



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



**CIIM**  
CENTRO DE INVESTIGACIÓN  
EN INGENIERÍA MECÁNICA

## **TRABAJO FIN DE MÁSTER EN INGENIERÍA MECÁNICA**

---

### **COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE PALAS DE PÁDEL UTILIZANDO SIMULACIONES DE ELEMENTOS FINITOS**

---

#### **MÁSTER EN INGENIERÍA MECÁNICA**

Trabajo desarrollado y tutelado por:

**D. Albert Morales Chover**

**Dr. D. Manuel Tur Valiente**

en el

**Departamento de Ingeniería Mecánica y de los Materiales (DIMM)**

de la

**Universitat Politècnica de València (UPV)**

València, 06 de septiembre de 2019



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



**CIIM**  
CENTRO DE INVESTIGACIÓN  
EN INGENIERÍA MECÁNICA



## RESUMEN

---

El Trabajo de Fin de Máster titulado “*Comparación del Comportamiento Dinámico de Palas de Pádel Utilizando Simulaciones de Elementos Finitos*” se confirma como una continuación de la tesis de investigación “*Simulación Dinámica de una Pala de Pádel (Nebot Valls, 2018)*”.

El objetivo fundamental del proyecto reside en la reproducción de las sollicitaciones mecánicas que se desarrollan en una pala de pádel en el momento en el cual se produce el contacto de la pelota y la pala, durante la simulación de un ensayo dinámico, a través de un Análisis Estático Equivalente (en adelante, AEE). De este modo, se minimiza la influencia de las condiciones de contorno y, a su vez, se reducen el tiempo y el coste de cálculo computacional derivados de la resolución del problema haciendo uso de herramientas de Elementos Finitos (en adelante, EF). No se intenta obtener un modelo que arroje resultados exactos en modo y valores, referentes a la distribución de las sollicitaciones mecánicas, si no que se pretende modelar un caso de análisis que, trabajando del lado de la seguridad estructural del modelo, permita reproducir de forma aproximada el comportamiento mecánico de la pala.

Por otro lado, se realiza un ajuste más detallado de las propiedades mecánicas de los materiales con los cuales se define el modelo geométrico, representativo de la pala, que se establece como referencia para que pueda emplearse en futuros proyectos de investigación, relativos al análisis del comportamiento mecánico de la pala, según se defina su configuración constructiva tales como materiales empleados en su fabricación o número y/u orientación de los laminados.

Palabras Clave: Simulación por Elementos Finitos, Tensiones mecánicas, Deformaciones, Goma EVA, Materiales Compuestos, Análisis Estático Equivalente.



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



**CIIM**  
CENTRO DE INVESTIGACIÓN  
EN INGENIERÍA MECÁNICA



## RESUM

---

El Treball de Final de Màster anomenat “*Comparació del Comportament Dinàmic de Pales de Pàdel Utilitzant Simulacions d’Elements Finites*” es consolida com una continuació del projecte d’investigació anomenat “*Simulació Dinàmica d’una Pala de Pàdel (Nebot Valls, 2018)*”.

L’objectiu fonamental del projecte radica en la reproducció de les sollicitacions mecàniques que es desenvolupen a una pala de pàdel en el moment en el qual ocorre el contacte entre la pilota i la pala, durant la simulació d’un assaig de naturalesa dinàmica, a través d’un Anàlisi Estàtic Equivalent. D’aquesta forma, s’aconsegueix minimitzar la influència que tenen les condicions de contorn i, alhora, reduir el temps i el cost associats al càlcul computacional que esdevé necessari per resoldre el problema mitjançant una ferramenta de treball per Elements Finites. No es tracta d’obtenir un model que proporcione uns resultats idèntics en manera de distribució i valors, sino que s’intenta modelar un cas d’anàlisi que, treballant al costat de la seguretat estructural del model, permeta reproduir de forma aproximada el comportament mecànic de la pala.

D’altra banda, es du a terme un procés d’ajust de les propietats mecàniques dels materials amb els que s’ha definit el model geomètric, representatiu de la pala, que esdevindrà una referència per futurs projecte de recerca i d’investigació, relatius a l’anàlisi del comportament mecànic de la pala, segons es defineixi la seva configuració constructiva d’acord als materials utilitzats en la seva fabricació o la quantitat i/o orientació que s’especifique per als laminats amb què s’ha constituït el model.

Paraules Clau: Simulació mitjançant Elements Finites, Tensions mecàniques, Deformacions, Goma EVA, Materials Composts, Anàlisi Estàtic Equivalent.



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



**CIIM**  
CENTRO DE INVESTIGACIÓN  
EN INGENIERÍA MECÁNICA



## ABSTRACT

---

The Post-Degree Final Project entitled “Comparison of Dynamic Behavior of Paddle Blades Using Finite Element Simulations” is confirmed as a continuation of the research thesis called “Dynamic Simulation of a Paddle Blade (Nebot Valls, 2018)”.

The main objective of the project lies on reproducing the mechanical solicitations that are developed in a paddle shot at the moment in which the contact of the ball and the paddle occurs, during the simulation of a dynamic test, through a Static Equivalent Analysis (hereinafter, AEE). In this way, the influence of the conditions of boundary conditions are minimized and, in turn, the time and cost of computational calculation derived from the resolution of the problem are reduced using Finite Element tools (hereinafter, EF) . It is not tried to obtain a model that yields exact results in mode and values, referring to the distribution of the mechanical solicitations, but it is intended to model a case of analysis that, working on the structural safety side of the model, allows reproducing in a way approximate the mechanical behavior of the blade.

On the other hand, a more detailed adjustment of the mechanical properties of the materials with which the geometric model, representative of the blade, is defined, is established as a reference so that it can be used in future research projects, related to the analysis of the mechanical behavior of the blade, as defined by its construction configuration such as materials used in its manufacture or number and/or orientation of the laminates.

Key Word: Finite Element Simulation, Mechanical stresses, Strain, EVA Compound, Composites, Static Equivalent Analysis.



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



**CIIM**  
CENTRO DE INVESTIGACIÓN  
EN INGENIERÍA MECÁNICA



# ÍNDICE

---

1	Objetivo del proyecto .....	13
1.1	Presentación del proyecto .....	13
1.2	Antecedentes .....	14
1.2.1	Caracterización de la pelota .....	14
1.2.2	Caracterización de la pala .....	17
1.2.3	Simulación dinámica del golpe y conclusiones de la tesis .....	20
2	Introducción al pádel.....	21
2.1	El pádel.....	21
2.1.1	Normativa .....	24
2.2	La práctica del pádel. datos estadísticos .....	27
2.2.1	Bases de datos.....	27
2.2.2	Crecimiento social del pádel en españa .....	28
2.2.3	Conclusiones.....	31
3	Simplificación del modelo inicial a través de un AEE.....	33
3.1	Obtención de los parámetros requeridos para la validación del análisis estático equivalente .....	33
3.1.1	Ejecución de la macro para velocidad inicial 20 m/s y obtención de los parámetros cinemáticos asociados a la pelota .....	34
3.1.2	Tensiones generadas sobre las superficies de impacto de la pala.....	38



3.1.3	Cálculo del área de contacto para el instante de máxima deformación de la pelota.....	40
3.1.4	Determinación de la presión .....	42
3.2	Modelado en ANSYS del análisis estático equivalente .....	44
3.2.1	Modelado de la nueva área de impacto .....	47
3.2.2	Definición de las condiciones de contorno .....	53
3.3	Análisis de los resultados .....	55
3.3.1	Conclusiones de la propuesta inicial para el AEE.....	56
3.4	Ajuste del modelo inicial propuesto para el AEE .....	63
3.4.1	Obtención del valor de la superficie de contacto modificada y corrección del modelado.....	63
3.4.2	Conclusiones relativas a la modificación del AEE .....	65
3.5	2ª Modificación para la adaptación del AEE .....	68
3.5.1	Conclusiones.....	68
4	Ajuste del modelo de referencia .....	71
4.1	Configuración constructiva de una pala de pádel.....	71
4.1.1	Comportamiento de la pala según el peso.....	73
4.1.2	Comportamiento de la pala según el balance .....	74
4.2	Materiales de fabricación de una pala de pádel .....	77
4.2.1	Materiales de fabricación para el marco de la pala.....	78
4.2.2	Materiales de fabricación para la superficie de impacto .....	84
4.2.3	Materiales de fabricación para el material de relleno .....	84
		10



4.3	Configuración de los materiales empleados para la caracterización del modelo de referencia .....	89
4.4	Ajuste de la densidad real del material del núcleo .....	90
4.4.1	Cálculo del volumen y el peso de los componentes del modelo .....	90
4.4.2	Ajuste de las propiedades del material de relleno en el modelo definitivo ....	91
4.5	Ajuste de las condiciones de contorno del AEE .....	95
4.6	Modelado del problema ajustado .....	98
4.7	Resultados .....	98
4.7.1	Superficie de impacto frontal .....	99
4.7.2	Superficie de impacto trasera .....	103
5	Conclusiones y desarrollos futuros .....	107
6	Bibliografía.....	111
7	Siglas y acrónimos .....	114
8	Anexo .....	115
8.1	Macro para la simulación dinámica del modelo de referencia para una velocidad inicial de 20 m/s.....	115
8.2	Datos del fichero “ <i>TPosVelEnerF.txt</i> ” .....	118
8.3	Distribución de tensiones y deformaciones para las distintas capas del laminado.....	122
8.3.1	Superficie de impacto delantera.....	123
8.3.2	Superficie de impacto trasera .....	127
8.4	Macro para el cálculo del área de contacto .....	131



8.5	Macro del “ <i>Load Step 1</i> ” .....	132
8.6	Macro del “ <i>Load Step 2</i> ” .....	135
8.7	Distribución de las solicitaciones mecánicas para el AEE inicial .....	138
8.7.1	Superficie de impacto frontal .....	138
8.7.2	Superficie de impacto trasera .....	142
8.8	Análisis solicitaciones mecánicas AEE inicial.....	146
8.9	Distribución de las solicitaciones mecánicas para el AEE modificado..	147
8.9.1	Superficie de impacto frontal .....	147
8.9.2	Superficie de impacto trasera .....	151
8.10	Análisis de las solicitaciones mecánicas para el AEE modificado .....	155
8.11	Distribución de las solicitaciones mecánicas para la 2ª modificación propuesta para el AEE.....	157
8.11.1	Superficie de impacto frontal.....	157
8.11.2	Superficie de impacto trasera.....	161
8.12	Análisis de las solicitaciones mecánicas para la 2ª modificación propuesta para el AEE .....	165

# 1 OBJETIVO DEL PROYECTO

---

## 1.1. PRESENTACIÓN DEL PROYECTO

El objetivo fundamental del presente proyecto reside en obtener una reproducción realista de los resultados relativos al comportamiento mecánico que experimenta una pala de pádel durante un Ensayo Dinámico a través de un Análisis Estático Equivalente (en adelante, AEE). Con ello, se consigue generar un procedimiento de cálculo eficiente, en cuanto a coste de cálculo computacional y tiempo de desarrollo de las simulaciones, que permite determinar la vida a fatiga que posee una pala de pádel cuando se analiza su comportamiento a través de un Análisis por Elementos Finitos “*Finite Element Analysis*” (en adelante, FEA).

A continuación, tan pronto como se verifica que el AEE arroja unos resultados fiables, se procede a modificar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales con los cuales se ha definido el modelo de partida (ver modelo geométrico usado por Nebot Valls (2018)) para analizar la influencia de los materiales en las sollicitaciones mecánicas generadas en la pala.

Por otro lado, con la intención de facilitar la comprensión del proyecto a los lectores menos familiarizados con el deporte del pádel, se realiza una breve introducción del mismo repasando, brevemente, la evolución histórica que ha experimentado este deporte y describiendo la normativa técnica concerniente a la pelota y la pala, fundamental para poder comprender, de forma rápida y sencilla, los estudios propuestos para asegurar la viabilidad del nuevo modelo planteado.

Finalmente, se exponen las conclusiones a las cuales se ha llegado, en función de los resultados obtenidos, y se plantean futuras vías de investigación que pueden realizarse empleando el modelo estático, desarrollado en la presente tesis, como referencia para el análisis de los resultados.

## 1.2. ANTECEDENTES

Como se ha mencionado en el Apartado 1.1, este trabajo no es sino la continuación de las investigaciones ya iniciadas en un trabajo académico anterior (Nebot Valls, 2018, “*Simulación Dinámica de una Pala de Pádel*”), quien estudió la manera más adecuada para modelar los elementos que intervienen en el proceso de golpeo en el deporte del pádel, durante la ejecución de un estudio de naturaleza transitoria.

De este modo, con el objetivo de esclarecer el origen de determinados valores preestablecidos y las suposiciones de comportamiento mecánico consideradas en la presente memoria, se realiza un proceso de sintetizado de la tesis que ha sido adoptada como punto de partida.

Así, el objetivo del trabajo de investigación titulado “*Simulación Dinámica de una Pala de Pádel*” es caracterizar un modelo mecánico, a través de un software FEA (concretamente, ANSYS APDL 18.2), que permita simular el proceso de impacto de la pelota de pádel sobre la pala y, de este modo, estudiar el comportamiento mecánico de ambos elementos (pelota y pala) según los datos obtenidos referentes a:

- Deformaciones.
- Tensiones.
- Reacciones (Fuerzas de Reacción) originadas en el mango de la pala.
- Capacidad de Amortiguamiento. Profundamente ligada a la Capacidad de Absorción Energética que posee la pala.

Para ello, el trabajo se encuentra dividido en 3 etapas de trabajo:

### 1.2.1 CARACTERIZACIÓN DE LA PELOTA

Para asegurar que el modelado de la pelota es correcto, se realiza un ensayo dinámico previo donde se reproduce el comportamiento mecánico que experimenta una pelota de pádel tras dejarla caer, partiendo del reposo, desde una altura inicial de 2,54 metros. De esta manera, el comportamiento de la pelota será correcto si la altura final del bote se encuentra comprendida entre 1,35 metros y 1,45 metros, siempre que el ensayo se realice en un emplazamiento cuya altitud sea menor a 500,0 msnm.

Previo al proceso de modelado 3D de la pelota, se observan una serie estudios relativos a la evolución temporal que experimentan parámetros como la velocidad de la bola, la altura del bote o la variación de la energía media de la pelota (para un modelo 2D simplificado que describa el proceso de bote). Con ello, se intenta ajustar una serie de parámetros relativos a la integración temporal de la simulación que permitan caracterizar con suficiente fidelidad las condiciones reales que se establecen durante el bote, a la vez que se trata de reducir el coste computacional asociado a la simulación del mismo.

De este modo, una vez establecido el Método de Integración Temporal más adecuado, junto con otras condiciones de contorno del problema (intervalos de tiempo entre etapas de la simulación, establecimiento de los valores de amortiguación o elementos de mallado más apropiados para cada uno de los elementos constitutivos de la bola), se procede a analizar el modelo tridimensional, propiamente considerado y ver si el bote se ajusta a los estándares estipulados según la reglamentación. De este modo, cuando los resultados surgen enmarcados dentro de los límites, se puede afirmar que tanto el material de fabricación como la geometría de la bola se encuentran correctamente modelados (ver Tabla 1).

**Tabla 1.** Propiedades del Modelo Definitivo para la Pelota de Pádel

ELEMENTO DEFINIDO		DEFINICIÓN
GEOMETRÍA	$\varnothing_{\text{exterior}}$	<b>5,95 cm</b>
	$\varnothing_{\text{interior}}$	<b>5,55 cm</b>
MALLADO DEL VOLUMEN EXTERIOR PELOTA	PROPIEDADES MATERIAL	Híper-Elastico: $\mu=2$ MPa // $d=0$ Factor Amortiguamiento: <b><math>\beta=0,000163</math></b>
	TIPO ELEMENTO	<b>SOLID186</b>
	TAMAÑO ELEMENTO	<b>0,40 cm</b>
	TIPO MALLADO	<b>Mapeado Hexaédrico</b>
	PROPIEDADES MATERIAL	Comando: <b>TB,FLUID,nºmat,1,1,GAS,TBDAT,1</b>

INTERIOR (ALOJAMIENTO GAS)	TIPO ELEMENTO	<b>HSFLD242 con KEYOPT(6) "compressible"</b>
	<i>REAL CONSTANT</i>	<b>101.325,0 Pa</b>
		Ruta:
	TIPO MALLADO	<b>Modeling → Create → Elements → Surf/Contact → Surf Effect → General Surface → Extra Node</b>
DEFINICIÓN DEL CONTACTO	TIPO ELEMENTO (PELOTA)	<b>CONTA174, con la opción "Impact Constraint" del KEYOPT(7)</b>
	TIPO ELEMENTO (SUELO)	<b>TARGE170</b>
	TOTAL	<b>197.851,6 Pa</b>
PRESIÓN	ATMOSFÉRICA	<b>101.325,0 Pa</b>
	RELATIVA (INTERIOR PELOTA)	<b>96.526,6 Pa</b>
MÉTODO INTEGRACIÓN TEMPORAL	-	<b>NEWMARK</b>
AJUSTE INCREMENTO TEMPORAL	-	<b>AUTOMÁTICO</b>
INTERVALO MÁXIMO INCREMENTO TEMPORAL	-	<b>0,001 s</b>
AMORTIGUAMIENTO DE RAYLEIGH	-	<b><math>\beta=0,000163</math></b>

## 1.2.2 CARACTERIZACIÓN DE LA PALA

Para el modelado de la geometría de la pala no es necesario definir ningún tipo de ensayo dinámico previo que asegure la viabilidad del modelo, dado que se conocen las propiedades mecánicas de todos los materiales necesarios para la fabricación de la pala. Además, la reglamentación establece de forma clara y concisa cuales son los límites dimensionales en los que uno puede moverse a la hora de realizar el diseño constructivo de una pala.

Consecuentemente, el modelado que Nebot Valls (2018) realiza de la pala se ejecuta atendiendo a las condiciones geométricas establecidas por la FIP en el Reglamento Técnico (posteriormente, en los Apartados 4.1 y 4.2 se amplía la información) donde se describen de forma detallada cuales son los límites dimensionales y los materiales con los que se permite fabricar una pala.

Atendiendo a lo expuesto anteriormente, las dimensiones que toma el modelo geométrico que reproduce la pala, en el caso del modelado de partida, son:

- **EMPUÑADURA**
  - Longitud: 9,0 cm.
  - Anchura: No especificado, dado que las horquillas no han sido modeladas.
  - Espesor: 3,8 cm.
  
- **CABEZA DE LA PALA**
  - Longitud: 26,0 cm.
  - Anchura: 26,0 cm.
  - Espesor: 3,8 cm.

En referencia a los materiales empleados para modelar las distintas partes constructivas de la pala, éstos son (ver Tabla 2):

**Tabla 2.** Propiedades mecánicas fundamentales de los materiales de fabricación de la pala

	<b>E (MPa)</b>	<b><math>\rho</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b><math>\nu_{12}</math></b>	<b>G (GPa)</b>
GOMA“EVA”	0,19	950	0,34	-
FIBRA VIDRIO	76,00	2.540	0,22	31,15
RESINA EPOXY	2,40	1.300	0,34	0,89

Por otro lado, resulta básico resaltar el hecho que, tanto la carcasa que recubre el núcleo de la pala como al marco exterior de la misma, han sido modelados haciendo uso de un material compuesto laminado. Dicho material se encuentra conformado por la unión de una serie de fibras (Fibra de Vidrio) y una matriz (Resina Epoxi), según la proporción en volumen siguiente:

- **VOLUMEN FIBRA ( $V_f$ ):** Equivale al 70% en volumen frente al total en volumen del laminado  $\rightarrow \phi_f = 0,7$
- **VOLUMEN MATRIZ ( $V_m$ ):** Ascende al 30% en volumen restante del total del volumen del laminado  $\rightarrow \phi_m = 0,3$

Consecuentemente, haciendo uso de la Ley de las Mezclas, se obtiene el valor de las propiedades mecánicas que definen el comportamiento del compuesto laminado (ver Ec.1, Ec.2, Ec.3 y Ec.4):

$$E_1 = \phi_f \cdot E_f + \phi_m \cdot E_m = 0,7 \cdot 76,00 + 0,3 \cdot 2,40 = 53,950 \text{ GPa} \quad [1]$$

$$E_2 = \frac{E_m \cdot E_f}{\phi_f \cdot E_m + \phi_m \cdot E_f} = \frac{76,00 \cdot 2,40}{0,7 \cdot 2,40 + 0,3 \cdot 76,00} = 7,450 \text{ GPa} \quad [2]$$

$$\nu_{12} = \phi_f \cdot \nu_f + \phi_m \cdot \nu_m = 0,7 \cdot 0,22 + 0,3 \cdot 0,34 = 0,256 \quad [3]$$

$$G_1 = \phi_f \cdot G_f + \phi_m \cdot G_m = 0,7 \cdot 31,15 + 0,3 \cdot 0,89 = 22,080 \text{ GPa} \quad [4]$$

Así mismo, dado el empleo de materiales compuestos para el modelado de la pala, es necesario plantear una serie de hipótesis que faciliten el trabajo con este tipo de materiales dado que, en caso contrario, el coste computacional se dispara y, en ocasiones, no resulta posible trabajar haciendo uso de la versión educacional de ANSYS. Las hipótesis asumidas son:

1. Fibra homogénea, isótropa, linealmente elástica y continua.
2. Matriz homogénea, isótropa, linealmente elástica y continua.
3. Fibras ordenadas de forma repetitiva y regular.
4. La unión entre las fibras y la matriz es perfecta, no existen malas “soldaduras” entre ambas que debiliten puntualmente estructura interna del material y puedan actuar a modo de concentrador de tensiones.
5. La matriz, en las cercanías de la fibra posee las mismas propiedades mecánicas que la resina en su forma bruta.
6. La inter-fase resulta infinitamente delgada.

Para finalizar, los 3 laminados que se emplean en el modelo de referencia, en función de la zona de la pala que se desea fabricar con cada uno, son:

1. **LAMINADO 1 (ID 1):** Constituido por 2 capas de 0,5 mm de espesor cuya orientación es  $45^\circ$  y  $135^\circ$ , respectivamente. Dicho laminado es empleado para constituir el recubrimiento del núcleo.
2. **LAMINADO 2 (ID 2):** Formado por un total de 4 capas, cada una de ellas con un espesor de 0,5 mm, cuya orientación es  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , ordenadas desde el exterior hasta el interior. El laminado se emplea para fabricar el marco de la pala pues, de entre los tres laminados definidos, es el que mayor resistencia posee,
3. **LAMINADO 3 (ID 3):** Definido por 2 capas de 0,5 mm de espesor orientadas a  $0^\circ$  y  $90^\circ$ . Este laminado se utiliza para constituir el recubrimiento exterior de la pala sobre la cual se produce el impacto con la pelota.



### 1.2.3 SIMULACIÓN DINÁMICA DEL GOLPE Y CONCLUSIONES DE LA TESIS

Según se ha comentado en el Apartado 1.1, el objetivo del trabajo propuesto como punto de partida para el presente proyecto, reside en la obtención de una serie de modelos (uno para la pelota y otro para la pala de pádel) que permitan realizar el conjunto de simulaciones dinámicas que ayudan a caracterizar el proceso de golpeo que se produce en el pádel y, con ello, obtener cómo se comportan mecánicamente todos los elementos que se ven envueltos en el proceso.

De este modo, las simulaciones se enfocan en la interacción energética de la pelota sobre la pala para distintas velocidades asociadas al movimiento de avance de la pelota, lo que modifica la energía total involucrada en el golpe. Así mismo, también se modifican las propiedades de la Goma EVA. Con todo ello, se pretende ver como es la evolución tensional sobre la superficie de impacto de la pala y, a su vez, como se comportan las reacciones mecánicas en la zona del mango dado que, al fin y al cabo, es el único punto de control que tiene el jugador sobre la pala.

Así, tomando los datos obtenidos por Nebot Valls (2018) en sus estudios del comportamiento dinámico de la pala, el objetivo que se persigue en el presente proyecto de investigación no es más que la simplificación, mediante la proposición de un AEE, del proceso dinámico asociado al golpe analizado en el trabajo de partida.

Para ello, los AEE deberán reproducir, de manera aproximada, las sollicitaciones mecánicas observadas, fundamentalmente, en la superficie de impacto frontal del modelo de la pala pues, en definitiva, es aquella que debe soportar en mayor medida los esfuerzos que se aplican sobre la misma.

En consecuencia, si se consigue aplicar una fuerza estática equivalente, se puede prescindir de la pelota para las sucesivas investigaciones cuyo objetivo sea analizar, exclusivamente, el comportamiento mecánico de la pala atendiendo a su naturaleza constructiva y, con ello, reducir el tiempo y el coste de cálculo, así como la complejidad asociada a la resolución del problema de contacto.

## 2 INTRODUCCIÓN AL PÁDEL

---

### 2.1. EL PÁDEL

El pádel se define como un deporte de pala y pelota que se fundamenta en un estilo de juego cooperativo entre 2 jugadores y enfrentarse, así, a otra pareja rival.

El deporte del pádel fue creado en Acapulco, México, a principio de la década de 1960 por Enrique Corcuera quien, aprovechando un frontón instalado en su finca, instaló 2 paredes de hormigón de 3 metros de altura en cada uno de los fondos junto con una pared de 2 metros de alto en el lateral opuesto con el objetivo de evitar que la vegetación invadiese la instalación existente. Así mismo, dividió la nueva pista creada en dos áreas de idénticas dimensiones mediante la colocación de una red, similar a la adoptada para la práctica del tenis.

