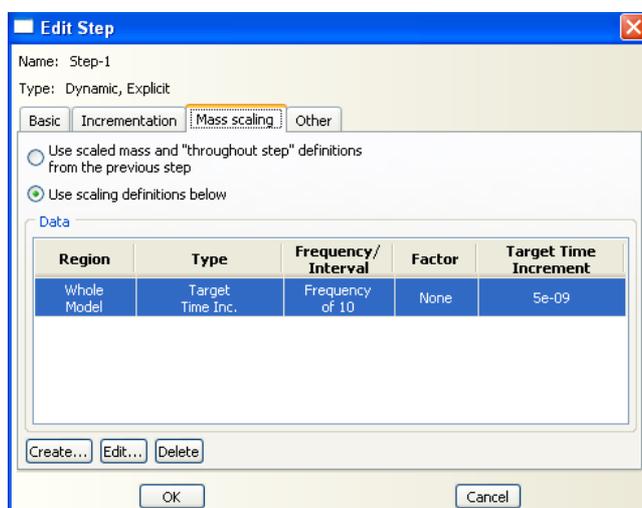


Fig 4.13: Selección en ABAQUS del paso de la simulación (“Target Time Increment”)

4.2 Parámetros analizados

A continuación se describen los parámetros que han sido modificados en las diferentes simulaciones realizadas con el modelo propuesto. Son los siguientes:

- Orientación de la fibra: definida por el ángulo comprendido entre el eje x y la dirección de la fibra, en sentido de las agujas del reloj.
- Ángulo de desprendimiento de la herramienta: formado por la superficie de desprendimiento y plano normal a la velocidad de corte.
- Forma de la malla: estructura interna de la malla del modelo de elementos finitos del material compuesto. Dirección y disposición de los elementos.
- Tamaño del elemento de malla: Sin modificar el tipo de elemento, distancia entre los nodos que definen cada elemento cuadrilateral.
- Energía de deformación: energía que soporta el material hasta rotura.
- Coeficiente de fricción: valor que modeliza la interacción entre herramienta y material.

Se analiza en los siguientes subapartados cada uno de estos parámetros en detalle y su influencia en el mecanizado.

4.2.1 Variación de la orientación de fibra

Nos encontramos ante el parámetro más influyente del presente estudio. La orientación en que la fibra se encuentra dispuesta en el refuerzo polimérico es fundamental en la generación de fuerzas y de daño en la pieza. Es por ello que se trata del parámetro con mayor número de simulaciones realizadas, eligiendo una gama de orientaciones de 0, -15, -30, -45, -60, -75 y -90°.

Estos ángulos han sido los que históricamente se han venido analizando en los diversos estudios que se pueden encontrar en el apartado de validación. No obstante los primeros informes y artículos se dedicaron a demostrar que la mejor gama de orientaciones de fibra se encuentra desde 0 o 90° tomadas con el sentido de las agujas del reloj, es decir, de 0 a -90° según la nomenclatura (Ver Fig 3.1: Nomenclatura para las orientaciones de fibra.)

Esto es debido a que, una vez la herramienta ataca la superficie a mecanizar, el hecho de encontrarse la fibra en la misma dirección que la velocidad de corte produce una mayor cantidad de grietas y el daño por debajo de la superficie mecanizada es considerablemente mayor. Las fibras que sobresalen del plano de corte doblan en la parte inferior del borde de la herramienta, se levantan hacia arriba por la acción de la fuerza de corte y no llegan a cortarse. Por tanto la viruta se forma con mucha dificultad. En este caso, el doblado de las fibras provoca la desunión en la interfase fibra-matriz, propagándose grietas de manera profunda en la pieza. Este fenómeno no es tan importante en los compuestos de fibra de vidrio como en los de fibra de carbono, ya que al tratarse de un material dúctil la grieta se genera de menor profundidad. Sin embargo el daño es igualmente importante al producirse compresión de las fibras con orientaciones positivas.

La elección del ángulo de orientación de las fibras es vital en el mecanizado, produciéndose diferentes modos de fractura y de fallo según el grado utilizado.

A grandes rasgos, como se ha expuesto en el capítulo de estudios experimentales, a 0° predomina el modo de fallo I, con la flexión como principal mecanismo de deformación y posterior fractura. Según la orientación aumenta de -15 a -90° , la compresión va tomando mayor importancia así como el modo II de fallo, al oponerse las fibras al avance de la herramienta. Las fuerzas de corte y avance se verán también influidas como consecuencia de esta disposición de las fibras en la matriz.

Para introducir el valor de la orientación de fibra en ABAQUS/CAE se utiliza el módulo “Property”, “Assign material orientation” y se selecciona la orientación deseada en “Angle”.

La mejor manera de editar la orientación de la fibra un vez se haya generado un modelo, como se comentó para los datos de resistencia del criterio de Hashin, es utilizando el Input File creado por el módulo CAE.

```
*Orientation, name=Ori-3
      1., 2.89120579329468e-16, 0., -
2.89120579329468e-16, 1., 0.
3, -45.
```

Con solo modificar el valor que aparece en último lugar (en este caso se trataría de un modelo con orientación de fibra de -45°) es posible cambiar el valor del parámetro y estar disponible para lanzar la simulación.

4.2.2 Variación del ángulo de desprendimiento de la herramienta.

Los estudios existentes han demostrado que el ángulo de desprendimiento de la herramienta, a pesar de no tener tanta influencia en los resultados como la orientación de la fibra, es un parámetro que se debe tener en cuenta en el estudio del corte ortogonal tanto de los materiales compuestos como de los metales.

En el estudio presente se ha tomado como uno de los parámetros que se han variado en la simulación.

La bibliografía argumenta que el incremento del ángulo de desprendimiento contribuye a una disminución de las fuerzas de corte necesarias para el mecanizado. El área de contacto material herramienta con ángulos pequeños es mayor y por tanto se produce una mayor fricción, y consecuentemente una mayor resistencia a compensar con mayores fuerzas de corte. Además, el calentamiento producido por la fricción puede dañar tanto a la pieza como a la herramienta, cuya vida en servicio se reduce drásticamente.

Nayak y Bhatnagar [10](Nayak et al., 2005) en la primera parte de su estudio demostraron que las fuerzas de corte disminuyen con el aumento de ángulo de desprendimiento de 30° después de lo cual se eleva de nuevo, proponiendo como herramienta óptima la de un ángulo de ataque de 30° . Además, lo consideran un aspecto de mayor importancia en el caso de materiales dúctiles como la fibra de vidrio.

Posteriormente Venu Gopala [12] (Venu Gopala et al., 2006) en su estudio llegaba a la conclusión de que el ángulo de desprendimiento tiene una influencia sobre el daño

mucho menor que la orientación de las fibras, aunque confirmaba esta disminución de las fuerzas con el aumento del ángulo.

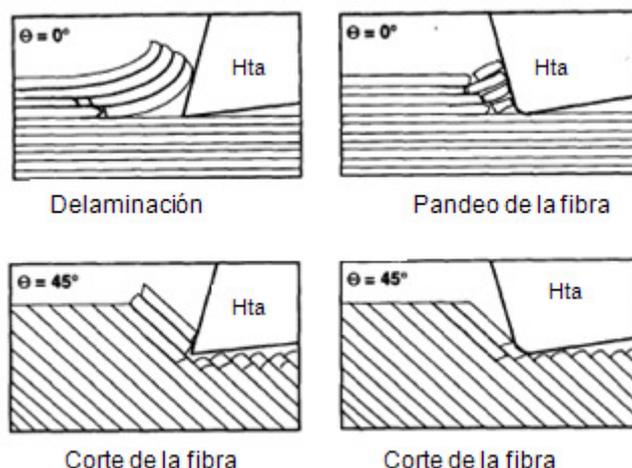


Fig 4.14: Mecanismos de corte con distintos ángulos de desprendimiento. (Arola et al.)[4]

A pesar de que existan parámetros más influyentes sobre el daño y las fuerzas, se considera de gran importancia y se ha dedicado un estudio a su variabilidad. Los valores del ángulo de desprendimiento que se han tomado para las distintas simulaciones son 0° , 5° y 10° .

Además, aunque sobre el papel parezca recomendable la utilización de una herramienta con el mayor ángulo de desprendimiento que sea posible, lo que generaría menores fuerzas de corte, es necesario buscar una solución de compromiso, ya que ésta pierde su robustez y con ángulos muy grandes empieza a debilitarse el filo y a aparecer fenómenos como el cráter en la punta o el aumento de la rugosidad en la superficie mecanizada.

A continuación se explica como variar en ABAQUS/ CAE este parámetro.

En el módulo “Part”, se selecciona el elemento que se desea modificar, en este caso la herramienta, a la que se ha llamado “TOOL PART”. En el desplegable “Section Sketch” aparece una cuadrícula con el dibujo de la herramienta para poder modificarla. Mediante los comandos “Edit- Transform- Rotate”, se elige la línea que define la superficie de desprendimiento, el eje de giro y permite seleccionar qué ángulo se desea modificar.

ANÁLISIS PARAMÉTRICO DEL CORTE ORTOGONAL DE MATERIALES COMPUESTOS MEDIANTE MODELIZACIÓN NUMÉRICA

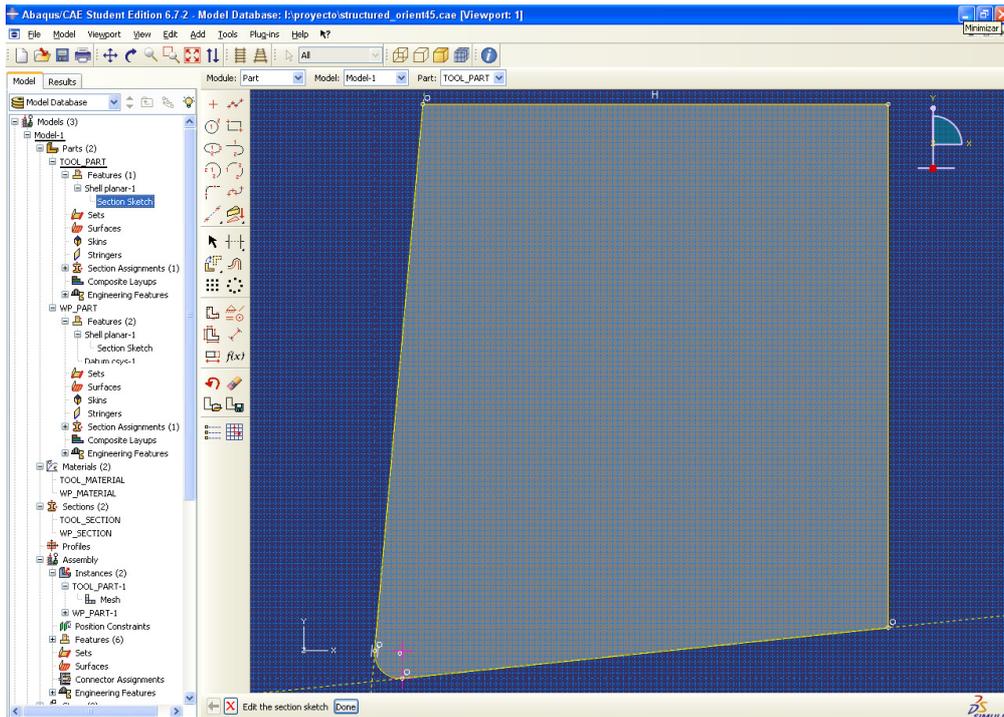


Fig 4.15: Modelado inicial de la herramienta en el módulo “Part” de ABAQUS/CAE

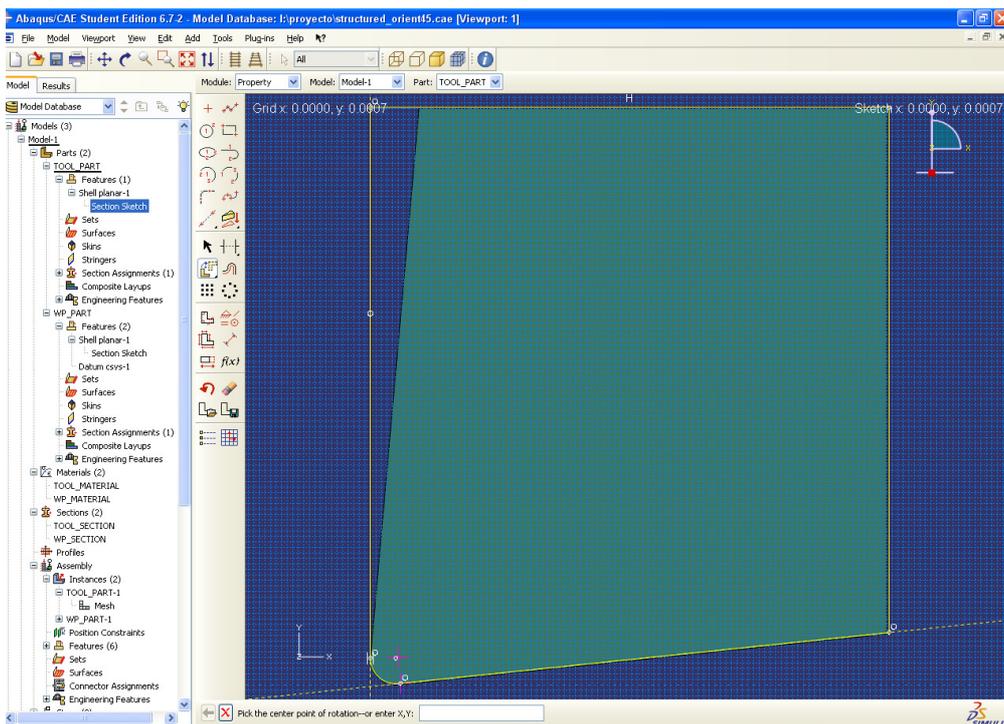


Fig 4.16: Modificación del ángulo de desprendimiento de la herramienta

En la Fig 4.16 se puede observar como se ha modificado el ángulo de -10° a 0° , señalado por el contorno, que ha pasado a 0° . Para que los cambios surjan efecto se debe seleccionar “Feature/ Regenerate”, y la angulación de la superficie de desprendimiento de la herramienta cambiará a partir de ese momento de forma definitiva.



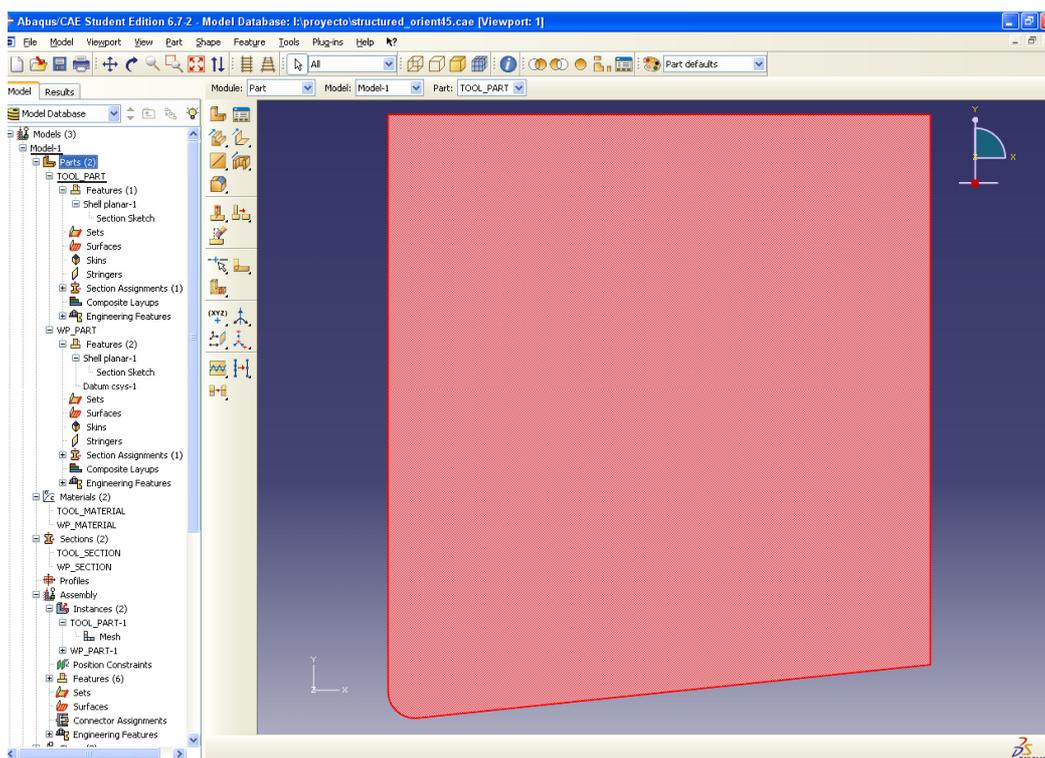


Fig 4.17: Forma final de la herramienta una vez modificado el parámetro del ángulo de desprendimiento a 0°

4.2.3 Variación de la malla.

La modificación de este parámetro se basa en identificar de qué manera la malla creada para el análisis con elementos finitos en ÁBAQUS puede influir en los resultados de la simulación del corte ortogonal en la fibra de vidrio. La estructura interna de la malla es importante ya que de su definición y elaboración puede depender la validez del modelo. El hecho de que los nodos se encuentren dispuestos en la malla libremente o de manera estructurada puede tener consecuencias en los resultados, como por ejemplo en los correspondientes al daño interno, ya que la deformación sufrida y la extensión del daño a través de ellos no van a ser la misma si se disponen ordenados o de manera aleatoria.

Por ello, se han elaborado tres tipos de malla en ABAQUS/CAE en el módulo “mesh” del programa:

- Una malla no estructurada (a la que nos referiremos como malla libre)
Para ello se divide la figura del material compuesto en diversas zonas dependiendo de la importancia para elegir una precisión de malla distinta en cada una. En el módulo “Mesh”, se eligen los puntos del contorno deseados para que se utilicen como inicio y referencia del mallado y posteriormente, en “mesh controls” se debe seleccionar “technique: free”, para conseguir una disposición aleatoria en el interior de cada sector. Cuanto más juntos se coloquen esos puntos, más precisa será la malla y más pequeño el elemento. Se modificó y

perfeccionó manualmente la zona que rodea al filo de la herramienta, con el objetivo de conseguir los resultados más perfectos en dicha zona, ya que es donde una vez comenzada la simulación se forma el inicio de la viruta y posteriormente su evolución. Por el contrario, zonas más alejadas del contacto con la herramienta se han descuidado más en el sentido de su aleatoriedad, dado su menor importancia de estudio.

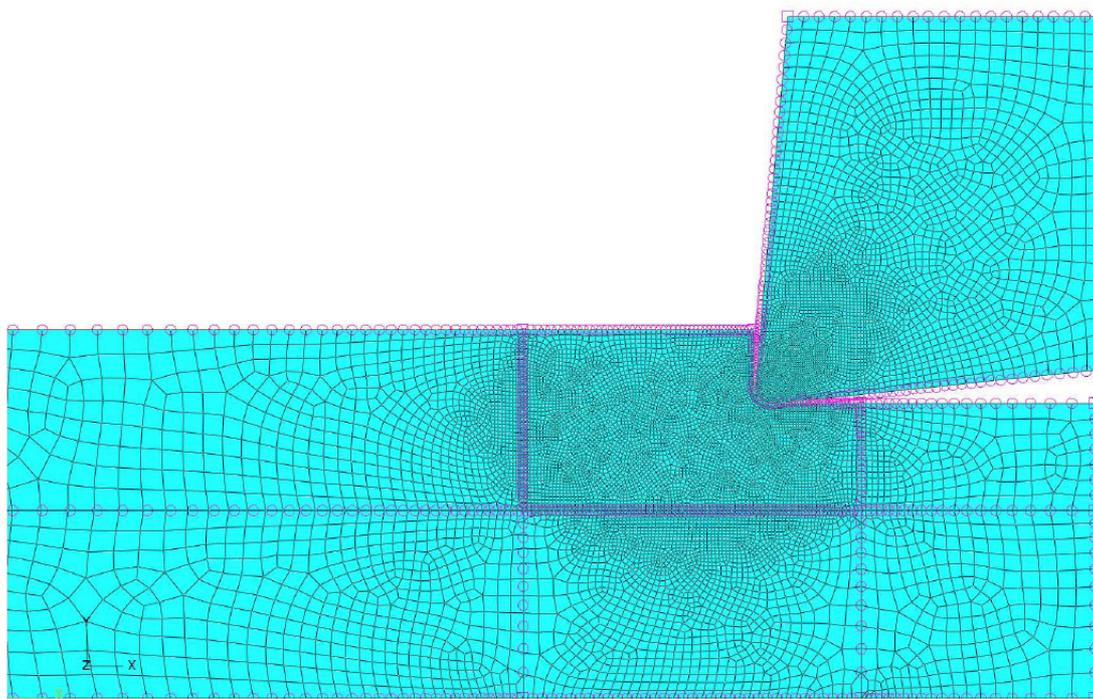


Fig 4.18: Modelo de malla libre generada con ABAQUS/CAE

En la Fig 4.18 se puede observar como en la zona de contacto entre pieza y herramienta se encuentra el tamaño de elemento más pequeño ya que se ha mallado con más detalle eligiendo manualmente puntos del contorno muy cercanos donde se desea que empiece la malla y de esa manera posibilitar una malla más fina. La zona más alejada, de menor interés, tiene un mayor tamaño de elemento para así simplificar los cálculos.

- Una malla estructurada a $90/0^\circ$. La disposición aleatoria de los elementos de la malla libre puede provocar que los resultados no sean del todo fiables. Una malla estructurada va a permitir ordenar los elementos en la dirección que se considere oportuna y probablemente repercute en una mayor precisión de la simulación. En cualquier caso se ha modificado el parámetro para ver de qué magnitud es esta influencia.

En este caso, en “mesh control” se selecciona “technique: structured”, y con una división de zonas similar a la del caso de la malla libre se realiza un mallado a 90° . En este caso, no se ha descuidado tanto las zonas más alejadas de la zona de contacto, permitiendo un estudio más completo, y se diseñó un modelo de material compuesto de mayor altura para poder analizar el daño en toda su profundidad. Como cabe esperar, este hecho repercute en un mayor tiempo de simulación.

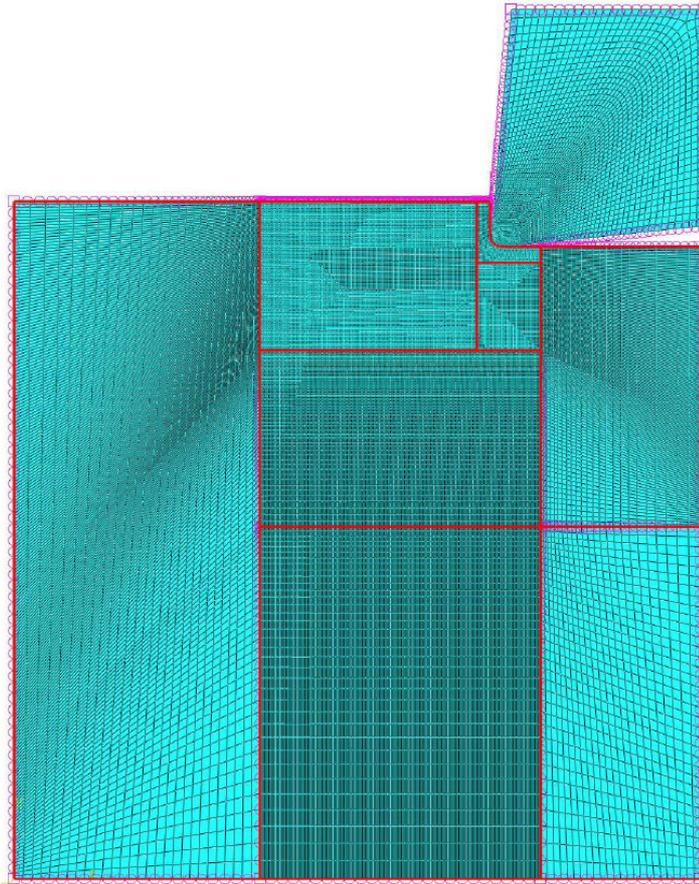


Fig 4.19 : Modelo de malla estructurada 90/0° generada con ABAQUS/CAE

- Una malla estructurada a 45°. La tercera modificación de este parámetro consiste en la realización de una malla estructurada a 45°. Se ha construido de manera muy similar a la anterior, con la particularidad de que en la zona cercana a la herramienta la malla está orientada con una inclinación de 45°.

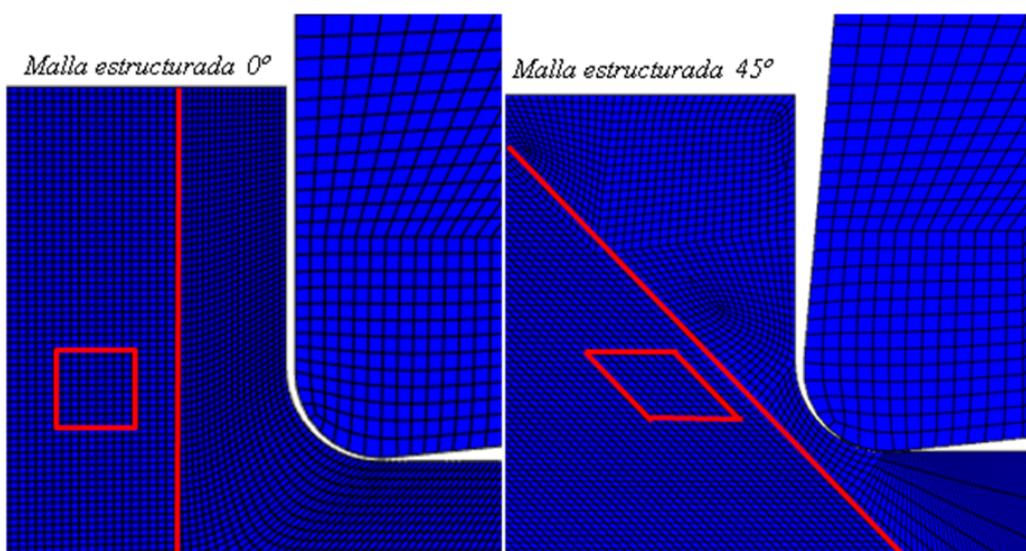


Fig 4.20: Comparación de la disposición de los elementos en la malla estructurada a 0/90° y la malla estructurada a 45°.

4.2.4 Variación del tamaño del elemento de malla.

Adicionalmente al parámetro de tipo de malla, se ha estudiado la influencia de otro parámetro relacionado con el mallado, como es el del tamaño del elemento de la malla, inicialmente seleccionado de $5 \times 5 \mu\text{m}$. Se ha modificado este parámetro para la malla estructurada a $90/0^\circ$, con unos cuantos casos de estudio, en concreto con tamaños de elemento de 7×7 , 9×9 y $12 \times 12 \mu\text{m}$.

Esto se consigue eliminando el mallado que ya se tenía construido, y eligiendo de nuevo los puntos para la realización del nuevo mallado, teniendo en cuenta de nuevo las zonas que son más importantes para el estudio del mecanizado. Evidentemente, si el tamaño de elemento es mayor, los puntos que se han tomado para la construcción de la malla han sido más distantes.

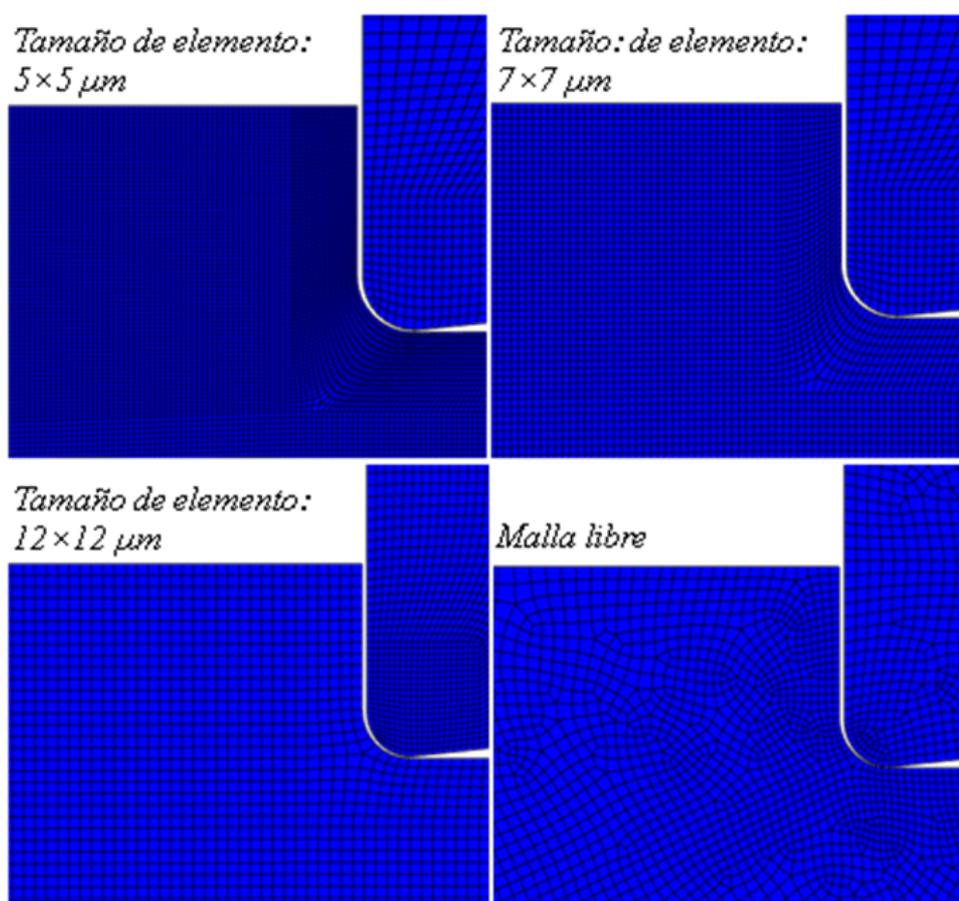


Fig 4.21: Diferentes tamaños de elemento de malla y malla libre.

