

Título del Documento:

MEMORIA FINAL PROYECTO HELICO

Código del Documento:

HLC-ER-DC-001

Edición: 1

Fecha: 14.10.08

	Nombre	Firma	Fecha
Preparado	IMP		14.10.08
Revisado	DCZ		14.10.08
Aceptado	JLL		14.10.08
Controlado			
Autorizado			

DISTRIBUCIÓN:

Enrique LEKUONA.
Ingeniería IDEC.

REGISTRO DE PAGINAS APLICABLES

Nota : Tras la recepción de esta modificación :

- a. Insertar las páginas adjuntadas en este documento.
- b. Destruir las páginas sobreesídas.

Página	Ed. / Rev.						
1-129	1						

REGISTRO DE CAMBIOS DE DOCUMENTO

OC Nº	Fecha OC	Páginas Afectadas	Incorp. por	Observaciones

INDICE

Página

1 OBJETIVO DEL PROYECTO.....	6
1.1 VENTAJAS FRENTE A LAS HÉLICES CONVENCIONALES.....	6
2 DESARROLLO DE TECNOLOGÍA.....	7
2.1 INTRODUCCIÓN.....	7
2.2 NATURALEZA DEL RTM.....	9
2.3 VENTAJAS DEL RTM.....	10
2.4 PREFORMADO O LAMINADO.....	10
2.4.1 COMPRESIBILIDAD.....	11
2.4.2 PERMEABILIDAD.....	16
2.5 NÚCLEOS O INSERTOS.....	17
3 SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES.....	19
3.1 INTRODUCCIÓN.....	19
3.2 ASPECTOS GENERALES SOBRE MATERIALES COMPUESTOS.....	20
3.2.1 CLASIFICACIÓN Y DEFINICIÓN DE LOS COMPOSITES.....	20
3.2.2 COMPARACIÓN DE LOS COMPOSITES FRENTE A OTROS MATERIALES.....	22
3.2.3 PROBLEMÁTICA DE LOS COMPOSITES.....	26
3.3 CARACTERÍSTICAS DE LAS DISTINTAS FIBRAS.....	26
3.3.1 FIBRAS DE CARBONO.....	26
3.3.2 FIBRAS DE VIDRIO.....	28
3.3.3 FIBRAS ORGÁNICAS.....	29
3.3.4 PRUEBAS COMPARATIVAS ENTRE FIBRAS.....	29
3.4 CARACTERÍSTICAS DE LAS MATRICES (RESINAS).....	32
3.4.1 RESINAS TERMOESTABLES Y TERMOPLÁSTICAS.....	32
3.4.2 RESINAS RECOMENDADAS PARA RTM.....	36
3.5 DISTINTAS CONFIGURACIONES DE FIBRAS.....	41
3.5.1 INTRODUCCIÓN.....	41
3.5.2 FIBRAS CONTINUAS.....	42
3.5.3 TEJIDOS DE MECHAS.....	42
3.5.4 TEJIDOS CON ORIENTACIÓN DE FIBRA ALEATORIA.....	43
3.6 CRITERIOS DE ROTURA DE UN LAMINADO.....	44
3.6.1 CRITERIO DE LA MAXIMA TENSIÓN.....	45
3.6.2 CRITERIO DE LA MÁXIMA DEFORMACIÓN.....	46
3.6.3 TEORÍA DE TSAI-HILL.....	47
3.6.4 TEORÍA DE TSAI-WU.....	48
3.7 SELECCIÓN DE MATERIALES.....	50
3.8 LAMINADO O PREFORMADO PARA LA PALA DE LA HÉLICE.....	52
4 DISEÑO DE LA HÉLICE.....	53
4.1 INTRODUCCIÓN.....	53
4.2 PASO DE LA HÉLICE Y DIÁMETRO.....	54
4.3 CONCEPTOS FUNDAMENTALES PARA EL DISEÑO.....	54
4.4 CAVITACIÓN.....	55

4.5	FORMA CONSTRUCTIVA DE LAS HELICES.....	56
4.6	DISEÑO EN 3D DE LA PALA.....	57
5	DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UTILLAJE.....	63
5.1	INTRODUCCIÓN.....	63
5.2	ASPECTOS A TENER EN CUENTA EN EL DISEÑO DE UTILLAJE RTM.....	63
5.3	PASOS EN EL DISEÑO.....	64
5.3.1	ESTUDIO DE PIEZA-PRIMER BOCETO DE ÚTIL.....	64
5.3.2	DISEÑO DEL SELLADO.....	67
5.3.3	DISEÑO DE ORIFICIOS DE INYECCIÓN Y VENTILACIÓN.....	68
5.3.4	DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE CALENTAMIENTO/ENFRIAMIENTO.....	69
5.3.5	DISEÑO DEL CIERRE Y DELCENTRAJE ENTRE HUELLAS.....	71
5.3.6	ELECCIÓN DE LOS MATERIALES PARA UTILLAJE.....	72
6	CÁLCULO DE LA HÉLICE (FEM).....	75
6.1	PREPARACIÓN DEL MODELO-MALLADO.....	75
6.1.1	HÉLICE CUNIAL.....	75
6.1.2	HÉLICE DE FIBRA DE CARBONO.....	75
6.2	MATERIALES.....	77
6.3	DATOS DE PARTIDA.....	82
6.4	CÁLCULOS.....	84
6.4.1	CASOS DE CARGA.....	84
6.4.2	ANÁLISIS DE RESISTENCIA.....	87
6.4.3	ANÁLISIS DE RIGIDEZ.....	94
6.4.4	ANÁLISIS VIBRATORIO.....	100
6.5	CONCLUSIONES DE CÁLCULO.....	103
6.5.1	Análisis vibratorio.....	103
6.5.2	Análisis de resistencia.....	103
6.5.3	Análisis de rigidez.....	104
7	ENSAYOS.....	106
7.1	ENSAYOS EN BANCO.....	106
7.1.1	CARGAS APLICADAS.....	108
7.1.2	PLANIFICACIÓN DE ENSAYO.....	110
7.1.3	RESULTADOS OBTENIDOS.....	112
7.2	CONCLUSIONES DEL ENSAYO.....	118
7.2.1	Conclusiones del ensayo de rigidez.....	122
8	COSTES.....	124
9	CONCLUSIONES DEL PROYECTO.....	125
9.1	LOGROS.....	125
9.2	OBJETIVOS DE CÁLCULO.....	125
9.3	ACCIONES FUTURAS.....	126
9.3.1	Diseño de la unión al buje.....	126
9.3.2	Plan de ensayos.....	126
9.3.3	Costera / Comportamiento en servicio.....	126
10	BIBLIOGRAFÍA.....	127

1 OBJETIVO DEL PROYECTO.

El objetivo fundamental perseguido por el presente proyecto es incrementar la competitividad del sector de la pesca en el mercado, mediante la incorporación de tecnologías avanzadas que permitan ofrecer Buques de Pesca con características muy mejoradas respecto de los habituales. En nuestro caso la innovación se centra en el sistema de propulsión de los buques de pesca, más concretamente, en la hélice.

Se selecciona un barco para realizar un estudio comparativo entre las prestaciones de una hélice actual, fabricada por colada de (Cu, Ni y Al) y las del prototipo a desarrollar.

Se ha elegido un barco de cebo vivo, porque en este caso la importancia del ruido es mayor, dado que el pescado está próximo a la embarcación.

Este tipo de barco es de un tamaño importante:

25m÷36m de eslora.

1.8m÷2.4m de diámetro de hélice.

1.1 VENTAJAS FRENTE A LAS HÉLICES CONVENCIONALES.

Las principales ventajas entre la utilización de una hélice convencional y la propuesta en material compuesto son;

- Ahorro de peso; la utilización de material compuesto supone una reducción de peso que ronda entre un 50 y 70% menor.
- Reducción de ruido y vibraciones, 5dB
- Reducción de los coeficientes de fricción de la hélice y del aumento de su rendimiento.
- Ahorro energético; debido a la reducción de peso y la mejora de su rendimiento hidrodinámico. Estimado en un 5%.
- Mejora de prestaciones; la tecnología de fabricación permite una mayor aproximación a las formas del diseño hidrodinámico.
- Menos fases de fabricación; mientras que la hélice convencional exige un diseño, un modelo, un modelo y finalmente se obtiene la pieza, con la hélice propuesta se ahorra el paso del modelo ya que en esta tecnología no es necesaria la utilización del mismo.
- Reducción de brillos y destellos que puedan favorecer la huida de los bancos de peces.
- Confort y seguridad.

2 DESARROLLO DE TECNOLOGÍA.

2.1 INTRODUCCIÓN.

En los últimos años, el RTM o Moldeo por Transferencia de Resina (más conocido por su acepción inglesa 'Resin Transfer Moulding') y sus procesos derivados han ido ganando popularidad en la industria. De hecho el RTM nació a mediados de la década de los 40, pero no llegó a ser comercialmente competitivo hasta los 60 y 70.

El RTM, es un proceso de fabricación de molde cerrado a baja presión que permite obtener piezas de material compuesto en un amplio rango de complejidad y tamaño, así como artículos de alto rendimiento. El proceso se diferencia de otros procesos de moldeo en que el refuerzo seco y la resina se juntan dentro de un molde para formar una pieza de material compuesto. El refuerzo (fibra), que puede estar preformada, se coloca dentro de la cavidad del molde, después el molde se cierra. Un tubo conecta el molde con un depósito de resina, la cual es bombeada o transferida dentro del molde para impregnar la fibra y finalmente se produce el curado.

Este proceso nos permite una mayor reproductividad de las palas, un mejor acabado superficial en ambas caras de la hélice, realizar ciclos de moldeo más cortos, tener flexibilidad de utillajes, volumen de fibra perfectamente controlable y conseguir unas propiedades mecánicas más altas.

De manera esquemática el proceso de RTM se puede explicar de la siguiente manera:

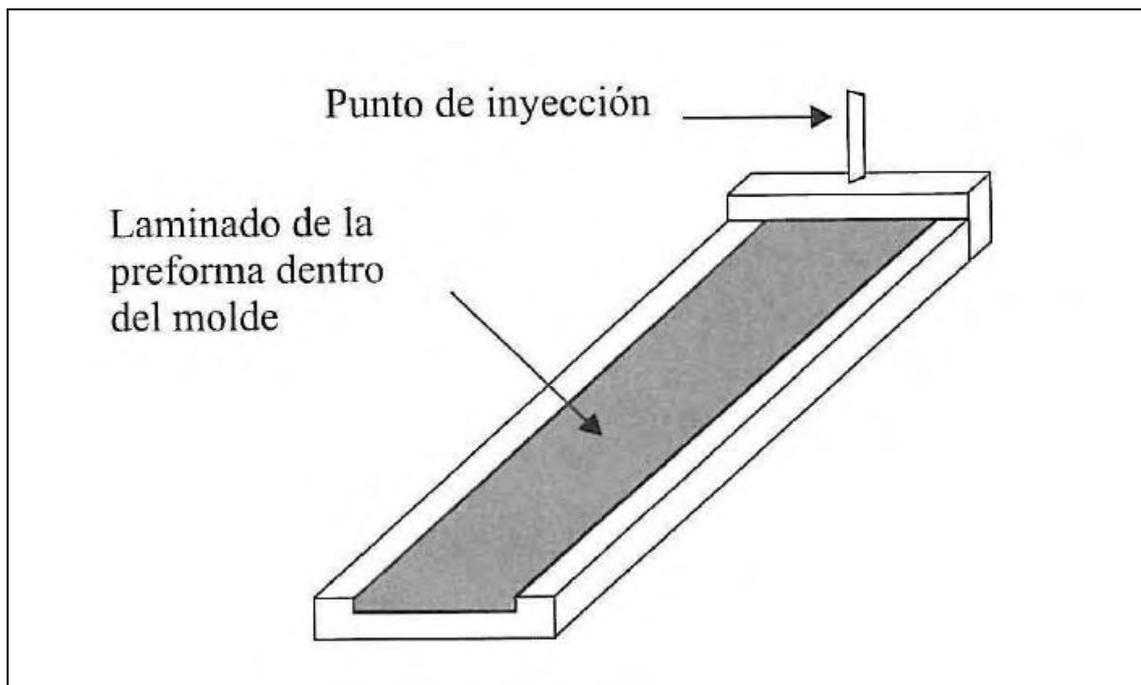


Figura 2-1. Preformado y colocación en el molde.

El refuerzo seco es preformado y orientado formando un esqueleto de la pieza. Esto es lo que se conoce como “preforma”, la cual es introducida dentro del molde en el que se ajusta perfectamente.

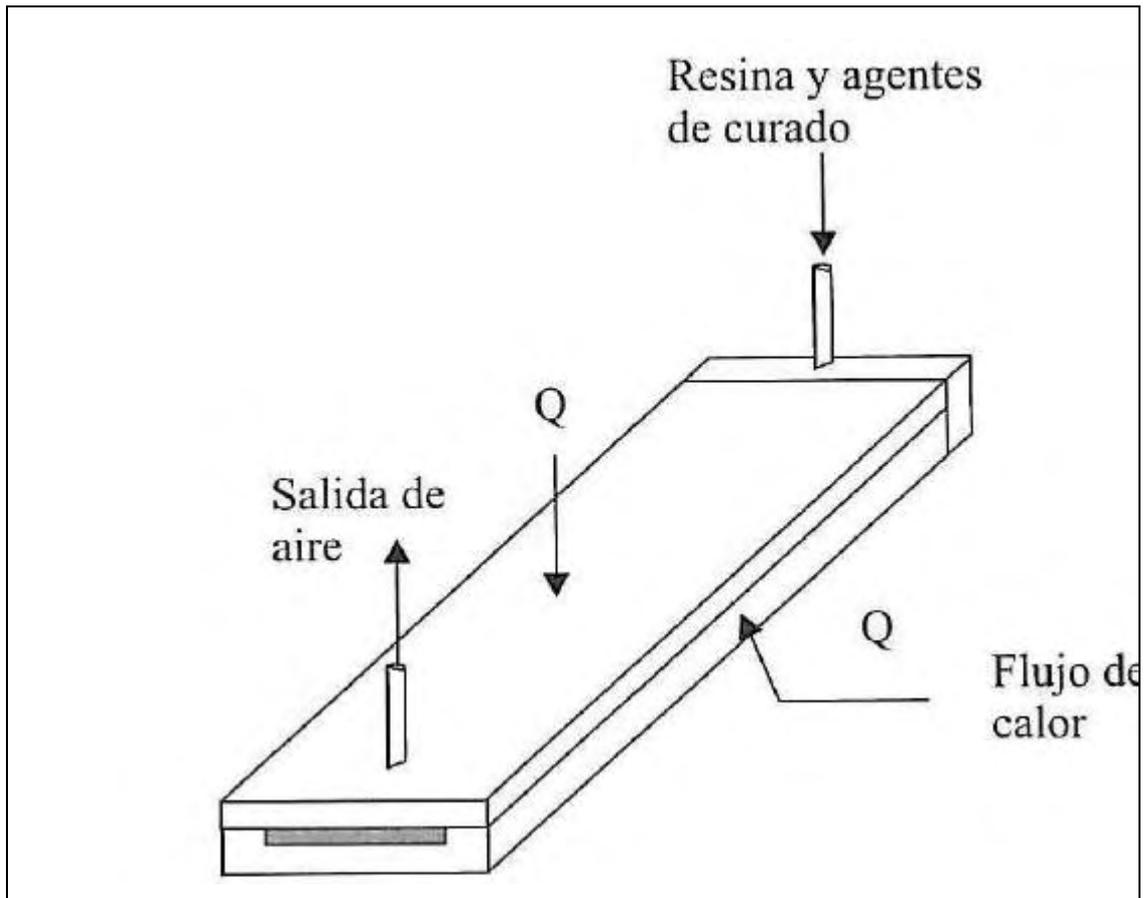


Figura 2-2 Impregnación y curado.

El molde se cierra y se inyecta una resina con baja viscosidad, el aire es desplazado por la resina y escapa por los agujeros de ventilación situados en los más altos del molde. Durante este periodo, conocido como la fase de inyección, la fibra se impregna de resina. El calor aplicado al molde activa los mecanismos de polimerización que hacen solidificar la resina en el paso conocido como curado.

El curado de la resina comienza durante el llenado y continúa durante el proceso de vaciado. Una vez la pieza desarrolla la suficiente rigidez es desmoldeada.

2.2 NATURALEZA DEL RTM.

El RTM parece ser un proceso simple de tres pasos: preformado, inyección y curado. Pero en realidad es mucho más complicado, porque está íntimamente relacionado con la calidad de la pieza final.

Cada paso del proceso afecta a los pasos siguientes. Cada decisión tomada afecta por una parte al procesado de la pieza y por la otra a la calidad de la pieza final. Por ejemplo, la microestructura de la preforma debe ser diseñada pensando son sólo en la carga termomecánica que la pieza sufrirá al final, sino también pensando en la influencia que va a tener la microestructura en la permeabilidad y por lo tanto en el tiempo de llenado del molde (de esta manera también tiene influencia la selección de resina, su viscosidad y el tiempo de desmoldeo). De manera similar, el proceso de inyección debe hacer un delicado balance entre: el deseo de tener un rápido llenado de molde, la integridad de la microestructura (evitando que se muevan fibras durante el llenado), la impregnación de manojos de fibras, y la eliminación del aire del molde. De esta forma, la selección de resina, temperatura de molde, la presión y viscosidad deben estar controladas para preservar la integridad de la preforma, De la misma forma, el molde debe ser diseñado teniendo en cuenta además de la forma y características de la pieza, las especificaciones de inyección, permeabilidad, curado y desmoldeo. Todo esto han sido unos pocos ejemplos de los retos asociados con el RTM, haciendo especial hincapié en que el procesado y cuestiones de rendimiento deben ser consideradas de manera simultánea para asegurar que el producto final es de calidad y económicamente rentable.

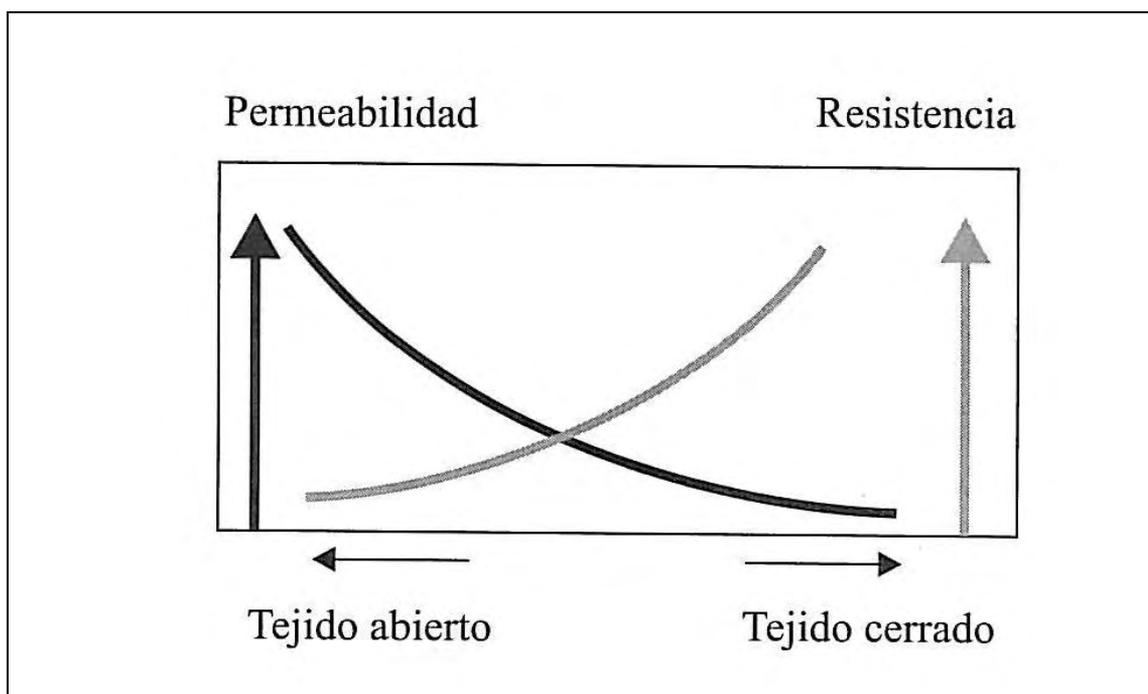


Figura 2-3, Permeabilidad y resistencia según el tipo de preforma.

2.3 VENTAJAS DEL RTM.

Probablemente la ventaja del RTM frente a otras técnicas de fabricación de composites es la relativa separación entre el proceso de moldeo y el diseño de la arquitectura de las fibras. Teniendo la etapa de preformado separada de la inyección y de la de curado, permite al diseñador crear materiales particularmente adaptados para cubrir perfiles de demanda específicos. Esto es completado por la combinación de varios tipos de fibra y forma. De hecho, el moldeo líquido permite lograr altos niveles de control microestructural y de las formas de las piezas, en comparación con otros métodos de fabricación.

Otras ventajas que ofrece el RTM:

- Pequeña inversión de capital.
- Buen acabado de pieza.
- Flexibilidad de utillaje.
- Capacidad para producir piezas grandes y complejas.
- Posibilidad de introducir nervios, núcleos e insertos.
- Integración de varias partes en una sola.
- Gran variedad de sistemas de resina posibles.
- Gran variedad de sistemas de refuerzo posibles.
- Volumen de fibra perfectamente controlable.

2.4 PREFORMADO O LAMINADO.

Para RTM se puede emplear una amplia variedad de fibras de refuerzo. La selección de la arquitectura de fibra tiene influencia directa en las características finales de pieza y en su fabricación, por tanto es una etapa crítica dentro de los procesos concurrentes de una pieza de RTM.

La preforma es el montaje de las fibras de refuerzo, a las cuales se les da una forma cercana a la geometría final y se orientan de la forma adecuada dentro del molde, antes de la introducción de resina.

La selección de material y diseño de la preforma está basado en criterios de comportamiento mecánico de la pieza final. Tiene que existir un compromiso entre estos criterios y los de procesabilidad, durabilidad, y coste. El impacto que tienen sobre la procesabilidad consiste en la necesidad de impregnar completamente la preforma con la resina. El grado de compactación y la orientación de las fibras afectan directamente a la

capacidad de la resina a fluir por el molde. Por lo tanto, el diseño del molde en términos de puntos de inyección de resina y puntos de evacuación del aire está directamente afectado.

Otro aspecto a tener en cuenta en el diseño de la preforma es la posible existencia de: espumas estructurales en el núcleo, insertos metálicos y otros materiales de refuerzo de distinta naturaleza.

De manera esquemática, el diseño de preformas debe tener en consideración los siguientes aspectos:

REQUERIMIENTOS MECÁNICOS	RIGIDEZ Y RESISTENCIA
	COMPRESIBILIDAD
	DEFORMABILIDAD
REQUERIMIENTOS DEL PROCESO	PERMEABILIDAD
	COMPRESIBILIDAD
	DEFORMABILIDAD
ASPECTOS ESPECIALES	NÚCLEOS DE ESPUMA
	INSERTOS METÁLICOS
	PREFORMAS MÚLTIPLES
REQUERIMIENTOS MEDIOAMBIENTALES	
REQUERIMIENTOS ECONÓMICOS	

2.4.1 COMPRESIBILIDAD.

La compresibilidad es un aspecto que afecta a la vez al procesado y al comportamiento final de la pieza fabricada por RTM. Durante el procesado, la presión del utillaje puede deformar la preforma, modificando el porcentaje de volumen de fibra y la permeabilidad. Estos cambios también afectarán a las propiedades de la pieza final.

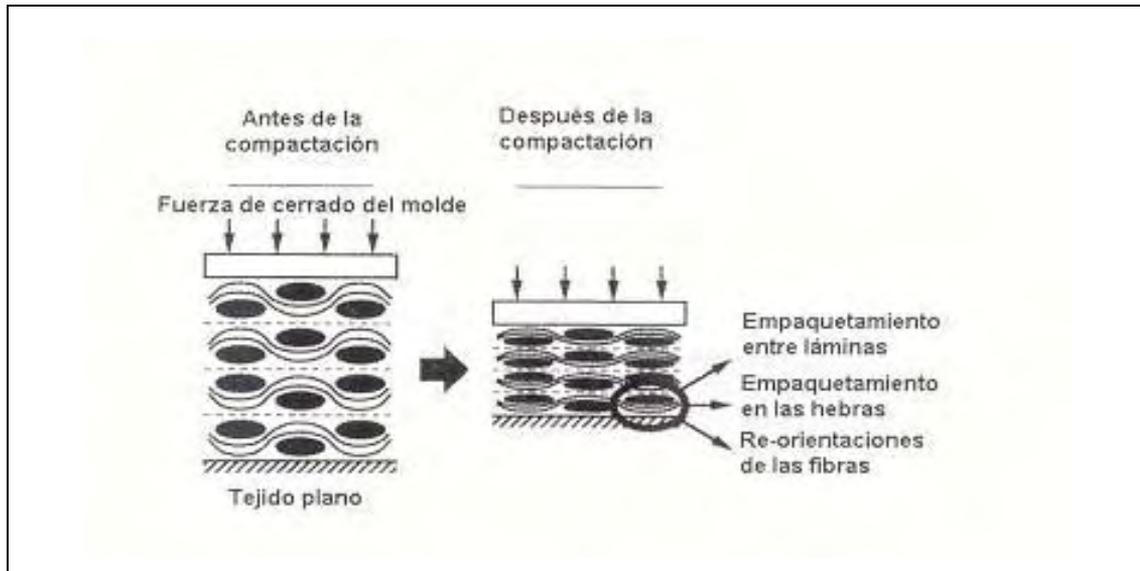


Figura 2-4. Influencia de la compresibilidad en la microestructura de la preforma.

En la figura anterior, se muestra el proceso de compactación. La preforma es más gruesa que el hueco que existe en el molde, por ello al cerrar el molde la preforma se comprime y modifica su arquitectura. Los cambios producidos en la preforma son:

- Cambios en los espacios entre capas.
- Cambios en el empaquetamientos entre las hebras individuales pertenecientes a una misma lámina, también puede variar la relación de aspecto de las hebras.
- Reorientación de telas.

En las figuras siguientes se muestran algunos resultados experimentales en los que se aprecia la relación entre la presión de compactación y el volumen de fibra resultante. Se han considerado dos materiales. El primero un mat de fibra continua, se puede apreciar en la gráfica el pequeño rango de porcentajes en volúmenes de fibra que se obtiene, para conseguir porcentaje mayores del 30% debe aplicarse una fuerza que rompería las fibras. El segundo material es un tejido 0/90. Con este material es posible conseguir un rango de volúmenes de fibra mucho más amplio. El porcentaje límite para el tejido es del 56%, que es mucho mayor que el del mat. De todas formas, la cantidad de compresibilidad posible varía de unos tejidos a otros, dependiendo del diseño de la hebra, tipo de fibra etc.

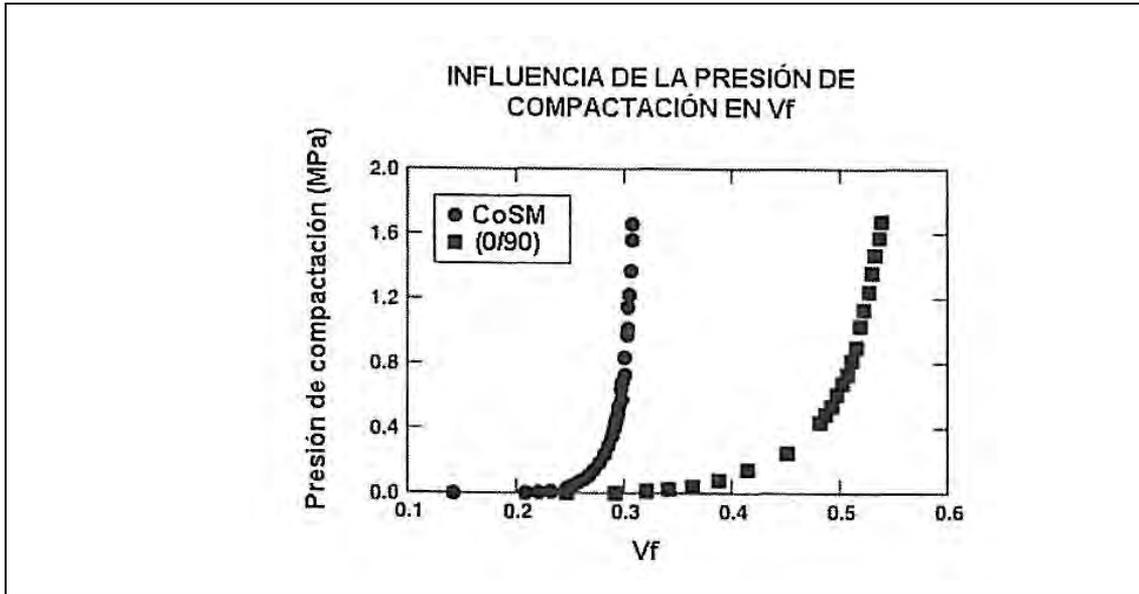


Figura 2-5 Influencia de la presión de compactación en la fracción en volumen de fibra.

En las siguientes figuras se ve la influencia de la compresibilidad en forma de porcentaje en volumen de fibra para otras propiedades mecánicas, tanto de comportamiento como de procesado.

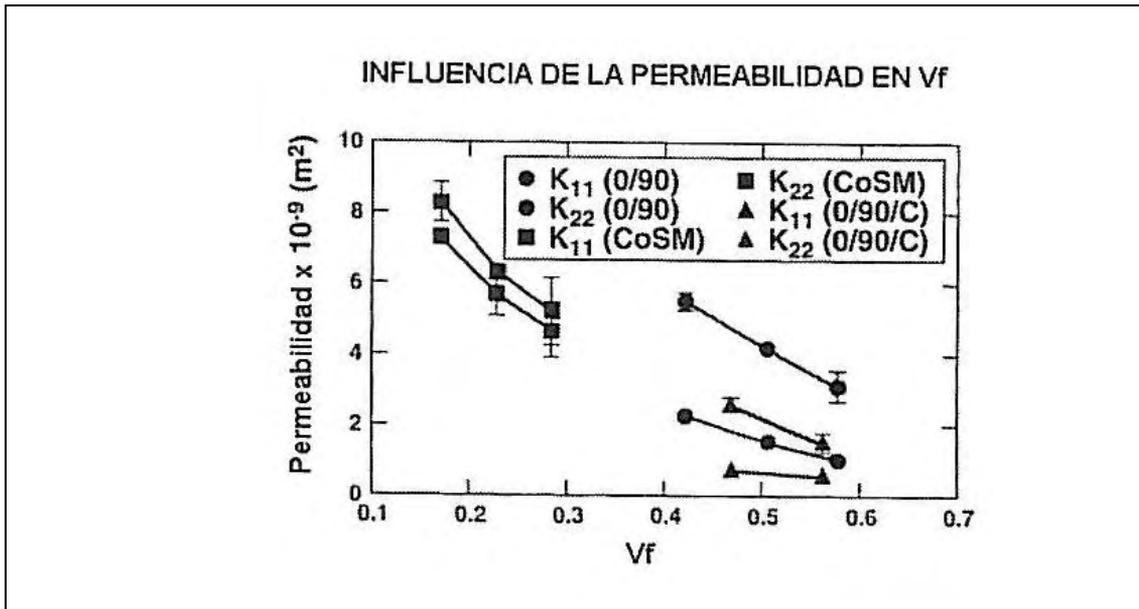


Figura 2-6 Influencia de la permeabilidad en la fracción en volumen de fibra.

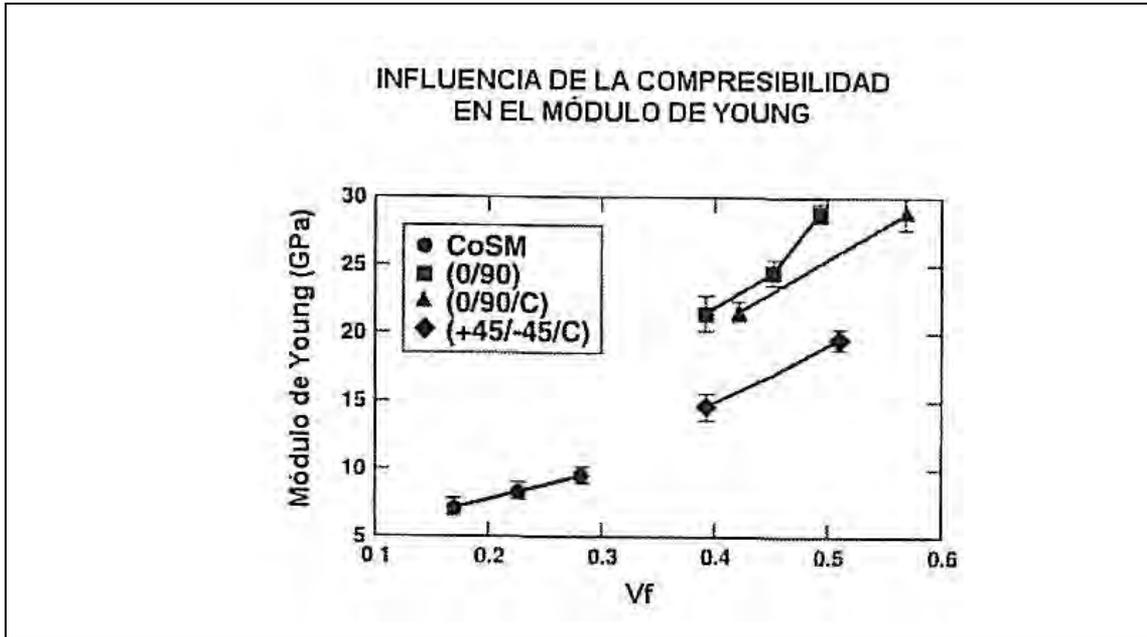


Figura 2-7 Influencia de la compresibilidad en el módulo de Young.

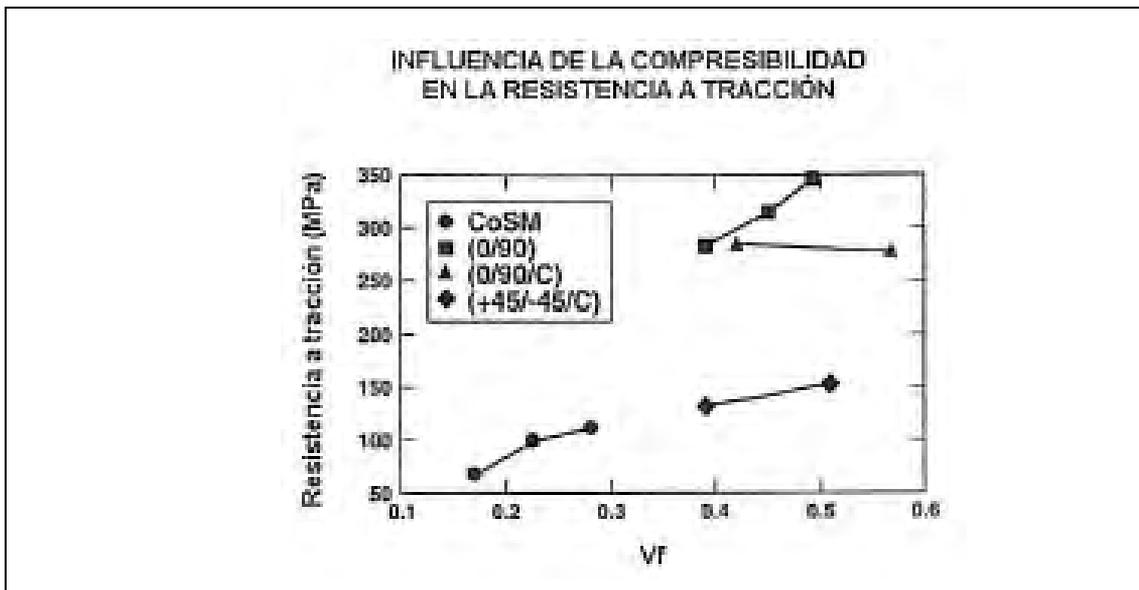


Figura 2-8 Influencia de la compresibilidad en la resistencia a tracción.

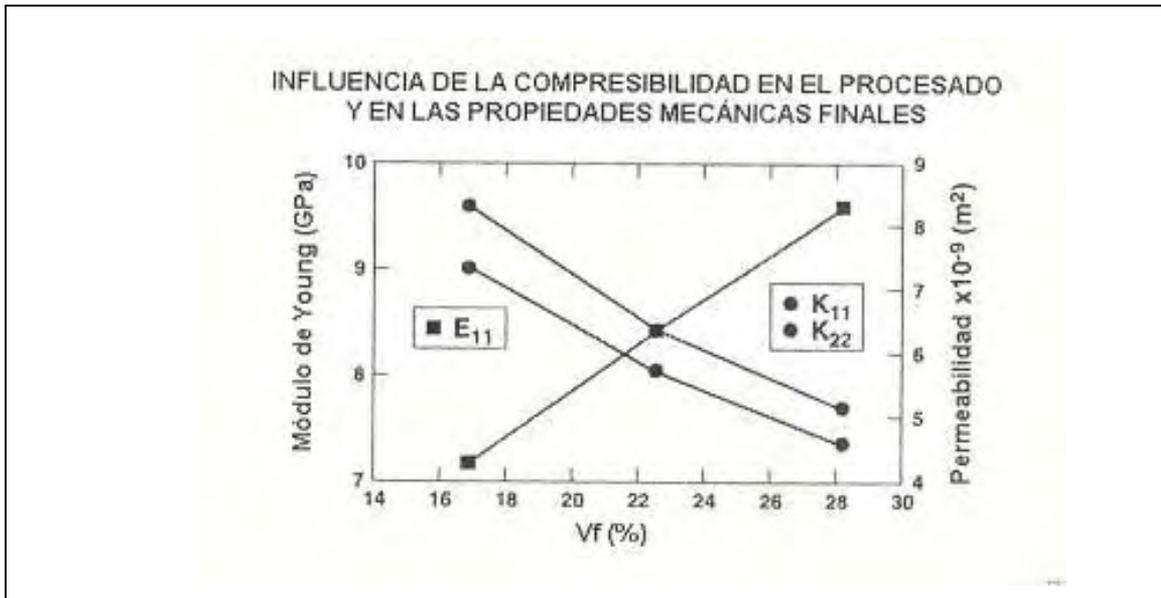


Figura 2-9 Influencia de la compresibilidad en el procesamiento y en las propiedades mecánicas finales.

Las tendencias no son siempre tan simples como parecen, las propiedades mecánicas mejoran con el aumento de volumen de fibra, pero no siempre de manera lineal, y a veces sólo hasta cierto punto. La gráfica siguiente muestra este efecto. A veces un porcentaje en volumen de fibra muy grande causa “sobrecompactación”, haciendo disminuir las propiedades mecánicas.

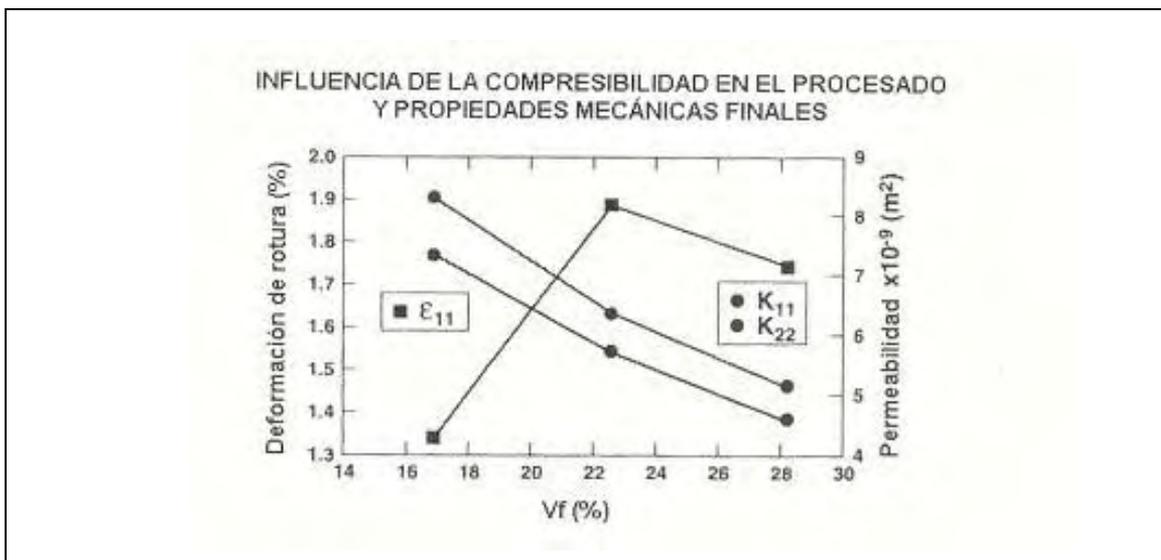


Figura 2-10 Influencia de la compresibilidad en el procesamiento y en las propiedades mecánicas finales.

2.4.2 PERMEABILIDAD.

La permeabilidad (K) es la medida de la facilidad de la resina para fluir a través de la preforma, y tienen unidades de área. La permeabilidad puede ser altamente direccional (anisótropa), lo cual es muy importante a la hora de diseñar el molde, las entradas de resina y las salidas de aire. La permeabilidad está afectada por la compactación y por la arquitectura de la preforma.

-Las preformas abiertas tienen mayor porosidad y mayor permeabilidad.

-Las preformas cerradas son más difíciles de impregnar, pero muestran mayor rigidez y resistencia.

-La permeabilidad K, muestra el efecto de la estructura de la preforma en el flujo.

-Las preformas porosas y abiertas tienen mayores valores de K y son más fáciles de impregnar.

Los factores que afectan a la permeabilidad son:

-Arquitectura de la preforma.

-Viscosidad de la resina.

La permeabilidad tiene carácter direccional, así que en preformas anisótropas es necesario conocer tres valores. K_{xx} , K_{yy} y K_{zz} .

La permeabilidad determina los parámetros clave para el procesado:

-Tiempo de llenado.

-Presión de inyección.

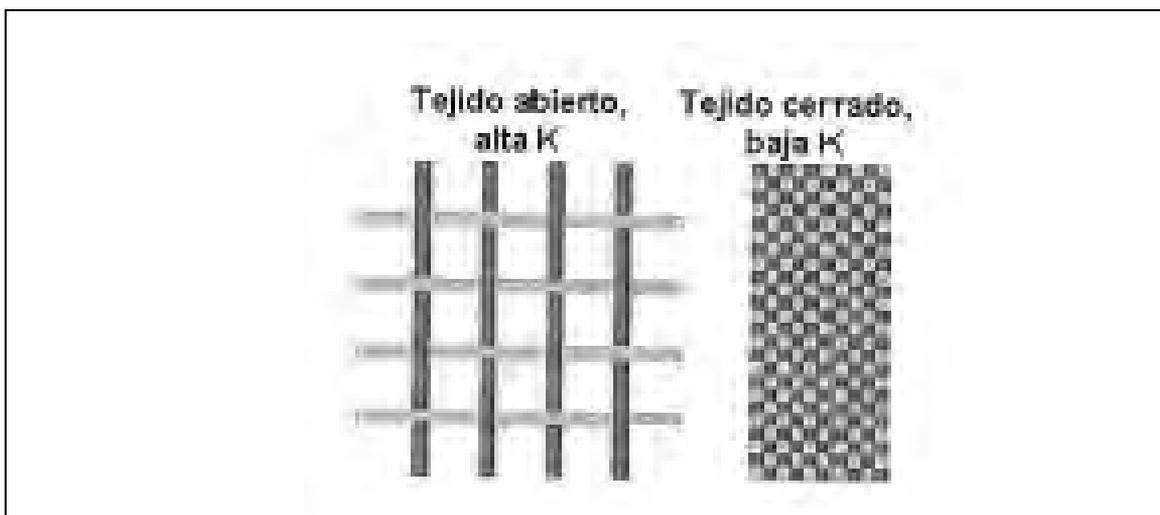


Figura 2-11 Tejidos abiertos y cerrados.