Posteriormente, como consecuencia de las altas temperaturas que se registran, asiduamente, en México, se decidió sustituir de forma parcial el muro de hormigón lateral por una malla de alambre, a la vez que se redujo su altura. De esta manera, se definió la instalación que, en la actualidad, se emplea en la práctica del pádel.



**Ilustración 1.** Primera pista de pádel creada por Enrique Corcuera en 1962

Por otro lado, se decide adoptar la misma reglamentación deportiva que rige el deporte del tenis con la única salvedad que, en el caso del pádel, se permite jugar la pelota si, después de botar en el suelo, ésta rebota en alguna de las paredes de hormigón habiendo dado, únicamente, un solo bote con anterioridad. Así mismo, se adopta como instrumentación necesaria para su práctica la misma pelota que se emplea en el tenis, aunque las palas usadas no son las palas reglamentarias de dicho deporte, sino que se adopta la pala que se utilizaba, por aquel entonces, en el *Platform Tennis*.

En el año 1974, el empresario español Alfonso de Hohenlohe, amigo personal de Corcuera, viaja a México y se interesa por la práctica del nuevo deporte. De este modo, a su regreso a España, tras realizar ligeras modificaciones en las normas de juego y en la definición del terreno de juego, construye las dos primeras instalaciones de pádel moderno en un club de la ciudad de Marbella, el Marbella Club. Con ello, el pádel experimenta un fuerte crecimiento social dentro de los clubs deportivos de la Costa del Sol, convirtiéndose en un deporte practicado, en sus etapas iniciales, por gente de clase social alta.

Posteriormente, en 1975, Julio Menditengui, durante una estancia en Marbella es testigo de la popularidad que el pádel ha adquirido en la Costa del Sol y decide promocionarlo en Argentina. Consecuentemente, en pocos años, el pádel se convierte en el segundo deporte más practicado en dicho país con un total de más de 4.000.000 de jugadores y más de 10.000 pistas de pádel construidas. Este hecho, propició que el deporte del pádel se extendiese a países limítrofes como Uruguay, Brasil o Chile convirtiendo, de esta manera, a Sur América en la cuna de la profesionalización del pádel. Por ello, cuando se visualiza el ranking actual del WPT (*World Padel Tour*), se observa como gran parte de los mejores jugadores son de nacionalidad suramericana (ver Tabla 3).

Tabla 3. TOP 3 Ranking WPT<sup>1</sup>

JUGADOR	RANKING	NACIONALIDAD
Carlos Daniel Gutiérrez	1	ARG
Maximiliano Sánchez	2	ARG
Francisco Navarro Compán	3	ESP

<sup>1</sup> Ranking oficial del WPT a fecha de 04 de junio de 2019.



En España, por el contrario, hay que esperar hasta el año 1987 para asistir al nacimiento de la AEP (Asociación Española de Pádel) a manos de Concha Galatas, Rafael Silvela y Pedro Ballvé, cuyo objetivo será la organización normativa y a promoción del deporte del pádel en nuestro país. No obstante, no es hasta finales de la década de 1990 que el pádel experimenta su auge definitivo motivado, principalmente, por tratarse de un deporte que es practicado por las personalidades más relevantes socialmente del país como políticos, empresarios de éxito o deportistas de otras disciplinas.

Años más tarde, en mayo de 1993 se da uno de los pasos más importantes para la consolidación del pádel como deporte profesional con el reconocimiento, por parte del CSD (Consejo Superior de Deportes), del mismo como nueva modalidad deportiva. Este hecho, propicia que, a fecha de 28 de septiembre de 1996, pueda crearse la FEP (Federación Española de Pádel) y, con ella, se desarrolle la reglamentación a nivel nacional del deporte que favorezca la creación del primer circuito de torneos profesionales.

Por esas fechas, los torneos profesionales disputados eran torneos por nacionalidades donde los mejores jugadores de cada una de las naciones participantes se enfrentaban entre sí siendo, los Campeonatos Mundiales, los eventos de mayor trascendencia. Dichos eventos se disputaban, cada dos años, en un país diferente y, con el paso del tiempo fueron adquiriendo mayor número de participantes. De esta forma, en el Primer Campeonato Mundial celebrado el año 1992 en España participaron jugadores de 6 nacionalidades distintas mientras que, en el año 2000, en el Campeonato celebrado en Francia ya se pueden observar hasta 11 nacionalidades distintas. De este modo, se aprecia la fuerte popularización que adquiere este deporte durante la última década del S. XX.

Finalmente, en el año 2013, se produce un acuerdo entre la FIP (Federación Internacional de Pádel) y el WPT (*World Padel Tour*), circuito creado en 1998 por la AJPP (Asociación de Jugadores Profesionales de Pádel), para incluir dicho circuito dentro del circuito de la FIP y permitir, con ello, que la puntuación pueda ser considerada para la determinación del ranking mundial de jugadores, tanto del circuito masculino como del circuito femenino.



**Ilustración 2.** Torneo femenino de Suecia 2018, incluido dentro de circuito del WPT

### 2.1.1 NORMATIVA<sup>2</sup>

Previo al estudio del comportamiento mecánico de la pala de pádel, es necesario y fundamental hacer un análisis de la Normativa Oficial que rige el deporte del pádel, dado que el objetivo del proyecto consiste en definir una pala que, constructivamente, cumpla con los requerimientos técnicos establecidos por la FIP.

En consecuencia, no se ahonda en la normativa referente a las reglas de juego ni a la definición constructiva de las pistas, dado que no aportan una información relevante para la definición de los casos de estudio. Contrariamente, se realiza un exhaustivo análisis de la reglamentación referente al diseño constructivo de las palas y las pelotas de pádel pues, como se verá en capítulos posteriores del proyecto (Apartado 4 y, en adelante), son los dos elementos que intervienen en la definición de los estudios que permiten analizar el comportamiento mecánico de la pala en la interacción resultante del golpeo de la pelota con la pala.

---

<sup>2</sup> Reglamento oficial aprobado por la FIP y en vigencia desde el 01 de enero de 2017.

### 2.1.1.1 LA PELOTA

Las únicas pelotas aptas para su uso en competición son aquellas que han sido homologadas por la FIP.

Para que la pelota consiga dicha homologación, ésta debe cumplir con una serie de requisitos constructivos y de comportamiento dinámico.

Por un lado, la pelota debe poseer una forma perfectamente esférica y estar fabricada mediante un material gomoso, con un recubrimiento exterior amarillo o blanco que permita una deformación adecuada durante los golpes y el bote, evitando comportamientos irregulares e impredecibles. Así mismo, dimensionalmente, su diámetro debe estar comprendido entre los 6,35 cm y los 6,77 cm, estando su peso comprendido entre los 56,9 g y los 59,4 g.

Por otro lado, la presión interna tiene que estar comprendida entre los 4,6 kg y los 5,2 kg por cada 25,4 mm<sup>2</sup>, es decir, por cada pulgada cuadrada de superficie. Con ello, se debe conseguir que la pelota tenga una altura de bote, desde su caída en estático a 2,5400 m de altura, comprendida entre 1,3500 m y 1,4500 m. Sin embargo, si la instalación se encuentra a una altura superior a los 500,0000 metros sobre el nivel del mar (msnm), se puede modificar su presión interna con el objetivo de que su bote se encuentre comprendido entre 1,2192 m y 1,3500 m.

### 2.1.1.2 LA PALA

De forma análoga al caso de la pelota, la pala empleada para la práctica deportiva del pádel debe adaptarse, compulsoriamente, a la normativa establecida por la FIP de forma que éstas serán analizadas mediante una serie de ensayos, previo a su comercialización, con el objetivo de obtener la homologación para su venta.

Fundamentalmente, la pala se encuentra formada por 2 elementos constructivos básicos, la cabeza y el puño o mango.

Genéricamente, cualquier pala homologable debe cumplir con una serie de requerimientos constructivos, por lo que a su configuración geométrica conjunta (cabeza más puño) se refiere:



- La longitud total de la pala no puede exceder los 45,5 cm.
- La tolerancia máxima admitida para el grosor de cada uno de los elementos que configuran la pala en su totalidad es del 2,5 %.
- La zona destinada al golpeo debe ser perforada por un número no limitado de agujeros cilíndricos idénticos cuyo diámetro esté comprendido entre los 9,0 mm y los 13,0 mm. No obstante, considerando una zona periférica alrededor del área de golpeo de 4,0 cm, medidos desde el borde de la pala, se permite incluir orificios con distinta forma o tamaño a los orificios definidos en la zona central de la cabeza, siempre que su inclusión no modifique la esencia del juego.
- La superficie de golpeo, de idéntica configuración por ambas caras de la pala, puede ser lisa o rugosa. No obstante, no se permite la adición de adhesivos u otros dispositivos que alteren el comportamiento dinámico de la pala. Únicamente, se permite usar aquellos elementos cuya finalidad sea la reducción de las vibraciones que se generen durante el golpe, la reducción del deterioro de la pala o la redistribución del peso de la misma.
- Como medida de seguridad, con el fin de evitar que la pala resbale y salga despedida durante el golpe, es obligatorio instalar un cordón no elástico en el mango, de longitud no superior a 35,0 cm.
- La pala no puede disponer de ningún dispositivo, visible o audible, que permita ser usado durante el transcurso de un partido para transmitir información de juego o consejo al jugador.

De forma más específica, tanto el mango como la cabeza de la pala deben cumplir con una serie de restricciones geométricas adicionales.

- El puño de la pala debe tener una longitud máxima de 20,0 cm y un grosor y un ancho límites de 5,0 cm.
- La cabeza posee un largo variable, definido por la longitud máxima de la pala en su conjunto y por la longitud establecida para el mango. El ancho,

sin embargo, sí está limitado a una dimensión máxima de 26,0 cm, mientras que el grosor no puede sobrepasar los 3,8 cm.



**Ilustración 3.** Pala Varlion Avant Carbon Hexagon 2

## 2.2. LA PRÁCTICA DEL PÁDEL. DATOS ESTADÍSTICOS

Para comprender el potente desarrollo tecnológico experimentado por el material deportivo, necesario para la práctica del pádel, y con el objetivo de reseñar las importantes inversiones económicas, realizadas por las grandes compañías del sector (HEAD, Varlion, Volkl, EME...) en investigaciones de I+D+I, relacionadas al desarrollo constructivo de nuevas palas, es fundamental echar un vistazo a los datos estadísticos relativos a la práctica del pádel en España. (Los datos del crecimiento social que el pádel experimenta en España son extrapolables a otros países como Argentina, Uruguay, Brasil, Francia o Bélgica)

### 2.2.1 BASES DE DATOS

Los datos presentados provienen de un conjunto de Encuestas Anuales de Hábitos Deportivos elaboradas por el Consejo Superior de Deportes (CSD) y por el Ministerio de Cultura, Ciencia y Deporte de España entre los años 2000 y 2015 (<http://www.mecd.gob.es>) (no ha sido posible encontrar datos más actuales, aunque se supone que la evolución observable en los estudios se mantiene en años posteriores).

En ellas, se registran los datos relativos a practicantes de actividad física y, también, a practicantes habituales y ocasionales del pádel, siendo el número total de elementos de muestreo de 61.189 (n=61.189).

Para tener una referencia global de individuos sobre la cual poder comparar la cantidad de personas que habitualmente practican deporte y, más precisamente, que juegan a pádel, se toma el total de individuos que conforman la población española. Por ello, se recurre, fuente de información, al Censo Poblacional del Instituto Nacional de Estadística (<http://www.ine.es>).

Por otro lado, para conocer al total de personas federadas (aquellas que poseen licencia federativa) para la práctica del pádel, se recurre a la fuente información que supone la de datos de la FEP (<http://padelfederacion.es>). Dicha fuente solamente proporciona datos desde el año 2012, momento en el cual se reconoce de forma oficial, por parte del CSD, la FEP.

## 2.2.2 CRECIMIENTO SOCIAL DEL PÁDEL EN ESPAÑA

Para analizar de forma breve y clara el crecimiento social experimentado por el pádel entre los años 2000 y 2015, se anexan una serie de tablas que resumen, por edad y género, el número de personas deportistas, el número de personas que juegan al pádel y el número de federados, frente al total de la población española. (ver Tabla 4, Tabla 5 y Tabla 6). Así mismo, se determina el número de jugadores existente en el año 2015 según su rango de edad, pudiendo observarse como se trata de un deporte que puede practicarse a cualquier edad, lo que supone un factor crucial para explicar el auge popularidad y, con él, el desarrollo del material técnico asociado a su práctica.

**Tabla 4.** Practicantes de pádel en España por año y género

<b>PARÁMETRO TOTAL</b>	<b>Año 2000</b>	<b>Año 2005</b>	<b>Año 2010</b>	<b>Año 2015</b>
CENSO POBLACIÓN	40.470.182	43.296.335	46.951.532	46.449.565
PRACTICANTES DEPORTE	12.545.756	14.287.790	20.189.158	24.850.517

PRACTICANTES PÁDEL	175.640	342.906	1.191.160	4.174.886
% PRACTICANTES PÁDEL <sup>3</sup>	1,40	2,40	5,90	16,80
<b>HOMBRES</b>	<b>Año 2000</b>	<b>Año 2005</b>	<b>Año 2010</b>	<b>Año 2015</b>
CENSO POBLACIÓN	19.826.339	21.335.283	22.982.272	22.826.546
PRACTICANTES DEPORTE	6.740.955	7.690.701	11.261.313	13.650.274
PRACTICANTES PÁDEL	-	-	-	2.962.109
% PRACTICANTES PÁDEL	-	-	-	21,70
<b>MUJERES</b>	<b>Año 2000</b>	<b>Año 2005</b>	<b>Año 2010</b>	<b>Año 2015</b>
CENSO POBLACIÓN	20.643.843	21.961.052	23.504.349	23.623.019
PRACTICANTES DEPORTE	4.541.645	5.709.873	7.286.348	11.220.934
PRACTICANTES PÁDEL	-	-	-	1.234.302
% PRACTICANTES PADEL	-	-	-	11,00

**Tabla 5.** Distribución de los practicantes de pádel en España por rango de edad para el año 2014

RANGO DE EDAD	PRÁCTICA DEL PÁDEL	
	% PRACTICANTES POR RANGO FRENTE AL TOTAL DE PRACTICANTES	PRACTICANTES POR RAGO
15 a 19	15,90	342.373
20 a 24	20,00	463.860
25 a 34	16,00	945.632
35 a 44	12,80	1.013.081

<sup>3</sup> Frente al total de practicantes de algún de deporte.

45 a 54	7,50	532.500
55 a 64	3,90	213.962
65 a 74	0,60	25.839
75 o superior	0,30	12.856

**Tabla 6.** Distribución de las licencias relacionadas con la práctica del pádel en España por género y año

<b>PARÁMETRO</b>	<b>Año 2000</b>	<b>Año 2005</b>	<b>Año 2010</b>	<b>Año 2015</b>
<b>TOTAL</b>				
TOTAL LICENCIAS DEPORTIVAS	2.644.532	3.138.201	3.520.192	3.388.098
TOTAL LICENCIAS EN PÁDEL	6.137	13.648	32.432	46.808
% LICENCIAS PÁDEL vs TOTAL LICENCIAS	0,23	0,43	0,92	1,38
<b>HOMBRES</b>	<b>Año 2000</b>	<b>Año 2005</b>	<b>Año 2010</b>	<b>Año 2015</b>
TOTAL LICENCIAS DEPORTIVAS	1.639.727	2.452.218	2.814.139	2.671.336
TOTAL LICENCIAS EN PÁDEL	-	9.006	21.023	32.446
% LICENCIAS EN VIGOR	-	78,14	79,94	78,84
% LICENCIAS PÁDEL EN VIGOR	-	65,99	64,82	60,52
% LICENCIAS PÁDEL vs TOTAL LICENCIAS	-	0,37	0,75	1,21
<b>MUJERES</b>	<b>Año 2000</b>	<b>Año 2005</b>	<b>Año 2010</b>	<b>Año 2015</b>
TOTAL LICENCIAS DEPORTIVAS	423.647	563.550	706.053	716.762
TOTAL LICENCIAS EN PÁDEL	-	4.642	11.409	16.997
% LICENCIAS EN VIGOR	-	17,96	20,06	21,16

% LICENCIAS PÁDEL EN VIGOR	-	34,01	35,18	31,70
% LICENCIAS PÁDEL vs TOTAL LICENCIAS		0,82	1,62	2,37

### 2.2.3 CONCLUSIONES

Tras realizar el análisis de los datos presentados en el Apartado 2.2.2, se llega a la conclusión que:

- El pádel es un deporte cuya popularidad se encuentra, desde el año 2000 (momento de inicio de los registros estadísticos), en continuo crecimiento, llegando a convertirse en la actualidad en el segundo deporte con mayor número de practicante, solamente superado por el fútbol.
- El número de personas federadas (árbitros, jueces, jugadores...) ha crecido en más de un 800% durante el período de análisis estadístico, pasando de 6.143 personas federadas en el año 2000 hasta las 56.613 en 2015.
- El pádel, por su naturaleza de juego, es un deporte que tiene gran perspectiva de crecimiento en años venideros, dado que se trata de un deporte que puede practicarse en un rango de edades muy amplio, pues su exigencia física a nivel amateur no resulta crítica para su práctica. Así mismo, se trata de un deporte que puede ser practicado tanto por clases económicamente pudientes como por gente con escasos recursos económicos, dado que el material que requiere su práctica se encuentra disponible en una gran gama de modelos adaptándose, de este modo, a los recursos económicos de que cada individuo dispone.

Con todo ello, se puede ver que el pádel es un deporte que tiene un vasto nicho de mercado en cuanto a material deportivo en venta se refiere. Por este motivo, se siguen invirtiendo grandes cantidades de dinero en proyectos de I+D+I de material deportivo que permitan la práctica del pádel a todos los niveles de juego.



En la actualidad, en gamas “profesionales” se trabaja con gran variedad de materiales y formas geométricas que permiten adaptarse, casi de forma personalizada, al estilo de juego de los jugadores. De este modo, combinando materiales y la disposición de los elementos que conforman la pala, se pueden modificar aspectos técnicos como la rigidez, la manejabilidad, el peso, el control o la potencia del golpeo.

Así, se hace necesario disponer de modelos “base” que permitan analizar las múltiples combinaciones de los elementos empleando ensayos (como los de naturaleza estática) que reduzcan el coste de cálculo y permitan tener puntos de partida que arrojen datos de referencia válidos.

Es en este punto, donde surge la motivación del proyecto, pues se pretende, como se ha comentado en apartados anteriores, validar un modelo de referencia que permita ensayar de forma estática el comportamiento mecánico que experimenta una pala de pádel durante un golpeo y, a su vez, arroje datos similares a los que se obtendrían ensayando dicha pala de forma dinámica. De este modo, se permite reducir tanto el tiempo como el coste de cálculo asociado al problema.

## 3 SIMPLIFICACIÓN DEL MODELO INICIAL A TRAVÉS DE UN AEE

---

### 3.1. OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS REQUERIDOS PARA LA VALIDACIÓN DEL ANÁLISIS ESTÁTICO EQUIVALENTE

Tal como se define en el Apartado 1.1. del presente documento, el objetivo inicial del proyecto reside en el planteamiento de un AEE que reproduzca el comportamiento mecánico que experimenta la pala cuando se aplica la fuerza que ejerce la bola sobre la pala durante el golpe. Las solicitaciones mecánicas a analizar se corresponden con aquellas que se observan en el instante en que la deformación de la pelota alcanza su valor máximo, durante el transcurso de la simulación de un análisis dinámico, y que coincide con el instante de velocidad nula para la pelota.

Para ello, se ejecuta en el software ANSYS 18.2 el modelo dinámico tomado como referencia. De este modo, se obtienen todos los parámetros que definen el comportamiento dinámico y mecánico de los distintos elementos que conforman el caso de estudio, durante la realización de dicho ensayo.

Sin embargo, antes de proceder a la determinación de las solicitaciones mecánicas que experimenta la pala durante la ejecución de un análisis dinámico, resulta básico destacar que los resultados asociados a estos parámetros vienen determinados, fundamentalmente, por la velocidad inicial que posee la pelota. De esta forma, a mayor velocidad inicial de la pelota, mayor cantidad de energía cinética posee en el momento del contacto y, en consecuencia, mayor es el intercambio energético que se origina entre los distintos elementos durante el golpe.

Por este motivo, el análisis de los resultados que se desprenden al ejecutar el ensayo dinámico está ligado, única y exclusivamente, a los valores que se generan para una velocidad inicial, impuesta arbitrariamente, de la pelota de 20,0 m/s.

### 3.1.1 EJECUCIÓN DE LA MACRO PARA VELOCIDAD INICIAL 20 m/s Y OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS CINEMÁTICOS ASOCIADOS A LA PELOTA

Para ejecutar el ensayo dinámico se abre el archivo de referencia conjuntamente con los casos de carga (*Load Step (LS) 1, 2, 3*) que se necesitan para modelar, al completo, la interacción que se establece entre la pelota y la pala en el momento del contacto<sup>4</sup>.

Una vez abierto el archivo que contiene el modelo completo, se define un nuevo análisis dinámico (en el software aparece definido con el término “*Transient*”), compuesto por los casos de carga anteriormente mencionados. La hoja de ruta a seguir para establecer el ensayo dinámico es:

***Solution* → *Analysis Type* → *New Analysis* → *Structural* → *Transient***

Resulta fundamental no seleccionar por error la opción “*Static*”, en el instante en el cual se define la naturaleza del ensayo pues, el “*Load Step 3*”, posee naturaleza transitoria y no podría ser ejecutado, obteniéndose con ello errores en la solución del problema.

Seguidamente, como se ha comentado en párrafos anteriores, se deben cargar los distintos casos de carga que definen al completo el problema. Análogamente a como se ha procedido en el paso anterior, se adjunta la hoja de ruta a seguir para su introducción en el software:

***Solution* → *Solve* → *From LS Files***

Una vez seleccionada la opción “*From LS Files*”, se abre una nueva ventana de diálogo (ver Ilustración 4) donde se especifican los casos de carga que el programa debe leer para aplicar para la simulación del análisis.

---

<sup>4</sup> En este apartado se explica el proceso que, para esta tesis, se ha seguido con el objetivo de ejecutar el modelo dinámico, el cual permite extraer el comportamiento mecánico de la pala a partir de su interacción con la pelota, durante el impacto. No obstante, a parte del proceso desarrollado, se pueden obtener los mismos resultados ejecutando, directamente, la macro que se anexa al final del documento en la barra de comandos del software.

 Solve Load Step Files

[LSSOLVE] Solve by Reading Data from Load Step (LS) Files

LSMIN Starting LS file number	<input type="text" value="1"/>
LSMAX Ending LS file number	<input type="text"/>
LSINC File number increment	<input type="text" value="1"/>

**Ilustración 4.** Ventana desplegable donde se introducen los casos de carga que modelan, al completo, el problema dinámico

Los campos que aparecen vacíos, dentro de la ventana de diálogo, deben rellenarse con la información siguiente:

- **LSMIN: 1.** Se establece el caso de carga inicial que da comienzo al ensayo.
- **LSMAX: 3.** Se especifica cual es el último caso de carga que deberá ejecutarse durante el transcurso de la simulación.
- **LSINC: 1.** Permite controlar el incremento dentro de todos los casos de carga, evitando, en caso que así lo requiera el estudio, simular ciertos casos de carga.

Con el lanzamiento de la simulación del ensayo, bien con la ejecución de la macro “PosVel2”<sup>5</sup> o bien siguiendo el planteamiento descrito con anterioridad, se genera un nuevo archivo “TPosVelEnerF.txt”. En dicho archivo, se recogen todos los datos dinámicos generados durante la simulación del ensayo<sup>6</sup>. De entre todos los datos, los únicos que realmente resultan relevantes para la obtención del instante de máxima

---

<sup>5</sup> Se trata de la macro que permite analizar el comportamiento dinámico del conjunto cuando la velocidad de partida de la pelota es de 20,0 m/s.

<sup>6</sup> Los datos generados en dicho fichero se encuentran adjuntos en el Anexo.

deformación de la pelota, y de los esfuerzos que actúan sobre ella en dicho instante, son:

- **COLUMNA 1:** Se observa el instante de tiempo que ha transcurrido desde el inicio de la simulación.
- **COLUMNA 2:** Indica la posición del CDG de la pelota según la Componente “Z” del SR.
- **COLUMNA 3:** Se especifica la velocidad que posee la pelota para cada instante. Los valores negativos simplemente indican que la velocidad de la pelota sigue el sentido opuesto a la dirección de la Componente “Z” del SR.

Dado que la Componente “Z” del SR se define como positiva en sentido exterior respecto a la superficie de impacto de la pala, como inicialmente la pelota se desplaza hacia dicha superficie (para generar el impacto) pues se observa que la velocidad aparece precedida del signo negativo. Posteriormente, una vez rebota la pelota, la velocidad ya adquiere sentido positivo.

- **COLUMNA 6:** Hace referencia a la fuerza de reacción que actúa sobre la pelota.

A continuación, para procesar con mayor rapidez y claridad los resultados obtenidos, se realiza un sintetizado gráfico de los mismos empleando la herramienta de cálculo de Excel. Para ello, se importan los datos numéricos que, inicialmente, se adjuntan en el fichero “*TPosVelEnerF.txt*” y se exponen de forma ordenada mediante una tabla en la hoja de cálculo.

