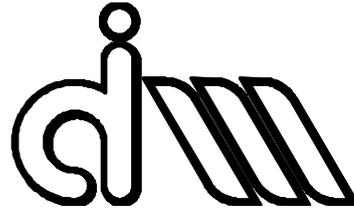


UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales



Trabajo Fin de Máster en Ingeniería Mecánica

CÁLCULO DE LA RIGIDEZ ESTÁTICA DE UNA PALA DE PÁDEL UTILIZANDO
ELEMENTOS FINITOS.

Presentado por: D. Víctor Manuel Vellisco Campos

Dirigido por: Dr. D. Manuel Tur Valiente

Valencia, Septiembre de 2018

INDICE

<i>INTRODUCCION Y OBJETIVOS</i>	4
<i>¿QUÉ ES EL PADEL?</i>	5
HISTORIA DEL PÁDEL	5
OBJETIVO DEL JUEGO	6
<i>NORMATIVA</i>	6
REGLAS BÁSICAS DEL PÁDEL	6
LA PELOTA DE PÁDEL	6
LA PALA DE PÁDEL	7
LA PUNTUACIÓN	7
CAMPO DE JUEGO O PISTA	8
DIMENSIONES DE LA PISTA	8
<i>PALAS Y TIPOS DE PALAS</i>	9
CARACTERÍSTICAS DE LAS PALAS DE PADEL	9
1. FORMA Y BALANCE DE LA PALA	9
2. PESO DE LA PALA	12
3. DUREZA DE LA SUPERFICIE	12
4. TAMAÑOS DE PALAS DE PADEL	12
<i>PARTES Y MATERIALES TIPICOS DE LAS PALAS DE PADEL</i>	13
PARTES DE LA PALA	13
MATERIALES DE LA PALA	14
1. FIBRA DE CARBONO	14
2. FIBRA DE VIDRIO	14
3. EPOXI	14
4. GOMA E.V.A.	15
5. FOAM	15
6. POLIETILENO	15
7. GRAFITO	16
8. FIBRA DE ALUMINIO	16
9. TITANIO	16
10. KEVLAR	16
<i>FABRICACIÓN DE UNA PALA</i>	16
PROCESO FABRICACIÓN PALAS DE PADEL	16
<i>MODELO GEOMETRICO</i>	20
FORMA	20
PLANO	20
<i>PALA DE REFERENCIA EN ANSYS</i>	21

MATERIALES DE LA PALA DE REFERENCIA	25
RESULTADOS	27
1. Puntos de golpeo	27
2. Centro de gravedad.	36
3. Análisis Estático	37
<i>ANALISIS DE LA PALA CON DIFERENTES MATERIALES EN DIFERENTES ZONAS</i>	41
NUCLEO	42
➤ Goma EVA 1	42
➤ Goma EVA 2	43
➤ Goma EVA 3	44
RESUMEN NUCLEO	44
TUBO INTERIOR	45
➤ Fibra de vidrio S	46
➤ Fibra de carbono HM	46
➤ Fibra de carbono HS	47
RESUMEN TUBO	48
SUPERFICIE DE GOLPEO	49
➤ Fibra de vidrio S	49
➤ Fibra de carbono HM	50
➤ Fibra de carbono HS	50
RESUMEN MALLA	51
<i>COMPARACION DE QUE ZONA DA MAS RIGIDEZ, ¿TUBO O MALLA?</i>	52
<i>COMPARACION DE QUE ZONA DA MAS RIGIDEZ, ¿TUBO O MALLA O NÚCLEO?</i>	52
<i>ANALISIS DE LA PALA DE REFERENCIA CON CAPAS EXTRA EN LA MALLA O DIFERENTE DIRECCION</i>	53
1. CAPAS EXTRA	53
2. DIRECCION DIFERENTE	54
<i>ANALISIS DE UNA PALA DE PADEL CON UNA CAPA EXTRA EN EL TUBO.</i>	55
<i>ANÁLISIS ESTÁTICO</i>	57
RESUMEN ANÁLISIS ESTÁTICOS	62
<i>CONCLUSIONES</i>	64
<i>BIBLIOGRAFIA</i>	65

INTRODUCCION Y OBJETIVOS

Este trabajo consistirá en el estudio y comparación de la influencia de diferentes materiales en la rigidez de una pala de pádel, en él se realizarán diferentes análisis de elementos finitos bajo carga estática. Para la realización de estos análisis, se definen 12 puntos donde se supone que la pelota impactara y nos darán las diferentes reacciones sobre la superficie de golpeo.

Estos análisis definirán la fuerza y desplazamiento en varios puntos de la raqueta, de esta forma se podrán obtener diferentes datos generando una media de la fuerza, rigidez y de los desplazamientos obtenidos para cada tipo de material, pudiendo así comparar que material es más rígido y cual menos.

Para empezar, se define una pala de referencia, la cual tendrá una geometría y forma específica, junto con unos materiales base que se definirán antes de empezar. Se obtendrán los datos sobre la pala de referencia, y con estos datos, podemos tener un punto de partida, durante el trabajo se modificarán los materiales en diferentes zonas o partes de la pala y se compararán los resultados con los de referencia para demostrar el cambio en la fuerza, rigidez y desplazamiento debido al golpeo.

El documento está organizado de la siguiente manera: En primer lugar se explicarán datos generales sobre el pádel, algunas de sus reglas, que tipo de pista se utiliza, además se tendrá en cuenta alguna de las reglas del mismo, para llevar a cabo este estudio de comparación ya que las reglas definen como tiene que ser la pala o raqueta de pádel, la forma, el peso,... Se hablará de las formas y tipos de pala existentes, después se describirá el tipo de fabricación al que son sometidas las palas para obtener su forma, cuales son las partes que forman la pala y de esta forma poder diferenciar las zonas donde se utilizarán diferentes materiales, que influirán en el estudio. Más tarde se pondrán los datos referentes a la pala utilizada como base para así poder comparar los demás estudios realizados, estos estudios consistirán en un análisis de elementos finitos donde el material de las diferentes zonas se habrá modificado por otro tipo.

Una vez obtenidos los resultados para los diferentes análisis se pasará a su comparación con los otros para obtener unas conclusiones. Durante los diferentes cálculos se pondrán varias tablas que ayudarán a la hora de reunir los datos, además se utilizarán gráficos para su mejor comprobación y más tarde su posterior explicación.

¿QUÉ ES EL PADEL?

El pádel es un deporte de pelota que se practica de manera individual o en parejas, la manera más común de practicarlo es en parejas. Tiene un sistema de juego similar al del tenis, en donde los jugadores deben pasar la bola por encima de una red, consiguiendo que impacte sobre el campo del contrario.

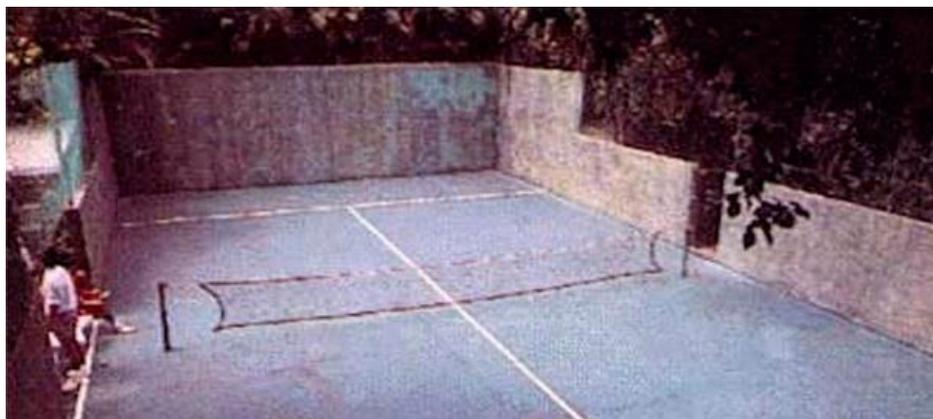


Al igual que el tenis, el pádel está representado por diferentes federaciones. Consta de tres materiales fundamentales para su práctica la pala, la pelota y la pista o el campo de juego, además de unas reglas de juego bien definidas.

El objetivo del pádel es jugar al mejor de tres sets, así que una pareja de jugadores debe vencer dos para ganar el partido.

HISTORIA DEL PÁDEL

El origen del pádel se remonta a los años ochenta del siglo XX. Fue inventado por Enrique Corcuera en Acapulco, México, a finales de los años 60. Tras extenderse por países latinoamericanos y España, este deporte empezó a popularizarse en toda América y Europa. La palabra de origen inglés paddle, que significa “pala” o “raqueta”, se españolizó por “pádel” en poco tiempo.



El primer circuito de pádel profesional surgió en el 2005 bajo el nombre de Pádel Pro Tour (PPT) y en 2012 nació el World Pádel Tour (WPT), el cual se convirtió en la principal competición profesional de este deporte.

OBJETIVO DEL JUEGO

Un partido de pádel se juega al mejor de tres sets, es decir que la persona o equipo debe ganar dos para ganar el partido. Como en el tenis, la persona o equipo que primero gana seis juegos con una diferencia mínima de dos respecto a su rival es el ganador del set.

Si llegasen a empatar a seis se desempataría por tie-break. En el caso de empate a un set, y siempre que se haya establecido así previamente, podrá jugarse el tercer set hasta que un equipo consiga dos juegos de ventaja respecto a su rival, sin tie-break en ningún momento. No obstante, la regla general es que si cada equipo se apunta uno de los dos sets jugados, se aplicará en el tercero las reglas del desempate llamado tie-break.

NORMATIVA

REGLAS BÁSICAS DEL PÁDEL



LA PELOTA DE PÁDEL

Una de las preguntas más típicas cuando comenzamos a jugar al pádel es si se puede hacer con pelotas de tenis. Sí, se puede, pero el reglamento de pádel también establece cómo son las pelotas de pádel y todas sus características tienen algunas diferencias respecto a las de tenis.

Las pelotas oficiales serán solamente aquellas aprobadas y homologadas por las diferentes federaciones nacionales para el deporte del pádel.

Como establece el Reglamento de la Federación Española de Pádel, la pelota deberá ser una esfera de goma con una superficie exterior uniforme de color verde o amarillo. Su diámetro debe medir entre 6,32 y 6,77 cm y su peso estará entre 56,0 y 59,4 g.

Deberá tener un rebote comprendido entre 135 y 145 cm al dejarla caer sobre una superficie dura desde 2,54 m. La pelota deberá tener una presión interna de entre 4,6 kg y 5,2 kg por cada 2,54 cm².

LA PALA DE PÁDEL

Al pádel se juega con palas (también denominadas paletas o incluso raquetas). Las medidas reglamentarias máximas de las palas de pádel son:

- 45,5 cm de largo.
- 26 cm de ancho.
- 38 mm de grosor de perfil.

Las palas de pádel tienen que estar perforadas por un número de agujeros (no limitados) de 9 a 13 mm de diámetro cada uno en la parte central de la pala. Los agujeros pueden tener mayor diámetro, largo o forma si no afectan al juego, se encontraran en una zona periférica máxima de 4 cm medidos desde el borde exterior de la pala.

La superficie de golpeo en una pala no excede los 30 cm de largo y los 26 de ancho y puede ser plana, lisa o rugosa.

El marco (incluido en el mango) solo puede tener adheridos dispositivos para prevenir su deterioro, vibraciones o para distribuir el peso. La pala no puede ser motivo de distracción o molestia para los demás jugadores, por lo que no podrá tener elementos reflectantes o sonoros que de cualquier modo alteren o puedan alterar el normal desarrollo del juego.

Todas las palas de pádel deben tener obligatoriamente un cordón o correa de 35 cm de longitud máxima y que sirve como sujeción a la muñeca como protección contra accidentes.

LA PUNTUACIÓN

El sistema de puntuación en el pádel es sencillo y similar al del tenis.

- Cuando el jugador o la pareja gana su primer punto se anota 15, al ganar el segundo 30, al ganar el tercero 40 y al ganar el cuarto cantará "juego".
- Si ambas parejas han ganado tres puntos (40-40), entonces quedarán "iguales". El tanto siguiente se denomina ventaja a favor del ganador y si lo gana el mismo se adjudicará el juego, si lo pierde, se vuelve a iguales. Así sucesivamente hasta que una de las parejas haya ganado dos puntos seguidos.

Las reglas del pádel establecen que el primero que gane 6 juegos, con un mínimo de 2 de ventaja, se anotará el set. Si se empata a 5 juegos se tienen que jugar dos más hasta que una de las parejas gane por 7-5. Pero si el empate es a 6 juegos se aplica el tie break o desempate.

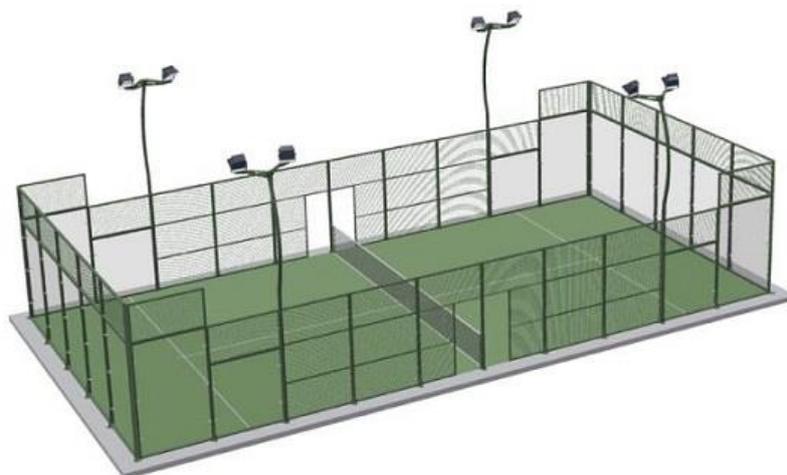
En general los partidos de pádel se juegan al mejor de 3 sets. Si se produce el empate a un set, si se ha establecido previamente, se puede jugar el tercer set sin aplicar el tie break.

El orden de los saques en un tie break es el siguiente:

- Comienza sacando el jugador al que le toque según el orden que se ha seguido en el set y lo hace desde el lado derecho de la pista, jugándose un solo punto.
- Después, respetando el orden de saque, se juegan dos puntos, sacando el jugador contrincante al que le toque desde el lado izquierdo. Así sucesivamente 2 saques cada jugador.

El que gane el tie break se anota el set por 7-6 y en el set siguiente empieza a sacar un jugador de la pareja que no haya empezado sacando el tie break.

CAMPO DE JUEGO O PISTA



DIMENSIONES DE LA PISTA

Según el Reglamento de Juego del Pádel, el área de juego es un rectángulo de diez metros de ancho por veinte de largo (medidas interiores) con una tolerancia de 0,5% y cerrada en su totalidad. Este rectángulo está dividido en su mitad por una red. A ambos lados de ella, paralelas a la misma y a una distancia de 6,94 m están las líneas de servicio. El área entre la red y las líneas de servicio está dividida en su mitad por una línea perpendicular a estas, llamada línea central de saque, que divide esta área en dos zonas iguales. Todas las líneas tienen un ancho de 5 cm y serán de color claro fácilmente distinguible del pavimento.

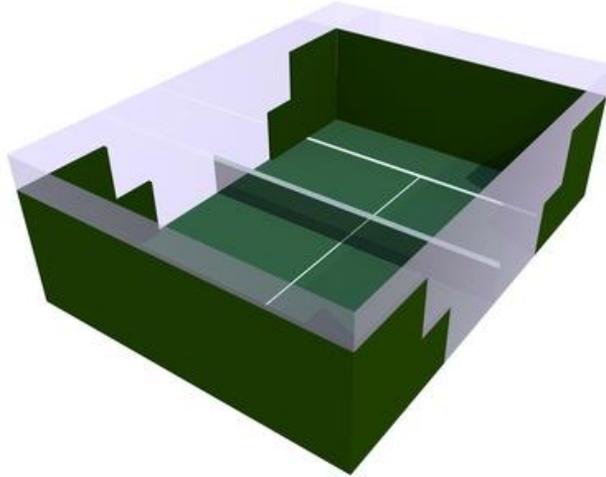
La red tendrá una altura máxima en el centro de 88 centímetros elevándose a 92 centímetros en los extremos, con una tolerancia de 0,5 centímetros en ambos casos. La red estará suspendida por un cable metálico de un diámetro máximo de 0,01 m, cuyos extremos están unidos a dos postes laterales de una altura máxima de 1,05 m o de la propia estructura que lo sujetan y tensan. La red divide la cancha en mitades iguales.

La pista está cerrada en su perímetro interior por fondos de diez metros y laterales de veinte metros. En todos los cerramientos se combinan zonas construidas con materiales que permiten un rebote regular de la pelota y zonas de malla metálica donde el rebote es irregular.

En sus fondos está cerrada por paredes o muros en forma de U con una altura de tres metros.

Las paredes laterales pueden ser rectangulares de tres metros de altura y cuatro metros de longitud en escalón (tipo europeo) o en diagonal (tipo americano), con un descenso de hasta dos metros.

El resto de los lados se cierra con malla metálica que, a su vez, sube por encima de las paredes hasta cuatro metros de altura en todo el perímetro. En las paredes laterales también se admite una altura de cuatro metros en los dos primeros contados desde el fondo de la pista y una altura de tres metros en los dieciséis restantes.



La superficie de la pista podrá ser de hormigón poroso y cemento, césped sintético o moqueta. El color podrá ser verde, azul o pardo-terroso. El césped o moqueta lleva un poco de arena especial (como la de la playa) para que sea más fácil el movimiento sobre la pista. Además se debe llevar un calzado adecuado para no resbalar.

Los accesos a la pista son simétricos respecto al centro de la misma, estando situados en los laterales. Podrán existir una o dos aberturas por cada lado, con o sin.

PALAS Y TIPOS DE PALAS

En el pádel hay muchos tipos de palas, de diferentes formas, materiales, peso. Dependiendo de estos factores puede afectar al tipo de juego de la persona que la utiliza.

La primera diferenciación, y más importante, que se hace en una pala de pádel es según su forma. Existen, por norma general, tres tipos de palas de pádel según su forma: redondas, forma de lágrima y en forma de diamante.

A continuación se muestran una serie de características que dan lugar a los diferentes tipos de pala que podemos llegar a encontrarnos en el pádel.

CARACTERÍSTICAS DE LAS PALAS DE PADEL

Las características que hay a continuación fueron sacadas de diferentes paginas oficiales sobre el pádel, las cuales suelen dar recomendaciones a las diferentes personas basadas en la gran experiencia que tienen con respecto al pádel. [1][2]

1. FORMA Y BALANCE DE LA PALA

La forma de la pala está estrechamente relacionada con su balance (equilibrio). Existen tres formas diferentes de palas de pádel:

- FORMA REDONDA.

Las palas con forma redonda están especialmente recomendadas para jugadores que buscan control. El equilibrio en este tipo de pala es bajo, el peso está distribuido hacia el puño, por lo que son muy manejables. La manejabilidad de la pala es un aspecto fundamental para el jugador que se inicia y necesita mover la pala con facilidad para aprender a realizar correctamente cada golpe. Esto no quiere decir que los jugadores

de nivel alto no elijan este tipo de pala ni mucho menos, ya que es ideal para los jugadores de nivel alto que buscan manejabilidad y control.

Son palas cuyo punto fuerte no es la potencia, pero que en cambio nos ofrecen una excelente precisión. Por todo ello, son palas ideales para jugadores de iniciación o novatos. Son las más fáciles de manejar y cuentan con un punto dulce muy amplio y suelen estar perfectamente balanceadas.



- **FORMA DE LÁGRIMA.**

Las palas de pádel con forma de lágrima tienen un molde similar a una gota de agua. Este tipo de pala está a medio camino entre la forma de diamante y la redonda. El balance es algo menor que en las de forma de diamante por lo que también son más manejables. Se trata del grupo de palas más donde su punto más destacado es que ofrecen la mejor relación control-potencia.

Es la pala más habitual, por lo que es la que más se suele ver a jugadores de todo tipo, precisamente por el excelente equilibrio control-potencia que ofrecen.

El balance suele estar en el medio de la pala. En general, son palas de pádel muy completas y versátiles.



- **FORMA DE DIAMANTE.**

Estas palas se caracteriza por tener la parte superior achatada. Este tipo de pala tiene el equilibrio alto, es decir, el peso está distribuido hacia la cabeza para conseguir mayor inercia en el golpeo (efecto martillo). En este tipo de pala, el punto dulce es más pequeño y son menos maniobrables. Sin embargo, el jugador con suficiente nivel y fuerza consigue una potencia mucho mayor. Por lo tanto, sería recomendable para jugadores de nivel avanzado que buscan potencia.

Las palas de diamante están recomendadas para jugadores de ataque a los que les gusta atacar la red desde todos los ángulos. El golpe más beneficiado con estas palas es el remate. El balance está situado en la parte superior de la pala, y por eso se les suele llamar palas “cabezonas”. Por eso, se recomienda que sean palas ligeras para que se puedan mover con mayor facilidad.



A continuación se puede observar en la siguiente foto donde se encuentra el balance en cada Pala



En la siguiente foto podemos observar donde se encuentra el punto de que ofrece una mayor potencia en la pala, también conocido como “Punto Dulce”



2. PESO DE LA PALA

No existe un peso adecuado cada usuario tiene un peso de preferencia para sus características. La palas con menos peso tienen mejor movilidad, proporcionando mejor respuesta, a cambio de esto la pala pierde potencia, en cambio una pala más pesada costará más moverla, pero dará más potencia en el impacto.

El balance de la pala además de estar relacionado con la forma de la pala (diamante más peso, redonda menos peso), el peso también afectará al balance.

Como ejemplo se muestra una tabla con recomendaciones de peso y forma de la pala en función del nivel de juego, sexo y prioridades del jugador. Que se ha obtenido de [4] basada en la experiencia de jugadores de pádel.

NIVEL	PE SO (Hombre)	PE SO (Mujer)	PREFERENCIA Potencia/control	FORMA
INICIACIÓN	360-370 g	345-355 g	Control	Redonda
INTERMEDIO	365-375 g	350-360 g	Control	Redonda
	360-370 g	345-355 g	Polifacética	Lágrima
AVANZADO	370-390 g	355-375 g	Control	Redonda
	365-385 g	350-370 g	Polifacética	Lágrima
	360-380 g	345- 365 g	Potencia	Diamante

3. DUREZA DE LA SUPERFICIE

La dureza de la superficie afectará al tipo de juego, las palas de pádel blandas no necesitarán mucha fuerza para dar una mayor potencia, pero dificultarán el control. La dureza también influye en la vida de la pala, si es más blanda, suele tener menos vida útil, para las palas con mucha dureza es lo contrario, se necesitará aplicar más fuerza para dar potencia a la bola, y durará más.

4. TAMAÑOS DE PALAS DE PADEL

Como referencia inicial se van a definir tres tamaños:

- OVERSIZE
- MIDSIZE
- CLASSIC

Una vez escogida la forma de la pala, además, se puede elegir el tamaño, de esta forma la pala puede tener diferentes resultados a la hora del juego, dándole o más control o más potencia al usuario.

1. OVERSIZE.

Si una pala tiene un tamaño oversize, cuenta con una zona de recepción más grande y potenciará los golpes del jugador. Al dar un plus en potencia, se deberá tener una gran técnica para poder controlar los golpes ya que irán con más velocidad.

El tamaño oversize ofrece la posibilidad de jugar con mayor seguridad sobre bolas que no vayan centradas. Ayuda a poder golpear con mayor potencia en golpes en los que el armado se queda corto.

2. MIDSIZE.

La Midsize es la medida intermedia entre la oversize y la classic. Combina lo mejor de ambos tamaños, y dependiendo de cómo impacte la pelota se obtendrá más control o más potencia.

Este tipo de tamaño está siendo el más popular entre las marcas de pádel por su versatilidad y equilibrio.

3. CLASSIC.

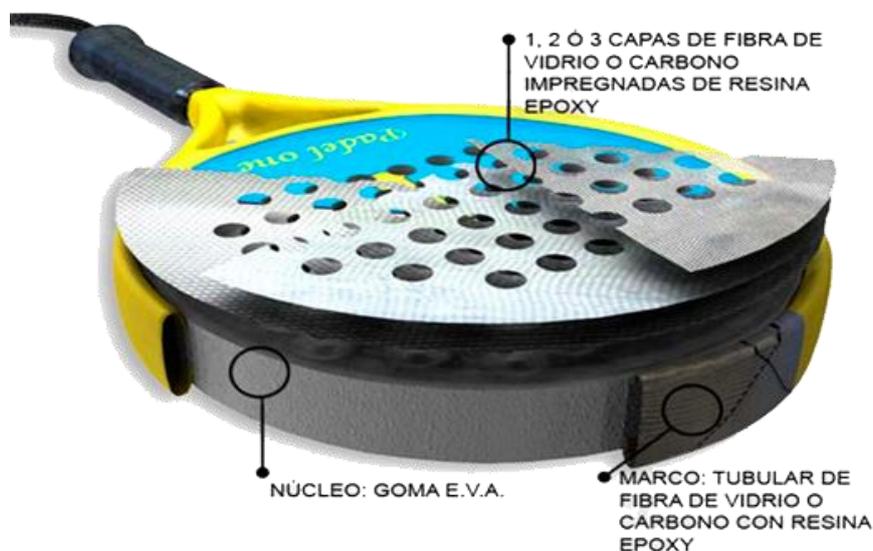
El tamaño classic cuenta con una cabeza de pala muy reducida que favorece un mayor control sobre el golpeo y permite al jugador ejecutar golpes con mayor precisión. De esta forma se facilita que se pueda jugar con mayor precisión sobre el rival y se puedan ajustar los golpes al máximo.

Esta tipo de pala cuenta con un punto dulce más pequeño que los otros tamaños, y en situaciones en las que vayamos un poco más forzados nos va a costar más sacar las bolas.