4.2.5 Variación de la energía de deformación.

Otro de los parámetros que se consideran difíciles de analizar es la energía de deformación del material compuesto, o energía hasta rotura.

La energía es trabajo y por tanto cuando se modifica este parámetro se está variando la cantidad de energía necesaria para eliminar un volumen de material cuando se realiza el mecanizado, es decir, la energía necesaria para la deformación del material hasta su

rotura. El comportamiento del material se verá influido por este parámetro, produciéndose valores muy altos de deformación en los nodos de la malla para altos niveles de energía.

La introducción de este parámetro en ABAQUS se realiza dentro de las propiedades del material, en el módulo “Part”, y tras ser elegido el criterio de fallo de Hashin. Un sub apartado de “Damage Evolution” ofrece la posibilidad de cambiar la energía.

Los datos que se deben introducir dentro del sub apartado “Damage evolution” son:

- Energía hasta rotura longitudinal en tracción (Longitudinal Tensile Fracture Energy)
- Energía hasta rotura longitudinal en compresión (Longitudinal Compressive Fracture Energy)
- Energía hasta rotura transversal en tracción (Transverse Tensile Fracture Energy)
- Energía hasta rotura transversal en compresión (Transverse Compressive Fracture Energy)

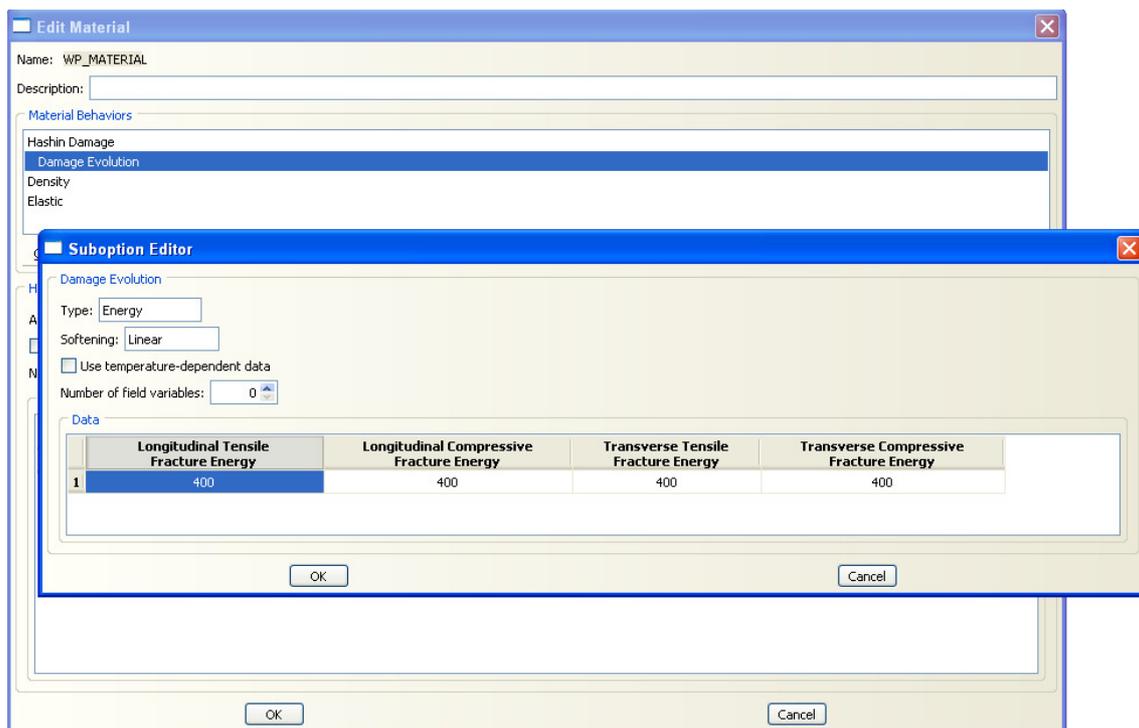


Fig 4.22: Introducción de la energía hasta rotura en el apartado de evolución del daño en ABAQUS.

Se ha realizado el estudio inicial utilizando un valor de 400 J/mm² para todos los datos de energía hasta rotura longitudinal, transversal, a tracción y a compresión.

Se han lanzado posteriores simulaciones con 200 y 600 J/mm². Este parámetro también puede ser modificado en el Input File simplemente cambiando los valores de energía recogidos en el siguiente extracto:

```
*Damage Evolution, type=ENERGY  
400.,400.,400.,400.
```

Método que como en el caso de la variación de los parámetros anteriores ahorra tiempo y repetición de cálculos.

4.2.6 Variación del coeficiente de fricción.

El coeficiente de fricción es un parámetro que no ha sido estudiado en profundidad en los artículos que tratan sobre el mecanizado de materiales compuestos de la bibliografía. Se trata de un parámetro difícil de predecir, ya que simula la interacción entre la herramienta y pieza, y se puede suponer que va a verse modificado por cualquier variación producida en la morfología de las superficies en contacto de estos dos elementos, como por ejemplo la orientación de fibra o el ángulo de desprendimiento de la herramienta. En la mayoría de los estudios se suele fijar este parámetro con un valor aproximado de 0.3 en vez de utilizar un rango de coeficientes.

En el estudio de Ali Mkaddem [13] (Mkaddem et al., 2008) se hace hincapié en actualizar el coeficiente de fricción de cada caso estudiado de orientación de fibra. (Ver Fig 3.54: Variación del coeficiente de fricción con la orientación de fibra).

Ya anteriormente Nayak y sus colaboradores [10] (Nayak et al., 2005) encontraron que el coeficiente de fricción aumenta con la orientación de la fibra, sin embargo como se ha comentado la mayoría de los modelos lo consideran constante.

En el presente proyecto se han realizado varias simulaciones modificando el coeficiente de fricción para comprobar si tiene realmente influencia en los resultados de la simulación, en concreto se ha simulado para coeficientes de 0.3, 0.5 y 0.9, trabajando con una misma malla y orientación de fibra.

4.2.7 Tabla resumen de parámetros

Se recogen a continuación todos los parámetros del modelo, tanto de la pieza de fibra de vidrio como de la herramienta.

Se pueden encontrar todos los parámetros variables descritos en los anteriores apartados, con los valores que se han utilizado para estudiar su influencia en el proceso, más los que permanecen fijos, cuya variabilidad escapa al contenido de este proyecto y que serán propuestos como trabajos futuros complementarios.

Parámetro	Valores utilizados
Fibra de vidrio	
Evolución del daño	Criterio de Hashin
Orientación de fibra	0°, -15°, -30°, -45°, -60°, -75°, -90°
Tipo de malla	Libre, estructurada 90/0°, estructurada 45°
Tipo de elemento	5*5, 7*7, 9*9, 12*12 (μm)
Energía	200, 400, 600 (J/mm ²)
Herramienta	
Geometría	Elemento rígido
Ángulo de desprendimiento	0°, 5°, 10°
Radio de punta	0.05 mm
Profundidad	0.2 mm
Velocidad	0.01 m/s
Interacción Herramienta-Pieza	
Coefficiente de fricción	0.3, 0.5 y 0.9

Tabla 4.3: Tabla resumen de parámetros.

Capítulo V

5 VALIDACIÓN Y RESULTADOS

5.1 Validación

Se ha procedido a la validación del modelo comparando los resultados con los experimentales de la bibliografía. Se exponen las particularidades observadas en cuanto a las fuerzas de corte, fuerzas de avance y daño en profundidad en la matriz.

5.1.1 Fuerza de corte

Se ha comparado primeramente los resultados del modelo numérico con los obtenidos experimentalmente por Nayak en [10] (Nayak et al., 2005).

Se trata del resultado del experimento que realizó con una fresadora de CN modificada para la aplicación del corte ortogonal con una herramienta de ángulo de desprendimiento de 0° y radio de punta de $5\mu\text{m}$. La profundidad de corte fue $0,2\text{ mm}$.

La comparación resulta posible al proponerse un modelo numérico con idénticas condiciones de corte, como se comentó en el Capítulo 4 cuando se describe el modelo.

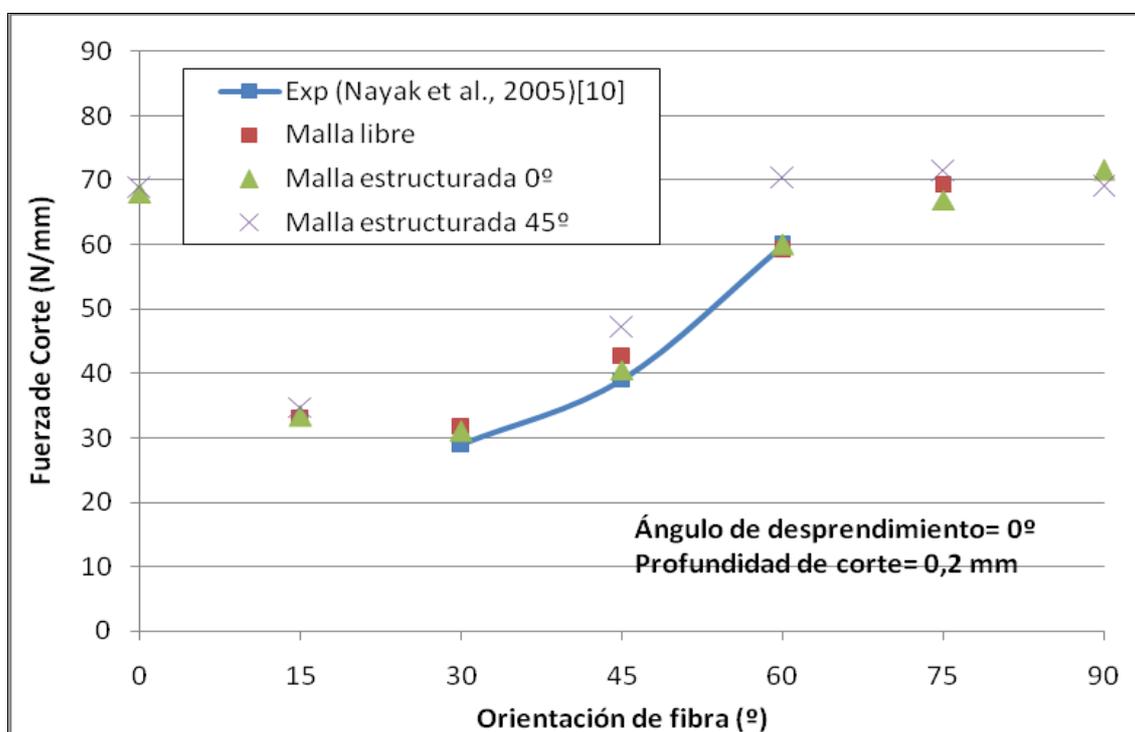


Fig 5.1: Comparación de resultados experimentales de Nayak [10] con los obtenidos en la simulación para fuerza de corte frente a la orientación de fibra con un ángulo de desprendimiento de 0°

Se puede observar en la Fig 5.1 que tanto la tendencia como los valores de la fuerza de corte del modelo se asemejan bastante a los experimentales, en particular en los casos de malla libre y malla estructurada 0/90°.

Los resultados que más se aproximan a los experimentales son los obtenidos para la malla estructurada a 0/90°, ya que en las orientaciones de -45 y -60° los valores incluso se superponen, aunque los de malla libre se encuentran muy cerca. Los valores de malla estructurada 45° se separan un poco de los experimentales pero la tendencia es la misma, luego el fenómeno ocurrido durante el mecanizado se está reproduciendo.

En cualquier caso se dispone solo de tres valores experimentales para herramienta de ángulo de desprendimiento 0°, a continuación se muestran más resultados para otras geometrías de herramienta.

Nayak y el resto de investigadores, en el mismo estudio [10], realizan el mismo experimento para un ángulo de desprendimiento de la herramienta de 10°, a la misma profundidad de corte. Se comparan sus resultados con los del modelo propuesto en la siguiente Fig 5.2.

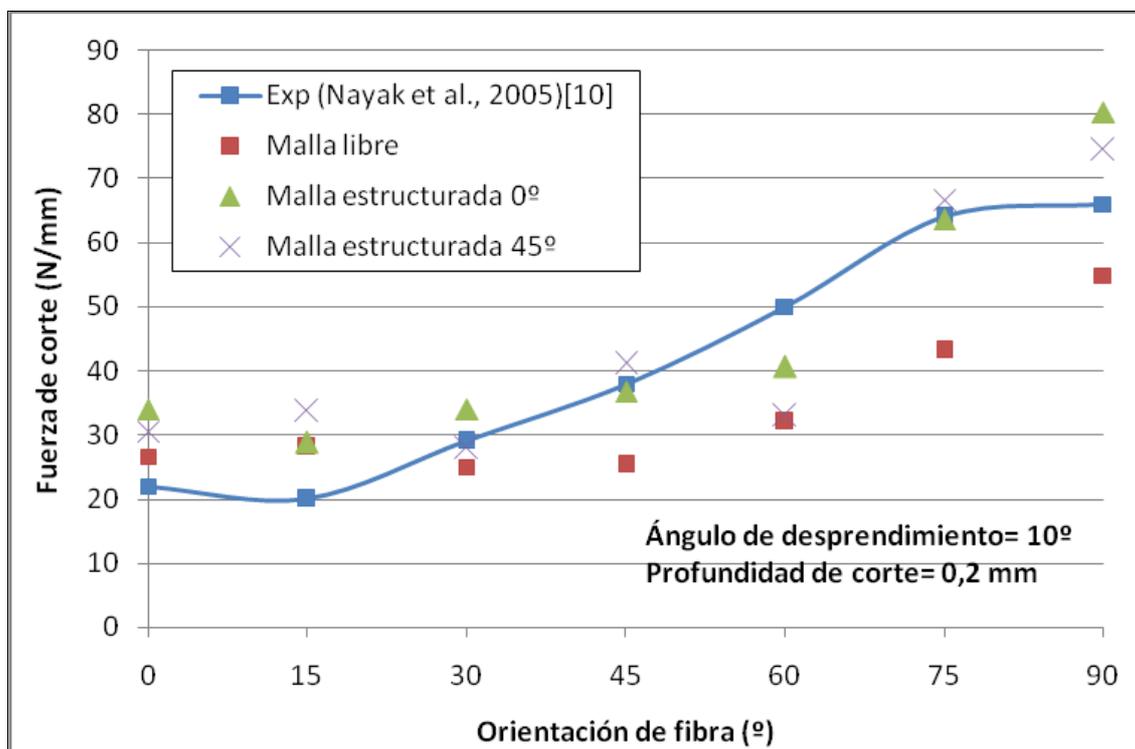


Fig 5.2: Comparación de resultados experimentales de Nayak [10] con los obtenidos en la simulación para fuerza de corte frente a la orientación de fibra con un ángulo de desprendimiento de 10°

Se puede observar en la Fig 5.4 que, al igual que sucedía con 0°, la tendencia en todos los casos de tipo de malla es la misma. Se debe indicar que para el caso de malla libre, en el modelo se obtienen valores por debajo de los experimentales sobre todo a partir de -30°. Luego en el caso de ángulo de desprendimiento igual a 10° el modelado con malla estructurada asemeja más los resultados experimentales que el de malla libre, cuyos

valores de fuerza de corte a partir de -30° sufren una disminución del 15-20% con respecto a ellos.

La comparación de los resultados de fuerza de corte de la simulación con herramienta de ángulo de desprendimiento 5° se ha realizado utilizando los datos experimentales del artículo [7] (Bhatnagar et al., 2004) y los de Venu Gopala [12] (Venu Gopala et al., 2006) La Fig 5.3 muestra los resultados.

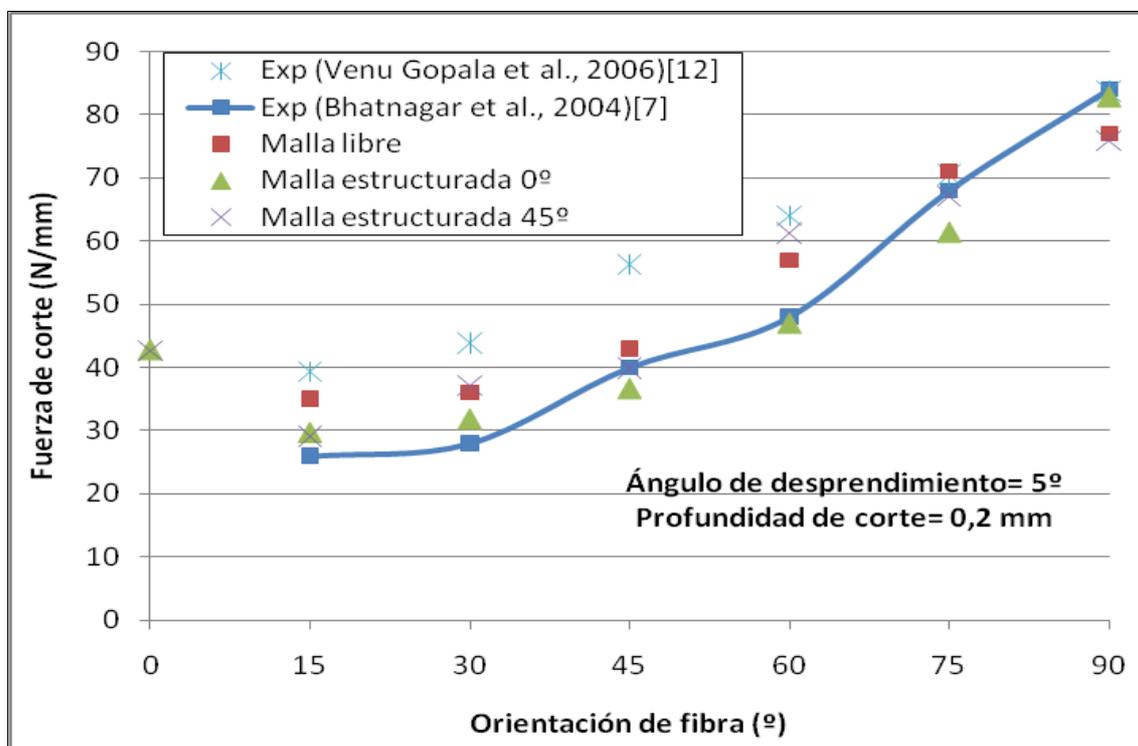


Fig 5.3: Comparación de resultados experimentales de Nayak [10] y los de Venu Gopala[12] con los obtenidos en la simulación para fuerza de corte frente a la orientación de fibra con un ángulo de desprendimiento de 5°

Se observa de nuevo que la tendencia y los valores de las fuerzas de corte se asemejan bastante a los experimentales, sobre todo para el caso de la malla estructurada a $0/90^\circ$, con desviaciones que pueden considerarse mínimas.

Una vez completada la comparación para los tres ángulos de desprendimiento de la herramienta, todas las orientaciones de fibra y los tres tipos de malla se puede afirmar que tanto la tendencia como los valores de los resultados de la fuerza de corte se encuentran muy cerca de los experimentales, sobre todo en los casos de malla estructurada.

5.1.2 Fuerza de avance

Siguiendo con el estudio de Nayak [10], se han comparado los valores experimentales para la fuerza de avance con los del modelo propuesto. En este caso se dispone de los resultados de fuerza de avance para el experimento realizado con una herramienta de ángulo de desprendimiento igual a 10° .

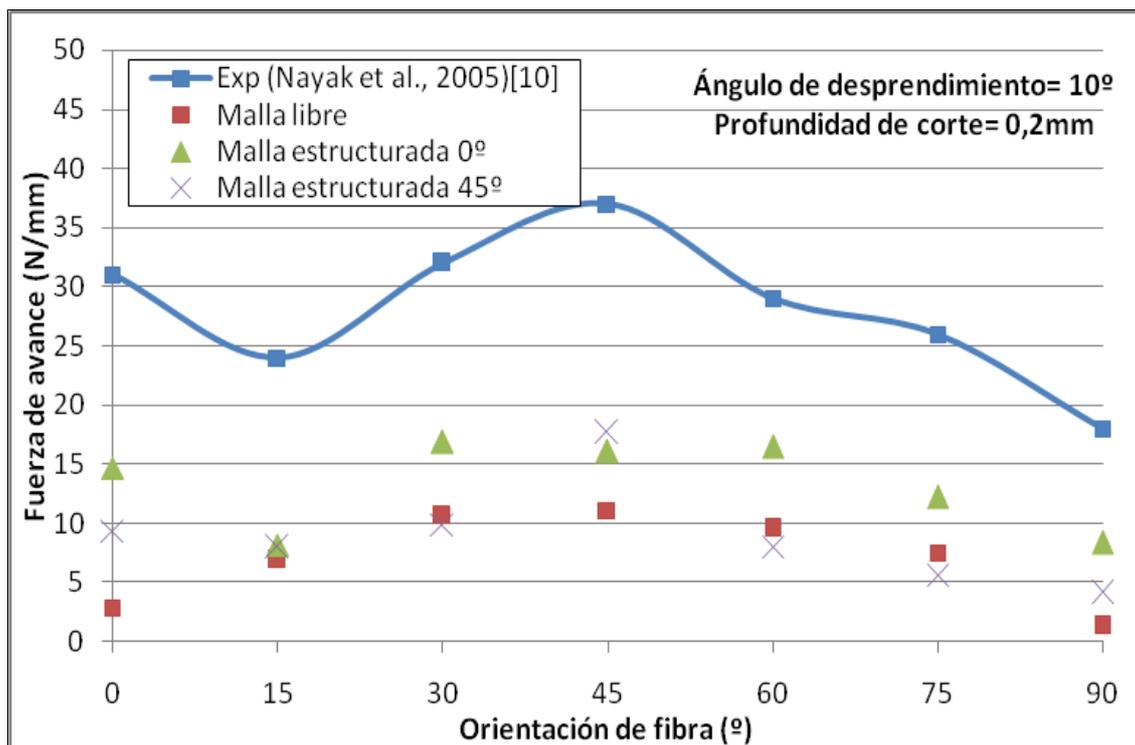


Fig 5.4: Comparación de resultados experimentales de Nayak [10] con los obtenidos en la simulación para fuerza de avance frente a la orientación de fibra con un ángulo de desprendimiento de 10°

A simple vista en la Fig 5.4 se puede observar que, aunque la tendencia de los tres casos simulados es la misma que en el caso experimental, los valores de fuerza de avance se encuentran muy por debajo de los experimentales, llegando éstos a triplicar el valor de los resultados para la malla libre.

Una caso similar ocurría en el estudio de Lasri [15] (Lasri et al., 2009) Tras realizar tres simulaciones con tres criterios de fallo distinto, Hashin, máxima tensión y Hoffman, los resultados que obtenía para la fuerza de avance estaban en un rango similar en los tres casos pero muy por debajo de los valores experimentales de Bhatnagar [7] para el caso de ángulo de desprendimiento de la herramienta de 5°.

La razón que enunciaba Lasri para esta diferencia de valores estaba basada en el efecto de “bouncing back” o recuperación elástica comentada en el estudio de Wang y Zhang [3] (Wang et al., 1995) En el experimento, la recuperación elástica que sufre el material bajo la superficie mecanizada tras la pasada de la herramienta, contribuye a la generación de una fuerza hacia arriba que se opone a la fuerza de avance de la herramienta, haciendo que ésta aumente su valor. Este fenómeno no está reflejado en el modelo y por tanto no se experimenta este incremento de fuerza. Además se puede ver que la tendencia (aumento de las fuerza de avance hasta 45° y posterior disminución) es la misma tanto en las simulaciones como en el experimento, luego el fenómeno se está reproduciendo como en el experimento, a excepción de ese incremento de fuerza comentado que hace aumentar el valor experimental de los resultados.

Esta caída en los valores de la simulación de la fuerza de avance se produce incluso en modelos construidos para la simulación del mecanizado en metales, luego no es extraño que en suceda en materiales compuestos.

Este efecto “bouncing back” no influye en la fuerza de corte, ya que la recuperación elástica se produce en el eje “y” y por tanto no afecta a la dirección “x” donde la fuerza de corte es aplicada.

En la Fig 5.5 se puede ver la comparación de los resultados experimentales de Bhatnagar [7] con los del modelo propuesto para la fuerza de corte en función de la orientación de fibra con herramienta de ángulo de desprendimiento igual a 5° , observándose al igual que en el caso de 10° la misma tendencia pero valores muy por debajo de los experimentales. Se han situado sobre la gráfica también los valores obtenidos por Lasri [15] (Lasri et al., 2009) en su simulación con distintos modos de fallo.

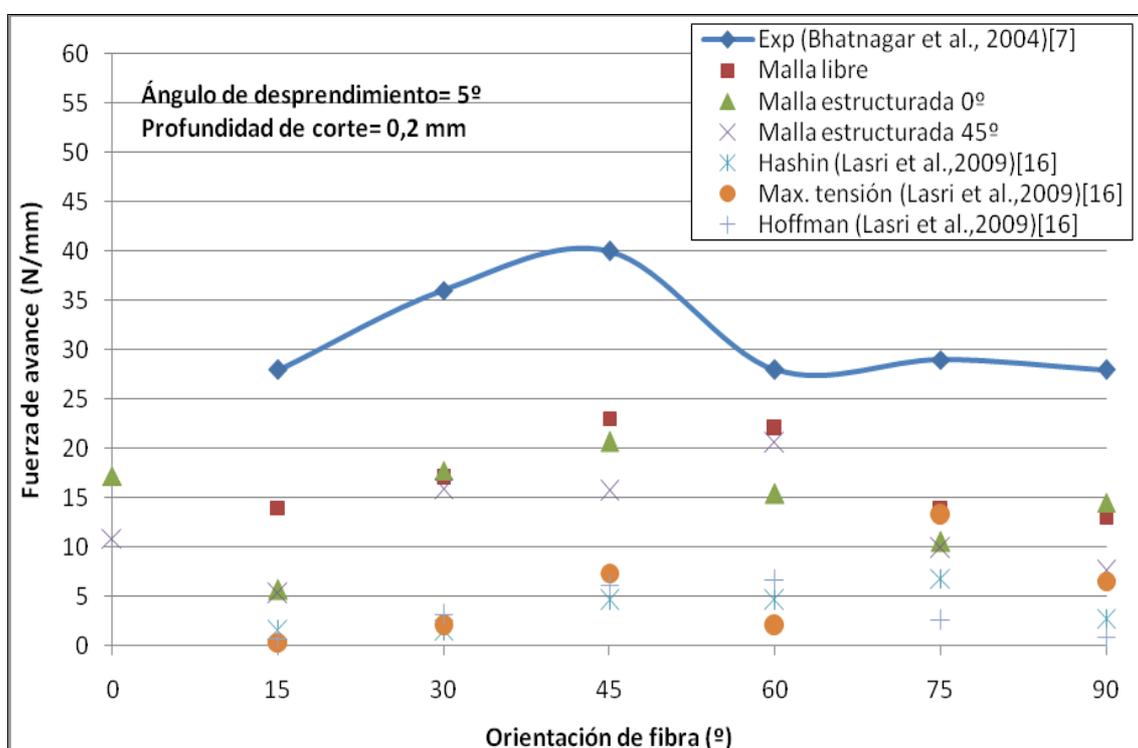


Fig 5.5: Comparación de resultados experimentales de Bhatnagar [7] con los obtenidos en la simulación de Lasri [16] con los tres modos de fallo (Hashin, max tensión y Hoffman) y del modelo propuesto (Hashin) para fuerza de avance frente a la orientación de fibra con un ángulo de desprendimiento de 5° .

La caída de los valores simulados en fuerza de avance también es reproducida en los modelos propuestos por Lasri.

Se puede comprobar además como en las simulaciones de Lasri los valores de la fuerza de avance se alejan todavía más que los del modelo propuesto en este trabajo de los experimentales, incluso en el caso de utilizar el mismo criterio de fallo (Hashin), sobre todo para orientaciones de fibra por debajo de 75° . Por tanto se puede decir que, sin conseguir buenos valores para la fuerza de avance en el modelo, se ha conseguido mejorar los resultados de Lasri en cuanto a las fuerzas de avance.

5.1.3 Extensión del daño en profundidad.

A continuación se han comparado los valores obtenidos para el daño bajo la superficie mecanizada en compresión en la matriz con los valores experimentales de daño obtenidos por Nayak[10] y Bhatnagar[7]. Este daño en profundidad ha sido medido según se explica en la Fig 5.9 y representa la extensión del daño hacia el interior de la pieza, ya que es lo que produce pérdida de propiedades mecánicas.