Seguidamente, con el objetivo de encontrar el punto de máxima deformación, se define un gráfico en el cual se representa la evolución de la velocidad que posee la pelota (en valor absoluto) frente al tiempo (ver Ilustración 5).



**Ilustración 5.** Evolución gráfica de la velocidad de la pelota en función del tiempo

Como es de esperar, el momento de máxima deformación se genera en el instante para el que la velocidad de la pelota es nula. En dicho punto del estudio, toda la energía cinética ( $E_{c0}$ ) que posee la pelota al inicio del ensayo se transforma en energía potencial elástica (asociada a la deformación de la pelota y la pala) o se disipa, consecuencia de la absorción energética que introduce la pala como resultado de la fricción y del amortiguamiento estructural que se desarrolla durante el golpe, razón por la cual la velocidad final de la pelota es menor que la velocidad inicial que posee la misma.

De este modo, si se presta atención a los resultados que se generan en el fichero “*TPosVelEnerF.txt*”, se puede validar la afirmación previa y afirmar que el momento de máxima deformación tiene lugar pasados 1,95 ms tras el inicio de la simulación ( $t_{\text{máx def.}}=1,00195$  s).

Resumidamente, los parámetros cinemáticos que definen al ensayo en dicho instante son (ver Tabla 7):

**Tabla 7.** Resumen de los que definen el comportamiento cinemático de la bola en el momento de máxima deformación

PARÁMETRO	VALOR
INSTANTE TEMPORAL (s)	1,00195
VELOCIDAD CDG PELOTA (m/s)	0
FUERZA REACCIÓN PELOTA (N)	370,75

### 3.1.2 TENSIONES GENERADAS SOBRE LAS SUPERFICIES DE IMPACTO DE LA PALA<sup>7</sup>

El primer dato que se requiere conocer es la manera en que se distribuyen las tensiones, tanto las principales como la de Von Mises ( $\sigma_I, \sigma_{II}, \sigma_{III}, \sigma_{VM}$ ), y las deformaciones principales y de Von Mises ( $\varepsilon_I, \varepsilon_{II}, \varepsilon_{III}, \varepsilon_{VM}$ ) sobre cada una de las capas del laminado que se emplea para fabricar las distintas superficies de impacto de la pala.

Para ello, es necesario ejecutar el ensayo dinámico tomado como punto de partida pues, según se asemejen los resultados del AEE propuesto en apartados posteriores a los resultados del análisis dinámico, se puede o no validar la propuesta planteada en la presente tesis de investigación.

El proceso genérico para obtener los resultados de las tensiones o de las deformaciones<sup>8</sup>, en cada una de las capas del laminado es:

1. Selección de la superficie de impacto (bien frontal bien trasera) que se requiere analizar. La hoja de ruta a seguir es:

**Select** → **Entities** → **Areas** → **By Num/Pick** → **From Full** → **Sele Below** → **Se selecciona el área 34<sup>9</sup>** → **Apply** → **Plot**

2. Definición del instante de estudio deseado. Se opera según se ha descrito en el Apartado 3.1.1.

---

<sup>7</sup> Los resultados gráficos que muestran la distribución y el valor absoluto máximo de cada una de las tensiones y las deformaciones, generadas en las distintas capas del laminado, se encuentran en el Anexo del Documento.

<sup>8</sup> En este apartado se expone cómo se ha trabajado para hallar la tensión principal 1 del laminado 1 con el cual se ha fabricado la superficie de impacto frontal.

<sup>9</sup> Es la que se corresponde con la superficie frontal de impacto.

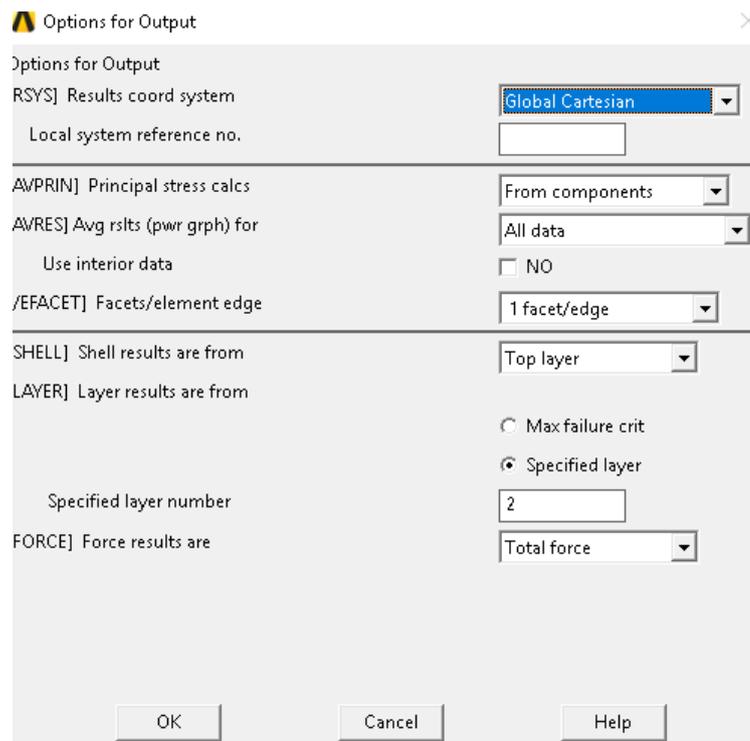
3. Se establece que parámetro del comportamiento mecánico del laminado se desea analizar en cada caso. Para el caso descrito, el proceso resulta de la manera siguiente:

**Plot → Results → Contour Plot → Nodal Solution... → Stress → 1st  
Principal Stress**

4. Para variar la capa del laminado en la cual se desea visualizar el resultado, se emplea la herramienta:

**General Postproc → Options for Outp**

Dada la naturaleza constructiva del material compuesto con el que se han fabricado las superficies de impacto, solamente se puede variar entre 2 laminados. Para ello, en la ventana de diálogo que se despliega al seleccionar “Options for Output” (ver Ilustración 6), dentro del campo “Specified layer number” se introduce el valor 1 o 2 según se pretenda observar los datos relativos a la capa superior o inferior, respectivamente, del laminado.



**Ilustración 6.** Ventana de diálogo que permite seleccionar una capa u otra del laminado

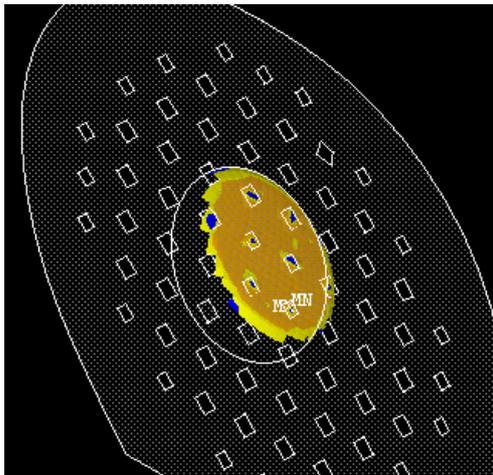
### 3.1.3 CÁLCULO DEL ÁREA DE CONTACTO PARA EL INSTANTE DE MÁXIMA DEFORMACIÓN DE LA PELOTA

Como se ha comentado en párrafos anteriores, el momento en el cual se genera la máxima deformación sobre la pelota, como resultado de la deceleración que experimenta ésta a causa del impacto sobre la pala, es transcurridos 1,95 ms tras el inicio de la simulación.

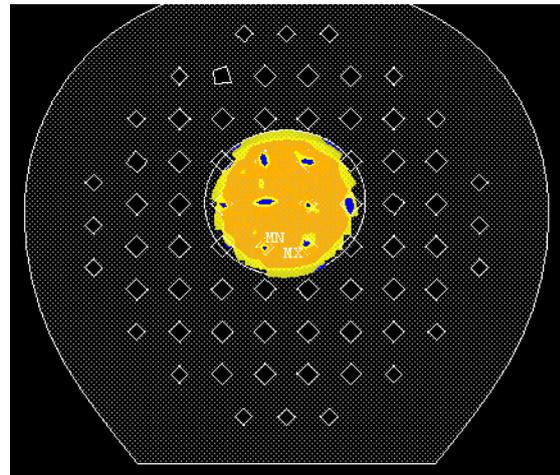
Previo a dicha operación, para tener una visión más clara del área exacta de contacto se emplea la opción “*Pair Based Contact Manager*”. Dicha herramienta, permite obtener múltiples parámetros del contacto, así como diversas maneras de visualización del mismo.

Para el problema concerniente, se emplea un método de visualización que representa, exclusivamente, los nodos de contacto y colorea el área que verdaderamente se encuentra en contacto (ver Ilustración 7 e Ilustración 8). La ruta de comando seguida para la definición de dicha forma de visualización de los resultados es:

***Pair Based Contact Manager*** → ***Contact & Target*** → ***Result*** → ***No Mdl Cntxt*** →  
***Contact Status*** → ***Plot Results***



**Ilustración 7.** Vista Isométrica



**Ilustración 8.** Vista Frontal

A continuación, para hallar el valor exacto del área de contacto se emplea la macro anexada. Así, una vez introducido el código completo en la barra de comando de ANSYS, se genera en la “*Output Window*” del archivo una línea de código que devuelve el valor de dicha superficie. Ésta, aparece referenciada como “*MY\_AREA\_1*” (ver Ilustración 9).

```
PARAMETER MY_AREA_1 = 0.3160164121E-02
```

**Ilustración 9.** Valor que devuelve la “*Output Window*” para el valor real del área de contacto

Como se observa en las ilustraciones 7 y 8, el área real del contacto es ligeramente irregular, consecuencia de las vibraciones que se generan en el contacto y, dada la geometría horadada de la superficie de impacto de la pala.

No obstante, para el modelo empleado en el AEE que en este trabajo se propone, se considera que el área de contacto generada en el momento del impacto es perfectamente circular disminuyendo, de este modo, la dificultad asociada al modelado del problema y, con ello, también el coste computacional relativo a la resolución del mismo.

La reducción del coste de cálculo computacional, como resultado de considerar el área perfectamente circular, se debe al menor número de elementos de discretización que se requiere emplear para mallar la geometría del contacto.

De esta manera, sabiendo el perfil geométrico que posee la huella en el AEE y, dado que la dimensión total del área debe mantenerse invariante, se procede a obtener el valor numérico, relacionado con el radio de la circunferencia, que permite modelar la nueva zona de impacto. (ver Ec.5 a Ec.9).

$$A_{\text{Deformada}} = \pi \cdot r_f^2 \quad [5]$$

$$3,160164 \cdot 10^{-3} = \pi \cdot r_f^2 \quad [6]$$

$$r_f^2 = \frac{3,160164 \cdot 10^{-3}}{\pi} \quad [7]$$

$$r_f = \sqrt{\frac{3,160164 \cdot 10^{-3}}{\pi}} \quad [8]$$

$$r_f = 0,03172 \text{ m}$$

[9]

Según lo calculado, el valor que debe poseer el radio de la sección circular equivalente, para reproducir fielmente las dimensiones originales del contacto, es de 0,031716107 m, es decir, aproximadamente 3,172 cm.

**Tabla 8.** Resultados obtenidos durante el cálculo del área de contacto entre la pelota y la pala

PARÁMETRO	VALOR
INSTANTE DEFORMACIÓN MÁXIMA PARA LA PELOTA “ $t_{\epsilon_{\text{máx}}}$ ” (s)	1,00195
ÁREA CONTACTO REAL (mm <sup>2</sup> )	3.160,16
RADIO SECCIÓN DEFORMADA “ $r_f$ ” (mm)	31,72

### 3.1.4 DETERMINACIÓN DE LA PRESIÓN

Con el firme objetivo de reproducir las sollicitaciones mecánicas que se generan a consecuencia de la fuerza de impacto de la pelota sobre la superficie de impacto de la pala, en el transcurso de un ensayo dinámico, se requiere calcular cuál es el valor de la presión a la cual equivale la aplicación de la fuerza anterior, durante un AEE.

Así, la fuerza que debe hallarse es la correspondiente a la fuerza de reacción que experimenta la bola en el instante de máxima deformación. Ésta fuerza, se obtiene con el análisis de los datos numéricos que se adjuntan el fichero “*TPosVelEnerF.txt*”.

Como introducción para el estudio de dichos datos, se opta por representar gráficamente el valor de la fuerza de reacción en función del tiempo (ver Ilustración 10).



**Ilustración 10.** Fuerza de reacción sobre la pelota en función del tiempo

Se observa que la fuerza aumenta desde el inicio del contacto hasta el momento de máxima deformación para, seguidamente, reducir su valor hasta desaparecer (aproximadamente 4 ms después de iniciarse el ensayo), resultado de la finalización del contacto entre la pala y la pelota.

Las ondulaciones que se observan en la curva graficada se corresponden con pequeñas variaciones en la fuerza del contacto, frente a la teóricamente supuesta. Dichas variaciones son consecuencia de la interacción del fenómeno ondulatorio que se produce sobre la superficie de impacto de la pala. Dicha ondulación, da lugar a pequeñas deformaciones que modifican ligeramente el área de contacto teórica, afectando así a las tensiones y a la fuerza de reacción.

No obstante, dichas micro-deformaciones no afectan significativamente al valor obtenido para cada una de las sollicitaciones mecánicas por lo que pueden ser obviadas y, simplemente, se pueden tomar como referencia los datos generados en el fichero de post-procesado.

Cuando se analiza dicho fichero, que contiene el conjunto de soluciones numéricas discretizadas temporalmente, se obtiene un valor de 370,73 N para la fuerza de reacción total en el instante de máxima deformación de la pelota.

Por otro lado, para hallar el valor de la presión a que equivale la fuerza de impacto de la pelota sobre la pala, únicamente se requiere disponer de la pisada o “huella” que marca la deformada de la pelota en el momento de máxima deformación y del valor de la fuerza de reacción que actúa bien sobre la pelota o bien sobre la pala (por la 2ª Ley de la Física de Newton, dicha fuerza de reacción debe ser la misma).

Se procede a calcular el valor de la presión que es necesario aplicar sobre la superficie de impacto para reproducir las sollicitaciones desarrolladas en el ensayo dinámico durante el AEE (ver Ec.10, Ec.11 y Ec.12):

$$P_{\text{Equivalente}} = \frac{F_{\text{Reacción}}}{A_{\text{Deformada}}} \quad [10]$$

$$P_{\text{Equivalente}} = \frac{370,73}{3,160164 \cdot 10^{-3}} \quad [11]$$

$$P_{\text{Equivalente}} = 117.313,53 \text{ Pa} \quad [12]$$

De este modo, la presión que se requiere aplicar sobre la nueva área modelada, para reproducir las condiciones de contorno desarrolladas durante el ensayo dinámico en el AEE, es de 117.313,53 Pascales.

### 3.2. MODELADO EN ANSYS DEL ANÁLISIS ESTÁTICO EQUIVALENTE

Obtenidos, al completo, los parámetros que caracterizan la interacción dinámica que se establece entre la pelota y la pala durante el contacto, como consecuencia del golpe, se procede simplificar el ensayo de referencia, estableciendo un AEE.

De este modo, como se ha comentado en la introducción de la tesis, se intenta reproducir un análisis que permita definir el comportamiento mecánico que caracteriza a la pala, según su configuración constructiva, sin necesidad de introducir los esfuerzos que provoca el choque de la pelota sobre esta mediante la ejecución de un análisis de naturaleza dinámica.

Para ello, como punto de partida para el modelado del AEE se considera el modelo geométrico definido por Nebot Valls (2018), el cual define completamente la geometría relativa a la pala y a la pelota. De este modo, al comienzo del planteamiento, se dispone del mismo modelo geométrico que se ha empleado en los ensayos dinámicos anteriores, dado que las tensiones tomadas de referencia en el Apartado 3.1 emplean dicho modelo. En consecuencia, se reduce el riesgo de introducir errores en la definición del AEE que desvirtúen los resultados que se obtengan.

A modo de resumen, el proceso de modelado del AEE consta de 3 pasos básicos:

### 1. **Adaptación del modelo geométrico a las necesidades reales del problema.**

Dado que la fuerza que ejerce la pelota sobre la pala durante el golpe (responsable de los esfuerzos mecánicos que experimenta la pala) se modela, en el AEE, directamente sobre el modelo geométrico de la misma a través de la definición de una presión equivalente, se procede a eliminar todos los elementos usados en la caracterización de dicho elemento.

Como resultado de lo recién expuesto, es requisito fundamental realizar la supresión de los siguientes campos, relativos al modelado previo de la bola de pádel:

- Geometría. Se borran los 8 volúmenes de que se compone la pelota. También, se elimina el volumen interior usado para modelar el fluido que dota a la pelota de presión al inicio de la simulación (mediante el “*Load Step 1*”). Y, finalmente, se deben borrar las superficies empleadas para caracterizar el contacto entre la pelota y la pala durante el ensayo dinámico.
- Malla necesaria para la discretización del modelo relativo a la pelota y sus elementos de contacto con la pala.

- Materiales necesarios para introducir el comportamiento mecánico-dinámico de la pelota. De esta manera, en dicho campo se introduce tanto al material usado para la definición de las propiedades, físicas y mecánicas, de la carcasa exterior de la pelota como al fluido interior que dota a la pelota de presión.
- Tipos de Elementos (*Element Type*) que permiten, junto con el mallado, discretizar el modelo adecuadamente, adaptándolo así para que reproduzca el comportamiento mecánico que posee la bola durante su interacción dinámica con la pala.

Antes de proceder a la explicación detallada del proceso es interesante resaltar el hecho que, para la supresión de los elementos sobrantes, hay que operar de forma inversa a como se ha modelado el problema. Es decir, el orden en que se debe ejecutar la eliminación de los elementos es:

***Malla* → *Geometría* → *Materiales* → *Tipos de Elementos (Element Type)***

## **2. Modelado de la nueva área de impacto.**

Tomando como referencia el área de contacto de mayores dimensiones que se establece entre la bola y la pala, se procede al modelado geométrico de un área de geometría circular, de dimensiones equivalente y cuyo centro se ubique en el centro de la superficie de contacto.

## **3. Introducción de la Tensión Equivalente.**

Según los datos extraídos en el Apartado 3.1, relativos a la fuerza de reacción que experimenta la pelota en el momento de máxima deformación, se introduce, sobre la nueva área de impacto (modelada en el paso anterior), una presión equivalente sobre las superficies de impacto que desarrolle unos esfuerzos mecánicos similares.

Dicha presión podrá ser considerada equivalente, únicamente, cuando las tensiones que genere sobre la pala se asemejen, en distribución y valores sobre cada capa del laminado, a las tensiones expuestas en el anexo.

### 3.2.1 MODELADO DE LA NUEVA ÁREA DE IMPACTO

Según lo comentado, en el resumen expuesto al inicio del apartado, una vez se ha simplificado el modelo de partida, se procede a modelar el área sobre la cual poder aplicar la fuerza a que equivaldría el impacto de una pelota de pádel sobre la superficie de impacto de una pala

Para llevar a cabo la definición de este nuevo elemento geométrico es imprescindible disponer de una serie de datos:

- **Valor del área de impacto.**
- **Forma geométrica del área de impacto.** Se trata de una variable impuesta arbitrariamente, pues la huella que deja la pelota se define (con el objetivo firme de simplificar el caso de estudio<sup>10</sup>) como circular.

A continuación, se explica las operaciones que se ejecutan para el modelado de la nueva área.

1. Mostrar en la interfaz gráfica el WP activo. Para ello:

#### ***WorkPlane → Display Working Plane***

De este modo, se comprueba que el WP con el cual se trabaja se encuentra centrado con el modelo geométrico que representa a la pala. Resulta importante su centrado pues, de lo contrario habría que realizar una reubicación del mismo para evitar problemas posteriores durante el modelado de la nueva área, que permite aplicar la presión equivalente.

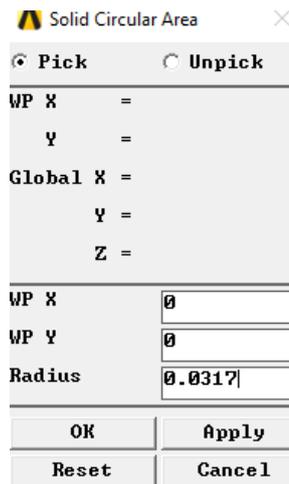
---

<sup>10</sup> En caso de que el impacto de la pelota sobre la pala no se produzca de forma perfectamente perpendicular, la deformada de la pelota sobre la superficie de impacto ya no posee una forma circular, sino que muestra un área ligeramente ovalada.

2. Definir una sección circular, de área equivalente a la superficie real de contacto. El centro de dicha área posee las coordenadas (0,0,0), asegurando, con ello, que está centrada frente a la superficie de impacto de la pala.

***Preprocessor → Modeling → Create → Areas → Circle → Solid Circle***

Seguidamente, se debe rellenar la ventana de diálogo de la misma manera que se observa en la Ilustración 11.

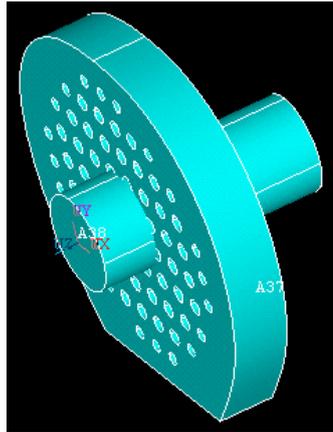


**Ilustración 11.** Ventana de diálogo que permite definir el área circular

3. Extruir el área circular de forma que el resultado sea un volumen cilíndrico que sea pasante frente al volumen del núcleo de la pala.

***Preprocessor → Modeling → Operate → Extrude → Areas → Along Normal***

Si el proceso se ejecuta correctamente, se observa (ver Ilustración 12):



**Ilustración 12.** Resultado de extruir el área circular creada en el Paso 2

- Realizar una operación booleana de intersección que permita crear un nuevo volumen. Éste volumen se corresponde con el volumen “compartido” en el espacio entre el núcleo de la pala y el cilindro extruido.

***Preprocessor → Modeling → Operate → Booleans → Intersect →  
Pairwise → Volumes → Selección de ambos volúmenes***

Previo a la operación de intersección, se debe especificar en la ventana “Settings” que los volúmenes con los que se trabaja se conserven, tan pronto se ejecuta la operación booleana. De lo contrario, desaparecería el volumen correspondiente al núcleo de la pala y sería necesario modelarlo nuevamente.

***Preprocessor → Modeling → Operate → Settings → Keep input  
entities → YES***

- Eliminar el volumen grande correspondiente al cilindro creado durante el Paso 3.

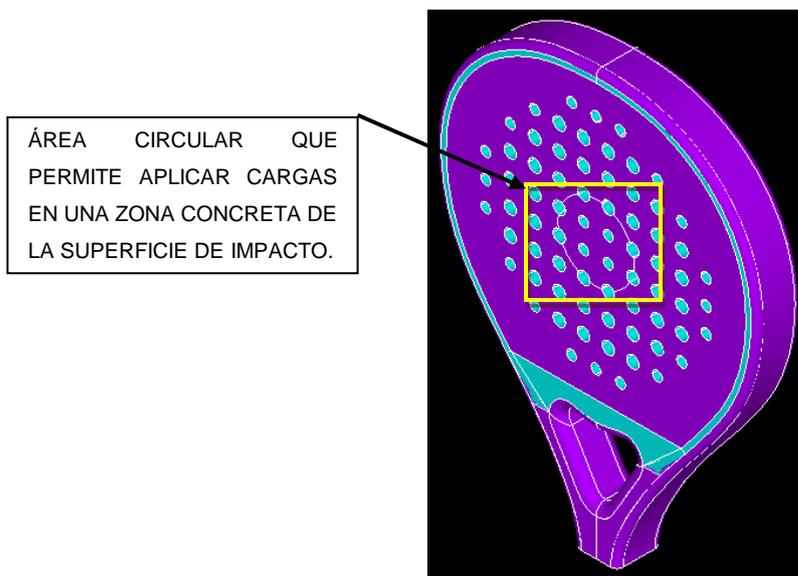
***Preprocessor → Modeling → Delete → Volume and Below***

- Unión del volumen creado en el Paso 4 con el volumen correspondiente al núcleo de la pala.

***Preprocessor → Modeling → Operate → Booleans → Intersect →  
Pairwise → Volumes → Selección de ambos volúmenes***

De este modo, se dispone de dos volúmenes (el núcleo y el volumen resultado de la intersección) que comparten un mismo espacio pero que se consideran como entidades distintas. Con ello, se permite realizar mallados distintos en cada uno de los elementos y, al mismo tiempo, aplicar sobre uno de ellos una sollicitación específica.

Si el proceso ha sido realizado de forma positiva, el modelo queda según se observa en la Ilustración 13.



**Ilustración 13.** Modelo definitivo relativo a un AEE

Cuando se verifica el modelo geométrico, se procede a definir el mallado que permita su discretización. Para evitar que existan errores en su definición es necesario realizar de forma ordenada el proceso, según se define a continuación:

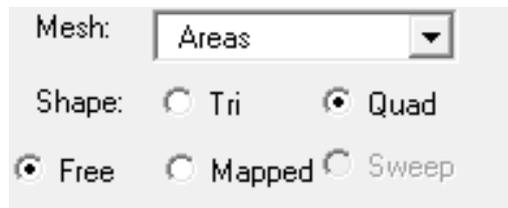
7. Mallado de la superficie de impacto frontal.