PARTES Y MATERIALES TÍPICOS DE LAS PALAS DE PADEL

PARTES DE LA PALA

Una pala de pádel está compuesta por diferentes tipos de materiales, que serán los que le darán, las características necesarias para poder utilizarse en el juego.



Como podemos observar en la foto anterior, tiene 3 partes características:

- El núcleo, que en la imagen anterior es de Goma EVA
- El marco o tubo, que como podemos ver puede ser de fibra de vidrio o de carbono con resina epoxi
- Y la superficie de golpeo, que puede ser de fibra de carbono o vidrio impregnadas en epoxi.

MATERIALES DE LA PALA

Una pala de pádel está hecha con diferentes tipos de materiales como se aprecia en las diferentes partes que tienen, a continuación veremos los tipos de materiales más comunes de las palas con una breve explicación de cada uno. Los primeros 5 materiales de los que hablaremos son los más comunes a la hora de fabricar palas de pádel.

1. FIBRA DE CARBONO

Este tipo de fibra utilizada en calidad aceptable proporciona resultados muy buenos en cuanto a ligereza y resistencia, de ahí su uso en fórmula 1, motociclismo y otros muchos deportes. No obstante muchos opinan que en el pádel sólo debe aplicarse a los marcos, ya que en las caras el carbono ofrece más pegada pero menos salida de bola. Se utiliza para conseguir mayor ligereza, resistencia y rigidez.

2. FIBRA DE VIDRIO

El material por excelencia en la fabricación de palas, algo más flexible que el carbono pero también menos ligero. Combinado con el carbono ofrece unas cualidades excepcionales con una resistencia muy buena a los impactos. Es más elástico que la fibra de carbono, por lo que proporcionará más salida de bola y menos pegada. Al poseer cualidades de flexión es ideal para colocar en la superficie de impacto de las palas de pádel, aunque muchas marcas también lo usan para los marcos.

3. EPOXI

Resina líquida y densa formada por compuestos líquidos y pegajosos que se utiliza para la formación compacta de las fibras. En la cadena de fabricación de una pala de pádel, se aplica

sobre todas las fibras que componen la pala, antes de ser introducida en el horno. Es el responsable directo de que la pala se convierta en un bloque homogéneo. Una vez que sale la pala del horno, la dureza del epoxi es sobresaliente. También se aplica en añadidos de barniz y pinturas para hacerlos más resistentes e impermeables

4. GOMA E.V.A.

Junto con el FOAM, son los materiales más usados en la fabricación de palas de pádel, se utilizan para en el núcleo de la pala. Es una goma cuya principal propiedad es la de la absorción de impactos y su componente principal es el látex, una resina que se extrae de arbustos o del petróleo, que con el calor se vuelve pegajosa y con el frío quiebra con facilidad, por lo que después de haber sido tratado inicialmente en planchas hay que añadir etil-vinil-acetato (EVA). Hay diferentes densidades, lo que hace que sea más o menos compacta, rígida, flexible, blanda, elástica... Los efectos en una pala de pádel serían de más o menos flexión al impacto con la bola, aportándonos diferentes sensaciones de golpeo, potencia, control... Las palas de EVA serán, en teoría, las de mayor control y vida útil, ya que es el material menos elástico. Tendrán una gran pegada y una menor salida de bola que las palas de FOAM.

Dentro de la EVA, hay distintas durezas: EVA Hyperasoft (la más blanda), EVA Supersoft... la goma se deforma mínimamente al contacto con la bola, lo que nos obliga a golpear con más fuerza para obtener la misma velocidad de bola, pero con la ventaja de que no tendremos un punto límite, en relación a la velocidad que podamos imprimir a la bola, tal como ocurre con el foam. Además, la palas de eva son más duraderas y sus acabados son de una mejor calidad.

5. FOAM

Junto a la EVA, son los materiales más usados para el núcleo de la pala. Es el término coloquial que se da a la resina sintética obtenida por condensación de diferentes tipos de poliéster, por eso también es llamado "espuma de polietileno", y se caracteriza por su baja densidad. Técnicamente la goma foam es espuma de poliestireno, un polímero termoplástico que se obtiene de la polimerización del estireno. Si llevamos esta definición al mundo del pádel, obtenemos una pala de tacto más blando al de la goma eva, que nos ofrece una igual salida de la bola con menor fuerza. Esto se debe a que el poliestireno tiene una mayor capacidad de absorción que permite, además, disminuir las vibraciones del golpeo, lo que repercute, por tanto, favorablemente para aquellos jugadores que sufran de brazos cargados. Las palas de foam tendrán una buena salida de bola al hacer efecto muelle, pero este mismo efecto hace que no sean palas de mucha pegada, ya que el compuesto absorbe parte de la fuerza que nosotros proporcionamos. Son menos duraderas y sus acabados son de menor calidad, ya que el material está en continua contracción-dilatación. Al ser más blandas tienen menos control.

6. POLIETILENO

Es un compuesto más duro que el FOAM, pero más blando que la EVA. Las palas con este material tienen más pegada pero menos salida de bola que las de FOAM, y tienen una vida útil mayor, son bastante duraderas por lo general. Tienen un control intermedio entre el FOAM y la EVA. En definitiva, no son palas ni duras ni blandas, con mayor pegada que el foam pero menos que la EVA, y con una durabilidad muy aceptable.

7. GRAFITO

Es usado para los marcos sobre la fibra de vidrio como refuerzo en zonas de la pala donde queremos que tenga una rigidez extra como en el marco, corazón y zonas de torsión extras...

8. FIBRA DE ALUMINIO

También llamado alufiber, es un material más duro que la fibra de vidrio, pero más blando que el carbono. Si se mezcla con carbono se obtienen muy buenos resultados tanto en potencia como en control, produciendo un característico ruido metálico.

9. TITANIO

En el pádel se puede añadir a la pala en forma de polvo mezclado con la pintura con el término de Titanate, dust titanium...En el mundo del pádel aporta firmeza y resistencia sin incrementar en demasía el peso del conjunto de la pala, proporcionando mayor durabilidad. Se suele aplicar en forma de polvo mezclado con la pintura.

10. KEVLAR

Es una tela con un tratado especial que la convierte en una de las más resistentes en la actualidad. Por ser bastante rígida, es muy costoso trabajarla, con lo que se puede añadir como refuerzo adicional en alguna zona concreta del marco de las palas de pádel y en ocasiones puntuales en el plano de la pala. El kevlar trenzado con carbono da unos resultados excepcionales de durabilidad. Actualmente pocas marcas lo utilizan, ya que es demasiado duro, más que el carbono y el vidrio, lo que le da una potencia extraordinaria y buen control pero poca salida de bola.

FABRICACIÓN DE UNA PALA

La fabricación de las palas de pádel tienen un aspecto fundamental que encarece este producto que es que la mayoría de las labores se hacen a mano sin prácticamente maquinarias, con lo cual lleva mucha mano de obra cada unidad.

PROCESO FABRICACIÓN PALAS DE PADEL

El primer proceso para comenzar la fabricación de una pala es cortar el molde de goma eva o de foam o de polietileno en tamaño y forma que quieras tener en la pala, ya sea redonda o de lágrima o diamante que son las principales formas. Luego a este molde se le troquela.

Se usa una matriz dividida en dos partes, a estas partes se les unta un desmoldante para poder despegar la pala una vez terminado el primer proceso y evitar daños o desperfectos.



En la matriz se coloca primero unas láminas de resina epoxi con fibra de vidrio o carbono. Dependiendo de la cantidad de láminas que pongamos, tendrá unas especificaciones u otras.





Después se coloca el marco tubular enrollara la goma eva y hará que el exterior tenga más fuerza, una vez puesto el marco se pondrá la goma eva en su interior, y se cierran las dos matrices

A continuación se aplica calor mientras por el marco tubular se hace pasar aire para hacer que mantenga la forma y no queden superficies defectuosas, durante esto el calor hace que se fusionen los materiales entre si obteniendo la forma final de la pala.



Una vez fusionado los materiales primarios y enfriada la pala, se le pasan una lima para quitar las rebabas o asperezas y se coloca masilla plástica en los marcos para eliminar desperfectos y dejar la superficie lisa. Este proceso es de suma importancia ya que es la base para un resultado óptimo y unos acabados de maravilla.

Por último se realiza la etapa de pintado y decoración de la pala

Una vez terminado el proceso anterior, y verificado que la pala está perfectamente fabricada con una base sólida y prolija se procede al siguiente paso, que es agujerear la pala y pintarla en unos casos, o colocarle un vinilo y agujerearlas en otros caso, dependiendo el tipo de pala que queramos hacer.

La gran mayoría de las palas se pintan y el marco de un color y en las caras superficiales se colocan pegatinas con el diseño realizado en el ordenador para darle esa terminación estética particular de cada modelo. Una vez definida y colocada se pinta con una laca transparente para fijar, hacer más resistente la cara de la pala.



Por último se pondrá el grip de la pala



MODELO GEOMETRICO

A continuación describiremos la pala de pádel que utilizaremos para conseguir los diferentes resultados. La pala que se ha utilizado como modelo es la siguiente:



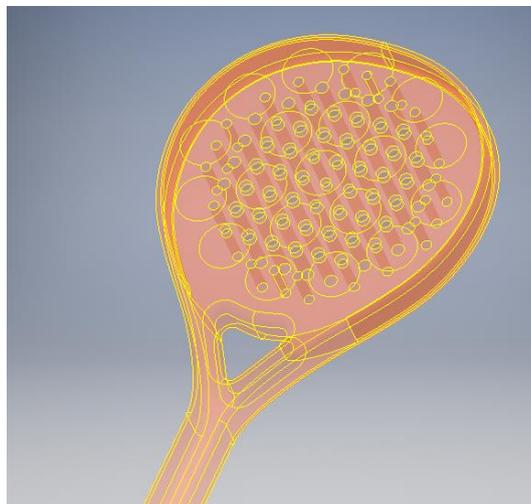
A continuación se describirá la forma que tiene la pala, además de un plano en 3D, el cual se ha realizado mediante el programa Inventor, para tener un modelo el cual poder utilizar en ANSYS.

FORMA

La pala de pádel que se ha utilizado como modelo aunque parezca que tiene forma redonda a simple vista, en la parte superior podemos observar cómo se achata un poco y en los laterales vemos que es algo más ancha, dándole la forma del segundo tipo, es decir, forma de lágrima.

PLANO

Como se ha mencionado antes, se ha utilizado el programa inventor y su capacidad para generar superficies para realizar la geometría de la pala y así poder utilizarla como base a la hora de utilizar el programa ANSYS, en el cual se realizaran todas las pruebas necesarias para este trabajo. Además en este paso también añadiremos las diferentes áreas que utilizaremos como zonas donde golpearía la pelota, estas zonas son los círculos que estarán en la superficie de golpeo que se utilizara.



PALA DE REFERENCIA EN ANSYS

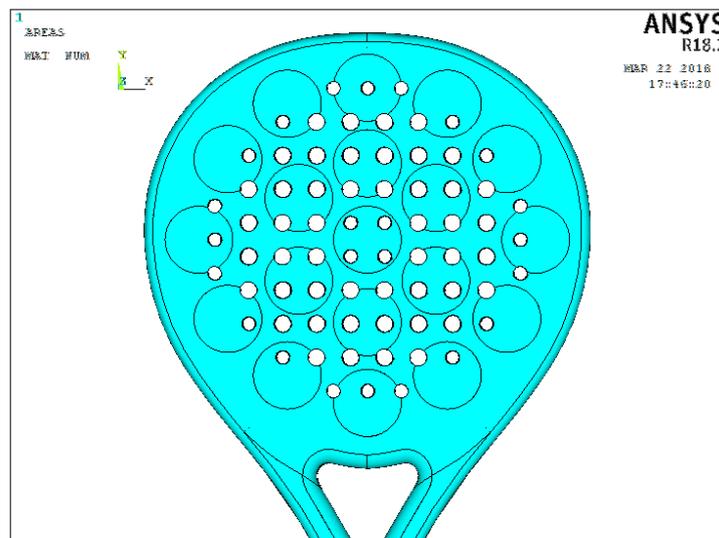
Una vez tenemos ya el modelo en Inventor procederemos a pasar los datos a ANSYS mediante una importación que ofrece el mismo programa.

De esta forma conseguiremos tener las áreas de la pala que necesitamos sin tener el volumen interior que definiremos nosotros mismos en el programa ANSYS mediante las áreas que se generan con este paso.

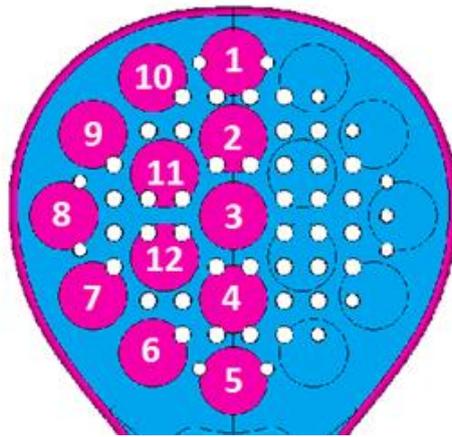


Una vez tenemos la pala en ANSYS quedaría algo como la foto anterior, en la foto anterior hemos utilizado la vista de las diferentes áreas que se han generado y nos ayudaran a realizar este trabajo.

En la siguiente imagen veremos mejor las diferentes zonas de golpeo, se utilizaran las del centro y las de un lateral, debido a que como la pala es simétrica no hace falta saber las fuerzas que se generaran en un lateral ya que serán las mismas en los 2 laterales.



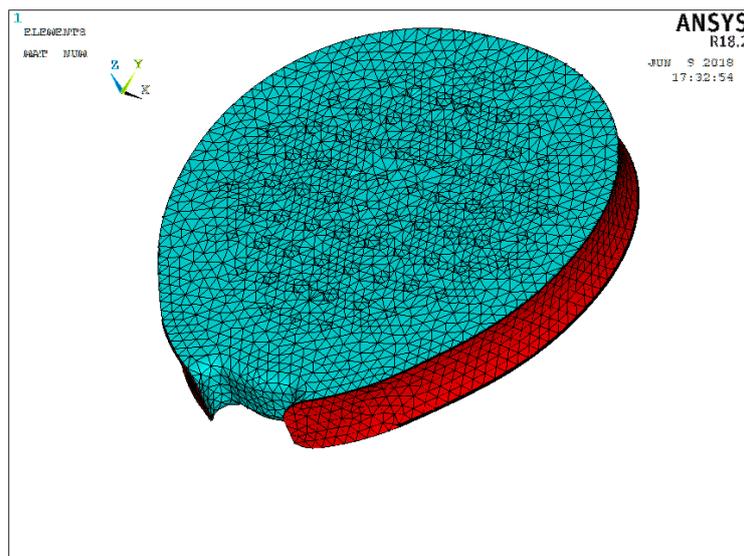
Las zonas que utilizaremos para el calculo son las siguientes y en este orden.



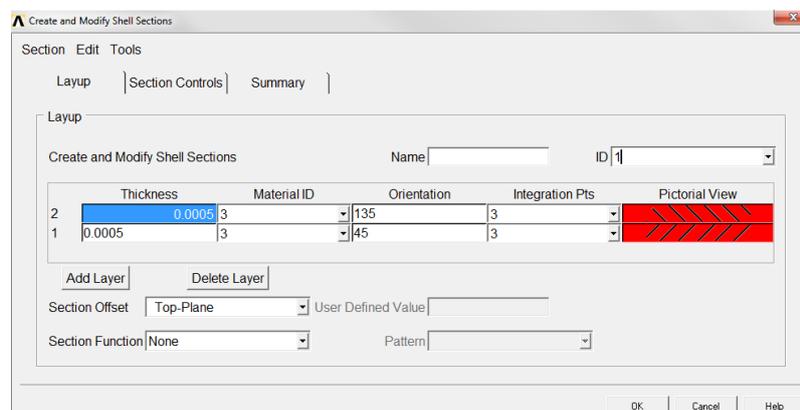
Con esta selección de zonas se utilizarán las macros creadas para el cálculo de esta pala.

Una vez definida la pala y las áreas de las diferentes zonas de impacto, se divide en 4 zonas que se utilizarán a la hora de definir los materiales y el número de capas que se utilizan.

La primera zona, que se ha definido es la parte del tubo que está más cerca del núcleo, en la siguiente foto esta zona será la parte roja de la imagen.

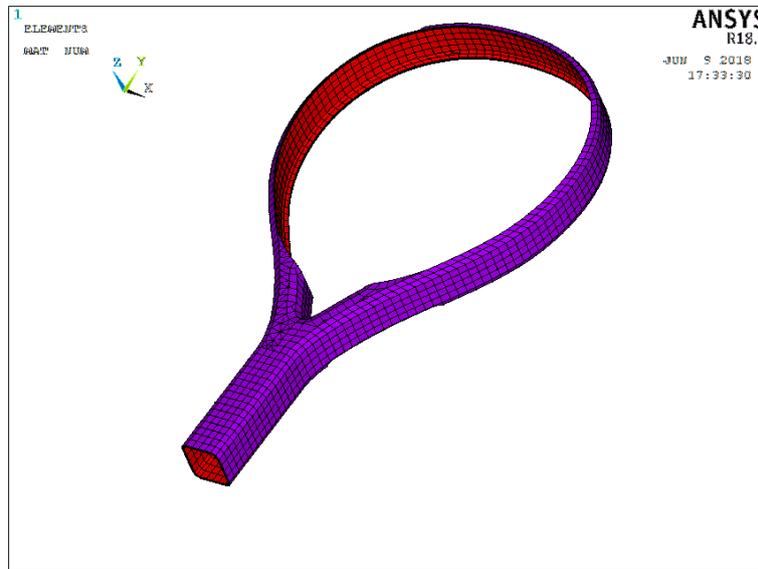


En ansys modificaremos la sección de los elementos y se pondrá de la siguiente forma:



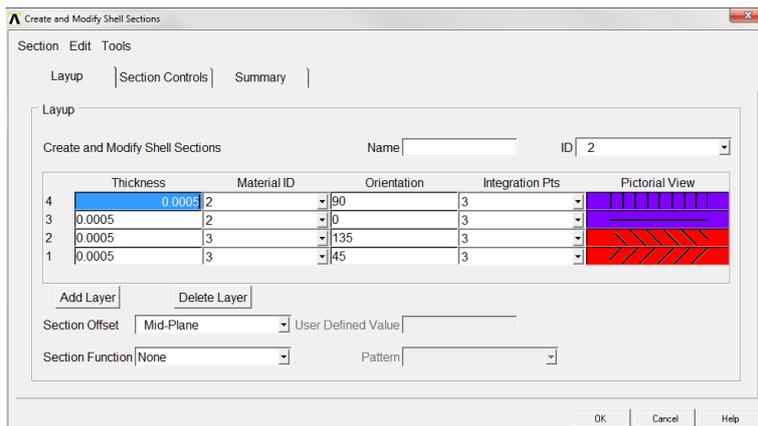
Como se ve en la imagen anterior, se utilizan 2 láminas de 0,5 mm, con direcciones de 45° y 135°, de esta manera podemos imitar que el tubo está formado el compuesto en forma de tejido, además debido a que es un tejido utilizaremos una formula específica a la hora de calcular sus propiedades para el análisis.

La segunda zona es la parte exterior del tubo y además también las láminas utilizadas para recubrir la pala sobre el tubo.



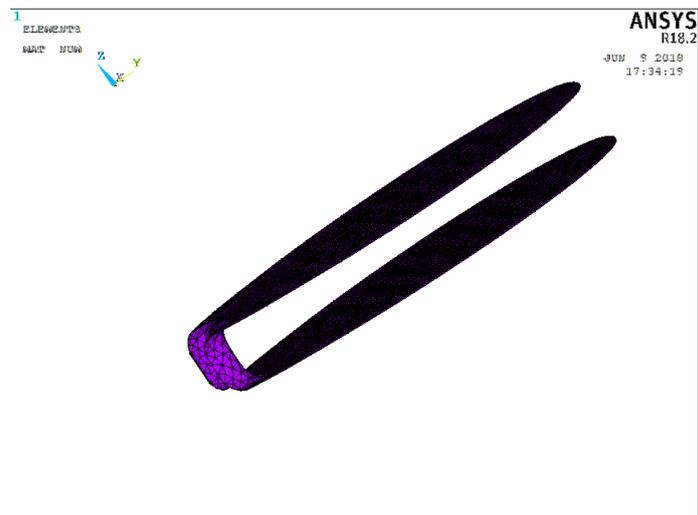
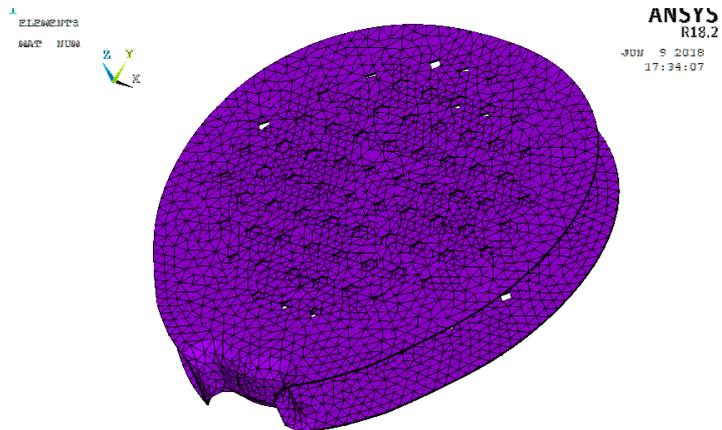
Como se ve en la imagen anterior, los elementos rojos son la parte del tubo, y la morada la zona que recubre la pala, además este color morado se utiliza para la malla que describiremos en la siguiente zona.

A continuacion vemos como esta dividida la seccion de toda la zona.



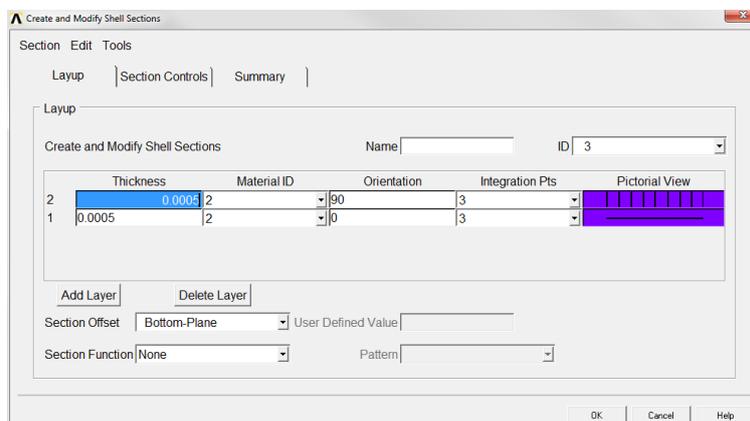
Como se observa en la imagen aquí también hemos utilizado un espesor de 0,5 mm tanto en la parte del tubo (zona roja), como la parte de la malla (zona morada).

La tercera zona, es la malla que se utiliza en la pala de pádel, esta malla será representada en Ansys de color morado.



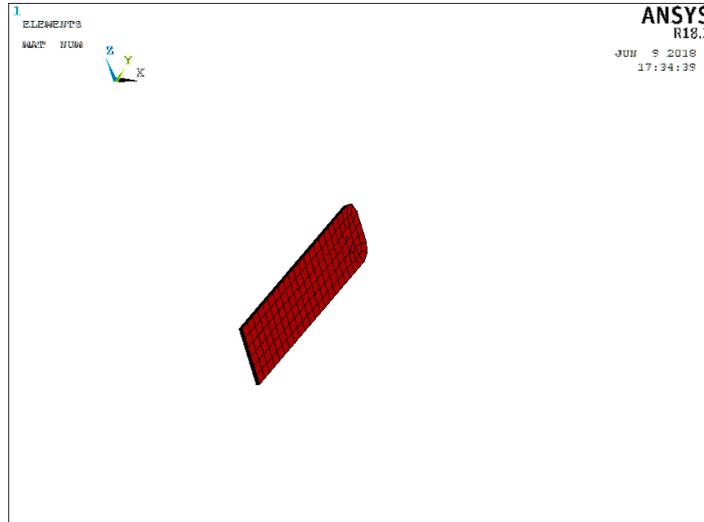
Como se ve en la imagen anterior la zona de la malla es básicamente la zona de golpeo de la raqueta.

En la siguiente imagen vemos como se encuentra la sección de dicha zona.

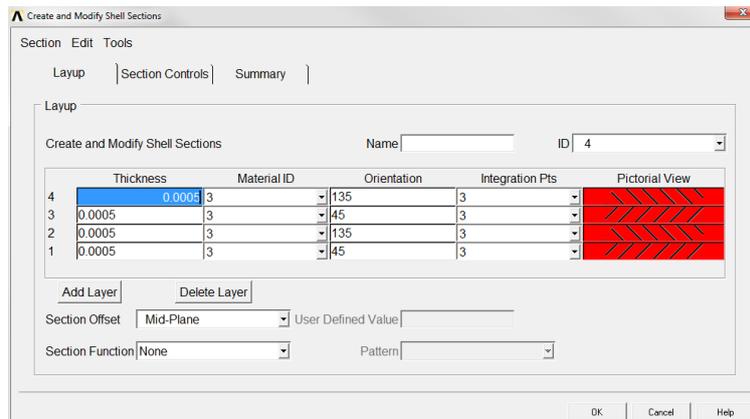


Para esta zona hemos utilizado un espesor de 0.5 mm y una dirección en cada lámina de 0° y 90°

La cuarta y última zona, es la que se encuentra en el mango, esta zona hace como si fuera la unión del tubo a la hora de rodear el núcleo.



Como se ve en la imagen es solo la zona de unión del tubo en el mango.