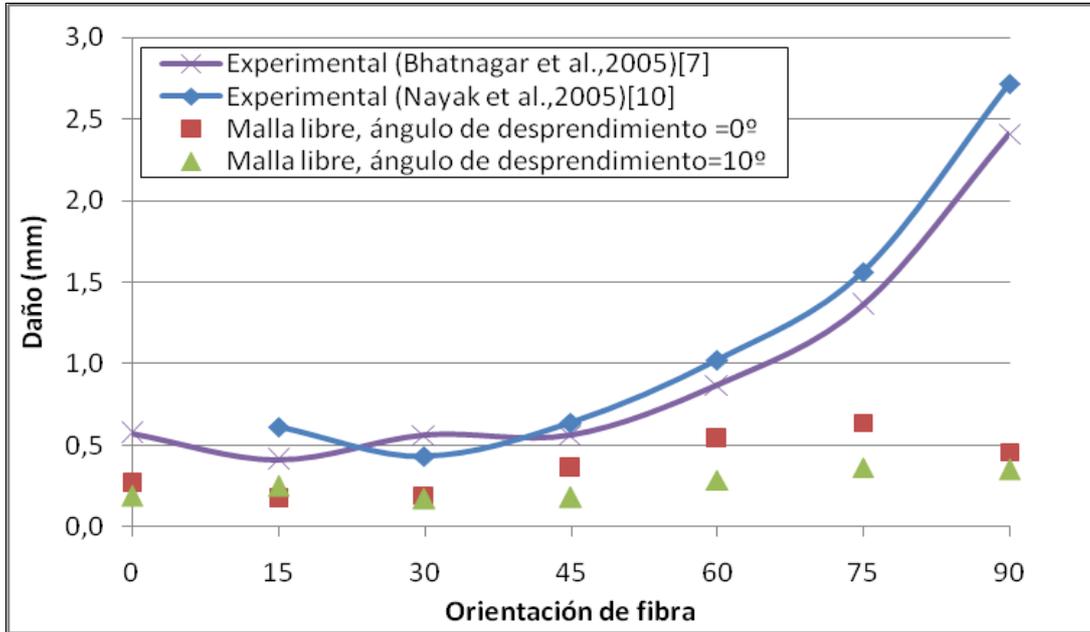


Fig 5.6: Comparación de resultados experimentales de [10] (Nayak et al. 2004) y [7] (Bhatnagar et al., 2004) con los obtenidos en la simulación para daño interno frente a la orientación de fibra, con un ángulos de desprendimiento de 0 y 10°, malla libre

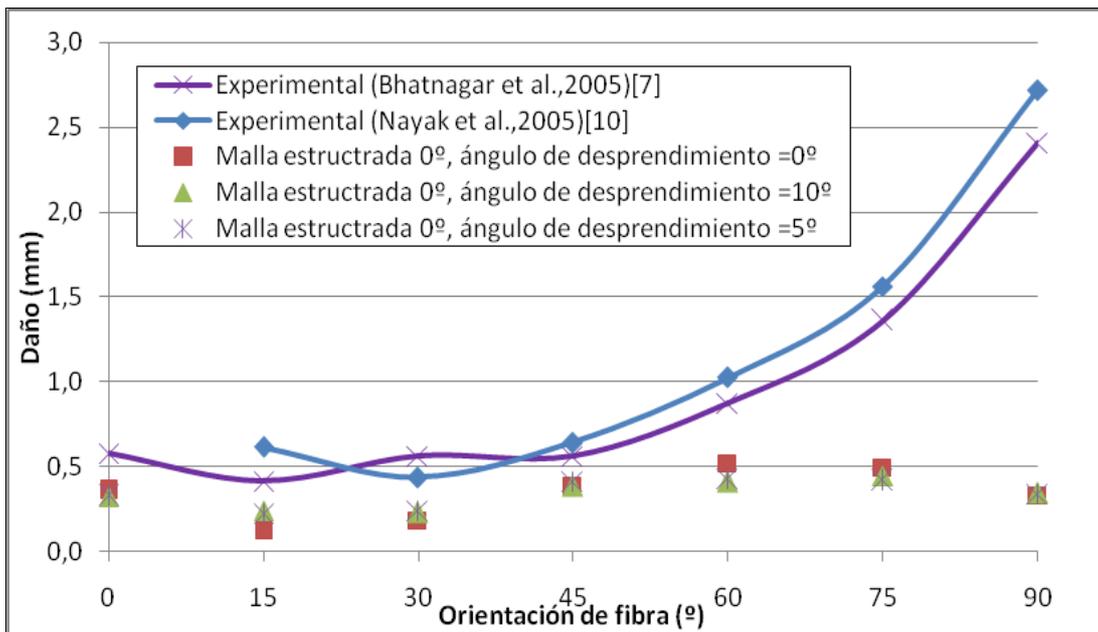


Fig 5.7: Comparación de resultados experimentales de [10] (Nayak et al. 2004) y [7] (Bhatnagar et al., 2004) con los obtenidos en la simulación para daño interno frente a la orientación de fibra, con un ángulos de desprendimiento de 0, 5 y 10°, malla estructurada 0/90°

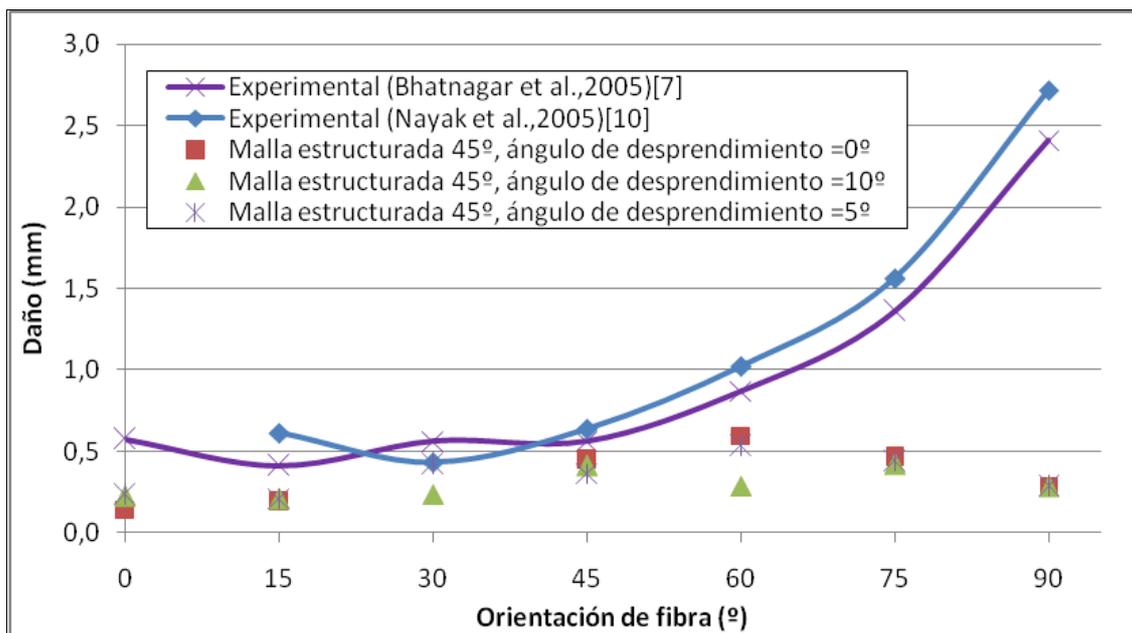


Fig 5.8: Comparación de resultados experimentales de [10] (Nayak et al. 2004) y [7] (Bhatnagar et al., 2004) con los obtenidos en la simulación para daño interno frente a la orientación de fibra, con un ángulos de desprendimiento de 0, 5 y 10°, malla estructurada 45°.

Se puede observar en la Fig 5.6, Fig 5.7 y Fig 5.8 que el valor el daño, en todos los casos, se asemeja a los resultados experimentales desde 0 hasta -45° de orientación de fibra. A partir de ese valor los resultados del modelo propuesto quedan muy por debajo de los experimentales y no siguen la tendencia creciente exponencial que se muestra para los resultados de Nayak y Bhatnagar.

Esto es debido al tipo de criterio de fallo que se ha elegido. En el modelo propuesto se ha elegido el criterio de Hashin, que divide el daño en cuatro tipos: fallo en la fibra por compresión, fallo en la fibra por tracción, fallo en la matriz por compresión y fallo en la matriz por tracción. Los resultados que se muestran en las figuras son los obtenidos para el daño en la matriz en compresión. El hecho de dividir el fallo en cuatro modos, hace que los resultados no coincidan con los experimentales. Un criterio que utilice un modo único de daño (como puede ser el criterio de Tsai-Hill) podría proporcionar unos resultados más aproximados a los del experimento, sin embargo se eligió el criterio de Hashin por simplicidad y principalmente por la posibilidad que ofrece de distinguir numérica y visualmente los cuatro tipos de daño. Criterios más desarrollados como el de Hou que también distingue entre varios modos de fallo podrían aportar más precisión.

La conclusión es que no se consiguió aproximar la lectura del daño total bajo la superficie mecanizada a altas orientaciones de fibra pero se aseguró una buena comprensión de qué mecanismos actúan en cada caso en su generación.

5.2 Resultados

A continuación se muestran todos los resultados obtenidos en todas las simulaciones realizadas para el modelo propuesto en este proyecto. Se especifica el valor de los datos por tipo de malla, ángulo de desprendimiento, orientación de fibra, fuerza de corte, fuerza de avance, daño en profundidad en compresión y daño en profundidad en tracción en la matriz.

La tabla siguiente muestra el trabajo de muchas horas de simulación, se ha necesitado de varios ordenadores trabajando las 24 horas del día para lograr todos los resultados que se habían propuesto inicialmente tras la elección de qué parámetros se iban a modificar.

En especial, simulaciones de modelos de malla estructurada a altas orientaciones de fibra han presentado muy altos tiempos de convergencia, en ocasiones de dos días completos, con lo que el estado estacionario no se conseguía en muchos casos tras el transcurso del tiempo establecido de simulación y era necesario repetir el cálculo incrementando el valor inicial de tiempo con la consecuente pérdida de tiempo de trabajo. Además, ABAQUS requiere muchos recursos de la CPU y por tanto se debe trabajar en máquinas potentes y libres de cualquier otro proceso adicional trabajando en segundo plano si se quiere dejar simulando más de un caso a la vez, algo que se hace necesario dado el alto número de simulaciones.

En muchos casos se producen errores, cuyos detalles pueden ser analizados en el Data File generado por ABAQUS /CAE una vez finaliza una simulación, ya sea satisfactoriamente o por que se ha producido un error. Generalmente el error que se ha venido produciendo en este modelo ha sido la aparición de un nodo de la malla deformado más pequeño que el elemento más pequeño permitido, con lo que la simulación no puede continuar. El programa no permite reanudar la simulación por donde se había cortado tras intentar solucionar el problema, luego es necesario comenzar el trabajo de nuevo. Los huecos en blanco que aparecen en la tabla corresponden a simulaciones en los que este error ha aparecido y tras varios intentos fallidos no se ha logrado llegar a un tiempo de simulación para el que los resultados de fuerza de corte y avance convergiesen, con lo que quedan pendientes por falta de tiempo para seguir indagando en el problema. Los datos de daño en profundidad para malla libre con herramienta de 5° de ángulo de desprendimiento están tomados como el máximo entre extensión de daño a tracción y compresión.

Señalar que se ha realizado alguna simulación adicional a las expuestas en la Tabla 5.1 para el estudio del coeficiente de fricción, tamaño de elemento de malla y energía de deformación, cuyos resultados se muestran en su correspondiente apartado.

ANÁLISIS PARAMÉTRICO DEL CORTE ORTOGONAL DE MATERIALES COMPUESTOS MEDIANTE MODELIZACIÓN NUMÉRICA

Tipo de malla	Ángulo de desprendimiento (°)	Orientación fibra (°)	Fc (N)	Fa (N)	Daño compresión (mm)	Daño tracción (mm)
Libre	0°	0	64,14	8,58	0,2676	0,3383
		15	32,95	3,76	0,1726	0,1200
		30	31,65	11,41	0,1937	0,1848
		45	42,58	18,24	0,3613	0,3686
		60	59,14	19,39	0,5403	0,5065
		75	69,19	9,21	0,6401	0,5194
		90	67,28	3,80	0,4578	0,3836
Libre	5°	0	43,20	8,32	0,2455	0,2827
		15	35,00	14,00	0,2	
		30	36,00	17,00	0,23	
		45	43,00	23,00	0,306	
		60	57,00	22,00	0,45	
		75	71,00	14,00	0,616	
		90	77,00	13,00		
Libre	10°	0	26,57	2,89	0,1924	0,1980
		15	28,09	6,92	0,2481	0,2417
		30	24,94	10,64	0,1729	0,1019
		45	25,32	11,11	0,1826	0,1658
		60	32,04	9,56	0,2891	0,2700
		75	43,16	7,49	0,3652	0,3432
		90	54,86	1,35	0,3513	0,4179
Estructurada 90/0°	0°	0	68,08	17,92	0,3596	0,3460
		15	33,40	11,60	0,1276	0,1200
		30	31,00	15,80	0,1848	0,1719
		45	45,14	17,89	0,3764	0,3610
		60	60,00	16,50	0,5194	0,5065
		75	67,00	11,50	0,4941	0,5194
		90	76,48	11,85	0,3292	0,3836
Estructurada 90/0°	5	0	42,85	17,26	0,3251	0,3149
		15	29,72	5,70	0,2247	0,2197
		30	31,85	17,76	0,2402	0,2151
		45	36,68	20,65	0,4149	0,3999
		60	46,99	15,38	0,4299	0,4299
		75	61,38	10,52	0,4195	0,3993
		90	82,81	14,51	0,3386	0,4298
Estructurada 90/0°	10	0	34,02	14,71	0,3233	0,3158
		15	28,87	8,20	0,2396	0,2321
		30	34,06	16,90	0,2307	0,1925
		45	36,78	16,11	0,3844	0,3841
		60	40,65	16,46	0,4073	0,3847
		75	63,67	12,23	0,4453	0,4234
		90	80,41	8,37	0,3438	0,4218
Estructurada 45°	0	0	68,86	16,87	0,1412	0,0995
		15	34,75	6,35	0,1885	0,1826
		30				0,1424
		45	47,15	19,21	0,4469	0,4169
		60	70,25	24,32	0,5974	0,5730
		75	71,42	14,32	0,4635	0,4391
		90	69,03	5,25	0,2748	0,3398
Estructurada 45°	5	0	42,65	10,92	0,2351	0,2242
		15	29,08	5,29	0,2104	0,2009
		30	37,11	15,86	0,4209	0,2142
		45	39,87	15,66	0,3661	0,3750
		60	61,27	20,59	0,5326	
		75	67,11	9,87	0,4410	0,4209
		90	75,84	7,55	0,2860	0,5203
Estructurada 45°	10	0	30,58	9,39	0,2243	0,2245
		15	33,71	8,02	0,2068	0,2454
		30	27,84	9,94	0,2376	0,2176
		45	41,03	17,71	0,4109	0,3590
		60	32,98	8,06	0,2902	0,5184
		75	66,72	5,69	0,4209	0,4304
		90	74,44	4,11	0,2869	0,4259

Tabla 5.1: Resultados de las simulaciones en ABAOUS



Se va a explicar como punto inicial de que manera se han obtenido en ÁBAQUS los valores de fuerza de corte y avance. La evolución en el tiempo de la fuerza de corte mientras la herramienta penetra en la pieza, crece hasta un punto, a partir del cual empieza a decrecer. Este punto corresponde al momento en que se produce la formación completa de la viruta. Se ha tomado el valor de la fuerza de corte en ese punto como la fuerza de corte necesaria para el mecanizado de la pieza. En ese mismo instante se ha recogido el valor de la fuerza de avance como la representativa del proceso. La caída repentina del valor de la fuerza de corte se debe a la eliminación del material (salida de la viruta). Las fluctuaciones son debidas a la heterogeneidad del material y sus distintas propiedades de resistencia.

Los valores del daño en compresión y en tracción han sido medidos directamente en ABAQUS/CAE sobre la figura representada en el módulo “Visualization” una vez finalizado el tiempo de simulación. En la Fig 5.9 se puede observar qué representa el valor tomado para el daño.

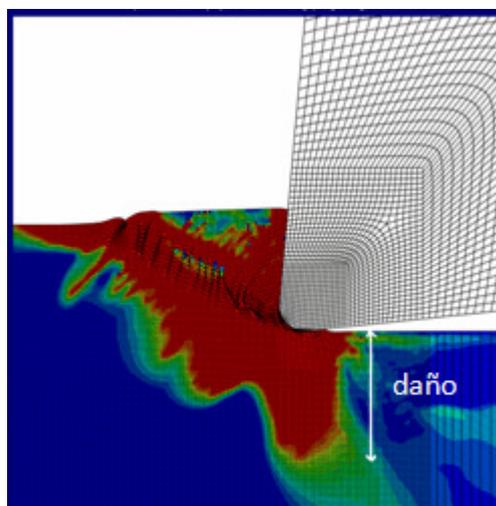


Fig 5.9: Medición del daño en profundidad

Para las fotografías donde se muestra el daño de la matriz a compresión y a tracción se han guardado dos archivos de imagen. El que aparece a la izquierda corresponde con el inicio de la formación de la viruta. Se ha considerado que este momento corresponde al tiempo en el que aparece el primer pico en la gráfica de la fuerza de corte, ya que la primera fluctuación de la fuerza de corte se estima como el inicio de la deformación del material. La zona de la derecha corresponde a la imagen del mecanizado una vez formada la viruta completa (momento en que se toman los valores de fuerza de corte y avance).

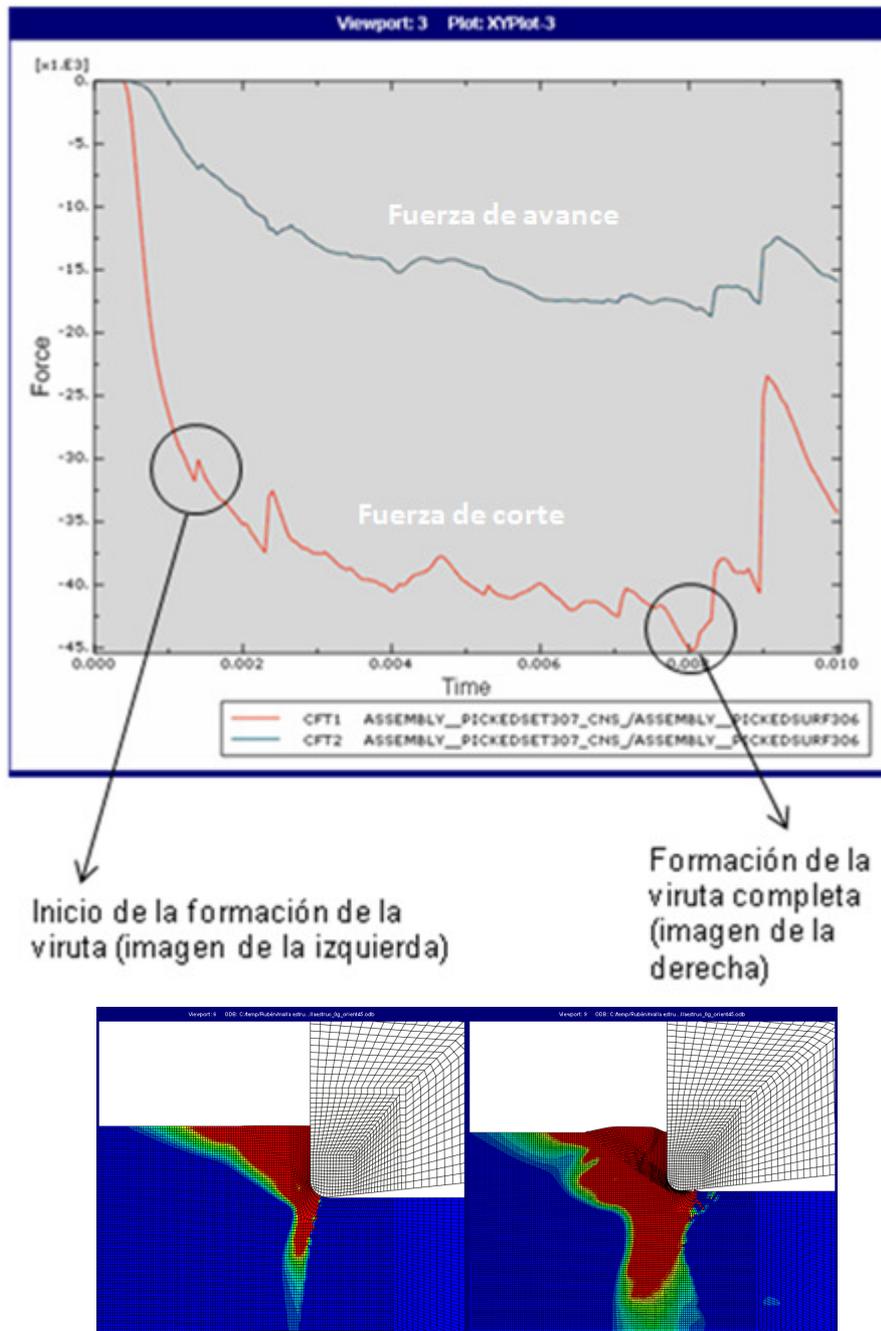


Fig 5.10: Selección de los tiempos de toma de fotografías del daño interno.

Como se puede ver en la Fig 5.10, correspondiente para una simulación con malla estructurada a 90° , con elemento de $7 \times 7 \mu\text{m}$, orientación de fibra 45° y herramienta de ángulo de desprendimiento 0° , la zona de la izquierda pertenece al inicio de la formación de la viruta, hasta aproximadamente 1ms. La viruta se completa hacia los 9 ms de simulación, momento que coincide con la fuerza de corte máxima. El resto de virutas del mecanizado (segunda y siguientes) no alcanzarán este valor de fuerza de corte, ya que se producen en una superficie previamente dañada por delante de la herramienta. Aunque la forma de la gráfica sea cíclica (es decir, a partir de ese momento comenzaría la formación de la segunda viruta con forma de gráfica similar), el valor

buscado de la fuerza de corte como característico del mecanizado es el de la formación de la primera viruta tras el contacto herramienta–pieza.

Se ha expuesto a continuación un resultado general que se ha observado previamente a desglosar el análisis por parámetros. El fenómeno consiste en que el daño generado en la fibra es prácticamente despreciable comparado con el daño en la matriz, tanto a tracción como a compresión. Es por ello que a partir de este momento, cuando se hable de daño, éste estará referido al daño en la matriz. Esto es debido a la baja resistencia a tracción y compresión de la matriz comparada con la de las fibras.

La siguiente Fig 5.11 muestra una fotografía tomada de este resultado;

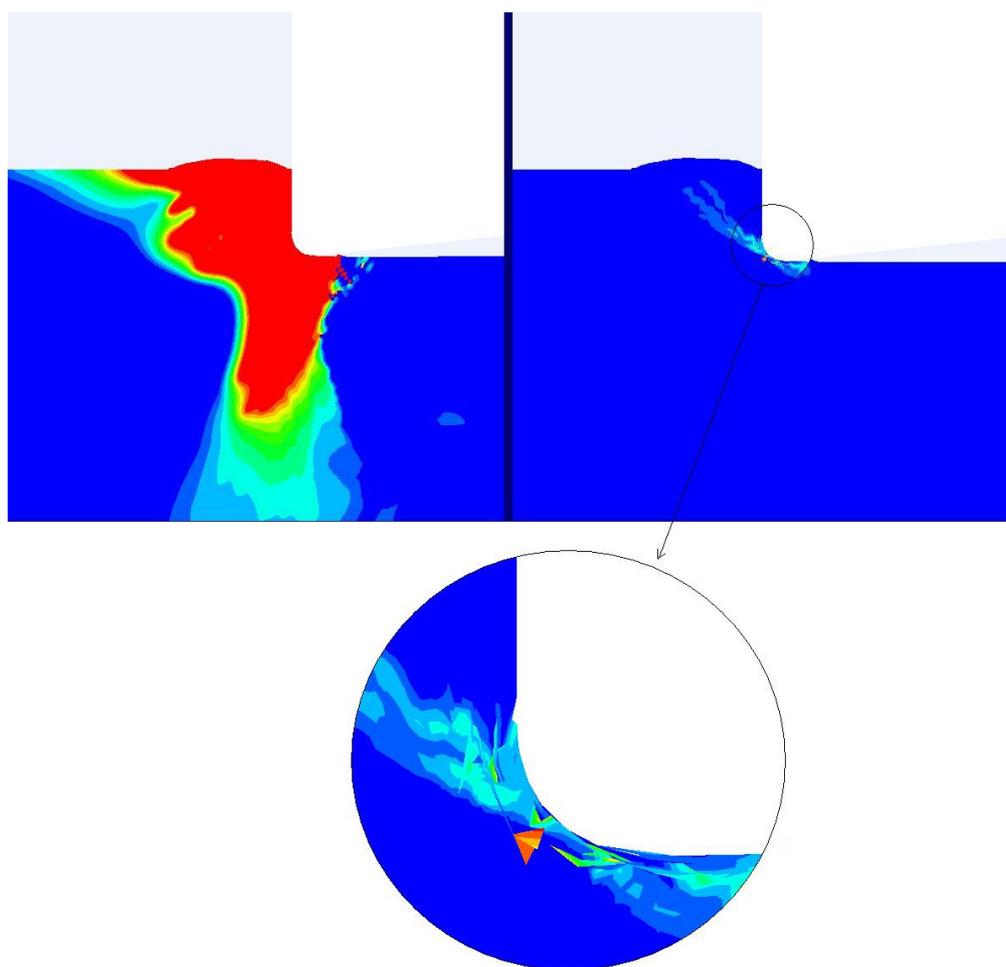


Fig 5.11: Representación del daño en la matriz (izquierda) y daño en la fibra (derecha y zoom). Simulación con malla estructurada a 0° , herramienta de ángulo de desprendimiento 0° y matriz con fibra orientada a 45°

En la Fig 5.11 se puede comprobar como el daño producido en la fibra se puede despreciar frente al producido en la matriz. Se trata de una simulación con malla estructurada a 0° , herramienta de ángulo de desprendimiento 0° y matriz con fibra orientada a 45° . La parte de la izquierda corresponde al daño producido en la matriz, y se observa que su valor es importante en profundidad, marcado por el contorno rojo donde se ha superado el criterio de fallo a compresión de Hashin en la matriz. Sin embargo, el daño en la fibra, mostrado en la parte de la derecha, es despreciable frente

al anterior ya que apenas se distinguen elementos dañados. En el zoom se puede observar que solo hay uno o dos nodos que hayan superado el criterio de Hashin.

Para corroborar este fenómeno, se muestra un segundo ejemplo, esta vez con la malla estructurada a 0° , fibra orientada a 90° y herramienta de ángulo igual a 5° . La conclusión a la que se puede llegar es la misma.

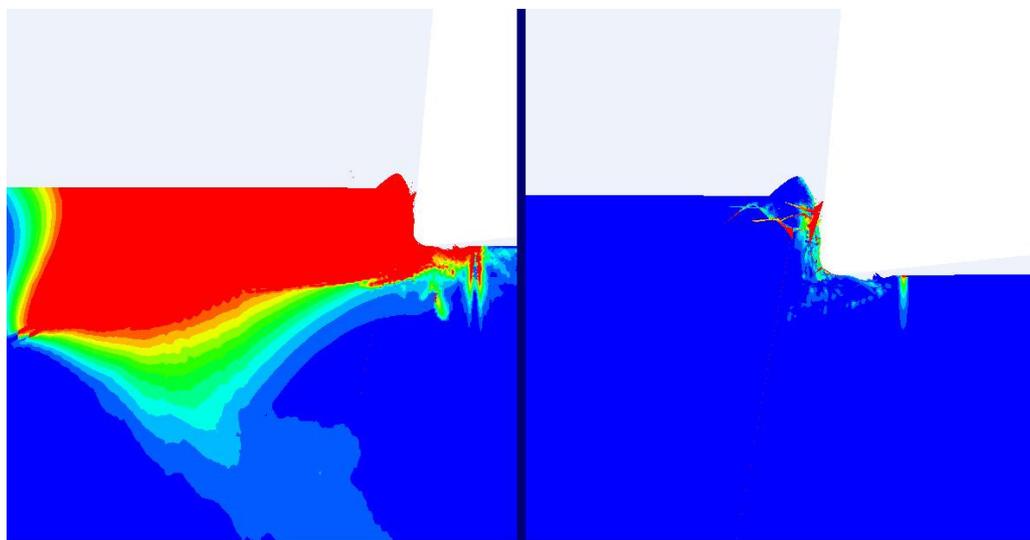


Fig 5.12: Representación del daño en la matriz (izquierda) y daño en la fibra (derecha). Simulación con malla estructurada a 0° , herramienta de ángulo de desprendimiento 5° y matriz con fibra orientada a 90°

Se explica a continuación la evolución del daño que sufre la matriz a -45° de orientación de fibra, con ángulo de desprendimiento igual a 5° y malla estructurada $90/0^\circ$. Se han elegido estos parámetros igual que podrían haberse elegido otros, ya que el proceso, con la diferencia del tiempo de estabilización y morfología de daño y viruta, es el mismo en esencia en el resto de simulaciones.

Tras el inicio del mecanizado, a los 1,9 ms comienza la formación de la viruta (Fig 5.13y Fig 5.14, imagen de la izquierda). El daño en la matriz aparece por delante y por debajo de la viruta. La matriz presenta bajos valores de daño por tracción ahí, mientras que la compresión está extendida sobre todo en la zona por delante y por debajo de la herramienta. Debajo de la superficie mecanizada, el daño por tracción y su profundidad es más importante que el de compresión.

La evolución del daño con el tiempo de corte termina con la formación de la viruta completa a los 12 ms (Fig 5.13 y Fig 5.14, imagen de la derecha), produciéndose en ese momento la fuerza de corte máxima. A partir de ese momento, el valor de la fuerza de corte decrece bruscamente debido a la separación de la viruta del material y su eliminación. Este proceso es cíclico y se repite mientras dura el mecanizado, no llegando a estabilizar por completo el valor de la fuerza de corte como si ocurre y se presupone en el mecanizado de metales. Como se comentó las fuerzas generadas para la eliminación de la primera viruta serán las más altas de todo el mecanizado, debido a la amplia extensión del daño en la matriz tras este proceso.