#### ***Preprocessor → Modeling → MeshTool***

Aunque se trata de dos elementos distintos, el área donde se aplica la presión equivalente y el resto de la superficie de impacto de la pala, ambos elementos se mallan conjuntamente. De este modo, se consigue un mallado uniforme que evite pérdidas de información por no disponer de elementos de discretización suficientemente pequeños en ciertas áreas a resultas de haber gastado el total de nodos de que se dispone en la versión de dicho

software, mallando una determinada zona con elementos excesivamente pequeños cuya relevancia no es tal.

El tipo de elemento que se utiliza en el mallado de las superficies de impacto es el “*SHELL281*” y, para evitar errores, se especifica que la malla se cree según las preferencias (ver Ilustración 14):



**Ilustración 14.** Tipo de malla empleado en la superficie de impacto.

8. Mallado del volumen interior, el correspondiente al núcleo de la pala. Esta malla toma como referencia la geometría de mallado 2D usada, previamente, para discretizar la superficie de impacto de la pala. Por ello, en la ventana de diálogo que se despliega al seleccionar la herramienta “*MeshTool*”, debe especificarse que la malla posea la característica “*Sweep*”. Con ello, se ejecuta una extrusión del mallado de la superficie hacia el interior del volumen.

El tipo de elemento que se requiere para mallar el volumen interior es el “*SOLID186*”.

9. Mallado de la superficie de impacto trasera. Debe operarse de manera análoga al procedimiento especificado en el Paso 7.
10. Mallado del resto de áreas que conforman el modelo representativo de la pala. Se hace uso del laminado 2.
11. Comprobación del mallado definido en los Pasos 7 a 9. Deben chequearse posibles errores al realizar la unión de los distintos mallado ejecutados, individualmente.

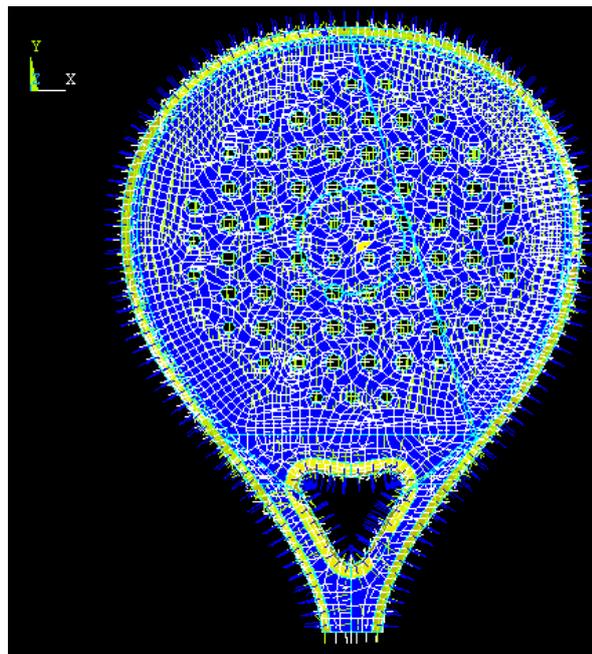
Para ello, se opera según:

***Preprocessor*** → ***Meshing*** → ***Check Mesh*** → ***Individual Elm*** → ***Plot Warning/Error Elements***

Debe comprobarse que no se haya mallado las áreas de los perforados con elementos del tipo (*SHELL281*) y con el material del laminado.

Así mismo, se debe asegurar que la orientación de los elementos del mallado es correcta y que se encuentra orientada de acorde al “*Working Plane*”. De lo contrario, aunque el programa permita resolver el problema, a la hora de extraer resultados se observarán valores discordantes con lo que dicta la lógica que debe suceder, mecánicamente, al ejecutar el ensayo estático equivalente.

En consecuencia, si el proceso ha sido ejecutado correctamente, ningún elemento de la malla debe aparecer representado en color rojo y, como resultado, puede darse por válida (ver Ilustración 15). También, según lo comentado en el párrafo anterior y, contemplando la Ilustración siguiente, se permite validar la orientación individual de cada uno de los elementos del mallado.



**Ilustración 15.** Malla empleada en la discretización del modelo usado en el AEE

### 3.2.2 DEFINICIÓN DE LAS CONDICIONES DE CONTORNO

La definición de las condiciones de contorno del problema es un proceso que contempla 2 etapas distintas.

Por un lado, se deben introducir las restricciones de movimiento que eviten que el modelo se encuentre “flotando” en el espacio. Con ello, se consigue que la pala no experimente un desplazamiento infinito al aplicar la carga y, a su vez, simular las condiciones de flexión y rotación que sufre la misma durante el golpe. La restricción de movimiento se define de tal forma que simula el agarre de la pala por parte del jugador.

Por otro lado, es necesario introducir el valor de la carga (a modo de presión) que origina unas sollicitaciones mecánicas, sobre la pala, similares a las que sufre la misma durante su interacción con la pelota.

De este modo, es necesario modelar 2 “*Load Steps*” (Casos de Carga). El primero, se emplea para las restricciones de movimiento y, el segundo, para la introducción de las cargas.

La introducción en el análisis de los Casos de Carga requeridos para reproducir las condiciones de contorno del problema se realiza a través de una serie de macros<sup>11</sup>, correspondiéndose cada “*Load Step*” con una macro distinta.

#### 3.2.2.1 “*LOAD STEP 1*”. RESTRICCIÓN DE MOVIMIENTO

El Caso de Carga #1 se encuentra definido a través de una macro. En ella, se estipula cuáles son los nodos cuyo movimiento se encuentra restringido. Para ello, se hace uso del modelo definido (haciendo visible la numeración de los nodos), y se asegura que los nodos que se recogen en la macro se correspondan con aquellos que conforman las líneas relativas a la geometría inferior del marco de la pala.

---

<sup>11</sup> Las macros se exponen en el anexo a modo de resumen, de forma que se puede contemplar la manera en que éstas se encuentran estructuradas.

Los movimientos restringidos en cada uno de los nodos seleccionados son:

- Desplazamiento en “X”: **UX**
- Desplazamiento en “Y”: **UY**
- Desplazamiento en “Z”: **UZ**
- Rotación en “X”: **ROTX**
- Rotación en “Y”: **ROTY**
- Rotación en “Z”: **ROTZ**

En cuanto al valor que adquieren las restricciones de movimiento, dado que el objetivo es fijar la pala, evitando que se desplace, se especifica que, en dichos nodos, tanto las traslaciones como las rotaciones, son nulas.

Por otro lado, para que la superficie adquiriera la tensión necesaria en el momento en el cual se aplique la carga en forma de presión, se define un micro-desplazamiento de valor  $-1 \cdot 10^{-3}$  m, según la Componente “Z” del “*Working Plane*”, en cada uno de los nodos pertenecientes al laminado con el cual se han definido las superficies de impacto.

En cuanto a la configuración que adquiere el “*Load Step 1*”, éste se inicia en el segundo 1 del análisis y dispone de un total de 5 “*Sub-Steps*” para la simulación de las condiciones de contorno, dado que el incremento de tiempo en cada escalón de la simulación es de 0,2 segundos y, el tiempo total, que dura este paso es de 1 segundo.

### 3.2.2.2 “*LOAD STEP 2*”. INTRODUCCIÓN DE LA CARGA

El Caso de Carga #2 se encuentra definido en otra macro distinta que ha sido usada para introducir la presión sobre la superficie de impacto equivalente, modelada en el Apartado 3.2.2.

Para ello, se define que el “*Load Step 2*” se inicia el segundo 2 del análisis y que cuenta, igual que el primer caso de carga, con 6 “*sub-steps*” para resolver el problema estático planteado. Sin embargo, para ahorrar memoria y agilizar el proceso de resolución del problema, se especifica que únicamente se registre la solución correspondiente al último sub-caso de carga.

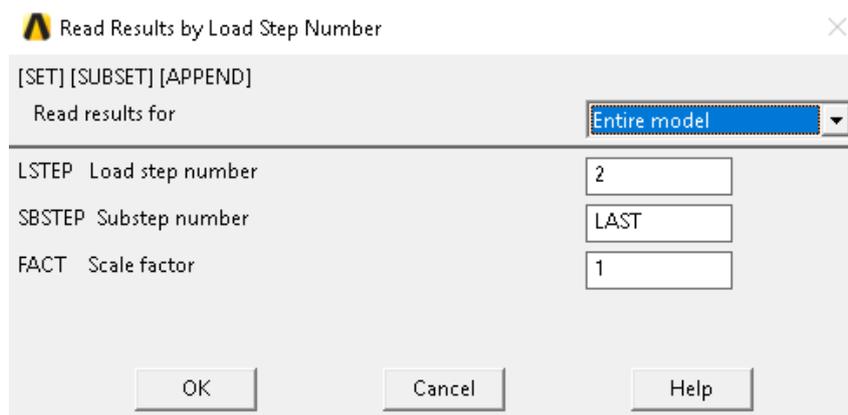
### 3.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Una vez simulado el AEE, de acorde con las condiciones de contorno expuestas en el Apartado 3.2.2, se procede a analizar los resultados arrojados por el nuevo modelo planteado <sup>12</sup> y ver si, efectivamente, éste reproduce fielmente las sollicitaciones mecánicas que experimenta la pala durante el impacto de una pelota cuya velocidad inicial es de 20 m/s o si, de lo contrario, es necesario introducir modificaciones sobre el modelo inicialmente planteado.

Previo al análisis de los resultados, es necesario asegurar que se analizan los resultados correspondientes al "Load Step 2" pues, de lo contrario, se extraería conclusiones erróneas, dado que el "Load Step 1" también arroja resultados tensionales y puede conducir a confusión. Para seleccionar el caso de carga correcto se procede del modo siguiente:

**General Postproc → Read results → By Load Step**

Y, la ventana de diálogo que aparece se completa de la manera que se observa en la Ilustración 16.



**Ilustración 16.** Selección de resultados para el "Load Step 2"

<sup>12</sup> Las imágenes que muestran cómo se distribuyen las sollicitaciones mecánicas en cada una de los laminados se incluyen en el anexo.

### 3.3.1 CONCLUSIONES DE LA PROPUESTA INICIAL PARA EL AEE

Tras extraer los resultados gráficos, relativos a las sollicitaciones mecánicas que experimentan cada una de las capas que conforman los laminados con que se fabrican las superficies de impacto de la pala, y estudiar los valores numéricos que se desprenden de la hoja de cálculo elaborada, se obtienen las siguientes conclusiones:

1. La tensión principal 1 es aquella en la cual se aprecian las sollicitaciones mecánicas máximas para cada una de las capas del laminado, dado que dicha tensión está orientada con la dirección en la cual se disponen las fibras de refuerzo dentro del PRFV (Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio).

De esta manera, para la Capa 1 del laminado, las sollicitaciones mecánicas máximas se orientan de forma horizontal (dado que las fibras en esta capa poseen una orientación angular de  $0^\circ$ ). Por otro lado, en la Capa 2, como la orientación de las fibras está girada  $90^\circ$  frente a la horizontal del WP del modelo, la distribución de las sollicitaciones mecánicas aparece formando vetas verticales.

2. Las sollicitaciones mecánicas relativas tanto a la dirección principal 1 como a la dirección principal 2 se concentran, básicamente, en la zona donde se ha modelado la nueva área de impacto, dado que son el resultado de la absorción energética del golpe por parte de las superficies de impacto.
3. Las sollicitaciones mecánicas que se generan en la dirección principal 3 son fruto, fundamentalmente, de la flexión que experimenta el modelo al aplicar las condiciones de contorno.

Como la pala se encuentra anclada en su parte inferior (zona correspondiente a la empuñadura) y, la fuerza que genera la presión, se aplica sobre la zona central de la superficie de impacto, se desarrolla un momento que tiende a flectar el modelo desarrollando, así, los mayores esfuerzos en la zona de unión de la empuñadura con las superficies de impacto.

4. En cuanto al valor de las tensiones y de las deformaciones, si se observan atentamente los datos adjuntados en el documento de Excel que se encuentra en el anexo, se concluye:
- Los valores de las solicitaciones mecánicas en la superficie de impacto frontal son del orden del 50% menores, en el AEE, que los valores obtenidos durante la ejecución del Análisis Dinámico.
  - El único parámetro que aumenta su valor máximo en la superficie de impacto frontal, en el AEE, es el valor asociado a la Tensión Principal 3 pues, no existe atenuación por solapamiento de esfuerzos debido al fenómeno ondulatorio, como si sucede durante el ensayo dinámico.
  - Las solicitaciones mecánicas obtenidas en el AEE son mayores, por orden general, en la superficie de impacto trasera de la pala que las obtenidas en el dinámico. Este hecho es resultado de la menor disipación de energía que se desarrolla durante el ensayo estático, frente a que se produce en el ensayo dinámico ya que, no solamente no se produce un fenómeno ondulatorio que atenúe los valores máximos, sino que además la aplicación de toda la energía del impacto se concentra en un mismo instante de tiempo.
  - Los valores de las solicitaciones mecánicas, en ambos ensayos, siguen un patrón idéntico, concentrando los valores máximos para cada solicitación en la superficie de impacto delantera. Por ello, aunque en la zona trasera exista una discordancia entre el AEE y el ensayo dinámico, las modificaciones futuras en el modelo se centrarán en intentar reproducir, con la mayor precisión posible, los resultados de las solicitaciones en la superficie de impacto frontal, dado que es la que, mecánicamente, resulta más crítica para analizar la resistencia de la pala.

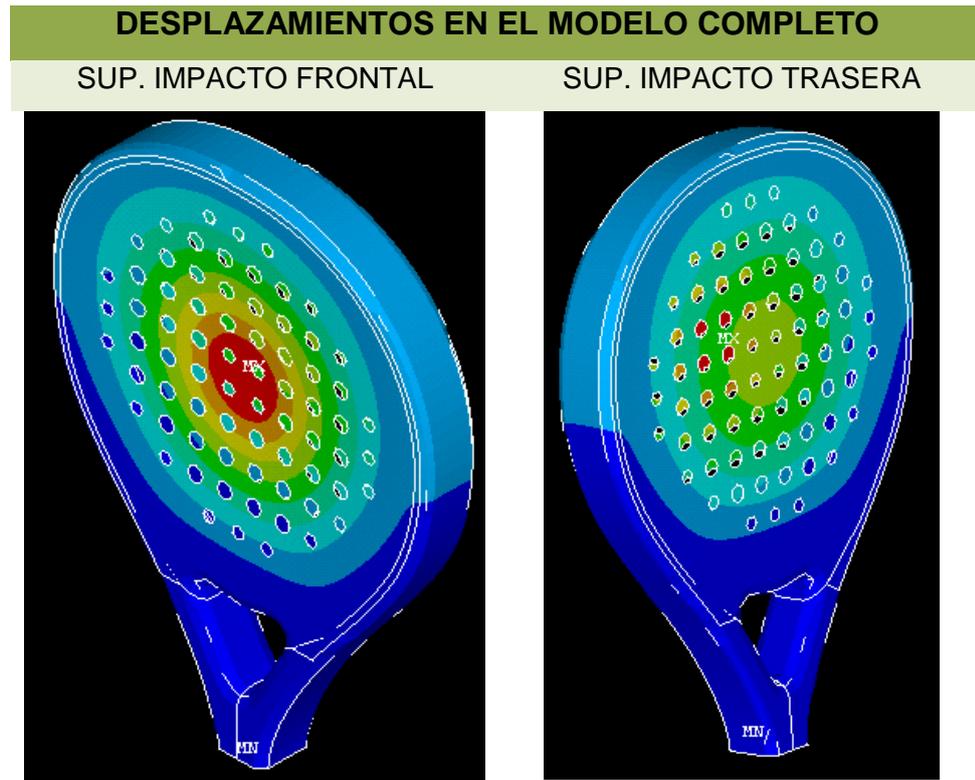
Como el objetivo fundamental del proyecto reside en generar un modelo equivalente, es necesario ejecutar una serie de modificaciones que permitan que se aumente el valor máximo para las solicitaciones sin alterar, significativamente el modo de distribución de las misma en el modelo de la pala.

Para ello, se propone introducir un nuevo valor para el área de impacto, cuyo factor de modificación sea:  $R_2=R_1/4$  (en apartados posteriores se detalla el proceso). De este modo, se consigue incrementar el valor de la presión introducida sin modificar el valor de la fuerza. Este hecho es muy significativo pues se consigue un incremento para el valor máximo de las tensiones y de las deformaciones sin incrementar el valor de los desplazamientos.

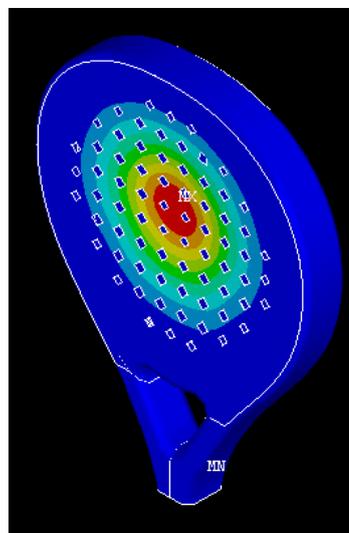
Si, contrariamente a como se ha explicado en el párrafo anterior, el parámetro que se modifica es el valor total para la fuerza introducida, no sólo se modifican las tensiones y las deformaciones, sino que también se ve alterado el valor para la flexión que se genera sobre la pala. Todo este desarrollo cobra sentido cuando se analizan los desplazamientos para ambos modelos planteados con más detenimiento (ver conclusiones 5 a 7).

5. Cuando se aplica la presión durante el AEE se genera un desplazamiento máximo de 5,013 mm que se localiza en la zona donde se modela la carga, es decir, en el área de impacto modelada para desarrollar el Análisis Estático, de la superficie de impacto frontal. (ver las ilustraciones de la Tabla 9).

**Tabla 9.** Desplazamientos desarrollados en el AEE



Contrariamente, en el modelo dinámico, los desplazamientos generados sobre la pala para el instante de máxima deformación de la pelota, ascienden a los 4,337 mm (ver Ilustración 17) y se focalizan en la zona de contacto que se establece en la superficie de impacto frontal.



**Ilustración 17.** Desplazamientos en el instante 1,00195 s

El motivo que explica la diferencia existente entre ambos valores reside, básicamente, en el micro-desplazamiento (de valor 1,0 mm) introducido en el AEE como resultado de la flexión que se genera sobre el modelo, dadas las condiciones de contorno impuesta en el problema. Contrariamente, en el ensayo dinámico no se genera dicha flexión dado que la carga es un fenómeno que se genera de forma puntual, pues es una fuerza de impacto.

6. Por lo que respecta a la manera en que se distribuyen los desplazamientos en el modelo, en la superficie de impacto trasera se observa una distribución de los mismos similar a la que se genera en la zona delantera. No obstante, el valor de los desplazamientos es menor como consecuencia de la disipación energética llevada a cabo por el material de relleno con el cual se fabrica el núcleo. El material de relleno se deforma elásticamente, absorbiendo parte de la energía del impacto y, con ello, evita que ésta se traslade por completo al laminado con el cual se modela la superficie trasera.

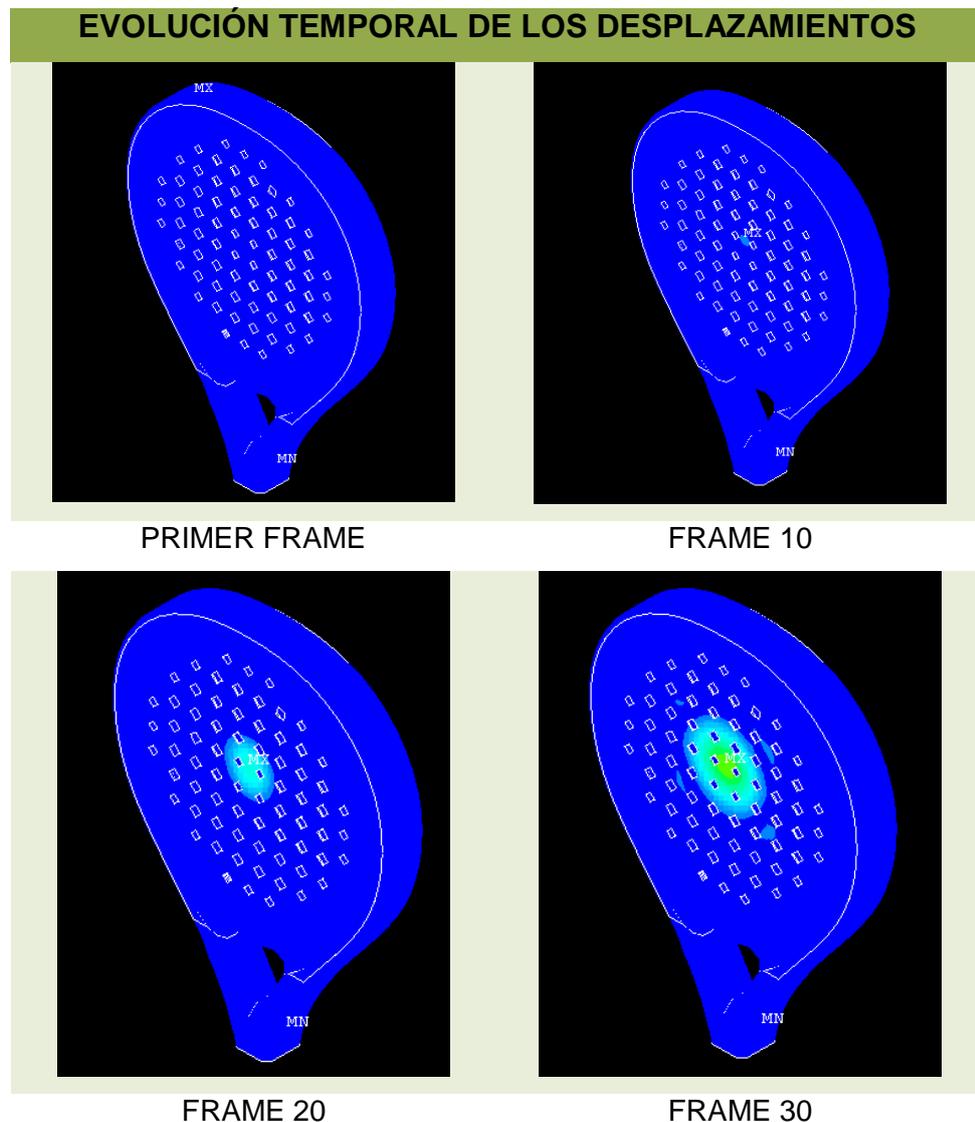
Por otro lado, si se observa la manera en que se distribuyen los desplazamientos para el modelo dinámico, se puede afirmar que, para ambos modelos planteados, los resultados son muy similares, generándose una distribución concéntrica de los mismos, cuyo valor se reduce de forma gradual a medida que se mide dicho parámetro frente a la zona central del impacto.

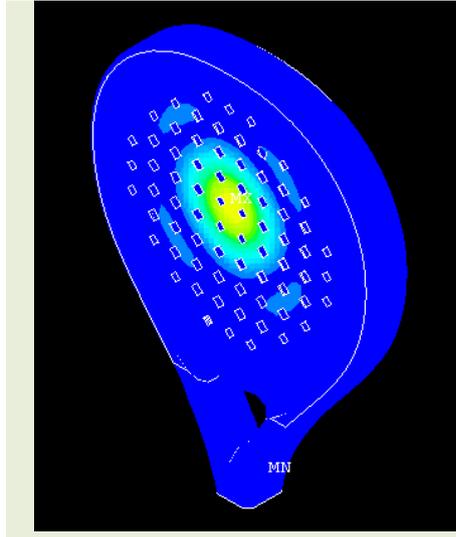
7. Los resultados relativos a los desplazamientos en una superficie y otra van acorde a las solicitaciones mecánicas que se han representado en el Apartado anterior del trabajo. Así, de igual manera que los desplazamientos que se generan sobre la superficie de impacto directa son mayores que los experimentados por la pala en la superficie trasera, las solicitaciones mecánicas siguen una distribución similar, obteniéndose los valores máximos para tensiones y deformaciones en la superficie de impacto frontal.
8. La manera en que se distribuyen tanto tensiones como deformaciones y, al mismo tiempo, los desplazamientos, en ningún caso podrá ser exactamente idéntica en un AEE que en el modelo dinámico pues, aunque el modelo estático reproduzca con un alto grado de precisión los efectos del contacto, no es capaz de simular los efectos de la inercia causados por el mismo sobre

el modelo y que, generan ondulaciones que alteran los valores de la fuerza puntual en cada instante del contacto.

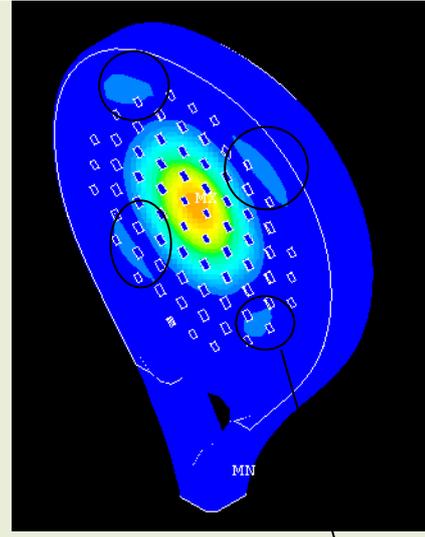
La naturaleza ondulatoria del fenómeno del contacto de la pelota sobre la pala puede observarse, fácilmente, ejecutando una simulación temporal del contacto en el cual se represente la evolución de las tensiones, los desplazamientos o las deformaciones. A continuación, en la Tabla 10 se adjuntan una serie de imágenes (son “frames” de la simulación) de forma que se puede observar la manera en que evolucionan los desplazamientos que experimenta el modelo en función del instante del ensayo dinámico.