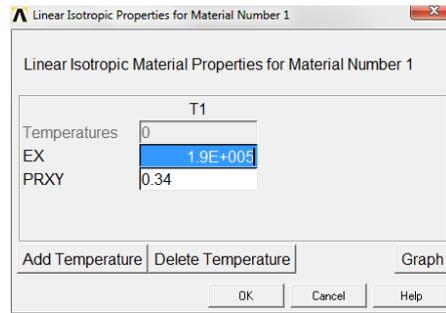
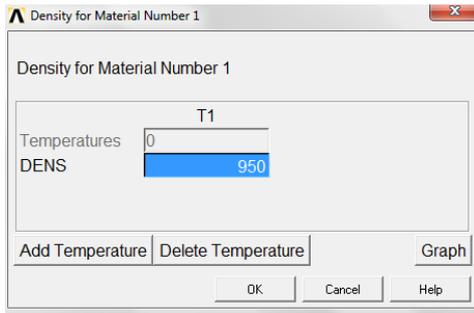
En esta zona, la sección es igual a las zonas rojas que hemos visto en las otras zonas.

A continuación se definirán los materiales que se han utilizado para las zonas, en cada imagen de la sección vemos una columna donde pone material ID, este material se definirá a continuación.

MATERIALES DE LA PALA DE REFERENCIA

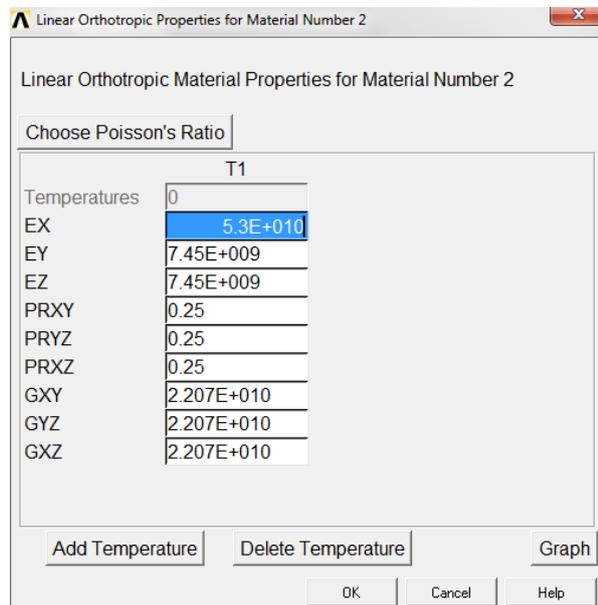
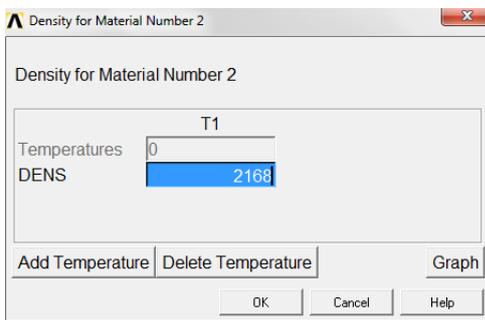
Como todas las palas de pádel, debemos definirle unos materiales base para poder utilizarlos como referencia, en este caso tendremos los siguientes materiales.

Para el núcleo tendremos Goma EVA:



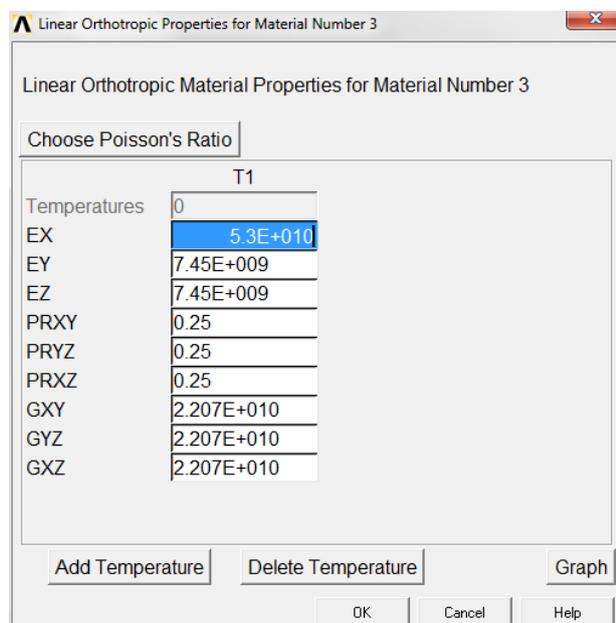
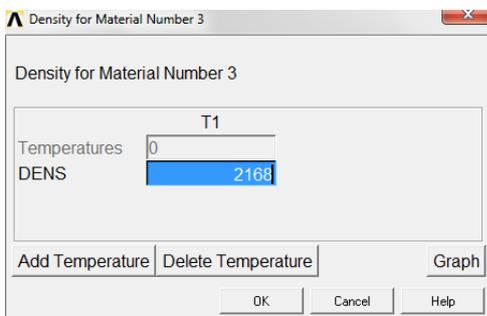
En el programa ANSYS cada material para el núcleo se vería así, donde vemos la densidad que tienen, su módulo de Young, y el coeficiente de poisson.

Para el tubo interior:



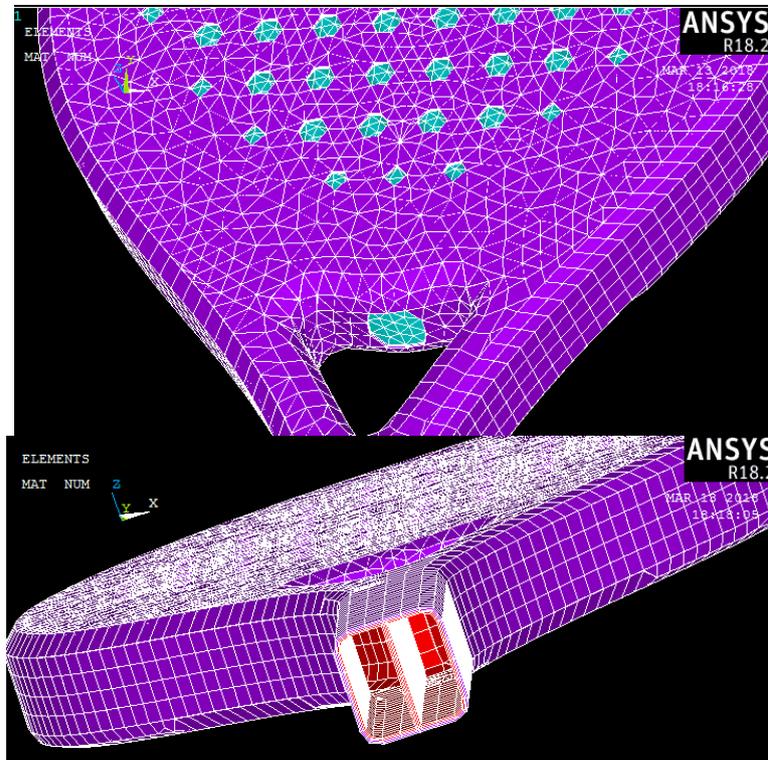
En el programa ANSYS cada material para el tubo o la superficie de golpeo se vería así, donde vemos la densidad que tienen, el modulo E del compuesto en las diferentes direcciones, el coeficiente de poisson del compuesto y el módulo G en las diferentes direcciones.

Y para la superficie de golpeo:



Como se ve en las imágenes, tanto para el tubo interior como para la superficie de golpeo, se ha utilizado el mismo material, en este caso fibra de vidrio con epoxi.

A continuación unas imágenes donde se observan los diferentes materiales con diferentes colores en el programa ANSYS.



En las imágenes podemos apreciar diferentes colores, podemos observar de color azul claro el núcleo de Goma EVA, de color morado observaríamos el material 3 que se utilizara para la superficie de golpeo y demás zonas exteriores, y para el tubo interior el color rojo.

Aquí una tabla resumen de los datos de la pala de referencia.

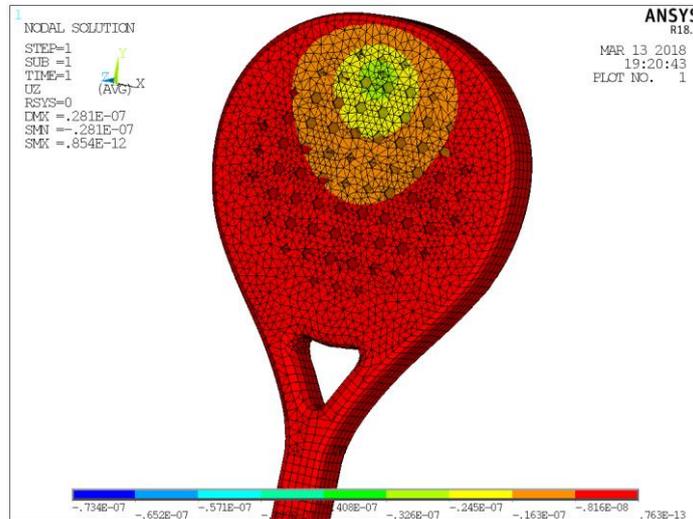
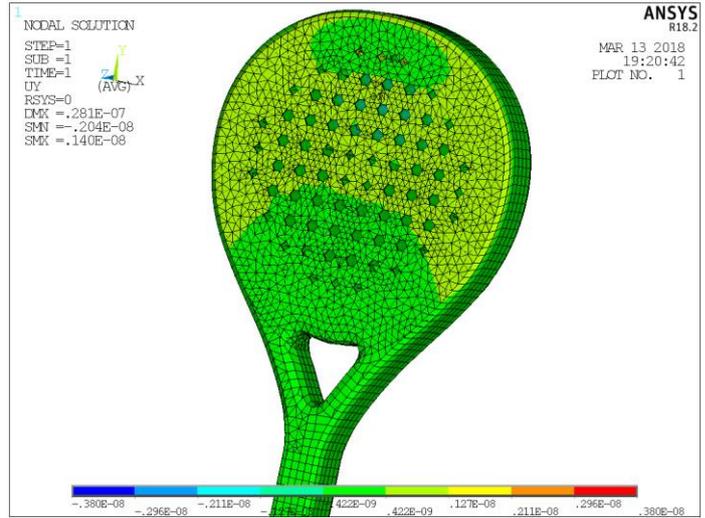
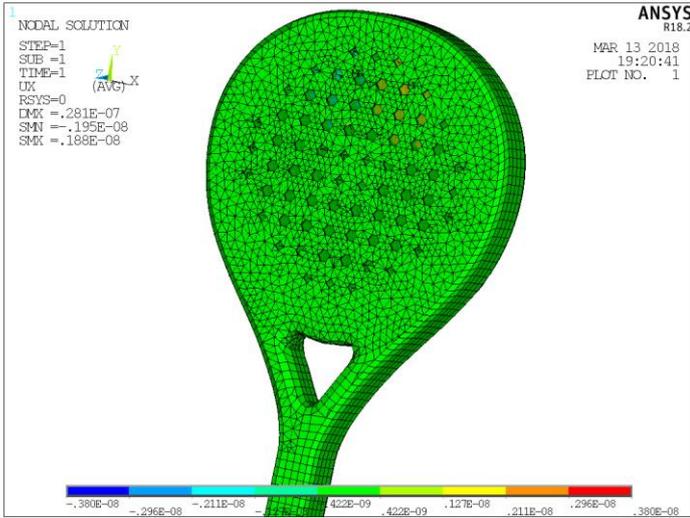
	MARCO O TUBO	REFUERZO MARCO	MALLA	NÚCLEO
TIPO	TEJIDO	LAMINAS	LAMINAS	SOLIDO
CAPAS	0.5 mm 45°	0.5 mm 0°	0.5 mm 0°	36 mm
	0.5 mm 135°	0.5 mm 90°	0.5 mm 90°	
RESINA	EPOXY	EPOXY	EPOXY	GOMA EVA
FIBRA	VIDRIO	VIDRIO	VIDRIO	EVA

RESULTADOS

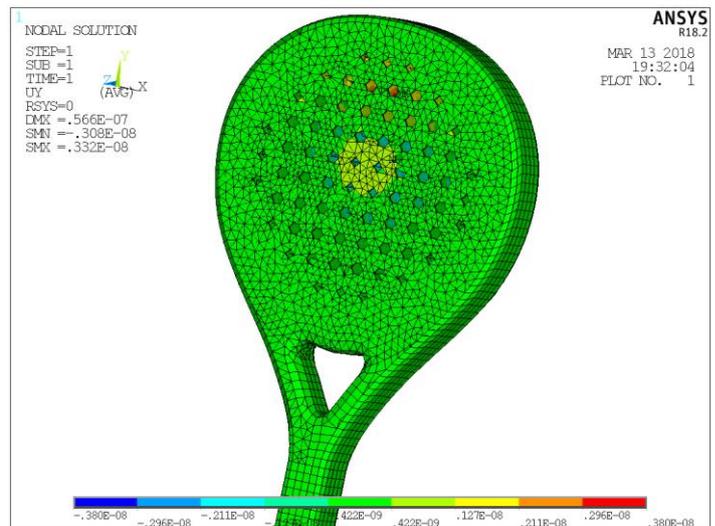
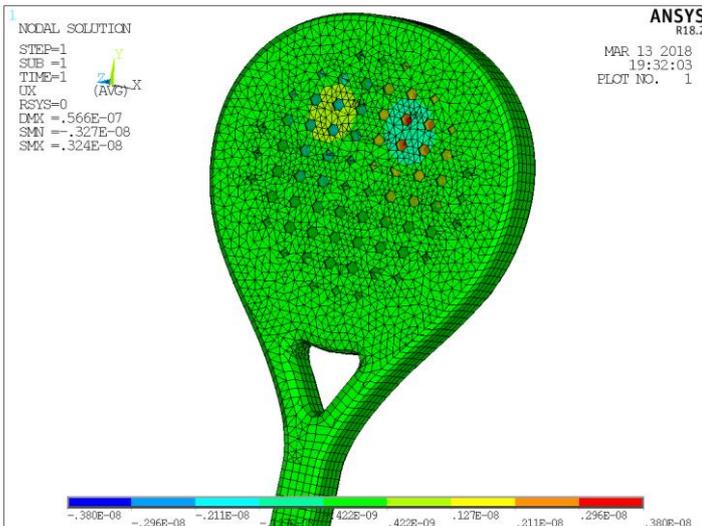
1. Puntos de golpeo

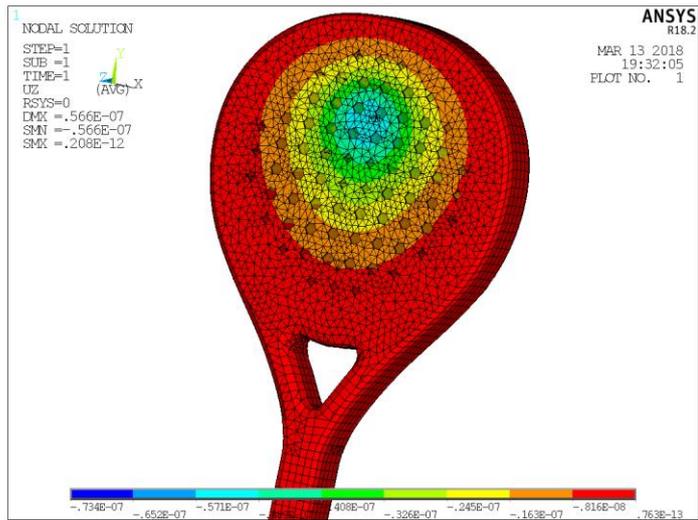
A continuación se mostraran los resultados que se obtienen de la pala de referencia, empezando por una serie de imágenes de cada uno de los diferentes puntos y para resumir todo una tabla con las diferentes rigideces, las fuerzas y los desplazamientos dados por la macro.

Punto de golpeo 1

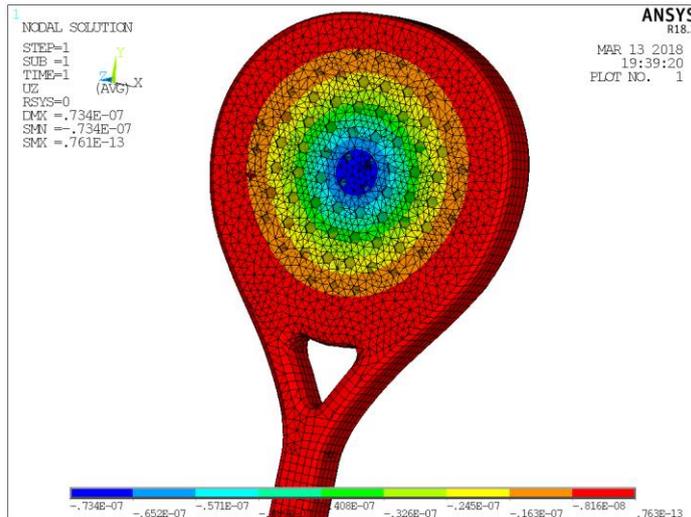
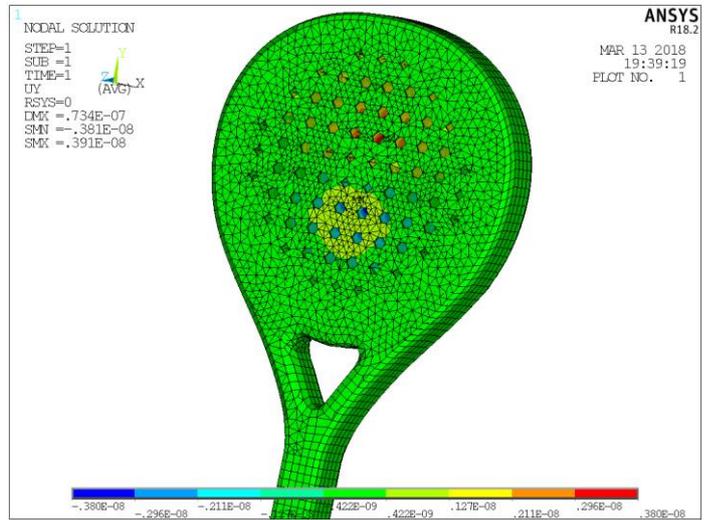
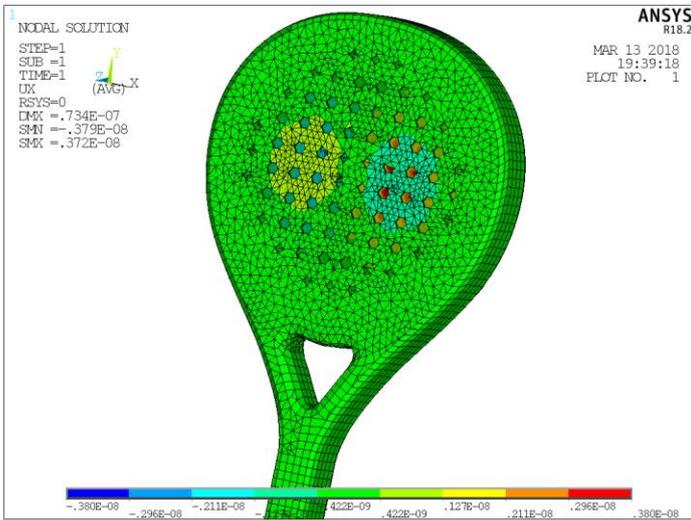


Punto de golpeo 2

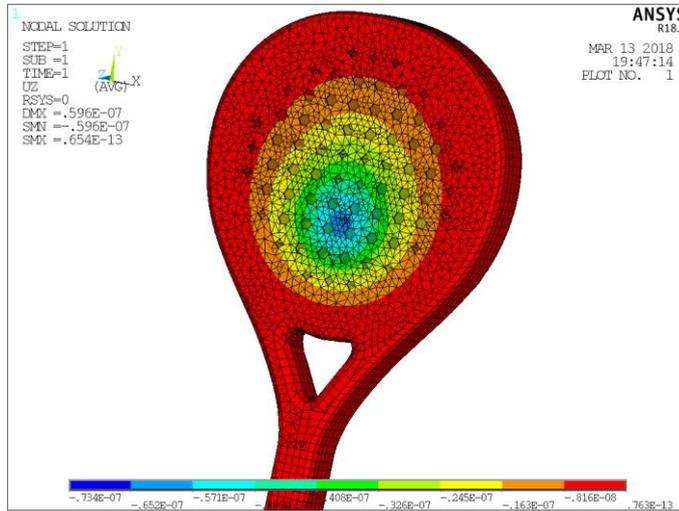
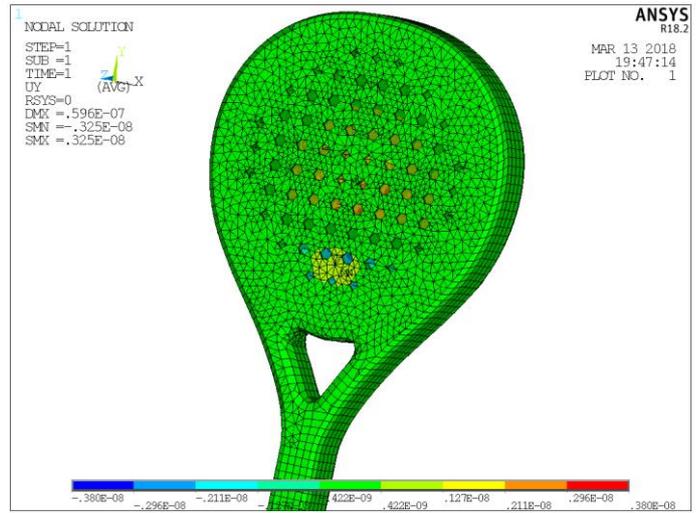
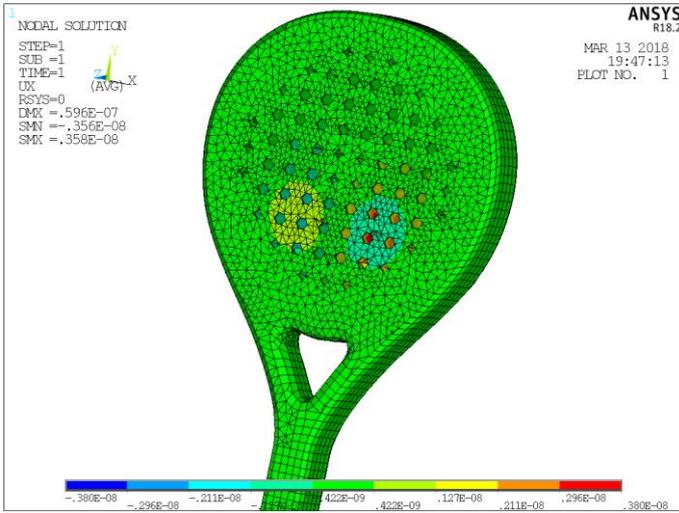




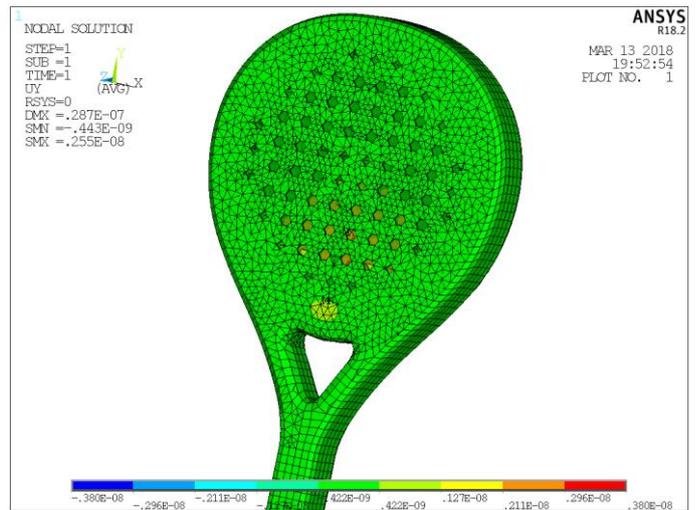
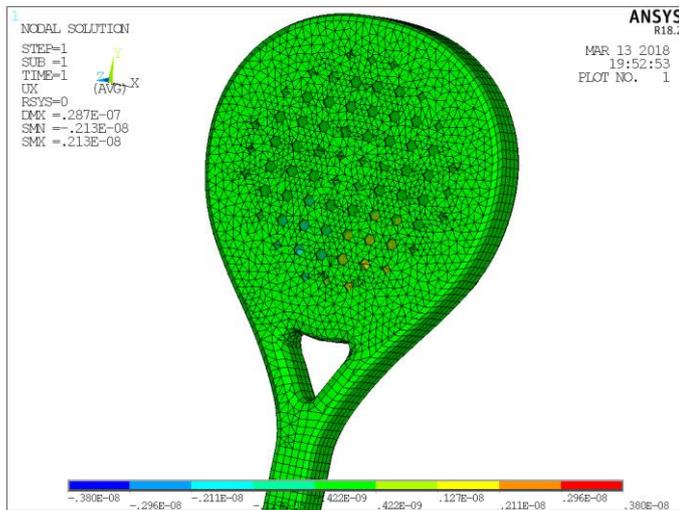
Punto de golpeo 3