2.5 NÚCLEOS O INSERTOS.

En numerosas ocasiones es necesario completar la preforma con otros materiales aparte de las fibras de refuerzo; éstos son los núcleos o insertos.

Núcleos:

Unos de los aspectos más beneficiosos del RTM es la posibilidad de fabricar grandes piezas con formas tridimensionales complicadas. Los núcleos se introducen para crear volúmenes en el interior y aumentar el momento de inercia sin aumentar el peso, o para dotar a la estructura de características aislantes o acústicas.

Factores a considerar cuando seleccionamos un material para núcleo:

- Complejidad de la pieza.
- Tolerancias dimensionales/ estabilidad.
- Inyección de resina y presión de compactación.
- Tiempo del ciclo de fabricación.

Materiales más comunes para núcleos:

- Espumas de poliuretano, fenólicas.etc.
- Honeycomb.
- Madera de balsa.
- Termoplásticos.

Insertos.

Para dotar de funcionalidad específica a algunas zonas de la pieza se utilizan piezas de otro tipo de materiales, siendo más utilizados los aglomerados o insertos metálicos. Estos últimos van desde placas planas a pletinas con taladros, roscas, tornillos, ruedas, etc. Los aspectos a tener en cuenta son los siguientes:

Aspectos relativos al procesado:

- Influencia del inserto en el flujo de resina.
- Efecto del flujo de resina en el posicionamiento del inserto.
- Adhesión entre el inserto y la resina de la matriz.
- Desarrollo de tensiones residuales durante el ciclo de curado.

Aspectos relativos al comportamiento final de la pieza:

- Comportamiento después de largo tiempo.
- Efecto de la posición del inserto en el comportamiento de la pieza.

-Efecto de las condiciones ambientales en el inserto.

-Transferencia de carga o tensiones entre el inserto y la matriz del material compuesto.

-Metodología de diseño.

Para aplicaciones estructurales, dos mecanismos de unión entre pieza e inserto son importantes:

-Unión mecánica entre superficie metal y la matriz, por ello la mayor parte de los insertos comerciales están instalados sobre rejillas metálicas, así se mejora la unión mecánica.

-Unión química entre moléculas del polímero y el óxido del metal.

3 SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES.

3.1 INTRODUCCIÓN.

El creciente número de aplicaciones de los materiales compuestos durante los últimos años ha generado gran optimismo en el futuro de esta tecnología. El hombre ha utilizado materiales compuestos desde hace miles de años, pero el desarrollo de este tipo de materiales a alto nivel ha sido potenciado fundamentalmente por la industria aeronáutica durante las dos últimas décadas. La fabricación de depósitos a presión, por medio de enrollamiento continuo de fibras de vidrio, fue la primera aplicación estructural de los materiales compuestos modernos.

En la década de los sesenta aparecieron los filamentos de boro, iniciándose programas de las Fuerzas Aéreas de los Estados Unidos con el objeto de promover estructuras aeronáuticas realizadas en materiales compuestos de este tipo.

En la fabricación del timón doble de un yate revolucionario de 12 m., bautizado como el USA. y perteneciente al Club San Francisco Yatch se utilizaron laminados de grafito de alto compromiso estructural. Este barco participó en el America's Cup Challenge. El U.S.A. fue uno de los artífices del trasvase de los materiales compuestos desde el dominio de la alta tecnología hasta el nivel de ser conocidos por toda la sociedad. La capacidad de realización de un amplio espectro de aplicaciones ha sido muy importante para el desarrollo y aceptación de los materiales compuestos como una vía dentro de la ingeniería de materiales.

En el campo de la aeronáutica, los últimos aviones de la compañía Airbus incorporan los estabilizadores horizontales y verticales fabricados en fibra de carbono, sirviendo además como depósito de combustible. También McDonnell-Douglas presenta varias piezas de estructura primaria de fibras de carbono en su modelo MD11. Una interesante aplicación de los materiales cerámicos se centra en los motores de aviación. La eficiencia de éstos está limitada por las temperaturas de fusión de los materiales constituyentes. La utilización de los materiales cerámicos, de elevado punto de fusión, puede incrementar la eficiencia de los motores de aviación de forma notable.

Los materiales compuestos han sido también utilizados para aplicaciones no aeronáuticas. En el sector de vehículos de turismo, la empresa Ford presentó en 1978 varios prototipos realizados casi íntegramente en laminados de fibra de carbono. Estos vehículos que fabricados mediante los cánones clásicos pesaban 1700 Kg., con materiales avanzados pesaban 565 Kg. menos. Desde entonces muchas piezas de fibra de vidrio de tipo SMC o XMC han sido ya incorporadas a la fabricación en serie: capós, techos, portones, etc. Piezas como árboles de dirección y de transmisión no resultan competitivas por el momento y habrá que esperar una reducción del coste de las materias primas para su implementación en la producción en serie.

En lo que concierne a vehículos de competición, el modelo GT40 de Ford, que incorporaba un bastidor de fibra de carbono, ganó las 24 horas de Le Mans en 1968 y 1969. El modelo

TWR Jaguar XJR-6 presenta un bastidor monocasco realizado integralmente en materiales híbridos carbono-aramida.

El modelo Espace de Renault y el Z1 de BMW son las dos aplicaciones estrella de carrocerías integrales en materiales compuestos para series largas y cortas respectivamente. En el área de vehículos pesados, la empresa General Motors fabrica en Estados Unidos un millón de ballestas de fibra de vidrio y resina epoxy cada año.

La industria del deporte también ha realizado una estimable aportación en la aplicación de estos materiales. Cientos de toneladas de laminados de fibra de grafito son utilizadas cada año, desde 1983, en raquetas de tenis, squash y palos de golf. En deportes como salto con pértiga, esquí, automovilismo, ciclismo, piragüismo, etc., se utiliza la fibra de vidrio de manera creciente.

En cuanto a la construcción, paneles de fachada, cubiertas e incluso perfilería resistente son aplicaciones actuales. Ventanas, baños y piscinas son elementos típicos de fibra de vidrio.

En los sectores químico y agrícola, depósitos, tuberías y maquinaria se fabrican con fibra de vidrio en cantidades elevadas, así como diversas estructuras del área de servicios: cúpulas, soportes de telescopio, palas de aerogenerador, etc.

Otras aplicaciones son bicicletas, remos de embarcación y cualquier elemento en el que el peso, la rigidez y la resistencia sean importantes.

Finalmente, queda una larga lista de aplicaciones que pueden resumirse en los siguientes apartados: las alas y timones del cohete Pegasus, el cono de salida del trasbordador espacial Hermes, el mástil y casco de los barcos que compiten en la Copa América, casco de los dragaminas que está fabricando la Empresa Nacional Navantia, palas de aerogeneradores, rotores de helicóptero, etc.

En una conferencia organizada por la Engineering Society de Detroit, en Diciembre de 1985, un empresario del sector del automóvil estimó el impacto de los materiales compuestos en la industria automovilística igual, si no mayor, que el causado por la electrónica.

3.2 ASPECTOS GENERALES SOBRE MATERIALES COMPUESTOS.

3.2.1 CLASIFICACIÓN Y DEFINICIÓN DE LOS COMPOSITES.

Los materiales compuestos pueden ser clasificados de muchas formas según sean los criterios aplicados para identificarlos (una de estas clasificaciones se muestra en la Tabla 3.1.). Muchos de los materiales que aparecen en la naturaleza obtienen sus magníficas propiedades por medio de una combinación de dos o más componentes. De igual modo, gran parte de los materiales compuestos ingenieriles son combinación de dos o más fases dispersas en escala microscópica.

TIPOS	EJEMPLOS
MATERIALES COMPUESTOS NATURALES.	MADERA, HUESO, BAMBÚ, MÚSCULOS Y OTROS TEJIDOS
MATERIALES MICROCOMPUESTOS.	ALEACIONES METÁLICAS: P. EJ. ACEROS. TERMOPLÁSTICOS ENDURECIDOS: P. EJ. POLIESTIRENO DE IMPACTO. HOJAS PARA MOLDEO CONTINUO (SMC). TERMOPLÁSTICOS REFORZADOS.
MACROCOMPOSITES.	
PRODUCTOS INGENIERILES.	ACERO GALVANIZADO. HORMIGÓN ARMADO. PALAS DE HELICÓPTEROS. ESQUÍES.

Tabla 3-1. Clasificación de los Materiales compuestos.

La resistencia y dureza de las aleaciones metálicas y los plásticos ingenieriles se consiguen combinando fases de gran resistencia con fases dúctiles y tenaces. Un claro ejemplo se encuentra en los aceros al carbono puros (p. ej. 99.2% hierro, 0.8% carbono) formados microestructuralmente por capas alternas de una fase dúctil blanda (casi hierro puro) y un compuesto duro y frágil llamado cementita (Fe_3C). Los materiales naturales y de ingeniería son ambos microcomposites debido a que sus propiedades se alcanzan a partir de una dispersión fina de las fases, pero la idea de composite puede aplicarse también a escala macroscópica.

Esto es particularmente relevante para piezas de ingeniería, que constan de dos o más materiales combinados para dar unas prestaciones de servicio que superan las de los materiales por separado. Así, las hélices de los helicópteros combinan el material estructural, que da resistencia y rigidez, con materiales resistentes a la erosión, para proteger el borde de ataque de cualquier daño.

No hay una definición realmente adecuada de material compuesto, pero la argumentación precedente da algunas indicaciones sobre el alcance del tema. Hay tres puntos principales que se deben incluir en la definición de material compuesto de uso en aplicaciones estructurales:

1. Consta de dos o más materiales físicamente distintos y separables mecánicamente.
2. Puede fabricarse mezclando los distintos materiales de tal forma que la dispersión de un material en el otro pueda hacerse de manera controlada para alcanzar unas propiedades óptimas.
3. Las propiedades son, en algún aspecto específico, superiores a las de los componentes por separado.

El último punto es el principal motivo al que se debe el desarrollo de los materiales compuestos. Combinando fibras y resinas se produce un material con una resistencia y una rigidez cercana a la de las fibras y con alta resistencia química. También se consigue algo de resistencia a la propagación de las grietas y capacidad de absorber energía durante la deformación.

3.2.2 COMPARACIÓN DE LOS COMPOSITES FRENTE A OTROS MATERIALES.

Ha habido un rápido crecimiento en el uso de materiales reforzados con fibras en aplicaciones ingenieriles en los últimos años y todo indica que esto continuará (en la Tabla 3.3. se da una idea del margen de aplicación de los materiales compuestos). Esto indica que, en algunos aspectos, los materiales compuestos tienen propiedades superiores (en la Tabla 3.4. se da una comparación entre las propiedades de un conjunto de materiales de alta resistencia). Desde el punto de vista de la resistencia y la rigidez, los materiales compuestos reforzados con fibras no tienen una clara ventaja, particularmente cuando se observa que su alargamiento de rotura es mucho menor que en los metales con resistencia comparable. Las ventajas de los materiales compuestos aparecen cuando se consideran el módulo de elasticidad por unidad de peso (módulo específico) y la resistencia por unidad de peso (resistencia específica). El mayor módulo específico y resistencia específica de los materiales compuestos significa que el peso de los componentes puede reducirse. Este es un factor de gran importancia en las piezas móviles, especialmente en todas las formas de transporte donde las reducciones de peso dan como resultado un mayor rendimiento y ahorro de energía.

En la Tabla 3.3. se dan las propiedades de los materiales compuestos orientados paralela y perpendicularmente a la dirección de la fibra. Las grandes diferencias de propiedades en distintas direcciones son debidas al alto grado de anisotropía del material y, en algunos casos, puede suponer una seria limitación para su aplicación. Sin embargo, esto es también una de las grandes ventajas de los materiales compuestos pues permite introducir rigidez y resistencia en los puntos que un producto requiera. En otras palabras, se introduce un elemento de flexibilidad en el diseño, a cambio de ser éste último más difícil y exigente.

Hay muchos procesos de fabricación para los materiales compuestos y, aunque no se pretende entrar en este tema, es importante reconocer el profundo efecto que el proceso de fabricación tiene sobre las propiedades finales de estos materiales, debido a su efecto

en la microestructura y en las tensiones internas. En la Tabla 3.4. se da un resumen de los principales procedimientos de fabricación.

INDUSTRIA	EJEMPLOS
AERONÁUTICA.	ALAS, FUSELAJES, TRENES DE ATERRIZAJE, PALAS DE HELICÓPTERO.
AUTOMÓVILES.	PIEZAS DE CARROCERÍA ALOJAMIENTO DE FAROS, PARRILLAS, PARACHOQUES, BALLESTAS, BASTIDORES DE LOS ASIENTOS.
NÁUTICA.	CASCOS, CUBIERTAS, MÁSTILES, HÉLICES.
QUÍMICA.	CONDUCCIONES, RECIPIENTES, RECIPIENTES DE PRESIÓN.
MOBILIARIO Y EQUIPAMIENTO.	ESTANTERÍAS, ARMAZONES, SILLAS, MESAS, ESCALERAS
ELÉCTRICA.	PANELES, AISLANTES, CAJA DE INTERRUPTORES
DEPORTES.	CAÑAS DE PESCAR, PALOS DE GOLF, PISCINAS, ESQUÍ, CANOAS

Tabla 3-2 Aplicaciones de los composites.

1. Densidad [g/cm^3].
2. Módulo de Young [GPa].
3. Resistencia a Tracción [MPa].
4. Alargamiento de Rotura (%).
5. Coeficiente de Dilatación Térmica [$10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$].
6. Módulo de Young Específico = Módulo de Young / Densidad [GPa].
7. Resistencia a Tracción Específica = Resistencia a Tracción / Densidad [MPa].
8. Estabilidad Térmica [$^\circ\text{C}$].

Material.	1	2	3	4	5	6	7	8
Aleación Al-Zn-Mg de								
Alta resistencia	2.80	72	503	11	24	25.7	180	350
Acero templado y revenido								
de baja aleación	7.85	207	1325	20	11	26.4	168	800
Nimonic 90 (Aleación con								
base de níquel)	8.18	204	1200	26	16	24.9	147	1100
Nylon 6.6	1.14	2	70	60	90	1.8	61	150
Nylon-vidrio ($V_f = 0.25$)	1.47	14	207	2.2	25	9.5	141	170
Fibra de carbono-resina epoxy								
en láminas unidireccionales								
($V_f = 0.60$)								
1. Paralelo a las fibras	1.62	220	1400	0.8	-0.2	135	865	260
2. Perpendicular a las fibras	1.62	7	38	0.6	30			
Fibra de vidrio-resina de poliéster								
en láminas unidireccionales								
($V_f = 0.50$)								
1. Paralelo a las fibras	1.93	38	750	1.38	11	19.7	390	250
2. Perpendicular a las fibras	1.93	10	22	0.2				
Fibra de vidrio-poliéster fibras en								
disposición plana al azar								
($V_f = 0.20$)	1.55	8.5	110	2	25	5.5	71	230
Nota: V_f es la fracción de volumen de fibra.								

Tabla 3-3. Algunos valores de las propiedades de materiales a 20°C .

PROCEDIMIENTO	PROCESO DE FABRICACION
<p>Procesos en molde abierto.</p> <p>1. Método de contacto.</p> <p>2. Proyección (Spray-up).</p> <p>3. Saco de vacío, saco de presión, autoclave.</p> <p>4. Enrollamiento de filamentos.</p> <p>5. Moldeo por centrifugación.</p>	<p>Se colocan sobre el molde fieltros de fibra enrollada, mechas manual (Hand lay-up).Trenzadas y otros tejidos hechos de fibras y se impregnan con resina a brocha y pasando un rodillo. Se ponen capas hasta que se llegue al espesor de diseño. El moldeado cura sin calor ni presión.</p> <p>Se proyectan simultáneamente hilos cortados y resina a un molde preparado y se pasa el rodillo antes de que la resina endurezca.</p> <p>Se impregnan capas de fibra con resina y se curan parcialmente formando un preimpregnado. Las hojas preimpregnadas se colocan en el molde con orientaciones determinadas, se cubren con un saco flexible, y se consolidan usando otro saco de vacío o de presión en autoclave a la temperatura de curado requerida.</p> <p>Mechas o hilos continuos de fibra se pasan sobre rodillos, guías y por un baño de resina, y se enrollan después sobre un mandrino con ángulos preestablecidos por programación. La resina cura parcial o totalmente antes de sacar el componente del mandrino.</p> <p>Se introducen mezclas de fibras y resina en un molde rotatorio y se dejan curar in situ.</p>
<p>Procesos con molde cerrado.</p> <p>6. Moldeo por compresión en caliente</p> <p>7. Moldeo por inyección. Moldeo de transferencia.</p> <p>8. Pultrusión.</p> <p>9. Moldeo por prensado en frío.</p> <p>10. Inyección de resina.</p> <p>11. Moldeo por inyección con relación reforzada (RRIM).</p>	<p>Las matrices, calientes y acopladas, se cargan con materia prima y se comprimen para que se adapten a la cavidad y curen.</p> <p>Se inyectan polímeros fundidos o en estado plástico mezclados con fibras cortas en la cavidad de un molde ranurado y se deja curar.</p> <p>Una alimentación continua de fibras en orientación preseleccionada se impregna con resina y se comprime a través de un útil calentado para darle la forma de la sección final. Durante el paso por la matriz se produce un curado.</p> <p>Es un proceso a baja presión y baja temperatura en el que las fibras se impregnan con resina y se comprimen entre dos útiles macho y hembra. El calor se genera durante el curado.</p> <p>Se ponen fibras en forma de tejido en el útil, que se cierra después. Se inyecta la resina a baja presión en la cavidad y fluye entre las fibras hasta llenar el molde.</p> <p>Sistema de resina de curado rápido con dos componentes que se mezclan inmediatamente antes de la inyección. Las fibras, o se ponen en el molde cerrado antes de inyectar la resina, o se añaden cortadas y desordenadas a uno de los componentes de la resina antes de la inyección.</p>

Tabla 3-4 Procedimientos de fabricación de materiales compuestos.

3.2.3 PROBLEMÁTICA DE LOS COMPOSITOS.

Algunos de los problemas más importantes que surgen al trabajar con materiales compuestos son:

1. Cambios en las propiedades debidos al contacto con la humedad y a las fluctuaciones de temperatura.
2. Diseño de composites con un contenido óptimo de fibra.
3. Diseño de composites con capacidad de absorción de energía.
4. Desarrollo de composites con resistencia a la corrosión.
5. Mejora de la resistencia al desgaste de los composites articulados.
6. Fenómenos de inestabilidad elástica local.

3.3 **CARACTERÍSTICAS DE LAS DISTINTAS FIBRAS.**

Aunque los materiales que se pueden utilizar como fibras y matrices en la fabricación de materiales compuestos son muy numerosos, no resulta práctico trabajar con todos ellos, ya que hay que considerar factores de compatibilidad entre fibra y matriz, de propiedades finales obtenidas, de fabricación, etc. Por este motivo sólo se citarán los tipos de fibras y de resinas más utilizados en la fabricación de composites.

3.3.1 FIBRAS DE CARBONO.

Las fibras de carbono de alta resistencia y alto módulo tienen un diámetro de 7 a 8 μ m. Los átomos de carbono se ordenan en redes hexagonales que se colocan unas sobre otras. Los átomos de cada una de las capas se mantienen unidos por enlaces covalentes muy fuertes mientras que los enlaces entre capa y capa son del tipo de fuerzas débiles de Van der Waals. Esto hace que las unidades de cristal básicas sean altamente anisótropas; el módulo de Young en una dirección paralela a las capas es de 910 GPa mientras que en una dirección normal es de 30 GPa. Por lo tanto, para obtener un alto módulo y resistencia los planos de las capas deben estar orientados paralelamente al eje de la fibra.

El módulo de elasticidad de las fibras de carbono depende del grado de perfección de la orientación, la cual varía considerablemente con las condiciones y proceso de fabricación. Las imperfecciones en orientación dan como resultado huecos, alargados y paralelos al eje de las fibras, que actúan como puntos de concentración de tensiones y puntos débiles que llevan a la reducción de las propiedades de resistencia.

La disposición de los planos de las capas en la sección de la fibra es también importante puesto que afecta a las propiedades transversales y de cortadura de la fibra.

Hay tres procedimientos principales para producir fibras con las capas orientadas preferencialmente paralelas al eje de la fibra:

a) Orientación del polímero precursor por estiramiento. En un primer proceso una masa de un polímero parecido al polietileno se convierte en una primera fibra que es estirada para producir la orientación de las cadenas moleculares a lo largo del eje de dicha fibra. Cuando se calienta esta fibra estirada, se produce un polímero que consta de una fila de anillos hexagonales. Mientras la fibra está todavía bajo tensión se calienta en una atmósfera de oxígeno que conduce a la formación de enlaces cruzados entre las moléculas. Tras la oxigenación se realiza un proceso de reducción, para dar la estructura de anillo de carbono. El módulo de elasticidad y la resistencia de las fibras dependen de la temperatura del tratamiento de calentamiento final.

b) Orientación por hilado. Este método implica el moldeo de hilos de alquitrán fundido para producir fibras. La pasta de alquitrán de carbón o petróleo se trata térmicamente a una temperatura de alrededor de 350°C para convertirla, por polimerización, en una mesofase bituminosa que contiene material isótropo y anisótropo (fase de cristal líquido). La mesofase bituminosa se hila fundida a través de una hilera compuesta de multiorificios para producir un hilo crudo. Durante este proceso de hilado los efectos hidrodinámicos en el orificio ocasionan la orientación de las moléculas planas. Pueden inducirse diferentes clases de orientaciones dependiendo de las condiciones del hilado. Se requerirán esfuerzos de tracción durante algunas de estas etapas para prevenir la relajación y pérdida de la orientación preferencial.

c) Orientación durante la grafitización. A temperaturas muy altas las fibras carburizadas obtenidas a partir de rayón o alquitrán, como se describió anteriormente, pueden estirarse durante la etapa de grafitización. Esto tiene como consecuencia el deslizamiento de unas capas sobre otras y su posterior orientación paralelamente al eje de la fibra. Todos estos procesos pueden llevarse a un posterior desarrollo y de mayor sofisticación. Cada uno tiene sus ventajas y desventajas según sea su comportamiento, costo, facilidad de fabricación y calidad del producto.

Podrán modificarse la ordenación de las capas y la perfección de la orientación por selección del proceso y de las variables del mismo, pudiéndose optimizar las propiedades físicas para satisfacer los requerimientos de una aplicación específica.

Un aspecto importante de las propiedades mecánicas de las fibras es su variabilidad. Ensayos a tracción de fibras aisladas muestran un amplio margen de valores de la resistencia. Por ejemplo, se han realizado ensayos en los que fibras obtenidas en una misma carga variaron su resistencia a tracción entre 0.5 y 4.3 GN/m² mientras que el módulo de Young osciló entre 270 y 580 GN/m².

3.3.2 FIBRAS DE VIDRIO.

Se han usado muchas composiciones diferentes de vidrios minerales para producir fibras. Las más comunes están basadas en la sílice (SiO₂) con adiciones de óxidos de calcio, boro, sodio, hierro y aluminio. Estos vidrios suelen ser amorfos aunque puede producirse una ligera cristalización después de un calentamiento prolongado a altas temperaturas. Esto conduce normalmente a una reducción de las propiedades de resistencia.

El Vidrio E (E de eléctrico) es el más comúnmente usado, porque tiene unas buenas propiedades de resistencia, rigidez, eléctricas y de desgaste. El Vidrio C (C de corrosión) tiene una mayor resistencia a la corrosión química que el Vidrio E, pero es más caro y su resistencia es menor. El Vidrio S es más caro que el Vidrio E pero tiene un módulo de Young mayor y es más resistente a la temperatura. Se usa en aplicaciones especiales tales como la industria aeronáutica, en la que un módulo de Young superior puede justificar el coste adicional.

Las fibras de vidrio de filamento continuo se fabrican fundiendo los materiales en bruto en un crisol o tanque que alimenta de vidrio fundido a una serie de recipientes de platino, cada uno de los cuales tiene centenares de orificios en su base. El vidrio fluye por gravedad a través de los orificios y se obtienen filamentos muy finos que se estiran mecánicamente a medida que el vidrio va saliendo por dichos orificios. Las fibras de vidrio son enrolladas en unos tambores a velocidades de varios miles de metros por minuto.

El control del diámetro de fibra se ejerce ajustando la altura de vidrio en el tanque, la viscosidad (que depende de la composición y temperatura), el diámetro de los orificios y la velocidad de enrollamiento. El diámetro de las fibras comerciales de Vidrio E está normalmente entre 8 y 15 μ m siendo con frecuencia de 11 μ m.

La resistencia y el módulo elástico del vidrio están determinados en principio por la estructura tridimensional de los óxidos constituyentes. Cada poliedro es una combinación de átomos de oxígeno alrededor de un átomo de silicio que se unen entre sí por medio de fuertes enlaces covalentes. Los iones sodio forman enlaces iónicos con los átomos de oxígeno y no están unidos directamente a la red. La estructura de la red y la fuerza de los enlaces individuales puede cambiar con la adición de otros óxidos metálicos (ver Tabla 3.5.) y por tanto es posible fabricar fibras de vidrio con diferentes propiedades físicas y químicas. A diferencia de las fibras de carbono, las propiedades de las fibras de vidrio son isotropas de forma que, por ejemplo, el módulo de Young a lo largo del eje de la fibra es el mismo que transversalmente al eje. Esto es consecuencia directa de la estructura tridimensional de la red del vidrio.

	<i>Vidrio E</i>	<i>Vidrio C</i>	<i>Vidrio S</i>
SiO ₂	52.4	64.4	64.4
Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	14.4	4.1	25.0

CaO	17.2	13.4	
MgO	4.6	3.3	10.3
Na ₂ O, K ₂ O	0.8	9.6	0.3
Ba ₂ O ₃	10.6	4.7	
BaO		0.9	

Tabla 3-5 Composición de Vidrios Utilizados para la fabricación de Fibra (todos los valores en % en peso).

El factor más importante que determina la resistencia a la rotura del vidrio es el daño que las fibras experimentan cuando rozan entre sí durante las operaciones del procesado. Algo de deterioro es inevitable y se produce aleatoriamente entre las fibras. Esto conduce a una considerable variación de la resistencia a tracción. El deterioro mecánico se produce en forma de pequeñas grietas superficiales. Los efectos de las grietas pueden minimizarse o eliminarse por un ataque corrosivo de la superficie, pero éste no es un procedimiento comercial.

3.3.3 FIBRAS ORGÁNICAS.

Un grupo relativamente nuevo y potencialmente importante de fibras se basa en la alta resistencia y rigidez que es posible obtener en polímeros completamente alineados. Así, por ejemplo, los monocristales de las largas cadenas de polietileno constan de cadenas unidas directamente en zigzag de carbono a carbono, completamente alineadas y agrupadas estrechamente, y tienen un módulo elástico teórico de aproximadamente 220 GN/m². No es posible todavía fabricar fibras con una estructura completamente alineada, pero se ha llegado a la fabricación de fibras de polietileno de alta densidad y de gran estirado con un módulo de elasticidad a tracción de 60 GN/m² y una resistencia a tracción de 1.3 GN/m². El alineamiento y alargamiento de la cadena se produce durante el hilado y el estirado. La diferencia entre el máximo teórico y los valores experimentales se debe al alineamiento imperfecto, los pliegues de la cadena y los extremos de la cadena. Como en las fibras de carbono, el módulo perpendicular a las fibras es menor que el paralelo. La fibra orgánica con mayor éxito comercial hasta la fecha ha sido desarrollada por la compañía Du Pont con la marca registrada Kevlar.

3.3.4 PRUEBAS COMPARATIVAS ENTRE FIBRAS.

3.3.4.1 **Propiedades específicas.**

Probablemente, el factor más importante que ha conducido al rápido desarrollo de los materiales compuestos es la reducción de peso que puede conseguirse a partir del uso de fibras de baja densidad con alto módulo elástico y resistencia. El módulo de Young

específico y la resistencia a tracción específica se definen como el módulo y resistencia divididos por la densidad, respectivamente. Las fibras de carbono son muy superiores a las fibras de Vidrio E en términos de módulo elástico específico. Las fibras de Kevlar 49 son mejores que las fibras de Vidrio E, pero inferiores a las de carbono y también tienen una resistencia a tracción específica un 40 - 50% mayor que las fibras de Vidrio E y de carbono de Tipo II. La fracción de volumen máxima de fibras normalmente alcanzada en el composite de fibra orientada es aproximadamente 0.7, por lo que los valores deben reducirse por este factor. Debe recordarse también que las propiedades mecánicas de los materiales compuestos orientados transversales a las fibras son mucho menores que las paralelas a las fibras.

3.3.4.2 Propiedades Térmicas.

En ausencia de aire y de otras atmósferas oxidantes las fibras de carbono poseen unas propiedades excepcionalmente buenas a altas temperaturas. Estas mantienen sus propiedades superiores muy por encima de los 2000°C. Para aplicaciones que incluyan matrices de polímeros, esta propiedad no puede ser aprovechada porque la mayoría de las matrices pierden sus propiedades aproximadamente por encima de los 200°C.

El vidrio en bruto tiene una temperatura de ablandamiento de aproximadamente 850°C pero la resistencia y el módulo elástico de las fibras de Vidrio E disminuyen rápidamente por encima de los 250°C. Aunque la estabilidad térmica del Kevlar 49 es inferior a la de ambas fibras (la de vidrio y la de carbono), es adecuada para su uso en la mayoría de los sistemas con matriz de polímeros.

Además de la conservación de propiedades durante el uso en servicio a altas temperaturas, es esencial que no se produzca deterioro de las propiedades durante las operaciones de fabricación. Los cambios en las propiedades del vidrio parecen ser casi reversibles con la temperatura, pero el Kevlar 49 puede sufrir un deterioro irreversible debido a cambios en la estructura interna.

3.3.4.3 Comportamiento ante compresión.

Estas propiedades son difíciles de medir y sólo pueden estimarse a partir de las propiedades de los materiales compuestos fabricados con dichas fibras. Se ha encontrado que la rigidez axial en compresión es aproximadamente la misma que en tracción para todas las fibras, pero sin embargo, la resistencia a compresión longitudinal de láminas unidireccionales orientadas fabricadas con Kevlar es sólo un 20% de su resistencia a tracción debido a las propiedades anisótropas de la fibra y a la baja rigidez a cortadura. En contraste, los ensayos para las fibras de carbono y vidrio muestran que tienen resistencias parecidas en tracción y compresión.

3.3.4.4 Flexibilidad y rotura de las fibras.

Las curvas de esfuerzo-deformación sugieren que todas las fibras rompen de manera frágil a tracción sin ninguna deformación o fluencia. Las fibras de carbono y vidrio son casi completamente frágiles y se rompen sin ninguna reducción de área de la sección recta. En contraste las fibras de Kevlar 49 rompen de forma dúctil. Un marcado estrechamiento precede a la rotura y la separación final aparece después de un estiramiento local grande. La fractura implica a menudo el deshilachado de las fibras.

El diámetro de las fibras tiene una gran influencia sobre la facilidad que tengan para curvarse. Esto es importante en operaciones en las que las fibras son conducidas a través de orificios y sobre bobinas (como en los procesos de tejido y devanado del filamento) y en las operaciones de moldeado y mezcla en las que las fibras son mezcladas con el polímero, en mezcladoras que producen grandes esfuerzos cortantes, y posteriormente extrusionadas o moldeadas por inyección en máquinas alimentadas por husillo. Una flexibilidad insuficiente produce dificultades en el manejo de las fibras y la rotura de las mismas.

3.4 CARACTERÍSTICAS DE LAS MATRICES (RESINAS).

3.4.1 RESINAS TERMOESTABLES Y TERMOPLÁSTICAS.

3.4.1.1 Resinas Termoestables.

Las resinas epoxy y poliéster cubren un amplio grupo de productos químicos y se pueden corresponder con un amplio intervalo de propiedades físicas y mecánicas.

En los polímeros termoestables, las resinas líquidas se convierten en sólidos duros y frágiles por uniones químicas cruzadas que llevan a la formación de una red tridimensional, fuertemente unida, de cadenas de polímeros. El curado puede conseguirse a la temperatura ambiente, pero es normal usar un sistema de curado que realice el calentamiento a una o más temperaturas durante tiempos preestablecidos para alcanzar unas uniones cruzadas óptimas y por tanto unas mejores propiedades. A menudo se da un tratamiento de postcurado para minimizar cualquier posterior curado y cambio de propiedades de servicio. La contracción durante el curado y la contracción térmica por enfriamiento posterior al curado pueden provocar tensiones internas.

Las propiedades de las resinas curadas pueden ser determinadas a partir de muestras preparadas fundiendo las resinas sin curar en moldes. En la Tabla 3.6. se ofrece un conjunto de valores de las propiedades típicas de las resinas de poliéster y epoxídicas. Estas propiedades están sujetas a grandes variaciones dependiendo del sistema químico usado y de las condiciones de curado.

Las resinas termoestables son normalmente isótropas. Su propiedad más característica es su respuesta al calor ya que no se funden al calentarlas. Sin embargo, pierden sus propiedades de rigidez a la temperatura de distorsión térmica. Las resinas epoxídicas son generalmente superiores a las resinas de poliéster en este aspecto, pero hay disponibles otras resinas que son estables a temperaturas más altas, tales como las poliamidas aromáticas y las poliimidas. La Tabla 3.6. muestra que las resinas epoxy tienen mayor resistencia y propiedades elásticas, con una menor contracción en el curado y un menor coeficiente de dilatación térmica. La resistencia de la unión de la interfase entre resina y fibra es también mayor para las resinas epoxy. Por contra, tienen la desventaja de tener viscosidad más elevada antes del curado y son más caras.

PROPIEDAD	UNIDADES	RESINAS EPOXI	RESINAS POLIÉSTER
Densidad	g/cm ³	1.1 - 1.4	1.2 - 1.5
Módulo de young.	GPa	3 - 6	2 - 4.5
Relación de poisson		0.38 - 0.4	0.37 - 0.39
Resistencia a tracción	MPa	35 - 100	40 - 90
Resistencia a compresión	MPa	100 - 200	90 - 250
Alargamiento de rotura a tracción	%	1 - 6	2
Conductibilidad térmica	W m ⁻¹ °C ⁻¹	0.1	0.2
Coefficiente de dilatación térmica.	10 ⁻⁶ °C ⁻¹	60	100 - 200
Temperatura de distorsión por calor	°C	50 - 300	50 - 110
Contracción de curado	%	1 - 2	4 - 8
Absorción de agua (24 h. A 20 °c)	%	0.1 - 0.4	0.1 - 0.3

Tabla 3-6 Comparación de Propiedades de las Resinas Epoxy y Poliéster usadas en los Materiales Compuestos.

Las curvas de esfuerzo-deformación de una resina de poliéster ensayada a tracción y compresión muestran que, a tracción, la rotura se produce a 63 MN m⁻² con una deformación del 2.0 % y sin fluencia antes de la rotura. En compresión, se produce una gran deformación plástica, con límite elástico de 122 MN m⁻². La deformación plástica a compresión no se produce a tracción, por la rotura prematura vinculada a las grietas dentro y en la superficie del material.

Hay tres vías principales de fabricación de composites con resinas termoestables reforzadas con fibra:

a) Método húmedo. Se impregna fibra seca con resina de baja viscosidad. Esto se realiza de varias maneras:

1. Por contacto húmedo (lay-up) en el que las fibras en forma de fieltro (mat) son impregnadas en resina con rodillos y prensadas.
2. Enrollado húmedo o enrollado de mechas en el que se transporta la fibra. Por ejemplo, haces de fibras se hacen pasar a través de un baño de resina antes de enrollarlos en un mandril o molde de forma requerida.
3. Por inyección de resina, en la que las fibras se colocan en posición en un molde cerrado y la resina entra en él por gravedad o a presión.

El éxito de estos procesos depende de la buena impregnación de las fibras. En composites con gran fracción de volumen de fibras de pequeño diámetro el espacio entre fibras es pequeño y la impregnación requiere periodos largos y altas presiones.

b) Impregnación de las fibras realizada en dos etapas. La primera etapa es la producción de un pre-preg que es una hoja de fibras impregnadas con resina. Esto se realiza poniendo las fibras y la resina entre hojas de papel impregnadas de silicona o películas de plástico que se presionan y enrollan para asegurar la consolidación e impregnación de las fibras y se curan entonces parcialmente. El proceso permite una excelente orientación de las fibras en capas unidireccionales. La segunda etapa, después de quitar el papel o la película, es dar la forma de la pieza apilando capas de pre-preg, o enrollando cinta de pre-preg alrededor de un mandril. El pre-preg se consolida por presión y el curado final se consigue calentando bajo presión.

c) Variante del sistema pre-preg. Los productos intermedios son compuestos para hojas continuas (SMC) y premix o pasta (PMC) basados en resinas de poliéster. Para hacer SMC, se mezcla resina con fibras cortadas para formar una hoja. Las fibras se mantienen paralelas a la hoja y la fracción de volumen está usualmente en un intervalo comprendido entre el 15 y el 40 %. Después de mezclar las fibras y la resina, el material tiene la consistencia de una pasta que luego se convierte en un material rígido fuerte por compresión en caliente en moldes, dando como resultado la posterior consolidación del material y el curado de la resina. El grado de orientación puede variar en las distintas partes del molde y es un factor importante que se debe tener en cuenta en el diseño de piezas y la predicción de propiedades.

3.4.1.2 Resinas Termoplásticas.

Al contrario que las resinas termoestables, los termoplásticos no tienen enlaces cruzados. Obtienen su resistencia y rigidez de las propiedades de las unidades monoméricas y de su peso molecular elevado. Esto asegura que en los termoplásticos amorfos haya una alta concentración de entramados moleculares que actúan como enlaces cruzados y que en los materiales cristalinos haya un alto grado de orientación molecular. En los materiales amorfos el calentamiento conduce al desentramado y al cambio de sólido a líquido viscoso. En los materiales cristalinos el calentamiento da como resultado la fusión de la fase cristalina para dar un líquido amorfo y viscoso. Normalmente se usan matrices de termoplásticos con refuerzo de fibra corta para aplicaciones en productos fabricados mediante moldeo por inyección.

PROPIEDADES	UNIDADES	POLIPROPILENO	NYLON 6.6	POLICARBONATO
DENSIDAD	G/CM ³	0.90	1.14	1.06-1.20
MÓDULO DE YOUNG	GPA	1.04-1.4	1.4-2.8	2.2-2.4
RELACIÓN DE POISSON		0.3	0.3	0.3
RESISTENCIA ELÁSTICA A TRACCIÓN	MPA	25-38	60-75	45-70
ALARGAMIENTO DE ROTURA A TRACCIÓN	%	>300	40-80	50-100
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	W M ⁻¹ °C ⁻¹	0.2	0.2	0.2
COEFICIENTE DE DILATACIÓN TÉRMICA	10 ⁻⁶ °C ⁻¹	110	90	70
PUNTO DE FUSIÓN	°C	175	264	
TEMPERATURA DE FLEXIÓN BAJO CARGAS DE 1.8 MN M-2	°C	60-65	75	110-140
ABSORCIÓN DE AGUA (24 H. A 20 °C)	%	0.03	1.3	0.1

Tabla 3-7 Comparación de Propiedades Típicas de Tres Termoplásticos Comunes Usados en Materiales Compuestos, a 20 °C.

Las matrices poliméricas comunes son el polipropileno, el nylon y el policarbonato. Los dos primeros son usualmente policristalinos y el último es amorfo. En la Tabla 3.8. se dan algunas de sus propiedades típicas. En la práctica puede obtenerse un amplio margen de propiedades, siendo la resistencia mecánica y la térmica particularmente sensibles al proceso, al peso molecular y a la distribución de pesos moleculares. Todos estos plásticos fluyen y se deforman antes de la rotura final siendo sus propiedades mecánicas fuertemente dependientes de la temperatura y de la relación de deformación aplicada.

Otra importante característica de las propiedades que es común a todos los termoplásticos es que bajo condiciones de carga constante la deformación se incrementa con el tiempo, es decir los materiales fluyen bajo la acción de cargas. Esto significa que en los sistemas compuestos habrá una redistribución de la carga entre la resina y las fibras durante la deformación.

3.4.2 RESINAS RECOMENDADAS PARA RTM.

En RTM los factores determinantes del precio final de la pieza es su calidad y su procesado. Los dos factores están relacionados con la selección de resina.

Factores de comportamiento de la pieza relacionados con la selección de la resina:

- Módulo
- Resistencia.
- Coeficiente de expansión térmica.
- Temperatura de uso de la pieza.

Factores de procesado de la pieza relacionados con la selección de resina:

-Interacción entre tiempo-temperatura-viscosidad: La resina debe fluir e impregnar la preforma completa. La viscosidad decrece a medida que la temperatura aumenta, pero a costa de una velocidad de curado mayor. Cuando el grado de curado aumenta, la resina se acerca a su punto de gelificación y la viscosidad disminuye, La viscosidad de inyección debe estar por debajo de unos 1000cps, aunque es preferible una viscosidad mucho menor.

-Ciclo de curado.

-Post-curado.

-El "pot life" de la resina, es decir el tiempo que la resina puede estar dentro del sistema de inyección.

Un sistema de resina ideal para RTM debería tener las siguientes propiedades.

-Viscosidad menor a 200cps. Cuanto menor sea la viscosidad, más fácil es impregnar la preforma. Si la viscosidad es demasiado baja (de 5 cps a 50cps) la resina podría salirse sin impregnar toda la preforma.

--Pot life" mayor de 8 horas a temperatura de inyección.

-Temperatura de curado menor de 175°C.

-Tiempo de curado menor de un minuto, esto es lo que se considera ideal para aplicaciones automovilísticas.

-Evitar el post-curado en lo posible.

-Bajos niveles volátiles y productos desprendidos en a reacción de curado.

Las características de un sistema particular de resina pueden variarse en cierto grado modificando variables como el nivel de catalítico y la temperatura.

Existe gran variedad de resinas disponibles para RTM: Poliéster, viniléster, fenólica, uretano, epoxis, bismaleimida, termoplásticos.

3.4.2.1 Parámetros de la resina a tener en cuenta en un molde de RTM.

Viscosidad: La viscosidad es la medida de la resistencia que opone un fluido a deformarse. En el caso de cortante simple como el que se muestra en la figura, la viscosidad se define como la relación entre la tensión cortante y la deformación de cortadura del fluido.