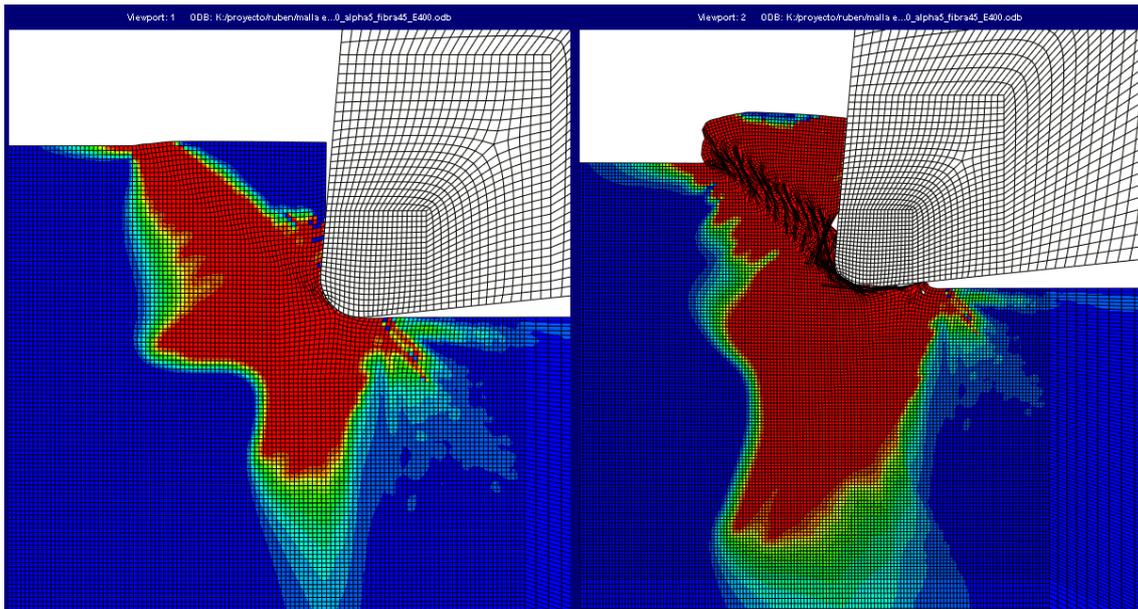


Fig 5.13: Inicio (izquierda) y formación completa de la viruta (derecha) con orientación de fibra -45° . Daño a compresión

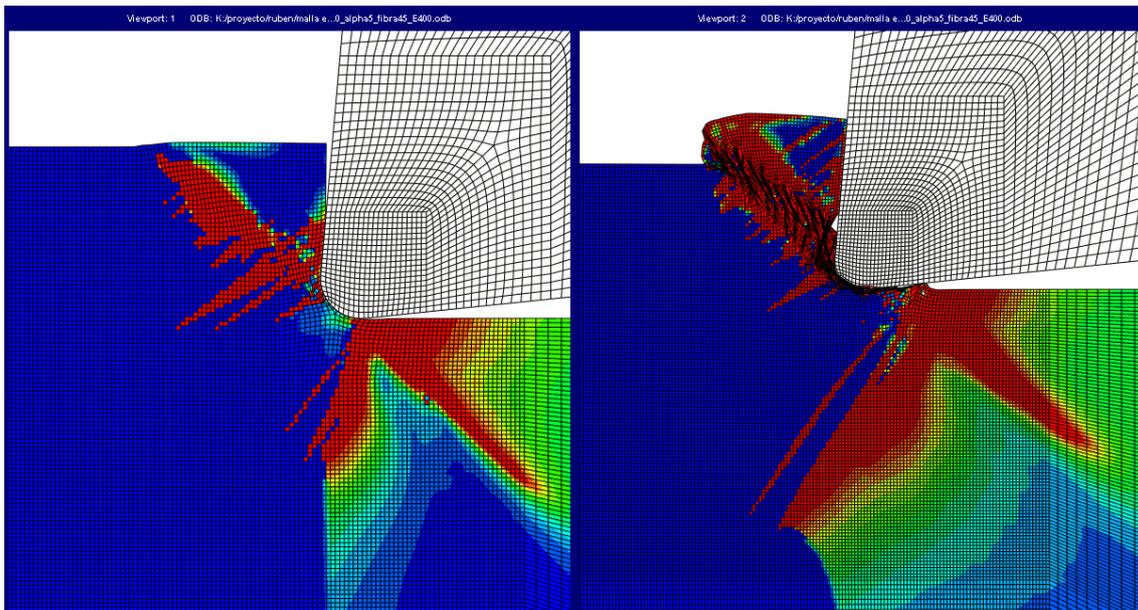


Fig 5.14: Inicio (izquierda) y formación completa de la viruta (derecha) con orientación de fibra -45° . Daño a tracción

5.2.1 Influencia de la orientación de fibra

La orientación de la fibra es el parámetro más importante en cuanto a la influencia que demuestra en los resultados tanto de fuerzas como de daño.

Se han obtenido los siguientes resultados para la fuerza de corte en el modelo propuesto.

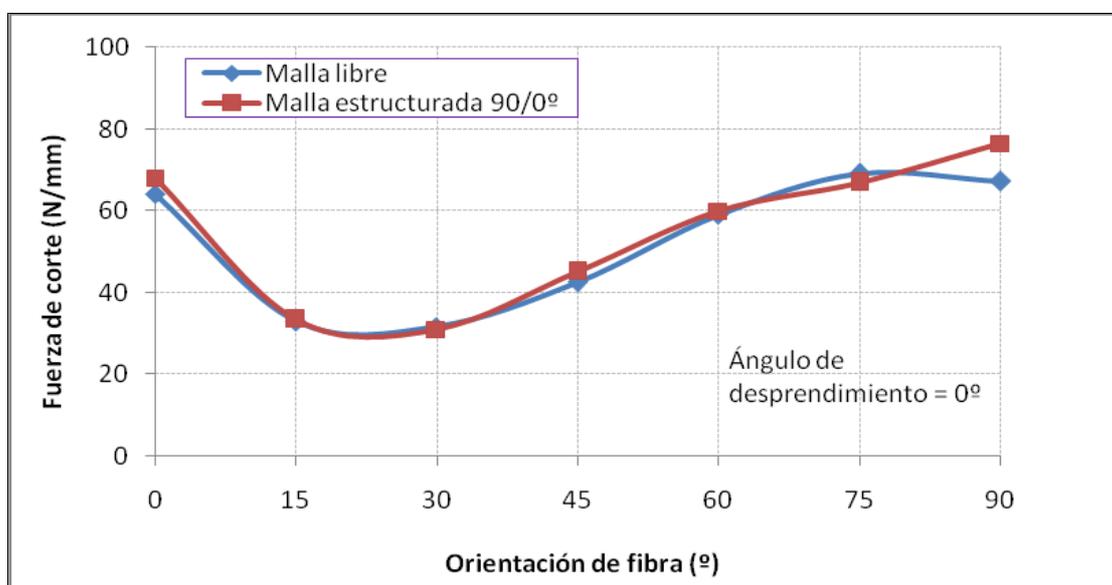


Fig 5.15: Resultados de Fuerza de corte frente a orientación de fibra para el modelo propuesto de malla libre y malla estructurada a 90/0°

Como se puede observar en la Fig 5.15 existe una tendencia marcada para los resultados de ambas simulaciones.

Para el primer caso de fibra orientada a 0°, se observa un valor de fuerza de corte bastante alto. Se trata de un valor sin demasiada importancia ya que la orientación de fibra igual a 0° es muy poco frecuente en el mecanizado de materiales compuestos, dadas las pocas probabilidades de que la fibra no se distribuya en la matriz con una mínima orientación. Ese es el motivo por el que muchos de los estudios experimentales no consideran este caso y los valores de las fuerzas a 0° no aparezcan en sus resultados.

A partir de la orientación de fibra igual a -15°, se observa una tendencia creciente de la fuerza de corte, hasta llegar a unos 70 N. Este fenómeno se atribuye al hecho de que según aumenta la orientación, la fibra se va situando de manera perpendicular a la dirección de la velocidad de corte de la herramienta en el plano de corte, con lo que las fuerzas aplicadas por herramienta para compensar la rigidez de la fibra y la compresión generada en el resto de fibras por delante de la herramienta deben ser mayores.

La formación de viruta completa se hace más difícil por la resistencia de las fibras orientadas perpendicularmente al plano de corte y el apoyo que les proporciona la matriz. Por lo tanto, para tener la formación de viruta completa, la herramienta de corte debe generar un aumento de carga.

En la Fig 5.29 que se comentará más adelante se puede observar el tiempo de convergencia de la fuerza de corte para las distintas orientaciones de fibra en un caso determinado de malla y ángulo de desprendimiento de la herramienta.

La Fig 5.16 muestra la evolución de la fuerza de avance. Explicar antes de nada que en lo que se ha centrado la atención en este caso es en la forma y tendencia de la curva, y no en las diferencias entre tipo de mallas; se muestran dos tipos en la figura como muestra de la tendencia similar con cada orientación de fibra que siguen todas.

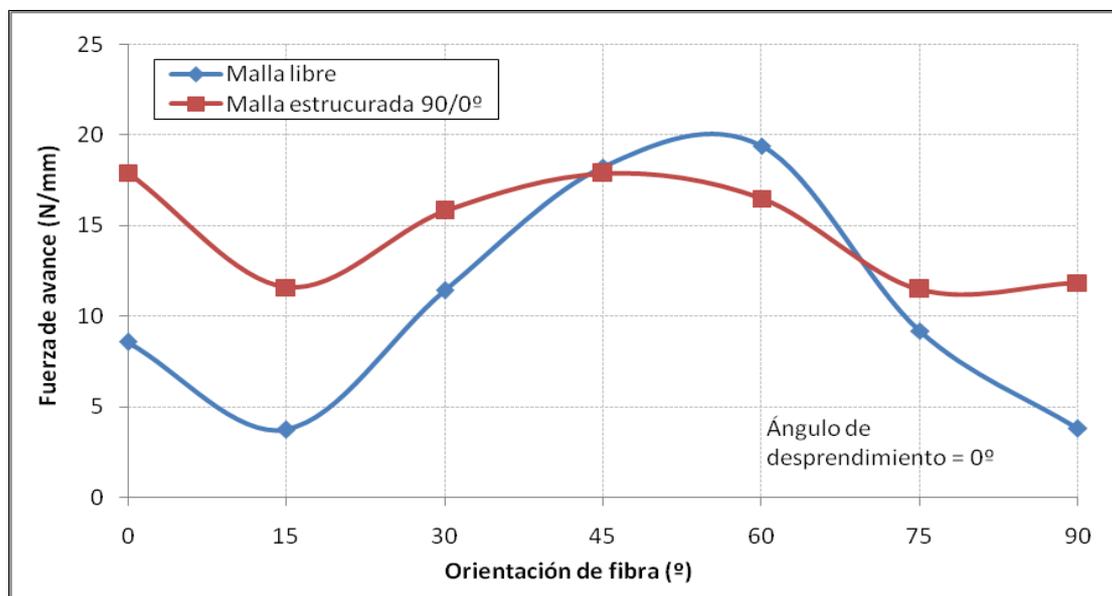


Fig 5.16: Resultados de Fuerza de avance frente a orientación de fibra para el modelo propuesto de malla libre y malla estructurada a 90/0°

La forma de las curvas es coherente con los estudios previos experimentales, como ya se explicó en el apartado de validación, ya que es creciente y tiene un pico de máximo valor sobre -45° o -60° , para después disminuir de nuevo.

En el caso de orientaciones bajas, el corte tiene lugar en dos pasos: una flexión de las fibras que se produce en el momento que la herramienta toca el material, acompañada de el modo I de fallo (grieta o apertura, en dirección x) y una posterior compresión que conduce a un fallo combinado (modo I + modo II, compresión y deslizamiento de la interfase, en la dirección y) (Ver Fig 5.20) La tendencia hasta -45° o -60° es creciente con lo que el avance de la herramienta, que se produce en dirección y , genera a esas orientaciones de fibra la mayor fuerza a vencer de todo el rango. Cuando la orientación supera esos valores, el modo I de fallo va poco a poco disminuyendo al contrario del modo II, que ocurre con facilidad y comienza tan pronto como la herramienta toca la pieza. El deslizamiento de la interfase con la fibra orientada a -75° o -90° favorece la disminución de la fuerza de avance que encuentra menos resistencia al producirse en dirección y , contrastado con el continuo incremento de la de corte que se enfrenta a la compresión de las fibras orientadas perpendicularmente a su dirección.

La forma de las curvas del daño en la matriz siguen la tendencia de la bibliografía, aunque con valores de profundidad muy por debajo de los reales a partir de -45° o -60° , como se comentó en validación.

Orientaciones bajas de fibra suponen un daño en profundidad menor, tanto a compresión como a tracción, encontrando entre -15° y -30° el punto óptimo donde la pieza sufre el menor daño. Al caso de orientación 0° , como ya se comentó, no se le da demasiada importancia dado los pocos casos que se encuentra un material compuesto

que no tenga una mínima orientación de fibra. Aun así en esa orientación se produce un daño mayor que las sucesivas, dado que el mecanismo de fallo que experimentado es distinto, con una apertura de las fibras en modo I y sin apenas deslizamiento en la interfase o modo II, muy distinto del mecanismo a partir de -15° donde el corte se produce por laminación provocando un daño menos severo. Desde -15 o -30° la tendencia del daño va en aumento, produciéndose los valores más altos generalmente entre -75 o -90° . El hecho de que la fibra se empiece a orientar perpendicularmente a la dirección del plano de corte de la herramienta hace que desaparezca la laminación y se provoque un daño interno en dirección perpendicular muy grande, como consecuencia de la apertura de la interfase (poco importante en la fibra de vidrio por se un material dúctil) y la compresión en el resto del material por delante de la herramienta (principal mecanismo).

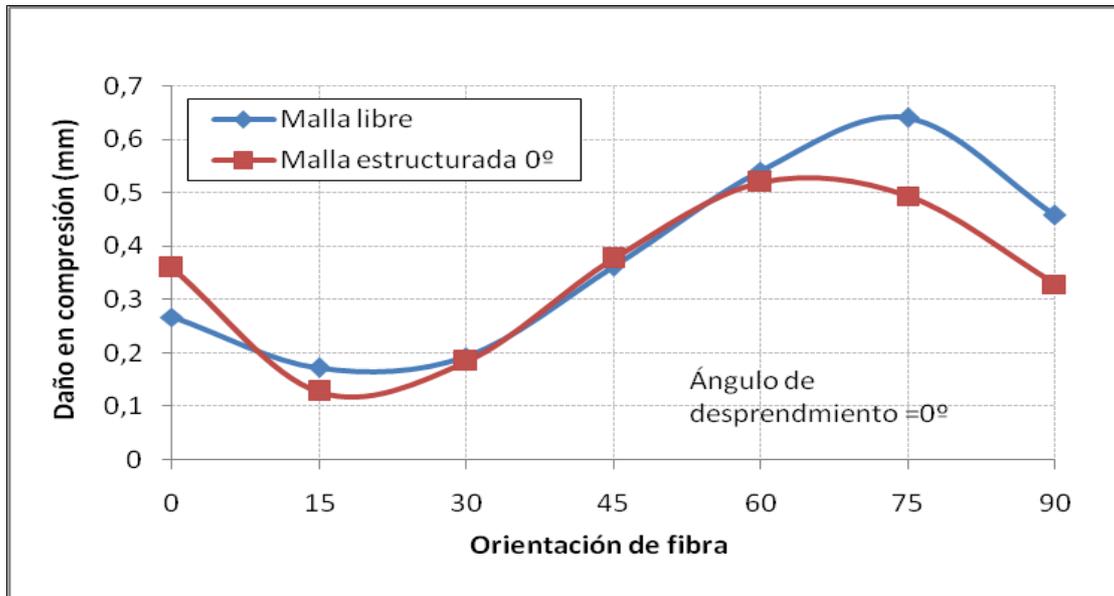


Fig 5.17: Resultados de daño en compresión en la matriz frente a orientación de fibra para el modelo propuesto de malla libre y malla estructurada a $90/0^\circ$

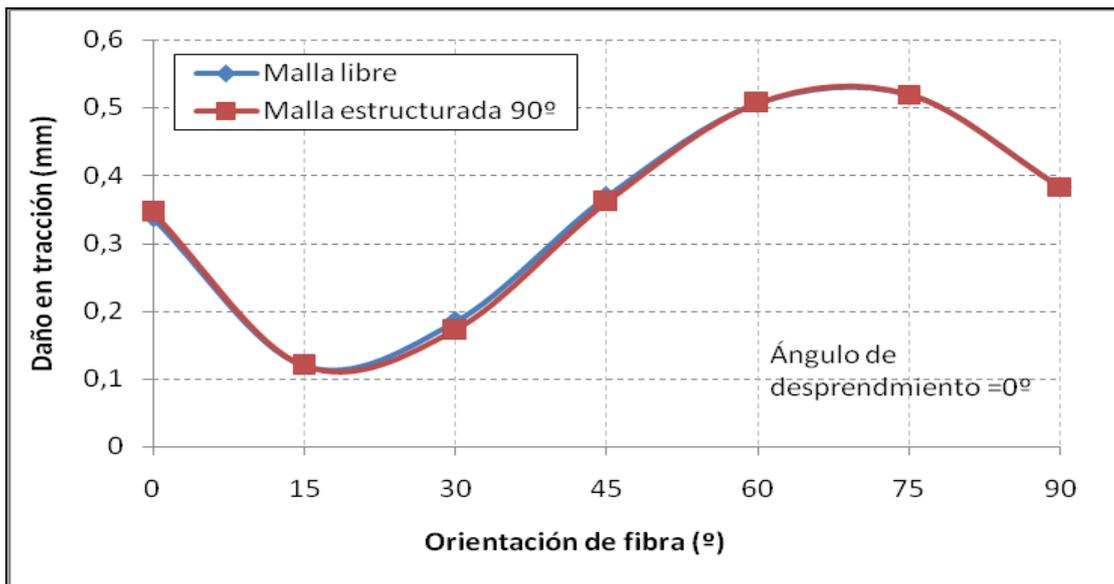


Fig 5.18: Resultados de daño en tracción en la matriz frente a orientación de fibra para el modelo propuesto de malla libre y malla estructurada a $90/0^\circ$

Se observa que el plano de propagación se produce en la dirección de la orientación de fibra. La inclinación de la zona primaria (línea que divide la zona dañada y la no dañada en frente de la herramienta) es fuertemente dependiente de la orientación de fibra como se puede comprobar en la Fig 5.19;

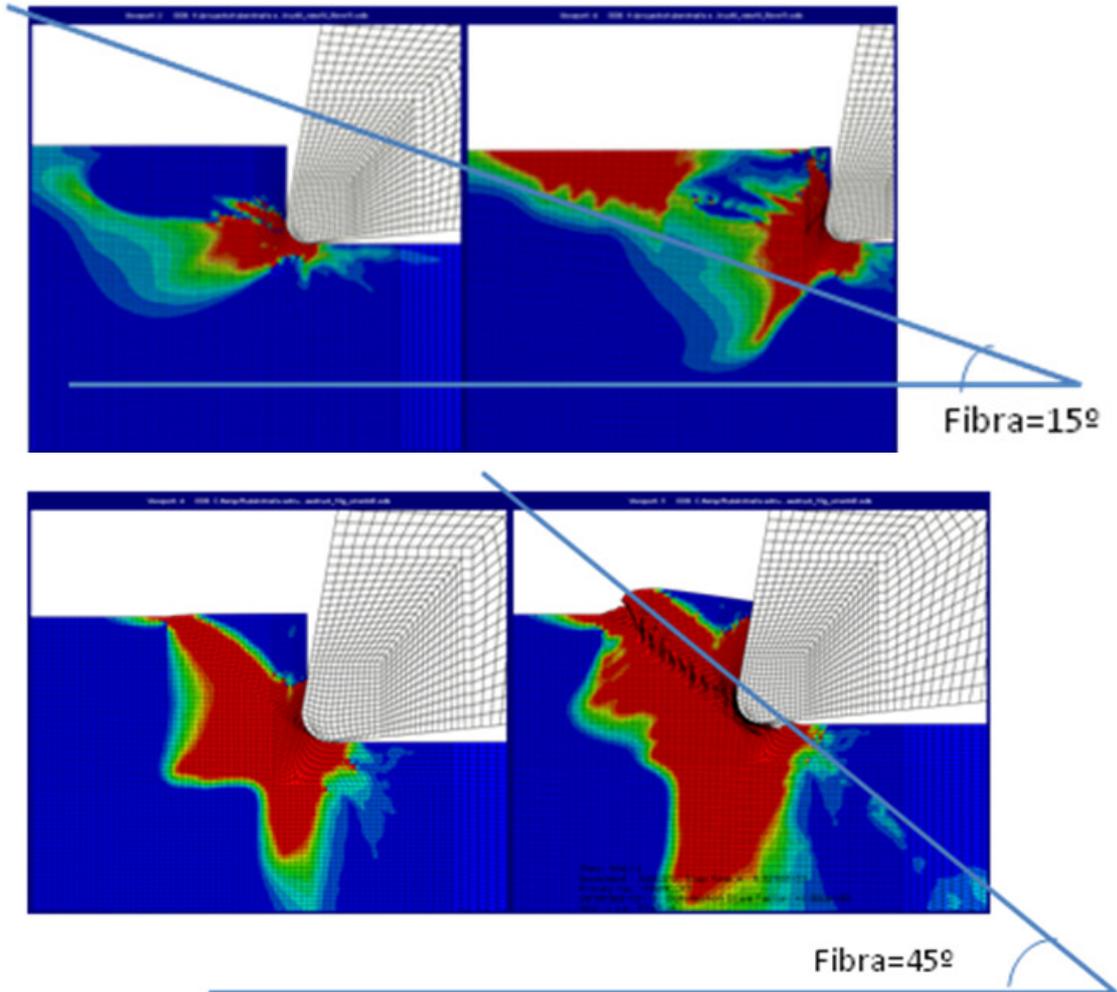


Fig 5.19: Plano de propagación del daño a compresión en la matriz con fibra orientada a -15° y -45°

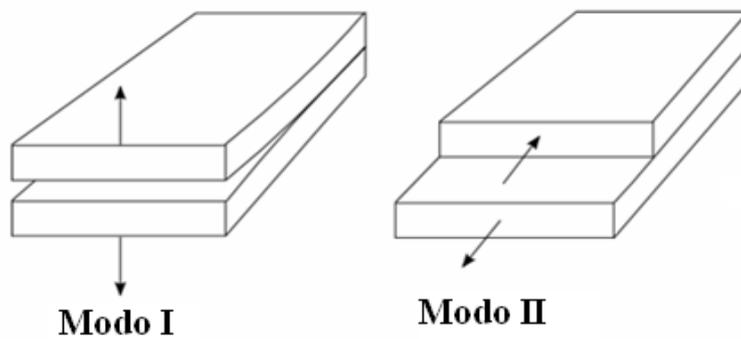


Fig 5.20: Esquema del modo I y modo II de fallo

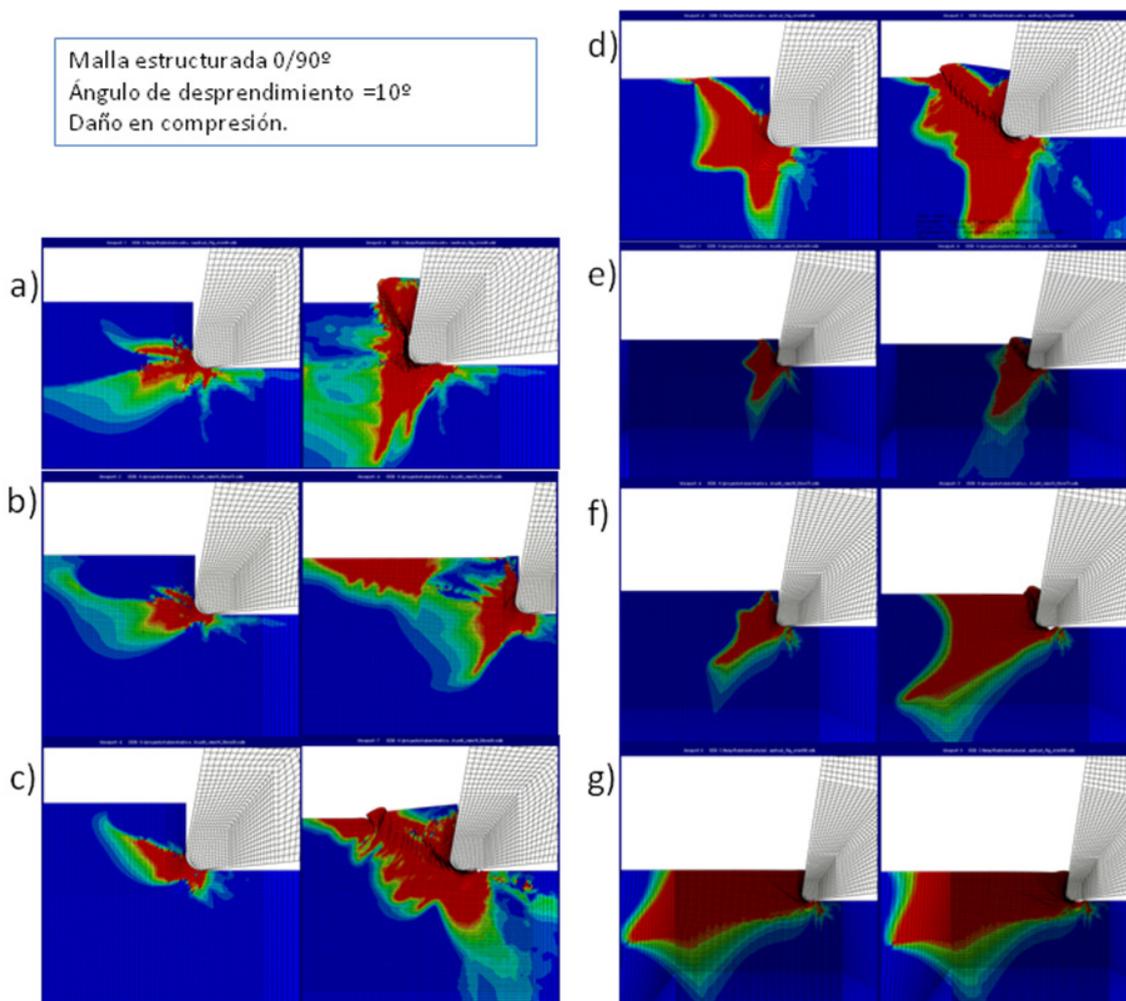


Fig 5.21: Inicio de la formación de la viruta y viruta completa para orientaciones a)0°, b)15°, c)30°, d)45°, e)60°, f)75°, g)90°. Daño en compresión.

La Fig 5.21 permite observar la influencia de la orientación de fibra en el daño a compresión de la matriz, produciéndose contornos muy diferentes en cada caso.

En el caso estudiado en este proyecto, con una orientación negativa de las fibras, el corte superficial es limpio, produciéndose una superficie relativamente lisa y sin grietas, debido a que la fibra es soportada por el resto del material por el lado contrario antes de que se introduzca la herramienta, y por tanto la flexión es mínima en ese instante. Una vez iniciado el corte, la componente de la fuerza de corte a lo largo del eje de la fibra crea una tensión de tracción que hace que las fibras puedan romper en las cercanías de la zona de corte, dando lugar a una superficie con fibras sin cortar.

La interfase fibra matriz es el principal punto de fallo del material, produciéndose bajo carga una desunión de los dos componentes por la flexión de las fibras. Según los estudios previos, el máximo daño se produce para -90° , propagándose en modo de fallo I (apertura en la interfase) y en modo de fallo II (ruptura inducida por compresión y deslizamiento de la interfase). Se puede ver la gran extensión del daño producido en la matriz a -90° en la Fig 5.21 g), tanto por delante de la herramienta como en profundidad.

A 0° , el modo I es el principal mecanismo de fallo, propagándose por delante de la herramienta y en la dirección del plano de corte. En la Fig 5.21 a) se puede observar que en el inicio de la formación de la viruta el daño se produce efectivamente por delante de la herramienta. Las siguientes Fig 5.22 y Fig 5.23 muestran también el inicio del daño y su propagación para otras simulaciones con fibra a 0° .

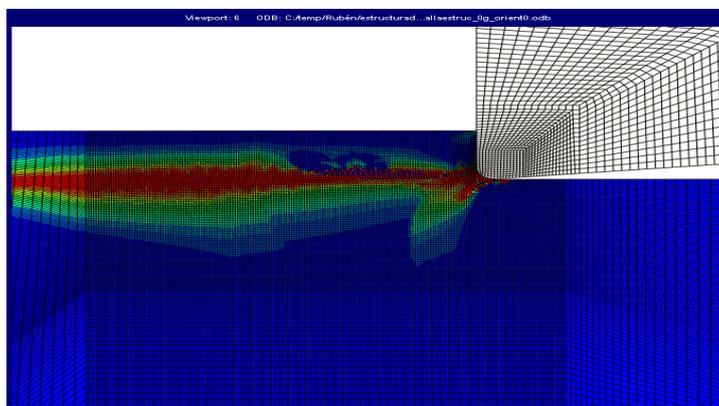


Fig 5.22: Evolución del daño a compresión por delante de la herramienta para orientación de fibra 0° , malla estructurada y ángulo de desprendimiento 0° .