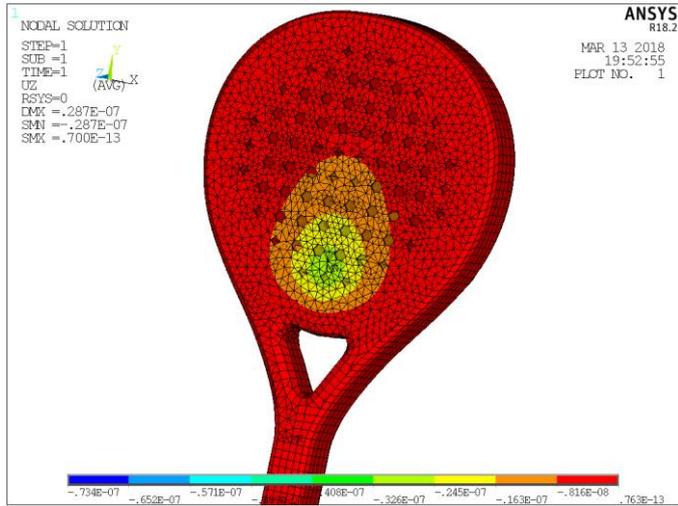


Punto de golpeo 4

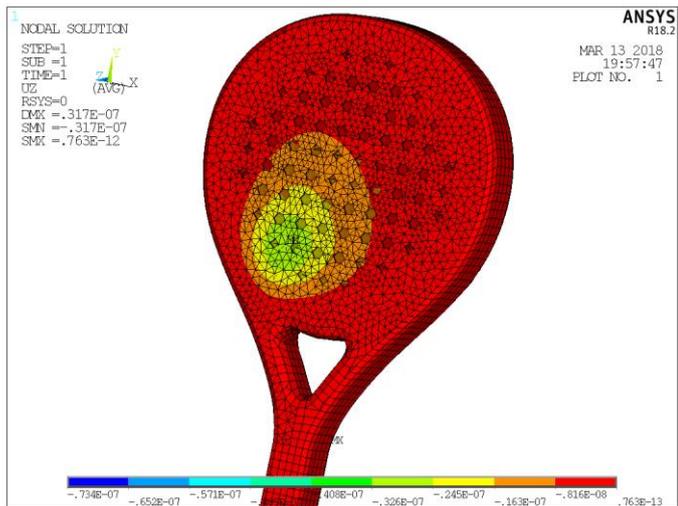
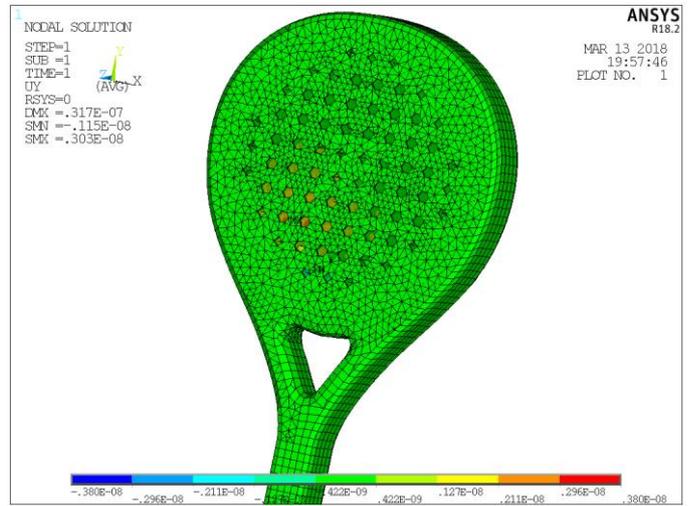
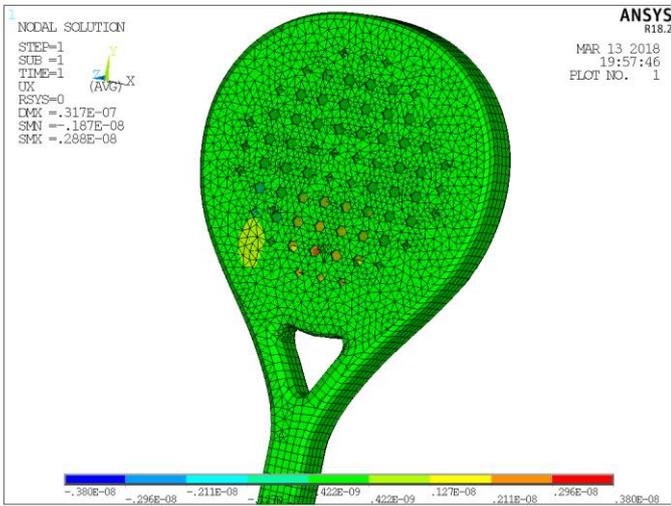


Punto de golpeo 5

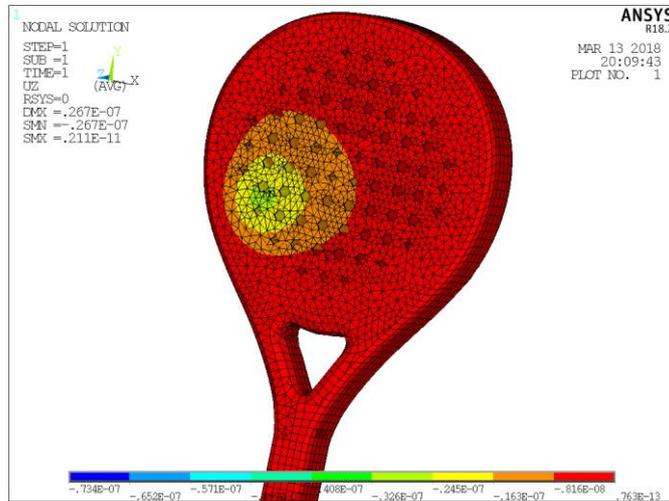
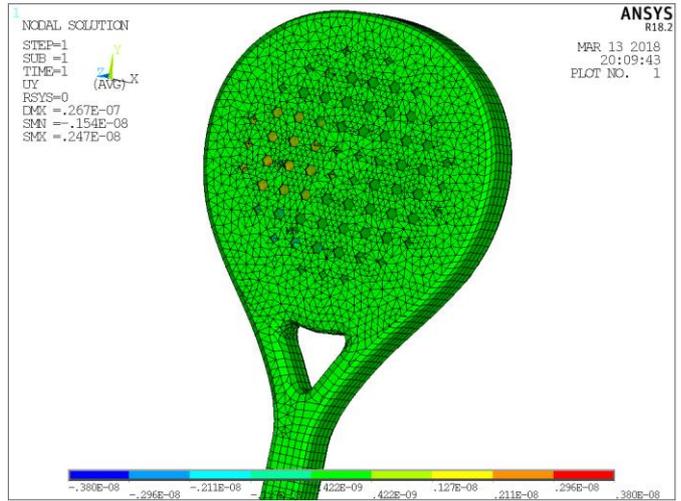
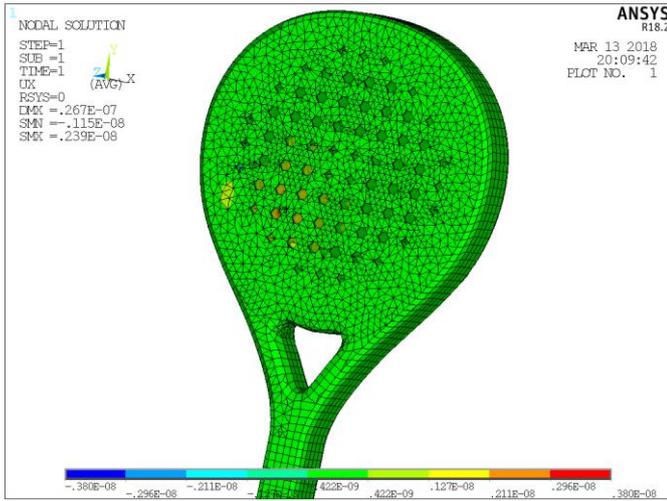




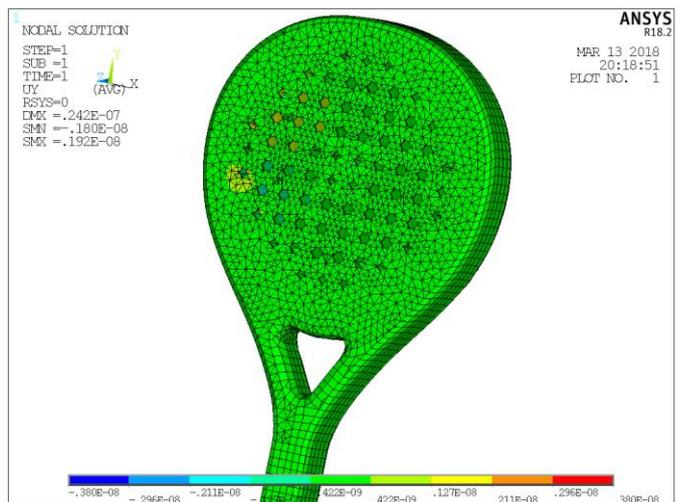
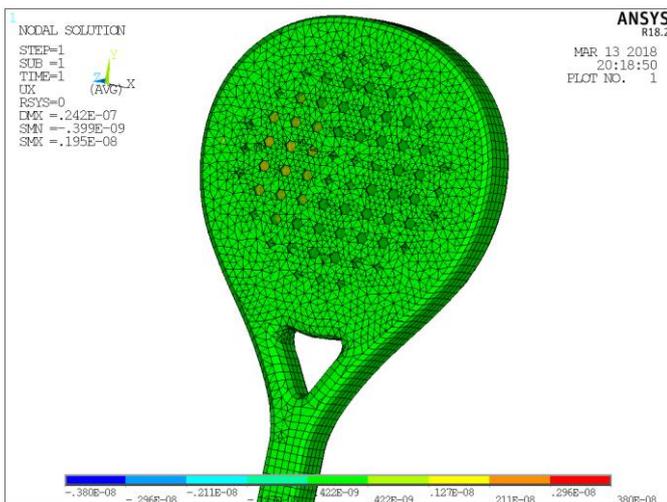
Punto de golpeo 6

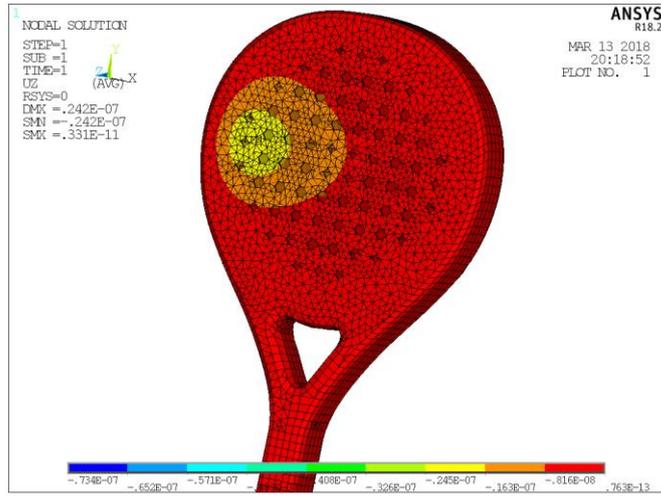


Punto de golpeo 7

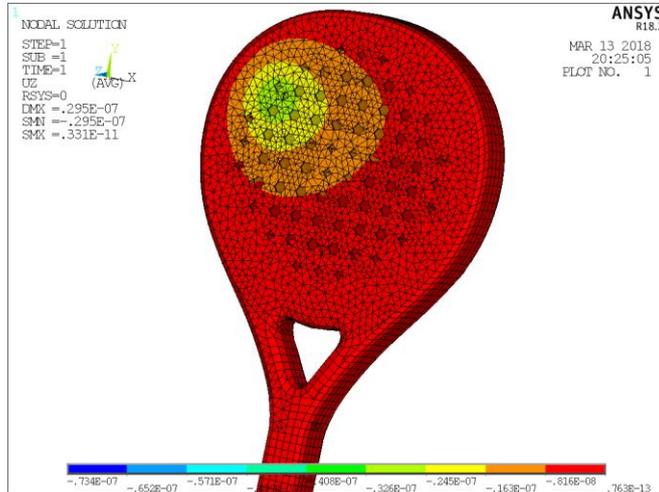
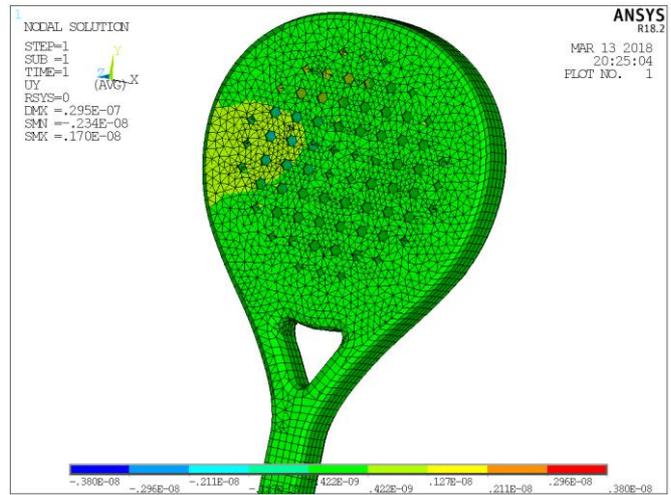
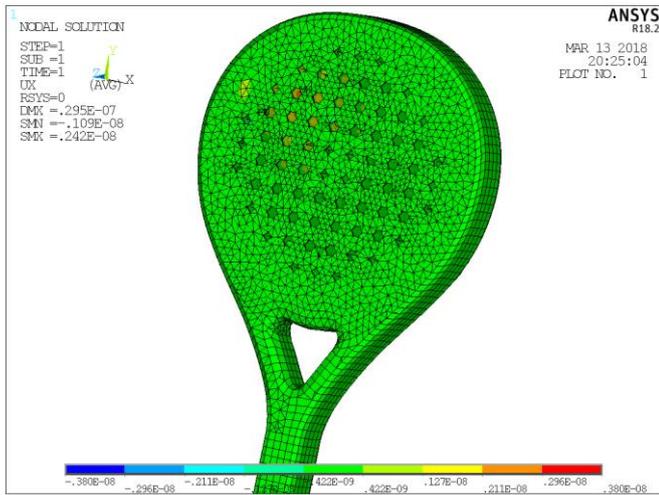


Punto de golpeo 8

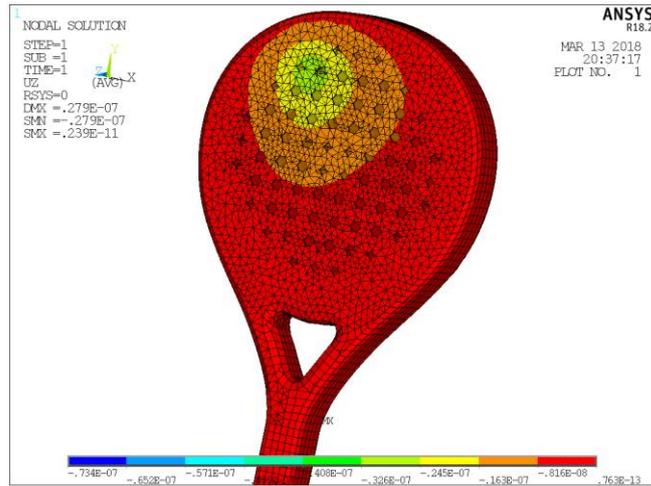
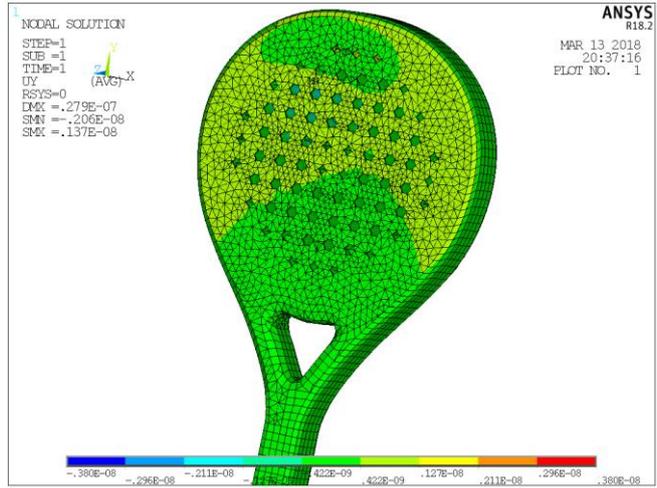
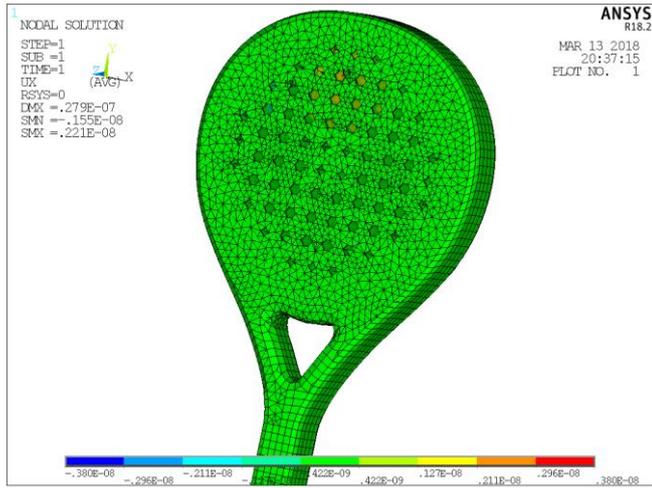




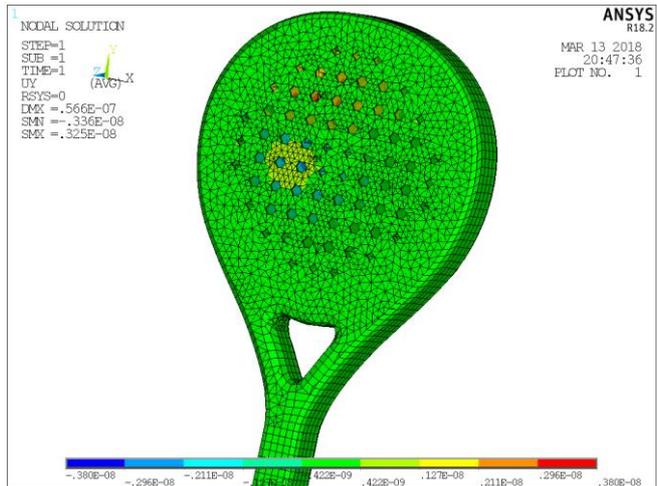
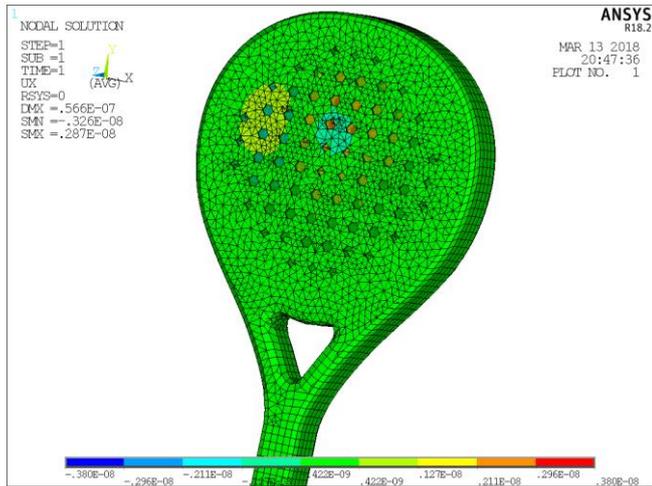
Punto de golpeo 9

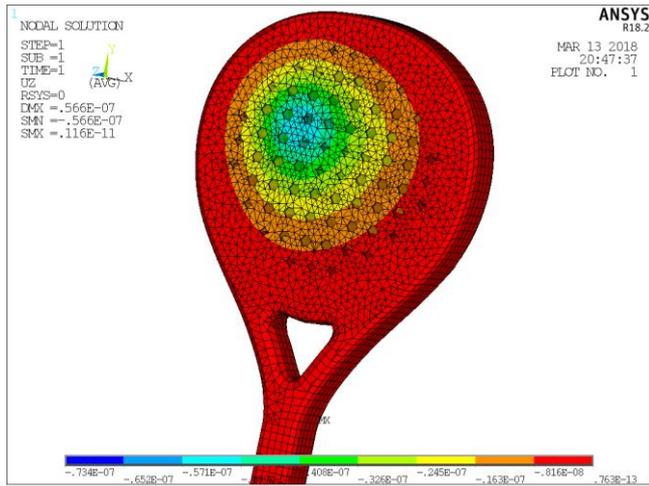


Punto de golpeo 10



Punto de golpeo 11





Punto de golpeo 12

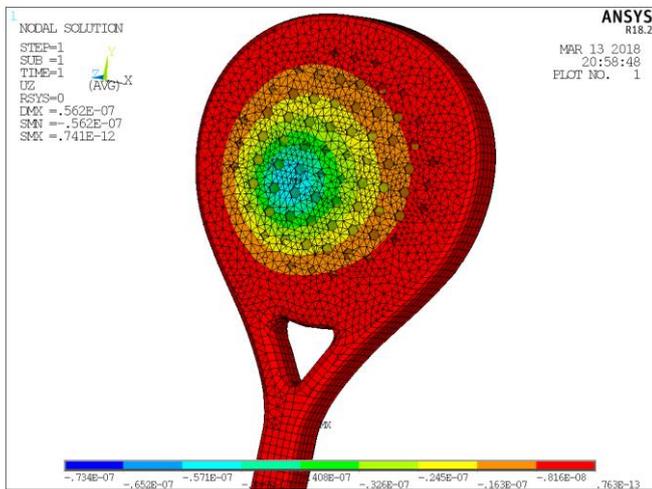
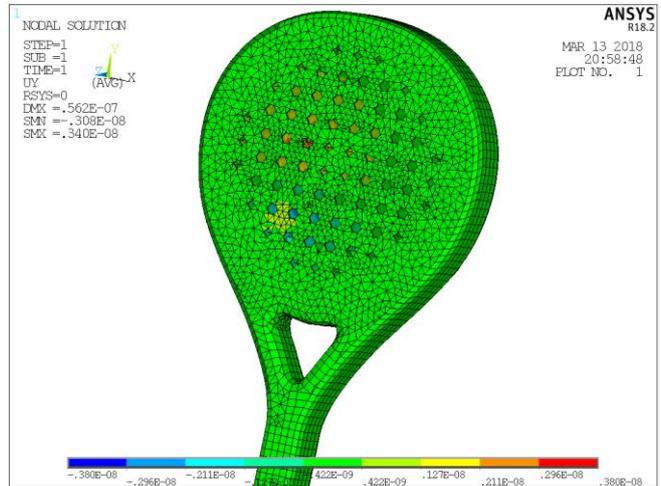
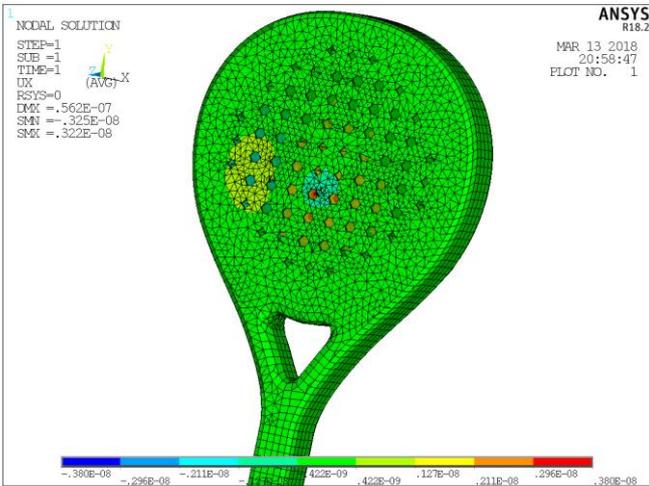


Tabla resumen de los resultados en los diferentes puntos

	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6
Ux	-1,62E-05	-6,17E-06	-4,01E-06	-2,73E-06	-2,45E-06	-1,10E-04
Uy	7,19E-04	4,38E-04	2,32E-04	-4,62E-06	-1,49E-04	-7,47E-05
Uz	-2,17E-02	-5,16E-02	-6,79E-02	-5,40E-02	-2,20E-02	-2,53E-02
Fz	-1,14E-03	-9,94E-04	-1,08E-03	-1,04E-03	-1,18E-03	-1,17E-03
Kxz	7,04E+07	1,61E+08	2,69E+08	3,81E+08	4,82E+08	1,06E+07
Kyz	-1,59E+06	-2,27E+06	-4,66E+06	2,25E+08	7,92E+06	1,57E+07
Kz	5,23E+04	1,93E+04	1,59E+04	1,92E+04	5,35E+04	4,63E+04
	Punto 7	Punto 8	Punto 9	Punto 10	Punto 11	Punto 12
Ux	-1,98E-04	-2,34E-04	-1,95E-04	-1,05E-04	-9,75E-05	-9,28E-05
Uy	5,50E-05	2,78E-04	5,21E-04	6,86E-04	3,38E-04	1,27E-04
Uz	-2,00E-02	-1,77E-02	-2,33E-02	-2,21E-02	-5,15E-02	-5,11E-02
Fz	-1,18E-03	-1,19E-03	-1,19E-03	-1,17E-03	-9,89E-04	-9,77E-04
Kxz	5,96E+06	5,09E+06	6,10E+06	1,11E+07	1,01E+07	1,05E+07
Kyz	-2,15E+07	-4,28E+06	-2,28E+06	-1,71E+06	-2,93E+06	-7,69E+06
Kz	5,92E+04	6,73E+04	5,08E+04	5,31E+04	1,92E+04	1,91E+04

En la tabla anterior están todos los resultados que Ansys ha proporcionado, estos datos nos servirán para comparar con los otros materiales con los que modificaremos la Pala, en la tabla se observan, el desplazamiento (U) en los 3 ejes, los cuales están multiplicados por 10^6 , la fuerza (F) dada en el eje z y la rigidez (K) calculada en cada punto en los diferentes ejes, esta rigidez sale de la división de los datos de la fuerza entre los datos del desplazamiento.

Para los cálculos realizados en la pala de referencia, el programa ha utilizado las siguientes fórmulas para calcular los diferentes datos:

Para el cálculo del desplazamiento

$$U_{x,y,z} = \frac{\sum U_{x,y,z}}{N^{\circ} \text{ nodos}}$$

Para la fuerza

$$F_z = \sum F_z$$

Y para la rigidez

$$K_{xz,yz,z} = \frac{F_z}{U_{x,y,z}}$$

Estas fórmulas son las que el programa ha utilizado, además son las que utilizara a la hora de calcular los siguientes casos que se analizaran.