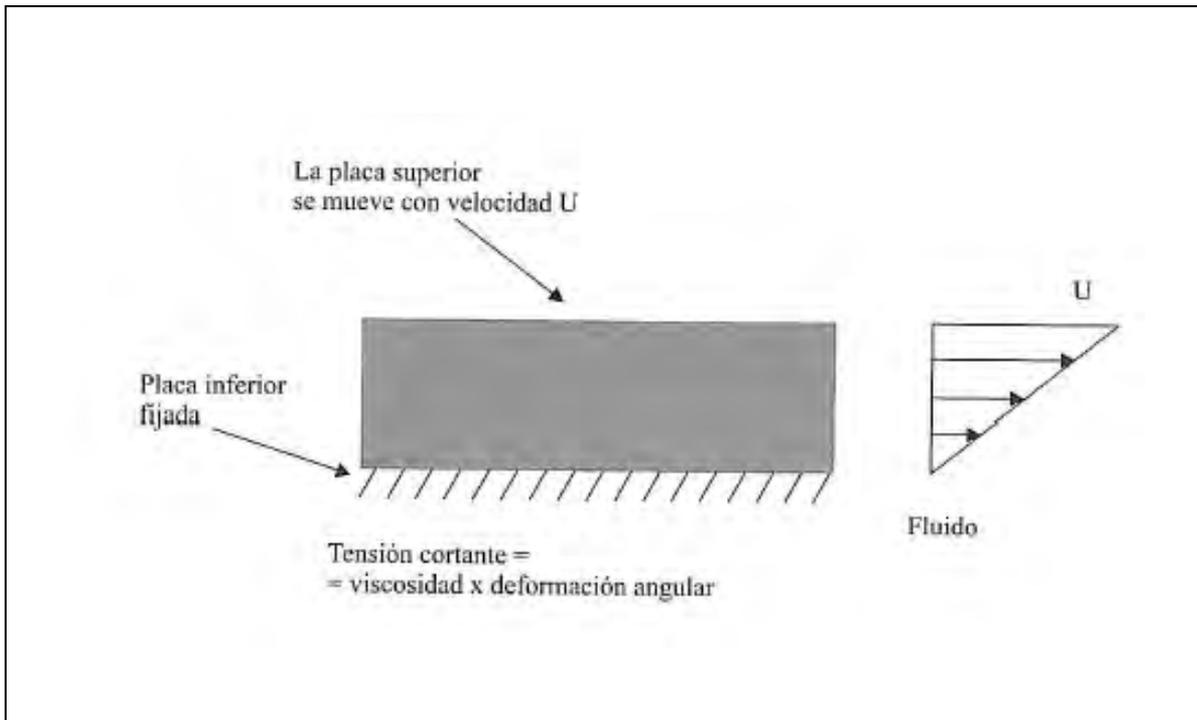


Figura 3-1 Definición de viscosidad

El viscosímetro Coutte consiste en un contenedor cilíndrico que contiene un cilindro coaxial a él con posibilidad de rotación. El espacio entre los dos cilindros se llena con el líquido del que queremos conocer su viscosidad.

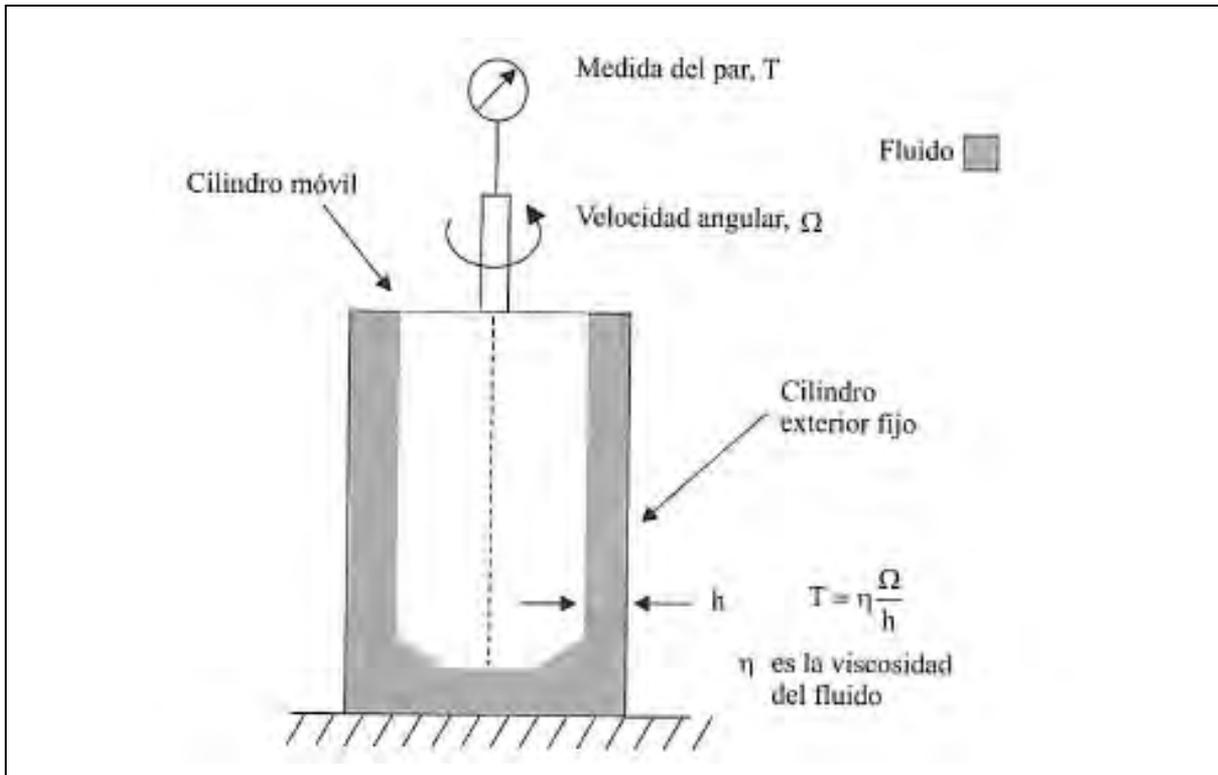


Figura 3-2 Viscosímetro Couette o de cilindros concêntricos.

El par ejercido para hacer girar el cilindro interior T es proporcional a la viscosidad η , a la velocidad angular W del cilindro interior, y es inversamente proporcional al espesor del fluido h .

En general, la viscosidad óptima para aplicaciones RTM es entre 200 y 1000 cps. De todos modos, los fabricantes de resinas suministran viscosidades desde 10 a 500cps.

Para controlar la viscosidad de una resina en concreto se utilizan variaciones de temperatura.

Si la viscosidad de la resina es muy alta, no llega a impregnar las hebras de fibra y si es demasiado baja, simplemente busca el camino de mayor resistencia, dejando gran cantidad de huecos sin impregnar.

Nivel de catálisis: Aumentando la concentración de catalizador en la resina se puede aumentar la velocidad de curado, pero es necesario usar DSC (Diferencial Scanning Calorimetry) para comprobar que la exotermicidad de la reacción es suave y no se introducen tensiones residuales por el aceleramiento de la reacción de curado.

A continuación se muestra un resultado de Dow Chemical sobre el efecto del nivel catalítico en el curado de la resina viniléster.

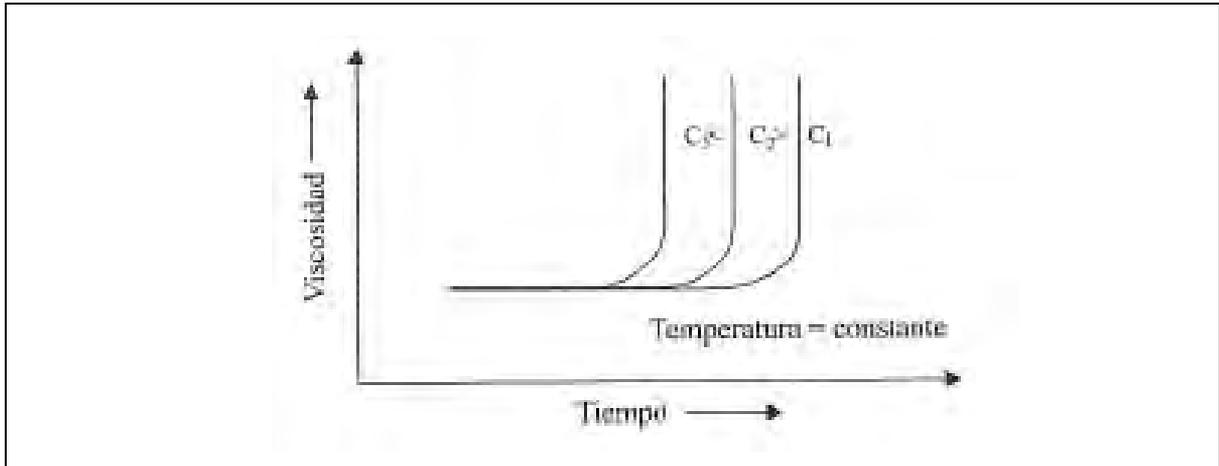


Figura 3-3 Efecto del nivel catalítico en la viscosidad.

Temperatura: La viscosidad es muy sensible a la temperatura. La siguiente figura muestra un estudio de Dow Chemical sobre el efecto de la temperatura en la viscosidad en el curado de una resina viniléster.

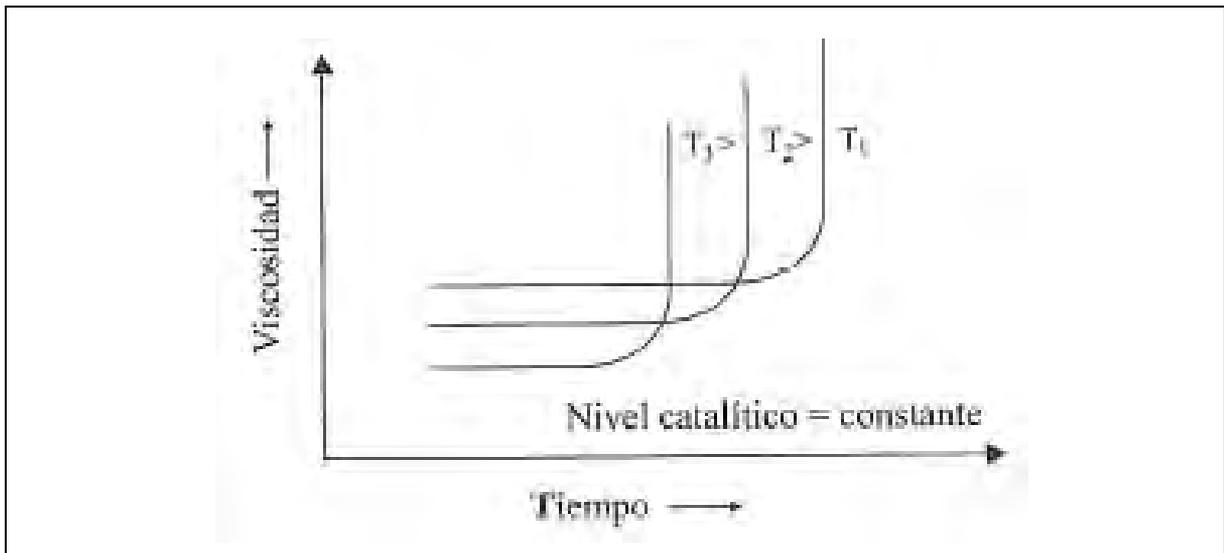


Figura 3-4 Efecto de la temperatura en la viscosidad.

Como se aprecia en la figura, la resina cura mucho más deprisa para temperaturas altas.

3.5 DISTINTAS CONFIGURACIONES DE FIBRAS.

3.5.1 INTRODUCCIÓN.

Muchas de las propiedades de los materiales compuestos son fuertemente dependientes de parámetros microestructurales tales como el diámetro, longitud, distribución de longitudes y fracción de volumen de las fibras y la orientación y ordenación de conjunto de las mismas. Es importante caracterizar estos parámetros para un procesamiento efectivo de los materiales compuestos y para diseño y manufactura eficientes de los componentes hechos con estos materiales.

Los componentes de altas prestaciones consisten usualmente en capas o láminas apiladas con una ordenación predeterminada para alcanzar propiedades óptimas. Para la predicción de las propiedades elásticas, cada lámina puede ser considerada homogénea en el sentido de que la ordenación y fracción de volumen de las fibras son uniformes por todas partes. Las hebras en las láminas pueden ser continuas o de corta longitud, pudiendo estar orientadas en una o más direcciones o distribuidas aleatoriamente en dos o tres dimensiones. En la Fig. 3.5. se ilustran dos ordenaciones simples de láminas. Un apilado de láminas se llama laminado. El laminado plano de la Fig. 3.5.(I.) consta de láminas unidireccionales idénticas apiladas con las fibras de las láminas adyacentes a 90° unas con otras. Esta construcción es típica del material usado para paneles de alta rigidez en aviones. El laminado curvo de la Fig. 3.5.(II.) es parte de la pared de una vasija cilíndrica y se encuentra comúnmente en aplicaciones tales como conductos presurizados.

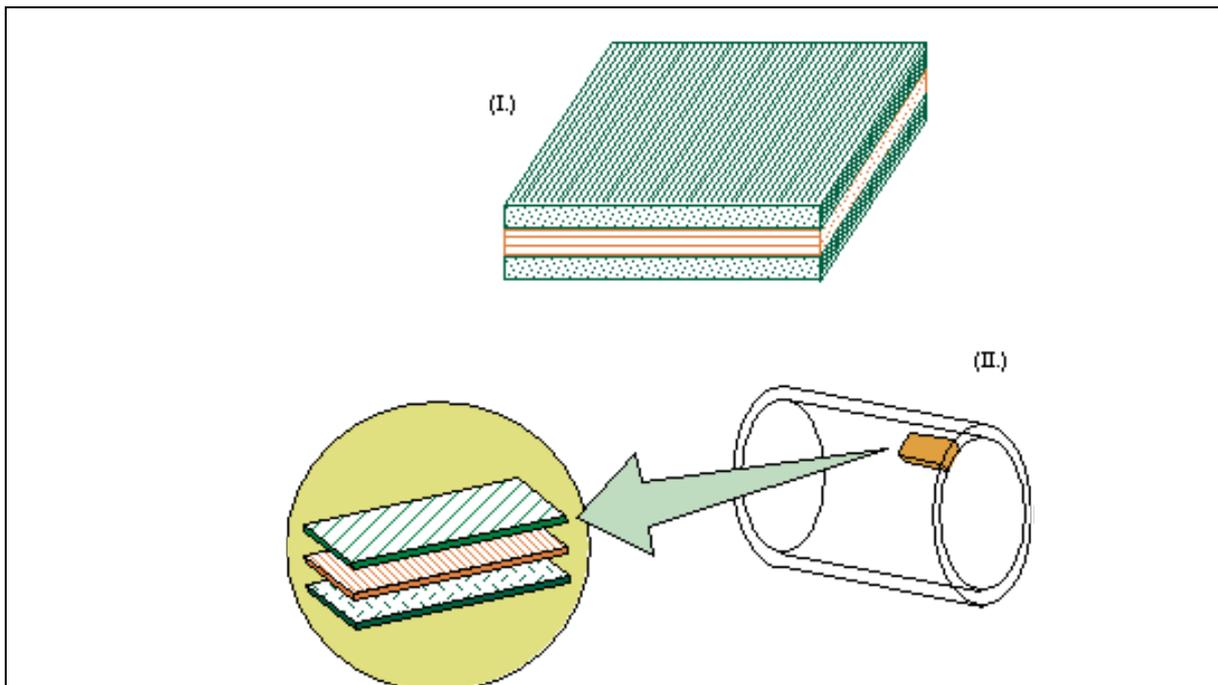


Figura 3-5 (I.) Laminado plano con láminas a 90° unas de otras. (II.) Laminado cilíndrico con dos láminas unidireccionales y otra de hebras cortadas.

3.5.2 FIBRAS CONTINUAS.

En una lámina unidireccional todas las fibras están orientadas paralelamente entre sí. Hay una cierta variación en el diámetro de la fibra, dependiente del procedimiento de fabricación, para todos los tipos de material.

Los estudios experimentales de la disposición de las fibras en láminas unidireccionales muestran que ésta no se produce en la práctica de forma uniforme en la práctica, excepto en pequeñas regiones localizadas. En algunas regiones el empaquetamiento se aproxima bastante a una red hexagonal, pero en toda la lámina se producen regiones ricas en resina con un agrupamiento irregular. Puede producirse un cierto apelmazamiento de las fibras y grandes zonas ricas en resina. El desorden de las fibras es también más pronunciado en las láminas de bajo Vf (fracción de volumen de fibra). La dispersión irregular de las fibras puede tener un efecto significativo en algunas propiedades, particularmente en la resistencia transversal y el módulo elástico. Una de las principales consecuencias del empaquetamiento irregular es la dificultad para conseguir fracciones de volumen mayores de 0.7, debiéndose considerar este valor como el límite práctico para los materiales comerciales. Las láminas no deben considerarse homogéneas desde el punto de vista microestructural, aunque para la predicción de las propiedades del laminado se supone que cada lámina tiene un conjunto de propiedades características.

Otro aspecto del empaquetamiento y espaciado de las fibras que es importante en muchas de las operaciones de procesado, particularmente cuando la resina se introduce en un molde cerrado que contenga fibras secas, es el mojado de las fibras mediante el flujo de la resina a través de las fibras empaquetadas. Para un alto Vf, con fibras de pequeño diámetro el espaciado entre fibras es muy pequeño y se requieren largos períodos y altas presiones para una infiltración completa.

3.5.3 TEJIDOS DE MECHAS.

Los laminados con fibras continuas se fabrican usualmente por contacto de láminas unidireccionales distintas a ángulos predeterminados antes de la consolidación final. Un procedimiento alternativo que ofrece algunas ventajas en determinadas aplicaciones es tejer las fibras en un tejido antes de incorporarlas a la resina. Una caracterización completa de los composites con tejido de mechas requiere detalles sobre el espaciado del tejido, número de fibras en cada mecha, ángulo entre fibras en el tejido y direcciones de la trama, aunque ésta sea invariablemente de 90°, y la relación del número de fibras en estas direcciones.

La estructura del tejido conduce a la formación de bolsas de resina en los puntos de cruce, siendo el Vf máximo para materiales compuestos con tejidos de mechas menor que para los materiales completamente orientados.

3.5.4 TEJIDOS CON ORIENTACIÓN DE FIBRA ALEATORIA.

Las láminas pueden fabricarse con fibras largas, ya sea en haces o con fibras sueltas, en las que las fibras permanecen casi totalmente en un plano. Se produce una cierta curvatura en los puntos de cruce siendo el V_f máximo mucho menor que en las láminas orientadas. Los valores típicos para laminados comerciales están en el intervalo $V_f = 0.10 - 0.30$. El parámetro microestructural más importante es la orientación de las fibras. Este puede representarse usando un histograma normalizado.

La distribución de orientaciones de las fibras en entramados planos de fibras largas, puede determinarse mediante dos técnicas relativamente simples: primeramente, para fibras inorgánicas, derritiendo la resina y examinando directamente las fibras al microscopio; en segundo lugar por microrradiografía, la cual implica la preparación de un corte fino del material compuesto paralelo al plano de las fibras y la realización de una radiografía por medio de rayos X. La diferente absorción de las secciones rectas de las fibras y de las resinas da como resultado las diferencias de contraste necesarias en la película de rayos X. La distribución de orientación de las fibras puede obtenerse a partir de estas fotografías por medida de la misma para cada fibra o haz de fibras en un área dada.

3.6 CRITERIOS DE ROTURA DE UN LAMINADO.

En este apartado nos referiremos a los distintos métodos que nos permiten determinar de forma teórica el valor de la tensión a la cual se producirá la rotura del material compuesto.

Existen diversos criterios para tal fin y comentaremos brevemente aquellos que resulten más interesantes.

Recordemos que los materiales compuestos objeto de nuestro estudio son materiales laminados, heterogéneos y anisótropos. Esta complejidad estructural dificulta cualquiera de los fenómenos que queramos observar con respecto lo que sería el mismo fenómeno en los materiales isótropos convencionales, y la rotura no es una excepción a esta afirmación.

La rotura de un laminado puede ocurrir por tres diferentes causas, que denominaremos modos de rotura:

- por rotura de las fibras.
- por pérdida de adherencia en la interfase fibra/matriz o agrietamiento de la matriz.
- por delaminación.

Los dos primeros modos de rotura son roturas intralaminares, que ocurren en el interior de alguna de las láminas que componen el laminado. El tercer modo es interlaminar, se da entre las distintas láminas componentes del laminado y origina una pérdida de adherencia y la separación de las láminas.

El método general para determinar de forma teórica el momento en que aparece la rotura en un laminado es el mismo que en materiales isótropos: se estudia el nivel de tensiones, en este caso para cada una de las láminas, ocurriendo la rotura cuando el nivel de tensiones de trabajo supera la correspondiente tensión de rotura del material.

Las tensiones σ_x , σ_y y ζ_{xy} son tensiones intralaminares y a ellas se deben los dos primeros modos de rotura: rotura de fibras y agrietamiento de matriz.

Las tensiones interlaminares son las cortantes ζ_{xz} y ζ_{yz} y la normal σ_z , y van a ser las responsables de la aparición de delaminaciones.

Como puede suponerse, para predecir con una cierta exactitud la rotura de un laminado, será necesario disponer de criterios que tengan en cuenta el tensor completo de tensiones, es decir, que consideren sus seis componentes ya sea globalmente o por separado.

A continuación se citan cuatro criterios para la determinación teórica de la tensión de rotura de un laminado de material compuesto:

3.6.1 CRITERIO DE LA MAXIMA TENSION.

Este criterio establece que la rotura aparece cuando alguna cualquiera de las tensiones que componen el tensor se hace igual a la correspondiente tensión de rotura medida experimentalmente.

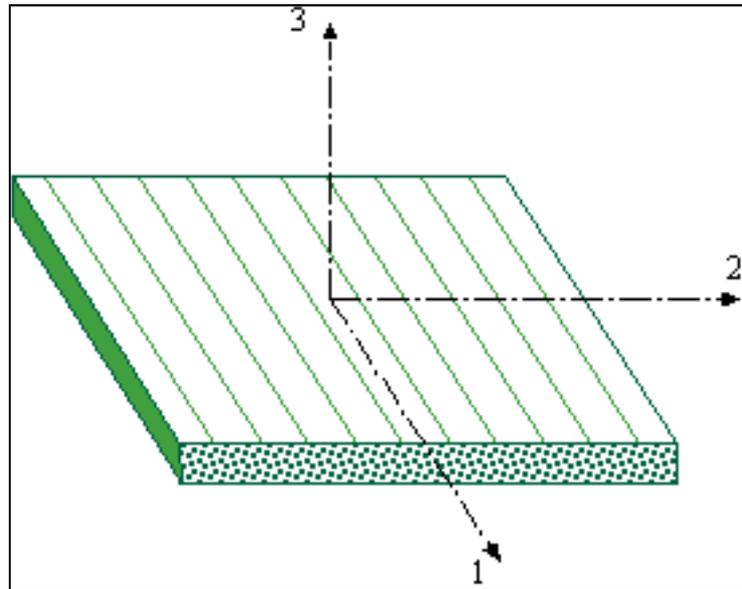


Figura 3-6. Detalle de ejes de coordenadas.

Si tenemos una lámina genérica de material compuesto como la de la Figura 3-6. con unos ejes de coordenadas en las direcciones indicadas, para que no exista rotura se han de cumplir todas las condiciones siguientes:

$$\sigma_1 < X_t$$

$$\sigma_2 < Y_t$$

$$|\tau_{12}| < S$$

$$\sigma_1 > X_c$$

$$\sigma_2 > Y_c$$

$$|\tau_{13}| < T_1$$

$$|\tau_{23}| < T_2$$

$$\sigma_3 > Z$$

Siendo:

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: componentes de tensión normal del tensor de tensiones, según los ejes indicados en la figura.

τ_1, τ_2, τ_3 : componentes de tensión cortante del tensor de tensiones, según los ejes indicados en la figura.

X_t : tensión de rotura a tracción según el eje 1.

X_c : tensión de rotura a compresión según el eje 1.

Y_t : tensión de rotura a tracción según el eje 2.

Y_c : tensión de rotura a compresión según el eje 2.

S : tensión de rotura por cortadura intralaminar, es decir en el plano formado por los ejes 1 y 2.

T_1 : tensión de rotura por cortadura interlaminar según el plano formado por los ejes 1 y 3.

T_2 : tensión de rotura por cortadura interlaminar según el plano formado por los ejes 2 y 3.

Z : tensión de rotura a tracción interlaminar.

-Si alguna de las condiciones anteriores no se cumple, se producirá la rotura del material.

-Si la condición incumplida es una de las 5 primeras, la rotura será de tipo intralaminar: rotura de fibras o pérdida de adherencia en la interfase fibra-matriz.

-Si la que se incumple es una de las tres últimas, estaremos ante una rotura interlaminar por delaminación.

3.6.2 CRITERIO DE LA MÁXIMA DEFORMACIÓN.

Este criterio establece que la rotura ocurre cuando alguna de las deformaciones en una de las dos direcciones principales de la lámina o el giro en el plano que forman se hace igual a la correspondiente deformación o giro de rotura, medido de forma experimental.

En este criterio sólo se tienen en cuenta los dos primeros modos de rotura. Considera únicamente la rotura intralaminar porque las deformaciones interlaminares son muy difíciles de medir experimentalmente y no se dispone de valores para las deformaciones interlaminares de rotura que resulten fiables.

En este caso, las condiciones que deben verificarse para asegurar que la lámina no alcanza una situación de rotura son las siguientes:

$$\varepsilon_1 < X_{\varepsilon t}$$

$$\varepsilon_2 < Y_{\varepsilon t}$$

$$|\gamma_{12}| < S_{\varepsilon}$$

$$\varepsilon_1 > X_{\varepsilon c}$$

$$\varepsilon_2 > Y_{\varepsilon c}$$

Siendo:

$X_{\epsilon t}$: máxima deformación en tensión normal de tracción según el eje 1.

$X_{\epsilon c}$: máxima deformación en tensión normal de compresión según eje 1.

$Y_{\epsilon t}$: máxima deformación en tensión normal de tracción según el eje 2.

$Y_{\epsilon c}$: máxima deformación en tensión normal de compresión según eje 2.

S_{ϵ} : máxima deformación en tensión cortante en el plano formado por los ejes 1 y 2.

3.6.3 TEORÍA DE TSAI-HILL.

El criterio de rotura de Tsai-Hill para materiales compuestos laminados se basa en la formulación de Von Mises para materiales isótropos.

En materiales ortótropos nos encontramos con la dificultad que supone la imposibilidad de cuantificar la diferencia entre las energías de dilatación y de distorsión.

La expresión del criterio de rotura de Tsai-Hill es la siguiente:

$$(G + H) \sigma_{12}^2 + (F + H) \sigma_{22}^2 + (F + G) \sigma_{32}^2 - 2H \sigma_1 \sigma_2 - 2G \sigma_1 \sigma_3 - 2F \sigma_2 \sigma_3 + 2L \tau_{23}^2 + 2M \tau_{13}^2 + 2N \tau_{12}^2 = 1$$

Según establece esta teoría, mientras el primer miembro de esta ecuación es menor que uno no se inicia la rotura. Enunciado en modo más directo, el estado tensional de trabajo provoca la rotura cuando el primer miembro de la ecuación es mayor que uno.

Los coeficientes F, G, H, L, M y N son constantes que se pueden determinar introduciendo en la ecuación casos tensionales particulares, solicitaciones simples cuyos límites de rotura sean conocidos, de manera que podamos hallar relaciones entre coeficientes y despejarlos de ellas.

Por ejemplo si el material está solicitado únicamente por una tensión de cortadura intralaminar τ_{13} aplicando la ecuación general se debe cumplir:

$$2N \cdot S^2 = 1$$

por lo tanto:

$$N = 1 / 2.S^2$$

Cuando el estado tensional se compone únicamente de una tensión normal s_1 según la dirección 1, se tiene:

$$(G + H) X^2 = 1$$

Si la tensión se aplica según la dirección 2, σ_2 :

$$(F + H) Y^2 = 1$$

Por último, si la única tensión aplicada es σ_3 :

$$(F + G) Z^2 = 1$$

siendo X, Y, Z las tensiones de rotura a tracción según las direcciones 1, 2 y 3 respectivamente, determinadas de manera experimental.

Resolviendo el sistema que forman las tres ecuaciones anteriores obtenemos los valores de otros tantos coeficientes:

$$H = 1/(2X^2) + 1/(2Y^2) - 1/(2Z^2)$$

$$G = 1/(2X^2) + 1/(2Y^2) + 1/(2Z^2)$$

$$F = 1/(2Y^2) + 1/(2Z^2) + 1/(2X^2)$$

Para el caso de una lámina sometida a un estado de tensión plana, la ecuación de Tsai-Hill se reduce a:

$$(G + H) \sigma_1^2 + (F + H) \sigma_2^2 - 2 H \sigma_1 \sigma_2 + 2 N \tau_{12}^2 = 1$$

Como el valor de las constantes F, G, H y N se conoce en función de las tensiones de rotura para sollicitaciones simples, que se pueden obtener experimentalmente, este criterio queda perfectamente definido para el caso de tensión plana y proporciona además buenos resultados para este estado tensional.

3.6.4 TEORÍA DE TSAI-WU.

Esta es también una teoría cuadrática basada en un estudio realizado por Tsai y Wu. Establece que la rotura para un caso de tensión espacial queda definida mediante una expresión de la forma:

$$F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j = 1$$

con $i, j = 1, \dots, 6$

En la expresión anterior, F_i y F_{ij} son tensores de tensión de segundo y cuarto grado respectivamente. Para simplificar la expresión utilizaremos una notación resumida en la que:

$$\sigma_4 = \tau_{23}$$

$$\sigma_5 = \tau_{13}$$

$$\sigma_6 = \tau_{12}$$

Elegiremos además el caso simplificado de una lámina ortótropa sometida a tensión plana, para el cual la ecuación anterior se reduce a:

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

Análogamente a lo que ocurría con la teoría de Tsai-Hill, las constantes que aparecen en esta ecuación se pueden determinar aplicando casos tensionales simples.

Por ejemplo cuando la lámina está sometida a una compresión pura según la dirección 1, queda:

$$F_1 X_c + F_{11} X_c^2 = 1$$

Análogamente cuando la lámina esté traccionada según la misma dirección:

$$F_1 X_t + F_{11} X_t^2 = 1$$

Resolviendo el sistema que forman estas dos ecuaciones determinamos dos de las constantes:

$$F_1 = 1/X_t + 1/X_c \quad F_{11} = -1/X_t X_c$$

Donde X_t y X_c son las tensiones de rotura de la lámina tracción y a compresión respectivamente, según la dirección 1.

En el caso de que la compresión sea en la dirección 2:

$$F_2 Y_c + F_{22} Y_c^2 = 1$$

y si se trata de una tracción:

$$F_2 Y_t + F_{22} Y_t^2 = 1$$

Resolviendo ahora este nuevo sistema hallamos otros dos coeficientes:

$$F_2 = 1/Y_t + 1/Y_c$$

$$F_{22} = -1/Y_t Y_c$$

Donde Y_t e Y_c son respectivamente las tensiones de rotura a tracción y compresión en la dirección 2.

La deformación de cortadura intralaminar es independiente del signo de la correspondiente tensión de cortadura que la origina, de lo cual podemos concluir que:

$$F_6 = 0$$

$$F_{66} = 1/S^2$$

Solo nos faltaría por determinar el coeficiente F_{12} para lo cual podemos recurrir a ensayos uniaxiales o biaxiales.

De esta forma se conocen ya la totalidad de las constantes que aparecen en el criterio de rotura de Tsai-Wu para el caso de láminas ortótropas sometidas a tensión plana.

Para analizar si un criterio es bueno o no, basta contrastar los resultados que ofrece con los obtenidos experimentalmente.

Los resultados obtenidos tanto con este criterio como con el anterior son buenos, incluso muy buenos, para el criterio de Tsai-Wu siempre que nos mantengamos dentro del campo de solicitaciones de tensión plana. Ambos consideran los dos primeros modos de rotura o rotura intralaminar pero su aplicación resulta muy compleja para estados tensionales tridimensionales. Es necesario para el análisis de estos casos un criterio que considere el nivel de tensiones interlaminares.

3.7 SELECCIÓN DE MATERIALES.

Del diseño que reemplaza una hélice metálica directamente por una de fibra de carbono, es casi seguro que el conjunto resulte mucho más caro, puesto que el material compuesto es de 10 a 50 veces más costoso que el metálico, además de pasar de un sistema de fabricación, fundición, a uno en algunos casos totalmente artesanal.

Sin embargo, puede resultar que mediante el estudio propuesto, y no mirando al conjunto aislado, sino como parte integrante de una estructura y mediante el diseño idóneo para este tipo de materiales y las mejoras físicas, estructurales .etc. del composite, den la rentabilidad del cambio; por conseguir ventajas tales como una disminución apreciable de peso, resistencia a la corrosión, aislamiento térmico, acústico y electromagnético, amortiguación y capacidad de absorción de energía.

Decidido el diseño en composites, la elección del tipo de matriz/fibra, está asociada con el tipo de proceso a escoger y con los valores preliminares de diseño. Este binomio junto con el diseño geométrico y dimensional, nos va a dar el producto final.

Generalmente se suele coger una selección de varios tipos de materiales sobre los que se hace incidir distintos parámetros, permitiendo la primera selección de los posibles materiales a utilizar. Para realizar este estudio, se parte de los datos de los fabricantes, datos de manuales y especificaciones apropiadas, que conjuntamente, mediante ensayos normalizados, dan paso a una primera selección.

Los ensayos reales que se realizan, dependen del tipo de diseño, con el fin de comprobar aquellos parámetros más significativos para este fin. Normalmente para estos primeros datos de selección, se dan como válidos los valores de los fabricantes en lo que se refiere a las propiedades separadas de los constituyentes del composite

Una vez seleccionado el material compuesto, se pasa al estudio en profundidad de este material, con el fin de definir las propiedades físico-químicas y valores de diseño. Es decir, se comienza la calificación del material para el diseño elegido.

En base a lo desarrollado anteriormente y a nuestras necesidades, los materiales que se utilizarán para la fabricación de la hélice por moldeo en RTM son:

COMPONENTE	MATERIAL SELECCIONADO
Largueros	Resina epoxy
	Tejido de carbono unidireccional de alto módulo
Piel exterior	Resina epoxy
	Tejido de carbono 0/90 de alta resistencia
	Tejido de polyester de alta resistencia
	Tejido de carbono unidireccional de alto módulo
Relleno	Espuma de poliuretano
Recubrimiento exterior	Acabado cerámico

3.8 LAMINADO O PREFORMADO PARA LA PALA DE LA HÉLICE.

La selección de la arquitectura de fibra tiene influencia directa en las características finales de pieza y en su fabricación, por tanto es una etapa crítica dentro de los procesos concurrentes de una pieza de RTM. La selección de material, grado de compactación y la orientación de las fibras afectan directamente al comportamiento mecánico de la pieza.

Los materiales laminados se han definido a partir de tres materiales ortotrópicos que se han utilizado como base:

MATERIAL	ESPESOR DE LÁMINA(mm)
Unidireccional FC	0,29
Tejido FC	0,28
Tejido FV	0,34

Es decir, los diferentes materiales composites están compuestos por combinaciones de los tres materiales base. Cada material base tiene sus propias propiedades mecánicas, pero cada combinación tendrá en si mismas sus propias propiedades mecánicas.

Una vez que se conocen las propiedades de los materiales base, ya se pueden definir los materiales composite. Esto hay que hacerlo capa por capa, dándole a cada una de ellas un espesor y una orientación. La orientación del material es una propiedad muy importante de los materiales composites, debido a que se comportará de manera muy diferente según la orientación que se le imponga.

El laminado de la hélice parte de los siguientes conceptos:

- 1.-Un sublaminado central de fibra unidireccional, optimizado por elementos finitos, para obtener la mayor rigidez con el menor peso posible, esto se hace después de realizar varias pruebas por FEM.
- 2.-Tejido de carbono en la parte exterior para dar mayor isotropía a la zona externa.
- 3.-Tejido de vidrio de para dar mejorar la resistencia al impacto, bastante pobre en el carbono. Sin embargo, se pondrá por debajo de alguna capa de carbono, porque la pala final tiene que ser negra.
- 4.-El ángulo 0º de material para las paredes verticales coincide con el eje que lleva del buje a la punta de la pala.

4 DISEÑO DE LA HÉLICE.

4.1 INTRODUCCIÓN.

Obviaremos entrar por su complejidad en los análisis matemáticos de los métodos para calcular cuál es la hélice más eficiente para un determinado tipo de motor y casco; pero es necesario tener un conocimiento básico para hablar con alguna propiedad sobre este mecanismo.

Este gran invento que algunos autores le adjudican en sus esbozos iniciales al genial Leonardo da Vinci y que otros asignan allá por en el año 1802 al coronel americano e inventor John Stevens, fue basado en el concepto del “disco impulsor” como conclusión de la 1ª Teoría de la Cantidad de Movimiento .

La realidad indicó que en ese estadio de análisis no se podían obtener ni relaciones ni medir eficiencia alguna de este invento que, originariamente estaba destinado a competir con las ruedas de paletas que salían como molinos hidráulicos a ambas bandas de los buque con propulsión mecánica más antiguos o más destacadamente en la popa en los románticos vapores fluviales que surcaron el Mississipi. A la par de incómodas e ineficientes en aguas abiertas, las paletas fueron paulatinamente condenadas desde que se vieron los buenos resultados de las primeras aplicaciones prácticas de las hélices en buque mayores.

El siguiente camino de cálculo que se abordó para entender con mayor propiedad su principio de funcionamiento nos aparece asentado como 2ª “Teoría de los Elementos de Pala”. Esta teoría fijó ya las relaciones entre la fuerza aplicada (par tursor del motor) y, el empuje obtenido. La teoría avanzó más prolijamente considerando a la pala de la hélice constituida por “franjas elementales “ o superficies separadas desde el centro del eje en rotación según el radio. Impuso definiciones para el cálculo en estas franjas elementales como: Superficie Proyectada – Superficie Desarrollada (que es la que más se aproxima al área elemental de empuje aplicado) y, la definición de Superficie Expandida. Como se observó más tarde esta teoría erró conceptualmente al considerar la eficiencia de la hélice en un líquido ideal = 1.

Pero la teoría que trajo la luz al nuevo mundo para este “tirabuzón del agua” fue la llamada “Teoría de la Circulación” (que no tiene nada que ver con los cortes de ruta ni los piqueteros) pero que tan bien fuera desarrollada por Kuta Jukoski para la sustentación de los aviones. Gracias a esto los investigadores Prandtl; Betz y Hembolt desarrollaron su aplicación en hélices de barcos tal cual hoy nos servimos de ellas.

Este teorema de Kuta Jukoski dice : “Que si un perfil del tipo alar se desplaza respecto al fluido a una velocidad V , se originará una fuerza de sustentación normal a la velocidad V que es posible calcular”.

Este es el concepto fundamental del elemento geométrico que hace útil la energía rotativa originada en un motor alternativo a pistones, transformándola en un empuje axial por medio del eje en el sentido de avance del barco.

4.2 PASO DE LA HÉLICE Y DIÁMETRO.

Aunque la hélice que tengamos delante tenga tres cuatro o cinco palas, “el paso” se define como la medida (en pulgadas o metros) que recorre una pala al girar sin resbalamiento una vuelta completa. Es entonces una dimensión medible que depende de la geometría de su diseño.

Se concluye por simplificación: El diámetro es la otra característica que nos ubica geoméricamente para definir a la hélice. Los fabricantes de hélices graban sobre el núcleo, el P X D es decir: El paso y el diámetro que cada una tiene.

Por una razón sencilla de identificación, no es fácil a simple vista ya que esta dimensiones hay que medirlas sobre un plato de calibración especial, que tiene circunferencias de ranuras muy finas donde se encastran los triángulos que representan el paso en el intervalo que ocupa la pala.

En resumen: El paso de la hélice es por identificación como la rosca de un tornillo. Si tiene rosca Whitworth avanzará más rápido hacia la tuerca en cada vuelta (la tuerca es la representación ideal de un fluido sin resbalamiento) Avanzará más rápido que un tornillo de igual diámetro pero con rosca milimétrica. Es decir tendremos en este caso que dar más vueltas al tornillo para avanzar lo mismo. Esto es entonces porque el tornillo milimétrico o de “paso fino” como justamente se llama, tiene menos paso.

Así mismo las hélices pueden ser (mirándolas desde la popa del barco) de “paso derecho” si se enroscan en el agua girando en el sentido de las agujas del reloj o a la inversa de “paso izquierdo” si para avanzar debe girar en sentido dextrógiro (contrariamente a las agujas del reloj)

4.3 CONCEPTOS FUNDAMENTALES PARA EL DISEÑO.

Siempre la mayor eficiencia se logrará con la hélice que tenga el mayor diámetro y la menor aceleración de empuje. Mayor diámetro que se compatibilizará con el vano disponible en el codaste para instalarla o, el tamaño que nos permita el pie de gallo ya instalado en el barco y que sustenta o soporta al eje o árbol propulsor. Además en todos los casos se deberá respetar una luz o distancia mínima entre el casco y la pala de la hélice, mayor a una pulgada (1" = 2,54 cm.) o más si es posible. Una hélice con menor diámetro significa menor masa de agua en movimiento, por lo que para igualar el empuje habrá que acelerar más a la masa en movimiento, o sea incrementar el paso de una hélice sustituta de menor diámetro.

Hay que evitar poner una hélice con un número de palas que sea múltiplo del número de cilindros del motor: Ej. Si tenemos un motor de 8 cilindros, no debemos instalar hélices de 2 o de 4 palas. Si en cambio de tres o cinco. Esto se hace para evitar vibraciones torsionales y sincronismos inducidos por empuje axial de las palas, a pesar de que esas deficiencias

puedan estar resguardadas por la masa rotante del volante del motor o el manchón elástico de acoplamiento entre cajas y árbol propulsor.

El paso de la hélice tiene que estar compatibilizado en cálculo con el número de revoluciones del motor propulsor y con la curva de potencia que el mismo motor presente. Si por ejemplo diseñamos una hélice que tenga poco paso, el motor podrá estar trabajando muy liviano buscando más empuje (carga) a mayores rpm. Girará en vacío, el barco andará muy lentamente e incluso podrá dispararse en vueltas ocasionando daños mecánicos o carbonizando dentro de los cilindros y largando humo negro por el escape originado en el exceso de combustible no quemado enviado por la bomba de inyección a las cámaras de combustión.

Si por el contrario nos excedemos en el paso (considerando en este análisis siempre un mismo diámetro de hélice en cuestión). El motor propulsor no podrá levantar más que un número vueltas limitado (sin llegar al máximo); comenzará a recalentarse y podrá indicarlo con mayores temperaturas en los gases de escape o largando humo blanco por el escape. Humo que es originado por un mayor consumo de aceite presente en las cámaras de combustión.

Es por eso que al considerar la velocidad a alcanzar andando a motor no podemos obviar el análisis de las características que presenta el casco para alcanzar su velocidad óptima “navegando la ola” o lo que es lo mismo el número de Froude correspondiente.

Además las formas del casco “perturbarán” el flujo continuo de agua que llega desde la proa hasta la posición de la hélice moderadamente ordenado, disminuyendo por tanto su eficiencia. Por esto es fundamental asegurar un flujo libre de interferencias y con líneas suaves hacia la posición en que trabajará la hélice.