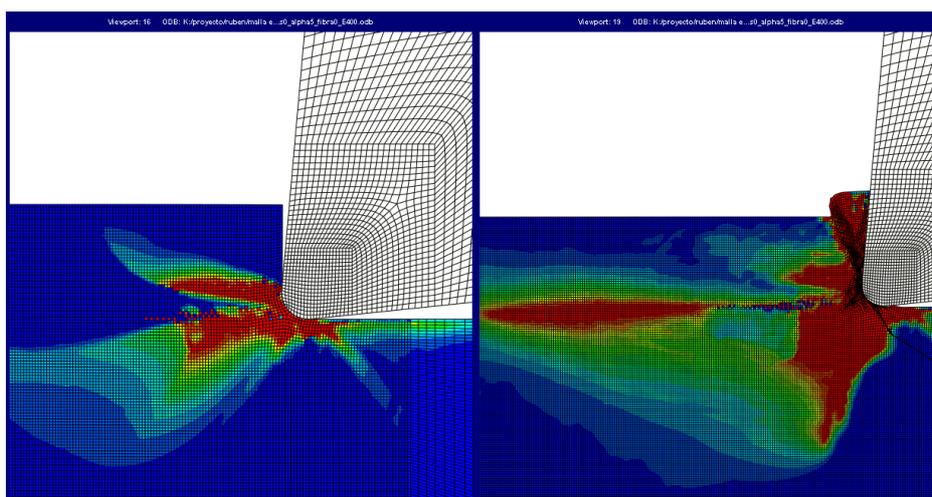


Fig 5.23: Evolución del daño a compresión en la malla estructurada, fibra 0° , ángulo de desprendimiento 5°

Entre -15° y -45° (orientaciones bajas) el modo II de fallo se convierte en el principal, pero coexiste con el modo I. Además de propagarse en la dirección de la fibra o la interfase, el daño se extiende de manera combinada, debido al mecanismo de apertura pero también a la compresión y deslizamiento. El corte se produce por laminación pura.

En la siguiente figura el daño a compresión se produce en la dirección de la fibra, 15° , producido por la introducción de la herramienta. Se observa como el daño provocado por la fuerza generada por la herramienta está por encima del plano de corte y acaba saliendo a la superficie, con lo cual a bajas orientaciones el daño interno en profundidad, que es el que realmente interesa evitar para no perder las propiedades del material compuesto, se produce en mucha menor medida que a altas orientaciones de fibra.

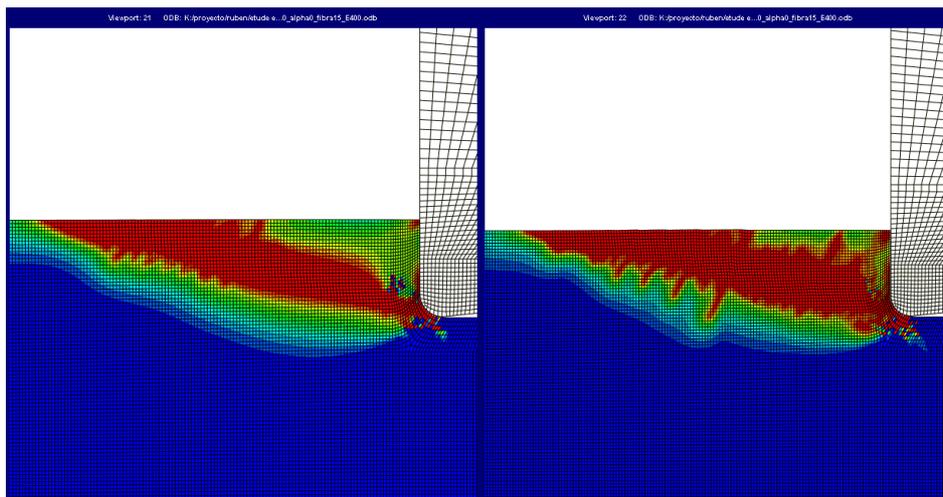


Fig 5.24: Evolución del daño a compresión en la malla estructurada, fibra 15°, ángulo de desprendimiento 0°

La siguiente Fig 5.25 muestra la evolución del daño para el mismo caso que la Fig 5.21 pero con daño a tracción. Se puede observar como el daño se localiza en zonas situadas debajo de la superficie mecanizada, ya que se trata de una zona traccionada debido a la fuerza de corte en dirección x que genera la herramienta a su paso. Mientras que en la zona localizada por delante de la herramienta se experimenta sobre todo daño a compresión, como se ve en la Fig 5.21, la misma fuerza genera una tracción por debajo de la herramienta.

A altas orientaciones de fibra, como en el caso de -75 o -90° , el daño a tracción se encuentra perfectamente localizado por debajo del plano de corte, únicamente existiendo por encima de ese plano daño a compresión. Este hecho es muy desfavorable para las propiedades mecánicas del material.

A orientaciones medias como -30 o -45° , se produce el mayor daño a tracción debajo de la superficie mecanizada. La generación de daño en la dirección de la fibra provoca este resultado.

A bajas orientaciones, como el en caso de -15° , se puede observar incluso el detalle que al igual que ocurre en la Fig 5.27, el daño a tracción aparece en la dirección de la fibra como en todos los casos pero visualmente explicativas son esas franjas rojas cercanas a la superficie donde el fenómeno de separación de la interfase fibra-matriz por tracción queda en evidencia.

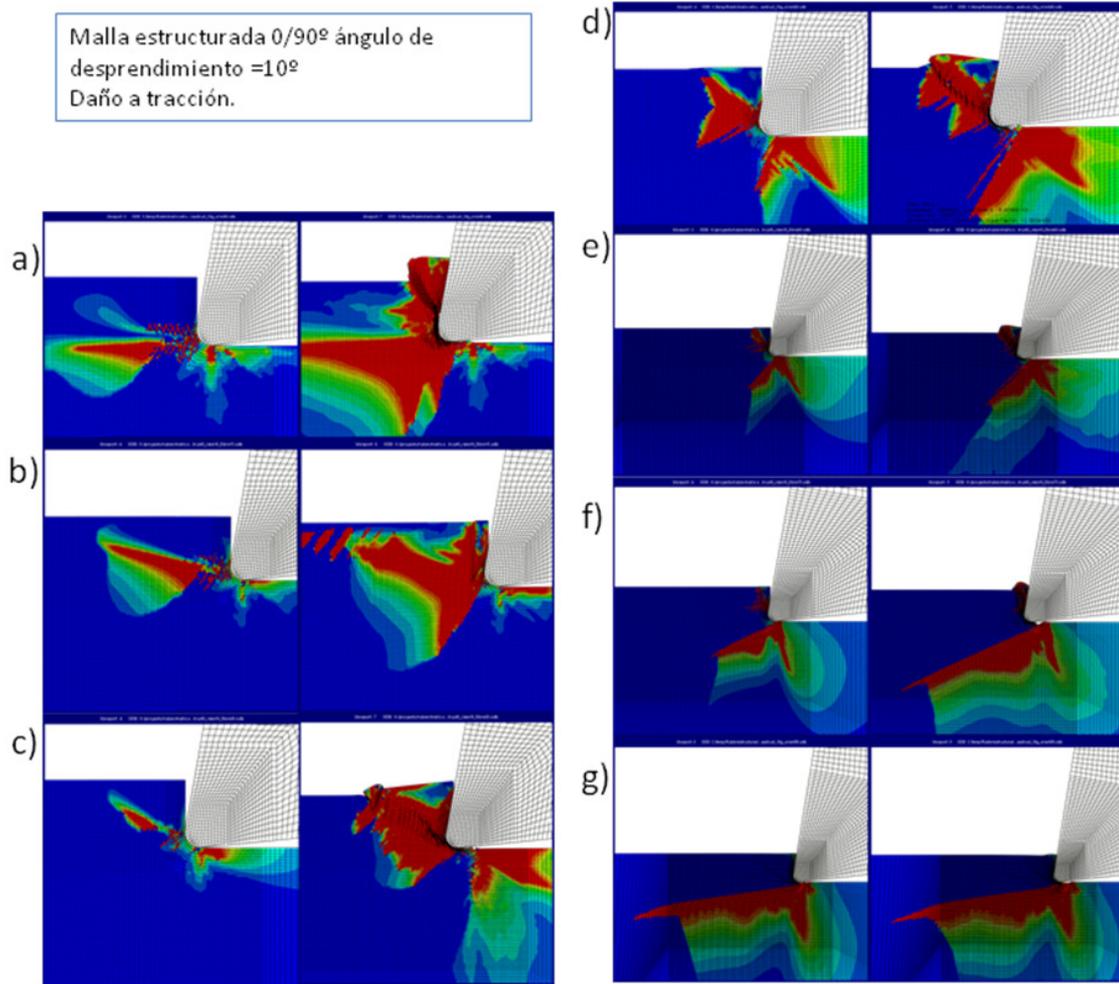


Fig 5.25: Inicio de la formación de la viruta y viruta completa para orientaciones a)0°, b)15°, c)30°, d)45°, e)60°, f)75°, g)90°. Daño a tracción.

A 0° el daño a tracción sufre el mismo fenómeno que el daño a compresión, desarrollándose en la dirección x y en el plano de corte.

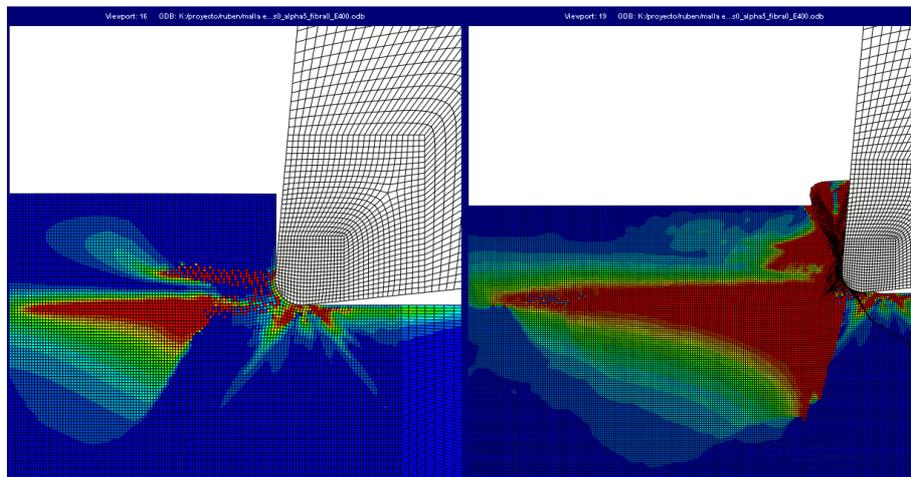


Fig 5.26: Evolución del daño a tracción en la malla estructurada, fibra 0°, ángulo de desprendimiento 5°

Se puede observar que el daño a tracción se produce en la dirección global de la fibra pero traccionada transversalmente, indicado por las franjas rojas donde se ha superado el criterio de Hashin, lo que provocará un fallo en la interfase por desunión de la fibra y la matriz, en este caso de baja magnitud.

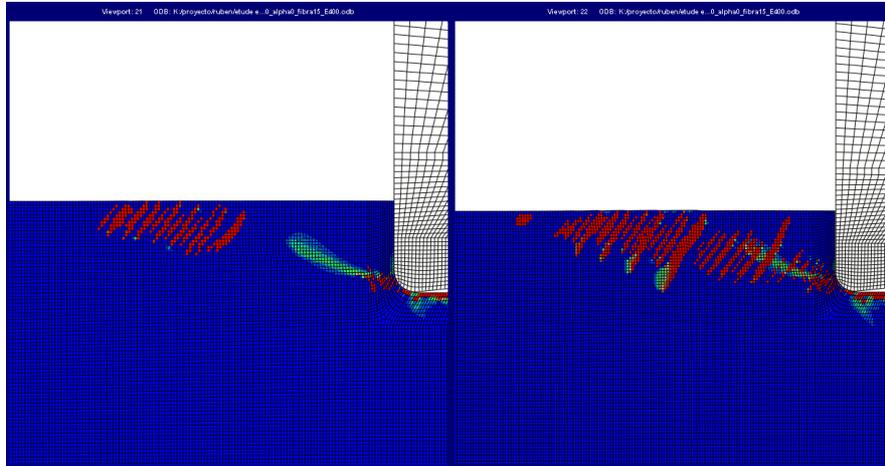


Fig 5.27: Evolución del daño a tracción en la malla estructurada, fibra 15°, ángulo de desprendimiento 0°

Se analiza a continuación la influencia de la orientación de fibra en la forma obtenida de la viruta completa.

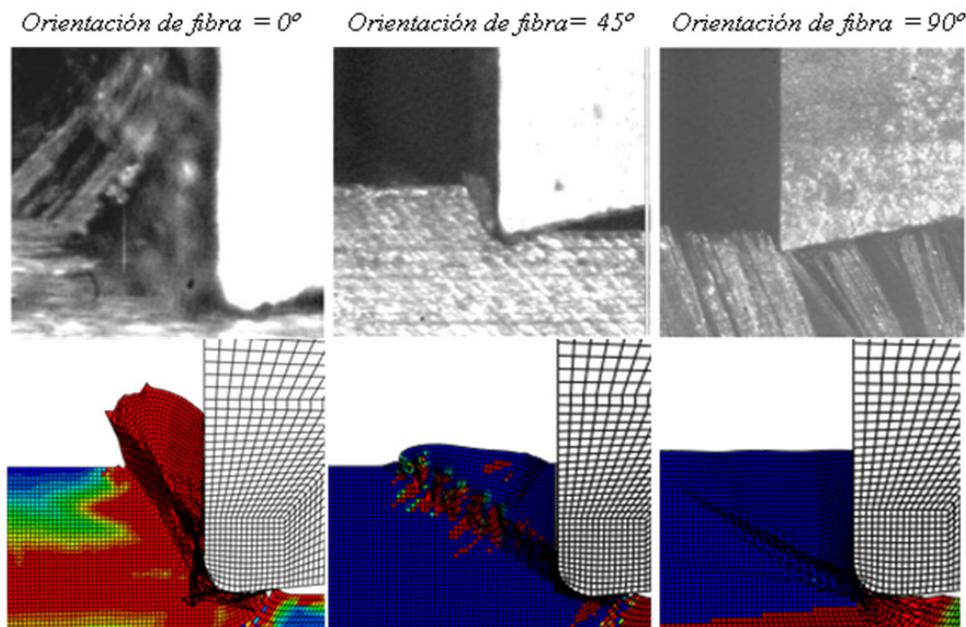


Fig 5.28: Distintas formas de viruta completa a distintas orientaciones de fibra

Existe una disminución general del tamaño de la viruta y longitud de los trozos de fibra rota con la orientación creciente de la fibra.

Se puede observar en la Fig 5.28 la influencia en la formación de la viruta de la orientación de fibra. Con una orientación muy baja de 0° , al avanzar la herramienta se

crea una abertura que se propaga en forma de grieta, y se crea una viruta de un grueso similar a la profundidad de corte. Se produce una flexión de las fibras seguido de una fractura transversal por compresión, que hace que las fibras se partan y se genere esa viruta de gran longitud.

Con las fibras orientadas a -45° , la viruta se forma por pura laminación, obteniendo en este caso una viruta continua para bajas profundidades de corte (hasta 0,07 mm) y una superficie limpia.

En el caso de orientación -90° , el esfuerzo de compresión aumenta con el desplazamiento de la herramienta, y la matriz se agrieta y falla en la interfase fibra-matriz. Con una profundidad de corte baja, como en el caso del modelo propuesto de 0,2 mm, las fibras se doblan levemente con lo que se obtiene viruta muy fina. Además materiales dúctiles como la fibra de vidrio no generan grietas profundas y viruta en agujas como ocurre con la fibra de carbono.

El aumento de la compresión y la disminución de la flexión provocan no tener el suficiente espacio para resbalar y desplazarse por la superficie de desprendimiento de la herramienta. Esto unido a la resistencia de las fibras, que se apoyan en la matriz, provocan que la viruta sea más corta, discontinua y más difícil de crear, como se observa también en la Fig 5.28.

Los resultados obtenidos de la forma de la viruta son muy coherentes, con el efecto principal de flexión a bajas orientaciones de fibra, de compresión a altas y una mezcla de ambas a -45° , donde la fibra es cortada transversalmente y la viruta se produce con una longitud comparable a la profundidad de corte. En parte, esto explica la disminución de la dimensión de la viruta.

En la siguiente gráfica se puede comprobar la dificultad de la formación de la viruta a medida que aumenta la orientación de fibra, ya que se indica el tiempo que se tarda en iniciarse y en su generación completa para todas las orientaciones estudiadas. Esto está relacionado con el tiempo de convergencia o estabilización de la fuerza de corte, ya que se recuerda que ésta no se consigue hasta no haber formado la primera viruta completamente.

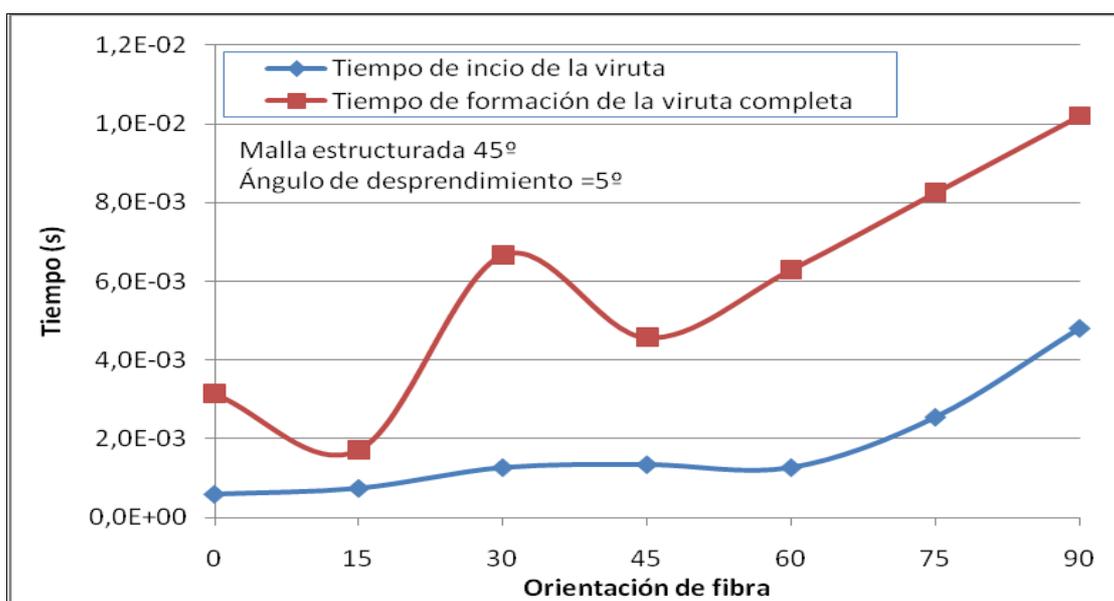


Fig 5.29: Tiempo de inicio y de formación de la viruta completa con distintas orientaciones de fibra

5.2.2 Influencia del ángulo de desprendimiento

El efecto de ángulo de desprendimiento de la herramienta sobre los resultados no es tan significativo si se compara con la influencia de la orientación de fibra.

Tras el análisis de este parámetro se extrae la conclusión de, como se podía prever, los resultados obtenidos para los distintos ángulos de desprendimiento de la herramienta concuerdan con los teóricos, ya que, en la mayoría de los casos, se aprecia un aumento de las fuerzas de corte según disminuye el ángulo de desprendimiento. Es un parámetro que tiene poca influencia en la fuerza de corte para las orientaciones de fibra hasta -45° , donde los valores varían en una gama estrecha. Sin embargo, para orientaciones más altas, se observa una disminución sensible de la fuerza con el ángulo de desprendimiento creciente de la herramienta. Como se puede comprobar en la Fig 5.30, Fig 5.31 y Fig 5.32 esto no se cumple para todas las orientaciones en todos los ángulos de desprendimiento, pero sí la tendencia general, que es el resultado buscado.

Por encima se encuentra la curva de los resultados obtenidos en la simulación con herramienta de ángulo de desprendimiento igual a 0° , y se debe a que una herramienta tan robusta tiene mayor contacto con la pieza a mecanizar y por tanto necesita de mayor fuerza para iniciar la formación de la viruta. Por debajo de ella se encuentra la curva para ángulo de desprendimiento igual a 5° , y por debajo de ésta la de 10° , herramientas que penetran mejor en el material.

Los resultados no muestran diferencias muy significativas ya que éstas se empezarían a apreciar con ángulos mucho mayores, como 30° , donde la caída de las fuerzas con el ángulo de desprendimiento sería notable. En este proyecto se está tratando una gama de ángulos muy similares pero que nos sirven para detectar la influencia que suponen.

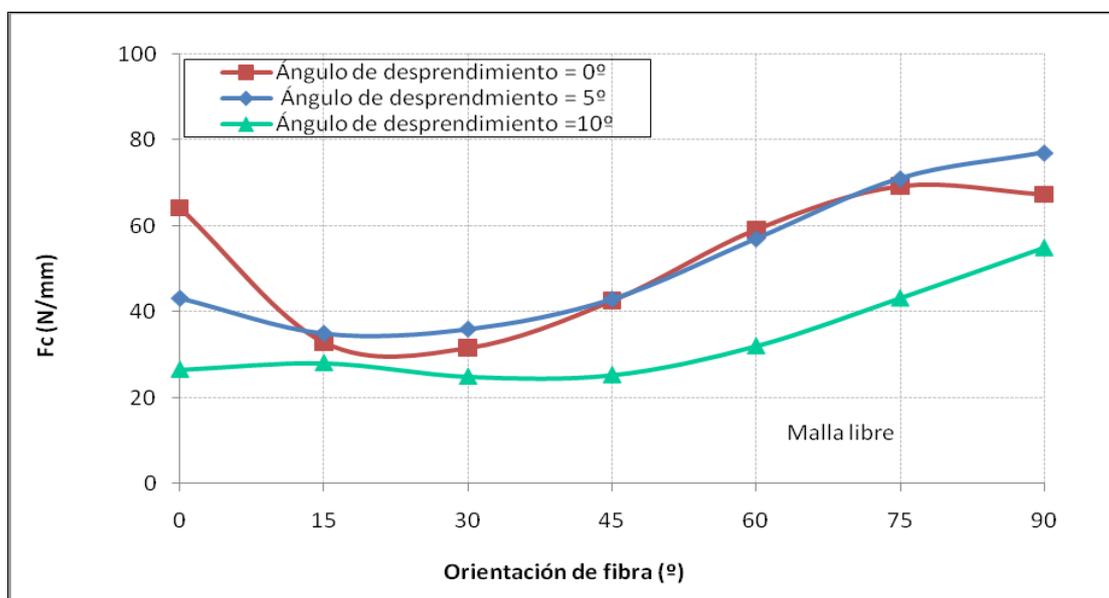


Fig 5.30: Fuerzas de corte frente a la orientación de fibra para distintos ángulos de desprendimiento. Malla libre

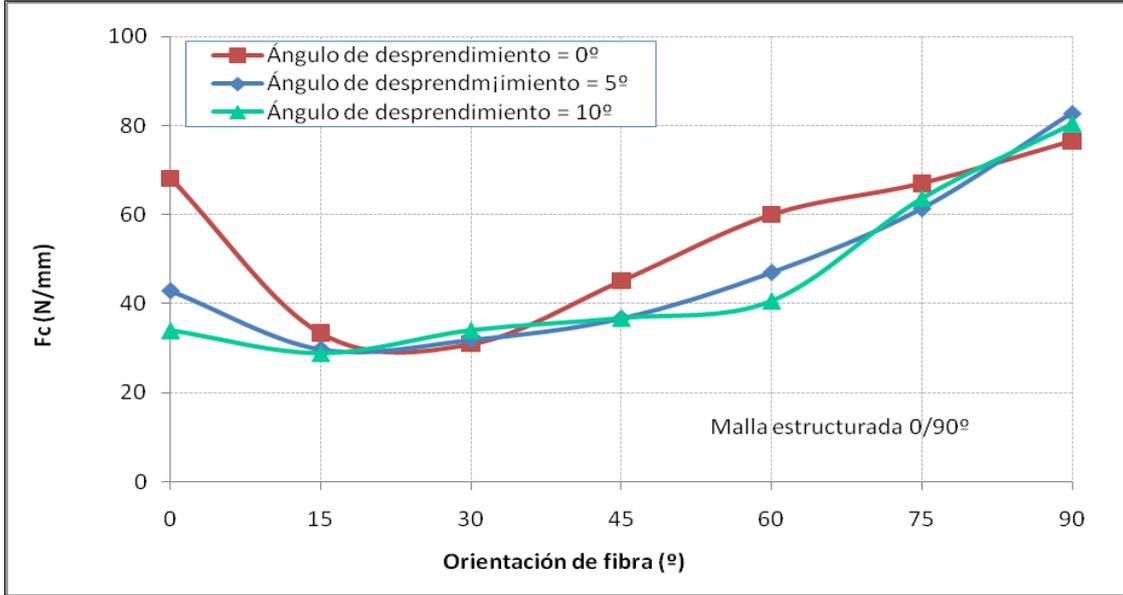


Fig 5.31: Fuerzas de corte frente a la orientación de fibra para distintos ángulos de desprendimiento. Malla estructurada 90/0°

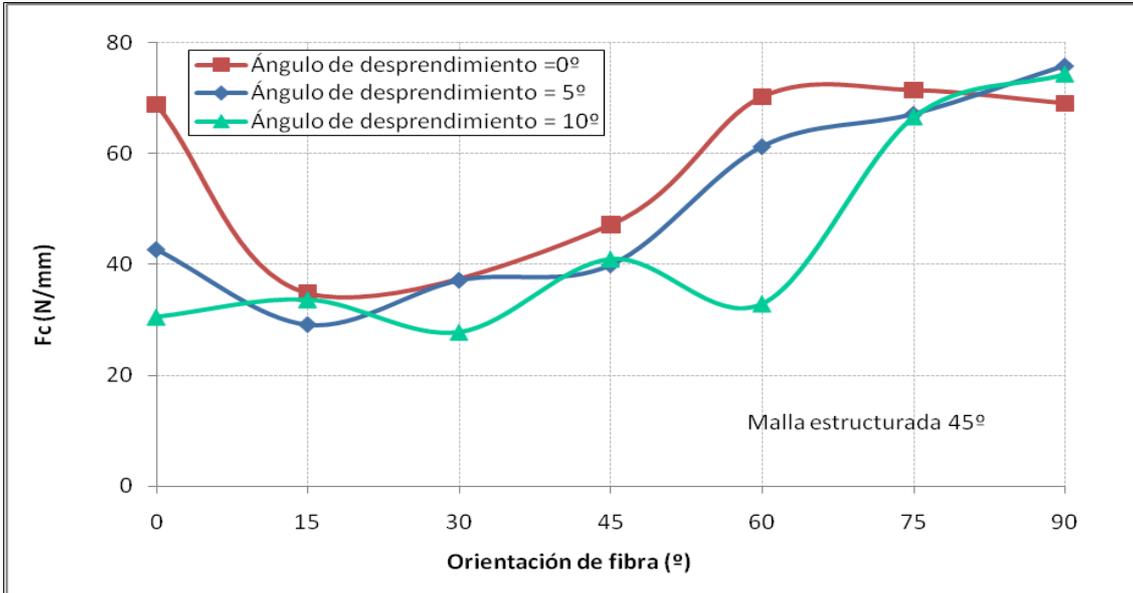


Fig 5.32: Fuerzas de corte frente a la orientación de fibra para distintos ángulos de desprendimiento. Malla estructurada 45°

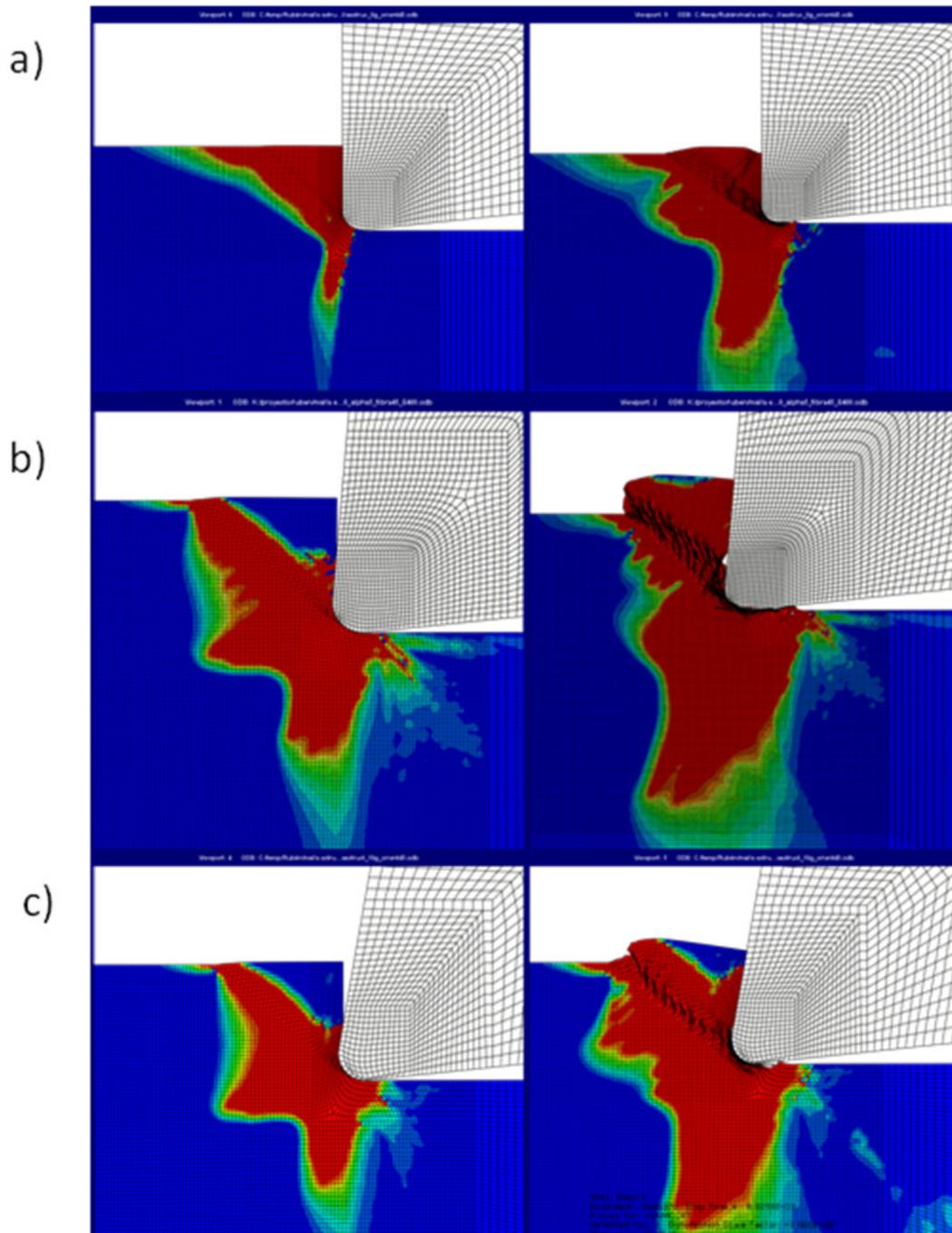


Fig 5.33: Daño a compresión para ángulos de desprendimiento a) 0°, b) 5°, c) 10°, con orientación de fibra -45° y malla estructurada 90/0°

Las Fig 5.33 muestra los tres tipos de ángulo de desprendimiento con la misma malla (estructurada a 0°) y misma orientación de fibra (-45°). Se puede observar que la variación del parámetro influye en la formación de la viruta, ya que una herramienta con un ángulo de desprendimiento grande favorece el mecanismo de flexión en las fibras, haciendo que éstas puedan deslizarse por la superficie de desprendimiento de la herramienta. El menor contacto con las fibras hace que la zona comprimida por delante de la herramienta sea menor, y mayor la traccionada en el resto de la fibra por encima y por debajo de esa zona de contacto, en la dirección de la fibra, como se puede observar

en la Fig 5.34, generando por tanto una longitud de la fibra rota mayor, ya que la fibra se considera que falla cuando la tensión excede la resistencia a la tracción longitudinal de la de la fibra (la resistencia a la compresión en la fibra de vidrio es cinco veces su resistencia a tracción, por lo que el mecanismo de fallo en el vidrio predominante es la flexión)

Un ángulo muy pequeño de desprendimiento favorece la compresión contra las fibras en el mecanizado, lo que además de provocar un mayor daño en la zona de contacto herramienta-pieza (zona roja) supone una formación más difícil de la viruta.