2. Centro de gravedad.

A continuación se pondrá el centro gravedad ya que así podremos comparar como afecta también el cambio de materiales.

CENTER OF MASS (X,Y,Z)= 0.54528 -0.35210 0.90008E-01

Como se ve en la imagen anterior, tenemos un centro de masa.

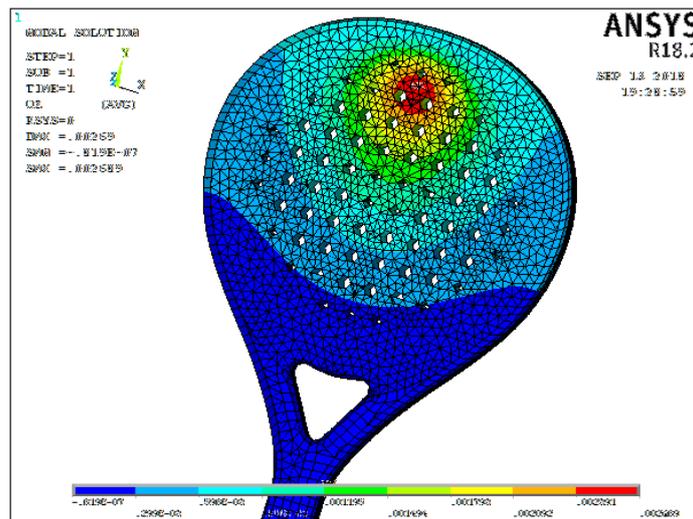
3. Análisis Estático

Aquí veremos un análisis estático de la pala con una fuerza aplicada de 10Kg suponiendo que será el máximo que se podrá alcanzar.

Para ello con esta fuerza debemos calcular la presión que ejercería en los diferentes puntos, para ello tomaremos las áreas de los puntos, donde cada área mide $1.043 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$, con el dato del área y la fuerza que se utilizara dará una presión de 95877.2771 Pa, una vez obtenidos los datos necesarios pasaremos a meter esta presión en 4 puntos de golpeo, para calcular la reacción y la tensión que se generara en el golpeo.

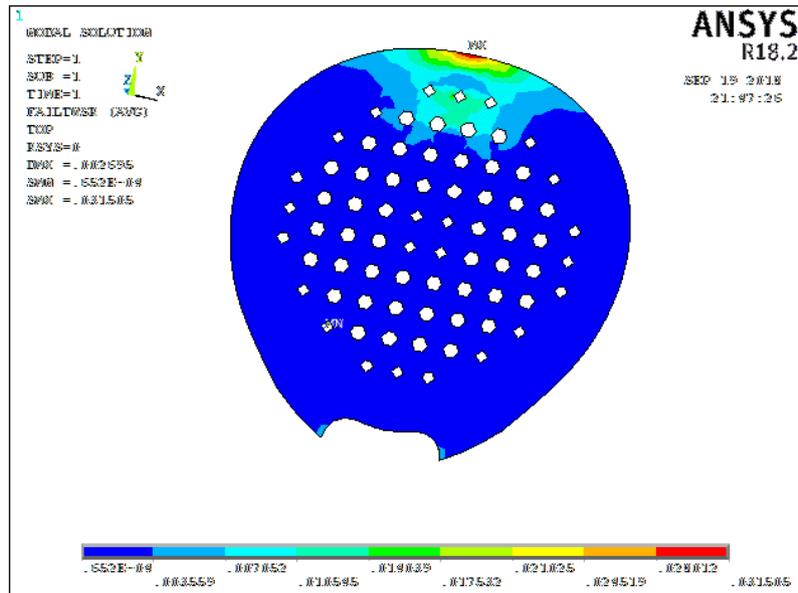
- **Punto 1**

Para el primer caso de cálculo estático se ha utilizado el primer punto definido en la pala, aprovechando los 12 puntos de la pala y sabiendo que se puede aprovechar la simetría de la misma para solo hacerlo en unos pocos.



En la imagen se podrá ver cómo se distribuye el desplazamiento máximo en la pala, y como se encuentra el punto más deforme donde se ha supuesto que golpea la bola.

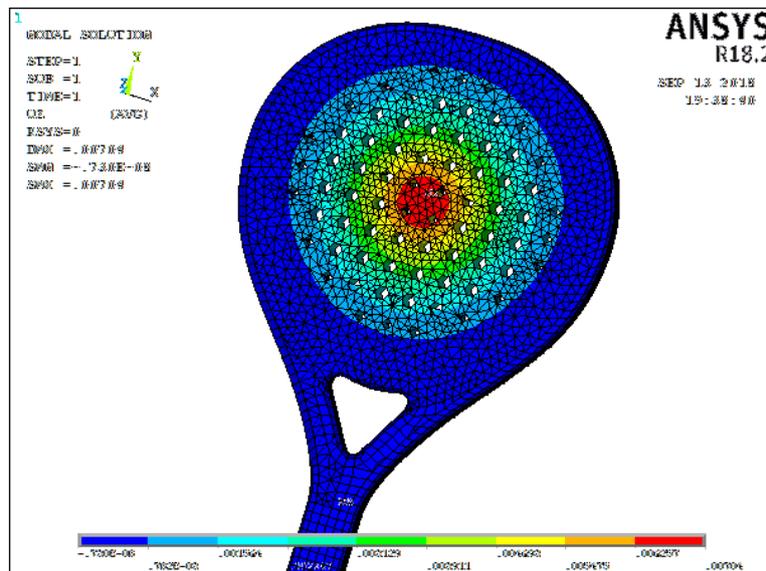
Este desplazamiento máximo que nos da solo se dará en el eje Z ya que la fuerza la aplicamos en ese eje. En este caso se ha obtenido una desplazamiento máximo de $0.269 \cdot 10^{-2} \text{ m}$.



En esta imagen se ve la distribución del método de la inversa de Tsai-wu en el Ansys, para este método se ha tenido en cuenta el coeficiente F_{12} con un valor de 0.25, en la imagen se observa la zona donde más afectara y por tanto menor coeficiente de seguridad, en este caso se puede ver como la zona que más afectada es la zona que se encuentra en la parte superior de la zona de golpeo, en la zona del marco o tubo. Los valores del coeficiente obtenido con Tsai-wu se observan en la tabla resumen.

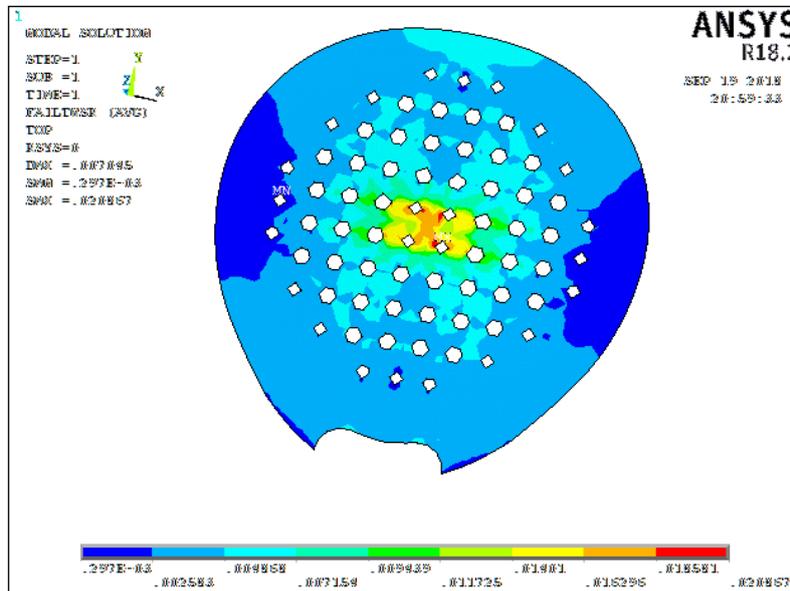
- **Punto 3**

Se utilizara el punto 3 de los 12 de golpeo, debido a que es el punto central de la raqueta.



En la imagen anterior se puede observar cómo se distribuye el desplazamiento máximo en este punto, como en el caso anterior se encuentra el punto más deforme donde se ha supuesto que golpea la bola.

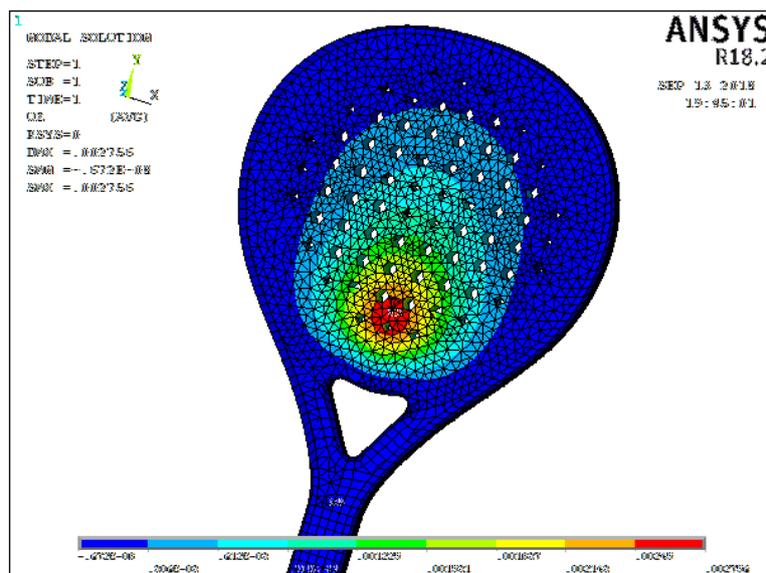
En este caso se ha obtenido una desplazamiento máximo de $0.704 \cdot 10^{-2}$ m. Es el punto central, por tanto tendrá un mayor desplazamiento máximo, debido a que es el punto más alejado del marco y no tiene tanta rigidez para evitar el desplazamiento máximo como lo tienen los puntos más exteriores.



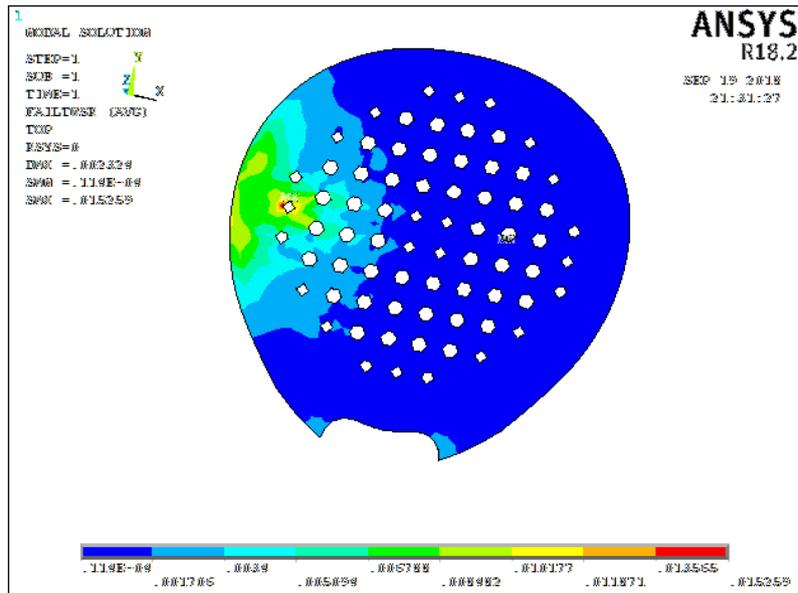
Como en la imagen anterior, a continuación se verá una imagen de la inversa de Tsai-wu que se ha calculado con ANSYS. En este punto podemos observar que la zona más afectada son los orificios que tiene la pala, y que se encuentran justo en la zona del golpe.

- **Punto 5**

El 3 punto utilizado es el punto más cercano al mango de la pala.



En este caso se ha obtenido una desplazamiento máximo de $0.2756 \cdot 10^{-2}$ m. Es el punto más cercano al mango de la pala, y como se esperaba en este punto se obtiene un desplazamiento máximo menor que en el central.



En esta imagen se ve que la zona afectada es la zona lateral, pero el punto más afectado se encuentra en el orificio que se encuentra en el punto de golpeo.

Desplazamientos máximos	Punto 1	Punto 3	Punto 5	Punto 8
Referencia	2,69E-03	7,04E-03	2,76E-03	2,32E-03

Tsai-wu Zona de golpeo	Punto 1	Punto 3	Punto 5	Punto 8
Referencia	3,15E-02	2,09-02	2,24E-02	1,53-02

ANALISIS DE LA PALA CON DIFERENTES MATERIALES EN DIFERENTES ZONAS

A continuación se han realizado diferentes análisis de diferentes materiales cuyos datos específicos han sido sacados del programa CES Edupack.

Los materiales que utilizaremos serán los siguientes, con sus respectivos datos.

Rangos de valores		E (GPa)	$\rho \cdot 10^3$	ν	G
Vidrio	S	93	2,5	0,23	39
Carbono	Hm	390	1,85	0,2	175
	HS	225	1,84	0,2	110
Epoxi		2,47	1,1	0,407	0,883
Goma EVA	EVA 1	0,0001	0,015	0,48	
	EVA 2	0,0008	0,030	0,48	
	EVA 3	0,008	0,080	0,48	

Y con los materiales anteriores y las ecuaciones de los materiales compuestos obtendremos los siguientes compuestos que utilizaremos en el análisis.

Las ecuaciones que se han utilizado para conseguir las propiedades de los materiales son la Regla de las mezclas para obtener E_1 , ν_{12} y ρ y para obtener E_2 y G_{12} se utilizara Halpin Tsai, así al final se obtienen:

COMPUESTOS UTILIZADOS							Vf	0,7
							Vm	0,3
	Materiales que lo forman	E_1	E_2	ρ	ν_{12}	G_{12}	ν_{21}	
Material 1	Fibra S + Epoxy	6,584E+10	1,605E+10	2,170E+00	2,831E-01	4,452E+09	3,334E-02	
Material 2	Fibra Carbono HM + Epoxy	2,737E+11	1,872E+10	1,715E+00	2,621E-01	4,869E+09	7,768E-03	
Material 3	Fibra Carbono HS + Epoxy	1,582E+11	1,803E+10	1,708E+00	2,621E-01	4,793E+09	1,330E-02	

A continuación, se pondrán las tablas con los resultados de los diferentes análisis realizados, la los procedimientos utilizados para los análisis son los mismo que para la pala de referencia, el único cambio en ellos es que se utilizan diferentes materiales en las diferentes zonas (Núcleo, tubo, y zona de golpeo o malla).

En estos análisis, solo se ha modificado el material que queremos analizar, es decir, se han mantenido los demás materiales de la pala intacta y solo se ha modificado el material que se utilizara en el análisis.

NUCLEO

Para los materiales del núcleo se utilizaran 3 tipos de goma EVA, descritas anteriormente, en los análisis realizados a continuación.

A continuación veremos una tabla en cada material donde se verán las diferentes propiedades calculadas con ANSYS, además de una imagen donde se ve la masa y el centro de gravedad de cada análisis.

➤ Goma EVA 1

1. Puntos de golpeo

A continuación una tabla generada en el análisis donde se ven los valores de las diferentes propiedades que realiza el análisis.

PUNTOS CON NÚCLEO 1						
	1	2	3	4	5	6
Ux	-1,641E-05	-6,003E-06	-3,922E-06	-2,725E-06	-2,497E-06	-1,225E-04
Uy	7,770E-04	4,933E-04	2,362E-04	-5,270E-05	-2,130E-04	-1,255E-04
Uz	-2,376E-02	-6,246E-02	-8,440E-02	-6,654E-02	-2,542E-02	-2,938E-02
Fz	-1,136E-03	-9,936E-04	-1,080E-03	-1,037E-03	-1,178E-03	-1,172E-03
Kxz	6,920E+07	1,655E+08	2,754E+08	3,807E+08	4,719E+08	9,563E+06
Kyz	-1,462E+06	-2,014E+06	-4,572E+06	1,968E+07	5,531E+06	9,338E+06
Kz	4,779E+04	1,591E+04	1,280E+04	1,559E+04	4,636E+04	3,987E+04
	7	8	9	10	11	12
Ux	-2,206E-04	-2,576E-04	-2,168E-04	-1,151E-04	-1,151E-04	-1,088E-04
Uy	2,643E-05	2,757E-04	5,537E-04	7,387E-04	3,685E-04	1,085E-04
Uz	-2,271E-02	-1,955E-02	-2,599E-02	-2,422E-02	-6,262E-02	-6,273E-02
Fz	-1,183E-03	-1,189E-03	-1,185E-03	-1,172E-03	-9,888E-04	-9,769E-04

Kxz	5,364E+06	4,614E+06	5,469E+06	1,019E+07	8,593E+06	8,976E+06
Kyz	-4,478E+07	-4,312E+06	-2,141E+06	-1,587E+06	-2,683E+06	-9,003E+06
Kz	5,211E+04	6,081E+04	4,561E+04	4,840E+04	1,579E+04	1,557E+04

En la tabla anterior se observan todos los datos que nos ofrece el programa, a la hora analizar los datos se tendrá solo en cuenta la rigidez que se da en el eje Z, debido a que por el golpeo de la pelota será el eje que se deformara, por tanto solo tendremos en cuenta los datos que nos da el K_z . En los demás casos analizados será igual, solo nos interesara la rigidez en el eje Z.

2. Centro de gravedad

A continuación el centro de gravedad de la pala al modificar el material.

CENTER OF MASS (X,Y,Z)= 0.54527 -0.39178 0.90006E-01

Los datos se analizaran más adelante comparándolo con los otros casos del núcleo.

➤ Goma EVA 2

1. Puntos de golpeo

A continuación una tabla generada en el análisis donde se ven los valores de las diferentes propiedades que realiza el análisis.

PUNTOS CON NÚCLEO 2						
	1	2	3	4	5	6
Ux	-1,551E-05	-6,706E-06	-4,214E-06	-2,547E-06	-2,154E-06	-8,071E-05
Uy	5,769E-04	3,308E-04	2,241E-04	9,374E-05	-8,390E-06	3,538E-05
Uz	-1,608E-02	-2,737E-02	-3,247E-02	-2,669E-02	-1,328E-02	-1,498E-02
Fz	-1,136E-03	-9,936E-04	-1,080E-03	-1,037E-03	-1,178E-03	-1,172E-03
Kxz	7,323E+07	1,482E+08	2,563E+08	4,072E+08	5,471E+08	1,451E+07
Kyz	-1,969E+06	-3,004E+06	-4,819E+06	-1,107E+07	1,404E+08	-3,311E+07
Kz	7,061E+04	3,630E+04	3,326E+04	3,886E+04	8,869E+04	7,820E+04
	7	8	9	10	11	12
Ux	-1,408E-04	-1,778E-04	-1,438E-04	-8,138E-05	-6,058E-05	-5,605E-05
Uy	1,250E-04	2,829E-04	4,437E-04	5,589E-04	2,793E-04	1,636E-04
Uz	-1,287E-02	-1,245E-02	-1,625E-02	-1,625E-02	-2,686E-02	-2,568E-02
Fz	-1,183E-03	-1,189E-03	-1,185E-03	-1,172E-03	-9,888E-04	-9,769E-04
Kxz	8,404E+06	6,685E+06	8,245E+06	1,440E+07	1,632E+07	1,743E+07
Kyz	-9,469E+06	-4,202E+06	-2,671E+06	-2,097E+06	-3,540E+06	-5,970E+06
Kz	9,198E+04	9,546E+04	7,295E+04	7,215E+04	3,681E+04	3,804E+04

En la tabla anterior se observan todos los datos obtenidos con el programa, solo tendremos en cuenta los datos que nos da el K_z

2. Centro de gravedad

A continuación el centro de gravedad de la pala al modificar el material.

CENTER OF MASS (X,Y,Z)= 0.54527 -0.38959 0.90006E-01

Los datos se analizaran más adelante comparándolo con los otros casos del núcleo.

➤ **Goma EVA 3**

1. Puntos de golpeo

A continuación una tabla generada en el análisis donde se ven los valores de las diferentes propiedades que realiza el análisis.

PUNTOS CON NÚCLEO 3						
	1	2	3	4	5	6
Ux	-1,477E-05	-7,851E-06	-4,839E-06	-2,393E-06	-1,537E-06	-5,361E-05
Uy	4,464E-04	2,862E-04	2,256E-04	1,397E-04	8,853E-05	1,120E-04
Uz	-8,749E-03	-7,759E-03	-7,117E-03	-5,386E-03	-3,218E-03	-3,712E-03
Fz	-1,136E-03	-9,936E-04	-1,080E-03	-1,037E-03	-1,178E-03	-1,172E-03
Kxz	7,690E+07	1,266E+08	2,232E+08	4,335E+08	7,667E+08	2,185E+07
Kyz	-2,544E+06	-3,472E+06	-4,788E+06	-7,425E+06	-1,331E+07	-1,046E+07
Kz	1,298E+05	1,281E+05	1,517E+05	1,926E+05	3,662E+05	3,156E+05
	7	8	9	10	11	12
Ux	-9,688E-05	-1,290E-04	-1,066E-04	-6,378E-05	-4,284E-05	-3,745E-05
Uy	1,840E-04	2,872E-04	3,812E-04	4,438E-04	2,550E-04	1,753E-04
Uz	-4,262E-03	-5,541E-03	-7,555E-03	-8,639E-03	-7,116E-03	-5,685E-03
Fz	-1,183E-03	-1,189E-03	-1,185E-03	-1,172E-03	-9,888E-04	-9,769E-04
Kxz	1,221E+07	9,215E+06	1,112E+07	1,838E+07	2,308E+07	2,609E+07
Kyz	-6,432E+06	-4,139E+06	-3,110E+06	-2,642E+06	-3,878E+06	-5,572E+06
Kz	2,777E+05	2,145E+05	1,569E+05	1,357E+05	1,390E+05	1,718E+05

En la tabla anterior se observan todos los datos obtenidos con el programa, solo tendremos en cuenta los datos que nos da el K_z

2. Centro de gravedad

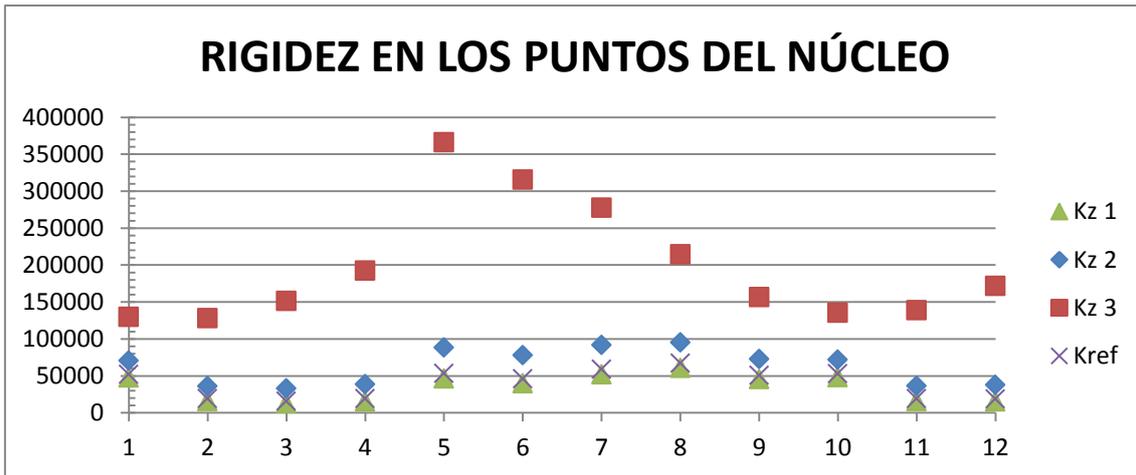
A continuación el centro de gravedad de la pala al modificar el material.

CENTER OF MASS (X,Y,Z)= 0.54528 -0.35210 0.90008E-01

Los datos se analizaran más adelante comparándolo con los otros casos del núcleo.

RESUMEN NUCLEO

Para resumir todo lo anterior se pondrá una gráfica que reunirá todos los datos relevantes de los 3 casos sobre el núcleo.



Como se ve en la gráfica al cambiar el tipo de material podemos decir que modificando el núcleo se obtiene un cambio en la rigidez en los diferentes puntos, cualquiera de los diferentes materiales que se han analizado genera un aumento en la rigidez de la pala sobre todo en el punto 5 donde el caso 3 con una goma EVA diferente a la de referencia se observa una rigidez bastante más alta que la rigidez del primer caso, además, en los demás puntos se mantiene por encima, por tanto la goma EVA 3 da la mayor rigidez de los 4 materiales.

Además se pondrá una tabla resumen de los CDG que veremos cómo variarían dependiendo del material, los datos están en mm.

CDG Núcleo	X	Y	Z
Referencia	545.28	-352.10	90
Material 1	545.28	-391.78	90
Material 2	545.28	-389.59	90
Material 3	545.28	-352.1	90

En la tabla se puede comprobar que el centro de gravedad es más bajo en el material 1, debido a las diferentes densidades de la goma EVA, la cual es la que mayor proporción de material tiene en toda la pala, en cambio el material 3 que es el más rígido tiene una densidad muy parecida a la de referencia y no hay diferencia en el centro de gravedad.

TUBO INTERIOR

El tubo interior que se utilizan en las palas de pádel es un compuesto en forma de tejido, por ello para el cálculo de los compuestos hemos utilizado la fórmula para los tejidos en la referencia [2]:

$$E_1 = E_2 = V_f \left(\frac{1}{2} E_f + \frac{3}{2} E_m \right) + E_m$$

$$G_{12} = E_m \frac{4V_f + 1}{3} \quad ; \quad \nu_{12} = \frac{G_{12}}{E_1}$$

TEJIDO DEL TUBO	E1 y E2	G12	V12
Fibra S + Epoxy	3,76E+10	3,13E+09	8,32E-02
Fibra Carbono HM + Epoxy	1,42E+11	3,13E+09	2,21E-02
Fibra Carbono HS + Epoxy	8,38E+10	3,13E+09	3,73E-02

Con los compuestos, obtenidos con las formulas se han realizado los siguientes análisis.