Hay otros factores como las bajas profundidades o falta de limpieza del fondo del casco que alteran los resultados teóricos de alcanzar cuando se calcula la hélice al aumentar la resistencia friccional.

4.4 CAVITACIÓN.

Este fenómeno se comenzó a advertir cuando fueron instaladas las primeras turbinas a vapor para propulsión en los buques militares, al tener estas un mayor número de rpm que las máquinas alternativas.

Cuando las hélices trabajan a un número alto de revoluciones hay zonas de las palas (bordes de diámetro extremo donde es mayor la velocidad lineal) y de la cara de empuje de las palas donde se produce un aumento de la presión que, hasta puede hacerse mayor que la presión hidrostática en la que trabajan las palas normalmente.

En realidad la caída de presión en un punto no necesita ser igual a la presión en ese punto de la pala, sino solo la presión menos la presión de vaporización del agua a la temperatura que esta esté.

Si esto ocurre en esos puntos de la pala se rechaza al agua formando cavidades vacías o burbujas de vapor de agua que “implotan” produciendo golpeteo que junto con el oxígeno que se desprende de las burbujas forman un fenómeno mecánico y químico notable con daños de erosión al material constitutivo de la hélice.

Primero para tratar de solucionarlo se fijó un límite al empuje (en kilos) por unidad de superficie de pala para evitarlo. Después vieron los investigadores que la velocidad lineal también intervenía para que se produjera este fenómeno nocivo que disminuye la eficiencia de la propulsión y a veces suena como metralla o se confunde con vibraciones en la popa.

Fue finalmente Ackeret quién en el año 1932 inventó el túnel de capitación donde se pudieron hacer los ensayos del fenómeno y jugar con las variables para evitarlo.

4.5 FORMA CONSTRUCTIVA DE LAS HELICES.

Las hélices convencionales de colada se fabrican “al calibre”, esto es con el modelo de madera de una sola pala repetido en el molde de tierra de fundición tantas veces como palas deba tener; o “con modelo completo” tal sea este exactamente e igual en número de palas y diseño de su núcleo. Es en el núcleo donde se maquina con precisión y de acuerdo a normas el cono de montaje que irá rigurosamente ajustado al cono del árbol propulsor que une la hélice con el motor dentro del barco.

Como cualquier masa rotante las hélices deben balancearse estática y dinámicamente para evitar un punto o nodo origen de vibraciones producido por este defecto cuando el conjunto ya esté armado y en navegación de prueba.

Hay distintos tipos de diseño de perfiles y palas de hélices que están patentados. Se han desarrollado hélices contrarrotantes y hélices con toberas para canalizar más eficientemente el flujo y aumentar notablemente el empuje. Se han diseñado hélices de superficie para lanchas de velocidad y sistemas de propulsión ajustables en calado o retractables al interior del casco. Se utiliza el mismo principio de hélice empujando lateralmente para los ‘bow thrusters’ de maniobra de barcos mayores. Se inventaron hélices plegables para veleros. Se diseñaron hélices de paso variable y paso controlable para ajustarlas adecuadamente a distintos rangos de velocidad o carga del barco. Todos hasta ahora utilizan la hélice como elemento que ha demostrado ser el sistema de propulsión más eficiente a relativamente bajas velocidades. Porque si de velocidades altas se habla, esto es mayor a los 20 o 22 nudos y más, estimo que la turbina de chorro de agua es el elemento más moderno para conseguir no solo velocidad sino maniobrabilidad con seguridad.

4.6 DISEÑO EN 3D DE LA PALA.

Para el diseño en 3D de la pala y del buje de esta hélice se utiliza en programa CATIA V5.

Para ello como ya se ya se ha desarrollado en apartados anteriores, es necesario saber las propiedades del buque para el que se está diseñando la hélice. Éstos los facilita el cliente.

DATOS DE ENTRADA DEL BUQUE.	
-Potencia del motor (cv)	1200
-Rendimiento mecánico	0.95
-Coeficiente de servicio	0.98
-Revoluciones del motor(rpm)	450
-Relación de reducción:	3078
-Número de palas de la hélice	5
-Velocidad de proyecto (nudos)	11.5

Con estos datos, el cliente define los parámetros de la hélice.

RESULTADOS DE CÁLCULO	
-Diámetro de la hélice(mm)	2120
-Paso(mm)	1992
-Nº de palas	5
-Área/disco	0.7

Junto con estos datos de la hélice se entrega un plano en el que se especifican medidas del buje, y secciones desarrolladas a determinados diámetros ya establecidos.

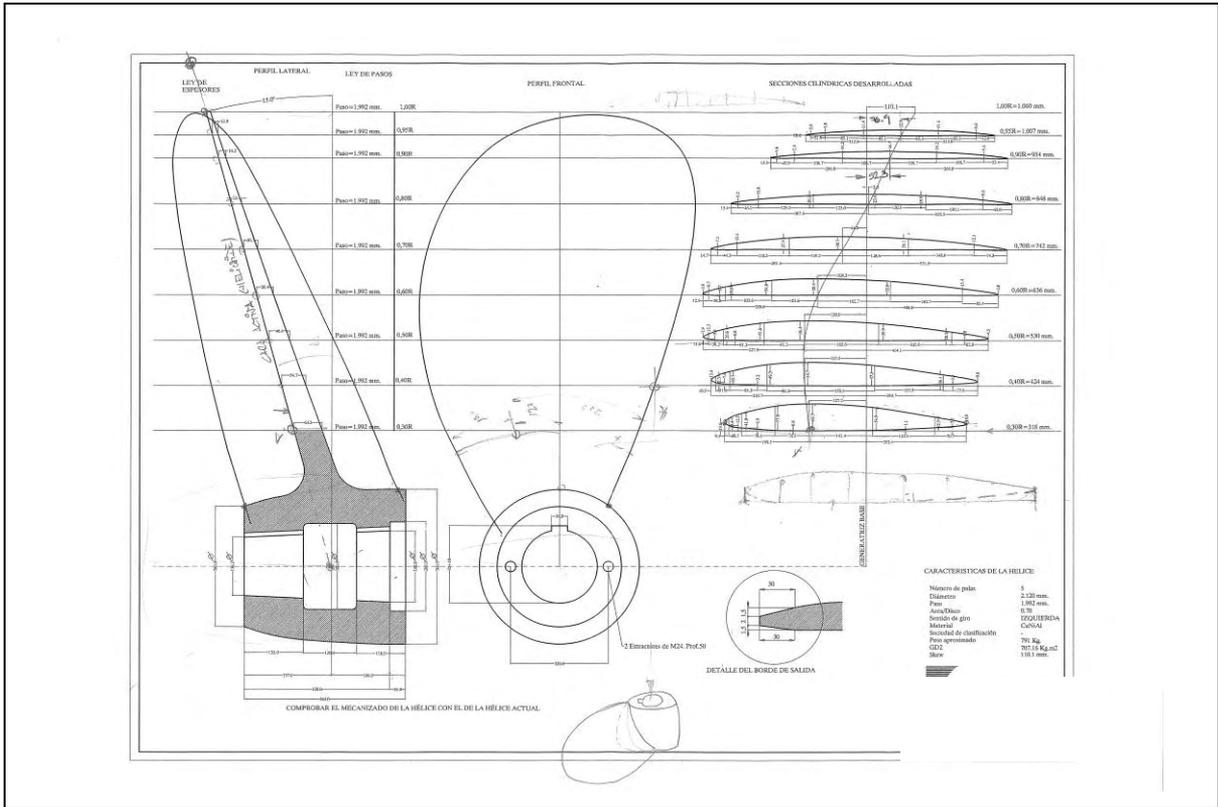


Figura 4-1. Plano de formas de la hélice.

Con estos datos ya somos capaces de diseñar en 3D la hélice. La empresa IDEC ha desarrollado un modelo CATIA parametrizado de manera que de una manera simple y rápida se puede realizar el modelo de cualquier hélice que el cliente exija.

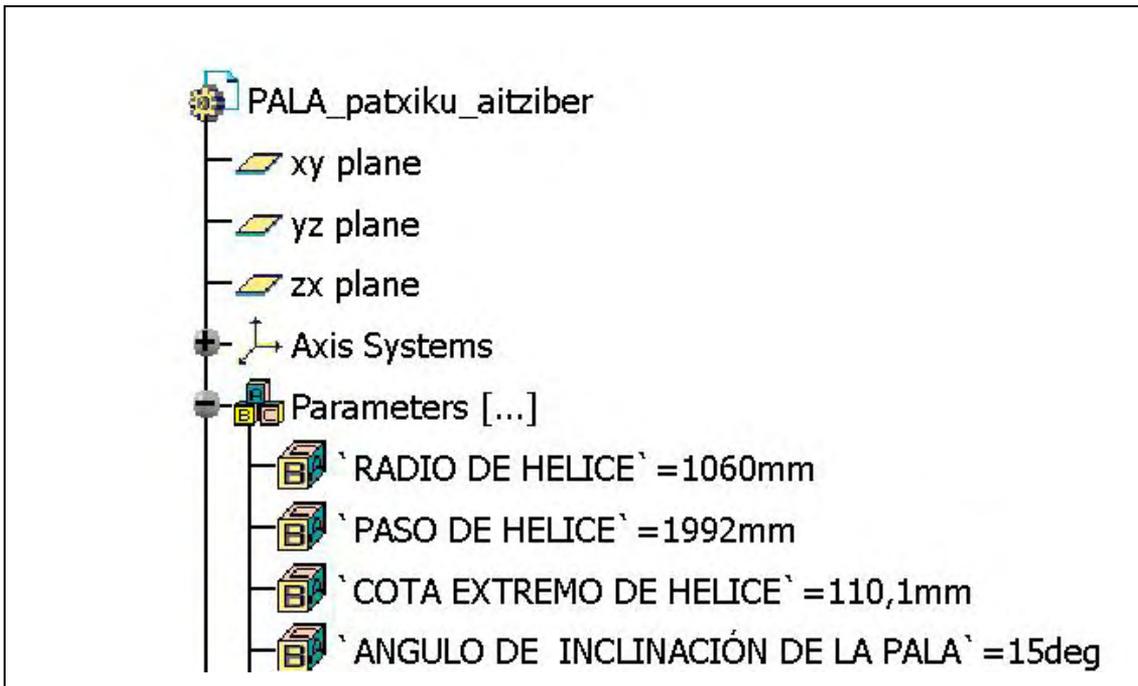


Figura 4-2 Parámetros de entrada.

Dibujar las secciones indicadas en los planos correspondientes.

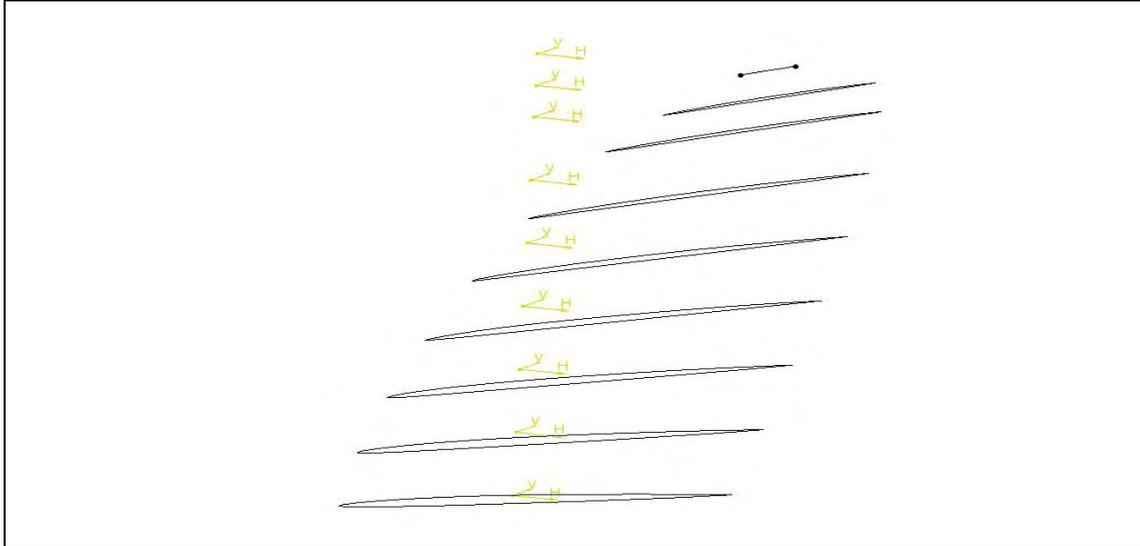


Figura 4-3 Secciones de pala planas.

Proyectar.

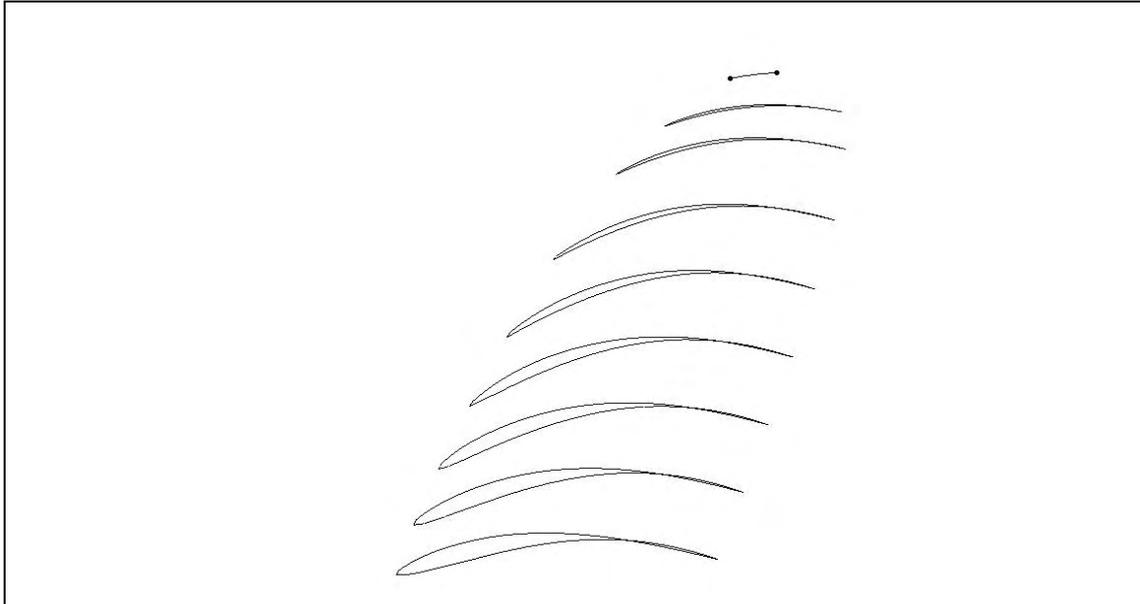


Figura 4-4 Secciones de pala proyectadas.

Para cerrar las superficies, basta con utilizar estas secciones y generar unas espinas de cierre

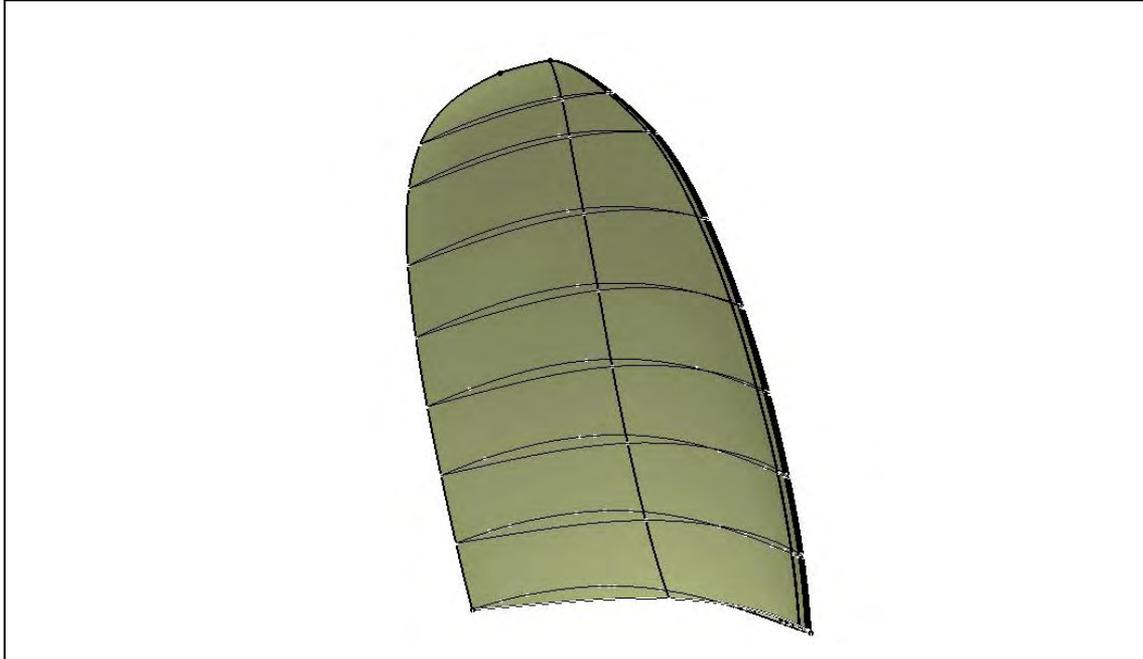


Figura 4-5 Construcción de superficies.

La unión de la pala al buje es diseñada de manera semejante a una cola de milano macho que se encastrará en el buje de aleación metálica previamente mecanizado en hembra. Se cierran las superficies y se genera el sólido.

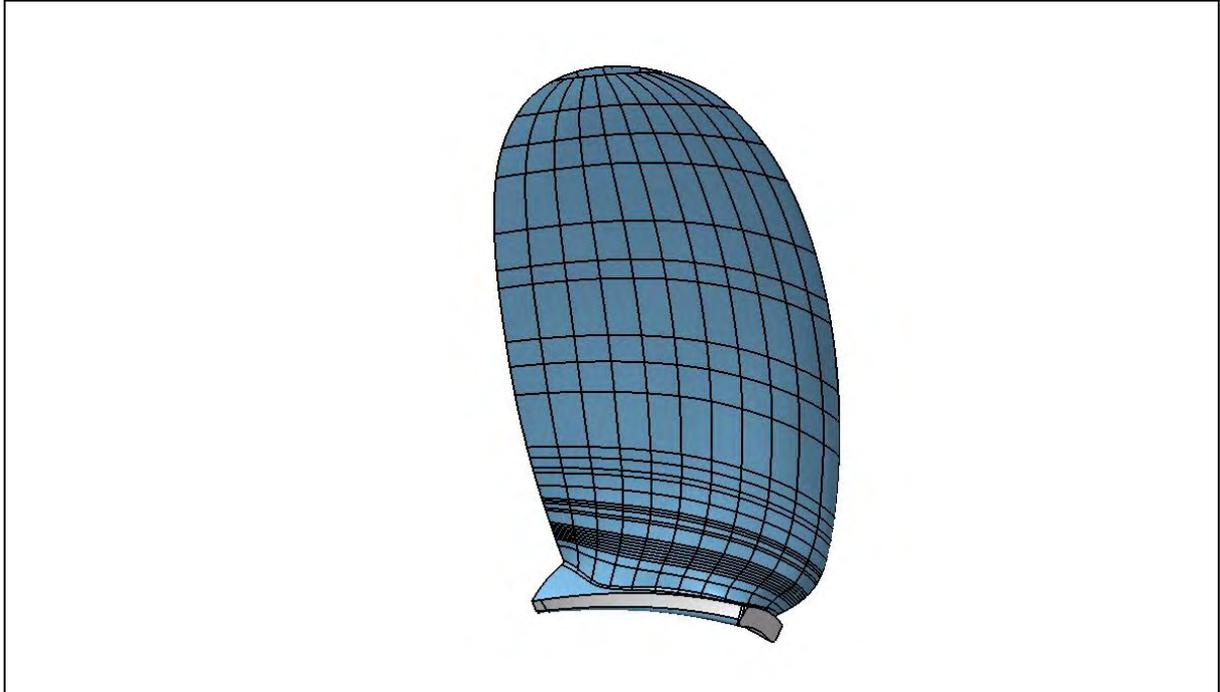


Figura 4-6 Detalle del sólido de la pala con la cola de milano.

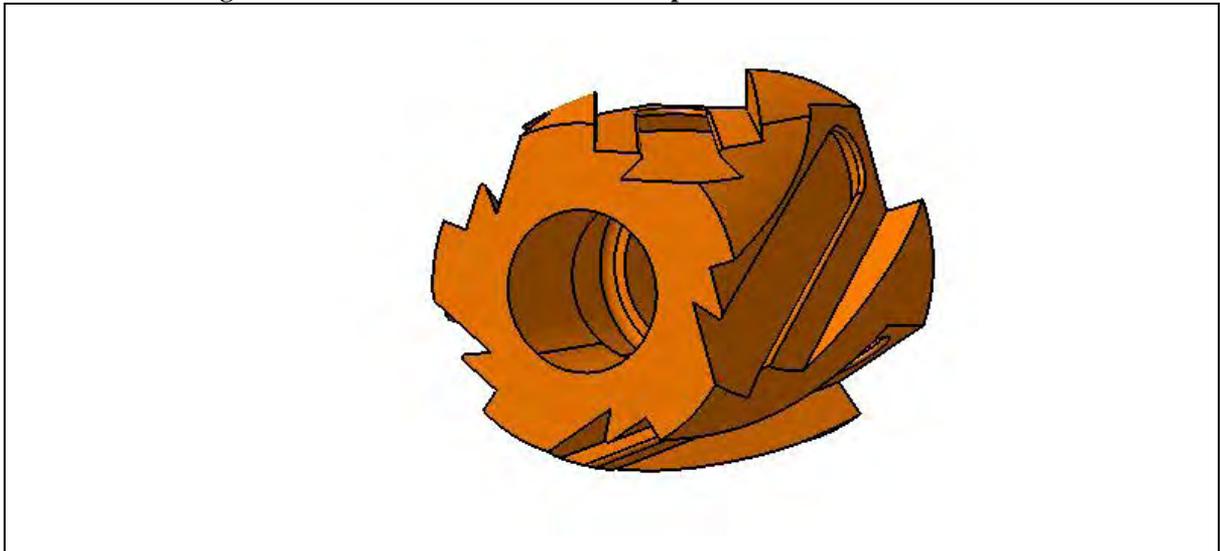


Figura 4-7 Detalle del buje metálico con las cinco guías mecanizadas.

La pala de la hélice que se propone es de compuesto, no es maciza como lo es la de cunial. Por lo tanto para rellenar el hueco se le va a introducir un núcleo de espuma de poliuretano durante el moldeo. Éste se diseña manteniendo unos largueros de fibra de carbono que dividen la pala en tres zonas, borde de ataque, cajón central y borde de salida.

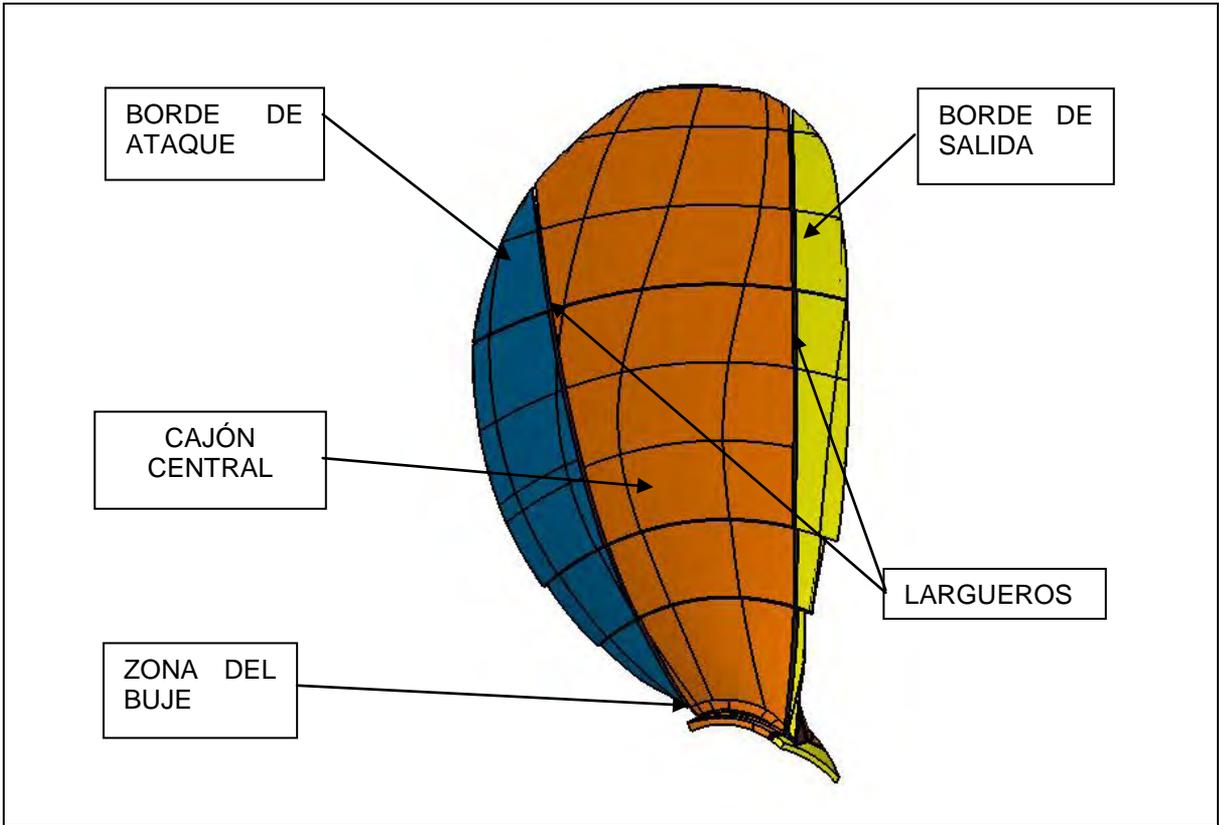


Figura 4-8 Detalle del núcleo de poliuretano diseñado.

5 DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UTILLAJE.

5.1 INTRODUCCIÓN.

Dada la inversión que hay que realizar en la fabricación de un molde de RTM, la baja producción de cada pala y la cantidad de pedidos de distintas hélices que se prevén, se opta por realizar el diseño de un molde de RTM en material compuesto.

5.2 ASPECTOS A TENER EN CUENTA EN EL DISEÑO DE UTILLAJE RTM.

En el diseño de este tipo de utillaje es importante tener en cuenta que en un futuro las hélice que obtengamos como pedido, no tienen por qué ser de las mismas dimensiones ni tan siquiera de la misma orientación de giro. Por ello durante el diseño hay que procurar tener esa visión de futuro para realizar un diseño polivalente.

El molde es la herramienta que da la forma final de la pieza. Los objetivos finales de un molde de RTM son los siguientes:

- Rellenar la preforma de resina antes de que comience la gelificación.
- Evitar que existan zonas sin impregnar.
- Evitar la formación de burbujas (<1%).

El proceso de RTM debe resultar económicamente rentable desde el punto de vista de tiempos y elección de equipamiento.

El molde debe estar diseñado no sólo para dar forma a la pieza, sino también considerando otros aspectos como, entradas de inyección, salidas de aire, permeabilidad, curado, desmoldeo...etc.

Los moldes metálicos, como es nuestro caso, se usan para producir series grandes, mientras que para pequeñas series se utilizasen moldes no metálicos.

Los factores a considerar cuando se diseña un molde son los siguientes:

- Número de piezas.
- Expectativa de vida.
- Eficacia de costes.
- Cerrado de molde.
- Perfecto ajuste entre caras del molde.
- Rigidez, deflexión mínima del molde durante las operaciones de:
 - Cerrado.
 - Inyección.
 - Apertura.

- Resistencia al calor.
- Calor desprendido por la reacción exotérmica de curado de resina.
- Calor aportado para el curado.

Al final, el diseño de moldes tiene como objetivo definir el numero de entrada y salidas y su localización, temperaturas del molde o de la forma. Para ello, hay que tener en consideración los siguientes aspectos:

- La temperatura de degradación de la resina limita la temperatura del molde.
- Capacidad y presión de inyección que tiene la máquina.
- El tiempo de gel de la resina limita el tiempo de llenado.
- La presión de cierre no debe exceder la presión de compactación en el preformado.

5.3 PASOS EN EL DISEÑO.

5.3.1 ESTUDIO DE PIEZA-PRIMER BOCETO DE ÚTIL.

Hay que estudiar la forma de la pieza para poder saber cuál será la mejor disposición de la misma en el molde y qué tipo de molde se va a realizar.

Hay que tener en cuenta el laminado de la pieza ya que el moldeo se realiza “in situ” sobre el mismo molde. Por ello se opta por diseñar el molde en horizontal y en dos mitades, una define la cara activa y otra la pasiva. También en este caso se encuentran contrasalidas de molde en la unión al buje. Se entiende por contrasalidas aquellas zonas que presentan un ángulo negativo con respecto a la dirección de desmoldeo de las huellas, de manera que para evitarlo se deben diseñar unos tacos que definan la zona del buje. Estos tacos sí que se podrán desmoldear cuando la pieza esté fabricada.

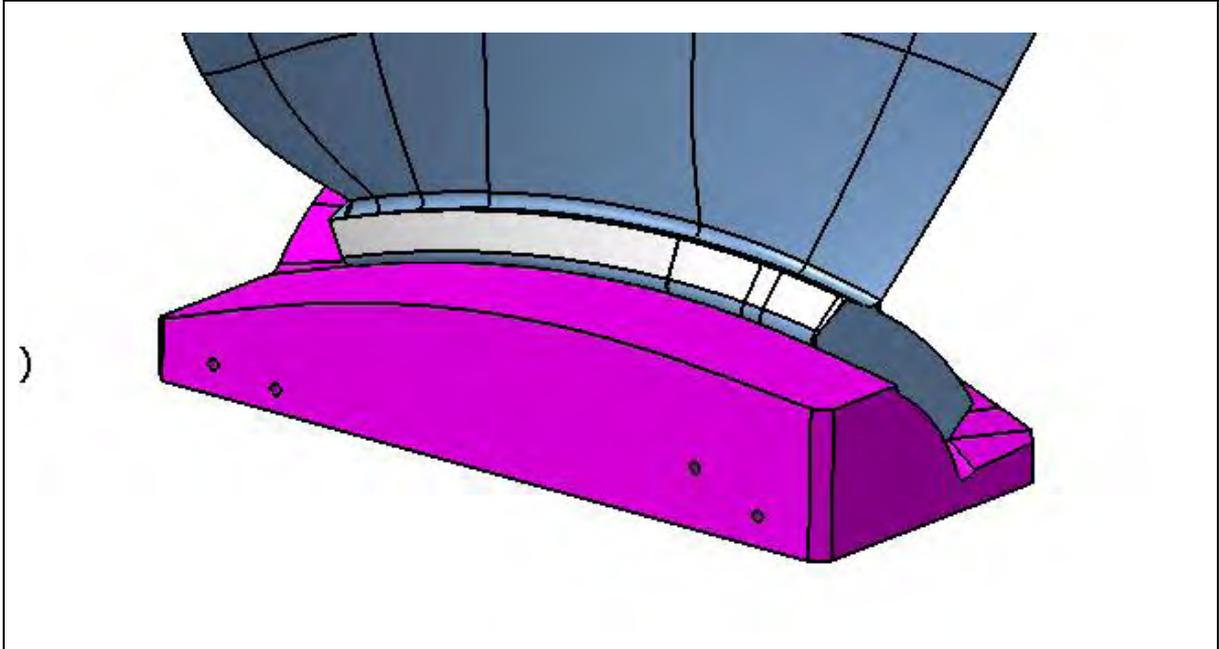


Figura 5-1. Detalle de los machos desmontables.

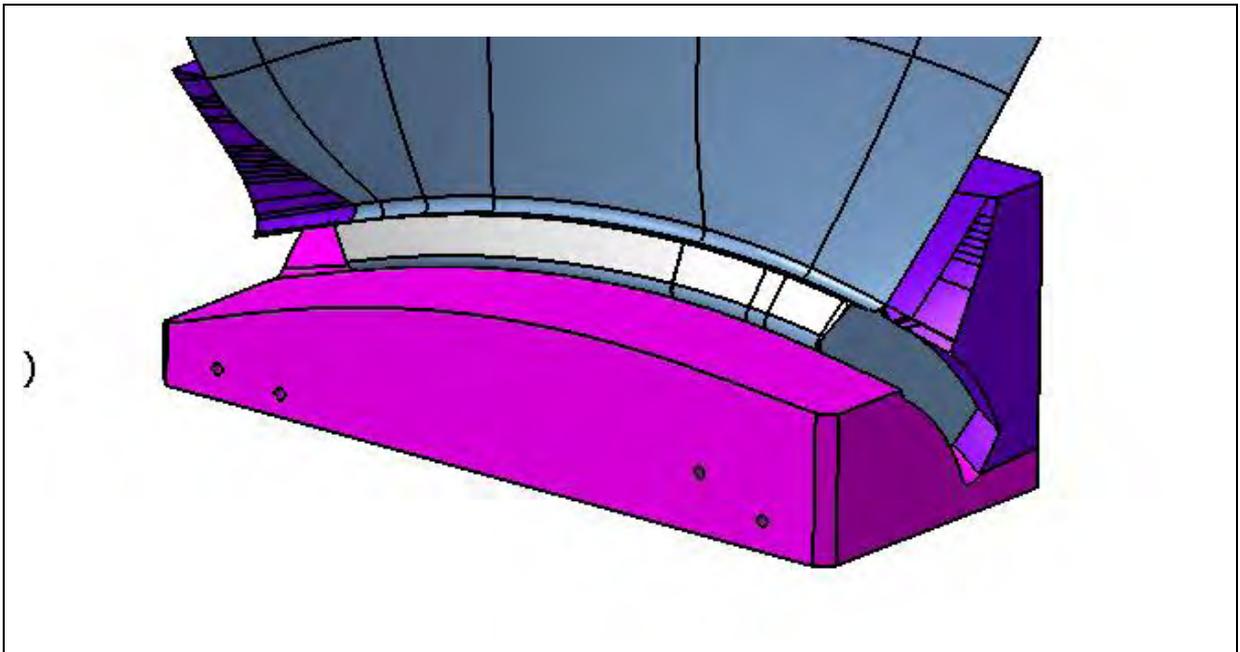


Figura 5-2 Detalle de los machos desmontables.

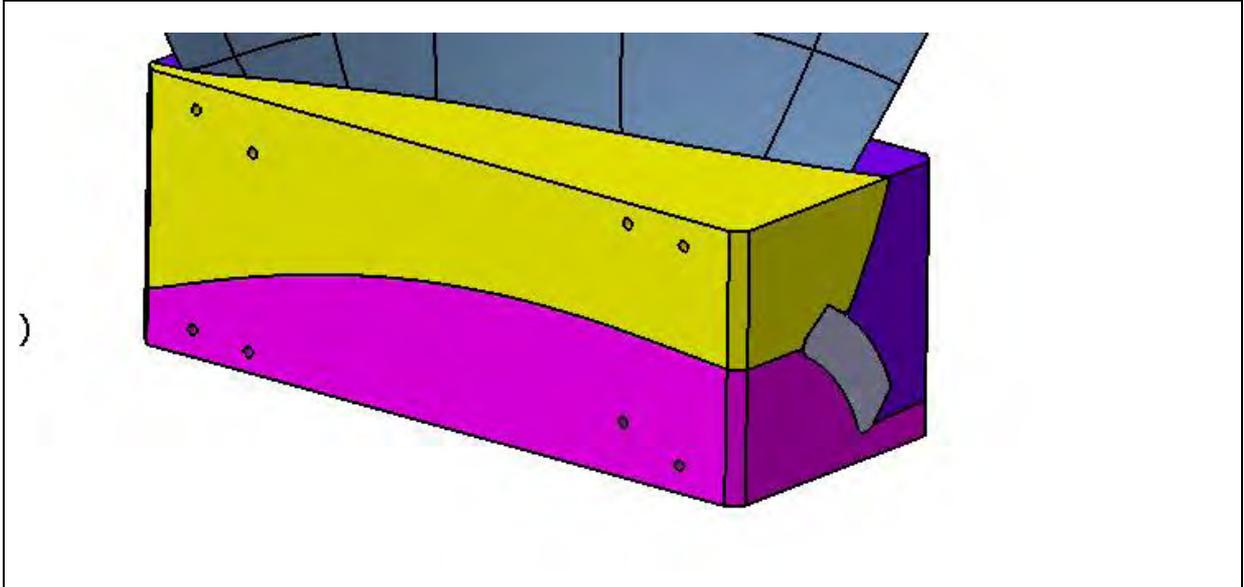


Figura 5-3 Detalle de los machos desmontables.

Ha de diseñarse la separación de los moldes teniendo en cuenta el mecanizado, y que cuanto menos pronunciado sea el desnivel en la superficie de cierre, mayor estanqueidad de útil conseguiremos. Hay que recordar que este tipo de moldes de RTM exigen vacío.

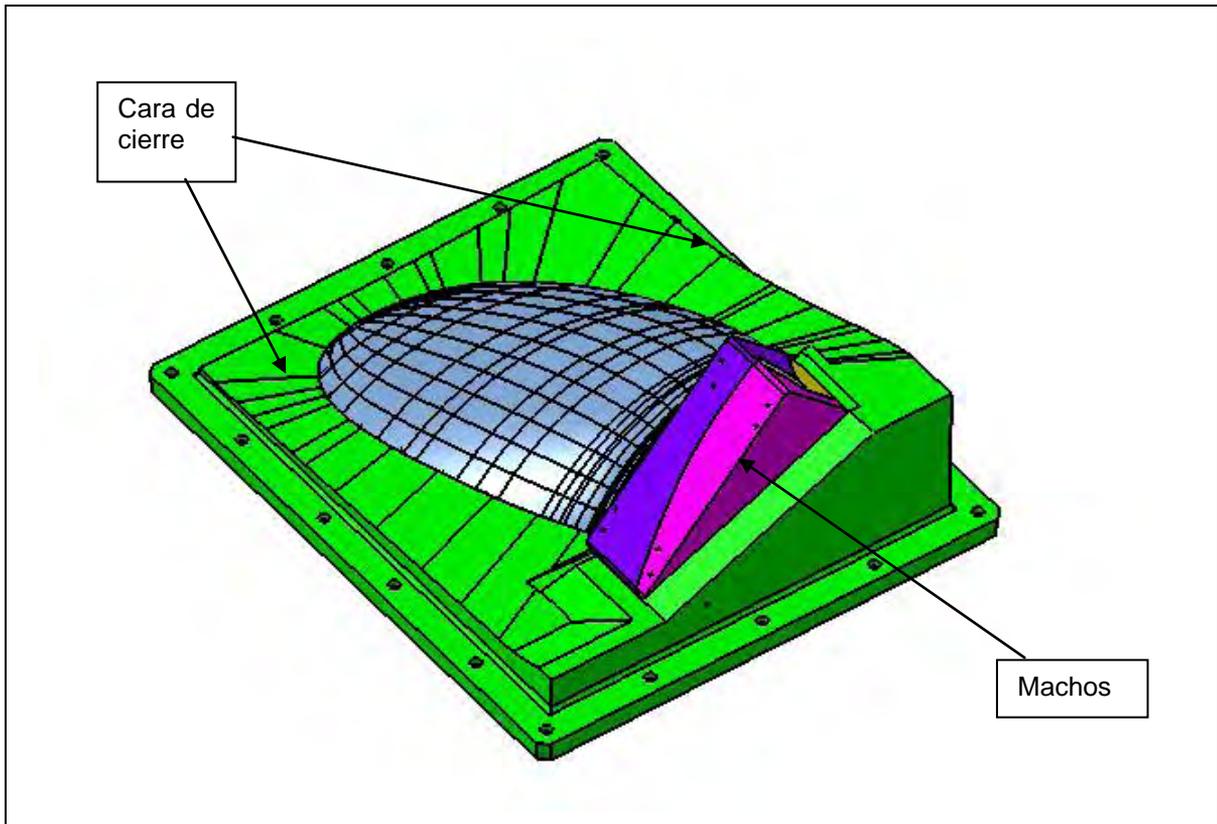


Figura 5-4 Detalle de la hembra.

5.3.2 DISEÑO DEL SELLADO.

Es necesario asegurarse de que la resina permanece en el molde sin salirse impregnando la preforma. La viscosidad de la resina disminuye al fluir a través de una preforma calentada, por ello es necesaria alta integridad en el sellado para prevenir la salida de resina. El sellado puede combinarse con vacío.

Métodos de sellado del molde:

-Sellado con elastómeros: En las siguientes figuras se muestran los métodos típicos de sellado de moldes con elastómeros:

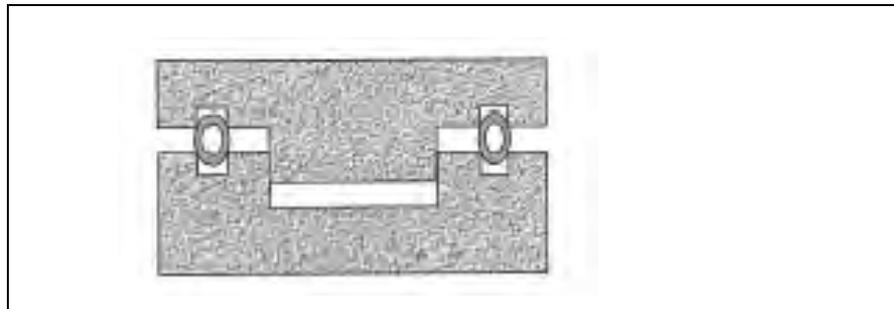


Figura 5-5 Detalle de cierre con elastómeros.

Estos tipos de sellado anteriores son muy comunes y funcionan bastante bien con resinas de baja viscosidad como son poliéster, viniléster o epoxis especiales de baja densidad. El sellado se introduce en ranuras practicadas en el molde.

-Sellado con resina:

- El sellado se forma con la resina sobrante de llenados anteriores.
- Las caras de ambos moldes deben ajustar perfectamente.
- Este método se usa menos en este tipo de moldes de RTM.

Este método de sellado tiene más incertidumbre porque necesita un control perfecto del curado de la resina, y del sistema de calentamiento para el ajuste de tiempos.

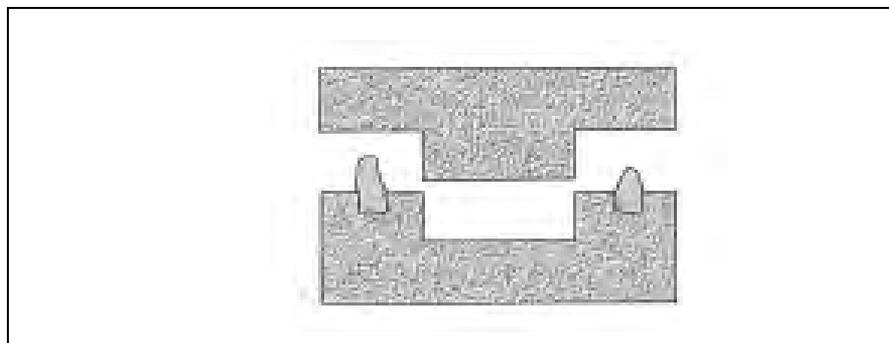


Figura 5-6 Detalle de cierre con resina.