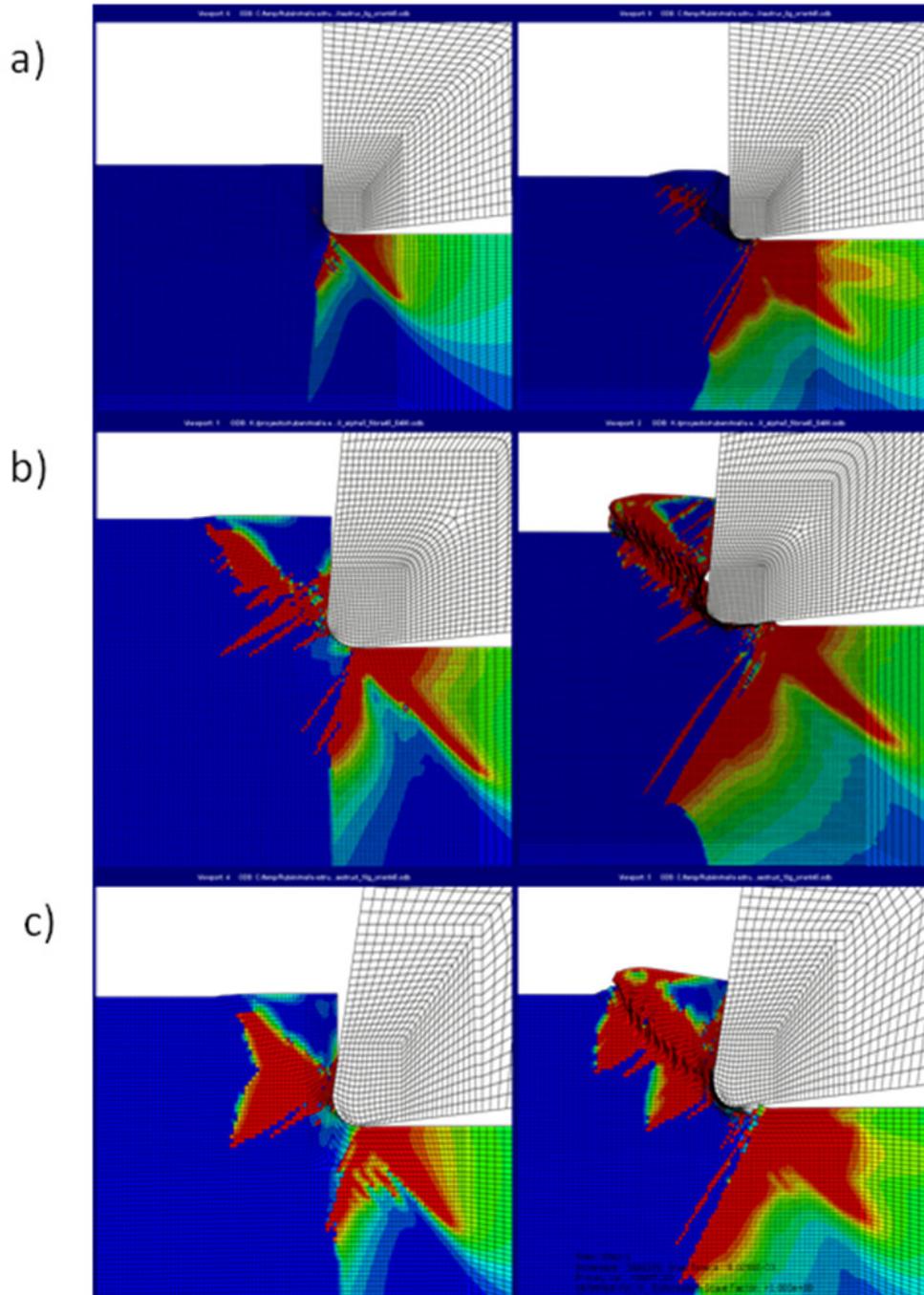


Fig 5.34: Daño a tracción para ángulos de desprendimiento a) 0°, b) 5°, c) 10°, con orientación de fibra -45° y malla estructurada 90/0°

5.2.3 Influencia de la malla

Se ha analizado cual es la influencia en el modelo propuesto de la forma en la que se ha construido el mallado. En la Fig 5.35, Fig 5.36 y Fig 5.37, se puede ver la desviación de los valores obtenidos de la fuerza de corte para los diferentes modelos de malla.

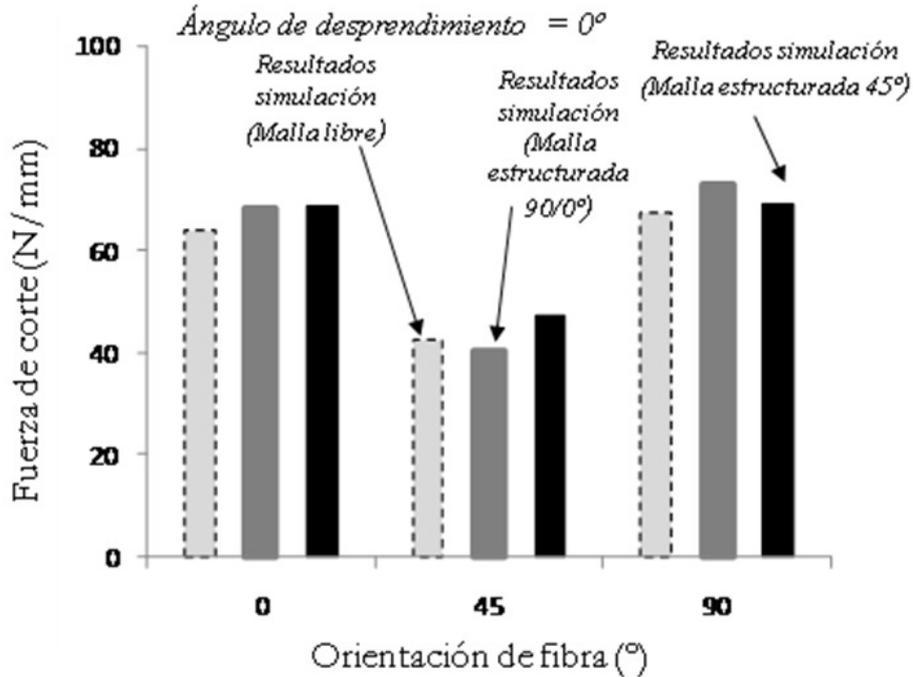


Fig 5.35: Comparación de las fuerzas de corte generadas modificando la malla y manteniendo constante el ángulo de desprendimiento de la herramienta (0°)

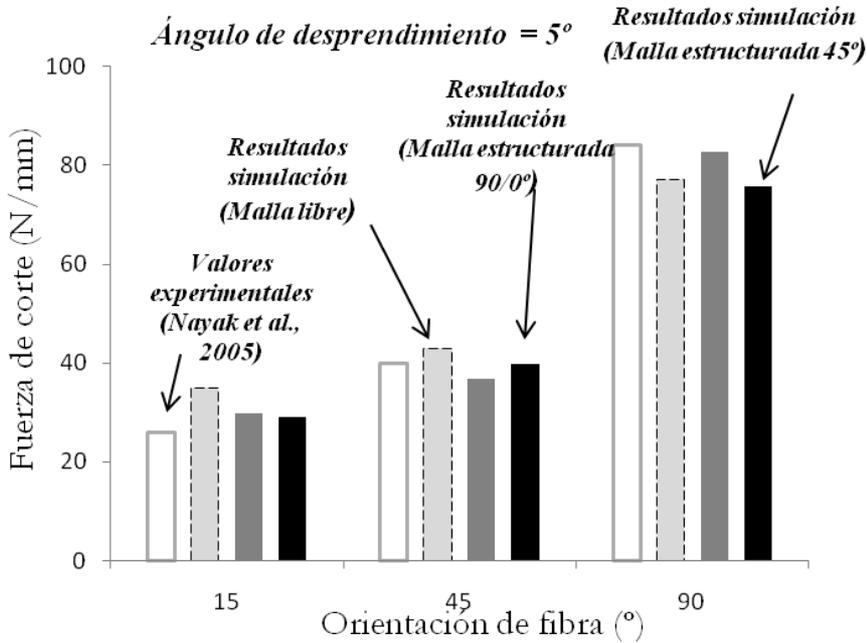


Fig 5.36: Comparación de las fuerzas de corte generadas modificando la malla y manteniendo constante el ángulo de desprendimiento de la herramienta (5°) y los experimentales de Nayak [10] (Nayak et al., 2005)

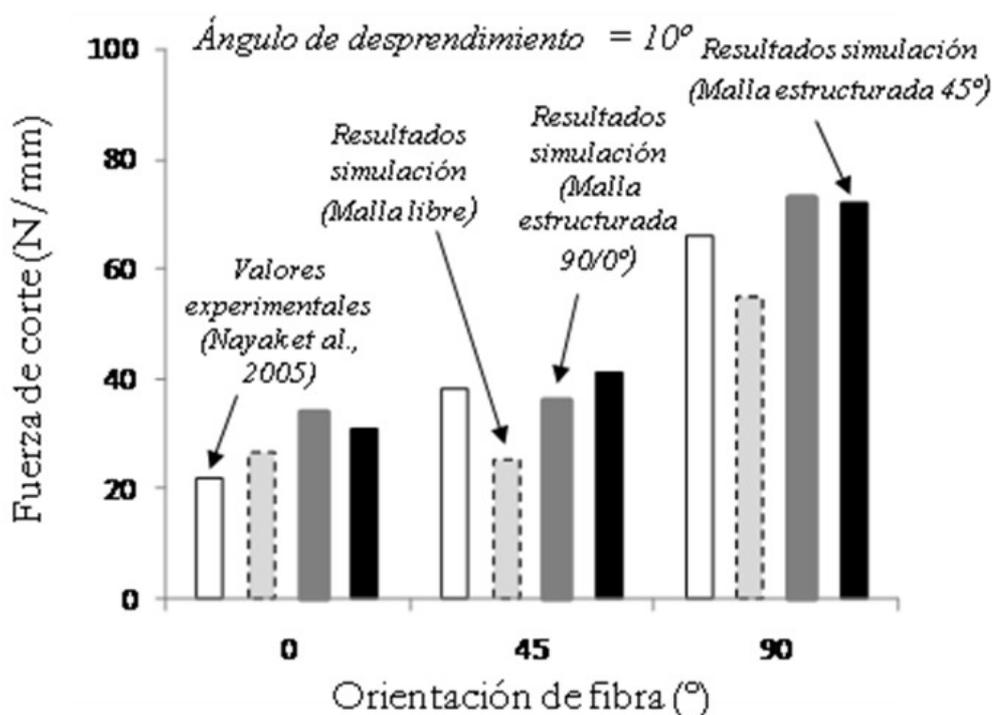


Fig 5.37: Comparación de las fuerzas de corte generadas modificando la malla y manteniendo constante el ángulo de desprendimiento de la herramienta (10°) y los experimentales de Nayak [10] (Nayak et al., 2005)

La conclusión que se extrae de la Fig 5.35, Fig 5.36 y Fig 5.37 es que los valores de la fuerza de corte no dependen en exceso del modelado interno de la malla, obteniendo resultados muy similares en todos los casos.

Una observación a comentar es que para el caso de ángulo de desprendimiento 10° , los modelos con malla estructurada mejoran bastante los resultados de la fuerza de corte en comparación con los experimentales respecto a los obtenidos con la malla libre.

En cualquier caso las diferencias no son grandes, en especial en el caso de ángulo de desprendimiento 5° , donde los resultados de las simulaciones con las tres mallas son prácticamente iguales.

Se puede decir que no es un parámetro que afecte significativamente a las fuerzas de corte.

La fuerza de avance sigue en los tres casos la misma tendencia. En las figuras siguientes se puede observar como los valores de la fuerza de avance obtenidos, tanto con malla libre como estructurada a 0° , siguen una tendencia prácticamente idéntica a los experimentales.

Como se comentó en el apartado de validación, los valores están muy por debajo de los experimentales, en los tres casos de mallado, luego la estructura de la malla no mejora este resultado. Se puede indicar que para un ángulo de desprendimiento igual a 10° , los valores de la fuerza de avance de la malla estructurada son algo más altos que los de la malla libre, fenómeno que ya sucedía con la fuerza de corte. Aun así, los resultados numéricos siguen siendo muy inferiores a los experimentales.

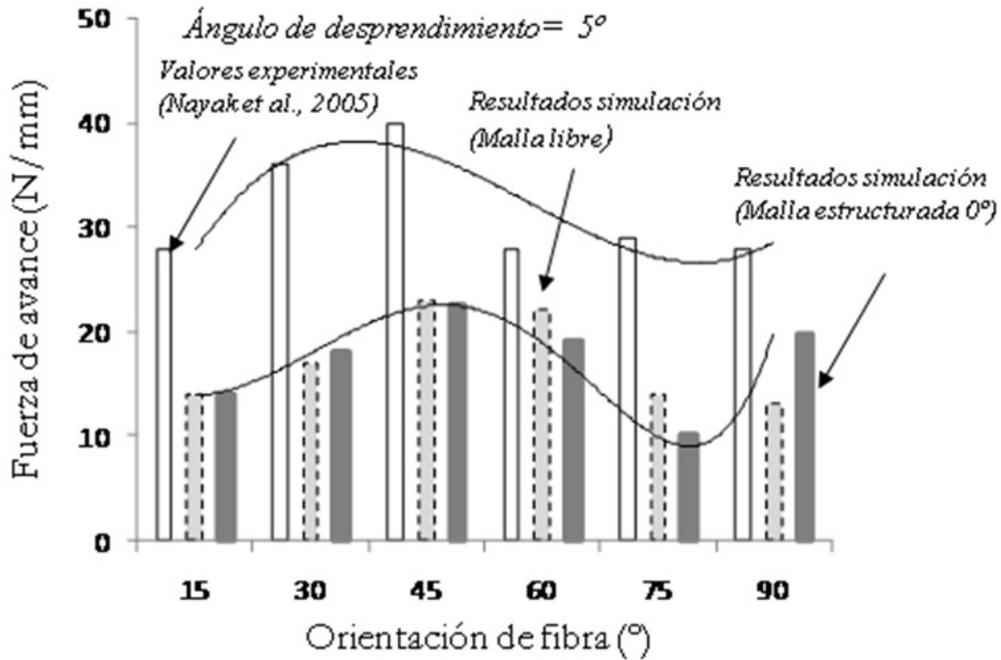


Fig 5.38: Comparación de las fuerzas de avance generadas modificando la malla y manteniendo constante el ángulo de desprendimiento de la herramienta (5°) y los experimentales de Nayak [10] (Nayak et al., 2005)

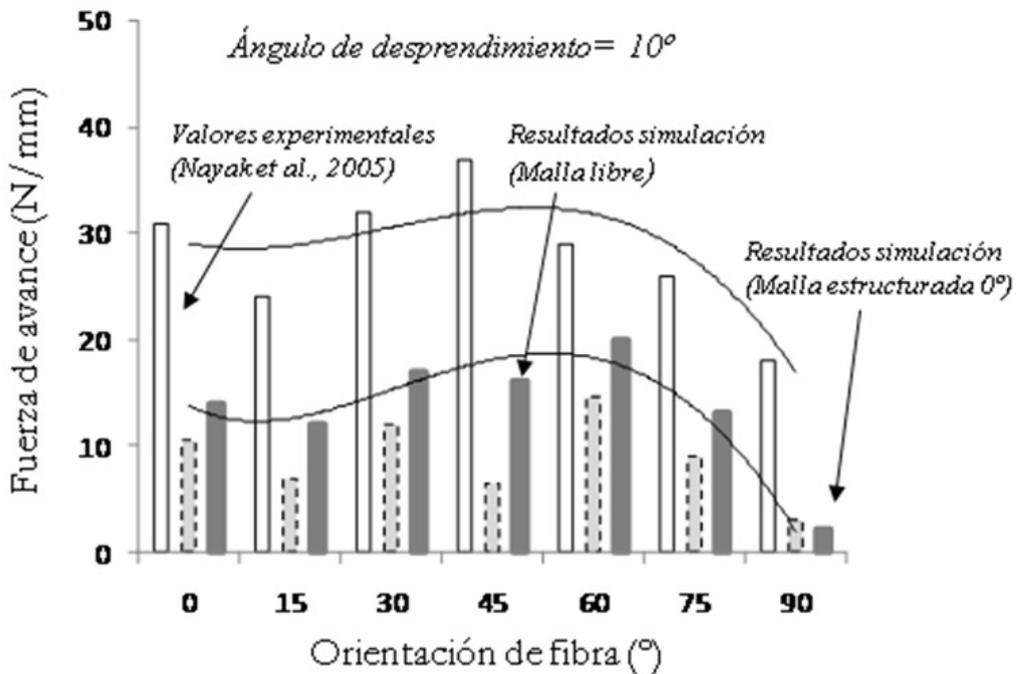


Fig 5.39: Comparación de las fuerzas de avance generadas modificando la malla y manteniendo constante el ángulo de desprendimiento de la herramienta (10°) y los experimentales de Nayak [10] (Nayak et al., 2005)

El daño en la matriz va a ser el fenómeno en el que mayor impacto tiene la estructura de la malla.

Como ya se ha comentado, el daño se extiende en la dirección de la interfase fibra-matriz, una vez iniciada la fractura. Se ha comprobado que el hecho de dar estructura a una matriz, en una determinada dirección, favorece la expansión del daño en la matriz en dicha dirección. Si además esa dirección es la misma que la de la de la fibra, el daño encuentra más vías o caminos por los que expandirse y se puede comprobar en la siguiente Fig 5.40 y Fig 5.41, tomadas para una orientación de fibra -45° tanto para la malla estructurada a 0° como para la malla estructurada a 45° .

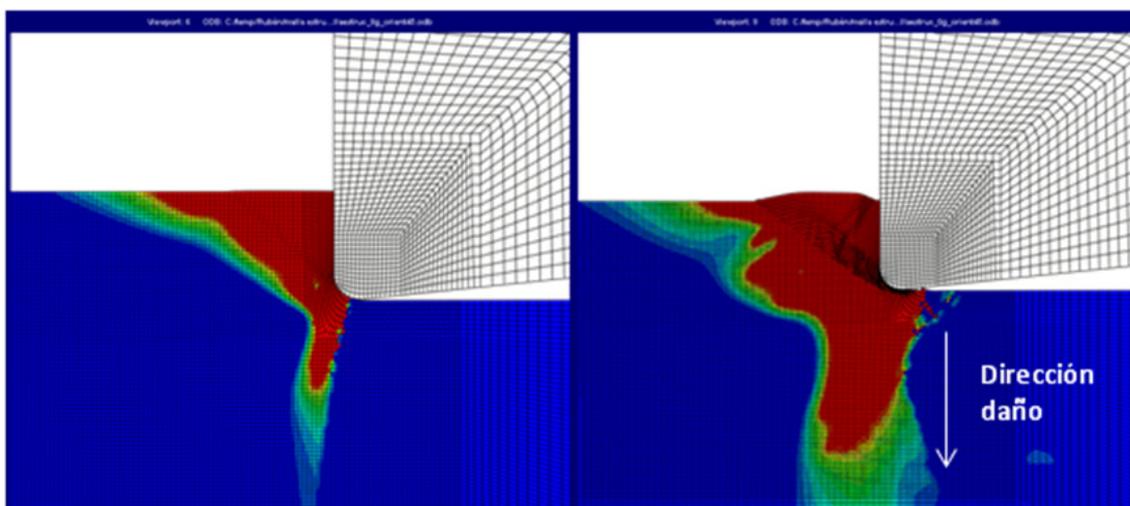


Fig 5.40: Extensión de daño a compresión en el inicio y final de la formación de la viruta con malla estructurada a 0° , orientación de fibra -45°

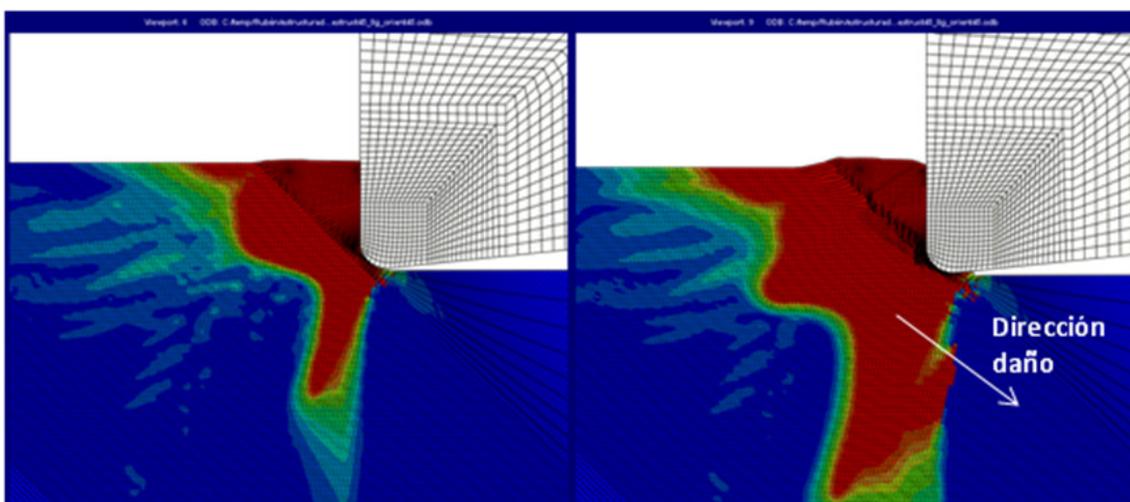


Fig 5.41: Extensión de daño a compresión en el inicio y final de la formación de la viruta con malla estructurada a 45° , orientación de fibra -45°

Se puede observar que el daño tanto a tracción como a compresión para fibra -45° progresa más con la malla estructurada a 45° , ya que favorece la expansión en esa dirección.

Este fenómeno ocurre también en el caso de la orientación de fibra -90° , el daño encontrará más fácil expandirse en el caso de la malla estructurada a $90/0^\circ$ que en el

caso de 45° , ya que la dirección de la fibra o de la interfase fibra-matriz es la misma que la de la estructura, se puede comprobar en las Fig 5.42 y Fig 5.43;

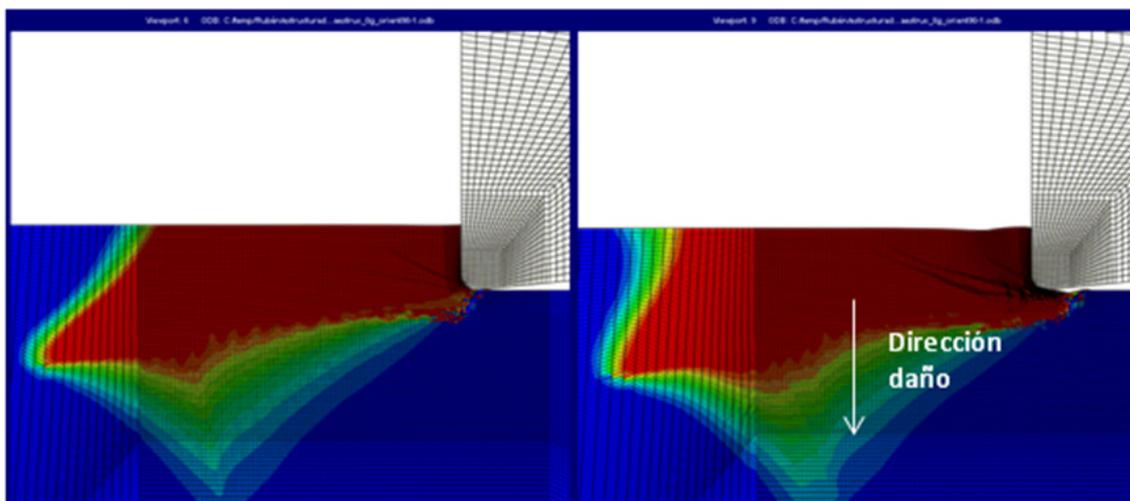


Fig 5.42: Extensión de daño a compresión en el inicio y final de la formación de la viruta con malla estructurada a $0/90^\circ$, orientación de fibra -90°

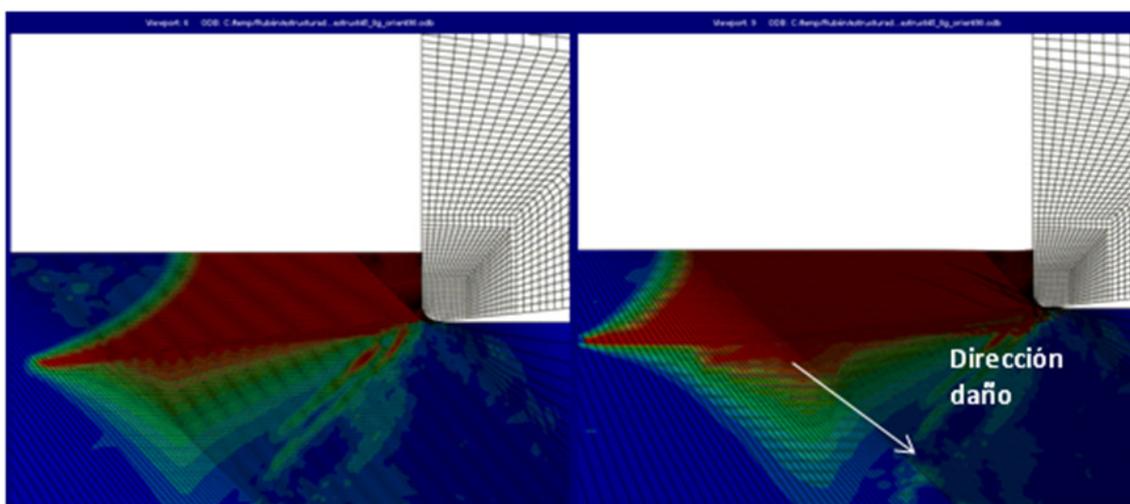


Fig 5.43: Extensión de daño a compresión en el inicio y final de la formación de la viruta con malla estructurada a 45° , orientación de fibra -90°

Se puede ver la diferencia del resultado de una malla a otra, en la Fig 5.42, caso de malla estructurada a $0/90^\circ$, donde el daño penetra más profundamente en la pieza que en el caso segundo (Fig 5.43) con malla de 45° , donde, a pesar de progresar bien, no se llega a los valores de profundidad del primer caso.