Tabla 10. Evolución temporal de los desplazamientos

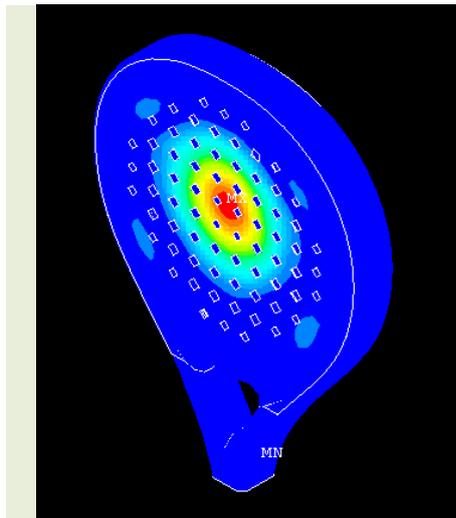




FRAME 40



FRAME 50



ÚLTIMO FRAME

FENÓMENO ONDULATORIO GENERADO  
EN LAS SUPERFICIES DE IMPACTO COMO  
RESULTADO DE LA DEFINICIÓN DE UN  
PROBLEMA DE NATURALEZA DINÁMICA

### 3.4. AJUSTE DEL MODELO INICIAL PROPUESTO PARA EL AEE

#### 3.4.1 OBTENCIÓN DEL VALOR DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO MODIFICADA Y CORRECCIÓN DEL MODELADO

Como se ha mencionado en el Apartado anterior, relativo a las conclusiones que se extraen tras el análisis del modelo planteado inicialmente para el AEE, es necesario llevar a cabo una reducción en la dimensión del área de contacto equivalente para focalizar la presión aplicada sobre la pala y, con ello, conseguir un aumento del valor de las sollicitaciones mecánicas en la cara frontal de impacto sin, con ello, modificar los desplazamientos que experimenta el modelo a causa de la fuerza ni, tampoco, incrementar el valor de la flexión que se genera sobre el mismo.

Tal como se ha mencionado, el nuevo valor para el área de contacto equivalente viene dado al considerar una reducción del 25% respecto del valor del radio inicialmente propuesto. De este modo, el valor para el radio empleado en la modificación propuesta es: (ver Ec.13, Ec.14 y Ec.15)

$$r_2 = 0,75 \cdot r_1 \quad [13]$$

$$r_2 = 0,75 \cdot 31,72 \quad [14]$$

$$r_2 = 23,79 \text{ mm} \quad [15]$$

Se ha tomado en consideración una reducción del 25% para el valor del radio dado que, al estar elevado al cuadrado el radio en la expresión, para el cálculo del área de la circunferencia, el factor de reducción total para la superficie de contacto aumenta exponencialmente. (ver Ec.16, Ec.17 y Ec.18)

$$A_{\text{Deformada}_2} = \pi \cdot r_2^2 \quad [16]$$

$$A_{\text{Deformada}_2} = \pi \cdot 23,79^2 \quad [17]$$

$$A_{\text{Deformada}_2} = 1.778,03 \text{ mm}^2 \quad [18]$$

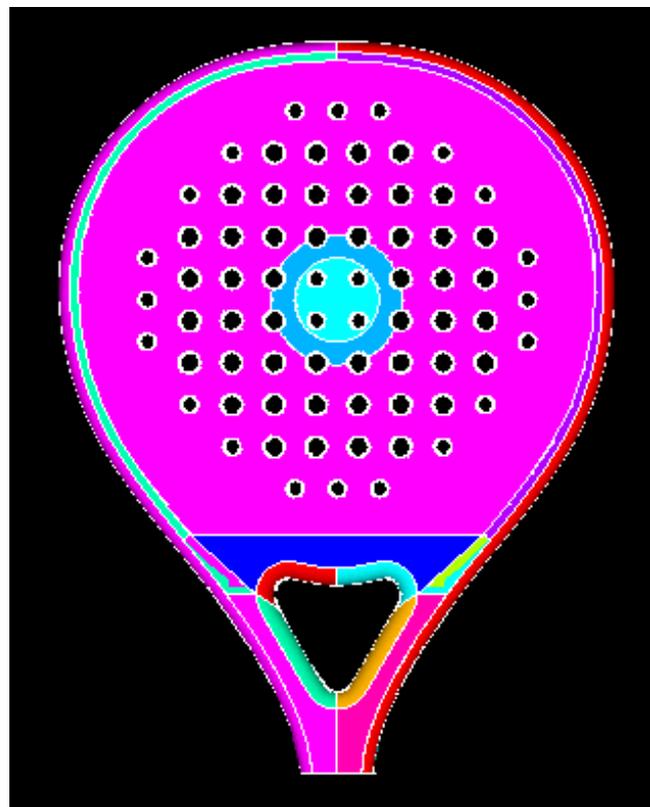
De este modo, se observa que, al reducir en un 25% la dimensión del radio, el valor asociado al Factor de Reducción para el área de contacto asciende hasta el 56,26 %. (ver Ec.19, Ec.20 y Ec.21)

$$\text{Fac. Reducción} = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \cdot 100 \quad [19]$$

$$\text{Fac. Reducción} = \frac{3.160,16 - 1.778,03}{3.160,16} \cdot 100 \quad [20]$$

$$\text{Fac. Reducción} = 56,26\% \quad [21]$$

A continuación, se observa cómo queda el modelo representativo de la pala, para el AEE, habiendo establecido las modificaciones pertinentes para definir la nueva superficie de contacto. (ver Ilustración 18)



**Ilustración 18.** El área circular, situada en el centro de la superficie de impacto frontal y de color azul celeste, representa la nueva superficie de contacto

Por otro lado, dado que el valor establecido para la fuerza aplicada no ha variado, pero sí lo ha hecho el área de contacto, es necesario calcular el nuevo valor asociado a la presión que se debe aplicar sobre la superficie de impacto frontal para reproducir el impacto de la pelota sobre la pala. (ver Ec.22, Ec.23 y Ec.24)

$$P_{\text{Equivalente}_2} = \frac{F_{\text{Reacción}}}{A_{\text{Deformada}_2}} \quad [22]$$

$$P_{\text{Equivalente}_2} = \frac{370,73}{1,77803 \cdot 10^{-3}} \quad [23]$$

$$P_{\text{Equivalente}} = 208.506,04 \text{ Pa} \quad [24]$$

De este modo, al igual que se realizó con el AEE inicialmente propuesto, se procede a adjuntar los resultados relativos a las sollicitaciones mecánicas que se desarrollan en cada una de las superficies de impacto de la pala para, con ello, proceder a validar o no, el nuevo modelo propuesto.

### 3.4.2 CONCLUSIONES RELATIVAS A LA MODIFICACIÓN DEL AEE

Tras analizar los resultados ligados a cada uno de los laminados (los datos del fichero de cálculo se encuentran en el anexo) con que se fabrican las superficies de impacto de la pala, se concluye que:

1. La forma en que se distribuyen las sollicitaciones mecánicas, tanto tensiones como deformaciones, en cada una de las capas del laminado que conforman las distintas superficies de impacto de la pala mantienen el mismo patrón.

Por ello, es posible afirmar que una reducción en la superficie de contacto, aunque modifica los valores pico, no altera la manera general en que se distribuye la energía del impacto a través del laminado. De este modo, la variación de la superficie de impacto es un método viable para el ajuste de los valores pico de las sollicitaciones

2. El valor asociado al desplazamiento general del modelo es de 5,292 mm. Comparando dicho valor con el obtenido en el AEE inicial se observa que no se han generado variaciones significativas.

De esta manera, es plausible afirmar que el modelo experimenta, en conjunto, un comportamiento muy similar al modelo inicial propuesto para la simplificación del problema dinámico.

De lo anteriormente expuesto, se llega a la conclusión que, mientras la fuerza aplicada no se modifique, dado que la energía asociada a su aplicación es la misma, el desplazamiento máximo no debe experimentar modificaciones significativas, aunque se altere el área donde se aplica dicha fuerza. Esto se debe a que el desplazamiento del modelo es consecuencia de la flexión que sufre el modelo al estar anclado por un extremo y aplicar una fuerza. Así, la pala trabaja como una viga en voladizo que flexa y se desplaza.

3. Con la reducción del área de impacto, se ha incrementado la energía que se absorbe en la superficie de impacto frontal. En consecuencia, se observa como las sollicitaciones mecánicas han aumentado en la cara frontal de la pala frente a la reducción de las misma que se obtiene en la superficie trasera.

Aunque en una primera impresión pudiese parecer que se ha empeorado el modelo, cuando se estudian los resultados con detalle se concluye todo lo contrario pues, al incrementar la energía absorbida por la superficie de impacto frontal, se ha conseguido reducir en dicha área el error existente entre el modelo dinámico y el nuevo modelo AEE.

Por otro lado, aunque en la superficie trasera, los resultados hayan incrementado su desviación, no es un factor que preocupe en demasía dado que el orden, asociado al valor máximo de las sollicitaciones en dicha superficie, es 10 veces menor que en la superficie de impacto frontal. Por ello, la reducción del área de contacto, se ha conseguido una aproximación de los valores de las sollicitaciones mecánicas, en el AEE, frente a los que se obtenían en el modelo dinámico para la superficie de impacto cuya exigencia mecánica es mayor.

4. Aunque los valores en nuevo AEE se aproximan, en la zona de trabajo de relevancia del modelo, a los valores del ensayo dinámico, todavía es necesario incluir variaciones en las dimensiones del área de contacto para aproximar, lo máximo posible, las solicitaciones mecánicas máximas que se generan en ambos análisis para la superficie de impacto frontal.

Por ello, se propone una reducción del 50% en la dimensión del radio, frente a la dimensión existente en el AEE inicial. De esta manera, el valor para el radio empleado en la modificación propuesta es: (ver Ec.25, Ec.26 y Ec.27)

$$r_3 = 0,50 \cdot r_1 \quad [25]$$

$$r_3 = 0,50 \cdot 31,72 \quad [26]$$

$$r_3 = 15,86 \text{ mm} \quad [27]$$

Y, con ello, el nuevo valor que posee el área de contacto entre la pelota y la pala es de (ver Ec.28, Ec.29 y Ec.30)

$$A_{\text{Deformada}_3} = \pi \cdot r_3^2 \quad [28]$$

$$A_{\text{Deformada}_3} = \pi \cdot 15,86^2 \quad [29]$$

$$A_{\text{Deformada}_3} = 790,23 \text{ mm}^2 \quad [30]$$

De este modo, se observa que, al reducir en un 25% la dimensión del radio, el valor asociado al Factor de Reducción para el área de contacto asciende hasta el 56,26 %. (ver Ec.31, Ec.32 y Ec.33)

$$\text{Fac. Reducción} = \frac{A_1 - A_3}{A_1} \cdot 100 \quad [31]$$

$$\text{Fac. Reducción} = \frac{3.160,16 - 790,23}{3.160,16} \cdot 100 \quad [32]$$

$$\text{Fac. Reducción} = 74,99 \% \quad [33]$$

5. De acuerdo a lo comentado en el punto 4 de las conclusiones, a partir de este momento, la superficie de impacto que se intenta aproximar, entre ambos modelos, es la superficie de impacto frontal dado que es la que resulta más crítica a la hora de estudiar la resistencia mecánica del modelo.

### 3.5. 2ª MODIFICACIÓN PARA LA ADAPTACIÓN DEL AEE

Los resultados gráficos y numéricos derivados de la ejecución del AEE se adjuntan en el anexo del documento.

#### 3.5.1 CONCLUSIONES

Las conclusiones derivadas del análisis de los resultados son:

1. Dado que la superficie de contacto ficticia entre la pala y la pelota posee unas dimensiones menores, frente a las superficies modeladas para ensayos anteriores, la energía del impacto queda más concentrada en la zona central de las superficies de impacto. De este modo, la distribución gráfica de las tensiones aparece desplazada o enfocada hacia dicha zona.
2. Como la dispersión energética hacia área aledañas al contacto es menor, los valores pico en la zona central de impacto son mayores, tanto para la superficie de impacto frontal como para la superficie de impacto trasera.

De este modo, comparando los resultados gráficos, para la distribución de las sollicitaciones mecánicas, se observa como en este nuevo modelo se aprecia la zona de impacto de la pelota también la superficie de impacto trasera, cosa que en modelos anteriores no sucedía. Este hecho es consecuencia de una mayor transmisión energética a través del núcleo de una superficie de impacto a otra.

3. En cuanto a la distribución de tensiones en la superficie trasera, se observa un modelo más “uniforme” a simple vista. Sin embargo, este hecho no es realmente representativo, dado que la mayor homogeneidad en la manera de distribución de las sollicitaciones mecánicas en dicha superficie es resultado del aumento de los valores pico lo cual afecta al valor de la escala y, por ello, las pequeñas variaciones entre unas zonas u otras no se observan con claridad.
4. En relación a la información expuesta en el punto inicial de las conclusiones, la superficie de impacto frontal absorbe una mayor cantidad de energía en su zona central. De este modo, se consigue aumentar el valor pico para las sollicitaciones mecánicas para dicha superficie de impacto, tanto para el laminado 1 como para el laminado 2.

Observando los valores numéricos, se observa que los valores máximos son ligeramente superiores a los valores máximos obtenidos en el ensayo dinámico. Sin embargo, la media de la dispersión de dichas sollicitaciones mecánicas no excede el 10–15% por lo que se puede considerar que el modelado es correcto. Así mismo, dado que los valores han sido desarrollados al alza, se trabaja del lado de la seguridad pues, cuando el modelo se emplee para validar nuevas propuestas constructivas para el modelo de la pala, las tensiones generadas siempre tenderán a ser ligeramente más desfavorables a las que realmente se generen durante un partido real. Con ello, se permite asegurar que la vida útil de la pala será larga.

5. Una vez validado el modelo para la superficie de impacto frontal, se puede dar por válido, también, para la superficie de impacto trasera pues, aunque los valores difieran significativamente de los valores obtenidos en el ensayo dinámico, éstos siempre difieren “al alza” y, en ningún caso, superan a los valores pico, obtenidos para las mismas sollicitaciones, que se desarrollan en la superficie frontal.

Consecuentemente, dado que la superficie de impacto más desfavorable mecánicamente reproduce con suficiente fidelidad las sollicitaciones mecánicas desarrolladas en el modelo dinámico y, puesto que permite



trabajar con un margen de seguridad, es posible dar por válido el nuevo modelo planteado para reproducir el contacto mediante un AEE.

Por otro lado, de las conclusiones extraídas a partir del primero modelo AEE, se plantea una futura vía de investigación. Dicha propuesta reside en hallar la zona donde debe modelarse el área de impacto en función de la velocidad inicial dada a la pelota.

## 4 AJUSTE DEL MODELO DE REFERENCIA

---

### 4.1. CONFIGURACIÓN CONSTRUCTIVA DE UNA PALA DE PÁDEL

La cantidad de información, de dominio público, de la cual se dispone a la hora de estudiar la naturaleza constructiva de una pala de pádel es significativamente escasa. Este hecho se debe a que el proceso de fabricación de una pala de pádel se realiza, casi en su totalidad, de forma artesanal, ocasionando que cada compañía posea un método de fabricación propio y materiales de fabricación con propiedades mecánicas y físicas variables entre sí.

Los distintos métodos de fabricación dependen, en gran manera, de las características constructivas que poseen las palas desarrolladas por cada una de las compañías. Consecuentemente, las empresas crean patentes de los métodos de fabricación propios y de las soluciones constructivas particulares. De este modo, la información que llega al gran público es, prácticamente, inexistente.

Por ello, en el presente apartado únicamente se pretende hacer una breve introducción a las características constructivas básicas de las palas de pádel, es decir, aquellas que, independientemente de las soluciones particulares adoptadas por cada fabricante, relativas al diseño final de la pala, comparten todos los modelos. Así mismo, se mencionan los materiales más habituales empleados en la fabricación de cada una de las distintas partes de que se constituye una pala de pádel (en apartados posteriores se analizarán con detenimiento aquellos que se seleccionen para el estudio planteado en el presente proyecto); Se emplea como fuente principal de información la Reglamentación Técnica aprobada por la FIP.

En la actualidad, cualquier pala de pádel se encuentra constituida por 3 elementos o partes:

- **MARCO DE LA PALA:** Se define como la zona exterior de la pala la cual, al ser una región conformada de una sola pieza, da lugar a un espacio interior donde ubicar tanto el material de relleno (Núcleo) como los laminados que definen las caras de impacto.

El marco de la pala, a su vez, incorpora el tubo interno del mango, sobre el cual se monta la empuñadura ergonómica. De este modo, se evitan juntas que puedan ocasionar un debilitamiento de la estructura las cuales, con el repetido impacto de la pelota sobre la pala, puedan desarrollar una rotura por fatiga de la misma (es necesario recordar que las zonas de unión siempre suponen zonas críticas para el análisis de este tipo de roturas pues, durante los procesos de ensamblaje, se pueden inducir micro-grietas que trabajen como concentradores de tensiones).

Por otro lado, los marcos de las palas de pádel poseen, si se les realiza un corte transversal, una sección tubular de geometría ligeramente ovalada. Para ello, los marcos se fabrican empleando laminados (Fibras) unidos con resinas (Matrices) que, por su naturaleza mecánica, aportan rigidez y resistencia al mismo tiempo que reducen el peso total del conjunto.

- **SUPERFICIE DE IMPACTO:** Es el elemento constructivo de la pala donde se produce el impacto de la pelota durante el proceso de golpeo. Consecuentemente, la manera en que se defina, constructivamente, y según la naturaleza del laminado determinarán el comportamiento mecánico de dicha zona variando, así, las sensaciones que aporten unas palas u otras al jugador.

Como se ha mencionado en el párrafo anterior, las superficies de impacto se moldean empleando laminados compuestos por una mezcla de fibras y matrices (en proporciones variables según el modelo y las sensaciones o el comportamiento mecánico que se desee obtener). Por ello, y considerando como se pueden combinar este tipo de materiales, existen infinidad de posibles soluciones en relación a las prestaciones que se deseen obtener de cada pala.

Así, se comprende mejor el gran esfuerzo económico que las principales marcas de material deportivo de pádel realizan en proyectos de I+D+I, tratando de encontrar nuevas combinaciones que consigan una mejora de las prestaciones de las palas.

- **NÚCLEO:** En rasgos generales, se define como el elemento de relleno que poseen las palas de pádel para suplir el volumen hueco existente entre las superficies de contacto y el marco de la pala.

La función principal que posee el núcleo de la pala es la de trabajar como sistema de amortiguamiento durante el impacto de la pelota sobre ésta. De este modo, el núcleo se asemeja a un resorte elástico, absorbiendo la mayor cantidad posible de energía cinética que trae la pelota antes del impacto. Así, tras impactar, dicha energía cinética se convierte en energía potencial elástica, dada la deformación que experimenta el núcleo de la pala y, tras frenarse por completo la pelota, el material de relleno retorna a su forma y dimensiones iniciales, acelerando de nuevo la pelota. Consecuentemente, el material elegido es básico para definir el comportamiento mecánico que tiene la pala durante el juego.

Explicadas las distintas partes de que se compone una pala se entiende mejor la función que ejerce cada elemento en relación al comportamiento general de la pala, de forma que se permite analizar cómo varía el comportamiento mecánico de las mismas según su forma geométrica, su peso y su dureza.

#### 4.1.1 COMPORTAMIENTO DE LA PALA SEGÚN EL PESO

Es posible afirmar que no existe un peso óptimo con el que establecer que una pala es, constructivamente, perfecta. Así, el peso ideal de la pala viene dado por una gran diversidad de factores, los cuales se relacionan, básicamente, con el estilo de juego deportista y su estado de forma física.

En función del peso de las palas, éstas pueden clasificarse en 2 grandes grupos, palas de pádel livianas y palas de pádel pesadas.

Como norma general:

- **PALAS LIVIANAS:** Se caracterizan por su gran maniobrabilidad y por la posibilidad de imprimir mayor velocidad a la pala, al tiempo que reducen la fatiga física que experimenta el jugador.

En contraprestación, la energía que pueden imprimir dichas palas durante el golpe, es reducida pues las fuerzas de inercia desarrolladas por las palas se reducen al tener una menor masa.

- **PALAS PESADAS:** Poseen el comportamiento opuesto a las palas livianas. Se requiere una menor fuerza de golpeo, por parte del jugador, para proporcionar a la pelota la misma velocidad de salida, dado que la inercia que posee la pala es significativamente mayor a la que poseen las palas livianas.

Sin embargo, como consecuencia de la mayor inercia que posee la pala, la maniobrabilidad de la misma se reduce, al mismo tiempo que se incrementa la fatiga física que experimenta el jugador, pues debe ejercer mayor fuerza para controlar la pala.

Según lo expuesto, se recomienda emplear una pala con el mayor peso posible, siempre y cuando éste no afecte a la resistencia física del jugador ni le impida tener un control total sobre la pala.

#### 4.1.2 COMPORTAMIENTO DE LA PALA SEGÚN EL BALANCE

*“El balance de una pala es la propiedad constructiva de la misma que define la manera en la que se distribuye la masa de los distintos elementos constructivos que la conforman, tomando en consideración su configuración geométrica general.”*

El balance permite caracterizar el comportamiento dinámico de la pala, así como su interacción con la pelota durante el golpe. Su efecto sobre la pala es debido a la influencia que tiene la distribución de la masa de la misma sobre su momento de inercia.

Así, se debe recordar que:

*“La inercia de un cuerpo es la tendencia que presenta el mismo a no modificar su estado de reposo o de movimiento.”*

De este modo, como mayor es la inercia que posee un cuerpo, más fuerza se requiere para ocasionar modificaciones sobre la caracterización cinemática que describe su movimiento.

Para obtener el Momento de Inercia ( $I$ ) de un sólido sobre un eje de rotación de referencia, se debe disponer de la ubicación del centro de masas, también llamado CDG, del cuerpo para poder, de este modo, aplicar la expresión que permita la obtención del mismo para sistemas de masa continuos (ver Ec.34).

$$I = \int x^2 \cdot dm \quad [34]$$

Siendo:

- **dm**: Masa puntual de la cual se desea obtener su momento de inercia.
- **x**: Distancia a la cual se encuentra la masa puntual analizada frente al eje de referencia.

Consecuentemente, si se establece que el eje de referencia pasa por el tronco vertebral del jugador, sobre el cual se fundamenta el movimiento de rotación que desarrolla este durante el golpe, como más desplazada hacia el extremo de la pala se encuentre la masa de la pala, más hacia el extremo de la misma se sitúa su CDG y, por ello, mayor es la distancia que separa ambos ejes. A resultas, las palas que poseen sus CDG en las zonas extremas superiores, adquieren momentos de inercia mayores.

- **PESO DESPLAZADO HACIA LA CABEZA**: La mayor parte de la masa tiende a concentrarse en la zona superior de la pala, desplazando así el CDG de la misma hacia dicha zona.

Estas palas se caracterizan por inducir gran potencia a la pelota durante el golpe, pues a velocidad con la que impacta la pala sobre la pelota es mayor, para una misma fuerza aplicada por el jugador sobre la pala durante el movimiento.

En contraprestación, el desgaste físico que supone jugar con este tipo de palas es mayor, pues el jugador debe ejercer mayor fuerza sobre la empuñadura para controlar que la trayectoria que sigue la pala es la correcta.

Por ello, se definen como un tipo de palas muy apropiadas para jugadores que fundamentan su juego en el “*Smash*” o en estilos de juego desde el fondo de pista, dado que permiten imprimir gran potencia al golpe.

- **PESO DESPLAZADO HACIA LA EMPUÑADURA:** Este tipo de palas concentran la mayor parte de su maza hacia la zona superior de la empuñadura o parte baja de la “lágrima”, aprovechando que una parte importante del peso de la pala corresponde con la zona del mango de la misma.

Este tipo de palas se caracterizan por su versatilidad y fácil control. Su comportamiento es neutro, ofreciendo un equilibrio adecuado entre potencia y control, al mismo tiempo que se reduce la exigencia física que se requiere para su control. Por ello, estas palas son las que se recomiendan para niños y jugadores noveles.

Sin embargo, dicho tipo de palas también presenta una serie de inconvenientes. Así, en juego en red donde es necesario ejecutar voleas con la mano pegada al tronco del jugador, las palas pierden consistencia por la inercia que tiene su cabeza es menor y, es el jugador el que debe proporcionar la mayor parte de la fuerza que contrarreste la fuerza (en contra-dirección del movimiento de avance de la pala) que genera el impacto de la bola sobre la misma.

Como se observa en la Tabla 11, uno de los factores básicos que determinan como se distribuye la masa de la pala es la forma geométrica que posee la zona de impacto y el marco. De esta manera, las palas con geometría ancha en la parte superior y estrecha en su zona inferior, poseen un balance desplazado hacia la cabeza (palas con forma de diamante). Por el contrario, las palas redondas poseen una distribución mucho más neutra, tendiendo a situar su CDG en la zona de la empuñadura (palas redondas).

**Tabla 11.** Balance de la pala de acorde a su configuración geométrica.

BALANCE DE LAS PALAS		
BAJO	MEDIO	ALTO
		
FORMA REDONDA	FORMA DE LÁGRIMA	FORMA DE DIAMANTE

En relación a la información presentada en el presente apartado, se observa como el modelo geométrico que se toma como punto de partida posee forma de lágrima y, con ello, un balance medio.