- Sellado con anillo de apriete:
- La preforma debe ser más larga que la pieza final.
- El anillo de apriete actúa de barrera al flujo de resina.
- Es necesario controlar la presión.
- La rotura de fibras puede dañar el molde.
- Silicona, para aplicaciones a altas temperaturas.

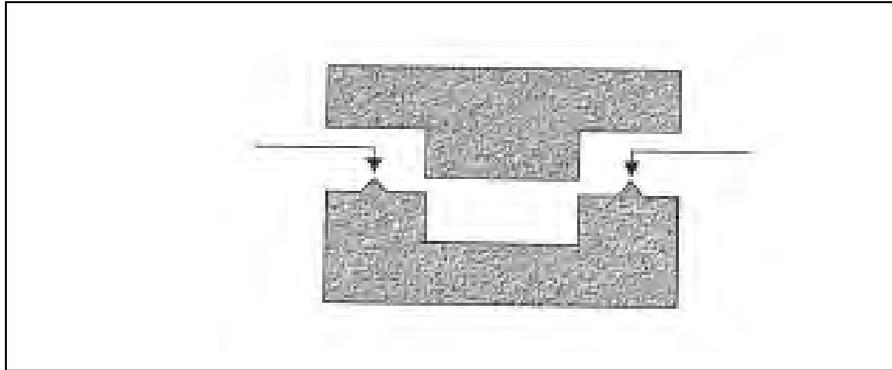


Figura 5-7 Detalle de cierre con anillos.

5.3.3 DISEÑO DE ORIFICIOS DE INYECCIÓN Y VENTILACIÓN.

Los orificios de ventilación deben estar localizados en las zonas cercanas a las últimas áreas de llenado.

A la hora de elegir la localización de los orificios de inyección y ventilación deben considerarse los siguientes aspectos:

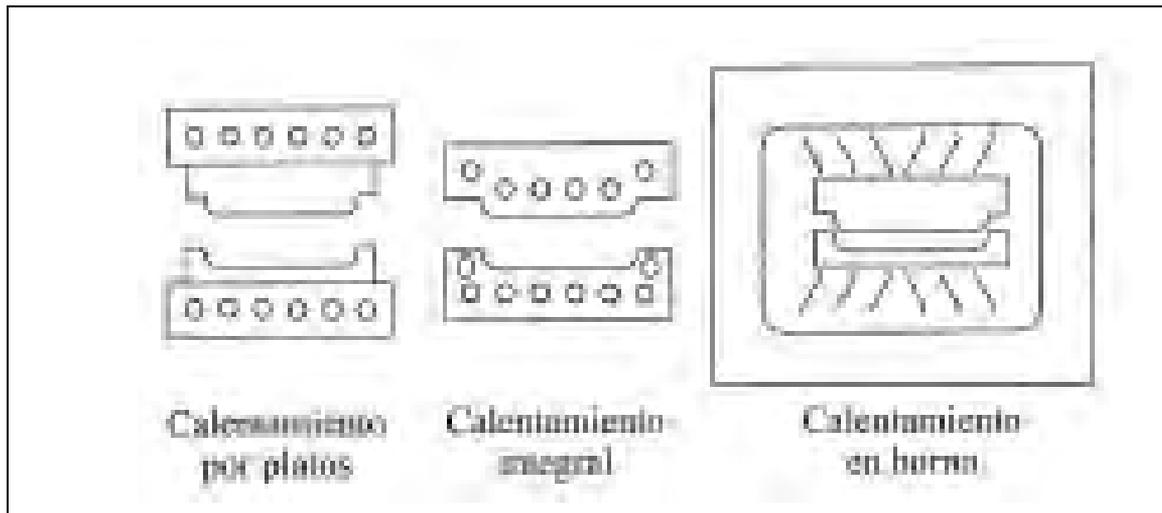
- Geometría de la pieza.
- Permeabilidad de la preforma.
- Tiempo de gel de la resina. Para un curado rápido de la resina son necesarios varios puntos de inyección.
- Tiempo deseado para el ciclo de moldeo.
- Eliminación del aire en el interior de la preforma.

Cuando se diseña un molde y se decide la localización de los orificios de inyección y ventilación, es importante tener en cuenta todo esto.

Las últimas áreas en llenarse se pueden identificar mediante simuladores por ordenador del proceso de llenado del molde. Estas simulaciones están basadas en el método de los elementos finitos.

5.3.4 DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE CALENTAMIENTO/ENFRIAMIENTO.

Los tres métodos más comunes para el calentamiento de moldes de RTM son los siguientes:



Calentamiento de platos: en este método el molde se mantiene en una prensa y lo que se calienta son los platos de la prensa. Este método requiere transferencia de calor por conducción al molde, por ello puede ser necesario mucho tiempo para calentar el molde. La ventaja es que no es necesario realizar mecanizados especiales al molde.

Calentamiento integral: Este método es el más común. Al moldear se le mecanizan unos conductos por los que circula agua o aceite caliente. El espaciado entre los conductos debe ser uniforme para garantizar un calentamiento o enfriamiento uniforme. Este método permite mucho más control que el método anterior.

Horno: El molde completo se introduce en un horno. Este tipo de calentamiento es el que mejor se ajusta a nuestras necesidades, ya que calefactando la carcasa de cierre, que será común para distintos moldes de hélices, se ahorran costes de utillaje.

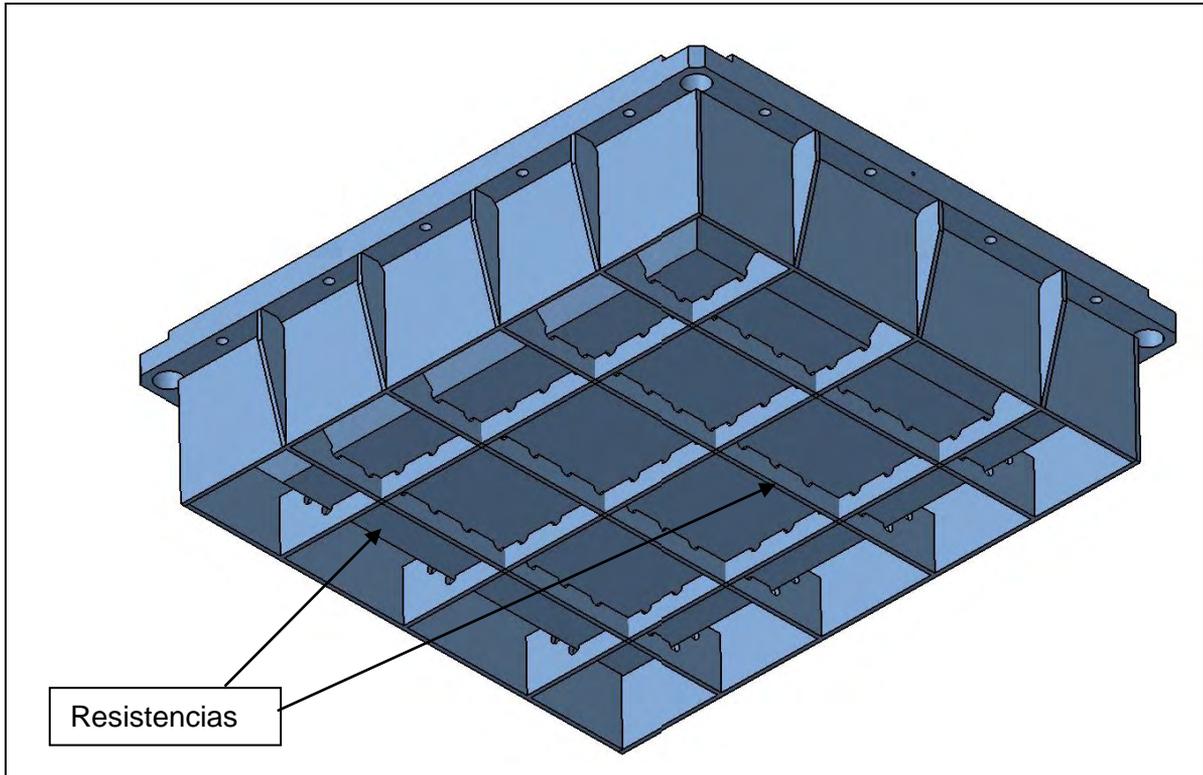


Figura 5-8 Detalle del molde para su calefactado.

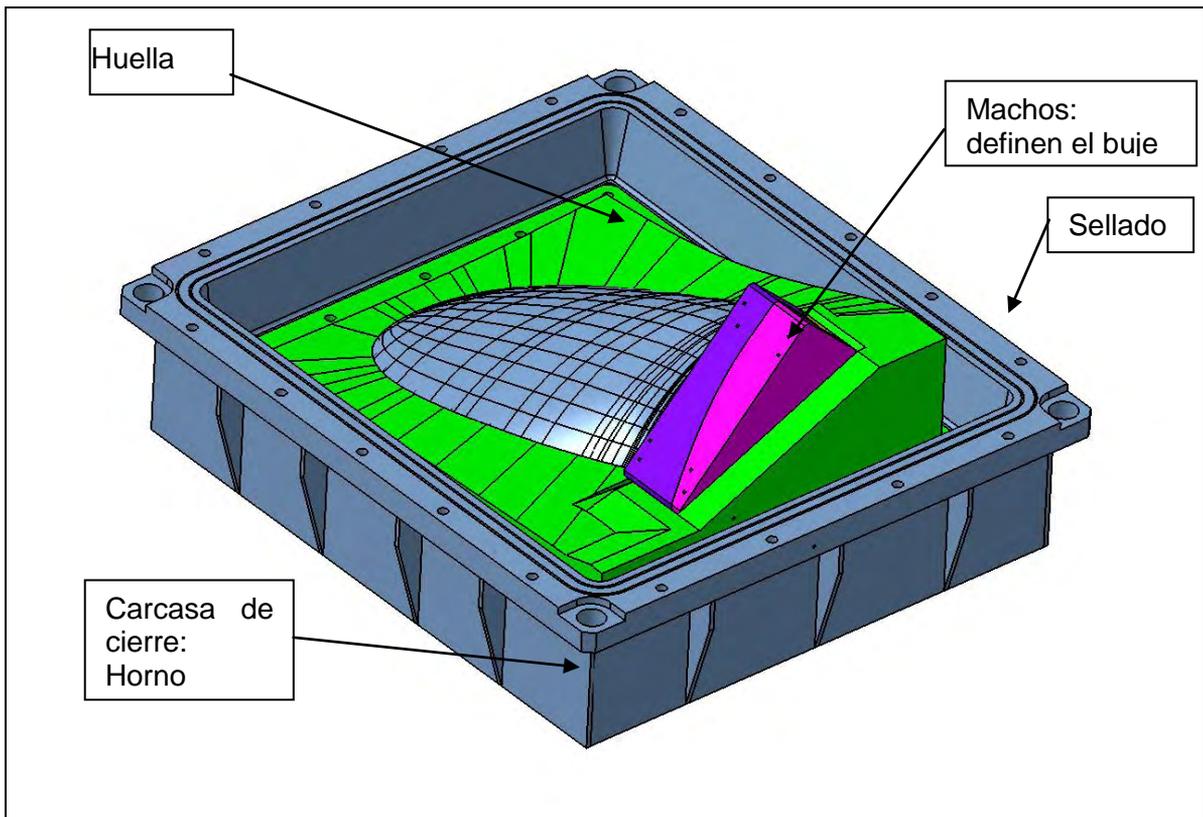


Figura 5-9 Detalle del molde.

Las resistencias que se utilizan para calefactar la carcasa de cierre tienen las siguientes características:

- Calentamiento rápido.
- Limitaciones geométricas: los cartuchos son planos por lo que no siempre se pueden ajustar a la geometría de cualquier molde.
- Extremadamente lento el enfriamiento.

5.3.5 DISEÑO DEL CIERRE Y DELCENTRAJE ENTRE HUELLAS.

Los métodos más comunes de cerrado son:

- Gatos en C.
- Cerrado perimetral con tornillos.
- Cerrado por bolsa de aire.
- Cerrado por presión neumática.(30-50TN)
- Cerrado por presión hidráulica (>100 TN)

En la elección del sistema de cerrado hay que considerar los siguientes aspectos:

- Área superficial de pieza.
- Presión de inyección.
- Tiempo de curado del ciclo.
- Requerimientos superficiales, apariencia.
- Consideraciones sobre la forma y el espesor.

En este útil se utilizará el cierre con tornillos ya que debido a la rigidez de la estructura no se cree que vayan a surgir problemas de deflexión del molde ni deterioro, y este tipo de cierre es mucho más barato que los otros.

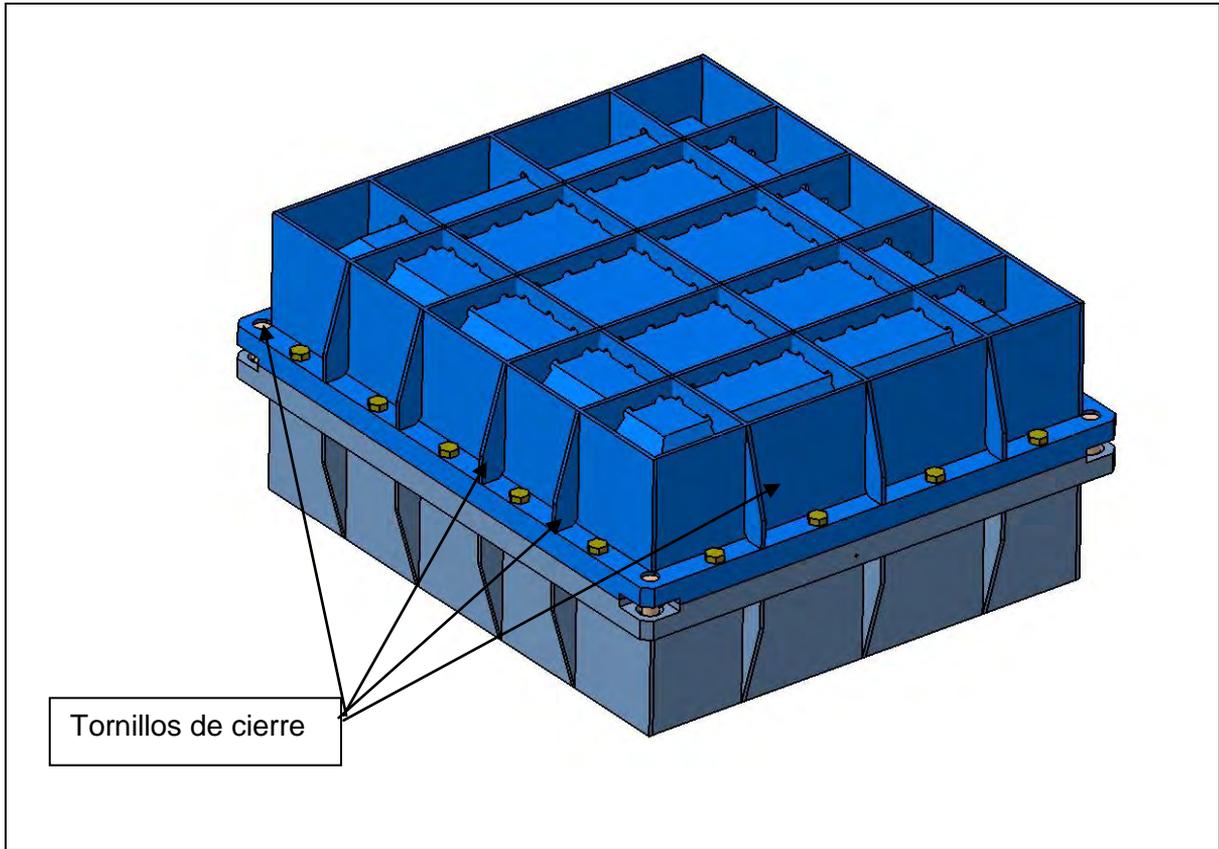


Figura 5-10 Cierre de molde y guiado.

El centraje más común, es utilizar salientes de guiado que hacen que las dos partes permanezcan sin moverse.

5.3.6 ELECCIÓN DE LOS MATERIALES PARA UTILLAJE.

Los materiales más comunes en este tipo de moldes son: acero, moldes electro-niquelados, aluminio, laminados y materiales moldeados en masa. Los criterios más importantes a la hora de la elección del material son: el coste, las partes que lo componen, conductividad térmica (CT), coeficiente de expansión térmica (CET), durabilidad, calidad superficial y tolerancia a la temperatura. En la siguiente tabla se compara cada material en relación a cada factor., "10" es lo más alto.

Material	Coste	Partes/molde	Ct	CET	Durabilidad	Calidad sup.	Temp.
Corte coloc	10	10	5	4	10	10	10
Proy. Directa	9	7	5	3	7	10	9
Estampado	8	5-8	10	9	6	8	8
Braiding	5	2-4	3	5-10	4-5	6	4
Tec. Textiles	4	1-3	2	4-8	3	5	3

En la industria, el objetivo prioritario es el económico. Por ello, en la selección del molde el coste debe estar equilibrado con la durabilidad. Estos dos factores están afectados por el tiempo que dura el ciclo, número de piezas al año, y el propio material del molde. La siguiente gráfica muestra la durabilidad en función del coste del molde, y se aprecia como la durabilidad es inversa al coste.

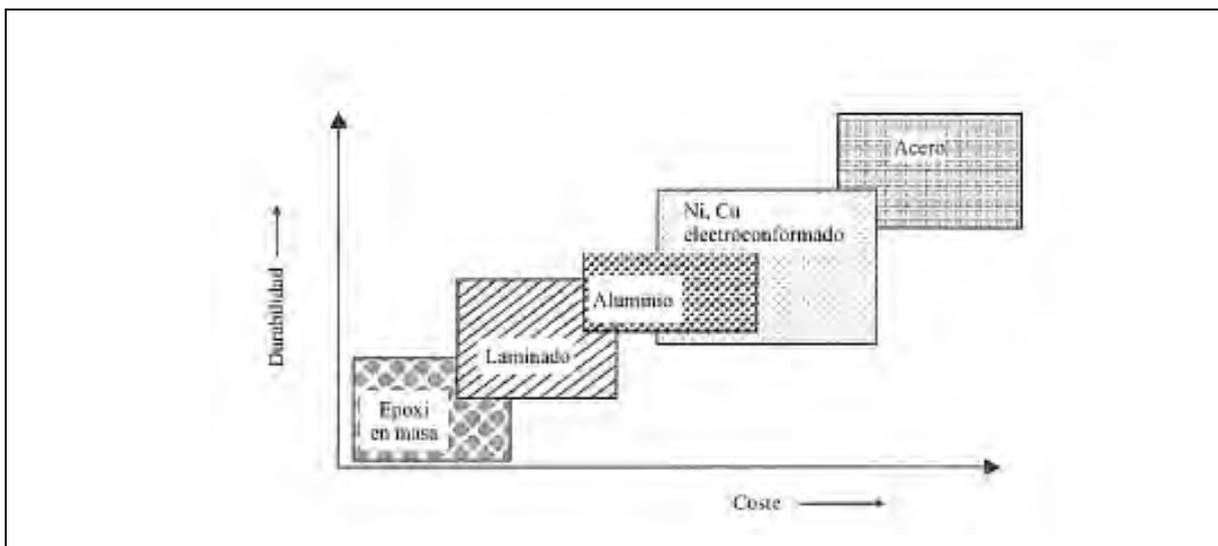


Figura 5-11 Materiales en función del coste y durabilidad.

Los factores más importantes a la hora de seleccionar un material son las propiedades térmicas del material: conductividad térmica y expansión térmica.

-Conductividad térmica: Es importante porque controla los ratios de calentamiento y enfriamiento del molde. Esa propiedad determina cómo de deprisa se puede llevar la resina hasta la temperatura de curado, y cómo de deprisa el calor generado por la reacción exotérmica de curado de la resina puede ser evacuado del molde.

-Expansión térmica: esta propiedad es importante porque determina la dilatación y las dimensiones finales de la pieza.

	VIDRIO-EPOXI	ACERO	ALUMINIO	NÍQUEL
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA. W/CM ² °C	0.00168- 0.00448	0.4732	1.2144- 2.1776	0.5863
EXPANSIÓN TÉRMICA MM/MM°K	11X10 ⁻⁶ 35X10 ⁻⁶	12X10 ⁻⁶	25.5X10 ⁻⁶	13.7X10 ⁻⁶

6 CÁLCULO DE LA HÉLICE (FEM).

En el siguiente apartado se presentan los cálculos realizados en este proyecto.

La estrategia de cálculo de la hélice de material compuesto, en estructura de sándwich, con fibra de carbono y resina epoxy y núcleo de poliuretano, es la siguiente:

- 1.- Cálculo de la hélice original, fabricada en material metálico, de aleación CUNIAL.
- 2.- Cálculo de hélice en material compuesto, fibra de carbono y resina epoxy.

La única forma de comparación posible entre los comportamientos de ambas palas es el análisis por Elementos Finitos de ambas, ya que el método tradicional de cálculo para hélices de barco, establecido por la Sociedad Clasificadora, sólo es válido para materiales metálicos e isotrópicos. La Sociedad Clasificadora es un órgano oficial encargado de la certificación de buques. Sociales conocidas son: OMI, IACS, Lloyd's Register of Shipping, Bureau Veritas, etc.

Por lo tanto, se calculará la hélice de CUNIAL, primero por el método tradicional para obtener unos datos orientativos, y después por FEM, para:

- Obtener unos valores más fiables.
- Comparar el comportamiento de la hélice metálica con la de material compuesto.
- Obtener valores de deformaciones que no ofrece el método tradicional.
- Los datos que nos aporte el cálculo, se corroborarán con los datos de los ensayos que se realizarán a posteriori.

6.1 PREPARACIÓN DEL MODELO-MALLADO.

Una vez finalizado el diseño del modelo CATIA, se importa la geometría en el programa de Cálculo por Elementos Finitos (FEM). El programa utilizado es el PATRAN.

6.1.1 HÉLICE CUNIAL.

Se parte de la pala de cunial modelizado con elementos 3D a los que se les aplica las propiedades de la aleación CUNIAL. Los datos que nos aporte esta pala se utilizarán a modo de comparación con la pala de FC.

6.1.2 HÉLICE DE FIBRA DE CARBONO.

En la modelización se han hecho una serie de aproximaciones, que para poder entenderlas es conveniente explicar las tres partes en las que se separa la hélice: la zona central, que es la parte en la que se encuentra el cajón central y las 2 zonas que los rodean, que están compuestas por las dos superficies que están en contacto con el agua.

En la zona central, se han realizado una aproximación para simplificar la complejidad de la pala. En esta parte, hay un núcleo de poliuretano que no se ha modelizado. Esto se hace así ya que el núcleo de poliuretano realiza en mismo efecto que si la pala estuviera hueca, el núcleo de poliuretano no aporta ningún tipo de rigidez a la pala y ni tan siquiera recibe carga.

Como se acaba de comentar, los elementos que se han utilizado para construir la malla son shells. Esta malla está basada en la superficie que se ha importado del CATIA. Se ha realizado un mallado tipo paver (no isométrico). Este tipo de mallado no es el más adecuado ya que provoca que muchos de los elementos sean triangulares y con un alto nivel de alabeo pero dada la complejidad de la superficie ha sido imposible evitarlo. No obstante se a procurado que en la medida de lo posible la pala estuviera mallada con isomesh para que los datos de estos análisis sean lo más reales posibles.

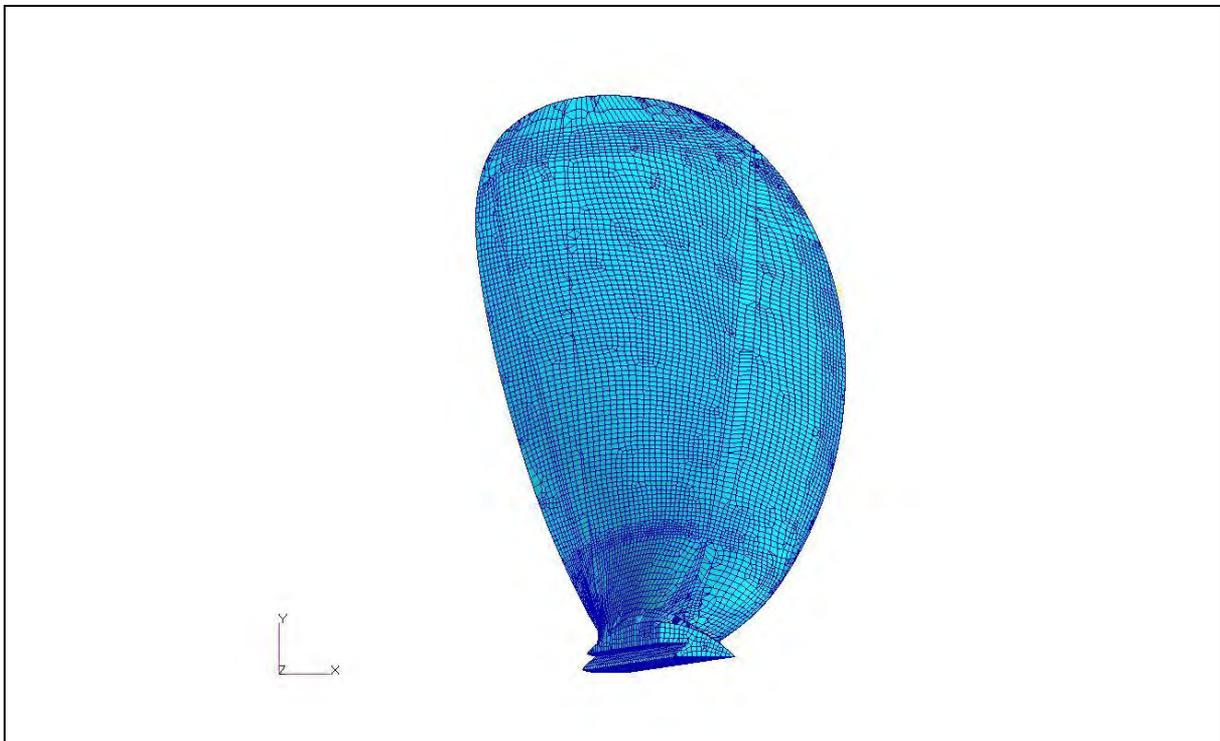


Figura 6-1 Detalle del mallado.

Las normales, es decir, la dirección en la que crece el material, se han impuesto en sentido exterior a la pala, mirando al agua. Esto tiene mucha importancia cuando se impongan los laminados a los elementos, ya que el orden de las capas irá en un sentido u otro, según se hayan definido estas normales.

6.2 MATERIALES.

Como se ha expuesto en la página 52 según la combinación de los 3 materiales base, se consiguen distintas combinaciones con sus propiedades y espesores cada una. Se definen ocho materiales compuestos diferentes dependiendo de las diferentes secciones que hay en la pala. En la siguiente figura se puede ver la distribución de los materiales a lo largo de la pala.

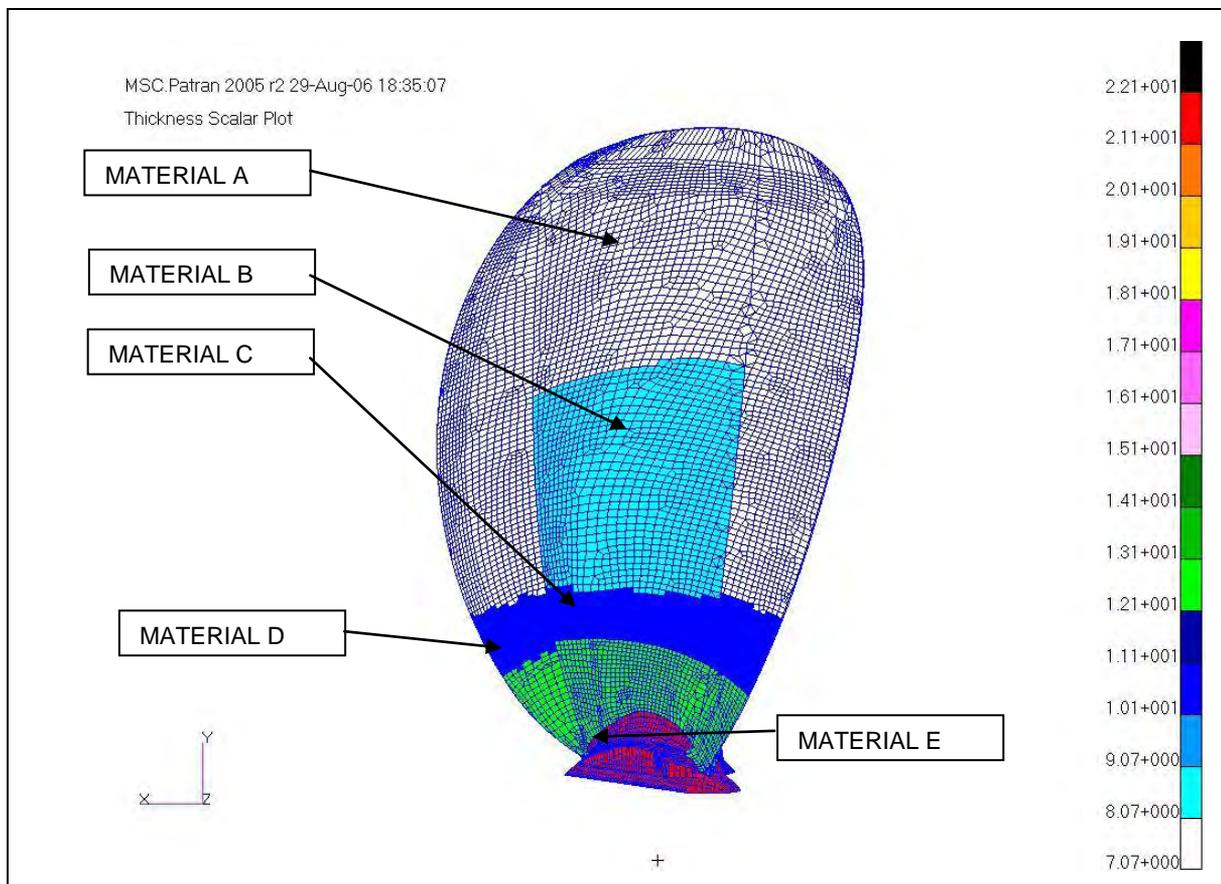


Figura 6-2 Materiales de la cara activa.

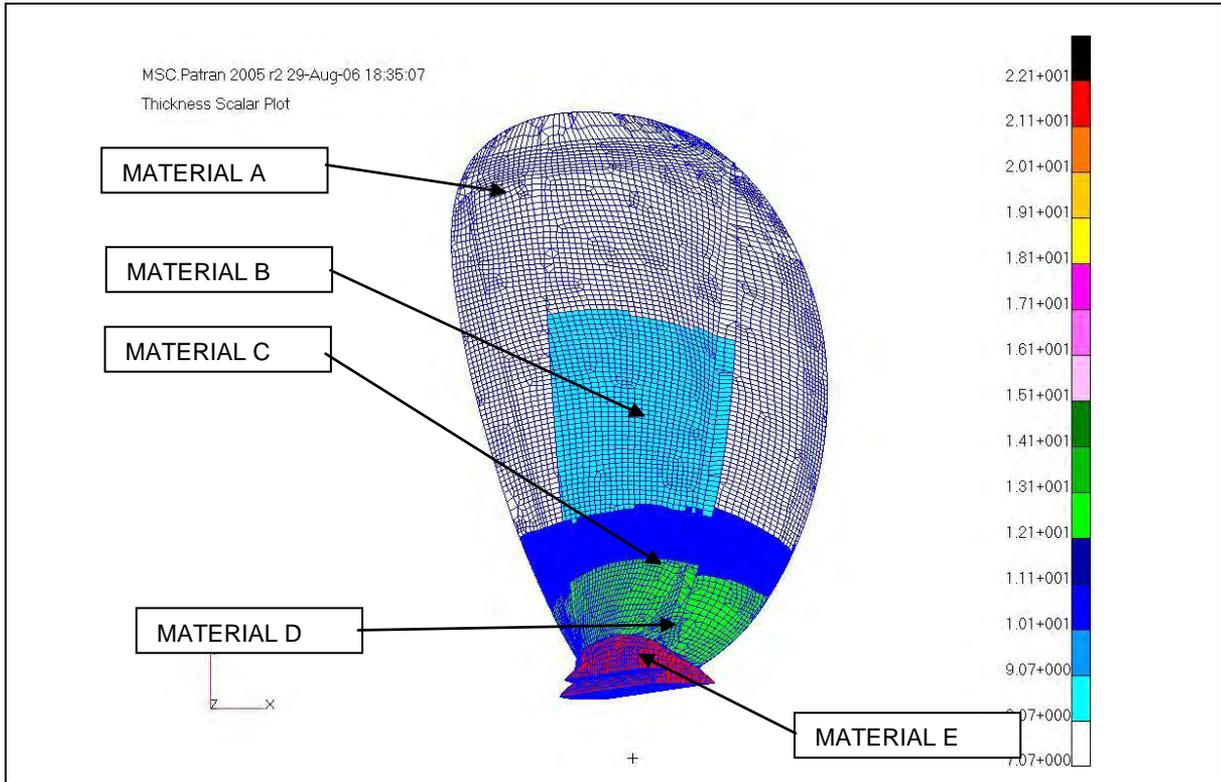


Figura 6-3 Materiales cara pasiva.

Si a la figura anterior se le quitan todas las superficies superiores y las laterales inferiores, se pueden observar los materiales del cajón central de la pala.

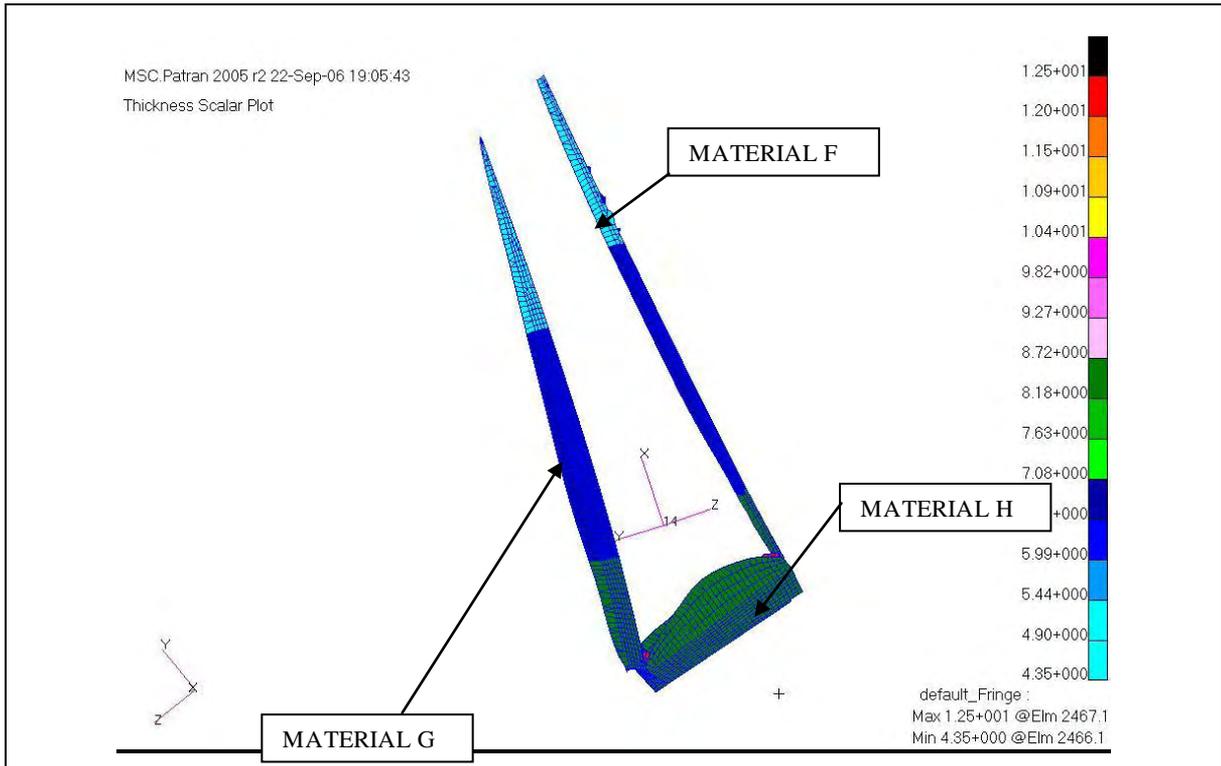


Figura 6-4 Materiales de los Larguerillos.

MATERIAL A:

Tanto en la cara activa como en la pasiva de la pala, se asigna este material en el cajón central a partir de 0.7R. En borde de salida y de ataque a partir de 0.4R hasta 1R. El espesor conseguido gracias a la combinación de los materiales que se indican en el apartado 3.8 es de 7.1mm.

MATERIAL B:

Este empilado de espesor 8.2 mm su utiliza en el cajón central en la zona que se encuentra entre 0.4R y 0.7R.

MATERIAL C:

Este empilado de espesor 10.2mm su utiliza en toda la pala tanto cara activa como pasiva en la zona entre 0.3R y 0.4R.

MATERIAL D:

Este empilado de 12.5 mm de espesor se utiliza en la parte más baja de la pala, es decir en aquellas zonas menores a 0.3R

MATERIAL E:

La zona del buje se aprovecha el empilado que llega de la zona baja de la pala, de manera que cada 2 que vienen de arriba una cubre el núcleo en la zona del buje.

MATERIAL F:

Este empilado se coloca en la zona más externa de los dos largueros, y se consigue un espesor de 4.4 mm.

MATERIAL G:

Este empilado se coloca en la zona que se encuentra entre 0.7R y 0.3R de los dos largueros, y se consigue un espesor de 6.7 mm.

MATERIAL H:

Este empilado se coloca en la zona que se interior de los dos largueros, y se consigue un espesor de 8.7 mm.

En el siguiente cuadro se indica el laminado de las distintas partes de la pala, su orientación y el espesor de laminado conseguido.

POS.	TEJIDO	ORIENTACIÓN	CAJÓN CENTRAL				BS/BA				LARGUEROS		
			MAT D	MAT C	MAT B	MAT A	MAT D	MAT C	MAT A	MAT A	MAT F	MAT G	MAT H
1	X	0°	2	2	2	2	2	2	2	2			
2	X	0°	3	3	0	0	3	3	0	0			
3	X	0°	3	3	3	3	3	3	3	3			
4	X	0°	2	2	2	2	2	2	2	2			
5	X	0°	1	1	1	1	1	1	1	1			
6	X	0°	1	1	1	1	1	1	1	1			
7	X	0°	1	1	1	1	1	1	1	1			
8	X	90°	1	1	1	1	1	1	1	1			
9	X	0°	1	1	1	1	1	1	1	1			
10	X	0°	1	1	1	1	1	1	1	1			
11	X	45	1	1	1	1	1	1	1	1			
12	X	0°	1	1	1	1	1	1	1	1			
13	X	0°	1	1	1	1	1	1	1	1			
14	X	0°	1	1	1	1	1	1	1	1			
15	X	90°	1	1	1	1	1	1	1	1			
16	X	0°	1	1	1	1	1	1	1	1			
17	X	0°	1	1	1	1	1	1	1	1			
18	X	0°	1	1	1	1	1	1	1	1			
19	X	90°	1	1	1	1	1	1	1	1			
20	X	0°	1	1	1	1	1	1	1	1			
21	X	0°	1	1	1		1	1					
22	X	-45	1	1	1	1	1	1	1	1			
23	X	0°	1	1	1		1	1					
24	X	0°	1	1	1		1	1					
25	X	0°	1	1	1		1	1					
26	X	90°	1	1	0		1	1					
27	X	0°	1				1						
28	X	0°	1	1	0		1	1					
29	X	0°	1	1	0		1	1					
30	X	90°	1	0	0	0	1	0	0	0			
31	X	0°	1	0	0	0	1	0	0	0			
32	X	0°	1	0	0	0	1	0	0	0			

33	X	45°	1	1	0		1	1					
34	X	0°	1	0			1	0			7	0	0
35	X	0°	1	0			1				4	4	
36	X	0°	1	0			1				4	4	4
37	X	90°	1				1				15	15	15
Espesor (mm)			12.5	10.2	8.2	7.1	12.5	10.2	7.1	7.1	8.2	6.7	5.5

6.3 DATOS DE PARTIDA.

Los datos de partida son los que suministra el cliente:

DATOS DE ENTRADA DEL BUQUE.	
-Potencia máxima del motor(cv)	1200
-Rendimiento mecánico	0.95
-Coeficiente de servicio	0.98
-Revoluciones del motor(rpm)	800
-Relación de reducción:	3.078
-Número de palas de la hélice	5
-Velocidad de proyecto (nudos)	11.5
-Diámetro de la hélice(mm)	2120
-Paso(mm)	1992
-Área/disco	0.7

Tabla 6-1. Tabla de datos de buque.

PREVISIÓN DE PRESTACIONES DE LA HÉLICE PROYECTADA				
Vel.del barco (nudos)	Pot. Absorb.(cv)	Pot. Efect. (cv)	Vueltas de motor (rpm)	Tiro disponible (kg)
0	840	0	618	8431
7.5	942	413	693	8034
8	953	437	702	7970
8.5	965	461	710	7913
9	978	484	720	7843
9.5	992	507	730	7781
10	1007	528	741	7705
10.5	1022	550	752	7636
11	1039	571	765	7563
11.5	1057	590	778	7477
12	1077	609	793	7395
12.5	1065	619	800	0
13	1022	604	800	0
13.5	980	594	800	0

Tabla 6-2 Previsión de prestaciones de la hélice.

6.4 CÁLCULOS.

6.4.1 CASOS DE CARGA.

El caso de carga que se va a estudiar son las cargas hidrodinámicas que sufre la pala.

Las cargas hidrodinámicas se pueden descomponer en dos componentes:

6.4.1.1 Presión del agua sobre la superficie hidrodinámica.

En primer lugar, se calculan ambas componentes por el método tradicional, que es el establecido por la Sociedad Clasificadora.

Se calcula el empuje (Ft) y el par de la hélice (Q):

$$Q = \frac{\text{potencia} * c1 * c2}{n \times \text{vel.giro} / c3}$$

$$1CV = 735W = 735 J / s = 735 Nm / s$$

$$1rpm = \frac{2\pi rad}{60s}$$

Siendo:

C1, un coeficiente del rendimiento mecánico.

C2, un coeficiente de servicio.

C3, un coeficiente de reducción de velocidad.

n, número de palas

Se obtiene que para las distintas potencias y velocidades de giro que se facilitan en la Tabla 6-2, el par máximo que se puede dar es:

$$Q = \frac{840 \times 735 \times 0.98 \times 0.95}{\frac{618 \times 2\pi \times 5}{3 \times 60}} = 5467614 Nmm$$

Esta misma tabla recoge los valores del tiro disponible de la hélice para cada caso. Para el par de 5467614Nmm le corresponde un empuje de 8431Kg.

$$F_{hélice} = 8431Kg = 82708N$$

$$F_{tpala} = \frac{F_{thelice}}{n} = \frac{82708}{5} = 16542 \text{ N}$$

Estas cargas se pueden ven representadas en la Figura 6-5.