➤ **Fibra de vidrio S**

1. Puntos de golpeo

A continuación una tabla generada en el análisis donde se ven los valores de las diferentes propiedades que realiza el análisis.

PUNTOS CON TUBO S						
	1	2	3	4	5	6
Ux	1,183E-05	1,025E-05	7,168E-06	2,883E-06	4,200E-07	-1,098E-04
Uy	7,894E-04	4,880E-04	2,737E-04	2,406E-05	-1,301E-04	-4,781E-05
Uz	-2,268E-02	-5,219E-02	-6,839E-02	-5,429E-02	-2,216E-02	-2,548E-02
Fz	-1,136E-03	-9,936E-04	-1,080E-03	-1,037E-03	-1,178E-03	-1,172E-03
Kxz	-9,602E+07	-9,691E+07	-1,507E+08	-3,598E+08	-2,806E+09	1,067E+07
Kyz	-1,439E+06	-2,036E+06	-3,946E+06	-4,312E+07	9,057E+06	2,450E+07
Kz	5,007E+04	1,904E+04	1,579E+04	1,911E+04	5,316E+04	4,598E+04
	7	8	9	10	11	12
Ux	-2,028E-04	-2,363E-04	-1,829E-04	-8,318E-05	-8,844E-05	-8,977E-05
Uy	9,145E-05	3,322E-04	5,898E-04	7,603E-04	3,859E-04	1,618E-04
Uz	-2,031E-02	-1,818E-02	-2,402E-02	-2,300E-02	-5,200E-02	-5,147E-02
Fz	-1,183E-03	-1,189E-03	-1,185E-03	-1,172E-03	-9,888E-04	-9,769E-04
Kxz	5,834E+06	5,031E+06	6,481E+06	1,409E+07	1,118E+07	1,088E+07
Kyz	-1,294E+07	-3,578E+06	-2,010E+06	-1,542E+06	-2,562E+06	-6,036E+06
Kz	5,826E+04	6,540E+04	4,934E+04	5,096E+04	1,901E+04	1,898E+04

En la tabla anterior se observan todos los datos obtenidos con el programa, solo tendremos en cuenta los datos que nos da el K_z

2. Centro de gravedad

A continuación una imagen donde podemos ver tanto la masa total, como el centro de gravedad de la pala al modificar el material.

CENTER OF MASS (X,Y,Z)= 0.54528 -0.35211 0.90008E-01

Los datos se analizarán más adelante comparándolo con los otros casos del núcleo.

➤ **Fibra de carbono HM**

1. Puntos de golpeo

A continuación una tabla generada en el análisis donde se ven los valores de las diferentes propiedades que realiza el análisis.

PUNTOS CON TUBO C HM						
	1	2	3	4	5	6
Ux	2,811E-05	2,044E-05	1,439E-05	6,826E-06	2,484E-06	-8,289E-05
Uy	6,641E-04	3,970E-04	1,967E-04	-2,584E-05	-1,619E-04	-9,482E-05
Uz	-2,013E-02	-5,060E-02	-6,729E-02	-5,370E-02	-2,189E-02	-2,486E-02
Fz	-1,136E-03	-9,936E-04	-1,080E-03	-1,037E-03	-1,178E-03	-1,172E-03
Kxz	-4,041E+07	-4,862E+07	-7,506E+07	-1,520E+08	-4,743E+08	1,413E+07
Kyz	-1,710E+06	-2,503E+06	-5,492E+06	4,014E+07	7,278E+06	1,236E+07
Kz	5,641E+04	1,964E+04	1,605E+04	1,932E+04	5,382E+04	4,713E+04
	7	8	9	10	11	12
Ux	-1,540E-04	-1,769E-04	-1,293E-04	-4,551E-05	-6,411E-05	-6,833E-05
Uy	2,179E-05	2,379E-04	4,761E-04	6,349E-04	3,038E-04	1,015E-04
Uz	-1,922E-02	-1,652E-02	-2,182E-02	-2,046E-02	-5,061E-02	-5,060E-02
Fz	-1,183E-03	-1,189E-03	-1,185E-03	-1,172E-03	-9,888E-04	-9,769E-04
Kxz	7,683E+06	6,720E+06	9,169E+06	2,576E+07	1,542E+07	1,430E+07
Kyz	-5,432E+07	-4,996E+06	-2,490E+06	-1,846E+06	-3,255E+06	-9,624E+06
Kz	6,157E+04	7,195E+04	5,433E+04	5,731E+04	1,954E+04	1,931E+04

En la tabla anterior se observan todos los datos obtenidos con el programa, solo tendremos en cuenta los datos que nos da el K_z

2. Centro de gravedad

A continuación una imagen donde podemos ver tanto la masa total, como el centro de gravedad de la pala al modificar el material.

CENTER OF MASS (X,Y,Z)= 0.54528 -0.35059 0.90008E-01

Los datos se analizarán más adelante comparándolo con los otros casos del núcleo.

➤ Fibra de carbono HS

1. Puntos de golpeo

A continuación una tabla generada en el análisis donde se ven los valores de las diferentes propiedades que realiza el análisis.

PUNTOS CON TUBO C HS						
	1	2	3	4	5	6
Ux	2,053E-05	1,570E-05	1,102E-05	4,970E-06	1,485E-06	-9,320E-05
Uy	7,131E-04	4,323E-04	2,263E-04	-6,759E-06	-1,498E-04	-7,694E-05
Uz	-2,109E-02	-5,120E-02	-6,771E-02	-5,392E-02	-2,199E-02	-2,508E-02
Fz	-1,136E-03	-9,936E-04	-1,080E-03	-1,037E-03	-1,178E-03	-1,172E-03
Kxz	-5,531E+07	-6,330E+07	-9,803E+07	-2,087E+08	-7,933E+08	1,257E+07
Kyz	-1,593E+06	-2,298E+06	-4,772E+06	1,535E+08	7,865E+06	1,523E+07
Kz	5,384E+04	1,941E+04	1,595E+04	1,924E+04	5,358E+04	4,671E+04
	7	8	9	10	11	12
Ux	-1,735E-04	-2,007E-04	-1,510E-04	-6,135E-05	-7,416E-05	-7,699E-05
Uy	4,853E-05	2,746E-04	5,204E-04	6,838E-04	3,355E-04	1,246E-04
Uz	-1,961E-02	-1,713E-02	-2,264E-02	-2,142E-02	-5,113E-02	-5,092E-02

Fz	-1,183E-03	-1,189E-03	-1,185E-03	-1,172E-03	-9,888E-04	-9,769E-04
Kxz	6,822E+06	5,922E+06	7,852E+06	1,911E+07	1,333E+07	1,269E+07
Kyz	-2,439E+07	-4,329E+06	-2,278E+06	-1,714E+06	-2,947E+06	-7,838E+06
Kz	6,034E+04	6,938E+04	5,235E+04	5,474E+04	1,934E+04	1,919E+04

En la tabla anterior se observan todos los datos obtenidos con el programa, solo tendremos en cuenta los datos que nos da el K_z

2. Centro de gravedad

A continuación una imagen donde podemos ver tanto la masa total, como el centro de gravedad de la pala al modificar el material.

CENTER OF MASS (X,Y,Z)= 0.54528 -0.35057 0.90008E-01

Los datos se analizarán más adelante comparándolo con los otros casos del núcleo.

RESUMEN TUBO

Para resumir todo lo anterior se pondrá una gráfica que reunirá todos los datos relevantes de los 3 casos sobre el tubo.



Como se ve en la gráfica al modificar el tubo también se obtiene un cambio en la rigidez en los diferentes puntos, exceptuando el primer caso, la fibra de vidrio, los demás casos afectan aumentando la rigidez en cambio los datos obtenidos del cálculo indican que la rigidez con esa fibra disminuye respecto a la de referencia, en cambio los otros dos casos, los de la fibra de carbono aumentan la rigidez y el caso que más aumenta la rigidez es el caso del material 2 el de la fibra de carbono HM. De este modo si se necesita aumentar la rigidez de una pala se optaría por la fibra de carbono HM

Como en el núcleo se mirara como afectan los materiales a los CDG (mm).

Tubo	x	y	z
Referencia	545.28	-352.10	90
Material 1	545.28	-352.11	90
Material 2	545.28	-350.59	90
Material 3	545.28	-350.57	90

Con respecto al tubo vemos que teniendo un tubo con fibra de carbono tendremos un centro de gravedad más alto que con la fibra de vidrio, esto se debe en principio a la diferencia de densidad entre los materiales, la fibra de carbono tiene menor densidad que la fibra de vidrio.

SUPERFICIE DE GOLPEO

La superficie de golpeo que se utilizan en las palas de pádel es un compuesto hecho por laminas en diferentes direcciones, para el trabajo se ha utilizado los diferentes compuestos ya mencionados anteriormente, el espesor utilizado es de 0,5 mm y las direcciones utilizadas en las 2 láminas son de 0° y 90°:

➤ Fibra de vidrio S

1. Puntos de golpeo

A continuación una tabla generada en el análisis donde se ven los valores de las diferentes propiedades que realiza el análisis.

PUNTOS CON MALLA S						
	1	2	3	4	5	6
Ux	-2,357E-05	-8,476E-06	-3,772E-06	7,626E-07	8,479E-07	-1,325E-04
Uy	6,694E-04	4,164E-04	2,202E-04	-2,621E-06	-1,286E-04	-7,186E-05
Uz	-2,207E-02	-5,316E-02	-6,956E-02	-5,662E-02	-2,245E-02	-2,610E-02
Fz	-1,136E-03	-9,936E-04	-1,080E-03	-1,037E-03	-1,178E-03	-1,172E-03
Kxz	4,820E+07	1,172E+08	2,863E+08	-1,360E+09	-1,390E+09	8,838E+06
Kyz	-1,697E+06	-2,386E+06	-4,904E+06	3,958E+08	9,163E+06	1,630E+07
Kz	5,145E+04	1,869E+04	1,553E+04	1,832E+04	5,249E+04	4,488E+04
	7	8	9	10	11	12
Ux	-2,773E-04	-3,655E-04	-3,358E-04	-1,906E-04	-1,428E-04	-1,266E-04
Uy	9,775E-05	3,397E-04	5,618E-04	6,806E-04	3,338E-04	1,269E-04
Uz	-2,083E-02	-1,813E-02	-2,502E-02	-2,322E-02	-5,345E-02	-5,313E-02
Fz	-1,183E-03	-1,189E-03	-1,185E-03	-1,172E-03	-9,888E-04	-9,769E-04
Kxz	4,268E+06	3,253E+06	3,530E+06	6,149E+06	6,925E+06	7,716E+06
Kyz	-1,211E+07	-3,499E+06	-2,110E+06	-1,722E+06	-2,962E+06	-7,700E+06
Kz	5,683E+04	6,555E+04	4,737E+04	5,049E+04	1,850E+04	1,839E+04

En la tabla anterior se observan todos los datos obtenidos con el programa, solo tendremos en cuenta los datos que nos da el K_z

2. Centro de gravedad

A continuación el centro de gravedad de la pala al modificar el material.

CENTER OF MASS (X,Y,Z)= 0.54528 -0.35211 0.90008E-01

Los datos se analizarán más adelante comparándolo con los otros casos del núcleo.

➤ **Fibra de carbono HM**

1. Puntos de golpeo

A continuación una tabla generada en el análisis donde se ven los valores de las diferentes propiedades que realiza el análisis.

PUNTOS CON MALLA C HM						
	1	2	3	4	5	6
Ux	-1,629E-05	-7,101E-06	-3,468E-06	2,606E-07	8,079E-07	-8,820E-05
Uy	3,678E-04	2,447E-04	1,143E-04	-3,316E-05	-1,150E-04	-7,685E-05
Uz	-1,314E-02	-3,410E-02	-4,566E-02	-3,680E-02	-1,367E-02	-1,610E-02
Fz	-1,136E-03	-9,936E-04	-1,080E-03	-1,037E-03	-1,178E-03	-1,172E-03
Kxz	6,974E+07	1,399E+08	3,114E+08	-3,980E+09	-1,458E+09	1,328E+07
Kyz	-3,088E+06	-4,061E+06	-9,451E+06	3,128E+07	1,024E+07	1,524E+07
Kz	8,643E+04	2,914E+04	2,365E+04	2,819E+04	8,619E+04	7,278E+04
	7	8	9	10	11	12
Ux	-1,925E-04	-2,652E-04	-2,519E-04	-1,474E-04	-1,039E-04	-8,777E-05
Uy	4,927E-05	2,095E-04	3,437E-04	3,899E-04	1,937E-04	5,467E-05
Uz	-1,280E-02	-1,112E-02	-1,545E-02	-1,404E-02	-3,446E-02	-3,442E-02
Fz	-1,183E-03	-1,189E-03	-1,185E-03	-1,172E-03	-9,888E-04	-9,769E-04
Kxz	6,146E+06	4,483E+06	4,706E+06	7,954E+06	9,515E+06	1,113E+07
Kyz	-2,402E+07	-5,674E+06	-3,449E+06	-3,007E+06	-5,105E+06	-1,787E+07
Kz	9,246E+04	1,069E+05	7,671E+04	8,350E+04	2,870E+04	2,838E+04

En la tabla anterior se observan todos los datos obtenidos con el programa, solo tendremos en cuenta los datos que nos da el K_z

2. Centro de gravedad

A continuación una imagen donde podemos ver tanto la masa total, como el centro de gravedad de la pala al modificar el material.

CENTER OF MASS (X,Y,Z)= 0.54528 -0.35120 0.90008E-01

Los datos se analizaran más adelante comparándolo con los otros casos del núcleo.

➤ **Fibra de carbono HS**

1. Puntos de golpeo

A continuación una tabla generada en el análisis donde se ven los valores de las diferentes propiedades que realiza el análisis.

PUNTOS CON MALLA C HS						
	1	2	3	4	5	6
Ux	-1,906E-05	-7,790E-06	-3,653E-06	4,429E-07	8,502E-07	-1,019E-04
Uy	4,727E-04	3,064E-04	1,502E-04	-2,749E-05	-1,276E-04	-8,048E-05
Uz	-1,624E-02	-4,116E-02	-5,473E-02	-4,424E-02	-1,680E-02	-1,974E-02
Fz	-1,136E-03	-9,936E-04	-1,080E-03	-1,037E-03	-1,178E-03	-1,172E-03

Kxz	5,959E+07	1,276E+08	2,956E+08	-2,342E+09	-1,386E+09	1,149E+07
Kyz	-2,403E+06	-3,243E+06	-7,189E+06	3,774E+07	9,234E+06	1,456E+07
Kz	6,993E+04	2,414E+04	1,974E+04	2,345E+04	7,012E+04	5,934E+04
	7	8	9	10	11	12
Ux	-2,209E-04	-2,995E-04	-2,813E-04	-1,630E-04	-1,178E-04	-1,013E-04
Uy	6,308E-05	2,534E-04	4,195E-04	4,917E-04	2,434E-04	7,780E-05
Uz	-1,569E-02	-1,359E-02	-1,887E-02	-1,726E-02	-4,152E-02	-4,143E-02
Fz	-1,183E-03	-1,189E-03	-1,185E-03	-1,172E-03	-9,888E-04	-9,769E-04
Kxz	5,358E+06	3,968E+06	4,213E+06	7,191E+06	8,394E+06	9,647E+06
Kyz	-1,876E+07	-4,692E+06	-2,826E+06	-2,384E+06	-4,063E+06	-1,256E+07
Kz	7,542E+04	8,745E+04	6,284E+04	6,793E+04	2,382E+04	2,358E+04

En la tabla anterior se observan todos los datos obtenidos con el programa, solo tendremos en cuenta los datos que nos da el K_z

2. Centro de gravedad

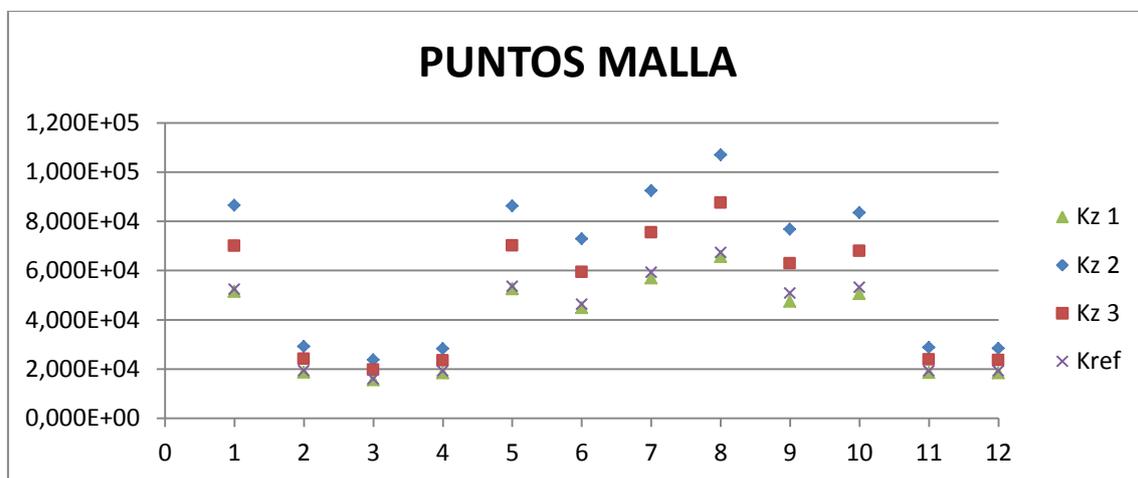
A continuación una imagen donde podemos ver tanto la masa total, como el centro de gravedad de la pala al modificar el material.

CENTER OF MASS (X,Y,Z)= 0.54528 -0.35119 0.90008E-01

Los datos se analizarán más adelante comparándolo con los otros casos del núcleo.

RESUMEN MALLA

Para resumir todo lo anterior se pondrá una gráfica que reunirá todos los datos relevantes de los 3 casos sobre la malla o superficie de golpeo.



Como se ve en la gráfica al modificar la malla como en los anteriores casos, también se obtiene un cambio en la rigidez en los diferentes puntos, el primer caso afecta negativamente a la rigidez disminuyéndola, la fibra de vidrio elegida para analizar la rigidez ha sido peor que la que hemos utilizado como referencia, se ha podido comprobar también en el caso anterior del tubo, los demás casos afectan aumentando la rigidez, los casos de las dos fibras de carbono aumentan la rigidez, en la malla se puede observar más claramente que el material que más aumentara la rigidez es el material del caso 2, por tanto en la malla si queremos aumentar la rigidez utilizaríamos la fibra de carbono HM.

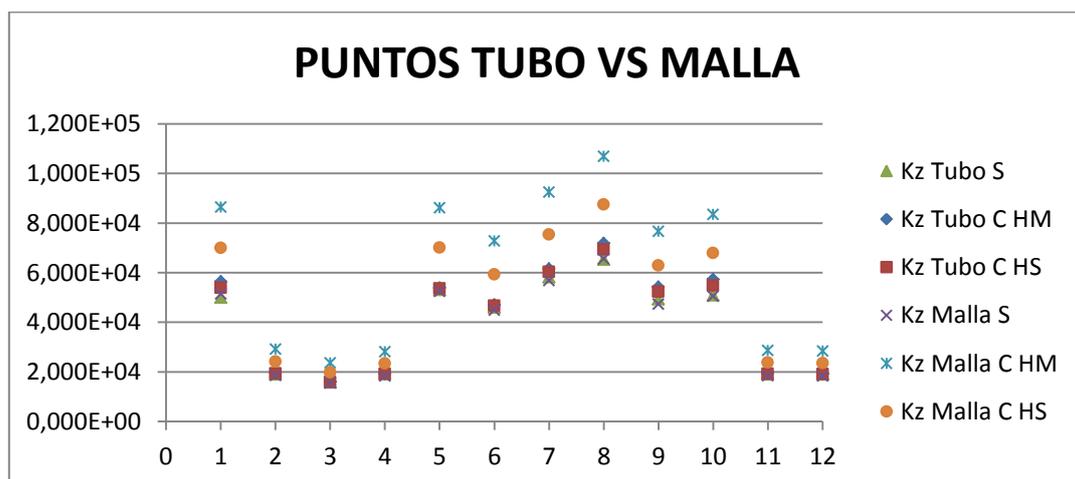
Como en el núcleo se mirara como afectan los materiales a los CDG (mm).

Malla	x	y	z
Referencia	545.28	-352.10	90
Material 1	545.28	-352.11	90
Material 2	545.28	-351.2	90
Material 3	545.28	-351.19	90

El centro de gravedad de manera muy parecida a al tubo, con la malla de diferente material tendrá un centro de gravedad más alto con la fibra de carbono que con la fibra de vidrio, esto se debe como en el caso anterior a la diferencia de densidades entre los materiales.

COMPARACION DE QUE ZONA DA MAS RIGIDEZ, ¿TUBO O MALLA?

Para esta comparación se utilizaran los datos generados anteriormente y se compararan las gráficas obtenidas de los anteriores resultados de la rigidez del tubo y la malla, de esta forma se podrá saber que parte de la pala de pádel afecta más.

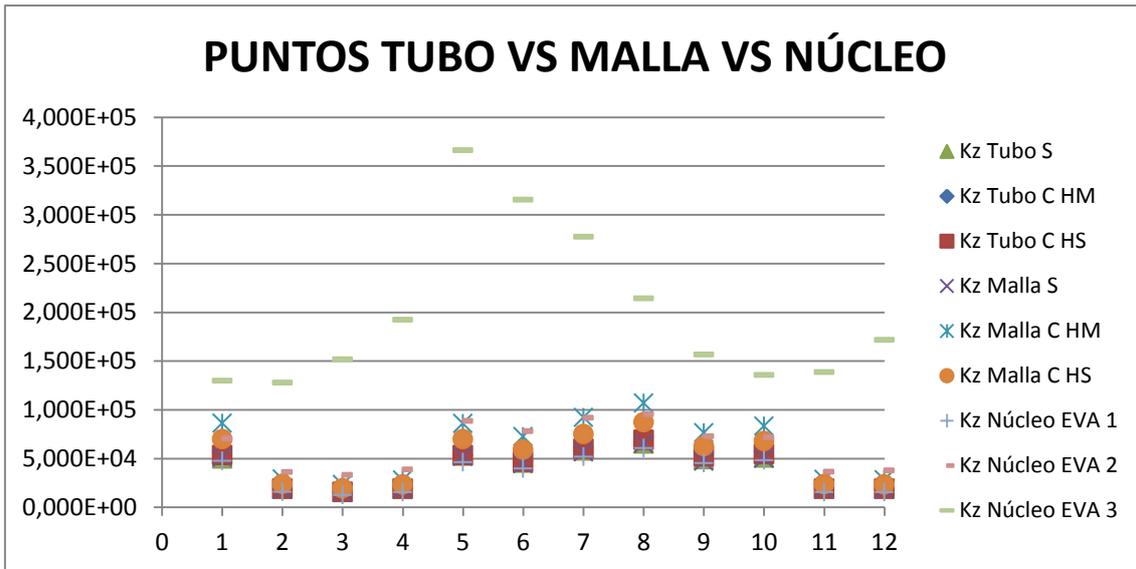


Como se demuestra en la gráfica, con una simple vista podemos intuir que lo que más afecta a la rigidez de una pala es la malla, ya que los puntos que dan más rigidez son los de la malla de fibra de carbono, por tanto podemos decir que la malla afecta más a la rigidez de una pala.

Además se observa que la malla de fibra de vidrio no influye tanto como la de carbono, ya que prácticamente influye igual que el tubo de fibra de vidrio.

COMPARACION DE QUE ZONA DA MAS RIGIDEZ, ¿TUBO O MALLA O NÚCLEO?

En el apartado anterior se tuvo en cuenta solo el tubo y la malla para el análisis, a continuación se añadirá el núcleo para comparar cuál de los 3 influye más en la rigidez.



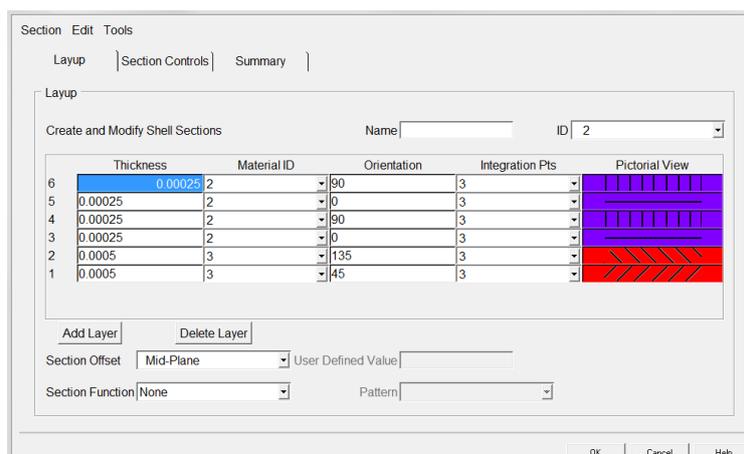
Como se observa en la gráfica anterior, de todos los casos el material que más afecta a la pala es el material del núcleo, en este caso es el material EVA 3, el cual da una rigidez bastante más elevada que los anteriores.

ANÁLISIS DE LA PALA DE REFERENCIA CON CAPAS EXTRA EN LA MALLA O DIFERENTE DIRECCION

En estos análisis se ha utilizado la pala de referencia, se ha modificado la geometría añadiendo dos capas y otro análisis modificando la dirección de la capa en la malla o superficie de golpeo, en el análisis no se ha modificado ningún material.

1. CAPAS EXTRA

A la hora de realizar el análisis se ha tenido que añadir un par de capas extra en la malla, por tanto se ha modificado la sección, en las siguientes imágenes vemos los cambios realizados.