Dado que, como se ha especificado, cualquier modificación de la forma geométrica de la pala afecta considerablemente al comportamiento dinámico y mecánico de la pala, en el proyecto que se realiza se opta por mantener constante todo lo relativo a dimensiones y forma, tanto para el marco como para la zona de impacto. De este modo, con el objetivo de ajustar el peso de la pala a los modelos reales, solamente se modificarán las propiedades mecánicas y físicas de los componentes con los cuales se fabrica, pero no así su configuración geométrica.

## 4.2. MATERIALES DE FABRICACIÓN DE UNA PALA DE PÁDEL

En consonancia a la información presentada en el Apartado 2.1 y 4.1, las palas de pádel se fabrican mediante el ensamblaje de 3 subconjuntos o elementos: el marco, el núcleo (material de relleno de la pala) y la superficie de impacto.

Cada uno de estos 3 elementos está fabricado de un material específico, de forma que se adapte de forma óptima a los requerimientos mecánicos a los cuales se encuentra sometido cada sub-elemento constitutivo de la pala.

#### 4.2.1 MATERIALES DE FABRICACIÓN PARA EL MARCO DE LA PALA

El marco de la pala debe reunir una serie de propiedades mecánicas y físicas (ver Apartado 4.1) con el fin de optimizar su utilidad. Entre ellas, cabe destacar la resistencia mecánica, la rigidez estructural y un bajo peso específico. Con ello, se consigue un elemento constructivo de refuerzo que aporta solidez estructural, durabilidad y buena manejabilidad.

En consecuencia, para su fabricación se deben emplear materiales cuyas propiedades satisfacen todos los requerimientos expuestos en el párrafo anterior. Dado que no es habitual encontrar materiales puros que reúnan todas las condiciones anteriores, lo más común es fabricar el marco de la pala haciendo uso de materiales compuestos.

Si se da un breve vistazo al mercado actual de palas, se observa como la práctica totalidad de los modelos, independientemente de la forma geométrica de la pala y del nivel de juego al cual se orienta, están fabricados a través de uno de los siguientes materiales compuestos que a seguir se definen:

- **PLÁSTICO REFORZADO CON FIBRA DE CARBONO (PRFC):** Se obtiene a partir de compuestos como el PoliAcriloNitrilo (PAN). La elaboración de la fibra de carbono basada en fibras PAN tiene lugar en 3 etapas distintas:
  - **1ª ETAPA:** La fibra PAN se estira y se distribuye para su establecimiento en paralelo y, mientras se mantiene en tensión, se procede a su oxidación por la acción del aire cuando se le aplican temperaturas que oscilan entre los 200°C y los 220°C.
  - **2ª ETAPA:** Se produce el proceso de carbonización mediante pirolisis, es decir, a través de la descomposición del oxígeno, del hidrógeno y del nitrógeno que conforman la fibra PAN, por acción calorífica bajo ambientes inertes y con temperaturas que oscilan entre los 1.000°C y los 1.500°C.

Como resultado, se produce un gran aumento de la resistencia a la tracción del compuesto material dado que, durante el tratamiento de carbonización, en el interior de cada fibra, se constituyen una serie de filamentos o bandas de esqueletos estratificados de grafito.

- **3ª ETAPA:** Se recolocan los cristales según el modelo del grafito dentro de cada fibra. Consecuentemente, dichas fibras o láminas de grafito llegan a contener hasta un 99% de carbono.

Una vez obtenidas las fibras, éstas se entrelazan para dar lugar a tejidos de grosor variable, atendiendo a la finalidad del material. No obstante, este proceso no es el que le otorga al material sus propiedades finales, sino que se debe añadir una matriz polimérica que aporte solidez al conjunto de las fibras evitando, de esta manera, que se deshilache.

La fibra de carbono puede clasificarse atendiendo a diversos criterios (valor del límite elástico (E), según el material de partida, en función de la temperatura aplicada a la fibra durante el tratamiento térmico final, etc.).

De entre todas las opciones, la más habitual es la clasificación de dichas fibras en función de la temperatura que se les aplicada durante el tratamiento térmico final, pudiéndose distinguir 3 tipos básicos de fibras:

- **TIPO I:** Temperatura superior a 2.000 °C. Se les conoce como procesos HTT (*“High Temperature Treatment”*). Poseen una elevada rigidez. Como contraprestación, su resistencia es escasa, dado que son bastante frágiles.
- **TIPO II:** Temperatura entorno 1.500°C. Se les conoce como procesos ITT (*“Intermediate Temperature Treatment”*). Poseen una elevada resistencia. Como contraprestación, su rigidez es menor en comparación al valor que se obtiene para las fibras Tipo I.

En cuanto a las propiedades mecánicas y físicas de este material compuesto cabe resaltar (relacionadas con la fabricación de marcos de palas):

- Gran resistencia a fatiga.
  - Alto valor del módulo elástico o módulo de Young
  - Baja densidad. Por lo tanto, el peso del componente es reducido.
  - Buena resistencia a la corrosión.
  - Impermeabilidad.
  - Gran resistencia a tracción.
- 
- **PLÁSTICO REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO (PRFV):** Es uno de los materiales compuestos más empleados en la actualidad, dado que sus propiedades mecánicas y físicas le conceden gran versatilidad (ver Ilustración 19). Emplea fibras de vidrio como material de refuerzo. Dichas fibras se unen, unas a otras, a través de una matriz polimérica, habitualmente resinas epoxi o poliésteres. De este modo, se consigue desarrollar un material altamente resistente con bajo peso, consiguiendo una alta resistencia específica.

Así mismo, el coste de dicha es relativamente bajo, en comparación con el de otros materiales empleados como refuerzo en materiales compuestos como las fibras de carbono o de aramida. Este hecho es debido a la automatización del proceso de fabricación de la fibra, consiguiéndose grandes cantidades de material en cortos plazos y, todo ello, con una alta calidad final de producto.

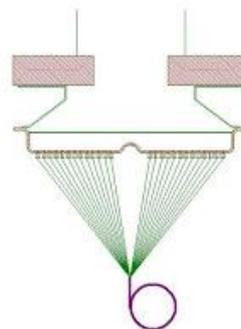


**Ilustración 19.** Ejemplo de las múltiples formas en que puede presentarse la fibra de vidrio, de acorde a su aplicación

Para su fabricación se emplea una mezcla de compuestos cerámicos: óxido de silicio ( $SiO_2$ ), óxido de magnesio ( $MgO$ ), óxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ), óxido de boro ( $B_2O_3$ ) y óxido de hierro ( $FeO$ ), así como otros aditivos. Para obtener la fibra se emplean dos procesos distintos, por Fusión Directa o por Refundición.

Para la obtención de las fibras continuas que se utilizan habitualmente para fabricar los refuerzos en los “*composites*”, el proceso más usado es el de Fusión Directa. Para ello, se debe seguir los pasos que a seguir se explican:

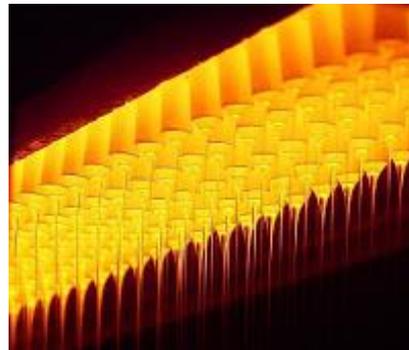
- **PASO 1:** Los materiales en estado sólido se introducen en un horno hasta que se consigue que fundan, produciéndose la mezcla homogénea a nivel macroscópico.
- **PASO 2:** El material fundido es extruido a través de un cabezal que contiene, a su vez, múltiples boquillas (entre 200 y 4.000 por cada cabezal) (ver Ilustración 20).



**Ilustración 20.** Proceso de fabricación de las fibras de vidrio por el método de fabricación directa

- **PASO 3:** El material fundido fluye a través de la placa del “*Bushing*” (ver Ilustración 21). Este elemento, consistente en un cabezal calefactable que contiene múltiples boquillas, permite la correcta formación de los hilos de fibra siendo, el espesor de las paredes de las boquillas, el parámetro más relevante para la correcta formación de la misma.

Como se observa, a medida que el material fundido fluye a través de la boquilla, por la tensión superficial del fluido, se forma una gota que, finalmente, da lugar a un hilo continuo como resultado de la actuación de la fuerza de gravedad la cual, rompe la película de fluido por su parte más débil. Para que el hilo posea las dimensiones adecuadas, el fluido debe tener un valor adecuado para la viscosidad pues, si es demasiado espesa, no es capaz de fluir de forma continua a través de la apertura.



**Ilustración 21.** Salida del vidrio fundido a través de las boquillas

- **PASO 4:** A medida que las fibras de vidrio solidifican, se les aplica una capa de recubrimiento (apresto) cuya composición depende, básicamente, del tipo de fibra de vidrio fabricada y, en consecuencia, de la aplicación final de la misma.

Normalmente, el apresto suele suponer entre el 0,5 y el 2,0 % en peso de la fibra.

En el caso de las fibras continuas, cuya finalidad es trabajar como elemento de refuerzo una vez se embeben dentro de la matriz, la función principal del apresto es la de proporcionar una inter-fase (entre fibra y matriz) resistente, con la menor dimensión posible y que, a su vez reduzca las impurezas que se puedan desarrollar en la zona de unión. De este modo, se evitan pérdidas de resistencia y la aparición de posibles puntos débiles dentro del material compuesto.

Por otro lado, el apresto permite reducir la fricción que se genera al hilar las fibras para dar lugar a los tejidos de fibras. Es básico resaltar que, cualquier posible rozadura puede ocasionar porosidad en la superficie externa de las mismas, la cual desarrolla una pérdida súbita de las propiedades resistentes del material.

Para el presente proyecto, la variante de fibra de vidrio que se toma como alternativa a otro tipo de fibras, como la de carbono, es la Fibra de Vidrio tipo "E". Ésta, se caracteriza por poseer una elevada resistencia (a tracción y a compresión) en la dirección en la que se orienta la fibra de refuerzo y, a su vez, una densidad baja. De este modo, la resistencia específica del compuesto es muy elevada.

Dado el tipo de geometría que poseen las palas, la manera más sencilla que existe para fabricarlas es mediante el método de moldeo por contacto (*Hand Lay-Up*). Así, las fibras de vidrio, tejidas formando finas telas continuas de fibra se adhieren a las paredes del molde, con la interposición previa de la resina, formando finas capas de laminado.



## 4.2.2 MATERIALES DE FABRICACIÓN PARA LA SUPERFICIE DE IMPACTO

En consonancia a las propiedades mecánicas que debe satisfacer la superficie de impacto de la pala (ver información expuesta en el Apartado 4.1) para poder ofrecer, ésta, unas correctas sensaciones de juego al jugador, los materiales que mayormente se utilizan para la fabricación de esta zona de la pala son, la fibra de vidrio o la fibra de carbono, eso sí, cada una con distintas variaciones constructivas según el nivel de juego del jugador o según las prestaciones y el comportamiento mecánico deseado para la pala.

## 4.2.3 MATERIALES DE FABRICACIÓN PARA EL MATERIAL DE RELLENO

Los materiales de relleno, usados para la fabricación del núcleo de la pala, deben reunir, como se ha comentado en apartados anteriores, una serie de requerimientos de comportamiento mecánico muy concretos:

- Alta resistencia al impacto.
- Buena durabilidad. La resistencia que presenten los materiales a esfuerzos de fatiga debe ser elevada.
- Buena absorción de las vibraciones.
- Poseer un buen comportamiento elástico. No deben ser excesivamente rígidas, pues deben permitir una correcta interacción con la pelota durante el impacto.
- Poseer propiedades mecánicas isotrópicas. Proporciona un comportamiento estable y predecible para cada impacto de la pala con la pelota.

Por otro lado, el material debe poseer una baja densidad, de forma que permita rellenar todo el volumen interior que se genera en la pala al juntar el marco de la pala con las superficies de impacto (frontal y trasera) sin añadir una masa excesiva a la pala, pues el peso máximo para la misma, no debe superar los 400,0 g.

De este modo, habitualmente se recurre a dos materiales poliméricos de distinta naturaleza, disponiendo cada uno de ellos de unas propiedades mecánicas distintas. Así, en función del material de relleno por el que se opta en cada pala, ésta presentará un comportamiento mecánico y unas sensaciones distintas.

- **GOMA EVA:** El nombre original del compuesto (de naturaleza 100% polimérica) es *Etileno-Vinil-Acetato*, y pertenece a la familia de los termoplásticos.

El material de partida que se toma en la industria de la fabricación de las palas de pádel, considerando la familia de materiales a que pertenece la Goma EVA, es aquel formado por un 88% en peso del compuesto de Etileno y de un 12% en peso de Vinil-Acetato.

Así, las propiedades físicas y mecánicas básicas de que dispone el material son:

- **DENSIDAD:** Varía en función del grado de atrapamientos de aire que existen en el interior del compuesto una vez expandido. Sin embargo, como dato de partida, se toma que la densidad habitual de esta variante de la Goma EVA ronda los 930,0 kg/m<sup>3</sup>.
- **MÓDULO DE ELASTICIDAD:** Su valor se encuentra comprendido entre 0,07 y 0,09 GPa. Representa la constante de proporcionalidad entre la deformación elástica que experimenta un material en función de la tensión que actúa sobre el cuerpo. (ver Ec.35)

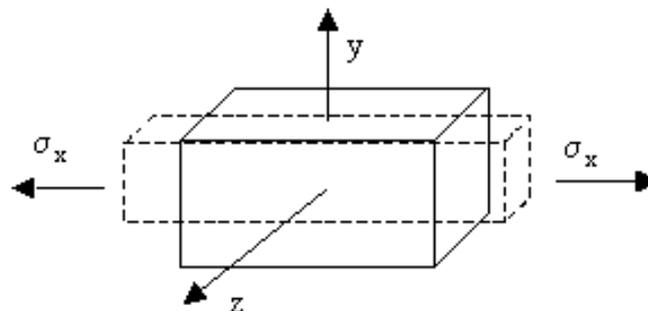
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad [35]$$

- **LÍMITE ELÁSTICO:** A pesar de tratarse de un material polimérico, posee un valor relativamente alto para su límite elástico, lo que le confiere una mayor rigidez mecánica frente al otro material empleado, habitualmente, en la fabricación de los núcleos las palas, es decir, el FOAM. Su valor se encuentra comprendido, dependiendo del % en peso de aditivos que pueda contener, entre los 18 y los 19 MPa.

Aunque el rango puede parecer pequeño, para tratarse de un material polimérico es una horquilla de variación relativamente alta pues, como se ha comentado, los materiales poliméricos suelen poseer valores mucho más discretos para dicha propiedad mecánica. (ver el valor del límite elástico que posee el FOAM).

- **ELONGACIÓN:** Es un parámetro que se calcula a través de la realización del ensayo de tracción del compuesto y se define como la variación de la longitud que experimenta la probeta, frente a su longitud inicial, en el momento en el cual se produce su fractura. Para la Goma EVA, el valor de la elongación es 730%.
- **COEFICIENTE DE POISSON:** Posee un valor aproximado de 0,34. Cabe recordar que el Coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) es un parámetro relativo al comportamiento mecánico del material que indica la relación existente entre las deformaciones longitudinales que experimenta el material en el sentido perpendicular a la dirección de la fuerza aplicada y las deformaciones longitudinales en dirección de la fuerza aplicada sobre el mismo. Matemáticamente, el Coeficiente de Poisson se define como: (ver Ec.36) (ver Ilustración 22)

$$\nu = \left| \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \right| = \left| \frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x} \right| \quad [36]$$



**Ilustración 22.** Representación gráfica descriptiva del fenómeno de Poisson

- **RESISTENCIA A FATIGA:** Es una propiedad mecánica del elemento que indica que tensión máxima es capaz de soportar el material,

cuando se encuentra sometido a una aplicación cíclica de esfuerzos, para que este sea capaz de resistir  $10^7$  ciclos de carga sin experimentar ninguna rotura.

- **MOLDEADO POR INYECCIÓN:** Presenta excelentes propiedades de conformado por inyección.
- **MOLDEADO POR EXTRUSIÓN:** Presenta excelentes propiedades de conformado por extrusión.
- **FOAM:** El FOAM es un compuesto de naturaleza 100% polimérica y que se compone, en su totalidad, de polietileno.

Tal como sucede con el compuesto de Goma EVA, el FOAM es un material plástico perteneciente a la familia de los termoplásticos, es decir, a aquellos materiales que pueden ser calentados hasta tener un comportamiento moldeable para, con ello, adquirir la forma deseada y, posteriormente, ser enfriados manteniendo, en gran medida, sus propiedades mecánicas y físicas iniciales. Sin embargo, es importante destacar que, tras múltiples procesos de conformado por calentamiento, el material termina perdiendo parte de dichas propiedades.

El material de partida que se toma en la industria de la fabricación de las palas de pádel, considerando la familia de materiales a que pertenece el FOAM, es el que se caracteriza por ser definido como un material polimérico de baja densidad con una gravedad específica de 0,08. De este modo, se puede afirmar que, el FOAM empleado en la fabricación de las palas de pádel es aquel que, por defecto, presenta una menor densidad, No obstante, como ocurre con el compuesto de Goma EVA, sus propiedades de partida pueden ser modificadas en el caso que, por expreso deseo del jugador, la pala deba poseer unas características de juego determinadas.

Las propiedades físicas y mecánicas fundamentales que definen al compuesto FOAM son:

- **DENSIDAD:** Mucho menor que la Goma EVA base. Su valor fluctúa entre los 77 y los 83 kg/m<sup>3</sup>.
- **MÓDULO ELÁSTICO:** Es del orden de entre 11,5 y 22,5 veces menor al valor que posee la Goma EVA, situándose entre los 0,004 y los 0,006 GPa. De este modo, puede observarse como se trata de un material menos rígido, pues se requiere aplicar una menor fuerza para conseguir una misma deformación en el compuesto.
- **LÍMITE ELÁSTICO:** Posee un valor máximo de 0,055 MPa.
- **ELONGACIÓN:** Comprendida entre un 51% y un 55% frente a sus dimensiones de partida. De este modo, aunque el material es menos rígido admite una deformación bastante menor. Por ello, admite peor los esfuerzos de deformación que ocasiona la pelota al golpear sobre la pala y, en consecuencia, la durabilidad de las palas de palas que están fabricas con un núcleo de FOAM es menor que la durabilidad de las palas compuestas con núcleos de Goma EVA.
- **COEFICIENTE DE POISSON:** La menor capacidad de deformación máxima que admite el compuesto también se ve reflejada en el valor que adquiere el Coeficiente de Poisson pues, su valor, está comprendido entre 0,26 y 0,30.
- **RESISTENCIA A FATIGA:** De igual modo que ocurre con el resto de propiedades mecánicas del compuesto FOAM frente a la Goma EVA, el valor máximo para las tensiones que puede soportar el material si se desea que posea vida infinita (10<sup>7</sup> ciclos de carga) es significativamente menor. De esta manera, se refuerza la idea ya introducida relativa a la menor vida útil de la pala frente a la aplicación de sollicitaciones mecánicas de igual juego similares.
- **MOLDEADO POR INYECCIÓN:** Es un material que posee un comportamiento excelente para dicho tipo de conformado.

- **MOLDEADO POR EXTRUSIÓN:** No presenta ningún problema a priori para ser moldeado empleando sistemas de extrusión.

#### 4.3. CONFIGURACIÓN DE LOS MATERIALES EMPLEADOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL MODELO DE REFERENCIA

En consonancia a la información expuesta en los Apartados 1.3, 4.2.1, 4.2.2 y 4.2.3, el compuesto empleado para modelar la zona de impacto y el marco de la pala es el mismo, es decir, un laminado compuesto a base de fibra de vidrio (como elemento de refuerzo) y una matriz de resina epoxi.

Por otro lado, el material definido en el modelo de partida (y que se ha empleado para la validación del AEE) para desarrollar el núcleo de la pala es un compuesto polimérico de Goma EVA. No obstante, este material posee una densidad que, para el volumen que debe ocupar entre las superficies de impacto frontal y trasera y el marco, da lugar a un peso total de la pala excesivo. De este modo, en el siguiente apartado del proyecto, se debe modelar un material que posea un comportamiento mecánico similar al utilizado originalmente pero que, a su vez, cuente con un valor para la densidad menor, permitiendo ajustar el peso del modelo al peso real que posee una pala de pádel.

En cuanto al material con el cual se han modelado las superficies de contacto y el marco, se han empleado datos comerciales para modelar los laminados, a partir de los cuales se fabrican dichos componentes. Con ello, se posee un punto de partida claro y fiable con el cual poder comparar los futuros datos obtenidos para las simulaciones de variantes en la forma de fabricación de las superficies de impacto y el marco, bien por los materiales empleados bien por la forma en que se disponen los laminados.

## 4.4. AJUSTE DE LA DENSIDAD REAL DEL MATERIAL DEL NÚCLEO

Partiendo de la información expuesta en el Apartado 4.2.3, el objetivo ahora reside en encontrar un valor para la densidad que permita adaptar el peso del material de relleno con el objetivo de obtener un peso final de la pala no superior al peso máximo que poseen los modelos de pala más pesados que pueden adquirirse, a día de hoy, en el mercado.

Para ello, dado que el modelo de partida definido por Nebot Valls (2018) emplea como elemento de relleno para la pala un compuesto a base de Goma EVA, en el proceso de ajuste del peso del nuevo modelo también se utilizará dicho compuesto para su fabricación. De este modo, se desvirtúan, en la menor medida posible, los parámetros del ensayo modelado en el presente proyecto, de forma que se puedan contrastar con mayor claridad los resultados obtenidos en relación con los del modelo de partida.

### 4.4.1 CÁLCULO DEL VOLUMEN Y EL PESO DE LOS COMPONENTES DEL MODELO

El primer paso que se requiere realizar, para obtener el valor de la densidad que debe tener el material de relleno, es calcular el volumen que éste deberá ocupar dentro de la pala.

Con objeto de aislar el volumen que ocupa, únicamente, el núcleo de la pala se sigue el siguiente proceso:

#### ***Select → Entities → Volumes***

Tan pronto se comprueba que el volumen seleccionado es el correcto, se procede a obtener el valor que poseen tanto su volumen como su masa. Con el objetivo de obtener el valor del volumen, se procede de la manera siguiente:

#### ***List → Volumes***

De este modo, ya se puede extraer la información relativa a las dimensiones geométricas del componente.

## VLIST Command

## File

```
LIST ALL SELECTED VOLUMES.  
NO.SHEL  AREAS  VOLU  #NODES #ELEM  MAT  REAL  TYP  ESYS  SECN  
1 1  33  34  35  36  0.1479E-02  3591  2992  1  -5  1  0  0
```

**Ilustración 23.** Ventana donde se observa el valor que adquiere el volumen del núcleo

De esta manera, se observa que el valor resultante para el volumen que debe ocupar el material de relleno es de  $1,479 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ .

Dado que no existe un valor límite reglamentado en la normativa de la FIP para el peso que pueden poseer las palas, se considera que el máximo peso permitido para el modelo, una vez ajustado, no debe superar los  $350,0^{13} \text{ g}$ .

#### 4.4.2 AJUSTE DE LAS PROPIEDADES DEL MATERIAL DE RELLENO EN EL MODELO DEFINITIVO

El ajuste de las propiedades mecánicas y físicas del material de relleno es un proceso que se debe realizar de forma individual para cada una de las propiedades del material, pues se realiza mediante métodos de adaptación independientes.

De este modo, por un lado, debe calcularse el valor real que toma la densidad para el material de relleno y, por otro lado, hay que adaptar los valores para las propiedades mecánicas de la Goma EVA.

##### 4.4.2.1 AJUSTE DE LA DENSIDAD

Para encontrar el valor real con el cual debe modelarse la densidad se procede según se explica a continuación:

---

<sup>13</sup> Este valor permite disponer de un pequeño rango de peso frente al valor límite que se suele encontrar en el mercado para los modelos más pesados (400,0 g). Es importante poseer dicho margen de variación dado que el modelo empleado para el AEE no dispone de un mango con el cual modelar la empuñadura de la pala.

- **PASO 1:** Se establece la forma en que se distribuye el peso conjunto de la pala en función de los distintos elementos constructivos que la conforman.

Si se tiene en cuenta que el peso máximo que puede poseer la pala, según decisión arbitraria, es de 0,3500 kg y, estableciendo que el peso del núcleo no debe superar el 70% del peso total considerado, se obtiene que el núcleo tiene que pesar, como máximo, 0,2450 kg. Con ello, es posible ajustar con mayor seguridad la densidad del material de relleno.

- **PASO 2:** Conocido el volumen del núcleo y la masa máxima que éste puede adquirir se calcula la densidad máxima que debe tener la Goma EVA Modificada para no superar el peso límite establecido. (ver Ec.37, Ec.38 y Ec.39)

$$\rho_{\text{Límite}} = \frac{m_{\text{Máxima Núcleo}}}{V_{\text{Núcleo}}} \quad [37]$$

$$\rho_{\text{Límite}} = \frac{0,2450}{1,479 \cdot 10^{-3}} \quad [38]$$

$$\rho_{\text{Límite}} = 165,7 \text{ kg/m}^3 \quad [39]$$

- **PASO 3:** Calculado el valor límite máximo que debe poseer la densidad, se procede a fijar el verdadero valor que se especifica para dicho componente.

Para ello, se toma en consideración los modelos existentes en el mercado y los valores que adquieren sus respectivos núcleos.

Así, se observa que el valor promedio para la densidad de los materiales de relleno del núcleo oscila entorno, a  $130,0^{14} \text{ kg/m}^3$ .