En general, el daño penetra mejor en las mallas estructuradas que en las libres, ya que esta estructura supone para el daño un camino por donde penetrar y se puede comprobar su tendencia a expandirse en la dirección a la que se haya construido. Por el contrario una disposición aleatoria de los elementos de la malla dificulta la progresión.

La Fig 5.44 representa el daño en una malla libre (izquierda) y en una estructurada a $90/0$ (derecha) a orientación de fibra 0° . El daño se propaga más uniformemente y

siguiendo una única dirección en el caso de la malla estructurada. Se ha realizado la fotografía eliminando el dibujo de la malla para poder observar con claridad el fenómeno.

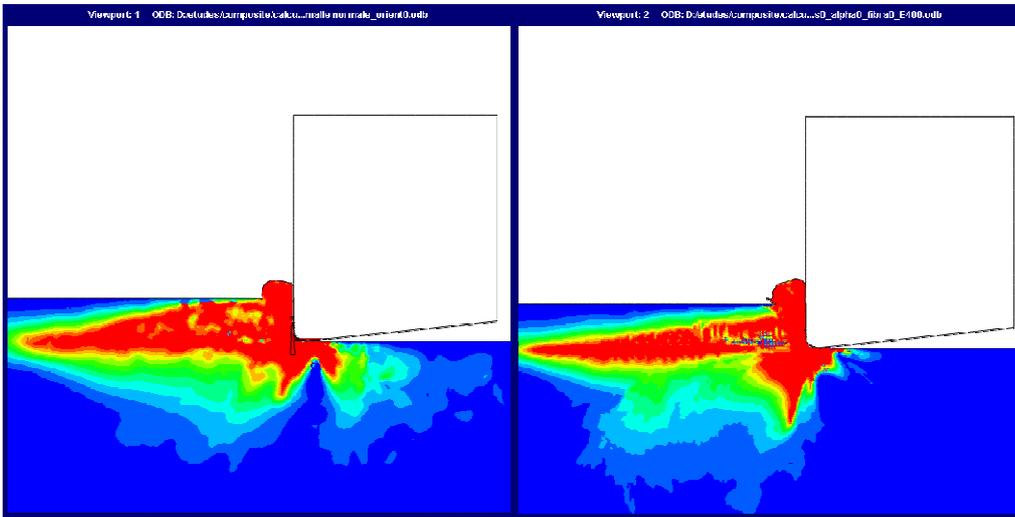


Fig 5.44: Extensión de daño a compresión con malla libre (izquierda) y malla estructurada 0/90° (derecha) con orientación de fibra igual a 0°

Se puede ver en la Fig 5.45 y Fig 5.46 como por lo general, el daño a compresión producido en la malla libre está por debajo de los valores de los obtenidos para la malla estructurada.

Además para orientaciones entre -15 y -60°, los valores del daño en compresión son mayores en la malla estructurada a 45°, y por encima de ese valor el daño es mayor para el caso de malla estructurada a 0/90°, por el fenómeno comentado. Algo similar ocurre en los valores de daño en tracción para la matriz.

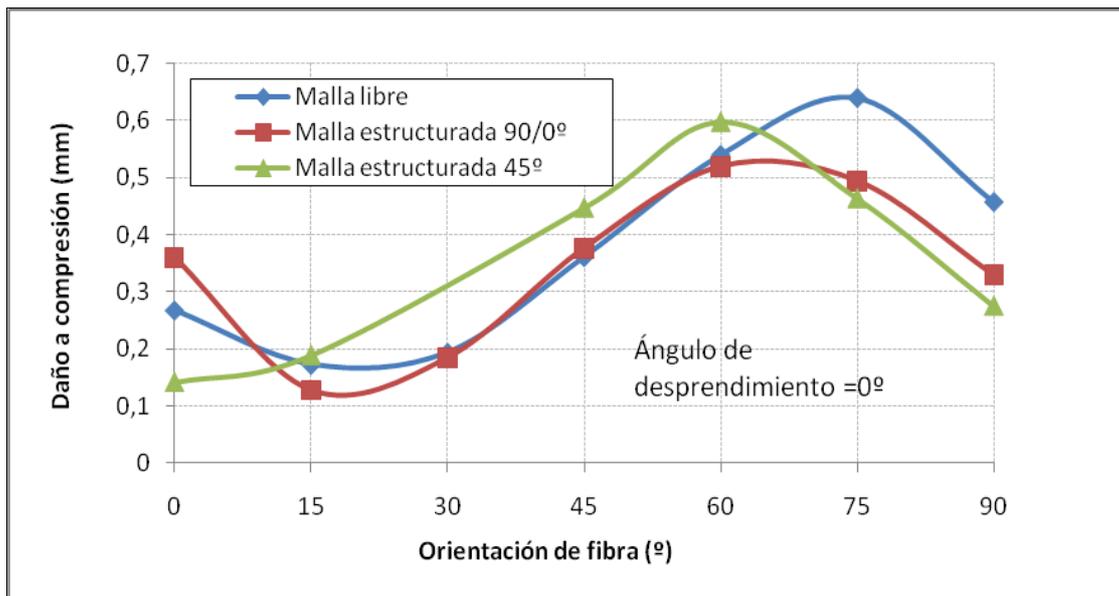


Fig 5.45: Daño a compresión frente a orientación de fibra para los tres tipos de malla. Ángulo de desprendimiento 0°

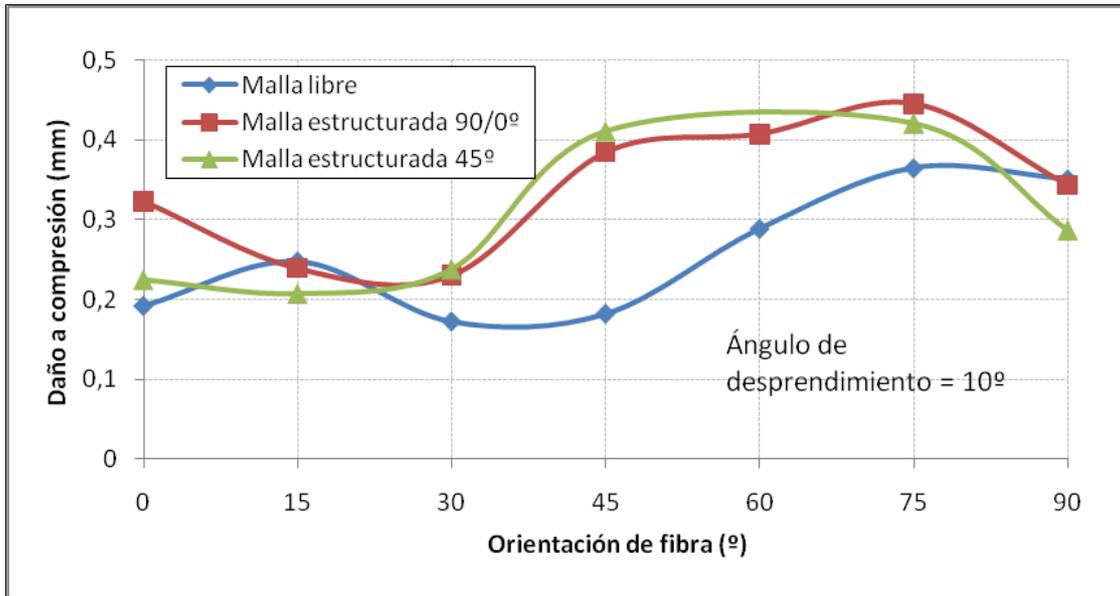


Fig 5.46: Daño a compresión frente a orientación de fibra para los tres tipos de malla. Ángulo de desprendimiento 10°

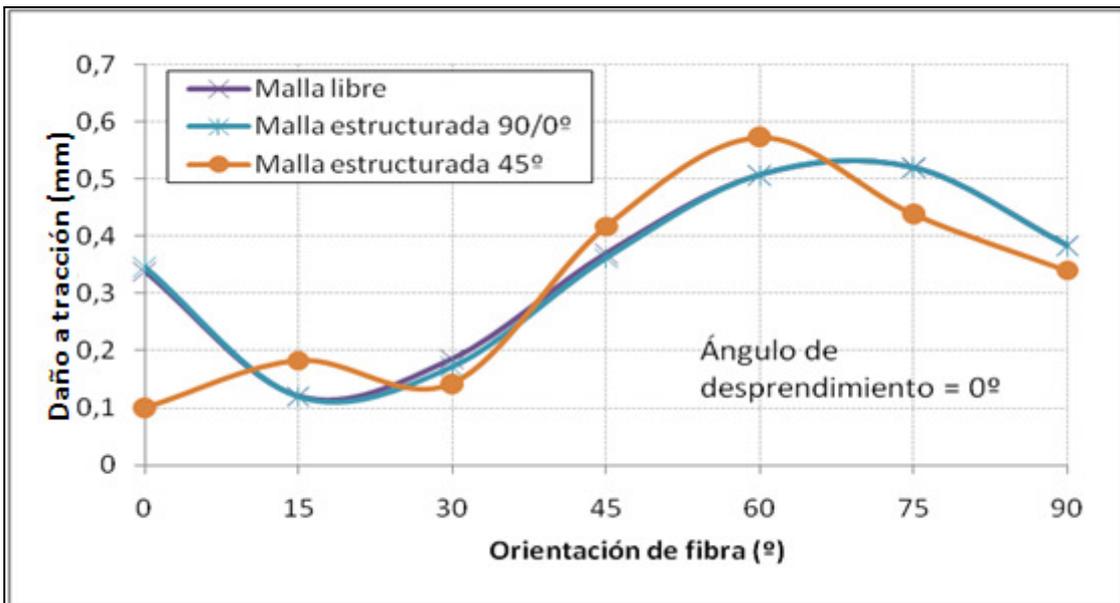


Fig 5.47: Daño a tracción frente a orientación de fibra para los tres tipos de malla. Ángulo de desprendimiento 0°.

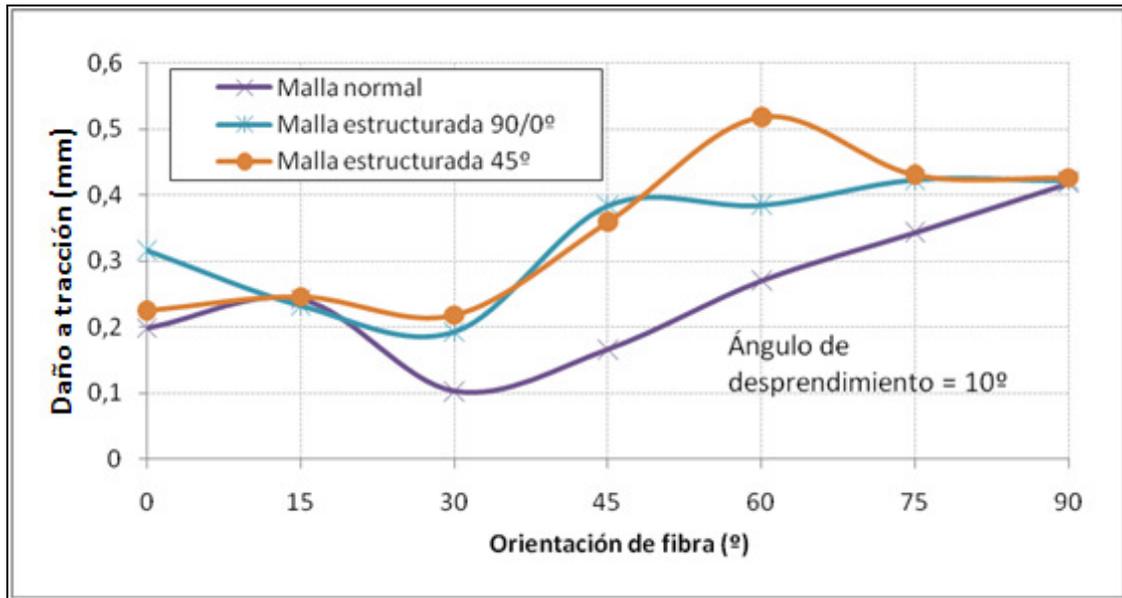


Fig 5.48: Daño a tracción frente a orientación de fibra para los tres tipos de malla. Ángulo de desprendimiento 10°.

No se debe olvidar que todos estos valores se encuentran muy por debajo de los hallados experimentalmente como se indicaba en el apartado de validación.

A continuación se muestran algunas figuras interesantes de donde proceden las mediciones de los resultados anteriores y donde se pueden observar todos los fenómenos que se han comentado;

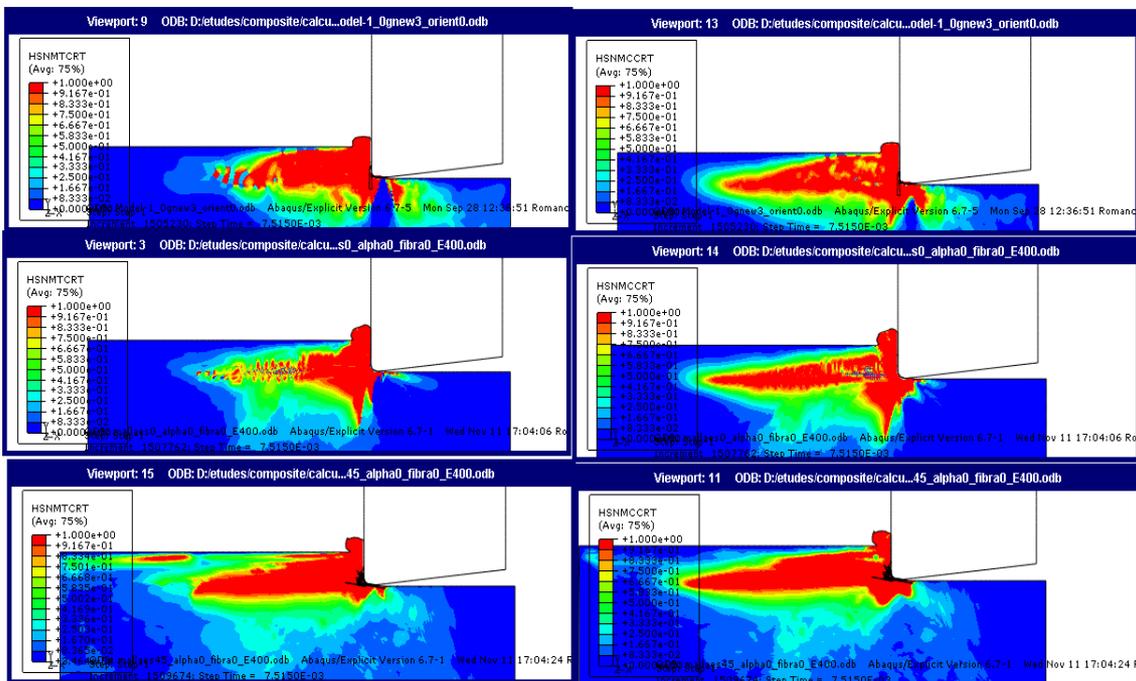


Fig 5.49: Daño en tracción (izquierda) y compresión (derecha) para malla libre, estructurada 90/0° y estructurada 45° (de arriba abajo) con orientación de fibra=0°

ANÁLISIS PARAMÉTRICO DEL CORTE ORTOGONAL DE MATERIALES COMPUESTOS MEDIANTE MODELIZACIÓN NUMÉRICA

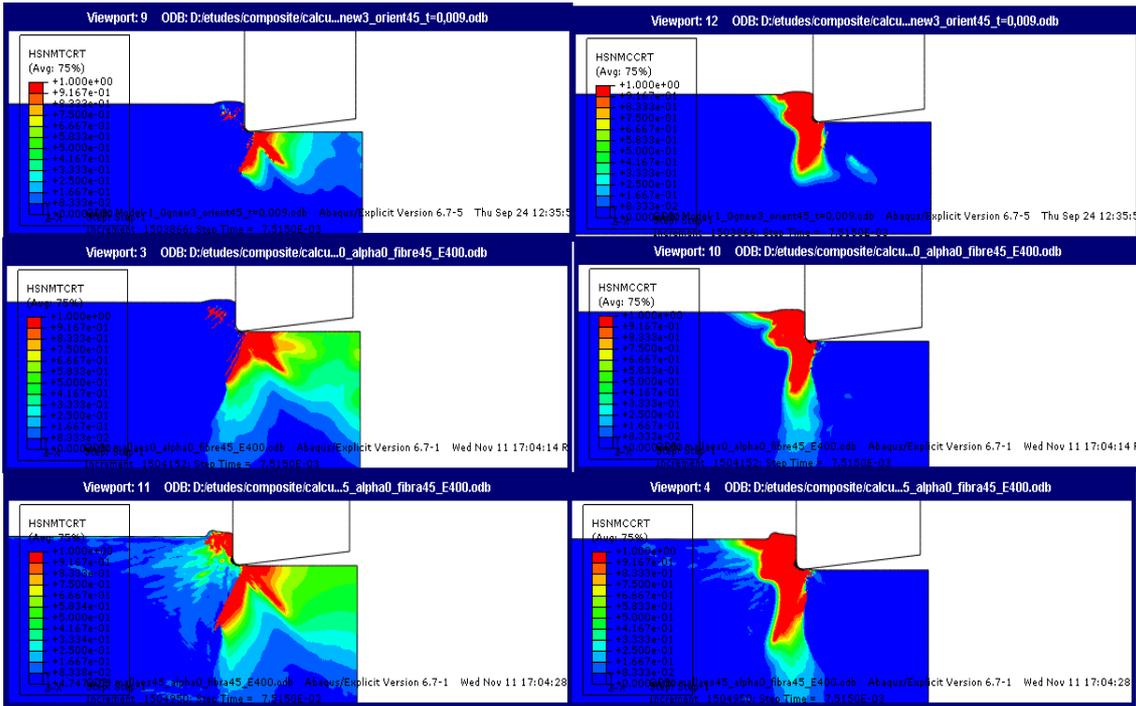


Fig 5.50: Daño en tracción (izquierda) y compresión (derecha) para malla libre, estructurada 90/0° y estructurada 45° (de arriba abajo) con orientación de fibra = -45°

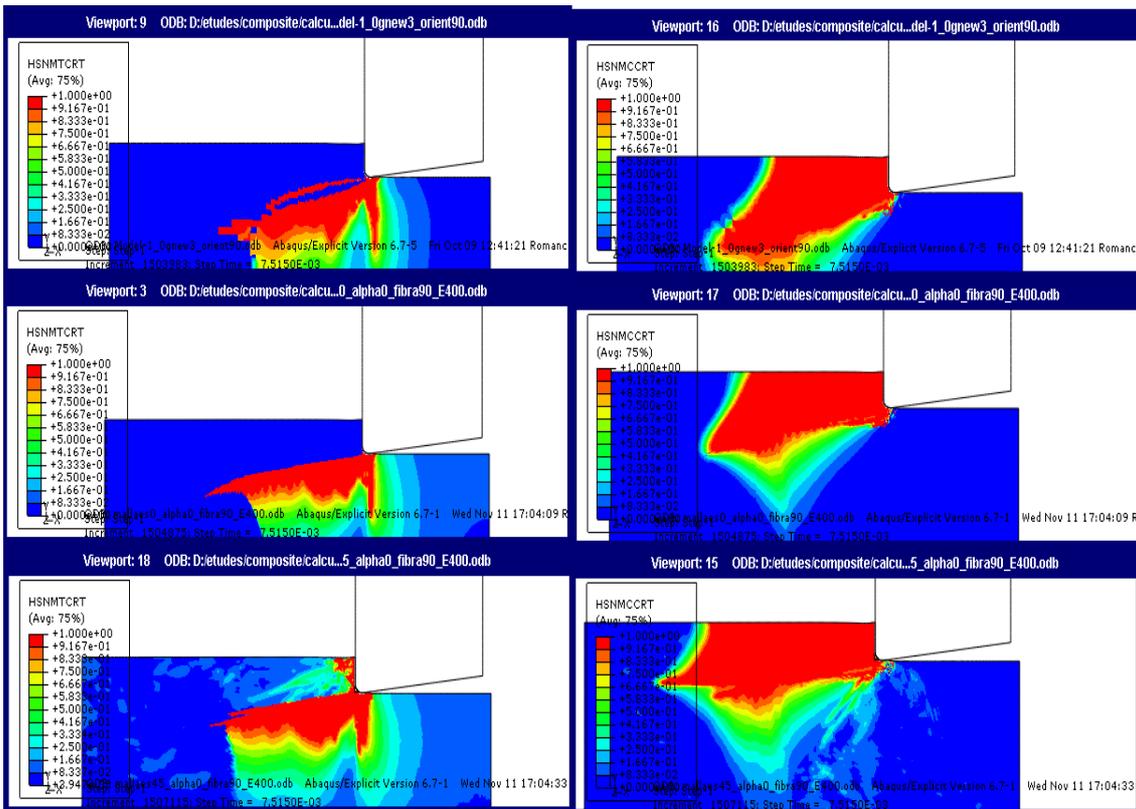


Fig 5.51: Daño en tracción (izquierda) y compresión (derecha) para malla libre, estructurada 90/0° y estructurada 45° (de arriba abajo) con orientación de fibra = -90°



5.2.4 Influencia del tamaño del elemento de malla

La realización de unas pocas simulaciones modificando este parámetro han llevado a extraer la conclusión de que no existe influencia del tamaño del elemento de la malla en la generación de fuerzas de corte y de avance. Para demostrarlo, se recopilan los datos obtenidos en la simulación.

	Malla estructurada 0 (7*7 μm)			Malla estructurada 0 (9*9 μm)			Malla estructurada 0 (12*12 μm)		
fibra	Fa (N/mm)	Fc (N/mm)	Daño (mm)	Fa (N/mm)	Fc (N/mm)	Daño (mm)	Fa (N/mm)	Fc (N/mm)	Daño (mm)
0	7,9	66		6,6	64	1,96	7,1	71	2
15	6,6	33	0,16				4,8	34	0,19
30	16	34					7,7	31,7	0,33
45	18	45	0,52	14,5	38,8	0,48	17	38,9	0,53
60	19	60					16	54,7	
75	15	73					13,6	66	
90	9,5	73	0,56	4,3	65	0,65	9,4	69	0,73

Tabla 5.2: Resultados de fuerza de corte, fuerza de avance, y daño en compresión para la matriz con los distintos tamaños de elemento de malla, para algunas orientaciones de fibra.

Las siguientes Fig 5.52 y Fig 5.53 muestran gráficamente los datos anteriores para poder observar las pocas diferencias existentes entre los resultados de las fuerzas de corte cuando se ha modificado el tamaño del elemento de malla.

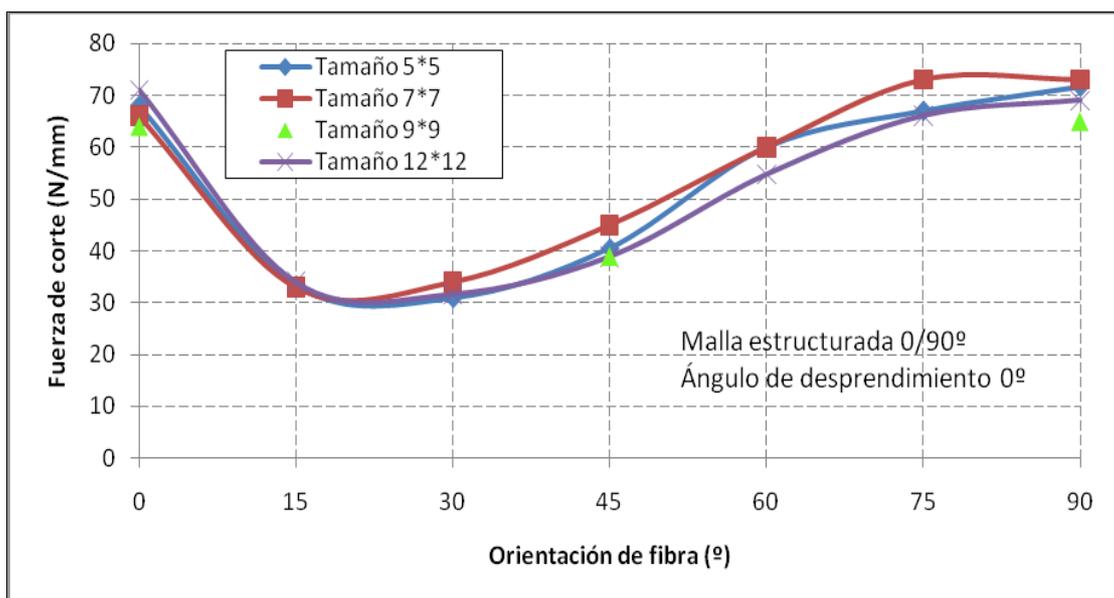


Fig 5.52: Variación de la fuerza de corte con la orientación de fibra para distinto tamaño de elemento de malla

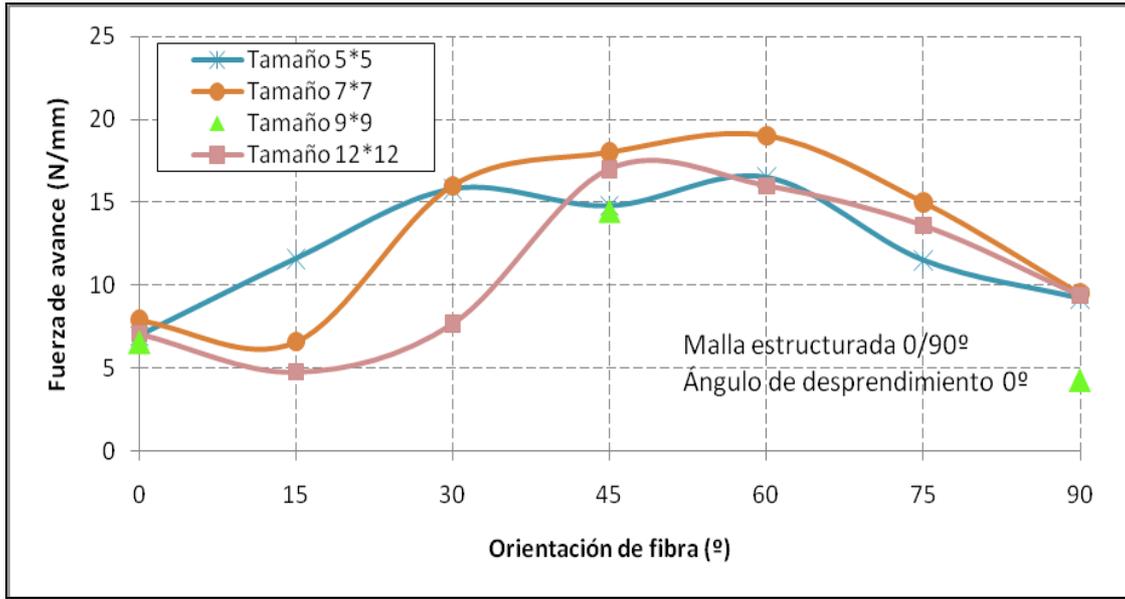


Fig 5.53: Variación de la fuerza de avance con la orientación de fibra para distinto tamaño de elemento de malla

En la siguiente curva de fuerza de corte frente al tiempo de mecanizado (Fig 5.5) se puede comprobar que el tiempo en que ha tardado en llegar al máximo valor de la fuerza de corte (tiempo en formar la viruta completa) en cada caso de simulación es distinto, pero al final el valor numérico que se ha alcanzado es muy similar en los casos de malla libre, malla estructurada de elemento 7*7 y malla estructurada de elemento 12*12.

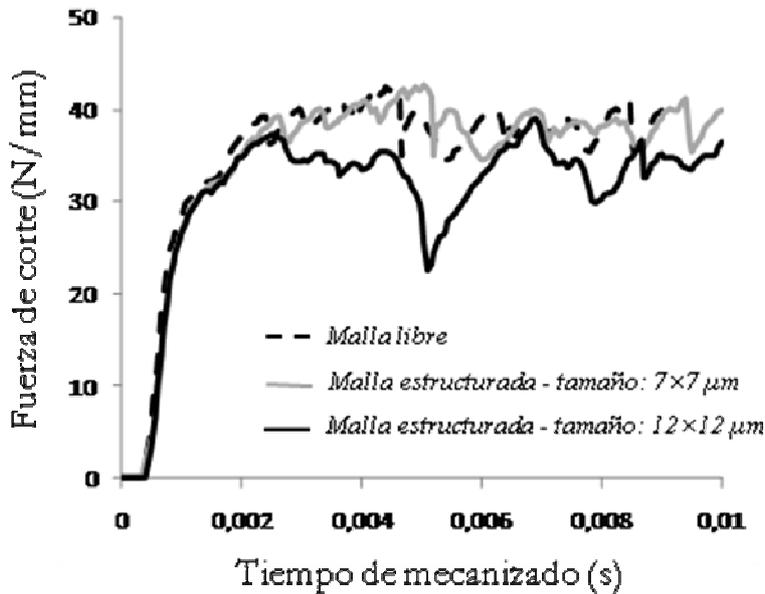


Fig 5.54: Convergencia de los valores de la fuerza de corte en simulaciones con distintos tamaños de elemento de malla y malla libre

Donde sí se ha observado una influencia muy significativa al modificar este parámetro es en el daño interno producido. La siguiente Fig 5.55 muestra el daño producido en la malla estructurada a 0° para una orientación de fibra de 90° . El daño interno en el caso del modelado con tamaño del elemento de 12×12 es mucho más profundo que en el caso de la malla libre o en la de 7×7 . Por tanto a mayor elemento de malla, más daño en profundidad se ha generado en la matriz.