Como se ve en la imagen se aumenta el número de capas pero a su vez se disminuye su espesor para no pasar de los límites geométricos que tiene la pala.

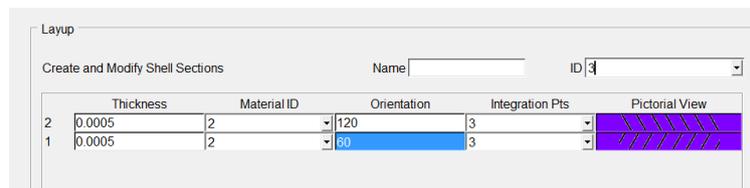
A continuación una tabla generada en el análisis donde se ven los valores de las diferentes propiedades que realiza el análisis.

PUNTOS						
	1	2	3	4	5	6
Ux	-1,49E-05	-5,34E-06	-3,69E-06	-2,69E-06	-2,35E-06	-1,20E-04
Uy	6,32E-04	4,01E-04	2,31E-04	3,50E-05	-6,79E-05	-1,99E-05
Uz	-1,89E-02	-4,42E-02	-5,84E-02	-4,63E-02	-1,84E-02	-2,13E-02
Fz	-1,14E-03	-9,94E-04	-1,08E-03	-1,04E-03	-1,18E-03	-1,17E-03
Kxz	7,64E+07	1,86E+08	2,93E+08	3,86E+08	5,02E+08	9,74E+06
Kyz	-1,80E+06	-2,48E+06	-4,67E+06	-2,96E+07	1,74E+07	5,89E+07
Kz	6,00E+04	2,25E+04	1,85E+04	2,24E+04	6,39E+04	5,51E+04
	7	8	9	10	11	12
Ux	-2,10E-04	-2,45E-04	-2,05E-04	-1,06E-04	-1,06E-04	-1,04E-04
Uy	9,53E-05	2,81E-04	4,79E-04	6,13E-04	3,17E-04	1,37E-04
Uz	-1,69E-02	-1,50E-02	-2,02E-02	-1,93E-02	-4,42E-02	-4,37E-02
Fz	-1,18E-03	-1,19E-03	-1,19E-03	-1,17E-03	-9,89E-04	-9,77E-04
Kxz	5,64E+06	4,85E+06	5,78E+06	1,10E+07	9,35E+06	9,42E+06
Kyz	-1,24E+07	-4,22E+06	-2,47E+06	-1,91E+06	-3,12E+06	-7,12E+06
Kz	7,01E+04	7,94E+04	5,86E+04	6,06E+04	2,24E+04	2,23E+04

Como en las anteriores tablas, solo tendremos en cuenta los datos que nos da el K_z

2. DIRECCION DIFERENTE

Para este caso de análisis, solo se cambiara la dirección de las láminas de material que se han utilizado en la pala de referencia, para este caso las láminas se encuentran en 60° y 120°



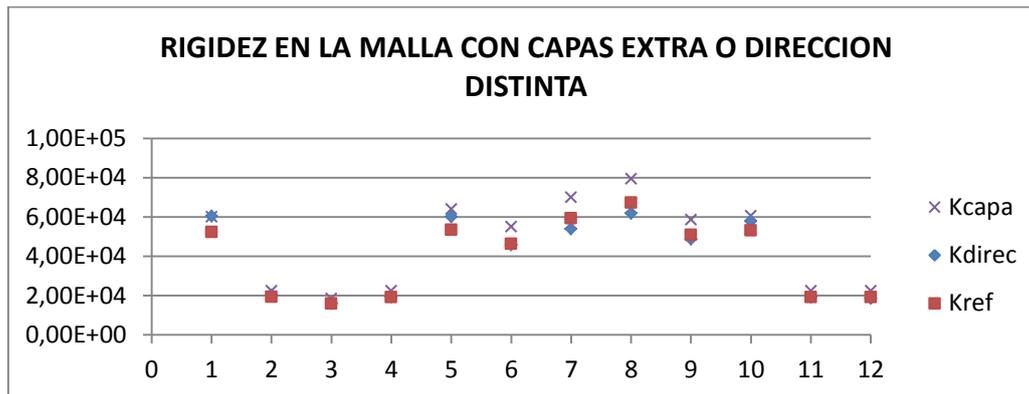
Como se ve en la imagen anterior, mantenemos el espesor y el número de capas, lo único que cambia es la dirección de las láminas.

A continuación una tabla generada en el análisis donde se ven los valores de las diferentes propiedades que realiza el análisis.

PUNTOS						
	1	2	3	4	5	6
Ux	-1,05E-04	-1,31E-04	-1,35E-04	-6,08E-05	5,55E-05	-8,35E-05
Uy	5,47E-04	3,72E-04	2,13E-04	2,09E-05	-5,38E-05	-4,86E-06
Uz	-1,88E-02	-4,90E-02	-6,77E-02	-5,35E-02	-1,96E-02	-2,56E-02
Fz	-1,14E-03	-9,94E-04	-1,08E-03	-1,04E-03	-1,18E-03	-1,17E-03
Kxz	1,09E+07	7,61E+06	8,02E+06	1,71E+07	-2,12E+07	1,40E+07
Kyz	-2,08E+06	-2,67E+06	-5,06E+06	-4,97E+07	2,19E+07	2,41E+08
Kz	6,04E+04	2,03E+04	1,60E+04	1,94E+04	6,01E+04	4,58E+04
	7	8	9	10	11	12

Ux	-2,44E-04	-3,49E-04	-3,14E-04	-2,00E-04	-2,23E-04	-1,81E-04
Uy	1,42E-04	3,41E-04	5,10E-04	5,72E-04	3,15E-04	1,29E-04
Uz	-2,20E-02	-1,92E-02	-2,44E-02	-2,03E-02	-5,13E-02	-5,22E-02
Fz	-1,18E-03	-1,19E-03	-1,19E-03	-1,17E-03	-9,89E-04	-9,77E-04
Kxz	4,85E+06	3,41E+06	3,78E+06	5,86E+06	4,43E+06	5,39E+06
Kyz	-8,32E+06	-3,48E+06	-2,33E+06	-2,05E+06	-3,14E+06	-7,55E+06
Kz	5,39E+04	6,18E+04	4,86E+04	5,78E+04	1,93E+04	1,87E+04

Como en las anteriores tablas, solo tendremos en cuenta los datos que nos da el K_z



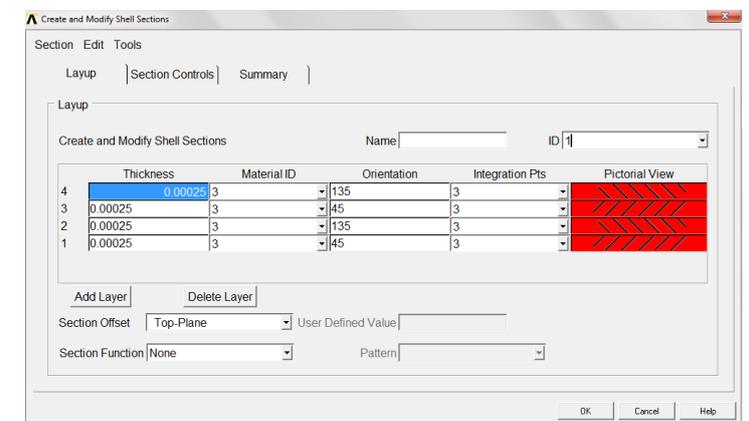
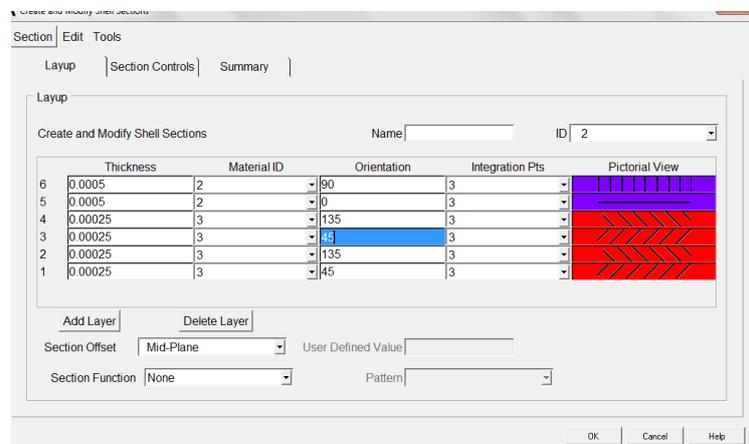
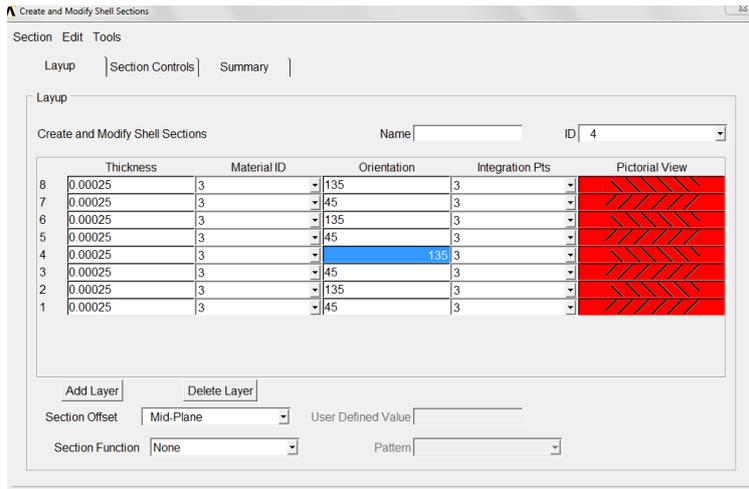
En esta grafica podemos ver que solo cambiando la dirección de las láminas, ganamos rigidez en unos puntos y en otros perdemos rigidez, esto se debe principalmente por la dirección del laminado y las propiedades que tienen los laminados cuando son ortótropos, isótropos, cruzado, simétricos, etc.

Y en el caso de la capa vemos que aumentando una capa extra ganamos rigidez respecto a la pala de referencia.

ANALISIS DE UNA PALA DE PADEL CON UNA CAPA EXTRA EN EL TUBO.

En este análisis se ha utilizado la pala de referencia, se ha modificado la geometría añadiendo dos capas para formar el tejido en el tubo de la pala, en el análisis no se ha modificado ningún material. Como tenemos una geometría máxima definida, se ha reducido también el espesor para evitar pasar de los límites.

La sección del tubo quedaría de la siguiente forma



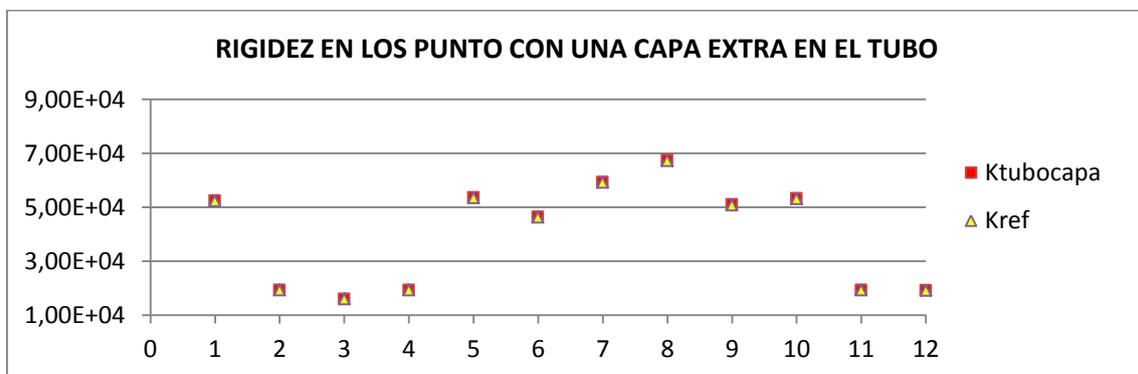
Como se ve en las imágenes, lo único que se ha realizado para este caso es aumentar una capa (2 capas para poder formar el tejido) reduciendo también el espesor para no pasar de los límites.

A continuación una tabla generada en el análisis donde se ven los valores de las diferentes propiedades que realiza el análisis.

PUNTOS						
	1	2	3	4	5	6
Ux	-9,66E-06	-2,68E-06	-1,80E-06	-1,73E-06	-1,88E-06	-1,09E-04
Uy	7,18E-04	4,37E-04	2,31E-04	-4,77E-06	-1,49E-04	-7,47E-05
Uz	-2,17E-02	-5,15E-02	-6,79E-02	-5,40E-02	-2,20E-02	-2,53E-02

Fz	-1,14E-03	-9,94E-04	-1,08E-03	-1,04E-03	-1,18E-03	-1,17E-03
Kxz	1,18E+08	3,71E+08	5,99E+08	6,01E+08	6,28E+08	1,07E+07
Kyz	-1,58E+06	-2,27E+06	-4,68E+06	2,17E+08	7,91E+06	1,57E+07
Kz	5,24E+04	1,93E+04	1,59E+04	1,92E+04	5,36E+04	4,64E+04
	7	8	9	10	11	12
Ux	-1,97E-04	-2,32E-04	-1,90E-04	-9,89E-05	-9,45E-05	-9,11E-05
Uy	5,49E-05	2,78E-04	5,21E-04	6,86E-04	3,38E-04	1,27E-04
Uz	-2,00E-02	-1,76E-02	-2,33E-02	-2,20E-02	-5,14E-02	-5,11E-02
Fz	-1,18E-03	-1,19E-03	-1,19E-03	-1,17E-03	-9,89E-04	-9,77E-04
Kxz	6,02E+06	5,12E+06	6,24E+06	1,19E+07	1,05E+07	1,07E+07
Kyz	-2,15E+07	-4,27E+06	-2,27E+06	-1,71E+06	-2,93E+06	-7,69E+06
Kz	5,93E+04	6,75E+04	5,10E+04	5,32E+04	1,92E+04	1,91E+04

Como en las anteriores tablas, solo tendremos en cuenta los datos que nos da el K_z



Como se observa en la grafica anterior, no hay casi diferencia si añadimos una capa extra al tubo. Por tanto se puede decir que aumentar una capa extra en el tubo es irrelevante para la rigidez de la pala.

ANÁLISIS ESTÁTICO

Aquí veremos una comparación de diferentes análisis estáticos a la segunda opción de cada prueba, todos los análisis realizados serán con una fuerza aplicada de 10Kg suponiendo que será el máximo que se podrá alcanzar.

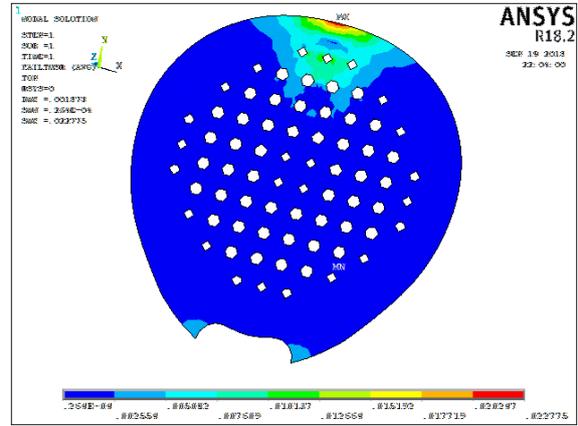
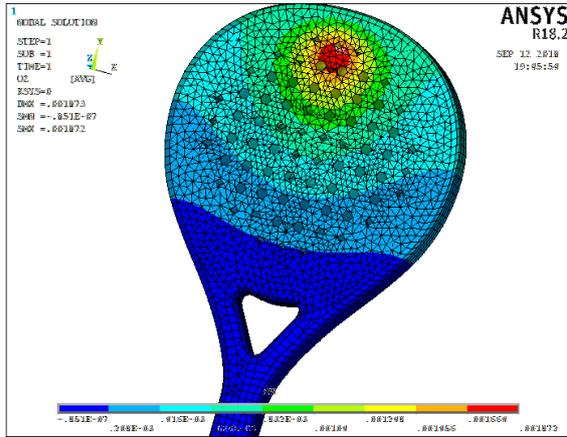
Los pasos a seguir serán los mismos que para la pala de referencia, cada área mide $1.043 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$, y la presión que utilizaremos será de 95877.2771 Pa.

Se mirara y comparará el desplazamiento máximo de cada desplazamiento y se utilizara Tsai-wu para ver la zona donde sufrirá más la pala.

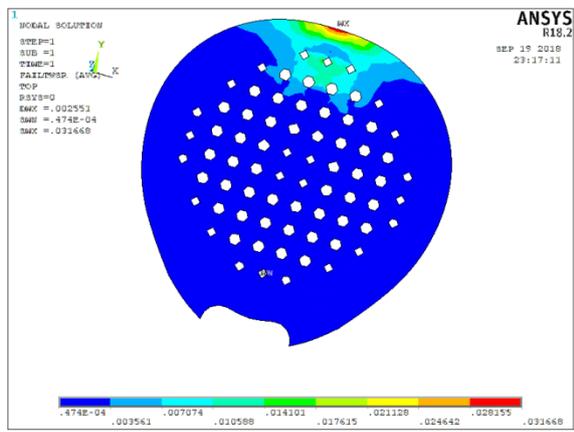
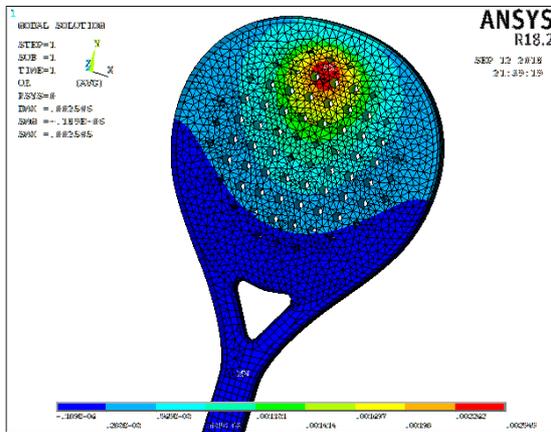
En las imágenes que se verán a continuación, se podrá observar cómo influye el cambio de un material respecto a los cálculos realizados durante el análisis estático de 4 diferentes puntos modificando un material u otro, al final de las imágenes se realizara una tabla resumen de los datos obtenidos sobre el desplazamiento y se hablara sobre el cálculo de Tsai-wu para el coeficiente de seguridad.

- **Punto 1**

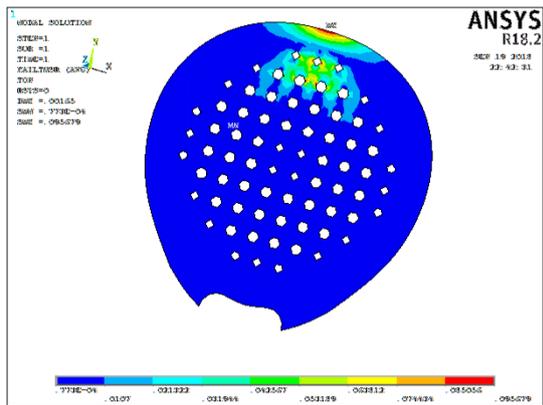
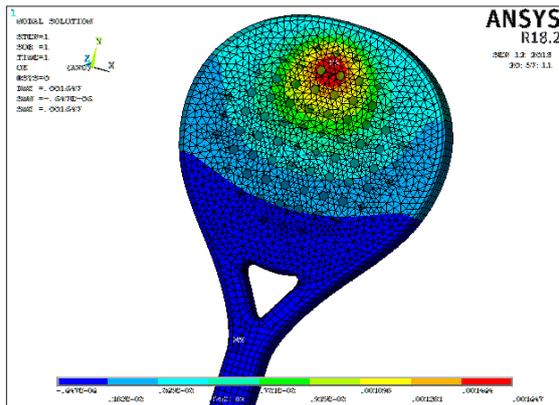
Goma EVA



Tubo

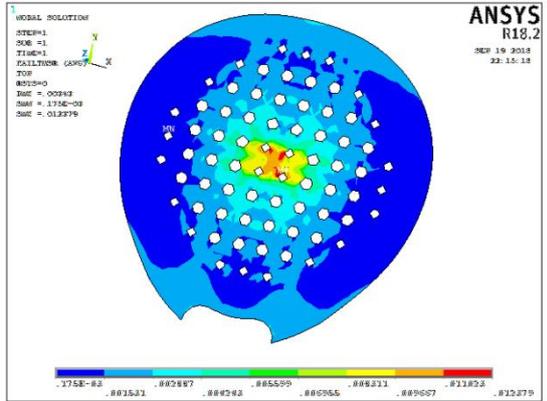
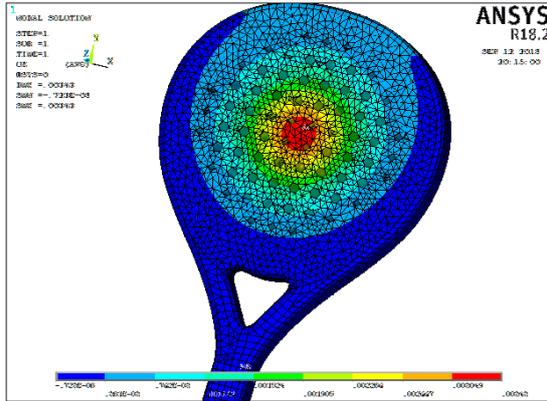


Malla

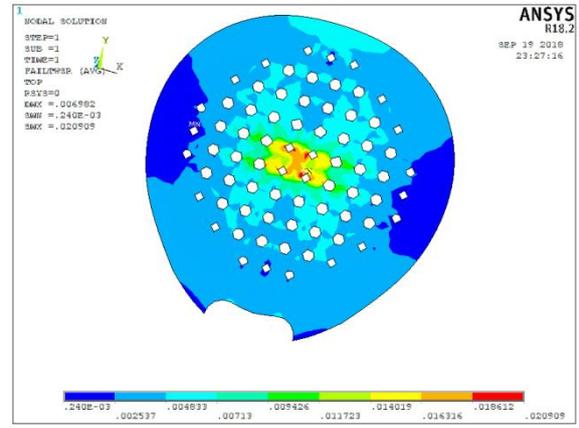
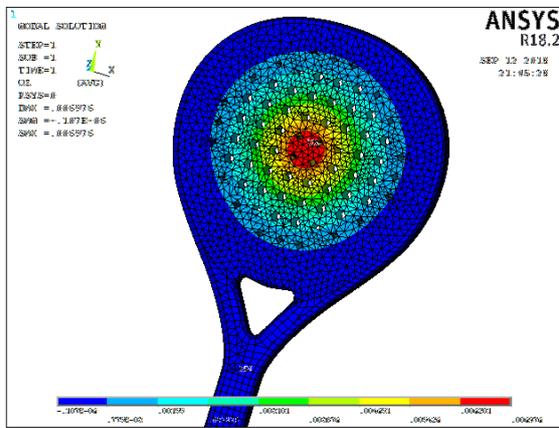


- Punto 3

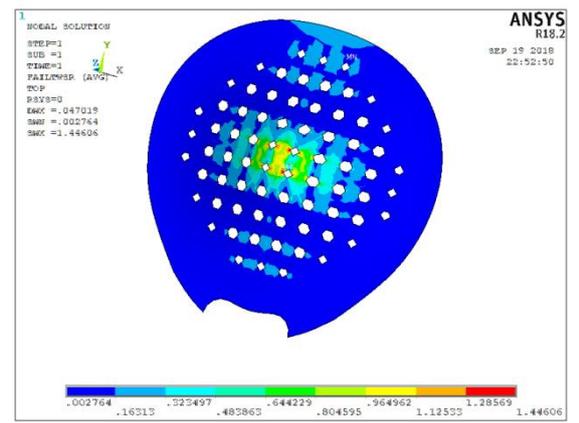
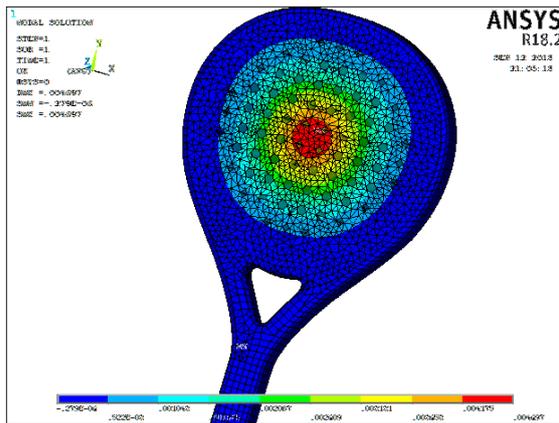
Goma EVA



Tubo

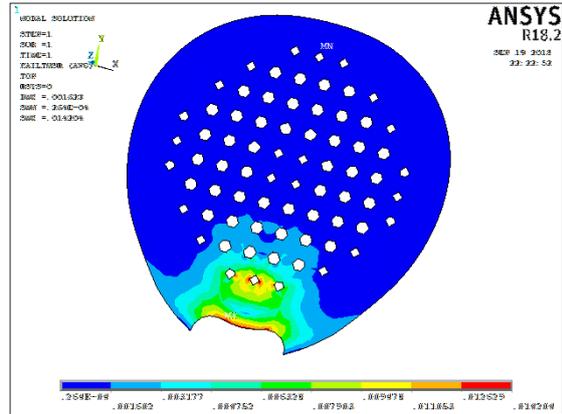
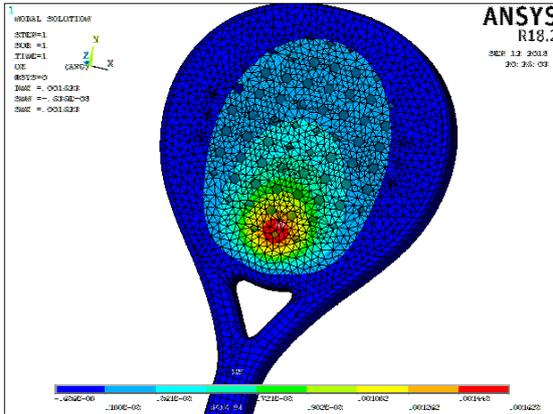