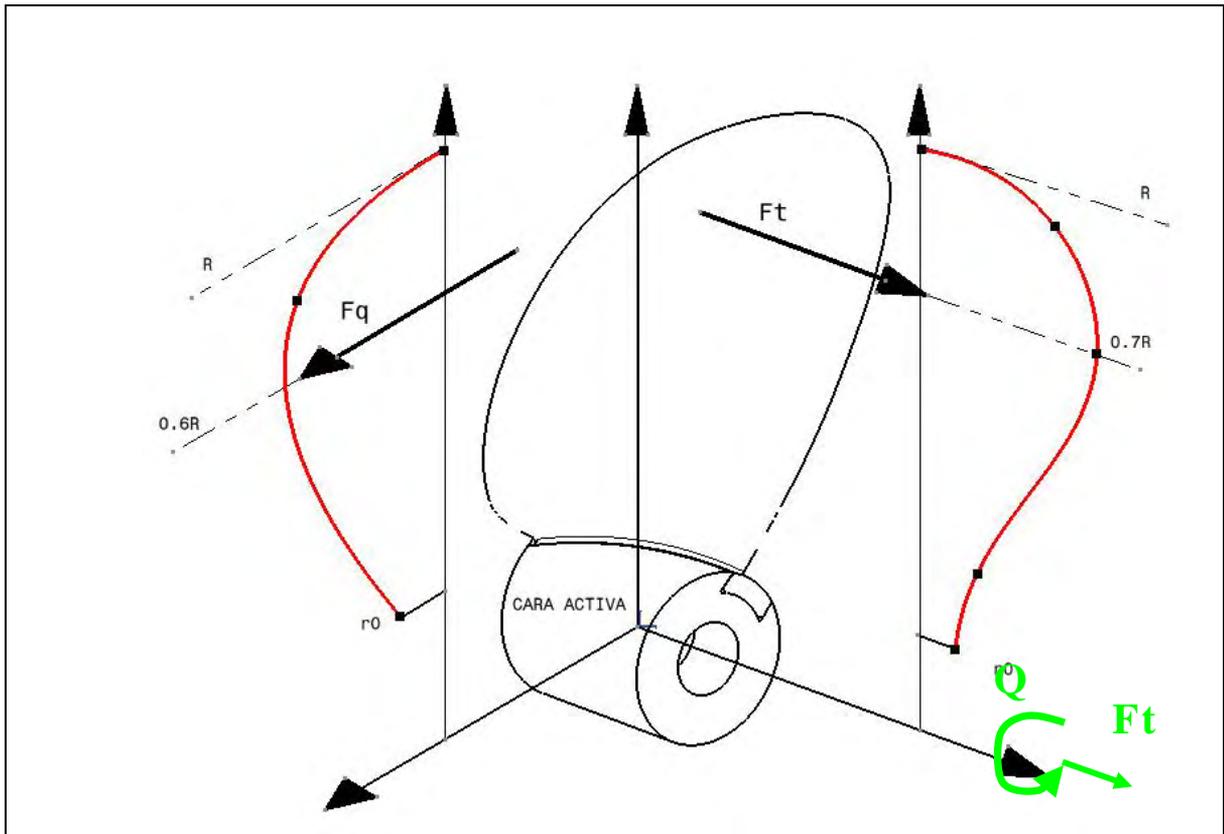


Figura 6-5 Esquema de fuerzas de empuje y par de la pala.

Para determinar el campo de presiones sobre la cara activa cuya resultante es el empuje (F_t) y su momento respecto de X es el par (Q).

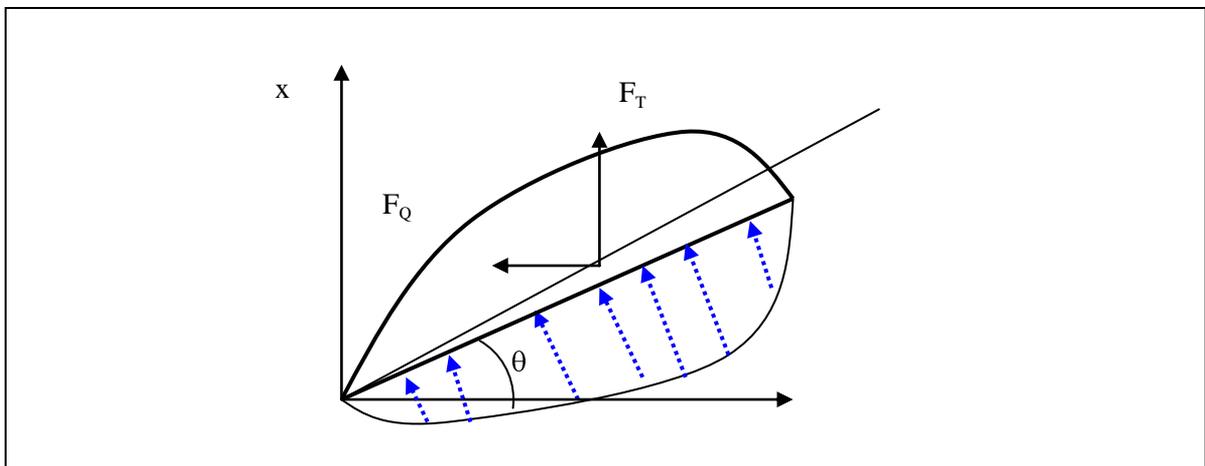


Figura 6-6 Distribución de presiones y cargas resultantes.

Conociendo que la distribución de presiones en la pala tiene forma de paraboloides, se trata de encontrar la ecuación del paraboloides que provoque unas reacciones (empuje y par) lo más parecidas posibles a las reales.

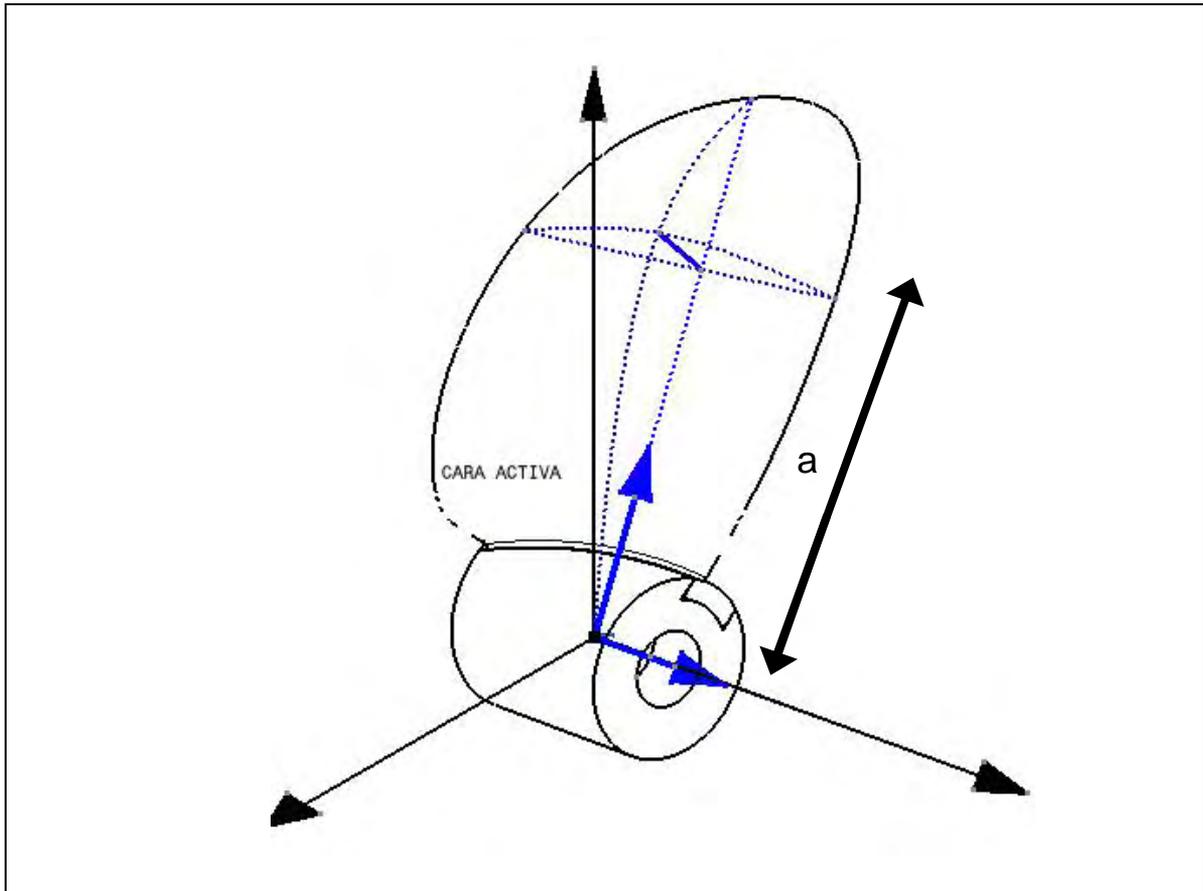


Figura 6-7 Distribución paraboloides de la presión hidrostática en la pala.

Para hallar la distribución de cargas con forma de paraboloides, se hace una composición con la suma de dos parábolas, una en sentido transversal, y otra en sentido longitudinal, con máximos en 0.7R.

$$P(x, y) = Q \left[1 - \left[\frac{(x)^2}{a^2} \right] - \frac{y^2}{b^2} \right]$$

Siendo "a" la distancia al origen de coordenadas al semieje de la parábola igual a 365mm y "b" 555 mm, se itera el valor de Q hasta que se obtienen unas resultantes de:

$$F_z = -16542 \quad \text{N} \quad \left[\frac{1}{5} \right]$$

$$M_z = 5.467.614 \text{ Nmm.} \quad \left[\frac{P}{rev} \times \frac{1}{5} \right]$$

La ecuación de la distribución de presión sobre la cara activa de la pala de cunial es:

$$P(x, y) = 0.068 \left[1 - \left[\frac{x^2}{365^2} \right] - \frac{y^2}{555^2} \right]$$

Tomando como referencia un eje de coordenadas situado en 0.7R y centrado.

Para que las resultantes en los ejes globales, equivalentes en ambos modelos, sean:

$$F_z = -16542 \quad \text{N} \quad \left[\frac{1}{5} \right]$$

$$M_z = 5.467.614 \text{ Nmm.} \quad \left[\frac{P}{rev} \times \frac{1}{5} \right]$$

6.4.1.2 Fuerza centrífuga de la pala.

La carga de inercia de ambas palas en unidades del programa es:

$$w = \frac{800}{3.078} = 260 \text{ rpm} \frac{1}{60s} = 4.3 \text{ rps}$$

6.4.2 ANÁLISIS DE RESISTENCIA.

Con este análisis se determina si en el caso de la pala cunial, ésta alcanza la tensión última de la aleación.

6.4.2.1 PALA EN CUNIAL.

6.4.2.1.1 Método Manual.

El método tradicional establecido por la Sociedad Clasificadora considera la hélice como una viga en voladizo.

Las ecuaciones establecidas por la Sociedad Clasificadora son:

$$\sigma = \sigma_T + \sigma_Q + \sigma_{CBM} + \sigma_{CF}$$

$$\sigma_T = \frac{F_T (a - r_o) \cos \vartheta}{n \times z_m}$$

$$\sigma_Q = \frac{F_Q (b - r_o) \sin \vartheta}{b \times n \times z_m}$$

$$\sigma_{CBM} = \frac{F_C \times L}{z_m} = \frac{2\pi m x_c D W^2 L}{z_m}$$

$$\sigma_{CF} = \frac{F_C}{\Delta}$$

Siendo:

$$\theta = 50.1^\circ$$

$$F_T = 82708 \text{ N.}$$

$$F_Q = 32,394 \times 10^6 \text{ Nmm.}$$

$$a = 742 \text{ mm.}$$

$$b = 700 \text{ mm.}$$

$$n = 5.$$

$$D = 2120 \text{ mm.}$$

$$m = 73.5 \text{ kg}^*.$$

$$z_m = 140644 \text{ mm}^3.^*$$

$$x_c = 0.57^*$$

$$r_o = 265 \text{ mm.}$$

$$L = 35.25 \text{ mm.}$$

$$W = 260 \text{ rpm.}$$

Resulta:

$$\sigma = \sigma_T + \sigma_Q + \sigma_{CBM} + \sigma_{CF}$$

$$\sigma_T = 36.0 \text{ MPa.}$$

$$\sigma_Q = 22.0 \text{ MPa.}$$

$$\sigma_{CBM} = 8.3 \text{ MPa.}$$

$$\sigma_{CF} = 2.3 \text{ MPa.}$$

$$\sigma = 68.6 \text{ MPa}$$

Implica un factor de seguridad de 5.2, frente al límite elástico de la aleación CUNIAL que es de 355 MPa.

6.4.2.1.2 Método de elementos finitos.

Se realiza el análisis bajo las mismas cargas en la pala y se analizan las tensiones. Se observa que los valores máximos de tensiones rondan los 72.5 MPa que se dan en zonas muy puntuales de la pala.

Tal y como se ocurrió en el cálculo manual, estos valores están muy lejos del límite (355 MPa). Trabajando con un factor de reserva de 4.9.

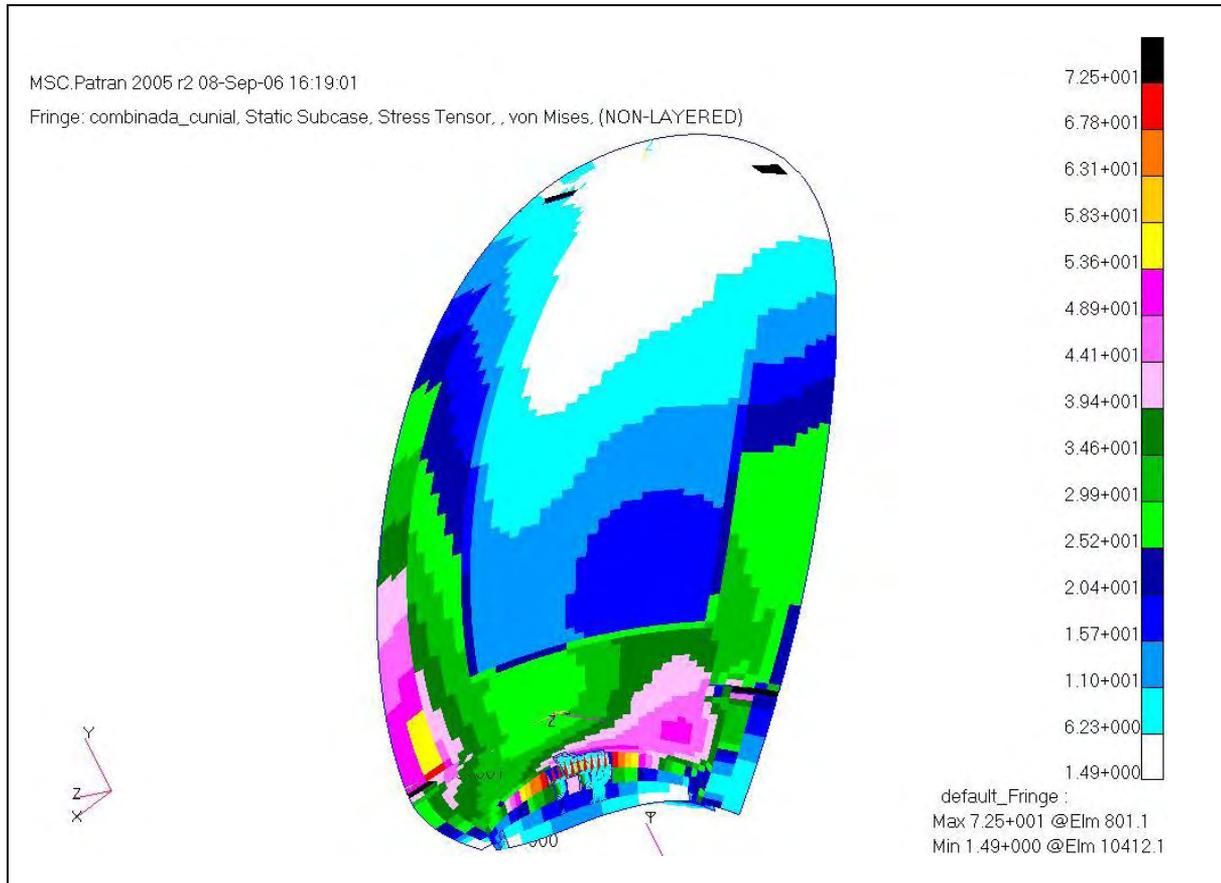


Figura 6-8 Tensiones en la pala de cunial. Bajo cargas dinámicas.

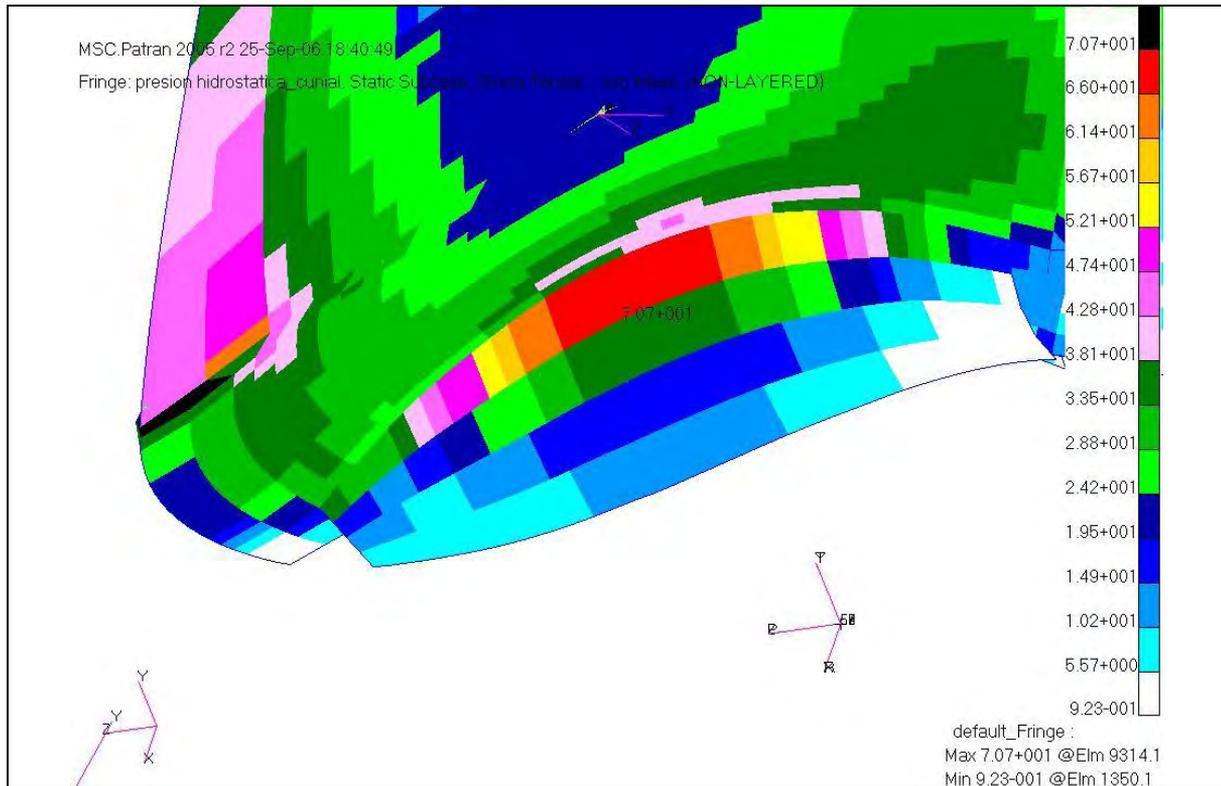


Figura 6-9 Detalle de tensiones en pala de curial.

6.4.2.2 PALA EN FIBRA DE CARBONO.

6.4.2.2.1 Método de elementos finitos.

Se analizan las tensiones bajo el criterio de Tsai-Wu, que tal y como se explicó en el apartado 4, es una teoría cuadrática que analiza la tensión capa a capa.

Estableciendo la tensión límite de los materiales de cada capa según las tablas siguientes.

TEJ FC T-300/EPOXY (VF=55%)	
σ_{tx} (MPa)	560
σ_{cx} (MPa)	500
σ_{ty} (MPa)	560
σ_{cy} (MPa)	500
ζ_{12} (MPa)	66

UD T800 FC/EPOXY (VF=58%)	
σ_{tx} (MPa)	1206
σ_{cx} (MPa)	499
σ_{ty} (MPa)	30
σ_{cy} (MPa)	166
ζ_{12} (MPa)	120

TEJ FV/EPOXY (VF=58%)	
σ_{tx} (MPa)	300
σ_{cx} (MPa)	300
σ_{ty} (MPa)	300
σ_{cy} (MPa)	300
ζ_{12} (MPa)	70

Con estos valores, Nastran analiza los índices de fallo por capa. Se observa que no rompe ninguna de las capas que forman esta pala de FC. Ya que los índices de fallo máximos que se dan en la pala bajo esta carga, no superan la unidad.

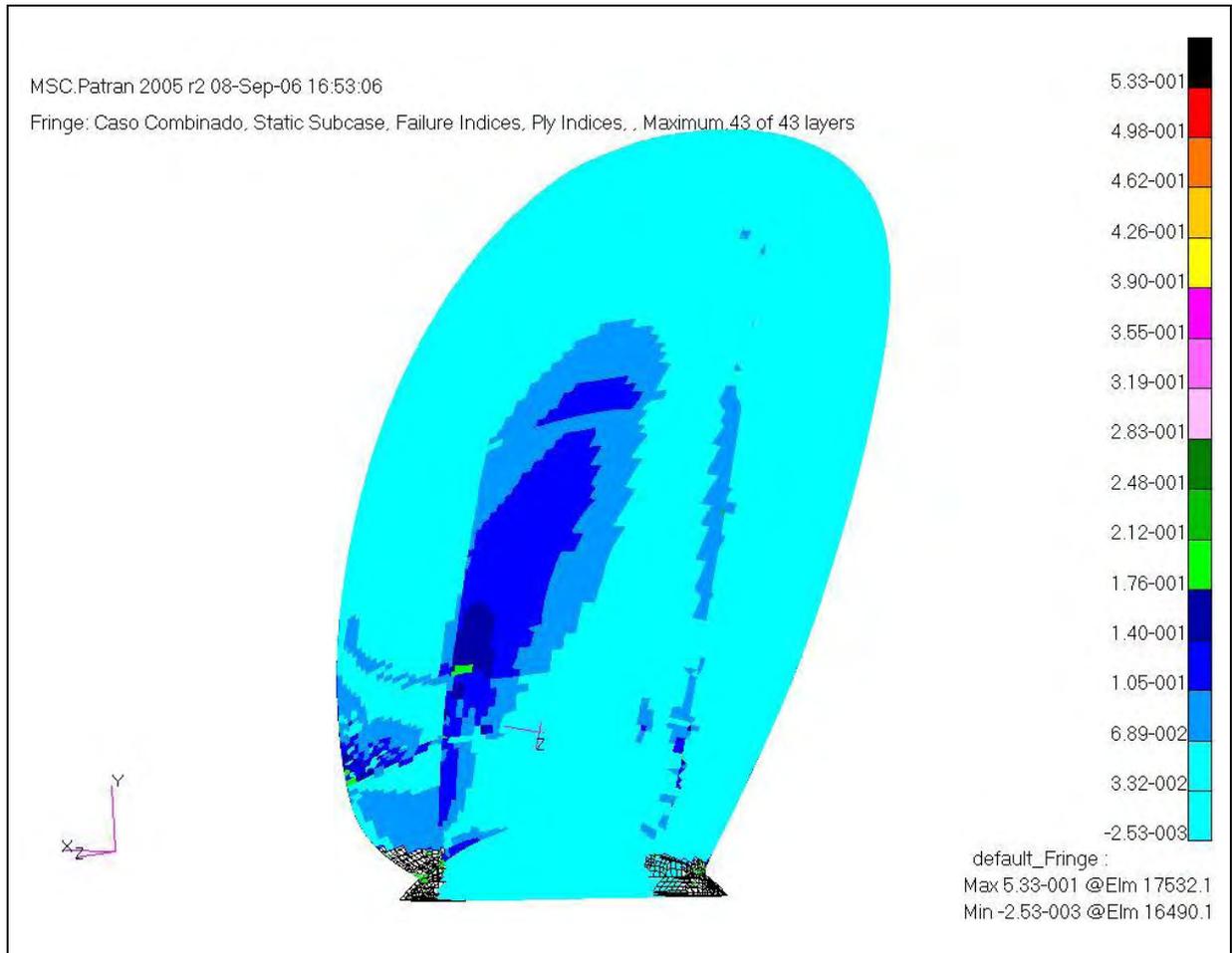


Figura 6-10 Índices de fallo de la pala de FC bajo carga dinámica.

6.4.3 ANÁLISIS DE RIGIDEZ.

Se intenta analizar ambas palas bajo dos casos de carga:

-se analiza bajo carga hidrodinámica debida a la presión del agua, los valores que aporte el FEM servirán para sacar conclusiones con los valores del ensayo.

-Se analiza bajo el caso de carga combinado, carga de inercia y presión hidrodinámica. Así se podrán estimar las deformaciones reales que sufrirá la pala.

6.4.3.1 PALA EN CUNIAL.

6.4.3.1.1 Método de elementos finitos.

Se analiza la pala de cunial bajo la carga estática que se utilizará en el ensayo. Los datos se recogen en la siguiente figura.

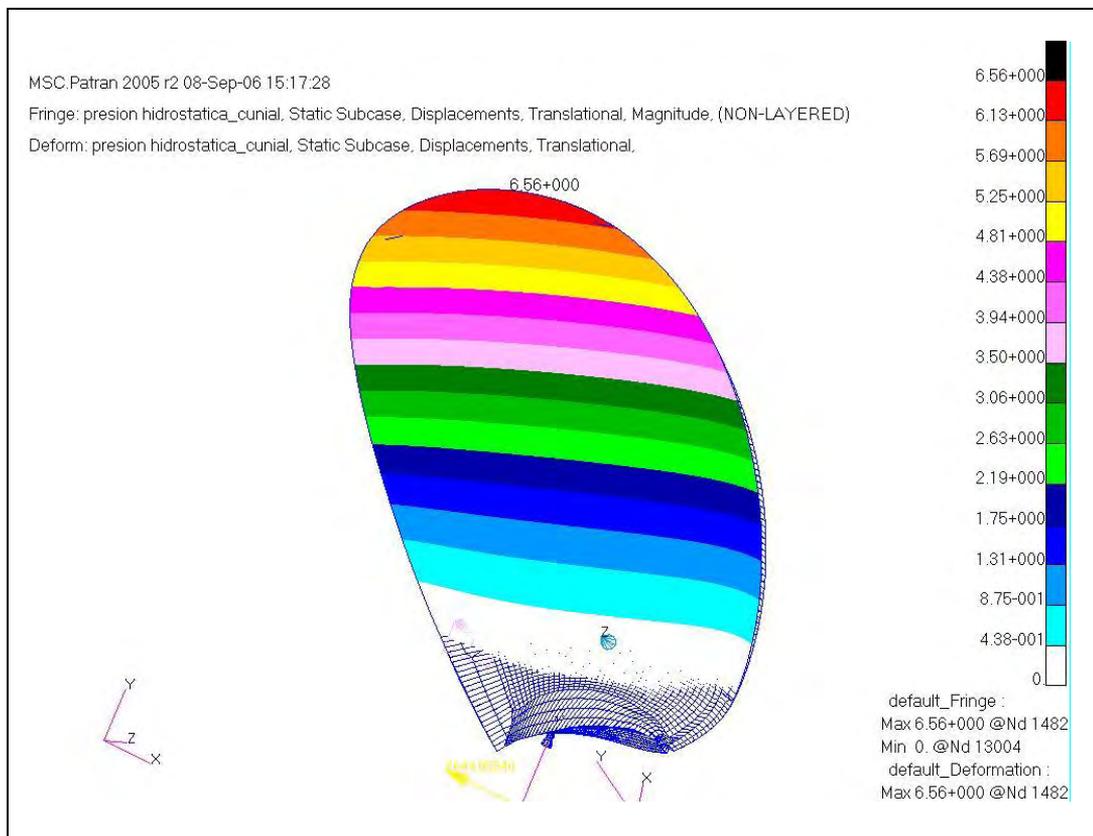


Figura 6-11 Desplazamientos bajo presión hidrostática.

	$\delta_{max}(mm)$
CUNIAL	6.56

Bajo el caso de carga combinado, se dan las siguientes deformaciones de la pala.

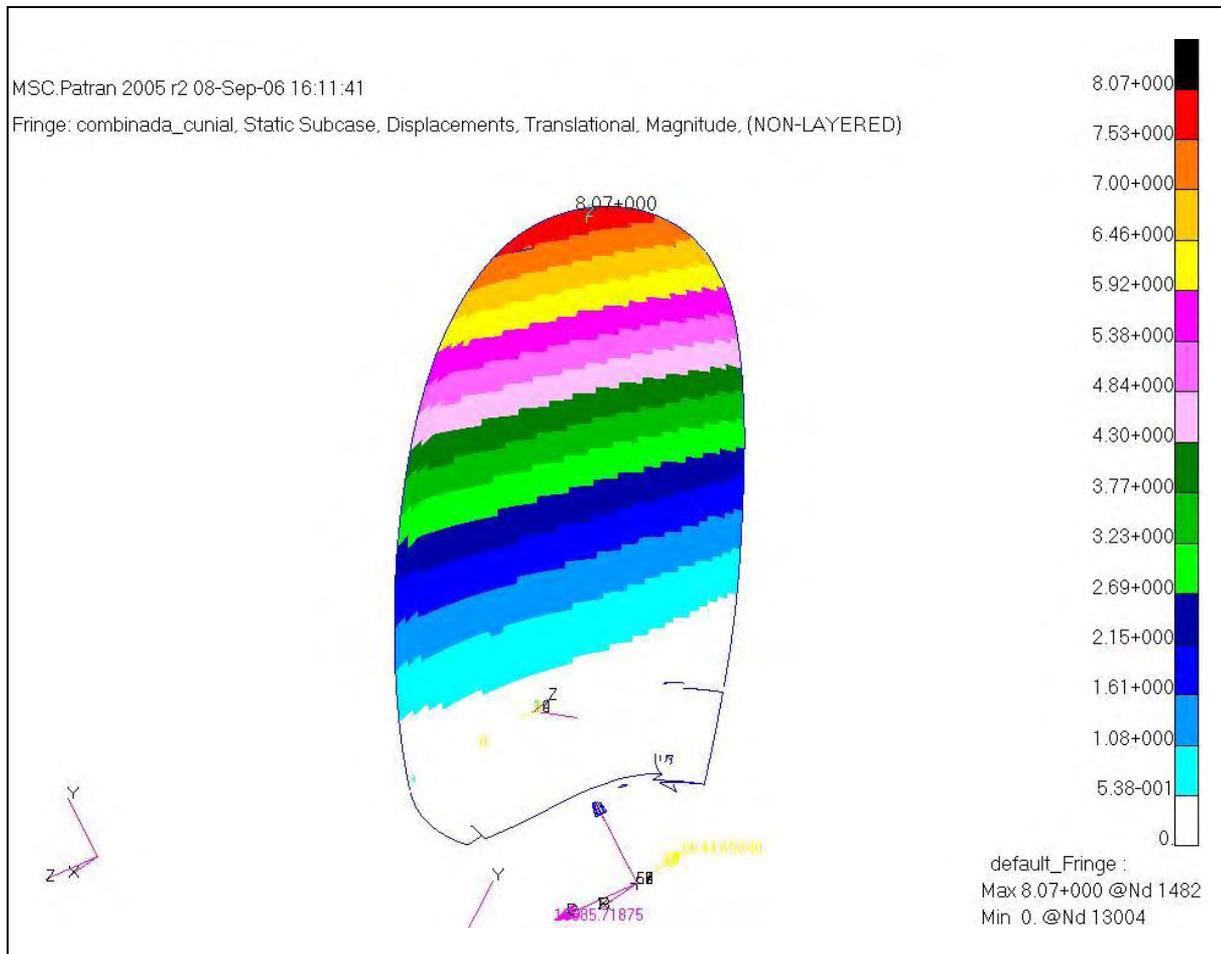


Figura 6-12 Desplazamientos bajo presión hidrostática y carga de inercia.

Se analiza el desplazamiento a 0.7R, sección en la que se dará el máxima presión hidrodinámica.

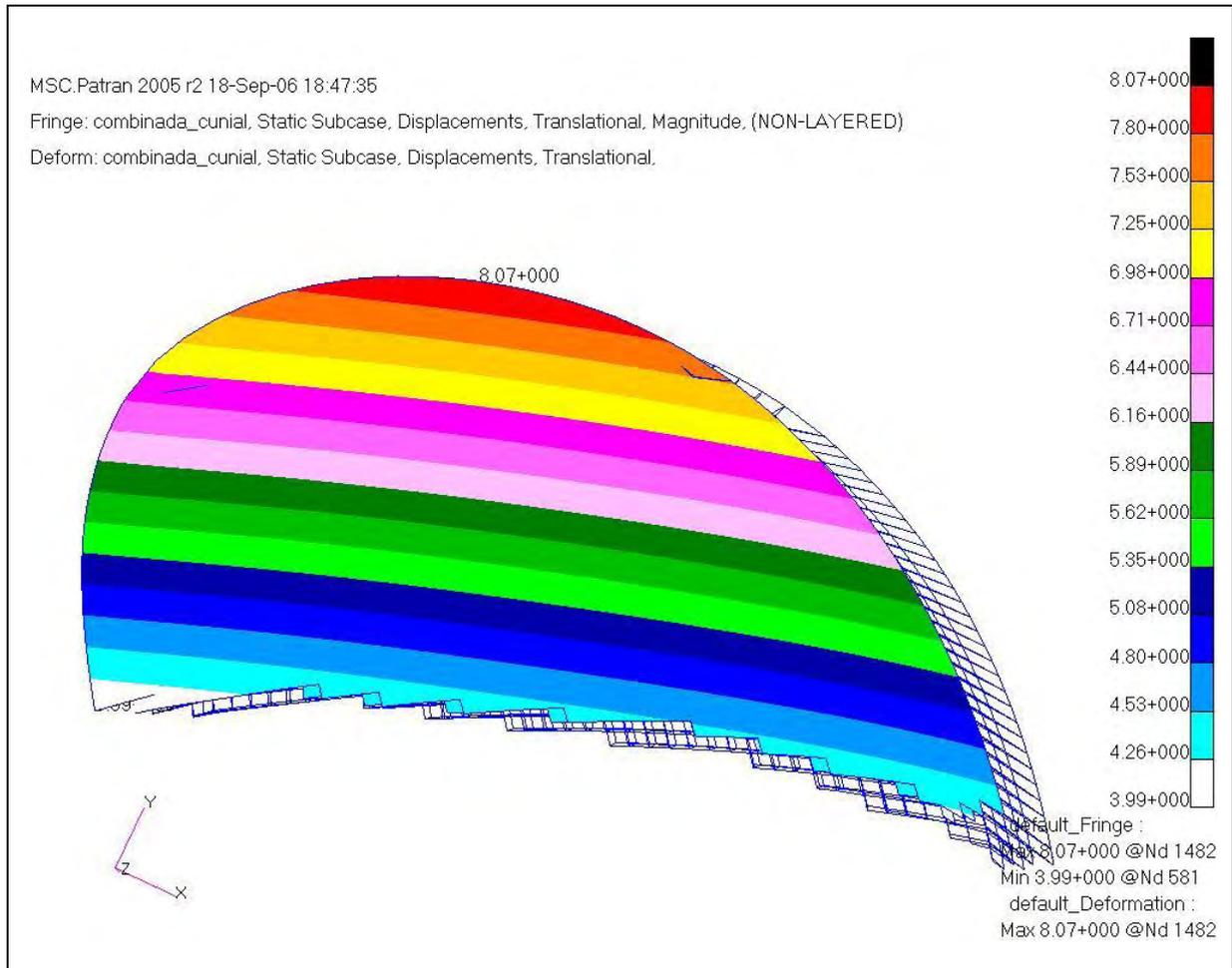


Figura 6-13 Desplazamientos debidos a la presión hidrostática y carga de inercia a 0.7R.

	δ_{max} (mm)
CUNIAL (1.0R)	8.07
CUNIAL (0.7R)	4.26

6.4.3.2 PALA EN FIBRA CARBONO.

6.4.3.2.1 Método de elementos finitos.

Al igual que con la pala de Cunial los datos de desplazamiento que se representan en la Figura 6-14 son sin considerar cargas de inercia.

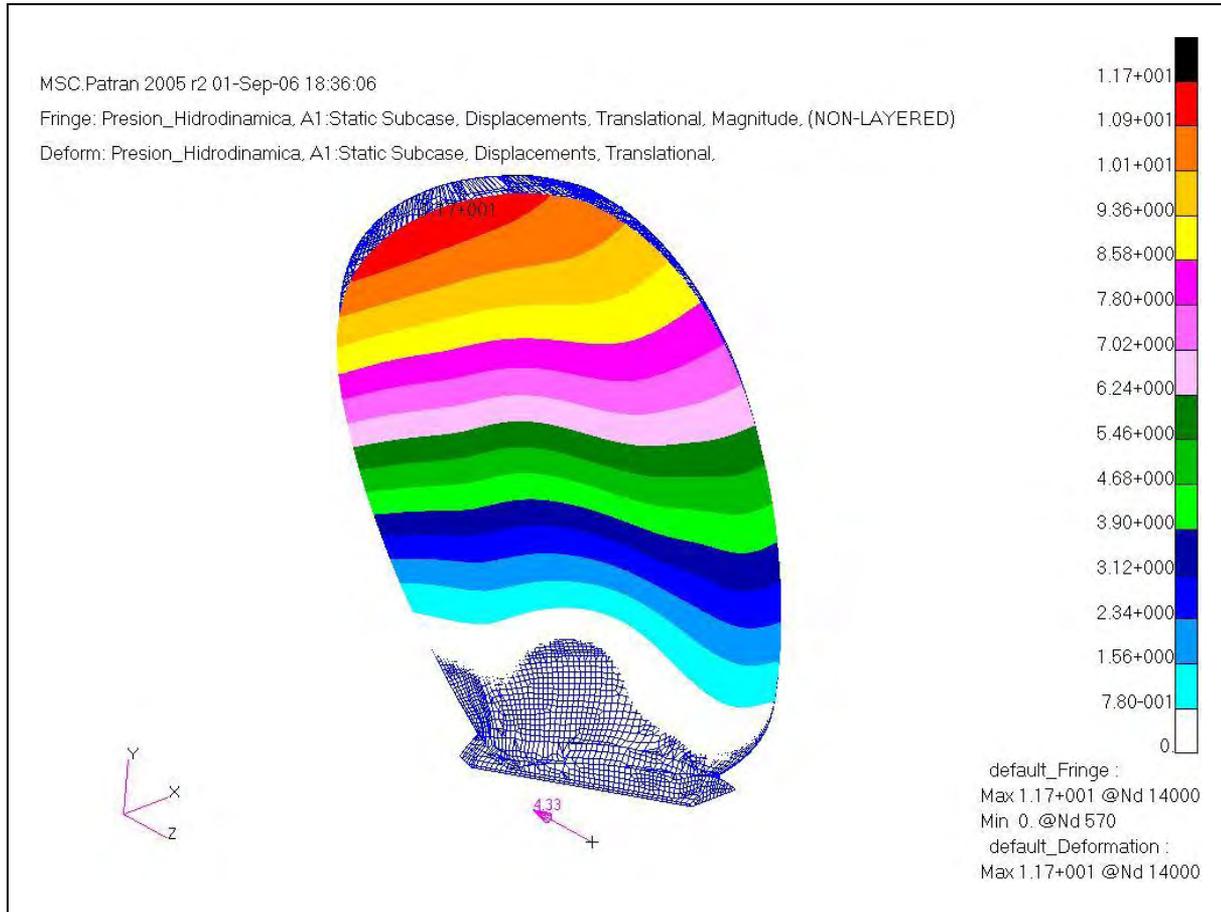


Figura 6-14 Desplazamientos debidos a la presión hidrostática sin carga de inercia.

	$\delta_{max}(mm)$
fibra de carbono	11.7

Pero como ya se ha explicado hay que tener en cuenta que la pala gira, y se analiza los desplazamientos de la pala de cunial teniendo en cuenta también la carga de inercia.

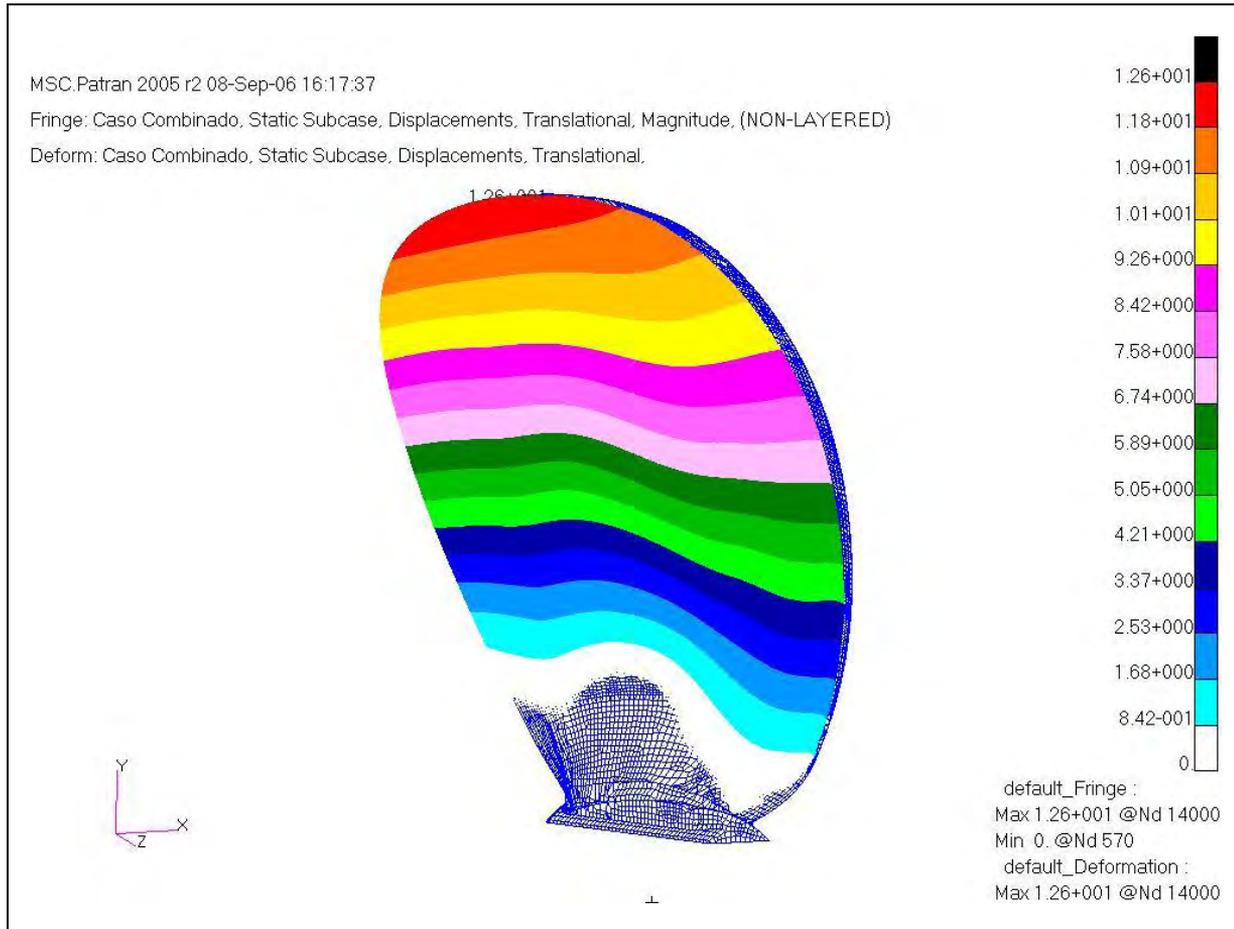


Figura 6-15 Desplazamientos bajo presión hidrostática y carga de inercia.