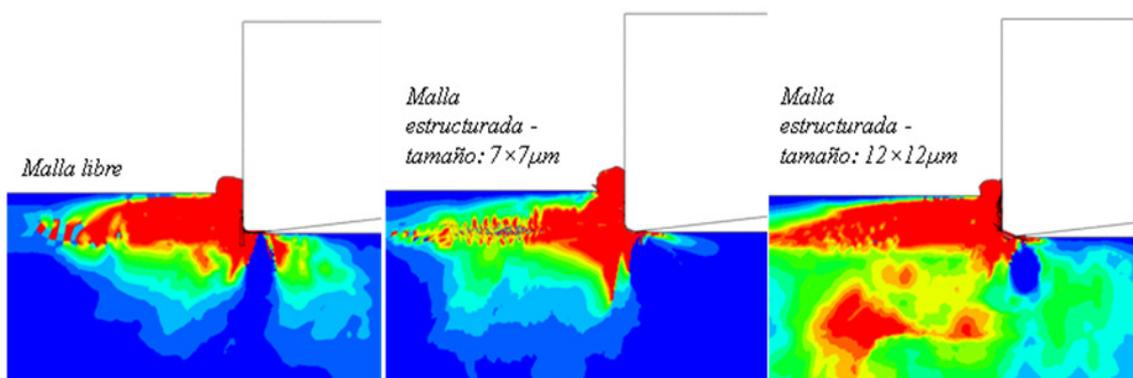


Fig 5.55: Extensión del daño a compresión en la matriz para mallados con distinto tamaño de elemento

Este hecho se puede comprobar también en la tabla de los datos, donde para la malla con elemento 12×12 el daño toma un valor de 0,73 mm en profundidad, mientras que para la malla estructurada con elemento 5×5 el daño tiene una profundidad tan solo de 0,38mm.

5.2.5 Influencia de la energía

La variación de la energía hasta rotura no ha tenido influencia significativa en las fuerzas y el daño en la matriz.

En la Fig 5.56 se puede comprobar que los valores de la fuerza de corte son prácticamente invariables ante el cambio de la energía de deformación. Para la fuerza de avance, se han obtenido los mismos resultados.

El único factor donde se ha observado una influencia importante es en la morfología de la viruta, comprobando con las imágenes obtenidas en el momento de la formación de viruta completa que cuanto más alta sea la energía hasta rotura establecida más elemento se puede deformar. El tiempo de formación de la viruta completa ha sido el mismo en los tres casos (momento que coincide con el de fuerza de corte máximo) como se puede observar en las Fig 5.57 y Fig 5.58, pero la forma de la viruta es distinta.

En la Fig 5.59 se pueden observar las diferentes formaciones de viruta tras la simulación completa. Para el caso de 400 J/mm^2 , energía que se ha mantenido constante cuando se han variado el resto de parámetros, la viruta se forma en un solo pliegue pegada a la

herramienta de ángulo de desprendimiento 0° . Sin embargo, con una energía de 600 J/mm^2 se ha sido capaz de deformar más cantidad de viruta, siendo más ancha la sección y formándose dos pliegues debido a dicha amplitud.

En el caso de energía igual a 200 J/mm^2 , se ha generado una sección de la viruta menor que en el caso de 400 J/mm^2 y por tanto la proporción deformada también menor.

El cambio por tanto más importante al variar la energía de deformación se ha producido en la morfología de la viruta, siendo poco significativo el cambio en el daño en profundidad tanto a tracción como a compresión.

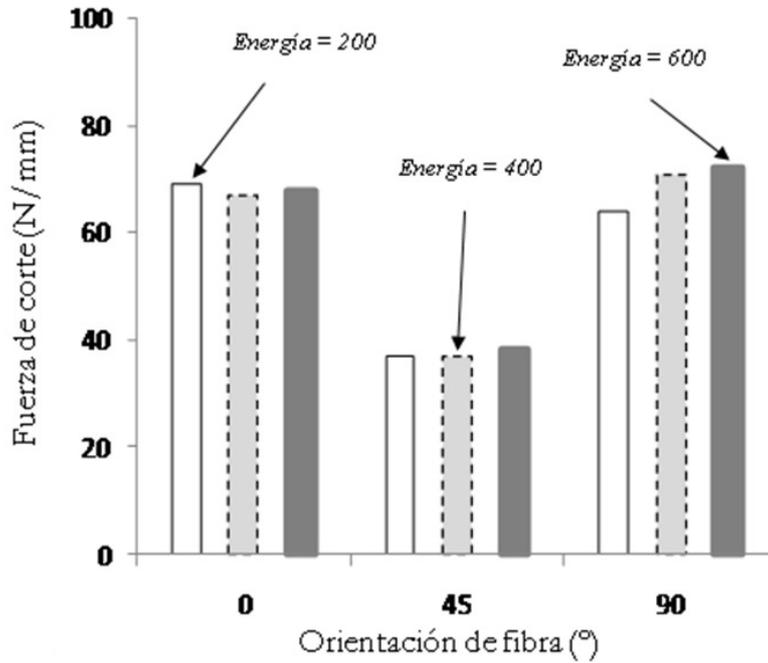


Fig 5.56: Resultados de la fuerza de corte para distintas simulaciones variando la energía hasta rotura

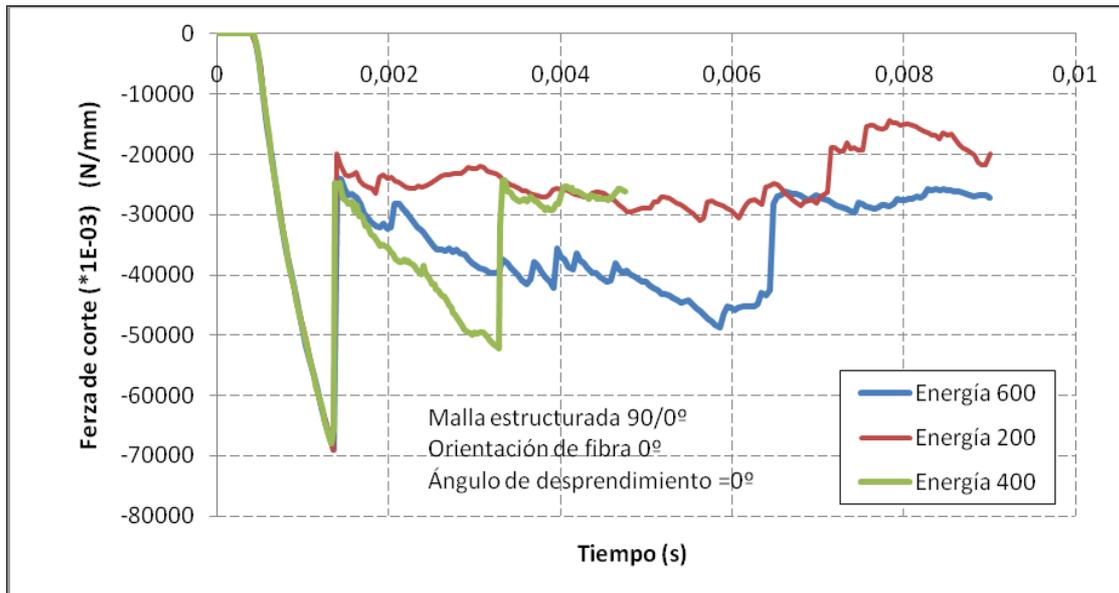


Fig 5.57: Tiempo de obtención de la fuerza de corte máxima (formación de la viruta completa) para las tres simulaciones con energías distintas. Orientación de fibra 0°

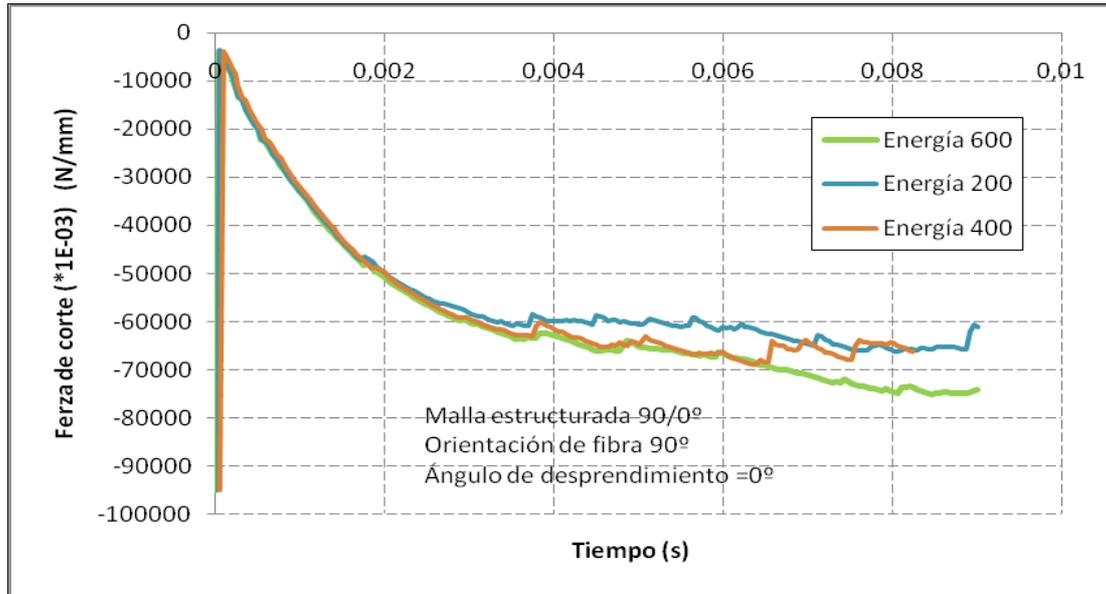


Fig 5.58: Tiempo de de obtención de la fuerza de corte máxima (formación de la viruta completa) para las tres simulaciones con energías distintas. Orientación de fibra 90°

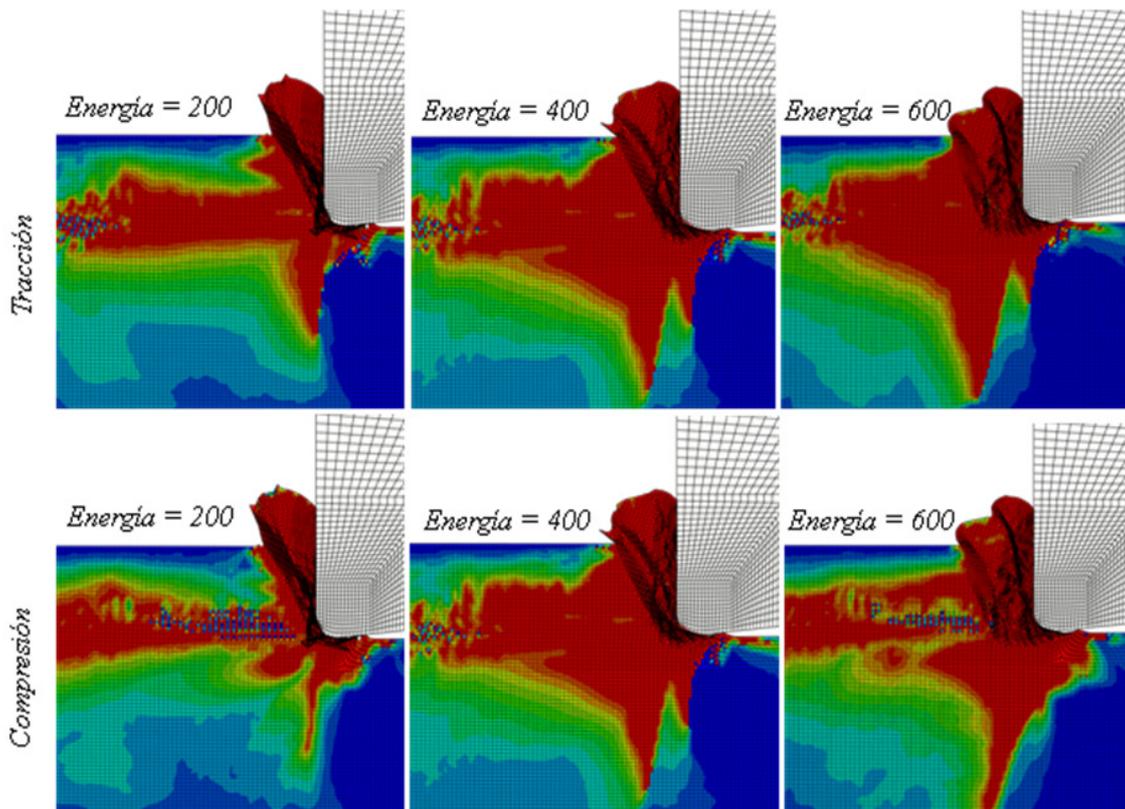


Fig 5.59: Morfología de la viruta con la variación de la energía hasta rotura con orientación de fibra 0°

5.2.6 Influencia del coeficiente de fricción.

Los resultados de la simulación tanto para la fuerza de corte como para la de avance cambiando el coeficiente de fricción han sido los siguientes:

Tipo de malla	Ángulo de desprendimiento (°)	Orientación de fibra (°)	Coeficiente Fricción=0,3		Coeficiente Fricción=0,5		Coeficiente Fricción=0,9	
			Fc (N/mm)	Fa (N/mm)	Fc (N/mm)	Fa (N/mm)	Fc (N/mm)	Fa (N/mm)
Estructurada 90/0°	0	45	45,14	17,89	44,02	16,98	42,85	19,49

Tabla 5.3: Resultados de las simulaciones de fuerza de corte, fuerza de avance y daño modificando el coeficiente de fricción.

Se puede ver que las diferencias entre los valores no son significativas, con lo que se puede afirmar que este parámetro no afecta a ninguno de los resultados del modelo.

La Fig 5.60 muestra la misma convergencia para la fuerza de corte en los tres casos, lográndose la formación de la viruta completa a los 0,008 segundos aproximadamente y con el mismo valor aproximado de fuerza de corte.

El hecho de que no haya afectado a la generación de daño se debe a que en el criterio elegido, el de Hashin, no está implementada la temperatura, luego los efectos de la fricción y el calor generado entre herramienta y material no se recogen en los resultados del modelo. Se puede comprobar este hecho en la Fig 5.61

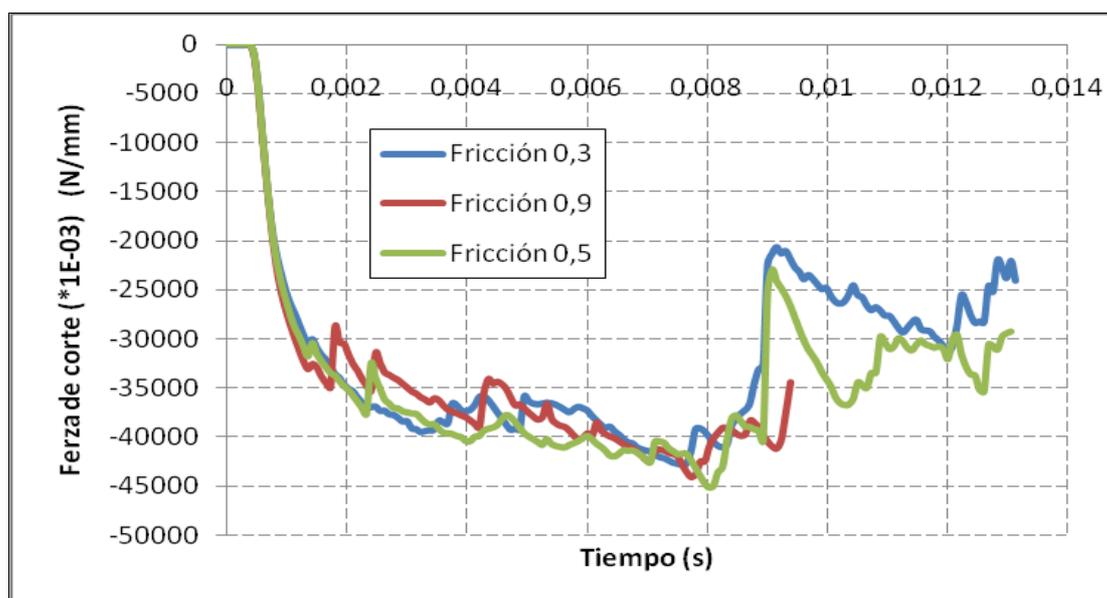


Fig 5.60: Tiempos de convergencia para las simulaciones con distintos coeficientes de fricción. Malla estructurada 90/0°, fibra -45°

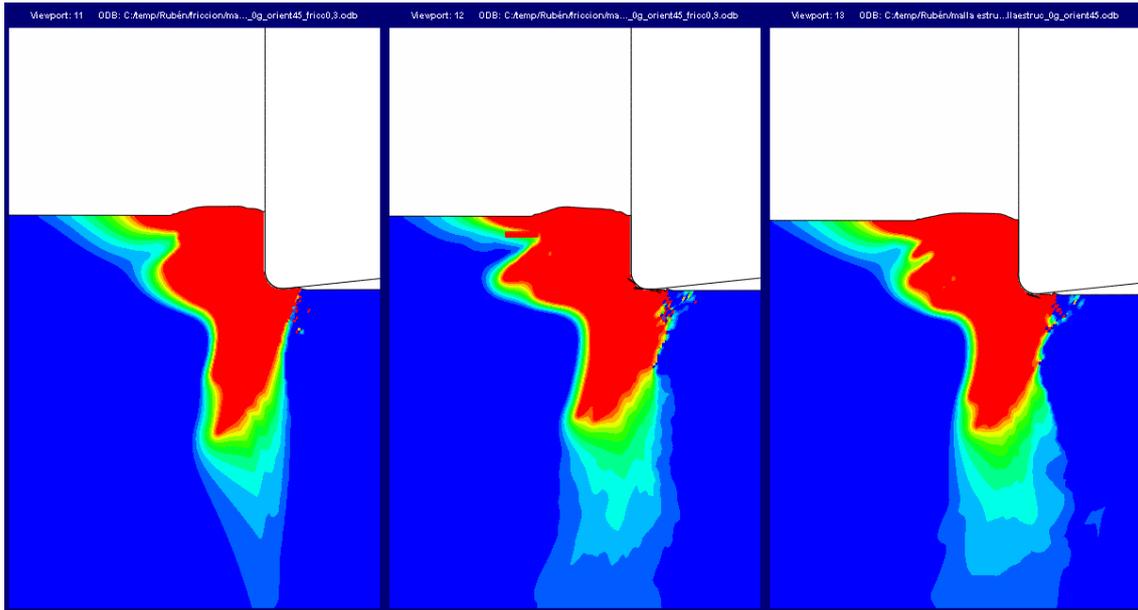


Fig 5.61: Daño a compresión generado para las simulaciones con los tres coeficientes de fricción (0.3, 0.5 y 0.9, de izquierda a derecha) para orientación de fibra -45°

Capítulo VI

6 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6.1 Conclusiones.

El principal aporte de este proyecto consiste en la aproximación dinámica de un modelo paramétrico de corte ortogonal para los compuestos reforzados con fibra de vidrio. El modelo, realizado con ABAQUS/Explicit, ha sido validado con los resultados experimentales de la bibliografía. Las conclusiones obtenidas después de su análisis son:

- 1- La aproximación dinámica que ofrece ABAQUS/Explicit ha permitido obtener información del proceso de corte tal como el tiempo de estabilización de la fuerza de corte y daño bajo la superficie mecanizada y por delante de la herramienta. Esto representa un tremendo avance frente a los análisis cuasiestáticos.
- 2- El modelo se ha validado frente a los resultados experimentales de Bhatnagar [7] (Bhatnagar et al., 2004) Venu Gopala [12] (Venu Gopala et al., 2006) y Nayak [10] (Nayak et al., 2005). Las tendencias de fuerzas de corte y avance han sido reproducidas con el modelo. Se han conseguido resultados numéricos de la fuerza de corte obtenidos con el modelo similares a los experimentales de la bibliografía.
- 3- El daño generado en profundidad por el mecanizado en la fibra ha sido despreciable frente al daño producido en la matriz, tanto a tracción como a compresión.
- 4- El instante de la formación de la viruta completa ha generado el máximo valor de la fuerza de corte. Las fluctuaciones siguientes han correspondido a la formación de la segunda y resto de virutas, no llegándose a alcanzar un valor tan alto como el conseguido en la primera ni a estabilizarse por completo.
- 5- Se ha comprobado una fuerte dependencia entre la formación de la viruta y el daño generado con la orientación de fibra. La mayor flexión de las fibras (mecanismo principal de daño en la fibra de vidrio) incluyendo tracción y compresión se ha observado a bajas orientaciones de fibra, cercanas a la dirección del plano de corte, produciendo una viruta fácil de crear. Orientaciones más altas han favorecido el incremento del daño a compresión por debajo de la superficie mecanizada mostrando dificultad a la hora de formar la viruta.
- 6- Se ha observado una disminución general del tamaño de la viruta y longitud de los trozos de fibra rota con la orientación creciente de la fibra.
- 7- El plano de propagación del daño a tracción y compresión se ha producido en todos los casos en la dirección de la orientación de fibra.
- 8- Se ha experimentado un tiempo de convergencia y estabilización de la fuerza de corte a altas orientaciones de fibra mayor que a bajas orientaciones, debido a las



dificultades para formar la viruta con las fibras orientadas perpendicularmente al plano de corte.

- 9- El efecto de ángulo de desprendimiento no se ha encontrado tan significativo si se compara con la influencia de la orientación de fibra. Un ángulo pequeño favorece la compresión contra las fibras en el mecanizado, lo que además de provocar un mayor daño en la zona de contacto herramienta-pieza supone una formación más difícil de la viruta.
- 10- Se ha observado que el hecho de modelar el material con una malla estructurada en una determinada dirección, ha favorecido la expansión del daño en la matriz en dicha dirección, tanto a tracción como a compresión.
- 11- Un mayor elemento de malla ha provocado mayor daño en profundidad generado en la matriz.
- 12- El cambio más importante al variar la energía de deformación se ha producido en la morfología de la viruta, siendo poco significativo la variación en el daño en profundidad tanto a tracción como a compresión
- 13- La modificación del parámetro del coeficiente de fricción no ha producido cambios en los resultados.

6.2 Trabajos futuros.

Se deja como posibles trabajos futuros que completen el presente proyecto ideas de interés que han surgido durante su realización.

- 1- Modificación del parámetro de la profundidad de corte (o avance). Se trata de un parámetro que se ha mantenido fijo en el modelo. La utilización de profundidades de corte superiores a 0,2 mm permitirían comprobar si la fuerza de corte obtenida en los resultados del modelo aumentaría también, y si la fuerza de avance, al verse inalterada por la profundidad de corte, mantendría su valor. Esto tiene su explicación porque la magnitud de la fuerza requerida para romper una fibra es independiente de la profundidad de corte ya que las fibras sólo se rompen cuando se supera su resistencia. Por otra parte, la fuerza requerida para cortar la matriz es sensible al volumen de material que se quita y por lo tanto, depende de la profundidad de corte.
La fuerza de corte debería aumentar considerablemente con la profundidad de corte y se debe esencialmente a la potencia de corte necesaria para la separación de la viruta que aumenta con el volumen de material a extraer.
Por lo tanto, es probable que la fuerza de corte vaya en aumento, en comparación con la de avance cuando la profundidad de corte se eleva más allá de un valor crítico que es alrededor de 0,2 mm. Sin embargo, por menor profundidad de corte, por ejemplo 0,1 mm, la fuerza debida al corte de la fibra predomina a la fuerza de corte de la matriz, lo que conduce a la mayor fuerza de avance.
Sería un estudio interesante comprobar si el modelo propuesto reproduce estos fenómenos al variar este parámetro.
- 2- Modificación del parámetro del radio de punta de la herramienta. Se trata de un parámetro que, combinado con la profundidad de corte, una vez analizados los efectos de la profundidad, formaría un estudio interesante a efectos de fuerzas comprobar como afectaría disminuir o aumentar este parámetro.



- 3- Modificación del parámetro de la velocidad de corte. El hecho de aumentar la velocidad de corte supone que si no se modifica el paso de la simulación, los intervalos de tiempo donde ABAQUS/Explicit toma valores se vuelven mayores y los resultados de fuerzas de corte y avance en el tiempo y su convergencia se vuelven poco representativos. Por tanto habría que disminuir el paso de la simulación si se aumenta la velocidad de corte. Un análisis de los resultados permitiría comprobar si el modelo reproduce los efectos de las fuerzas de inercia.
- 4- Utilizar un criterio de fallo más completo al de Hashin como el criterio de Hou, para intentar mejorar los resultados y la tendencia del daño en profundidad en la matriz a altas orientaciones de fibra. Se trata de un criterio cuadrático basado en cuatro modos de fallo que incluyen delaminación (pérdida de continuidad entre dos láminas contiguas) rotura de fibras (tracción y compresión) rotura de la matriz a tracción y rotura de la matriz a compresión.
- 5- Utilizar otros materiales compuestos en el modelo como la fibra de carbono, para comparar la generación de daño y morfología de la viruta entre un material frágil como es éste y un material dúctil como es la fibra de vidrio.
- 6- Modelización de la herramienta eligiendo un criterio que permita estudiar el desgaste y el daño interno para analizar su vida en servicio.



7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Takeyama, H.; Iijima, N. Machinability of glass fiber reinforced plastics and application of ultrasonic machining. Ann. CIRP 1988
- [2] N. Bhatnagar, N. Ramakrishana, N.K. Nail, R. Komanduri, On the machining of fibre reinforced plastic (FRP) composite laminates. Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 35. No. 5. pp. 701-716, 1995
- [3] Wang DH, Ramulu M, Arola D. Orthogonal cutting mechanisms of Graphite/Epoxy. composite part I: unidirectional laminate. Int J Mach Tool Manufac 1995;35(12):1623–38.
- [4] Arola, D; Ramulu, M. Orthogonal cutting of fiber-reinforced composites: a finite element analysis, International Journal of Mechanical Sciences 1997; 39: 597-613
- [5] Inoue, H.; Yuge, T. Study on the surface finish after cutting glass fiber reinforced plastics. Advances in Fiber Composite Materials; Elsevier Science and The Society of Materials Science, 1999
- [6] Wang XM, Zhang LC. An experimental investigation into the orthogonal cutting of unidirectional fiber reinforced plastics. Int J Mach Tool Manuf 2003;43:1015–22.
- [7] Bhatnagar, N; Nayak D; Singh, I; Chouhan, H; Mahajan P. Determination of machining induced damage characteristics of fiber reinforced plastic composite laminates, Materials and Manufacturing Processes 2004; 19 (6): 1009-1023
- [8] Zitoune R, Collombet F, Lachaud F, Piquet R, Pasquet P. Experiment-calculation comparison of the cutting conditions representative of the long fibre composite drilling phase. Compos Sci Technol 2005;65(3–4):455–66.
- [9] Koplev A, Listrup A, Vorm T. The cutting process, chips and cutting forces in machining CFRP. Composites 1983;14(4):371–6.
- [10] Nayak D; Bhatnagar, N; Mahajan, P. Machining studies of uni-directional Glass fiber reinforced plastic (UD-GFRP) composites part 1: effect of geometrical and process parameters, Machining Science and Technology 2005; 9: 481-501
- [11] Nayak D, Bhatnagar N, Mahajan P. Machining studies of UD-FRP composites. Part 2: Finite element analysis. Mach Sci Technol 2005;9(4):503–28.
- [12] Venu Gopala Rao, G; Mahajan, P; Bhatnagar, N. Micro-mechanical modeling of machining of FRP composites- Cutting force analysis. Composites Science and Technology 2007; 67: 579-593



- [13] Mkaddem, A; Demirci, I; El Mansori, M. A micro–macro combined approach using FEM for modelling of machining of FRP composites: Cutting forces analysis, *Composites Science and Technology* 2008; 68: 3123–3127
- [14] Mkaddem, A; El Mansori, M. Finite element analysis when machining UGF-reinforced PMCs plates: Chip formation, crack propagation and induced-damage, *J Mater Design* 2009, doi:10.1016/j.matdes.2008.12.009
- [15] Lasri, L; Nouari, M; El Mansori, M. Modelling of chip separation in machining unidirectional FRP composites by stiffness degradation concept, *Composites Science and Technology* 2009; 69: 684-692
- [16] Hashin, Z; Rotem, A. A Fatigue Criterion for Fiber-Reinforced Materials, *Journal of Composite Materials*, 1973; 7: 448–464
- [17] Hashin, Z. Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites, *Journal of Applied Mechanics* 1980; 47: 329–334
- [18] Carlos Santiuste, PhD; Xavier Soldani, PhD; Henar Miguélez, Ph. D; Machinig FEM Model of Long Fiber Composites for aeronautical components 2009
- [19] Carlos Santiuste; Análisis y modelización de vigas tipo laminado sometidas a cargas impulsivas, Tesis doctoral 2007.
- [20] José M. Román Arroyo; Conferencia E.T.S.I. Aeronáuticos: Materiales estructurales compuestos 1984.
- [21] “ABAQUS/cae user’s manual” Versión 7.1.
- [22] “ABAQUS Análisis user’s manual” Versión 7.1.
- [23] M^a Henar Miguélez, J.L.Cantero, J.A. Canteli, Jose´Guillermo Filippone, Problemas resueltos de tecnología de fabricación.
- [23] Apuntes de Tecnología de Fabricación 4º Ingeniería Industrial.
- [23] Federal Aviation Administration (FAA) Home Web
<<http://www.faa.gov/>>
- [24] Blumenberg Associates LLC. Purveyors of Rare History Images of the Publishing Trade.
<<http://www.ahrtp.com> >
- [25] AIRBUS OPERATIONS Web. Airbus S.A.S. 2010.
<<http://www.airbus.com/en/>>