Malla

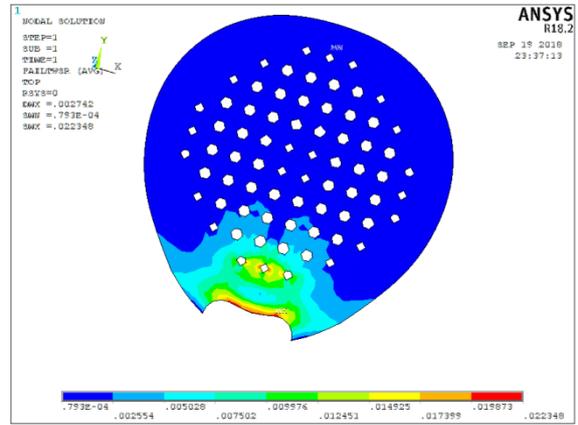
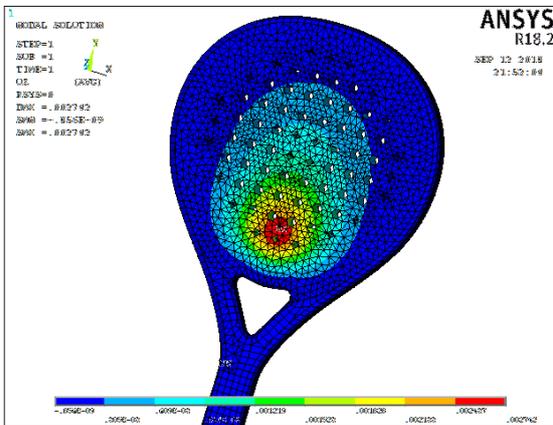


- **Punto 5**

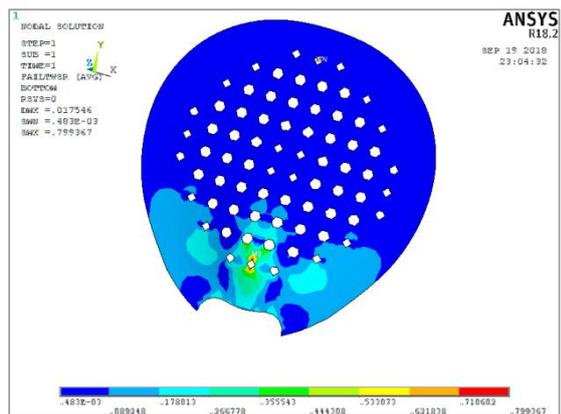
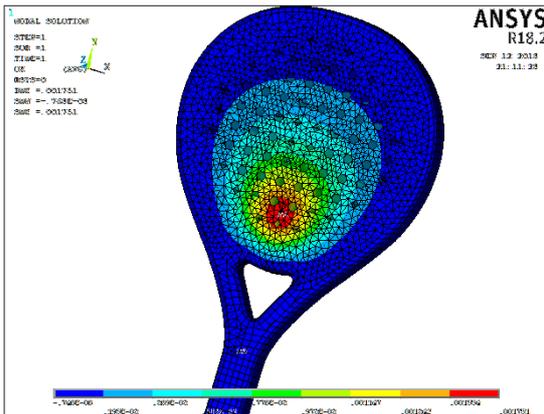
Goma EVA



Tubo

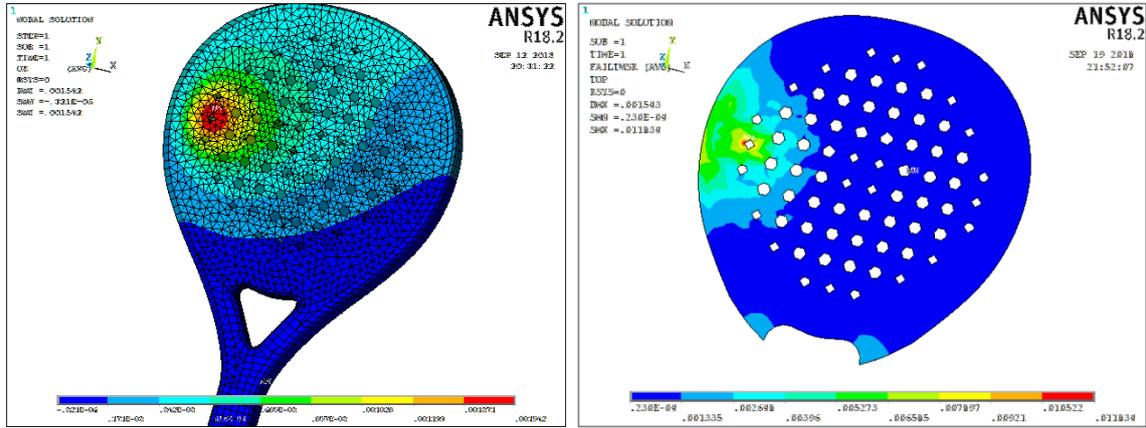


Malla

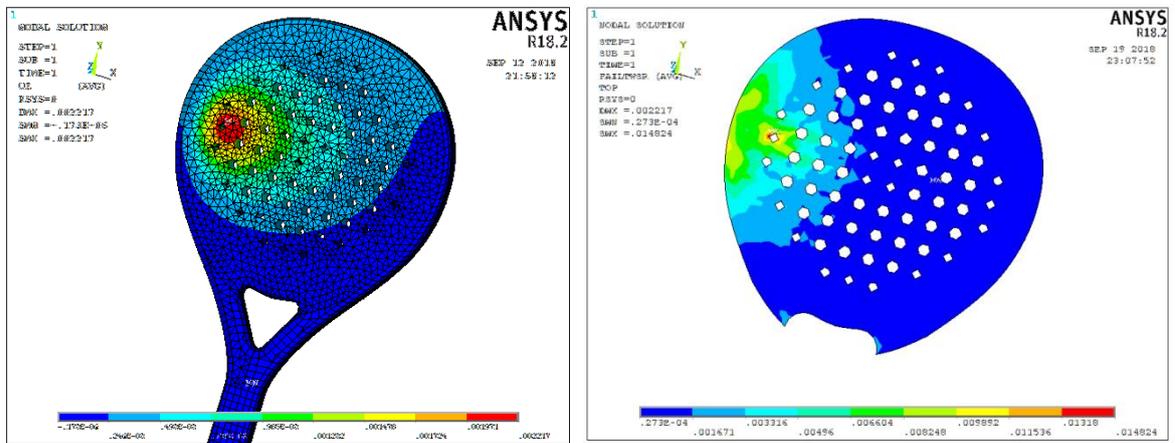


- **Punteo 8**

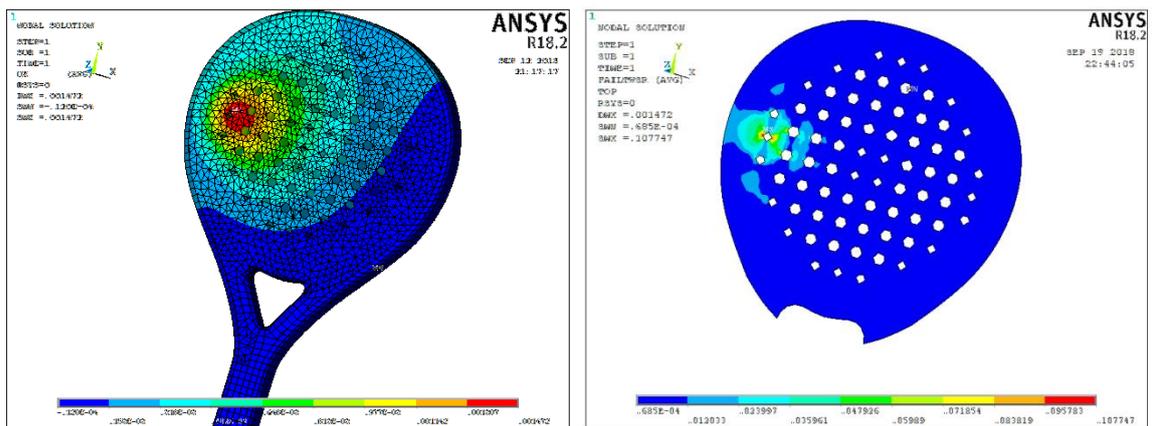
Goma EVA



Tubo



Malla



RESUMEN ANÁLISIS ESTÁTICOS

Como se puedes observar en cada una de las imágenes se ve donde ha sufrido su mayor desplazamiento, además de ver donde afecta más el golpe con el método de Tsai-wu.

A continuación se pone una tabla a modo resumen de los diferentes desplazamientos máximos además de los resultados del cálculo inverso de Tsai-wu según ANSYS.

Desplazamiento máximo (m)	Punto 1	Punto 3	Punto 5	Punto 8
Goma EVA	1,87E-03	3,43E-03	1,62E-03	1,54E-03
TUBO	2,55E-03	6,98E-03	2,74E-03	2,22E-03
MALLA	1,65E-03	4,70E-03	1,75E-03	1,47E-03

Tsai-wu Zona de golpeo	Punto 1	Punto 3	Punto 5	Punto 8
Goma EVA	2,28E-02	1,24E-02	1,42E-02	1,18E-02
TUBO	3,17E-02	2,09E-02	2,24E-02	1,48E-02
MALLA	1,08E-01	1,44606	7,99E-01	1,08E-01

Como se ve en las tablas anteriores, el punto que más se desplaza siempre es el punto 3, esto se debe a que no está cerca del marco de la pala y no dispone de la misma rigidez que se encuentra en los puntos más cercanos a este, por tanto con la misma fuerza que en los demás el desplazamiento máximo que tendrá será mayor que en las otras zonas.

Se ve también cual material afecta más al desplazamiento en cada punto, observándose como al variar la goma EVA que va en el interior se consigue reducir el desplazamiento obtenido en algunos puntos, al variar solo el material de la malla se ve que no reduce tanto el desplazamiento en el punto 3 aunque influya en esa zona ya que la malla es la superficie de golpeo que se encuentra antes de la goma EVA, con esto podemos ver que si queremos que en el centro de la pala no se desplace mucho, se necesitara una goma EVA de mejores propiedades. En cuanto al desplazamiento conseguido al variar el tubo o marco, se ve que no tiene tanta influencia ya que es el que mayor desplazamiento tiene en el punto 3, que es el centro de la pala.

En cuanto a los resultados de Tsai-wu, se puede ver que el material de la malla es el que más afecta, ya es el que menor coeficiente de seguridad da a la hora de realizar los cálculos, dando incluso un resultado de $X > 1$.

Con Tsai-wu también se observa dónde puede romperse antes la raqueta y que zonas son las más frágiles. En este cálculo se puede ver que las zonas más frágiles son los orificios y la parte superior.

A continuación se ponen unas imágenes de fracturas comunes en palas de pádel, sacadas de [5], que dan una idea de donde suelen romperse.



En la imagen anterior se ve como está rota por la parte superior.



En cambio en esta imagen se observa como la fractura se ha producido en los orificios de los que dispone la raqueta.

De los resultados de Tsai-wu vistos en la tabla resumen se puede decir que, en el punto de golpeo 3, se observa un coeficiente mayor que 1, por tanto la zona por donde se rompería, sería por los orificios de la zona de golpeo 3, estos resultados pueden ser debidos al cambio de material, ya que la fibra de carbono es más frágil que la de vidrio que se utiliza en la pala de referencia.

CONCLUSIONES

Los análisis de rigidez realizados han dado una gran variedad de resultados, donde se observa que la fibra de carbono HM es el material que más rigidez da en las zonas donde se aplica.

En cuanto a el núcleo, se ve que con un simple cambio de material en el aumenta bastante la rigidez debido a que la goma EVA es blanda, y si se añade una goma EVA que no es tan blanda aumenta bastante la rigidez. Como se ve en el grafico del caso, un simple cambio de densidad hace que la rigidez, aunque podemos observar un punto que es bastante más grande comparado con los demás, y es el punto 5 de aplicación de presión.

Con respecto al tubo, se puede decir que no se nota tanto la diferencia de rigidez entre los diferentes materiales, pero si se puede decir que en este caso la fibra de carbono HM es la que más rigidez da a la pala cuando la cambiamos. En el grafico del caso se ve claramente que el K_{22} (fibra de carbono HM) es el que da más rigidez.

Con respecto a la malla, es prácticamente como el anterior caso, vemos como la fibra de carbono HM da una mayor rigidez.

Por tanto se puede decir que si necesitamos aumentar la rigidez, optaremos por utilizar fibra de carbono en la pala, además con esto reduciremos su peso, aunque encareceríamos su precio dado que la fibra de carbono es más cara que la fibra de vidrio.

A la hora de analizar qué zona influiría más en la rigidez de la pala, se comparó los diferentes casos del tubo con los de la malla, este fue el método más eficaz para poder obtener los resultados, ya que se aprovechó lo obtenido en los cálculos y solo se tiene que comparar con gráficas, donde se ve que la malla influye más debido a que la malla es la misma superficie de golpeo de la raqueta y cambiando allí el material por uno más rígido se evitara que se deforme a la hora de golpear la bola.

Además se hizo una comparación extra añadiendo el núcleo a la gráfica. Con esto se ve que poner un núcleo con un alto modulo daría una rigidez mayor y seria el que más afectaría a la hora de calcular la rigidez de la pala.

En cuanto a los análisis realizados sobre la capa extra y la dirección, se puede decir que si añadimos capas a la malla podemos obtener una rigidez mayor comparada con solo tener una aunque reduzcamos el espesor para tener el mismo que en el caso normal, mientras que cambiando la dirección podemos decir que debido a las propiedades que se adquieren dependiendo de si es simétrico, ortótropo, isótropo, etc, hacen que en algunas zonas haya más rigidez que la de referencia y en otras menos.

En cuanto a añadir una capa extra en el tubo podemos decir que casi no hay modificación en la rigidez de la pala.

Gracias al análisis estático se ve como se desplaza la pala a la hora de asestar un golpe de unos 100 N de fuerza, se observa que el desplazamiento es mayor en el punto 3, el centro de la pala, ya que es el punto más alejado de las zonas laterales donde los materiales son más rígidos que en el centro. En cuanto a Tsai-wu da una idea de que partes son las más frágiles y porque zonas terminaría rompiendo antes la pala.

BIBLIOGRAFIA

[1] <https://padelstar.es/>

[2] www.streetpadel.es

[3] Temario la asignatura Materiales compuestos.

[4] <http://www.rctss.com/padel/5-tips-para-comprar-una-pala-de-padel-nivel-principiante-2/>

[5] Google imágenes

YouTube (videos de fabricación de palas de pádel)

ANEXO

General information

Designation

Glass, S grade

Typical uses

Reinforcement, as single fibers or yarn or woven mat, in PMCs, MMCs, and

Composition overview

Compositional summary

65%SiO₂-25%Al₂O₃-10%MgO

Form	Fiber
Material family	Glass
Base material	Oxide

Composition detail (metals, ceramics and glasses)

Al ₂ O ₃ (alumina)	25	%
MgO (magnesia)	10	%
SiO ₂ (silica)	65	%

Price

Price	* 17,5	- 29,2	EUR/kg
Price per unit volume	* 4,35e4	- 7,28e4	EUR/m ³

Physical properties

Density	2,49e3	- 2,5e3	kg/m ³
Porosity (closed)	0		%
Porosity (open)	0		%

Mechanical properties

Young's modulus	86	- 93	GPa
Yield strength (elastic limit)	* 3,75e3	- 4,09e3	MPa
Tensile strength	4,7e3	- 4,8e3	MPa
Elongation	5,2	- 5,3	% strain
Compressive strength	* 4e3	- 5e3	MPa
Flexural modulus	* 86	- 93	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	4,5e3	- 4,9e3	MPa
Shear modulus	* 35	- 39	GPa
Bulk modulus	* 51	- 55	GPa
Poisson's ratio	0,21	- 0,23	
Shape factor	1		
Hardness - Vickers	500	- 600	HV
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	* 4,05e3	- 4,41e3	MPa
Mechanical loss coefficient (tan delta)	* 1e-5	- 1e-4	

Impact & fracture properties

Fracture toughness	* 0,5	- 1	MPa.m ^{0.5}
--------------------	-------	-----	----------------------

Thermal properties

Glass temperature	* 650	- 680	°C
Maximum service temperature	300	- 320	°C
Minimum service temperature	-273		°C
Thermal conductivity	1,2	- 1,35	W/m.°C
Specific heat capacity	735	- 740	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	2,8	- 2,95	µstrain/°C

Electrical properties

Electrical resistivity	3,16e15	- 1e16	µohm.cm
Dielectric constant (relative permittivity)	5,2	- 5,34	
Dissipation factor (dielectric loss tangent)	0,002	- 0,007	
Dielectric strength (dielectric breakdown)	* 15	- 20	MV/m

Magnetic properties

Magnetic type	Non-magnetic
---------------	--------------

Optical properties

Color	Clear
Refractive index	1,51 - 1,53
Transparency	Transparent

Critical materials risk

Contains >5wt% critical elements?	Yes
-----------------------------------	-----

Durability

Water (fresh)	Excellent
Water (salt)	Excellent
Weak acids	Excellent
Strong acids	Excellent
Weak alkalis	Acceptable
Strong alkalis	Limited use
Organic solvents	Excellent
Oxidation at 500C	Excellent
UV radiation (sunlight)	Excellent
Halogens	Limited use
Metals	Limited use
Flammability	Non-flammable

Primary production energy, CO2 and water

Embodied energy, primary production	49,3	- 54,3	MJ/kg
-------------------------------------	------	--------	-------

Sources

40.4 MJ/kg (Dhingra, Overly, Davis, 1999); 45.9 MJ/kg (Ecoinvent v2.2); 54.7 MJ/kg (Shen and Patel, 2008); 66 MJ/kg (Kemna et al. 2005)

CO2 footprint, primary production	2,85	-	3,14	kg/kg
Sources				
2.63 kg/kg (Ecoinvent v2.2); 3.36 kg/kg (Kemna et al.				
Water usage	* 281	-	311	l/kg

Processing energy, CO2 footprint & water

Fabric production energy	* 2,48	-	2,73	MJ/kg
Fabric production CO2	* 0,198	-	0,218	kg/kg
Fabric production water	* 1,03	-	1,55	l/kg
Prepreg production energy	* 38,1	-	42	MJ/kg
Prepreg production CO2	* 3,05	-	3,36	kg/kg
Prepreg production water	* 18,3	-	27,4	l/kg

Recycling and end of life

Recycle			
Recycle fraction in current supply	0,1		%
Downcycle			
Combust for energy recovery			
Landfill			
Biodegrade			

Notes

Other notes

Properties for fibers are those parallel to the fiber axis. The yield strength has been equated to the tensile strength for brittle fibers.

Links

ProcessUniverse

Producers

Reference

Shape

General information

Designation

Carbon, HM

Typical uses

Reinforcement, as single fibers or yarn or woven mat, in PMCs, MMCs, and

Composition overview

Compositional summary

C	
Form	Fiber
Material family	Ceramic (technical)
Base material	C (Carbon)

Composition detail (metals, ceramics and glasses)

C (carbon)	100	%
------------	-----	---

Price

Price	* 37,5	- 45	EUR/kg
Price per unit volume	* 6,75e4	- 8,32e4	EUR/m ³

Physical properties

Density	1,8e3	- 1,85e3	kg/m ³
---------	-------	----------	-------------------

Mechanical properties

Young's modulus	370	- 390	GPa
Yield strength (elastic limit)	1,91e3	- 2,11e3	MPa
Tensile strength	2,4e3	- 2,41e3	MPa
Elongation	1,8	- 2	% strain
Compressive strength	2,2e3	- 5,2e3	MPa
Flexural modulus	* 370	- 390	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	2,2e3	- 5,2e3	MPa
Shear modulus	* 165	- 175	GPa
Bulk modulus	* 178	- 180	GPa
Poisson's ratio	0,01	- 0,2	
Shape factor	1		
Hardness - Vickers	660	- 810	HV
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	1,87e3	- 4,42e3	MPa
Mechanical loss coefficient (tan delta)	* 1e-5	- 2e-5	

Impact & fracture properties

Fracture toughness	1	- 2	MPa.m ^{0.5}
--------------------	---	-----	----------------------

Thermal properties

Melting point	3,69e3	- 3,83e3	°C
---------------	--------	----------	----

Maximum service temperature	* 530	-	580	°C
Minimum service temperature	-273			°C
Thermal conductivity	80	-	200	W/m.°C
Specific heat capacity	705	-	715	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	0,2	-	0,4	µstrain/°C
Latent heat of fusion	* 5,8e3	-	5,9e3	kJ/kg

Electrical properties

Electrical resistivity	6,31e4	-	1,58e5	µohm.cm
Galvanic potential	0,14	-	0,22	V

Magnetic properties

Magnetic type	Non-magnetic			
---------------	--------------	--	--	--

Optical properties

Transparency	Opaque			
--------------	--------	--	--	--

Critical materials risk

Contains >5wt% critical elements?	No			
-----------------------------------	----	--	--	--

Durability

Water (fresh)	Excellent			
Water (salt)	Excellent			
Weak acids	Excellent			
Strong acids	Excellent			
Weak alkalis	Excellent			
Strong alkalis	Limited use			
Organic solvents	Excellent			
Oxidation at 500C	Unacceptable			
UV radiation (sunlight)	Excellent			
Flammability	Non-flammable			

Primary production energy, CO2 and water

Embodied energy, primary production	272	-	300	MJ/kg
Sources 286 MJ/kg (Suzuki and Takahashi, 2005)				
CO2 footprint, primary production	* 19,3	-	21,3	kg/kg
Water usage	* 7,03	-	7,77	l/kg

Processing energy, CO2 footprint & water

Fabric production energy	* 2,48	-	2,73	MJ/kg
Fabric production CO2	* 0,198	-	0,218	kg/kg
Fabric production water	* 1,03	-	1,55	l/kg
Prepreg production energy	* 38,1	-	42	MJ/kg
Prepreg production CO2	* 3,05	-	3,36	kg/kg
Prepreg production water	* 18,3	-	27,4	l/kg

Recycling and end of life

Recycle	✘			
Recycle fraction in current supply	4,73	-	5,22	%
Downcycle	✓			
Combust for energy recovery	✓			
Heat of combustion (net)	* 32	-	33,6	MJ/kg
Combustion CO2	* 3,58	-	3,76	kg/kg
Landfill	✓			
Biodegrade	✘			

Notes

Other notes

Properties for fibers are those parallel to the fiber axis. The yield strength has been equated to the tensile strength for brittle fibers.

Links

ProcessUniverse

Producers

Reference

Shape

General information

Designation

Carbon, HS

Typical uses

Reinforcement, as single fibers or yarn or woven mat, in PMCs, MMCs, and

Composition overview

Compositional summary

C	
Form	Fiber
Material family	Ceramic (technical)
Base material	C (Carbon)

Composition detail (metals, ceramics and glasses)

C (carbon)	100	%
------------	-----	---

Price

Price	* 22,5	-	30,1	EUR/kg
Price per unit volume	* 4,05e4	-	5,53e4	EUR/m ³

Physical properties

Density	1,8e3	-	1,84e3	kg/m ³
---------	-------	---	--------	-------------------

Mechanical properties

Young's modulus	225	-	245	GPa
Yield strength (elastic limit)	* 3,75e3	-	4e3	MPa
Tensile strength	4,5e3	-	4,8e3	MPa
Elongation	2	-	2,2	% strain
Compressive strength	* 4,9e3	-	5e3	MPa
Flexural modulus	* 225	-	245	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	4,5e3	-	4,8e3	MPa
Shear modulus	* 100	-	110	GPa
Bulk modulus	* 107	-	109	GPa
Poisson's ratio	0,01	-	0,2	
Shape factor	1			
Hardness - Vickers	660	-	810	HV
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	* 3,83e3	-	4,08e3	MPa
Mechanical loss coefficient (tan delta)	* 1e-5	-	2e-5	

Impact & fracture properties

Fracture toughness	* 1	-	2	MPa.m ^{0.5}
--------------------	-----	---	---	----------------------

Thermal properties

Melting point	3,69e3	-	3,83e3	°C
---------------	--------	---	--------	----

Maximum service temperature	* 530	- 580	°C
Minimum service temperature	-273		°C
Thermal conductivity	80	- 200	W/m.°C
Specific heat capacity	705	- 715	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	0,2	- 0,4	µstrain/°C
Latent heat of fusion	* 5,8e3	- 5,9e3	kJ/kg

Electrical properties

Electrical resistivity	6,31e4	- 1,58e5	µohm.cm
Galvanic potential	0,14	- 0,22	V

Magnetic properties

Magnetic type	Non-magnetic
---------------	--------------

Optical properties

Transparency	Opaque
--------------	--------

Critical materials risk

Contains >5wt% critical elements?	No
-----------------------------------	----

Durability

Water (fresh)	Excellent
Water (salt)	Excellent
Weak acids	Excellent
Strong acids	Excellent
Weak alkalis	Excellent
Strong alkalis	Limited use
Organic solvents	Excellent
Oxidation at 500C	Unacceptable
UV radiation (sunlight)	Excellent
Flammability	Non-flammable

Primary production energy, CO2 and water

Embodied energy, primary production	272	- 300	MJ/kg
Sources 286 MJ/kg (Suzuki and Takahashi, 2005)			
CO2 footprint, primary production	* 19,3	- 21,3	kg/kg
Water usage	* 7,03	- 7,77	l/kg

Processing energy, CO2 footprint & water

Fabric production energy	* 2,48	- 2,73	MJ/kg
Fabric production CO2	* 0,198	- 0,218	kg/kg
Fabric production water	* 1,03	- 1,55	l/kg
Prepreg production energy	* 38,1	- 42	MJ/kg
Prepreg production CO2	* 3,05	- 3,36	kg/kg
Prepreg production water	* 18,3	- 27,4	l/kg