Se analiza el desplazamiento a 0.7R, sección en la que se dará la máxima presión hidrodinámica.

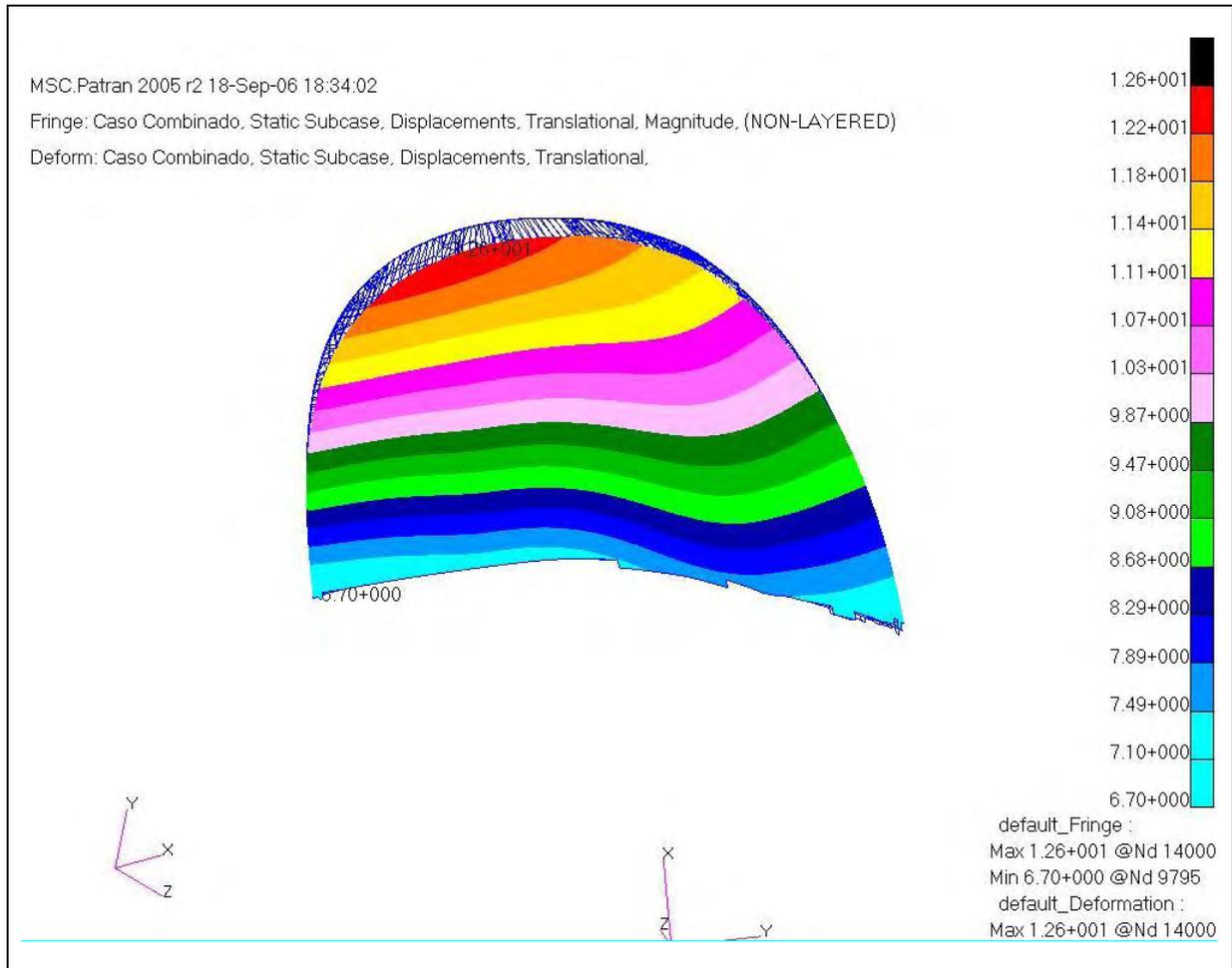


Figura 6-16 Desplazamientos debidos a la presión hidrostática y carga de inercia a 0.7R.

	$\delta_{max}(mm)$
FIBRA DE CARBONO (1.0R)	12.6
FIBRA DE CARBONO (0.7R)	7.1

6.4.4 ANÁLISIS VIBRATORIO.

Con el fin de conocer el comportamiento dinámico de la hélice en su movimiento de giro, resulta interesante obtener las frecuencias propias de vibración y realizar una comparación con las posibles frecuencias de excitación del sistema, a fin de poder predecir si existe la posibilidad de que el mismo pueda entrar en resonancia.

6.4.4.1 MECANISMOS DE EXCITACIÓN.

Cuando cada pala de la hélice pasa cerca del casco del buque (o del soporte saliente que mantiene en posición el eje de la hélice), se encuentra con una región del flujo diferente a la existente en las zonas de agua más o menos libre. Consecuentemente, las fuerzas hidrodinámicas son diferentes de forma que dichas fuerzas experimentan variaciones con la frecuencia de paso de la pala (es decir con las revoluciones de la hélice multiplicadas por el número de palas). Las variaciones de par así resultantes son más importantes cuando la hélice pasa cerca del casco o de los soportes que cuando está más alejada.

Este efecto es responsable del hecho de que el eje de propulsión principal se vea sometido en ocasiones a determinadas velocidades. Así mismo, este efecto produce una variación de las reacciones sobre los apoyos del sistema eje-hélice y por tanto, sobre el casco del buque, lo que se traduce en vibraciones que pueden a menudo observarse en la cubierta posterior. En el caso de que la frecuencia de estas fuerzas se aproxime a la frecuencia natural de vibración del buque considerado, como una viga de extremos libres, las oscilaciones resultantes pueden llegar a ser de una magnitud importante.

En este estudio se ha determinado un tipo de frecuencia propia: La frecuencia natural de vibración a torsión del sistema eje-hélice.

6.4.4.2 FRECUENCIA PROPIA DE TORSIÓN DEL SISTEMA EJE-HÉLICE.

La pala puede considerarse como una viga de sección variable empotrada en un extremo y libre en el otro.

Para este tipo de carga se obtiene por elementos finitos los modos propios de vibración, donde se obtienen que los 5 primeros modos ocurren a las siguientes frecuencias:

MODO	Frecuencia FC(Hz)	Frecuencia curial (Hz)
1	75.85	50.33
2	191.42	154.58
3	206.72	167.79
4	299.71	282.13
5	355.85	317.3

En las siguientes figuras se observan alguno de los modos que corresponden a la pala de FC y la de CUNIAL respectivamente.

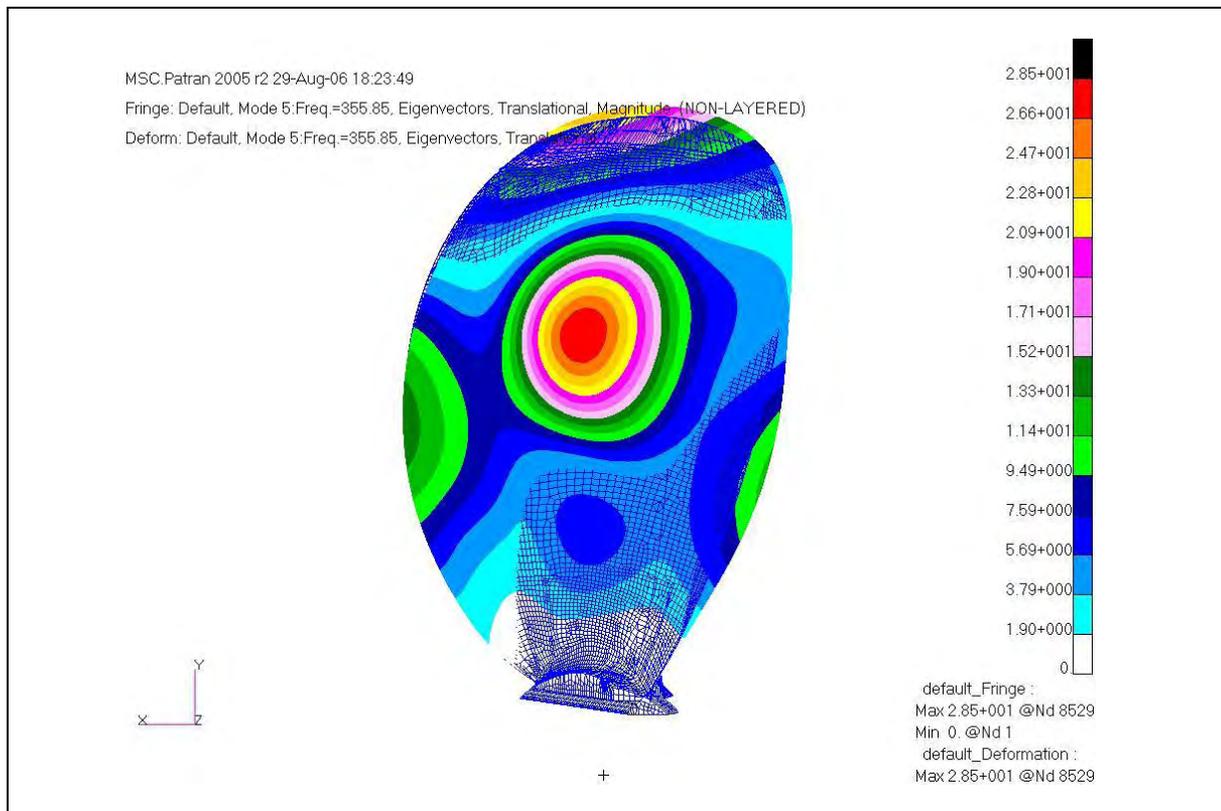


Figura 6-17 Modo propio 5 de la pala de FC.

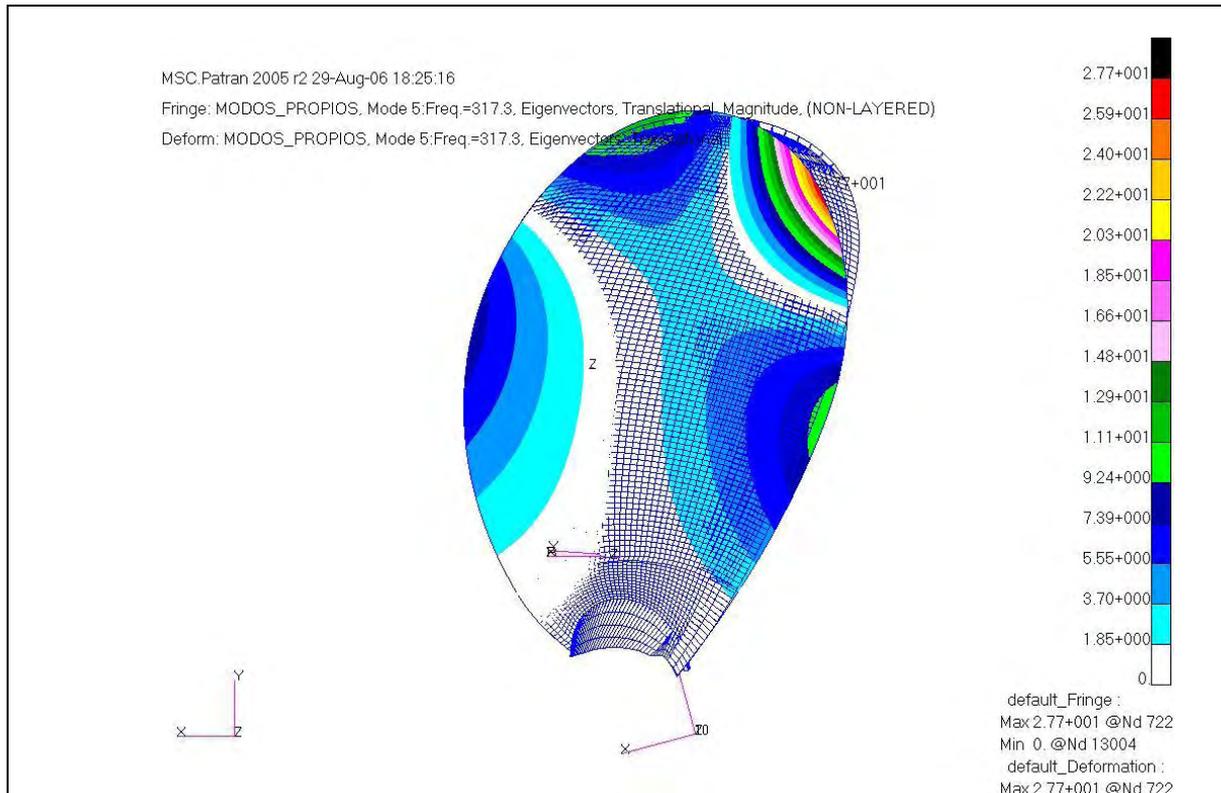


Figura 6-18 Modo propio 5 de la pala de CUNIAL.

Para la pala de carbono la frecuencia del primer modo correspondería a una excitación de 4551 rpm.

Sin embargo, esta frecuencia sería para una hélice en el aire. Al estar en el agua, habría que introducir un factor Λ , que refleja el efecto de la inmersión. Este efecto no es otro, que una reducción de las frecuencias a la que ocurre cada modo.

$$\Lambda = \frac{\text{frecuencia en agua}}{\text{frecuencia en aire}}$$

Este factor no es constante para cada modo, sino que va aumentando según aumenta la complejidad del modo.

Según bibliografía consultada, un valor aceptable para el primer modo es de 0.625.

En este caso, la frecuencia propia de flexión será:

Frecuencia en agua = 0.625 x frecuencia en aire = 2844.37 rpm

Se comprueba que la frecuencia de excitación para este motor utilizado es:

rpm del motor / relación de reducción * nº de palas = (800 / 3.078) * 5 = 1299 rpm

2844.37 > 1299 por lo tanto no entraría en resonancia la hélice.

6.5 CONCLUSIONES DE CÁLCULO.

6.5.1 Análisis vibratorio.

Con los datos obtenidos en la tabla de modos propios de ambas palas, se observa que la pala de Fibra de Carbono tiene una mayor frecuencia que la de Curial. Gracias a la ecuación de la frecuencia natural de un sistema, que relaciona la rigidez y la masa, se puede deducir que pala será más rígida.

$$w_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Sabiendo que el peso de las palas es de 24.8Kg la de FC y 73.5Kg la de Cunial, despejando y operando se obtiene la rigidez de ambas palas.

$$k(FC) = w^2 \times m$$

$$75^2 \times 24.8 = 139500 \text{ N/m}$$

$$k(CUNIAL) = w^2 \times m$$

$$50^2 \times 73.5 = 183750 \text{ N/m}$$

La pala de Cunial es 31% más rígida que la de fibra de Carbono.

6.5.2 Análisis de resistencia.

En el análisis de resistencia, se observa que la pala de FC soporta las tensiones máximas que se dan en la pala manteniéndose bastante alejada del límite de rotura de cada capa. La pala de Cunial también se mantiene bastante alejada de la tensión última de la aleación.

El factor de reserva de ambas palas es mayor de 2, por lo tanto ambas tienen un alto margen de seguridad.

6.5.3 Análisis de rigidez.

En el análisis de rigidez de las pala se observa que bajo el caso de carga real (hidrodinámico e inercia), la pala de curial se deforma menos que la de FC. Esto nos lleva a demostrar de nuevo que la pala de FC es menos rígida que la de curial.

No obstante esto no significa que la pala que se propone no sea válida. El dato realmente a tener en cuenta es, si esa deformación de la pala afecta al ángulo de ataque de la misma en el fluido.

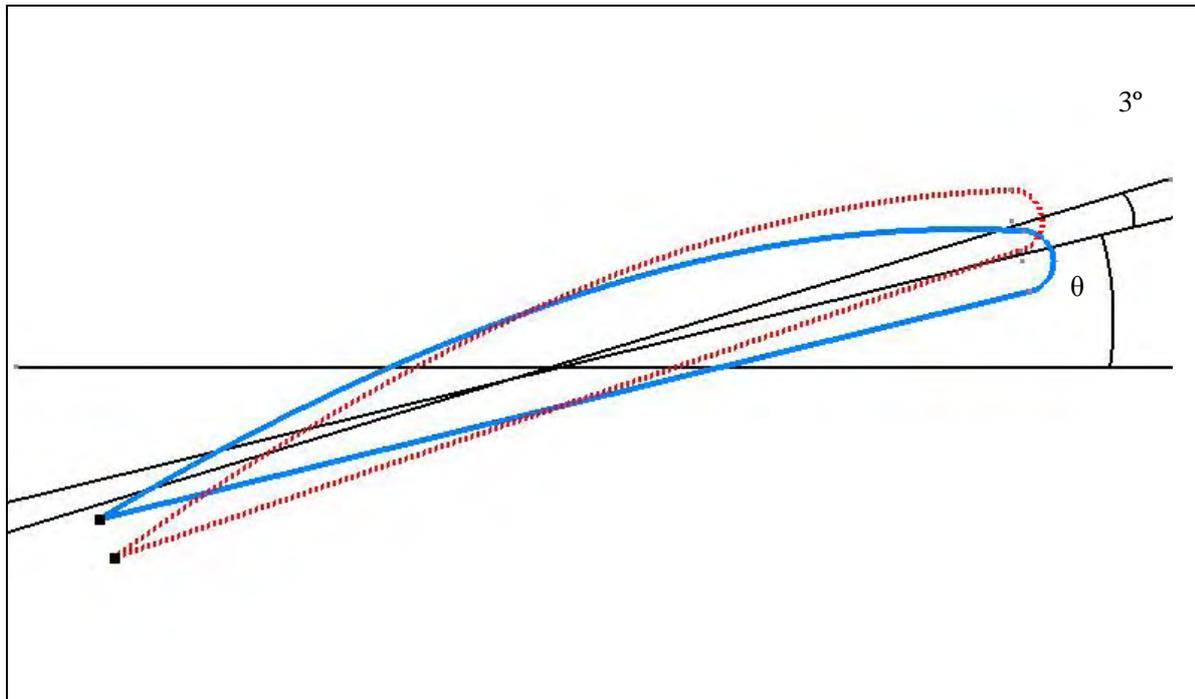


Figura 6-19 Detalle del ángulo de ataque de la pala.

El ángulo de ataque de la pala sobre el agua es función del paso y del radio de la pala. Se estudia la pala a $0.7R$, a esta altura se da el caso de máxima presión del agua sobre la pala.

$$\theta = \arctg \frac{P}{2\pi r} = \arctg \frac{1992}{2\pi 742} = 23.13^\circ$$

Estos 23.13° representan el ángulo de ataque de esta sección en el agua, a partir de 26.13° la pala no sería funcional.

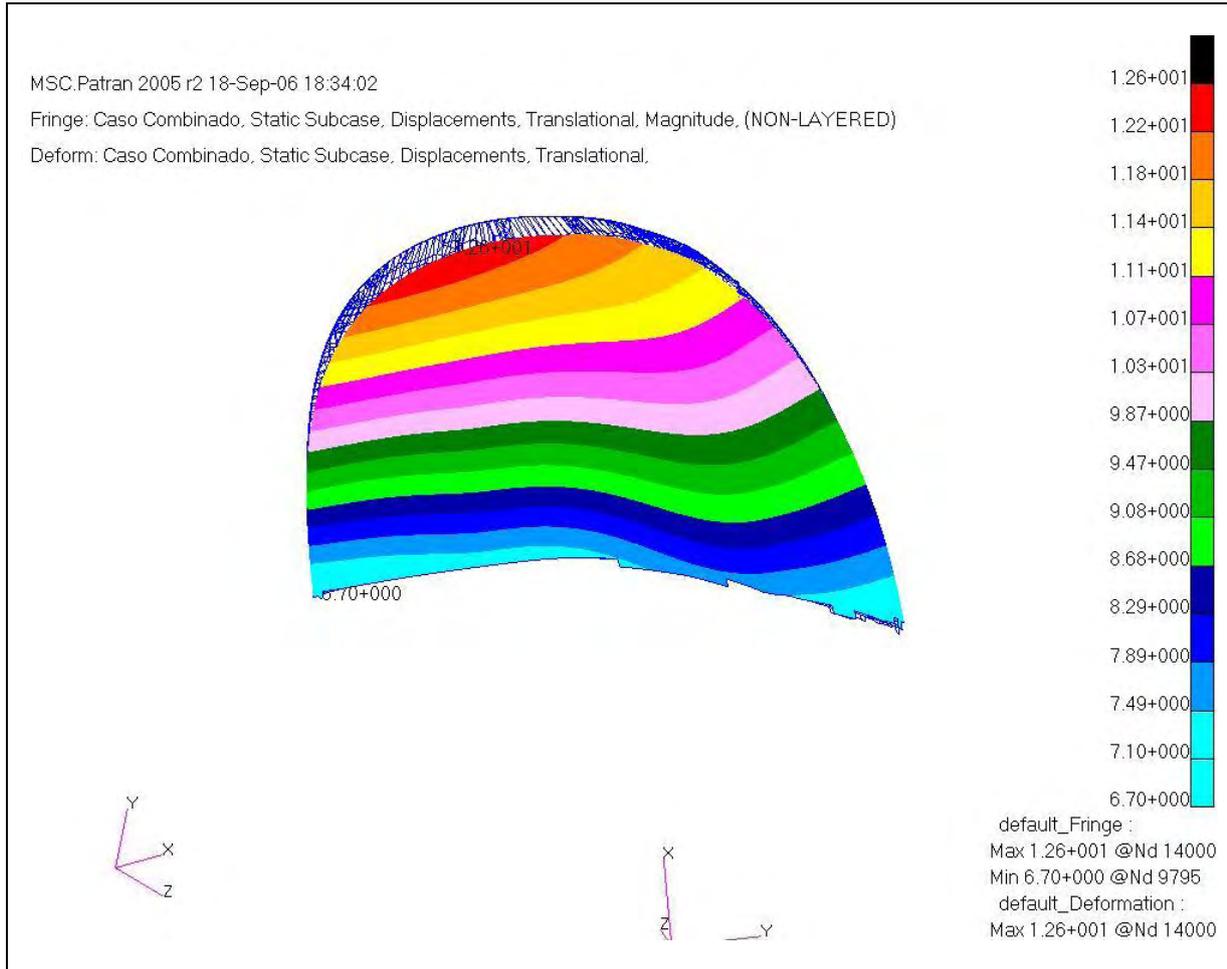


Figura 6-20 Desplazamientos debidos a la presión hidrostática y carga de inercia a 0.7R.

En la figura se aprecia una deformación longitudinal, en ningún caso se da una deformación tal que afecte al ángulo de ataque. Es decir, la pala de fibra de carbono mantiene el ángulo de ataque dentro de la tolerancia.

Por otro lado en las palas de las hélices, el análisis de rigidez no es tan importante como lo es el análisis de resistencia. Las Sociedades Clasificadoras ni siquiera establece fórmulas para su cálculo en palas de cunial.

7 ENSAYOS.

Se ha realizado un Plan de Ensayos destinado a validar el prototipo de la hélice en fibra de carbono objeto último del proyecto.

El espécimen de ensayo es la primera pieza que sale del molde previamente diseñado, mecanizado y puesto a punto.

El plan comprende la realización de los diferentes tipos de ensayos siguientes:

- Ensayos en banco.
- Ensayos en buque atracado.
- Ensayos de navegación.
- Costera.

Estos ensayos tienen por objeto comprobar el comportamiento ante las cargas hidrodinámicas, midiendo tensiones y deformaciones, de forma que se pueda dar luz verde a la instalación de la hélice en el barco y pasar a las pruebas funcionales.

A la realización de este proyecto, sólo se disponen de datos suficientes para desarrollar los ensayos en banco ya que aun no se ha colocado la hélice en el buque.

7.1 ENSAYOS EN BANCO.

Los ensayos sobre la pala se realizarán en el banco de ensayos de INASMET. Esta empresa realiza todo tipo de ensayos en material compuesto.

En la figura siguiente se muestra la pala ya fabricada en material compuesto lista para realizar en ensayo en banco.



Figura 7-1 Pala de material compuesto lista para el ensayo.



La disposición del ensayo se muestra en la Figura 7-2, el anclaje a la bancada representa exactamente el amarre de la pala al buje de manera que simula una viga empotrada a la que se le aplicará una carga con un actuador hidráulico.

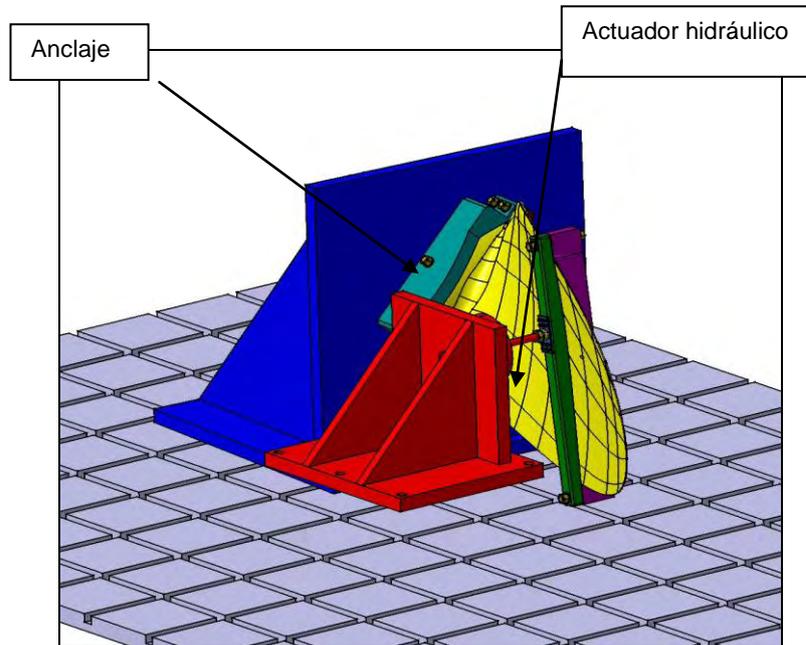


Figura 7-2 Dibujo del banco de ensayos.

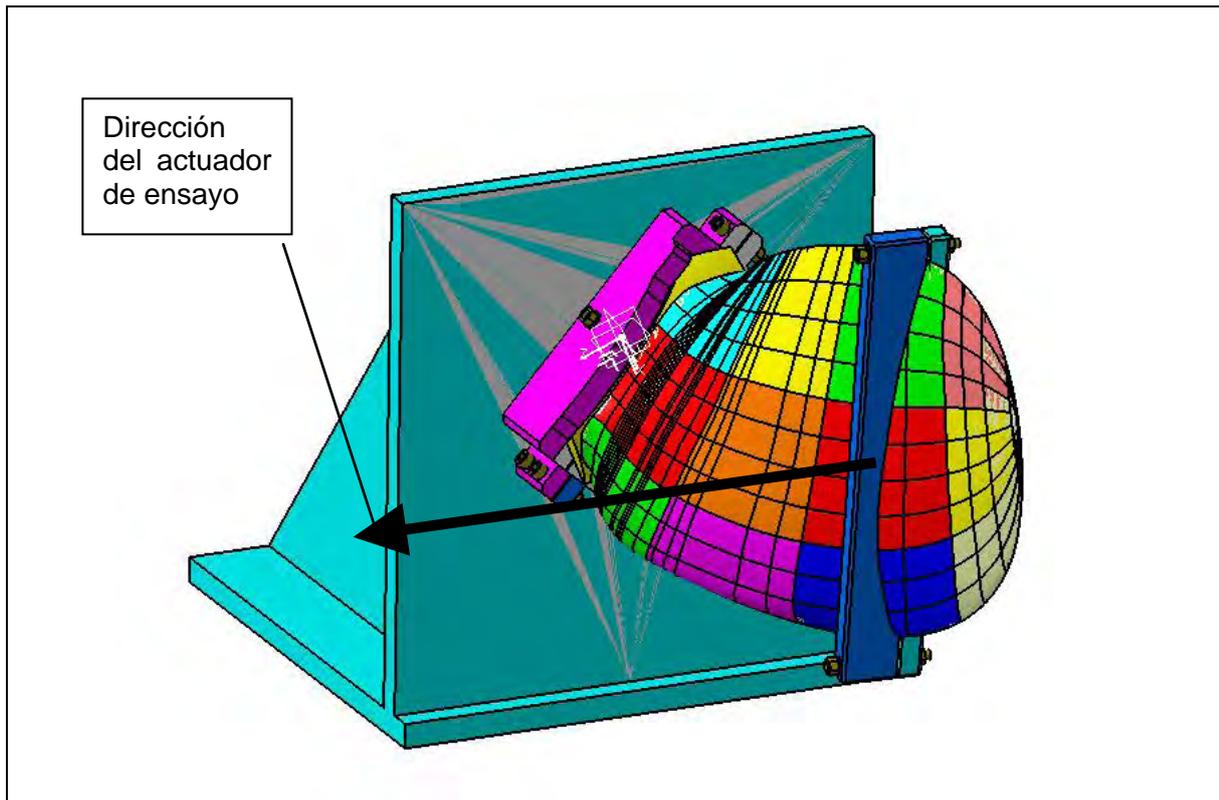


Figura 7-3 Detalle de la dirección del actuador, colocado a 0.7R.

7.1.1 CARGAS APLICADAS.

La carga se introducirá mediante un actuador hidráulico de carga máxima 5 Toneladas, con una dirección que represente las fuerzas resultantes de empuje y de par motor de diseño. Estas cargas resultantes son equivalentes al campo de presiones hidrodinámicas que ha servido para el dimensionado por FEM de la pala.

Para comparar con los resultados de cálculo se introducirá esta misma carga en el modelo FEM.

Se llevará a cabo el ensayo en dos fases :

- Aplicación de la carga de trabajo (o de diseño).
- Ensayo a rotura.

La carga se aplicará en una dirección resultante de forma que las reacciones sean las siguientes :

F_z (N)	M_z (N x mm)
16.453	5.213.434

La carga se aplicará repartida sobre la totalidad de la longitud de la cuerda del 70% del radio en la cara activa, utilizando un rigidizador que repartirá la carga por la superficie de la pala, simulando las cargas hidrodinámicas.

Tal y como se indica en la Figura 7-3 Detalle de la dirección del actuador, colocado a 0.7R. Figura 7-3 el actuador sólo puede moverse en una dirección, por lo que habrá que colocar la hélice en una dirección tal que al aplicar fuerza en el actuador se obtengan los valores deseados de F_z y M_z .

Los ejes de la pala son los mostrados en la figura.

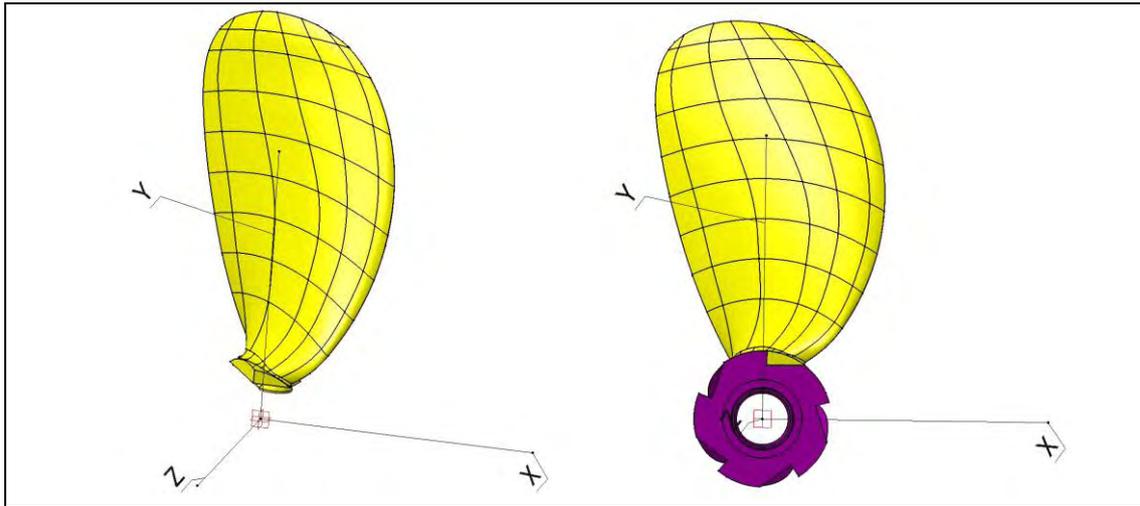
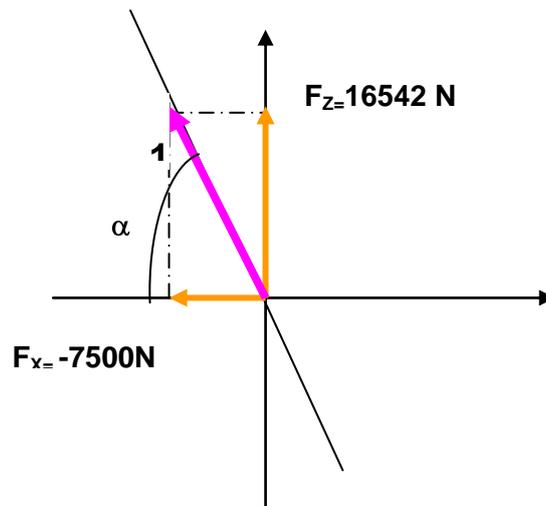


Figura 7-4 Ejes de la pala diseñada.

Por tanteo, mediante NASTRAN, se obtiene que con una fuerza en el eje Z de 16542N, para obtener un momento en Z de 5080407 Nmm, hace falta una componente en el eje x de -7500 N.

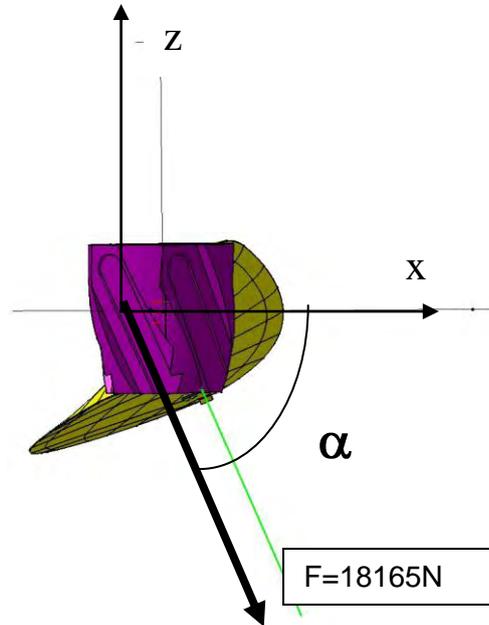
Como la fuerza que se va aplicar es en una sola dirección, tendrá que ser en una dirección, tal que tenga una componente en el eje x de -7500 N, y en z de 16542 N.



El ángulo que forma la resultante es de:

$$\alpha = \arctan \frac{F_z}{F_x} = \arctan \frac{16542}{-7500} = 65.6^\circ$$

Por lo tanto, la fuerza neta aplicada será de $\frac{F_z}{\sin \alpha} = 18165$ N.



7.1.2 PLANIFICACIÓN DE ENSAYO.

La medición del desplazamiento se realizará mediante un palpador en la cota 90%R, en el centro de la cuerda.

Se ubicarán extensímetros en las zonas indicadas en la figura, en forma de roseta, para poder medir las microdeformaciones ε_{11} y ε_{22} . Las direcciones principales serán las mismas que las del modelo FEM. La dirección 1, coincide con la dirección 0° de alineamiento del laminado, que va desde el buje, hasta la punta de la pala. La 2 será perpendicular a la 1.

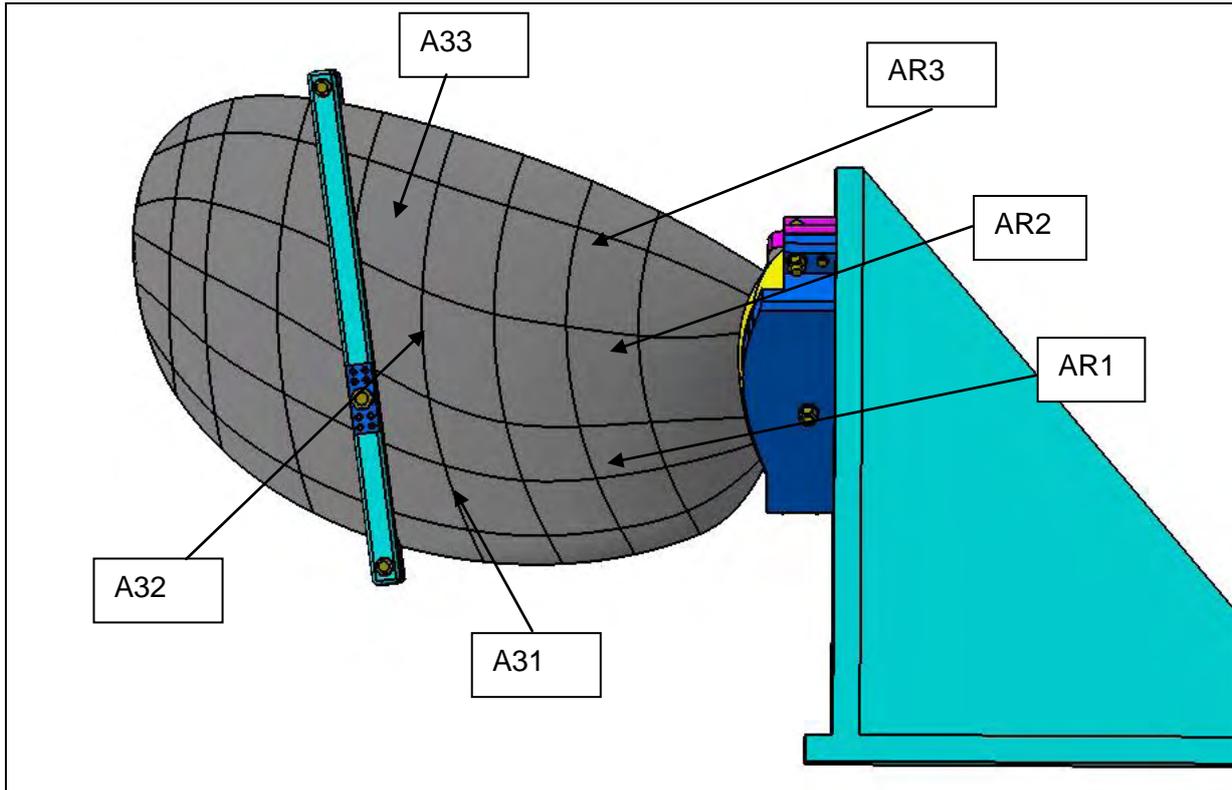


Figura 7-5 Rosetas en cara activa.

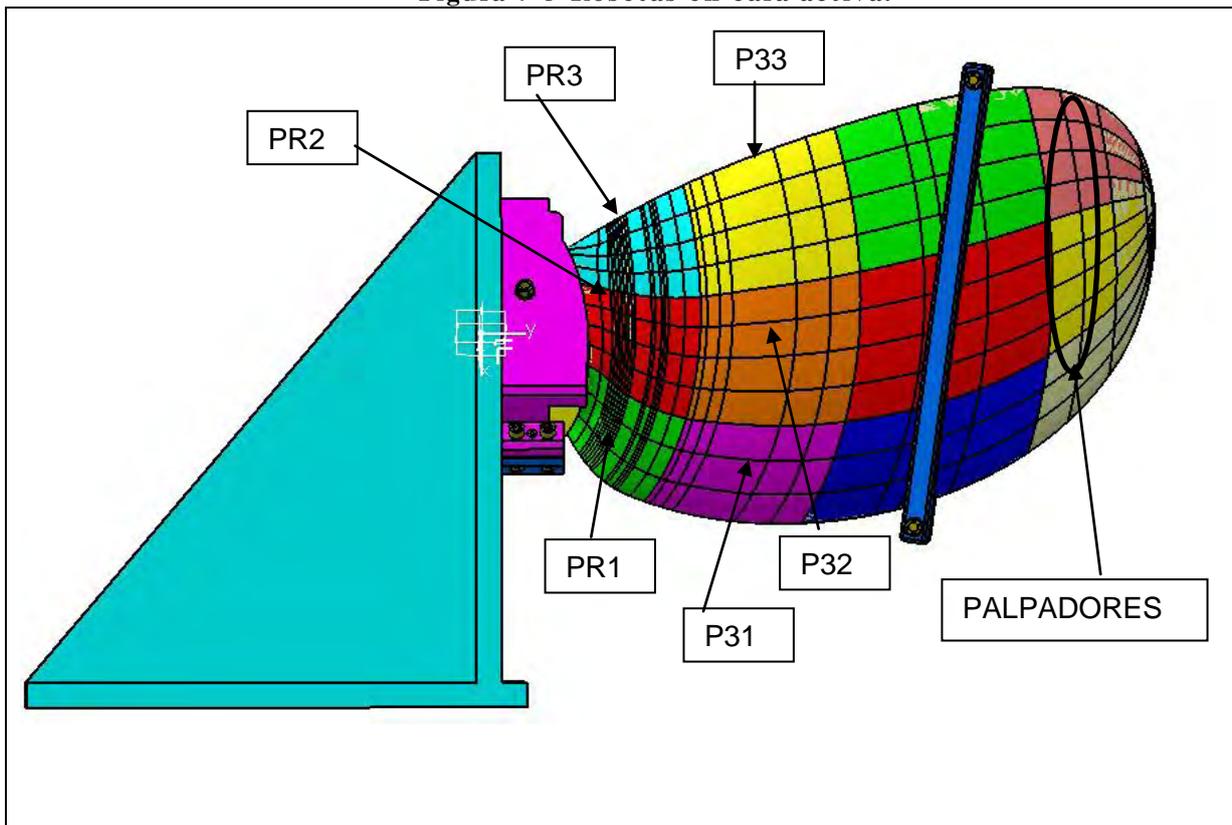


Figura 7-6 Rosetas en cara pasiva.

Se aplicará la carga de forma progresiva, registrando los datos de desplazamiento y de tensiones.

Antes de verificarse la Rotura de Primera Lámina (RPL) se retirará la carga cada cierto tiempo para comprobar régimen elástico. Dado que no se conoce a priori el valor real de la RPL se repetirá este paso en los valores de la carga de diseño del 50%, 75%, 100%, 125% y 160%.

7.1.3 RESULTADOS OBTENIDOS.

Se empieza a introducir una carga en el actuador y se observa como la pala se va deformando. Los extensímetros empiezan a recoger valores y una carga de 13279N la pala rompe.

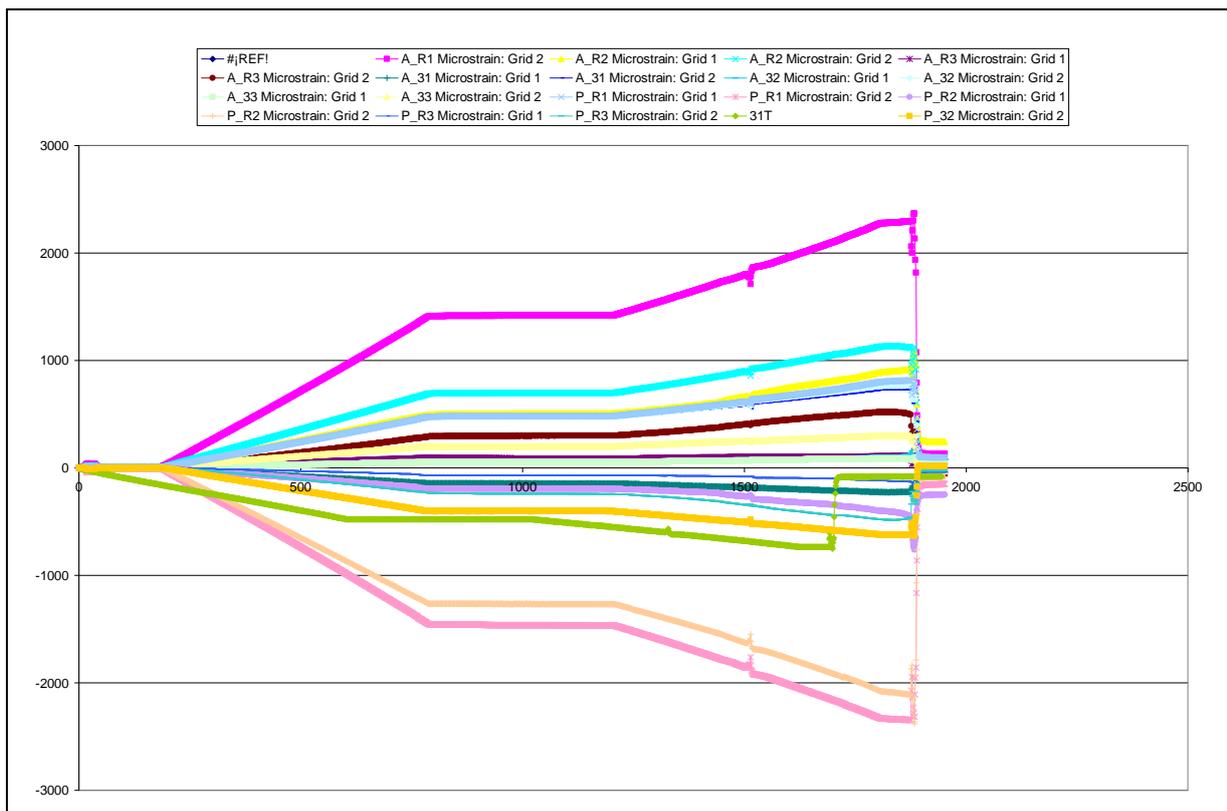


Figura 7-1, Datos obtenidos en el ensayo.

Dado que la carga que debía actuar sobre la cara activa tenía que ser de 18165N y en nuestro ensayo no hemos llegado a dicha carga; se decide comparar los datos obtenidos con los valores FEM, a esa misma carga y con otras cargas intermedias antes de producirse la rotura. De esta manera se podrá analizar el comportamiento de la pala y sacar conclusiones.

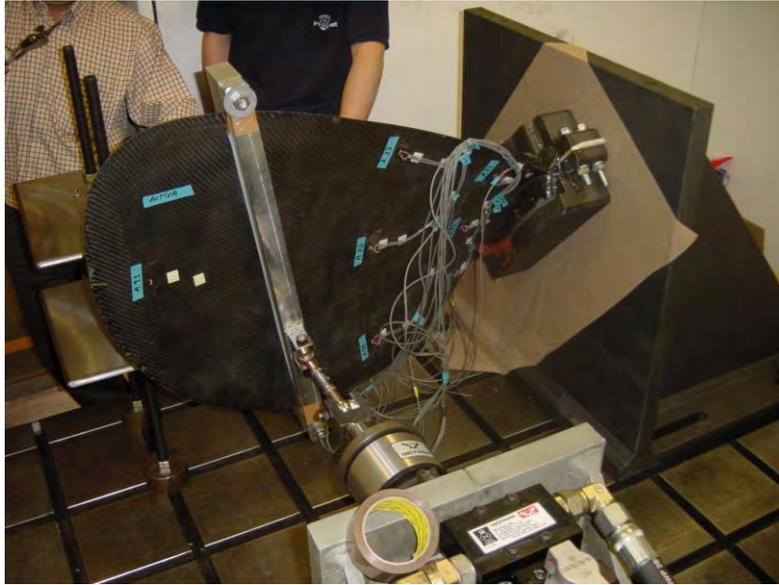


Figura 7-7 extensímetros en cara activa y pasiva durante el ensayo.

7.1.3.1 ANÁLISIS A 4500N.

Este análisis corresponde al 25% de la carga de 18165N. Los extensímetros a esta carga aportan los resultados que se recogen en una tabla.

Los datos que se estudiarán son los que están en la dirección 1 dado que son mayores y coinciden con la dirección 0º de alineamiento del laminado.

En el modelo FEM, se analizan las microdeformaciones de los elementos que se encuentran en la zona que se ha analizado con la roseta. Los datos del FEM son de un modelo que se ha realizado sin incluir la inercia debida al giro de la pala y simulando la carga hidrodinámica como el actuador que se utilizó en la realidad. De manera que la resultante del actuador sea la resultante de la carga hidrodinámica.

Ambos datos se recogen en la siguiente tabla($\mu\epsilon$).

CARGA 4500N			RF
Extensimetro1 AR1	FEM	200	1.47
	ENS	-295	
Extensimetro2 AR2	FEM	180	1.37
	ENS	247	
Extensimetro3 AR3	FEM	120	0.4
	ENS	49	
Extensimetro4 A31	FEM	58	1.34
	ENS	-78	
Extensimetro5 A32	FEM	120	0.32
	ENS	39	
Extensimetro6 A33	FEM	74,5	0.33
	ENS	25	
Extensimetro8 PR1	FEM	-111	2.09
	ENS	233	
Extensimetro9 PR2	FEM	81	1.16
	ENS	-94	
Extensimetro10 PR3	FEM	77	0.41
	ENS	-32	
Extensimetro11 P31	FEM	29	5.52
	ENS	161	
Extensimetro12 P32	FEM	-74	2.79
	ENS	-207	
Extensimetro13 P33	FEM	25,8	2.67
	ENS	-69	

7.1.3.2 ANÁLISIS AL 9000N.

Este análisis corresponde a un estudio al aproximadamente al 50% de la carga de 18165N.

Los datos del FEM son de un modelo que se ha realizado sin incluir la inercia debida al giro de la pala y simulando la carga hidrodinámica como el actuador que se utilizó en la realidad.

Los extensímetros a esta carga de 9000N aportan los siguientes datos ($\mu\epsilon$).

CARGA 9000N			RF
Extensimetro1 AR1	FEM	400	1.59
	ENS	-636	
Extensimetro2 AR2	FEM	360	1.43
	ENS	515	
Extensimetro3 AR3	FEM	240	0.35
	ENS	85	
Extensimetro4 A31	FEM	116	1.26
	ENS	-147	
Extensimetro5 A32	FEM	240	0.29
	ENS	71	
Extensimetro6 A33	FEM	149	0.36
	ENS	54	
Extensimetro8 PR1	FEM	-223	2.2
	ENS	492	
Extensimetro9 PR2	FEM	162	1.24
	ENS	-201	
Extensimetro10 PR3	FEM	154	0.47
	ENS	-73	
Extensimetro11 P31	FEM	58	4.01
	ENS	233	
Extensimetro12 P32	FEM	-149	2.77
	ENS	-414	
Extensimetro13 P33	FEM	51	1.84
	ENS	-94	

7.1.3.3 ANALISIS A 13257N.

Esta carga de 13257N es la elegida para hacer el cálculo ya que si eligiéramos la de rotura 13291N los datos no serían fiables.

Los datos del FEM son de un modelo que se ha realizado sin incluir la inercia debida al giro de la pala y simulando la carga hidrodinámica como el actuador que se utilizó en la realidad.

Los extensímetros que se colocaron durante el ensayo aportan los siguientes datos ($\mu\epsilon$).

CARGA 13257N			RF
Extensimetro1 AR1	FEM	600	1.71
	ENS	-1026	
Extensimetro2 AR2	FEM	540	1.63
	ENS	885	
Extensimetro3 AR3	FEM	362	0.29
	ENS	107	
Extensimetro4 A31	FEM	175	1.29
	ENS	-226	
Extensimetro5 A32	FEM	360	0.30
	ENS	111	
Extensimetro6 A33	FEM	223	0.36
	ENS	81	
Extensimetro8 PR1	FEM	-335	2.37
	ENS	796	
Extensimetro9 PR2	FEM	244	1.63
	ENS	-400	
Extensimetro10 PR3	FEM	231	0.52
	ENS	-121	
Extensimetro11 P31	FEM	88	0.36
	ENS	32	
Extensimetro12 P32	FEM	-223	2.78
	ENS	-622	
Extensimetro13 P33	FEM	77,5	2.95
	ENS	-229	

7.1.3.4 ANÁLISIS DE DESPLAZAMIENTOS.

Este análisis corresponde a los desplazamientos(mm) que se registran en el actuador y en la zona donde están situados los palpadores. Ambos datos junto con los del FEM se representan en la siguiente tabla, según los ciclos de cargas que se efectuaron.

CARGA (kN)	Extremo		Actuador		Observaciones
	Real	Teórico	Real	Teórico	
1 ciclo	0	0,0	0,0	0,0	
	1,5	1,1	0,2	1,3	
	3	2,3	1,8	2,8	
	4,5	3,6	2,8	4,4	
2 ciclo	0	0,0	0,0	0,4/0	
	1,5	1,1	0,2	1,3	
	3	2,3	1,8	2,7	
	4,5	3,5	2,8	4,1	
	6	4,8	3,7	5,6	
3 ciclo	7,5	6,2	4,6	7,2	
	0	0,0	0,0	1,2/0	
	4,5	3,7	2,8	4,2	
	6	5,0	3,7	5,6	
	7,5	6,3	4,6	7,1	
4 ciclo	9	7,6	5,5	8,4	ligeros crujidos
	0	0,0	0,0	3,2/0	
	7,5	6,7	4,6	5,6	
	9	8,1	5,5	7,1	
	10,5	9,6	6,1	8,6	
	12	11,6	7,3	10,6	golpes
5 ciclo	13,5	15,3	8,3	15,1	golpes
	0	1,2/0	0,0	4,1/0	
	9	9,5	5,5	9,2	
	10,5	11,1	6,1	11,1	
	12	12,9	7,3	13,1	
	13,5	14,9	8,3	15,2	
6 ciclo	15	26,8	9,2	20,7	golpes
	0	0,0	0,0	5,3/0	
	1,5	1,4	0,2	1,0	
	3	3,2	1,8	2,8	
	4,5	5,1	2,8	4,8	
	6	7,1	3,7	6,9	
	7,5	9,1	4,6	9,2	
	9	11,3	5,5	11,5	
	10,5	13,5	6,1	13,9	
	12	15,8	7,3	16,4	
	13,5	17,7	8,3	19,3	
	15	20,6	9,2	21,8	
	16,5	24,6	10,0	25,8	fuerte golpe. Se ha despegado parte de la raíz
18		11,8			

Los datos que se introducen del FEM, son del modelo sin incluir la inercia debida al giro de la pala y simulando la carga hidrodinámica como el actuador que se utilizó en la realidad. De manera que la resultante del actuador sea la resultante de la carga hidrodinámica.

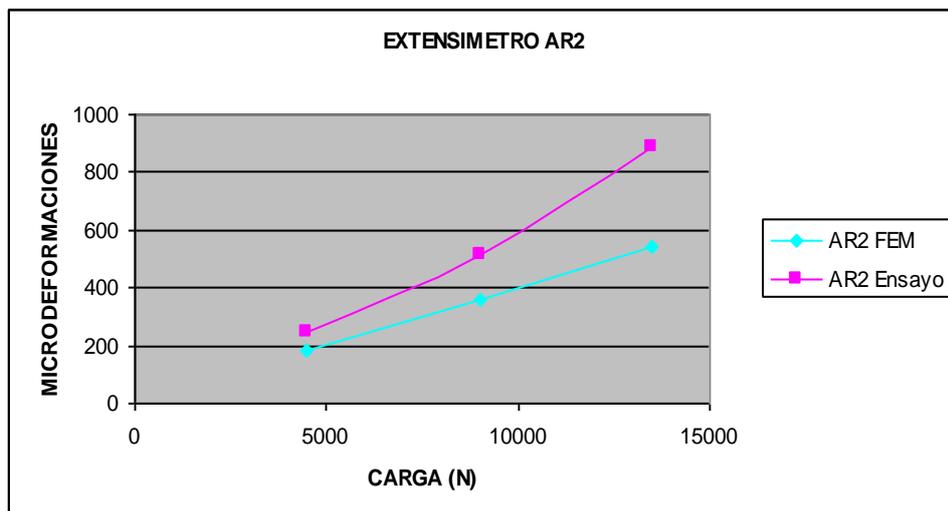
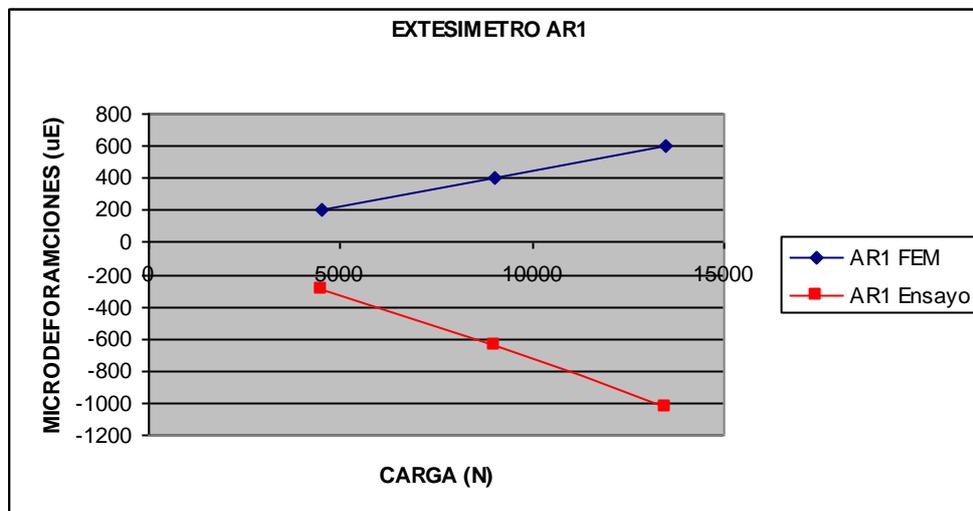
7.2 CONCLUSIONES DEL ENSAYO.

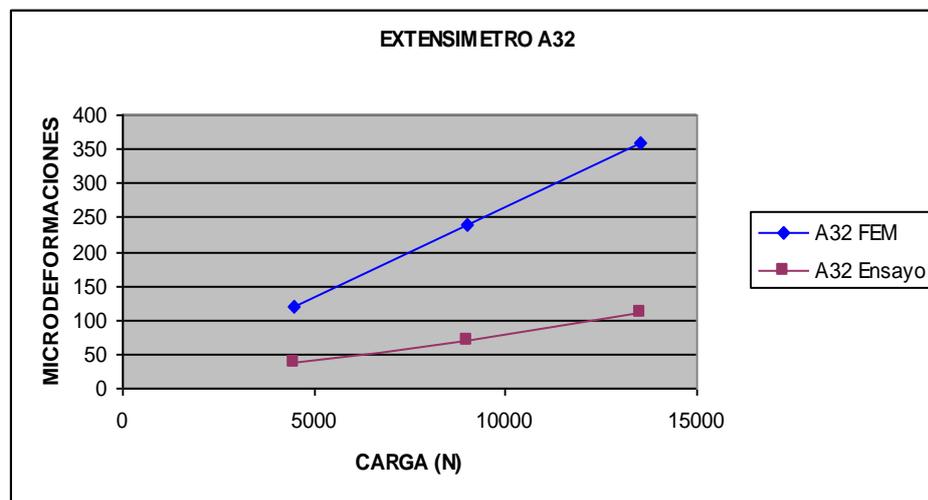
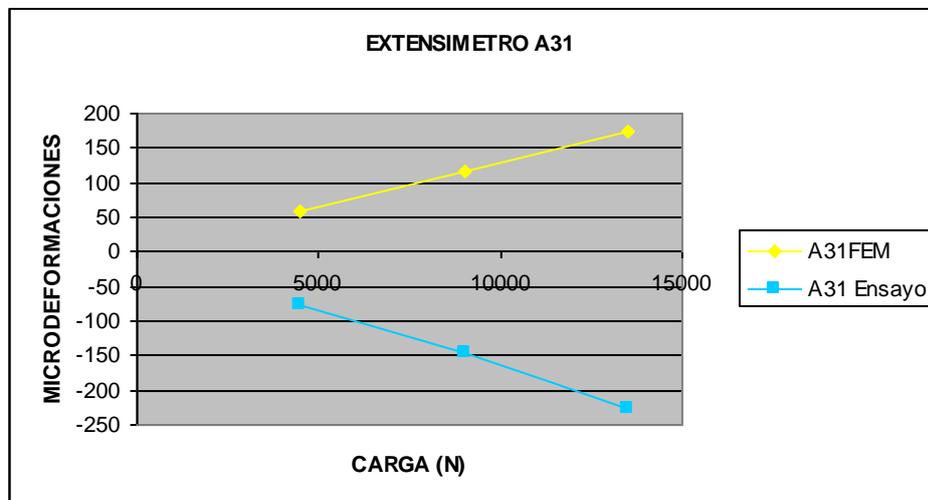
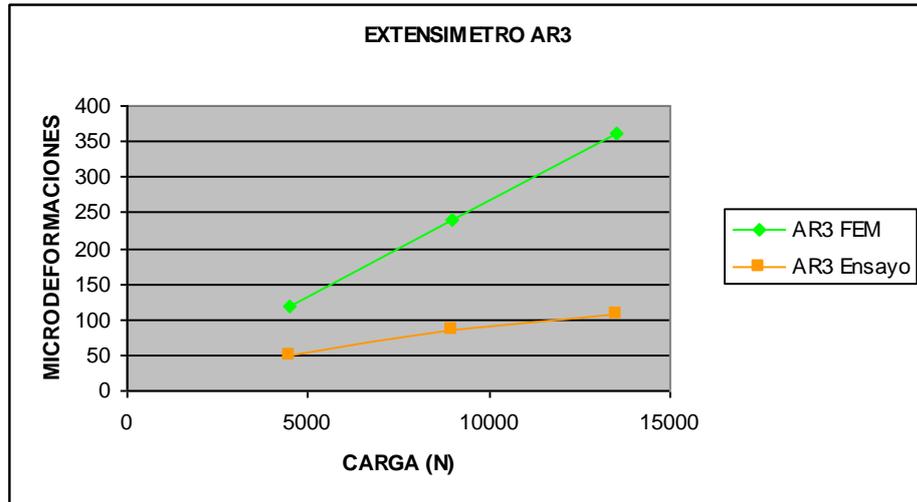
Los resultados de los ensayos no han sido los esperados. Se observó cómo la cola de milano no apoyaba bien en el útil que se diseñó para el ensayo, y por lo tanto existían holguras que provocó que la pala se “revirase” provocando la torsión de la pala. El amarre de la pala que se estaba ensayando no era el más adecuado.

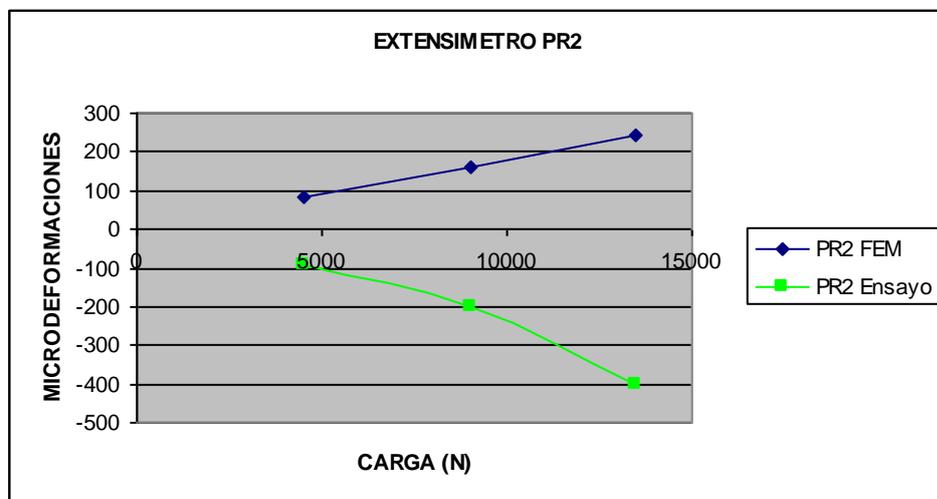
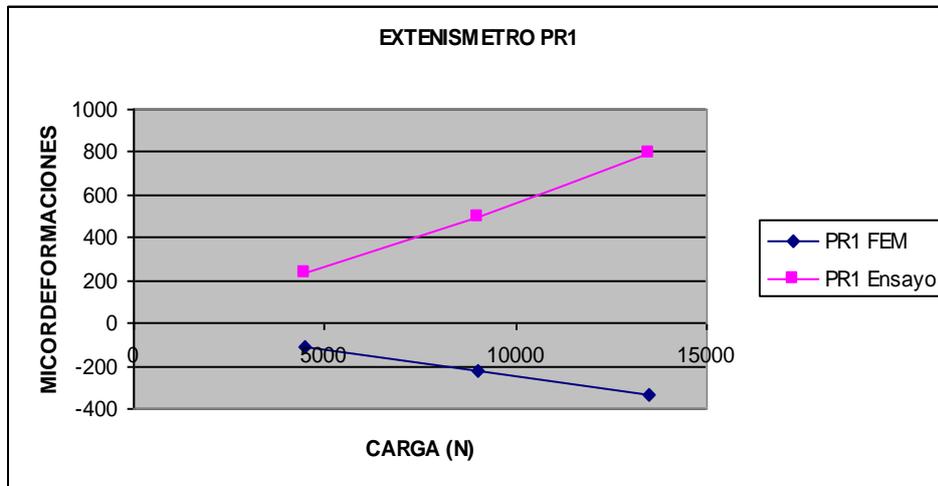
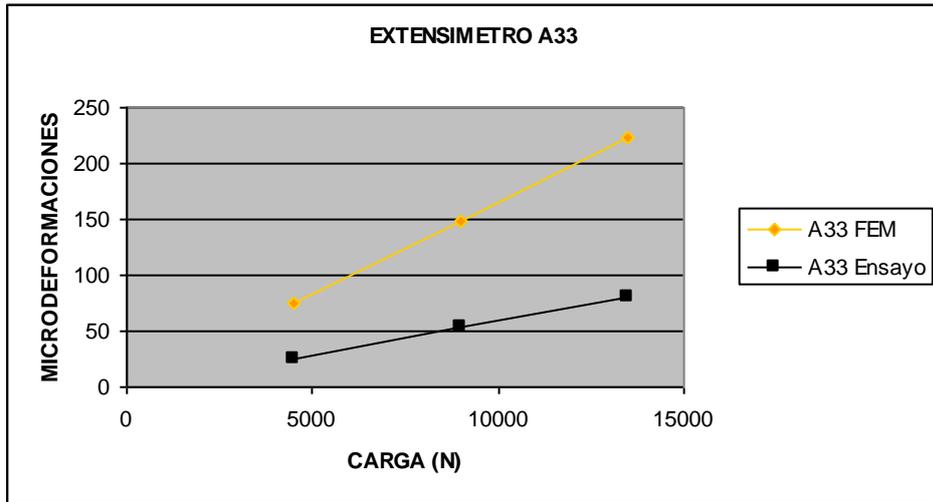
Para realizar una comparativa con los datos que aportan los ensayos, se ha realizado un modelo en el que sólo se estudia la pala bajo la carga hidrodinámica simulándola como el actuador que se utilizó en la realidad. De manera que la resultante del actuador sea la resultante de la carga hidrodinámica. Con este modelo y con los datos del ensayo fallido se llega a las siguientes conclusiones:

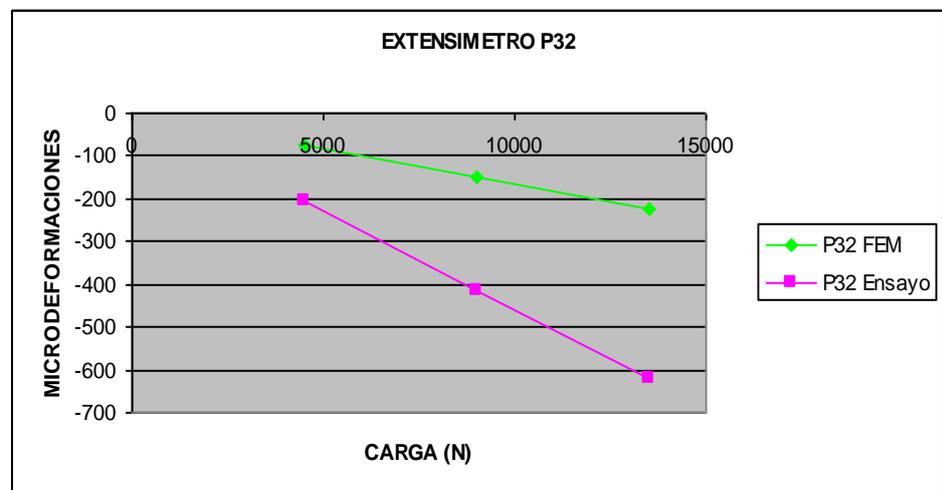
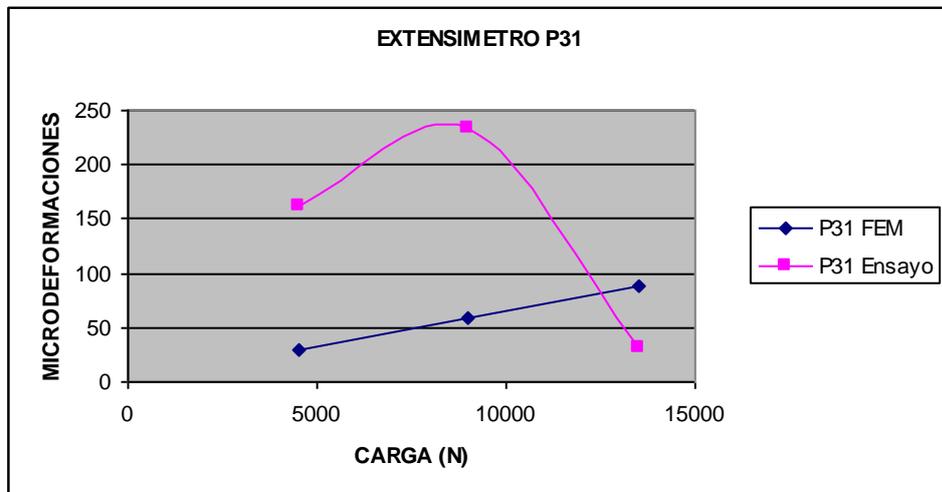
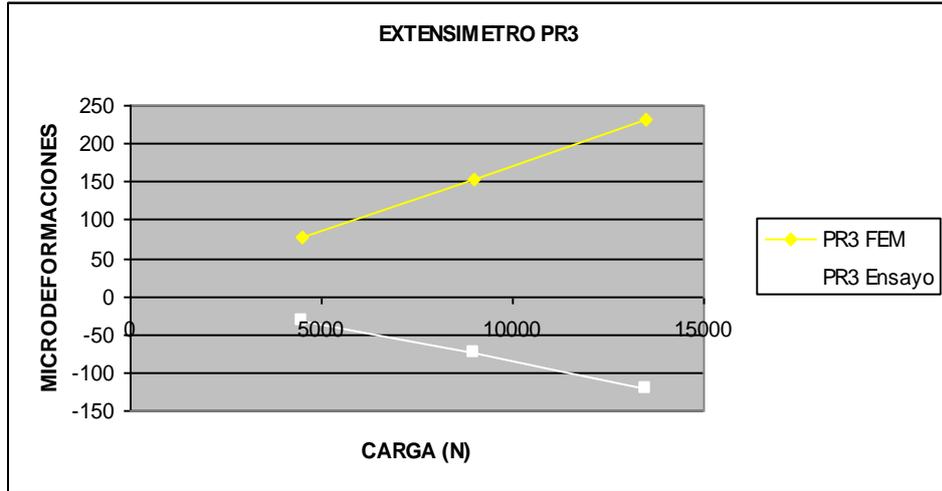
-Conclusiones debidas al ensayo de resistencia.

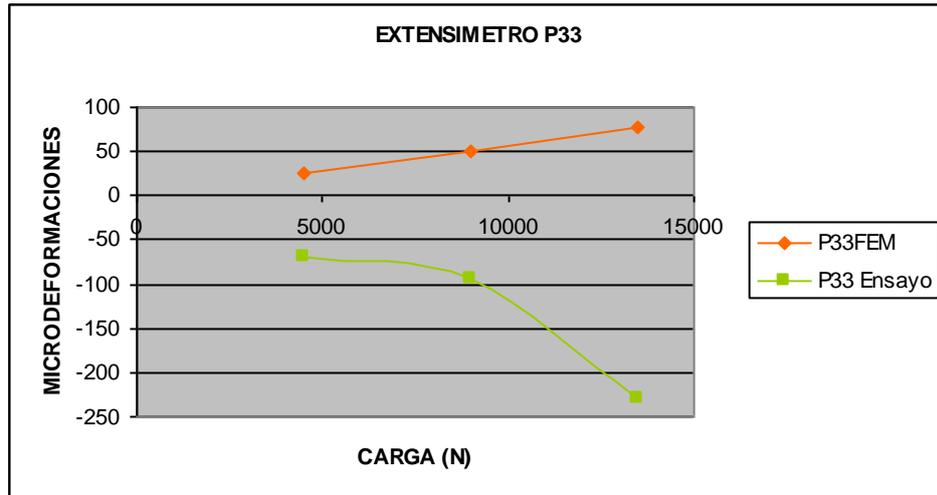
En las gráficas siguientes se representan las microdeformaciones que resultaron del ensayo, con las que aporta el modelo FEM.











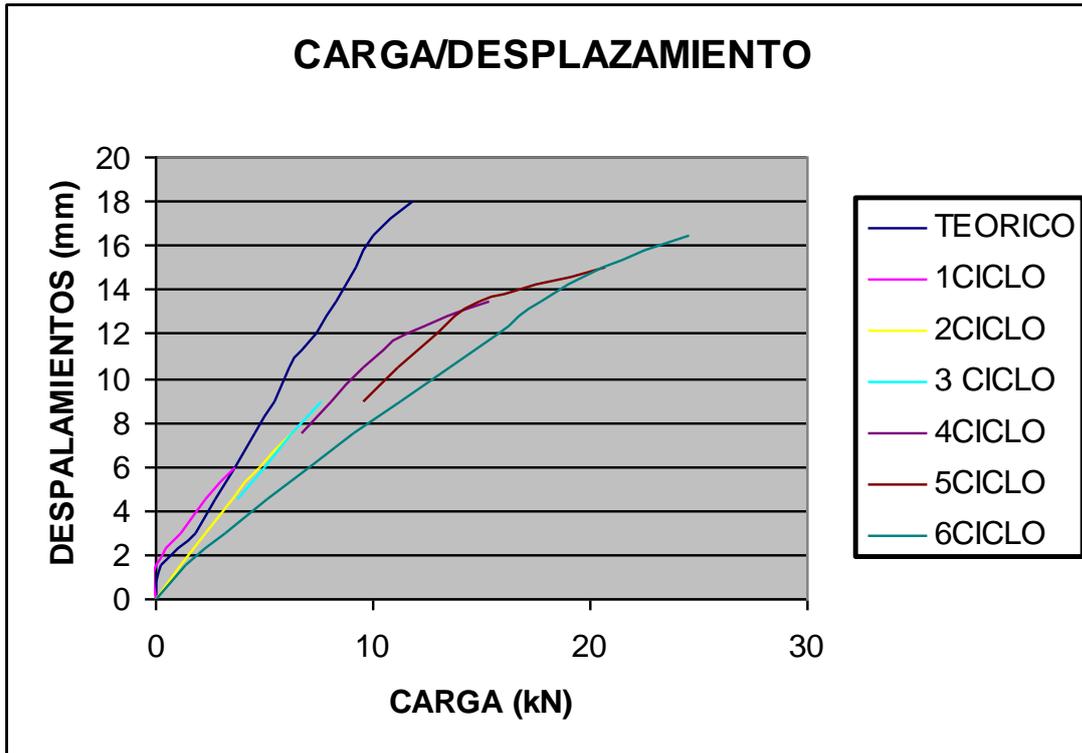
En estas gráficas se observa que la pala efectivamente se revira. Las rosetas AR1 y A31 están realizando lecturas de signo contrario al que indica el FEM. Esto es debido a que la pala no se comporta como una viga en voladizo a la que se le está aplicando una flexión. Sino que la pala se está torsionando, un efecto para el cual no está calculada.

Este efecto de torsión provocó que la pala se despegara a 13291 N de manera que nunca se llegó a la carga de 18165 N. La cual era la de trabajo de la misma. También se observó que la pala se rompió en su base (zona buje) al perder adherencia con el útil de ensayo.

Este efecto de torsión es debido a que el amarre de la pala en el ensayo no es el adecuado. Así pues este ensayo no ha servido para poder hacer un buen análisis de la pala a la carga de trabajo y sacar conclusiones entre los cálculos de FEM y el ensayo.

7.2.1 Conclusiones del ensayo de rigidez.

Por otro lado hay que analizar los datos de la tabla donde se representan las deformaciones debidas a las distintas cargas. Éstos se recogen en la grafica siguiente en la que se observa como en el FEM existe linealidad entre los desplazamientos y las cargas. Por otra parte en los valores del ensayo se aprecia que esa relación lineal de los resultados se pierde. Esto es debido que la pala se está retorciendo y provoca la torsión de la misma, todo esto es debido a un mal amarre de la pala durante este ensayo.



En resumen, el ensayo que se ha realizado no se puede considerar válido, ya que los datos que nos aporta no son suficientes para poder sacar conclusiones del comportamiento de la pala bajo cargas hidrodinámicas.

Se prevé corregir la zona del buje, aumentándole la zona de contacto, para poder realizar otro ensayo en el que la pala se cargue como lo hace en la realidad (a flexión). De esa manera se espera evitar el efecto torsor para el cual la pala no está calculada y se sacarán mejores conclusiones. Una vez que este ensayo salga satisfactoriamente, se continuará con el plan de ensayos.

8 COSTES.

A continuación se detallan los costes de fabricación de una hélice completa por materiales compuestos y la fabricación de una hélice completa en aleación cunial .

GASTOS TOTALES DE HÉLICE COMPLETA EN MATERIAL COMPUESTO			
Unid	Producto	Descripción	Coste €
5	PALA	MATERIALES	5293€
		MANO DE OBRA	6675€
1	BUJE	FUNDICIÓN ALEACIÓN CUNIAL Y MECANIZADO DE ALOJAMIENTOS DE 5 PALAS E INTERIOR	1100€
TOTAL GASTOS			13068€

GASTOS TOTALES DE HELICE COMPLETA EN ALEACION CUNIAL			
Unid.	Producto	Descripción	Coste €
1	Helice completa	Fundición aleación cunial y mecanizado interior del buje para union al eje motor.	9500€
Total gastos			9500€

9 CONCLUSIONES DEL PROYECTO.

Tras el análisis técnico-económico de este proyecto, se pueden realizar los siguientes comentarios a modo de conclusiones finales de un primer estudio.

9.1 LOGROS.

Peso: Reducción de peso de un 66.25%.

De cara a alcanzar los objetivos de ahorro energético y de maniobrabilidad del buque, la reducción del peso en un 66.25% suponen una mejora y avance muy importante.

Mejora del ruido y vibraciones.

Este objetivo está pendiente de su comprobación mediante pruebas en el buque. Esta fase de ensayo se realizará cuando se analice y se ensaye la nueva pala con una mayor zona de contacto.

Coste de la hélice de carbono: 13068 €.

Debido a la dificultad de la fabricación de los utillajes de RTM, a la cantidad de horas de mano de obra que se necesitan, y al alto coste de los materiales compuestos, el coste de la hélice de fibra de carbono que se propone alcanza un coste de 13068 €.

Por otro lado la fabricación de una hélice en aleación cunial alcanza los 9500€.

El coste de la pala en fibra de carbono es menor a 1.5 veces la de cunial. Diferencia que se amortizará en combustible en un corto espacio de tiempo, debido a la reducción de peso tan grande que se ofrece con la hélice de carbono.

9.2 OBJETIVOS DE CÁLCULO.

-Pala de FC menos rígida pero válida.

En el análisis de rigidez de las pala se observa que bajo el caso de carga real (hidrodinámico e inercia), la pala de cunial se deforma menos que la de FC. Esto indicaría que la pala de FC es menos rígida que la de cunial.

No obstante esto no significa que la pala que se propone no sea válida. El dato realmente a tener en cuenta es, si esa deformación de la pala afecta al ángulo de ataque de la misma en el fluido. Como se demuestra en las conclusiones del análisis de rigidez (apartado 6.5.3), la pala de fibra de carbono mantiene el ángulo de ataque dentro de la tolerancia de 3º.

De todos modos, la rigidez de las palas en una hélice no es tan importante como la resistencia. como indica el hecho de que La Sociedad Clasificadora sólo establece ecuaciones para el cálculo de la resistencia y no de rigidez.

-Pala de FC resistente.

Se analiza bajo el criterio cuadrático de Tsai-Wu, el cual demuestra que la pala de material compuesto es tan resistente como lo puede ser la pala de cunial. Ambos factores de reserva son altos.

9.3 ACCIONES FUTURAS.

9.3.1 Diseño de la unión al buje.

Durante el ensayo se observó que la unión al buje de la pala de carbono no es la más adecuada. Para un futuro, se optaría por aumentar la superficie de contacto en el encastre de manera que la pala se comporte a flexión pura y no a flexo-torsión.

En la figura de la izquierda se representa la cola de milano que se propone para aumentar la superficie de contacto con respecto a la que existe actualmente, representada a la derecha.

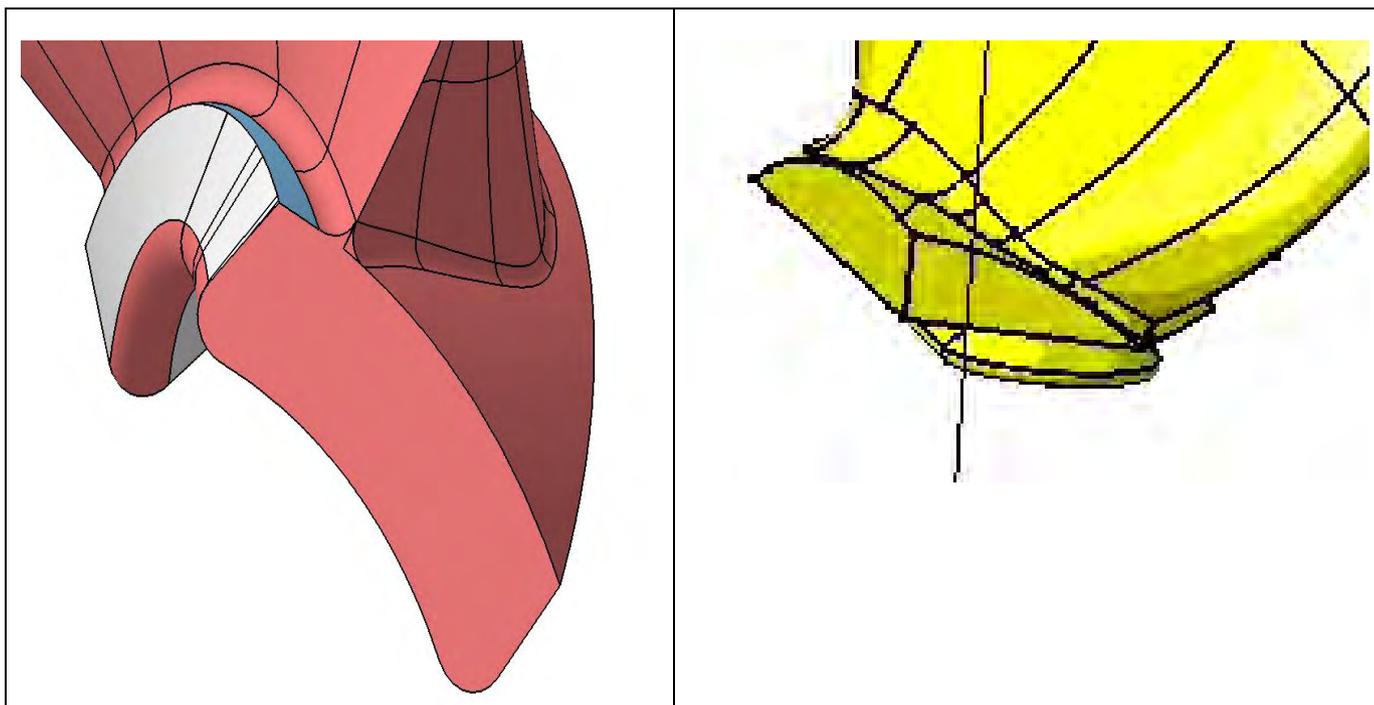


Figura 9-1 Encastre propuesto y encastre actual.

9.3.2 Plan de ensayos.

Tras realizar un ensayo en banco apto, se procedería a continuar con el plan de ensayos establecido, que se compone de las siguientes fases:

- Ensayos en banco.
- Ensayos en buque atracado.
- Ensayos de navegación.

9.3.3 Costera / Comportamiento en servicio.

Tras el diseño y cálculo del prototipo, quedaría pendiente saber su comportamiento en servicio a lo largo de una campaña, para conocer la influencia de factores que no están bajo control y que no han podido tenerse en cuenta a la hora del diseño.

10 BIBLIOGRAFÍA.

MATERIALES COMPUESTOS I Antonio Miravete 1ª ed, 2000. I.S.B.N. Obra completa:84-921349-7-6 I.S.B.N. Tomo I 84-921349-8-4.Dep. Legal Z-1462-2000.

MATERIALES COMPUESTOS II Antonio Miravete 1ª ed, 2000. I.S.B.N. Obra completa:84-921349-7-6 I.S.B.N. Tomo II 84-921349-9-2.Dep. Legal Z-1462-2000.

DETAILED DESIGN OF SHIP PROPELLERS. Gonzalo Pérez Gómez, Juan González-Adalid. Fondo Editorial de Ingeniería Naval del Colegio Oficial de Ingenieros Navales y Oceanográficos. I.S.B.N. 84-921750-3-6 Dep Legal M-24676-98.

APUNTES SOBRE BUQUES PESQUEROS Prof. José Fernando Nuñez Basañez. Escuela Técnica de Ingenieros Navales. Madrid 1994.

MARINE PROPELLERS & PROPULSION J.S. Carlton. I.S.B.N. 075061143X 1ª ed. 1994. Butterworth-Heinemann Ltd 1994.