Como se observa, dicho valor no supera el valor límite previamente calculado, por lo que se puede considerar que el parámetro es aceptable para su uso en la definición del modelo de referencia.

---

<sup>14</sup> Dicho valor se ha obtenido de forma experimental, analizando el promedio de las densidades.

#### 4.4.2.2 AJUSTE DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS

Para modelar el comportamiento mecánico real del material de relleno se deben establecer los valores que toman el límite elástico y el Coeficiente de Poisson, dado que se ha considerado que se trata de un material isotrópico con un comportamiento enmarcado dentro del rango elástico.

Según se ha comentado en apartados anteriores, la información relativa al comportamiento mecánico real de dichos materiales es significativamente escasa y de difícil obtención. Consecuentemente, el ajuste del límite elástico se ha realizado de forma experimental. Para ello, se ha sometido, a distintos núcleos, a un ensayo mecánico de compresión. El objetivo es observar cómo evoluciona la deformación que éstos experimentan en función de la fuerza aplicada sobre los mismos. De esta manera, según la Ley de Hooke, que define el comportamiento elástico de un material isotrópico, se puede calcular aproximadamente el valor que adquiere el módulo de Young del material con el cual están fabricados.

Como se ha comentado, los datos han sido obtenidos de forma experimental (ver Ilustración 24). Con este objetivo, se han anclado las dos superficies de impacto que conforman la pala, cada una a uno de los extremos de la máquina de ensayos. Así, se consigue aplicar de forma uniforme la misma fuerza en ambas caras de la pala. Por otro lado, al mismo tiempo que se controla la fuerza aplicada en cada instante, se mide la deformación elástica que experimentan las superficies de impacto de la pala.

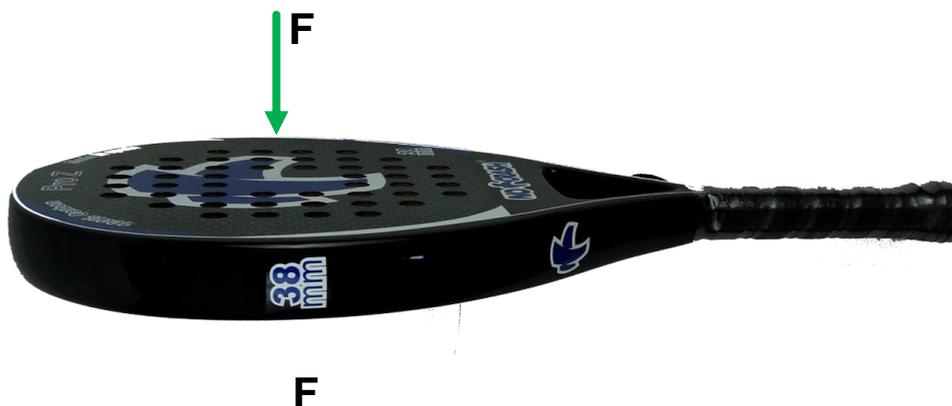
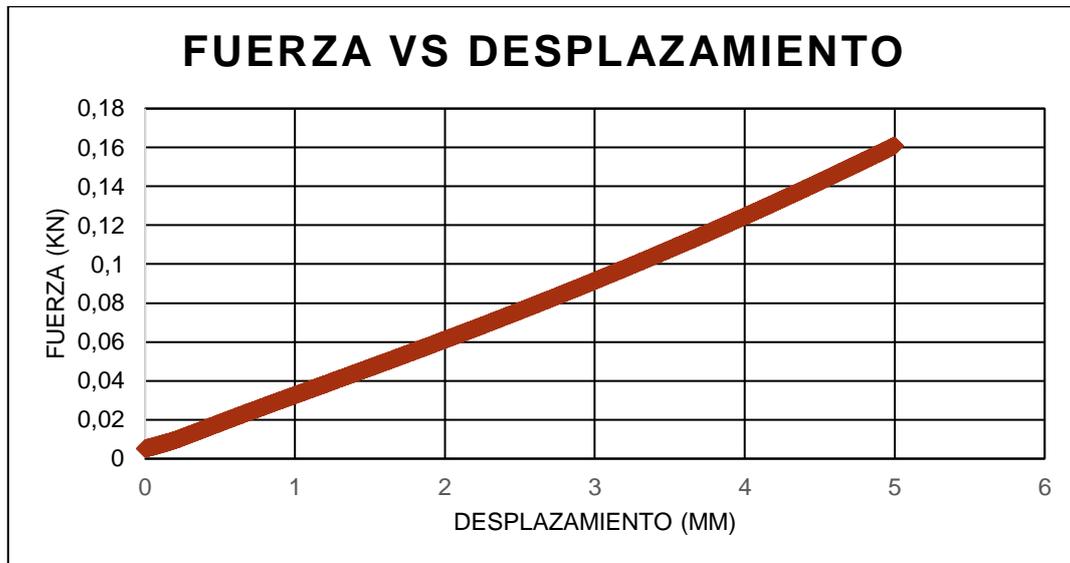


Ilustración 24. Sentido de aplicación de la fuerza sobre las superficies de impacto

Con los datos generados durante la ejecución del ensayo mecánico es posible reproducir un gráfico “Fuerza – Desplazamiento” y, con él, obtener el valor correspondiente al límite elástico del material (ver Ilustración 36).



**Ilustración 25.** Gráfico “Fuerza – Desplazamiento” que define el comportamiento mecánico a compresión del material de relleno

De este modo, en la Ilustración 25 se observa cómo, a través de un análisis de EF donde se reproduce el ensayo anteriormente descrito, hasta que la curva “Fuerza - Desplazamiento” es similar para distintos modelos de pala. Con ello, se puede obtener un valor aproximado para el Módulo de Young de la Goma EVA que se emplea en la actualidad para la fabricación de las palas que se encuentran en el mercado.

Consecuentemente, las propiedades que posee la Goma EVA Modificada (ver Tabla 12) y que es necesario introducir en el programa para modelar el nuevo comportamiento mecánico y físico de dicho compuesto son:

**Tabla 12.** Propiedades físicas y mecánicas del nuevo material de relleno

PARÁMETRO	VALOR
DENSIDAD ( <i>DENSITY</i> )	130,0 kg/m <sup>3</sup>
MÓDULO DE ELASTICIDAD ( <i>EX</i> )	62.000 Pa
COEFICIENTE DE POISSON ( <i>PRXY</i> )	0,34

#### 4.5. AJUSTE DE LAS CONDICIONES DE CONTORNO DEL AEE

En el Apartado 3 se ha propuesto la tarea de modelar un análisis estático equivalente con el que estudiar el comportamiento mecánico que experimenta una pala de pádel en el momento del golpe.

Como se ha comentado en el Apartado 3.1., para evitar introducir errores externos (mediante una definición errónea de las condiciones de contorno las cuales definen el ensayo de referencia) que desvirtúen los resultados, se ha tomado como primer valor para la fuerza que ejerce la pelota sobre la pala el dato correspondiente para la fuerza de reacción en el mango de la pala en la Componente “Z” en el momento de velocidad 0 para la pelota.

Sin embargo, por errores cometidos en el modelado de las propiedades físicas de la pelota, el valor real para la fuerza que ejerce la pelota sobre la pala es superior. De este modo, haciendo uso de las ecuaciones de la estática se ha obtenido un valor más realista con el cual definir dicha sollicitación mecánica.

Para ello, se emplea el Principio de D’Alembert, el cual permite estudiar problemas de naturaleza dinámica como si se tratase de problemas puramente estáticos, mediante la introducción de unas acciones físicas ficticias denominadas “*Acciones Inerciales*” (ver Ec.40 y Ec.41). Así, partiendo de la Segunda Ley de Newton aplicada a un Sólido Rígido (en adelante, SR) que se encuentre sometido a un movimiento plano, se puede suponer que:

$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i - m \cdot \vec{a}_G = 0 \quad [40]$$

$$\sum_{i=1}^n (\vec{r}_i \times \vec{F}_i) + \sum_{i=1}^m \vec{T}_i - I_G \cdot \vec{\alpha} = 0 \quad [41]$$

Para conocer el valor de la Fuerza Estática Equivalente (FEE) que se debe aplicar sobre la pala, de forma que se reproduzcan las sollicitaciones mecánicas reales que se generan durante el proceso de golpeo, se emplea la Ecuación 42:

$$\vec{F}_{EE} = m_{\text{pelota}} \cdot \vec{a}_{\text{pelota}} \quad [42]$$

Por un lado, teniendo en consideración las Reglamentación Técnica impuesta por la FIP, se establece que el valor para la masa de la pelota debe ser de 59,4 g.

Por otro lado, el valor que toma la deceleración de la bola (se supone aceleración constante durante todo el proceso de golpeo), desde que impacta en un primer instante con la pala hasta que se detiene, es una incógnita que debe ser esclarecida con antelación al cálculo de la FEE real que se debe aplicar. Para ello, se hace uso de las expresiones matemáticas correspondientes al movimiento rectilíneo uniformemente acelerado (en adelante, MRUA) (ver Ec.43 y Ec.44) y, se emplean los valores del tiempo y velocidad inicial especificados en la Tabla 13.

**Tabla 13.** Parámetros requeridos para el cálculo de la aceleración del M.R.U.A. que experimenta la pelota durante el golpe

PARÁMETRO	VALOR
TIEMPO ACELERACIÓN (t)	0,002 s
VELOCIDAD INICIAL PELOTA ( $v_0$ )	20,0 m/s

$$v_f = v_0 + a \cdot t \quad [43]$$

$$x_f = x_0 + v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 \quad [44]$$

De las dos expresiones anteriores, se emplea la Ecuación 43 para obtener el valor de la deceleración, y que da lugar a la fuerza que la bola ejerce sobre la pala durante el impacto.

$$|a| = \left| \frac{V_f - V_0}{t} \right| \quad [45]$$

$$|a| = \left| \frac{0,0 - 20,0}{0,002} \right| \quad [46]$$

$$|a| = 10.000,0 \text{ m/s}^2 \quad [47]$$

En este momento, habiendo calculado en la Ec.47 el valor absoluto que toma la aceleración de la bola durante el golpe y, tomando el dato especificado anteriormente para la masa de la bola, es posible calcular, de forma aproximada, la fuerza real ejercida por la pelota sobre la superficie de la pala. (ver Ec.48, Ec.49 y Ec.50)

$$\vec{F}_{EE} = m_{\text{pelota}} \cdot \vec{a}_{\text{pelota}} \quad [48]$$

$$\vec{F}_{EE} = 5,94 \cdot 10^{-2} \cdot 10 \cdot 10^3 \quad [49]$$

$$\vec{F}_{EE} = 594,00 \text{ N} \quad [50]$$

**Tabla 14.** Resumen de los parámetros calculados que permiten caracterizar el Ensayo Estático Equivalente

PARÁMETRO	VALOR
DECELERACIÓN DE LA PELOTA (a)	10.000,0 m/s <sup>2</sup>
FUERZA ESTÁTICA EQUIVALENTE ( $\vec{F}_{EE}$ )	594,00 N

Así, una vez se ha obtenido la FEE y, conociendo el área de interacción entre la pelota y la pala, se puede calcular cuál es el nuevo valor que se debe introducir a la presión para reproducir los esfuerzos desarrollados por la pelota sobre la pala. (ver Ec.51, Ec.52 y Ec.53)

$$P_{EE} = \frac{\vec{F}_{EE}}{A_{\text{Deformada}_2}} \quad [51]$$

$$P_{EE} = \frac{594,00}{7,9023 \cdot 10^{-4}} \quad [52]$$

$$P_{EE} = 751.679,9 \text{ Pa} \quad [53]$$



#### 4.6. MODELADO DEL PROBLEMA AJUSTADO

Habiendo definido todos los parámetros necesarios para la caracterización definitiva de un modelo de referencia estático, tanto fuerza real de contacto como propiedades físicas y mecánicas de los materiales ajustadas, se procede a la introducción de dichos datos en el software ANSYS 18.2, a través del sub-menú “*Preprocessor*”.

Por un lado, las condiciones de contorno relativas a las restricciones de desplazamiento se mantienen sin alterar, así como la superficie de contacto modelada en el Apartado 3.4.

Por otro lado, sin necesidad de eliminar la malla ya definida, se varía el valor para la nueva presión que se debe aplicar (de acorde a la nueva fuerza calculada) y, se introducen los parámetros necesarios para la caracterización del nuevo material de relleno.

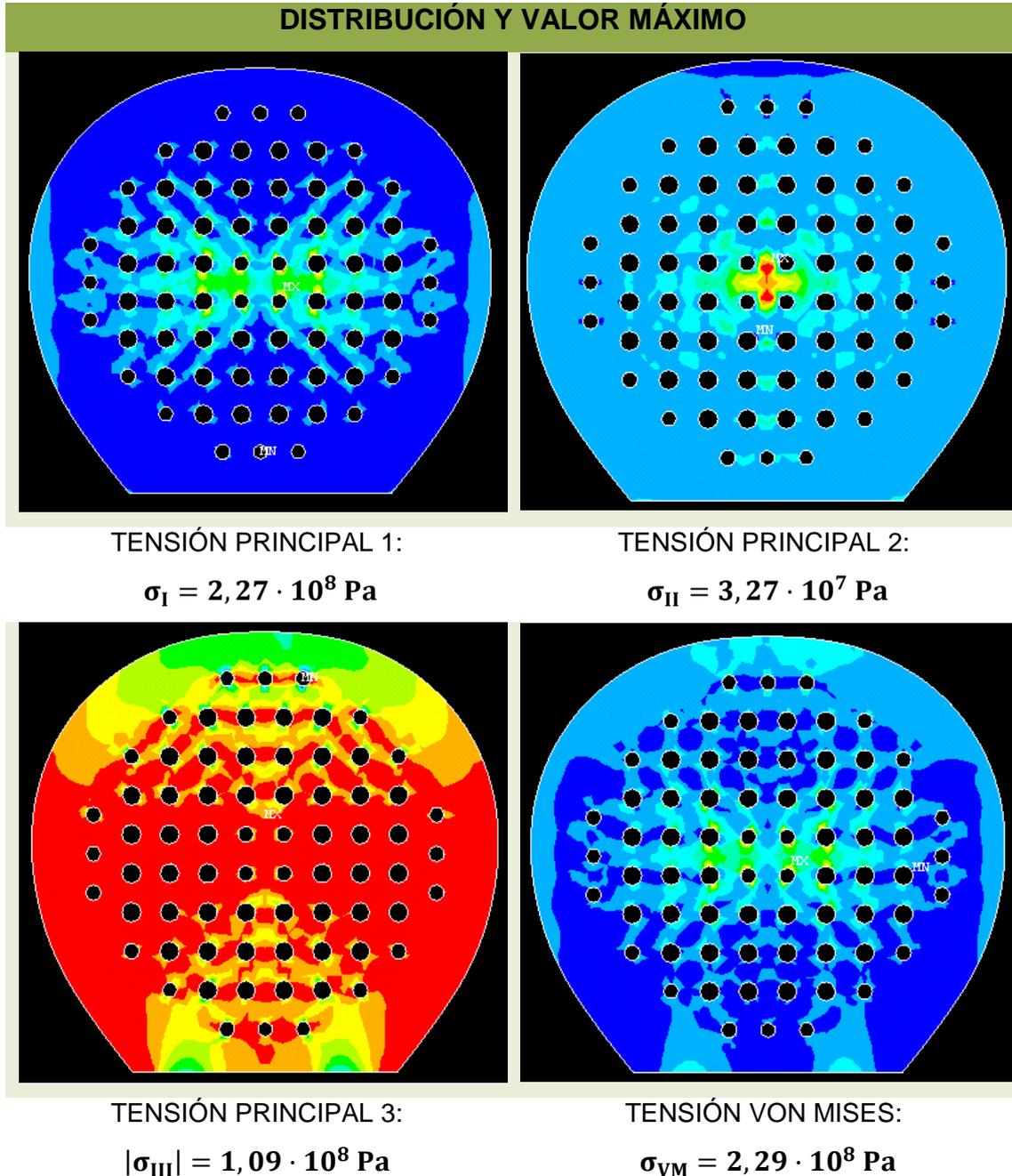
#### 4.7. RESULTADOS

Seguidamente se adjuntan los resultados gráficos que representan cómo se desarrolla la distribución de las sollicitaciones mecánicas en el modelo definitivo propuesto en la presente tesis.

## 4.7.1 SUPERFICIE DE IMPACTO FRONTAL

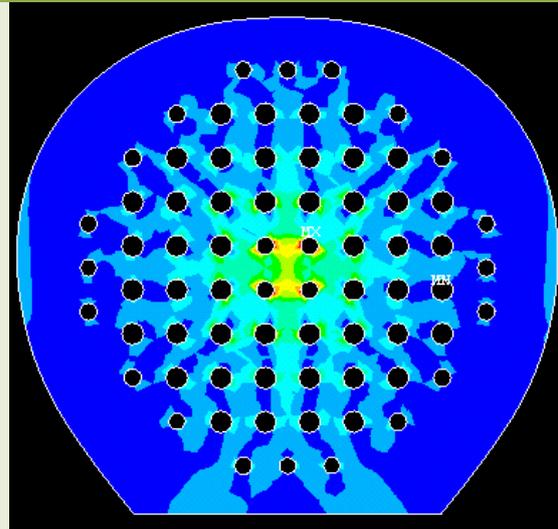
### 4.7.1.1 CAPA 1 DEL LAMINADO

- TENSIONES



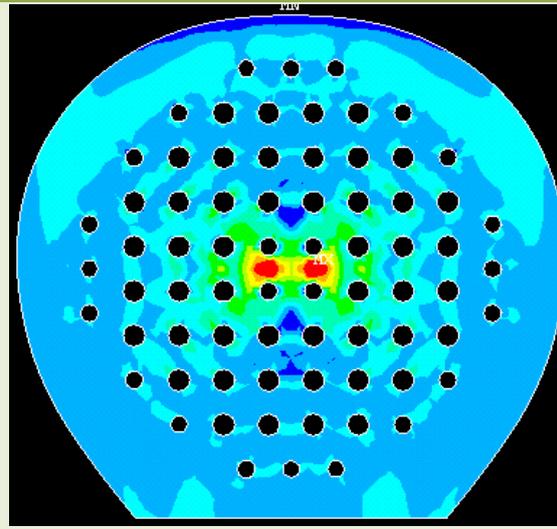
- **DEFORMACIONES**

**DISTRIBUCIÓN Y VALOR MÁXIMO**



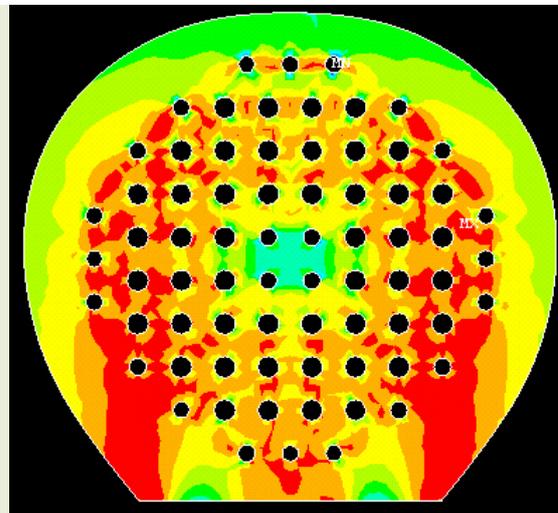
DEFORMACIÓN PRINCIPAL 1:

$$\varepsilon_I = 0,005647$$



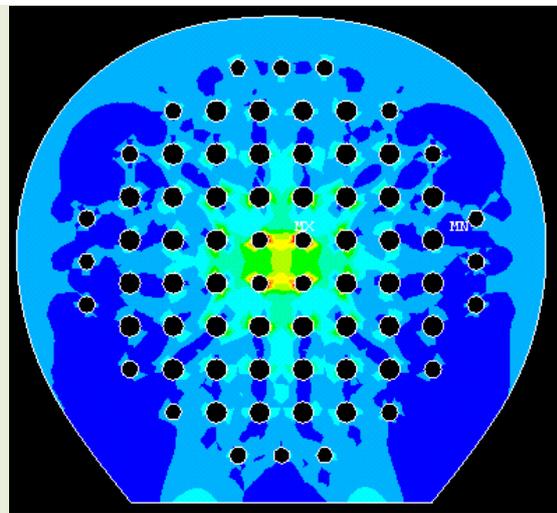
DEFORMACIÓN PRINCIPAL 2:

$$\varepsilon_{II} = 0,001987$$



DEFORMACIÓN PRINCIPAL 3:

$$|\varepsilon_{III}| = 0,002029$$



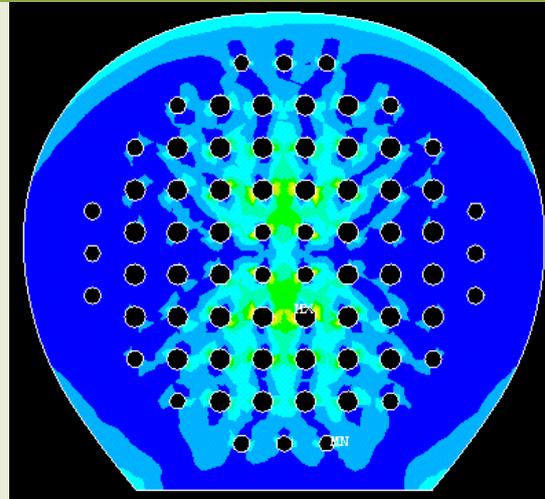
DEFORMACIÓN VON MISES:

$$\varepsilon_{VM} = 0,006301$$

#### 4.7.1.2 CAPA 2 DEL LAMINADO

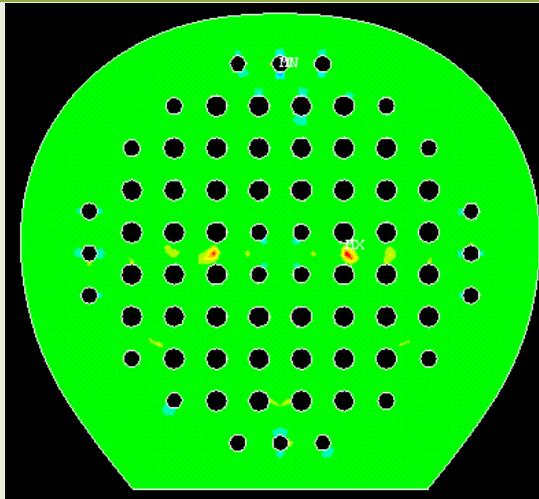
- TENSIONES

#### DISTRIBUCIÓN Y VALOR MÁXIMO



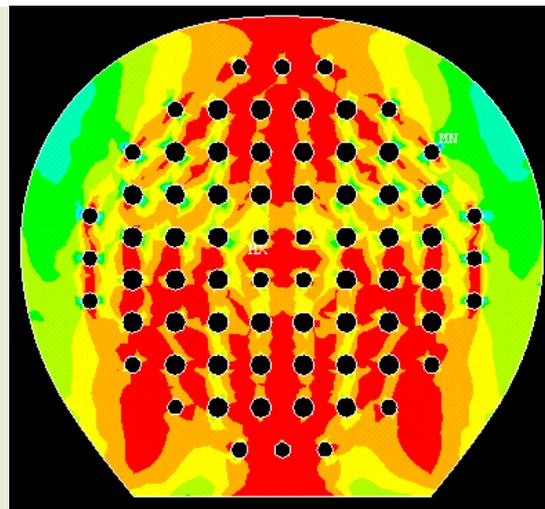
TENSIÓN PRINCIPAL 1:

$$\sigma_I = 2,37 \cdot 10^8 \text{ Pa}$$



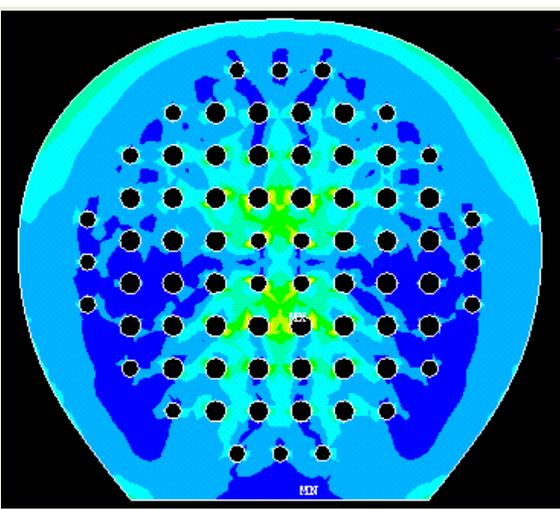
TENSIÓN PRINCIPAL 2:

$$\sigma_{II} = 1,52 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$



TENSIÓN PRINCIPAL 3:

$$|\sigma_{III}| = 9,18 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$

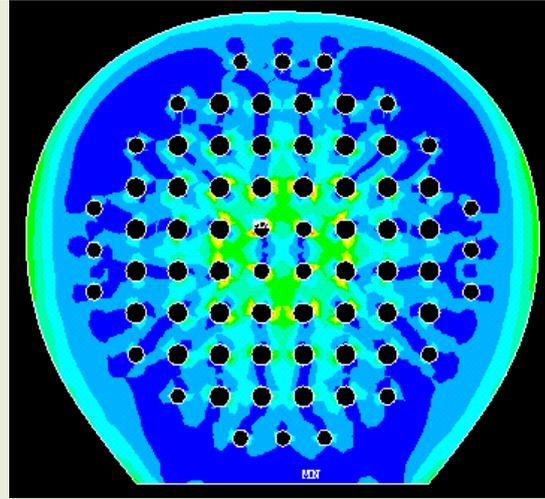


TENSIÓN VON MISES:

$$\sigma_{VM} = 2,35 \cdot 10^8 \text{ Pa}$$

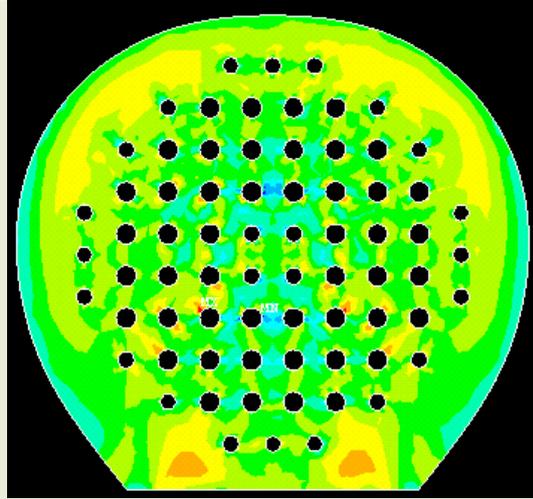
- **DEFORMACIONES**

**DISTRIBUCIÓN Y VALOR MÁXIMO**



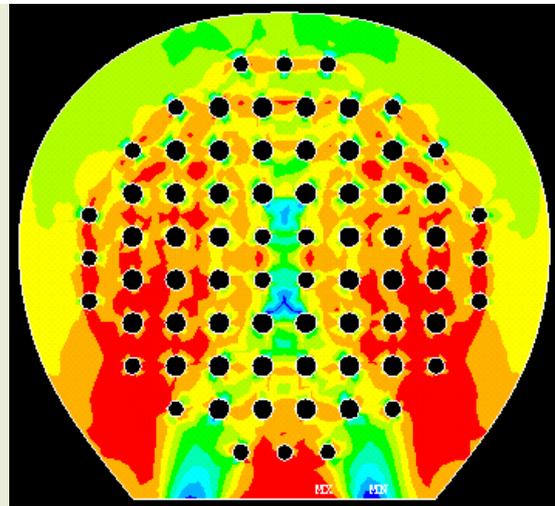
DEFORMACIÓN PRINCIPAL 1:

$$\epsilon_I = 0,004541$$



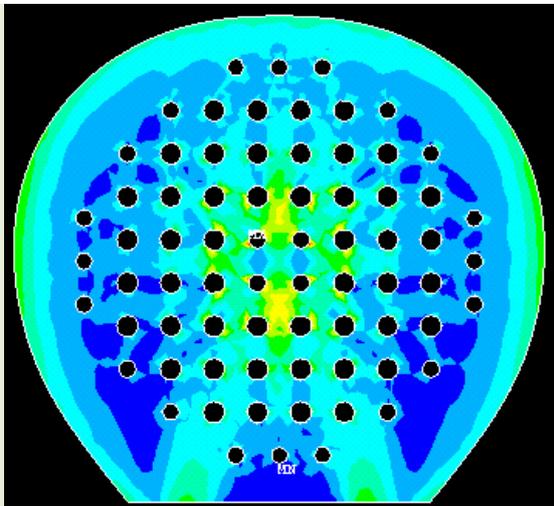
DEFORMACIÓN PRINCIPAL 2:

$$\epsilon_{II} = 0,000609$$



DEFORMACIÓN PRINCIPAL 3:

$$|\epsilon_{III}| = 0,002604$$



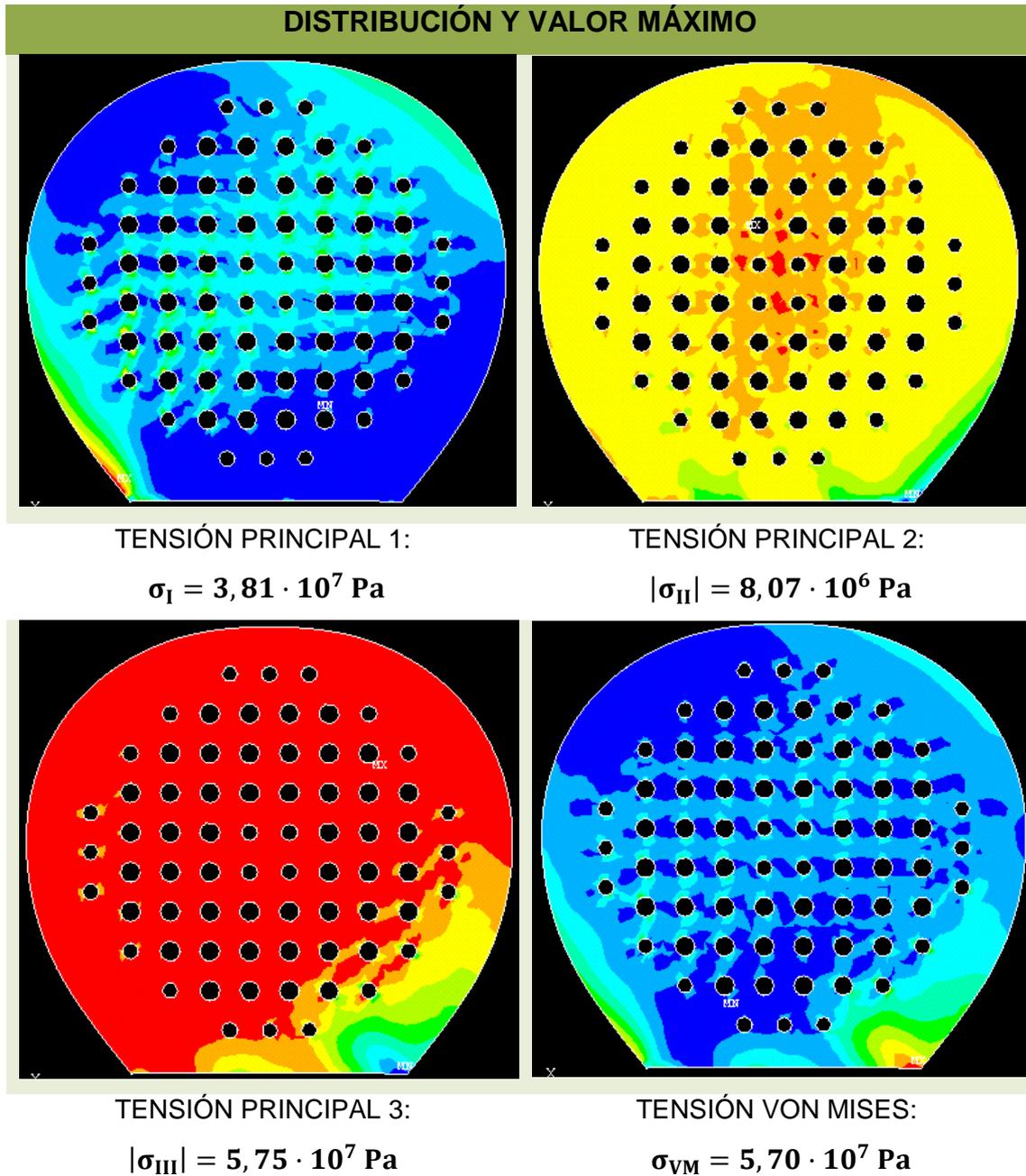
DEFORMACIÓN VON MISES:

$$\epsilon_{VM} = 0,005417$$

## 4.7.2 SUPERFICIE DE IMPACTO TRASERA

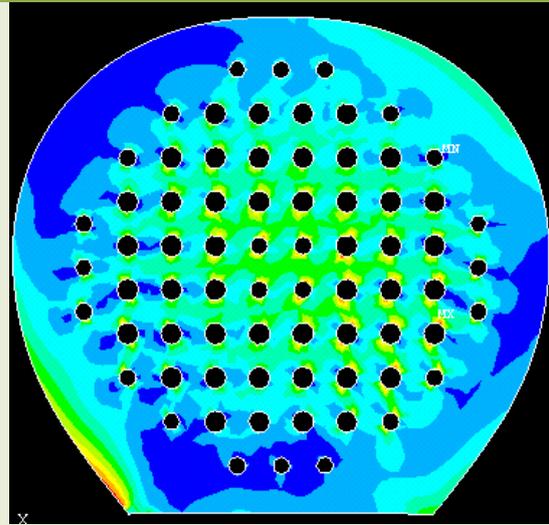
### 4.7.2.1 CAPA 1 DEL LAMINADO

- TENSIONES



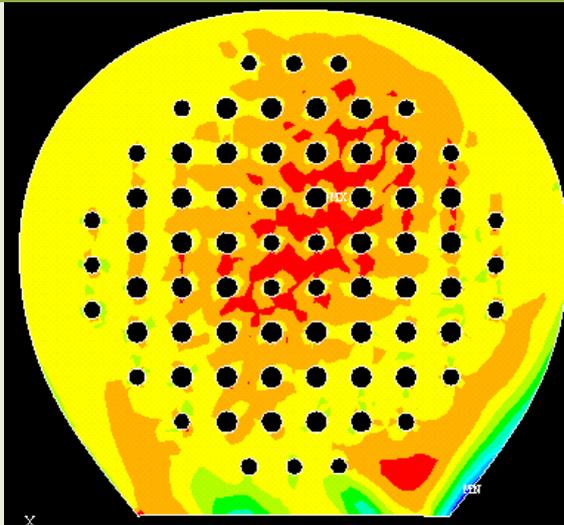
- **DEFORMACIONES**

**DISTRIBUCIÓN Y VALOR MÁXIMO**



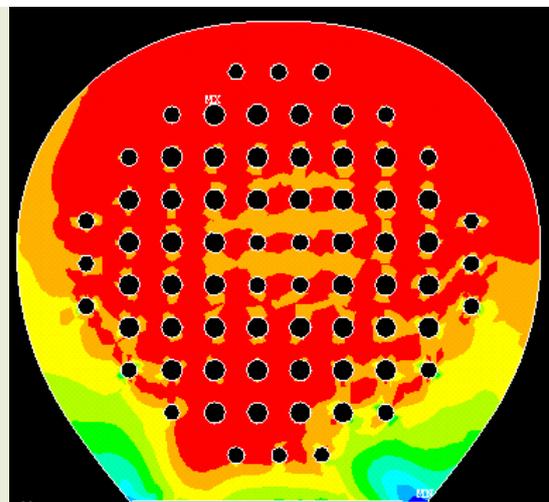
DEFORMACIÓN PRINCIPAL 1:

$$\epsilon_I = 0,000775$$



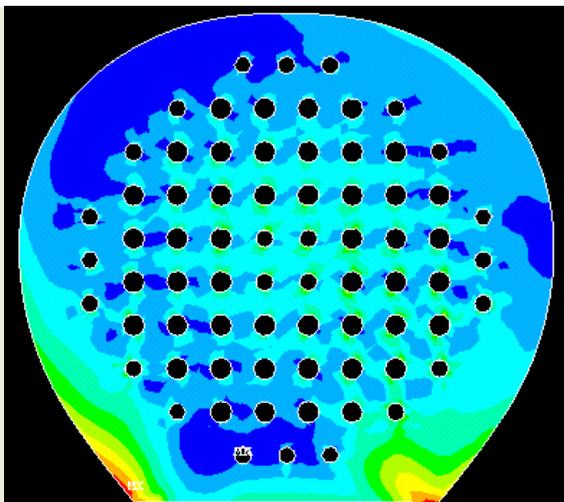
DEFORMACIÓN PRINCIPAL 2:

$$|\epsilon_{II}| = 0,000489$$



DEFORMACIÓN PRINCIPAL 3:

$$|\epsilon_{III}| = 0,001069$$



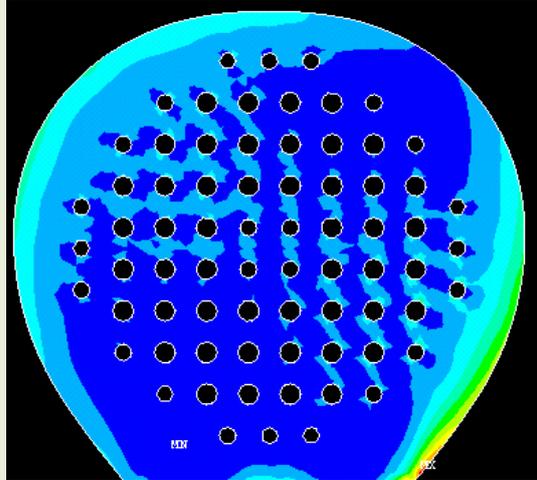
DEFORMACIÓN VON MISES:

$$\epsilon_{VM} = 0,001283$$

#### 4.7.2.2 CAPA 2 DEL LAMINADO

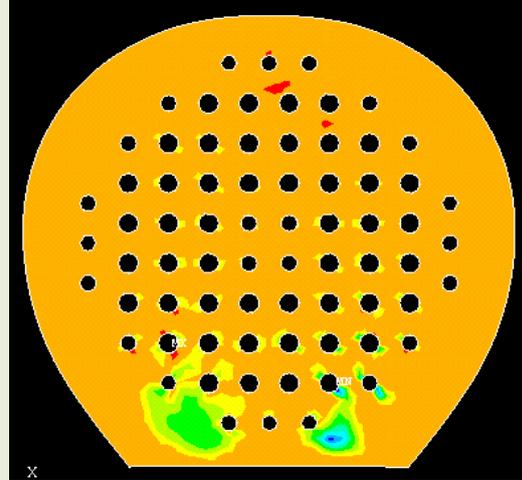
- TENSIONES

#### DISTRIBUCIÓN Y VALOR MÁXIMO



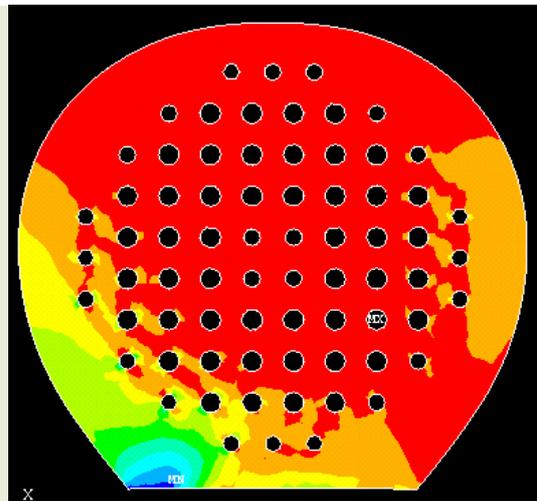
TENSIÓN PRINCIPAL 1:

$$\sigma_I = 5,71 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$



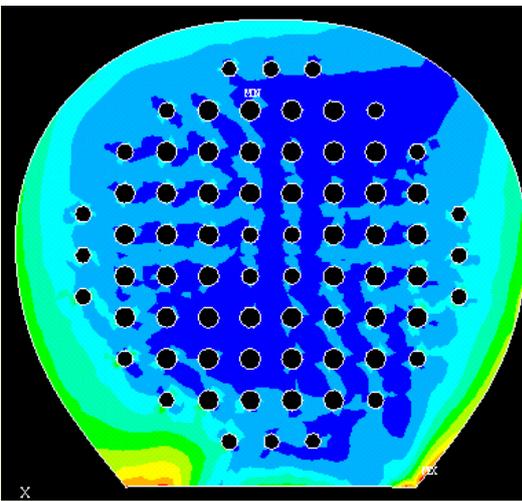
TENSIÓN PRINCIPAL 2:

$$\sigma_{II} = 6,09 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$



TENSIÓN PRINCIPAL 3:

$$|\sigma_{III}| = 6,15 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$

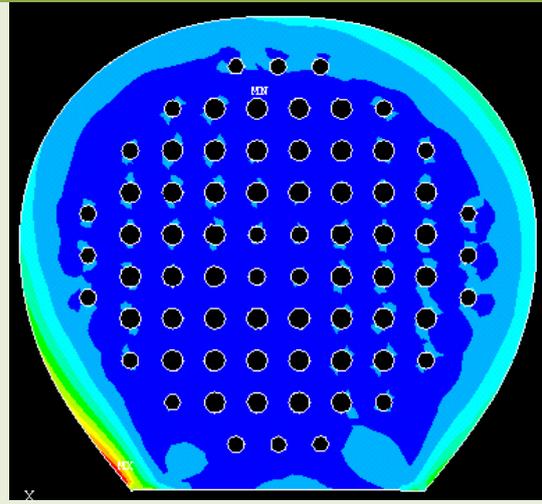


TENSIÓN VON MISES:

$$\sigma_{VM} = 5,92 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$

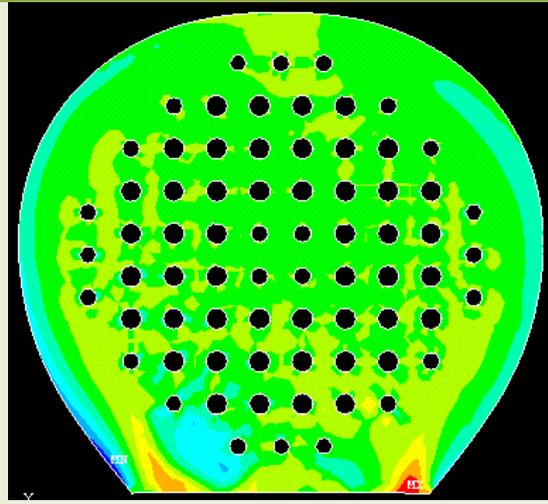
- **DEFORMACIONES**

**DISTRIBUCIÓN Y VALOR MÁXIMO**



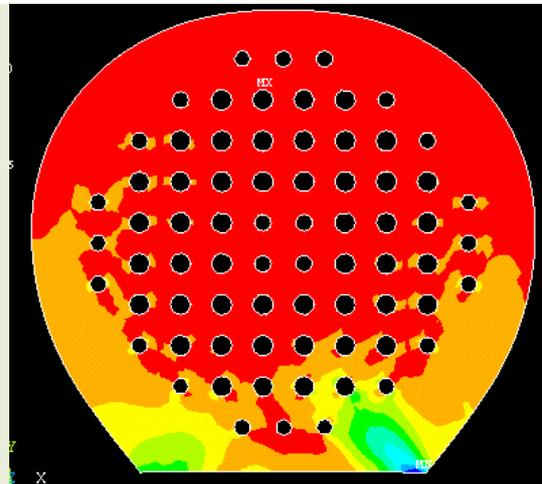
DEFORMACIÓN PRINCIPAL 1:

$$\epsilon_I = 0,002281$$



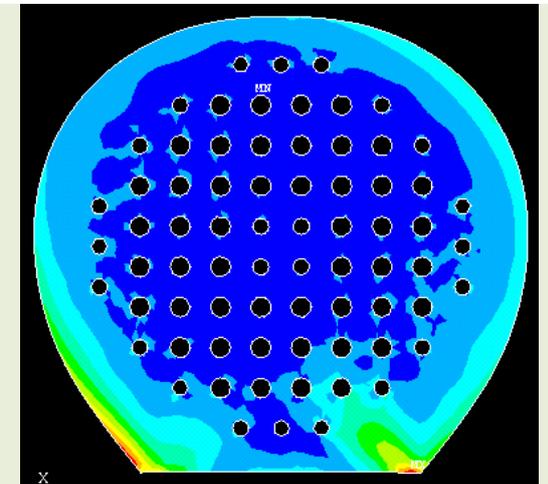
DEFORMACIÓN PRINCIPAL 2:

$$\epsilon_{II} = 0,000386$$



DEFORMACIÓN PRINCIPAL 3:

$$|\epsilon_{III}| = 0,002216$$



DEFORMACIÓN VON MISES:

$$\epsilon_{VM} = 1,64 \cdot 10^8 \text{ Pa}$$

## 5 CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

---

Las conclusiones que se desprenden tras un exhaustivo análisis de los resultados, relativos a cada uno de los ensayos planteados durante la realización de la tesis son:

1. Cuando se plantea la sustitución del análisis dinámico por un análisis estático equivalente se asume una ligera modificación en los valores resultantes, relativos a la distribución de las sollicitaciones mecánicas, en cada una de los distintos componentes que conforman el modelo total de la pala.

La razón reside en el hecho que durante la ejecución de un análisis dinámico se generan fenómenos ondulatorios transitorios en las superficies de impacto que interaccionan, en cada instante, con la fuerza ejercida por la pelota sobre la pala. Sin embargo, cuando dicho ensayo se reemplaza por un ensayo estático, la única carga a la cual se somete la pala viene dada por la presión modelada sobre la superficie de impacto equivalente. De este modo, durante la ejecución del análisis estático no se producen efectos de solapamiento entre distintas cargas y, por ello, la distribución de las sollicitaciones mecánicas en el modelo estático posee un patrón más uniforme.

2. El ahorro total en coste de cálculo computacional, necesario para la resolución del ensayo estático frente a su equivalente ensayo dinámico, supera el 2700%, pues el tamaño medio de los resultados generados durante ensayos dinámicos supera los 5 GB frente a los 181 MB que ocupan, de media, los archivos “.rst” que contienen los resultados generados durante las simulaciones estáticas.
3. Relativo a los valores pico para las sollicitaciones mecánicas que se generan en las superficies de impacto, es importante tomar dichos valores con cautela pues se encuentran condicionados por ligeras irregularidades en el mallado de los bordes de los orificios existentes en las caras de impacto de la pala.

Este factor adquiere mayor relevancia en la superficie de impacto frontal, frente a la superficie trasera, pues es la que absorbe la mayor cantidad de energía durante el contacto. Así mismo, en la superficie frontal la transmisión energética se produce sobre la zona perforada.

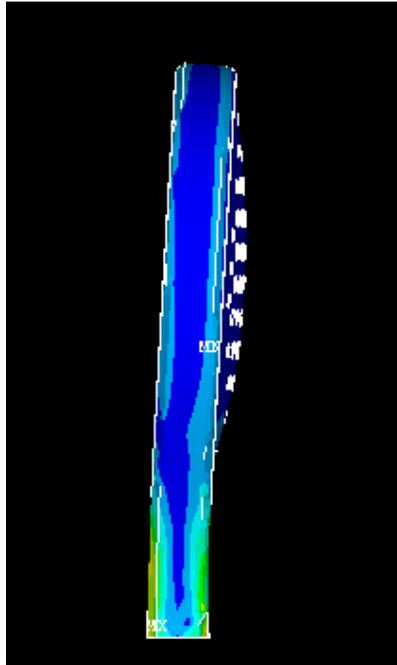
Contrariamente, en la superficie de impacto trasera, la cantidad de energía que se transmite es significativamente menor (este hecho es fácilmente observable en los valores pico para las sollicitaciones mecánicas en cada capa del laminado) y, en su gran mayoría, ésta es transmitida por la energía que absorbe el marco de la pala. Consecuentemente, si se analizan los resultados, se observa como en la superficie de impacto trasera, los valores máximos en las sollicitaciones mecánicas se desarrollan en las áreas próximas al borde de la superficie de impacto con el marco.

4. Para el modelo definido como referencia para futuros ensayos, la tensión principal 3 incrementa su valor pico, respecto a los modelos que poseen las propiedades iniciales para la Goma EVA, dado que ésta ha sido modelada con una rigidez menor.

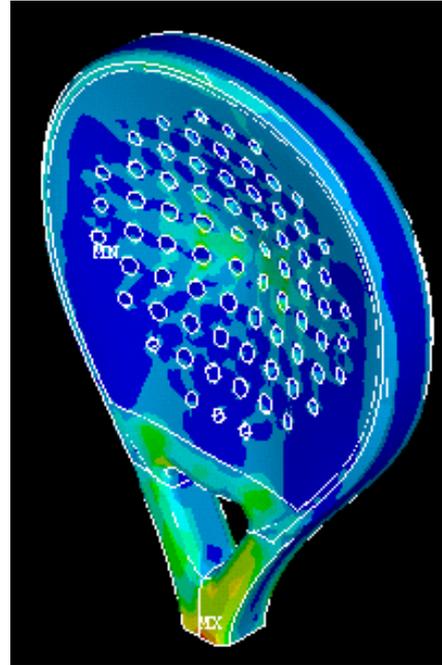
Este hecho da lugar a una mayor deformación del material del núcleo en el momento del impacto de la pelota sobre la pala. Consecuentemente, las deformaciones que experimentan los laminados con que se fabrican las superficies de impacto son, en la dirección principal 3, mayores en dicho modelo que frente a los modelos de ajuste del área de contacto (se realizaron todos con las propiedades iniciales de la Goma EVA).

5. El comportamiento mecánico global del modelo se mantiene invariante en el modelo ajustado frente al modelo de partida.

De este modo, si se observan la Ilustración 26 y la Ilustración 27, se puede comprobar como la pala experimenta una flexión en la zona superior del modelo cuya flecha se sitúa alrededor de los 5 mm, valores ciertamente similares a los obtenidos en el ensayo dinámico que se pretendía reproducir.



**Ilustración 26.** Flexión observada desde el perfil modelo



**Ilustración 27.** Vista isométrica que muestra el comportamiento mecánico general del modelo

6. En relación a los comentado en el Punto 3, en caso de disponer de una versión completa del software (que no posea limitación de nodos), se propone realizar un proceso de refinamiento de la malla usada para discretizar las áreas próximas a las zonas perforadas de las superficies de impacto.

De esta manera, se aproxima la malla a una forma geométrica circular, similar a la verdadera geometría de la pala y, con ello, se eliminan elementos cantedos que actúan como concentradores de tensiones y que, en consecuencia, generan alteraciones en los valores máximos para las sollicitaciones mecánicas.

Este es un factor profundamente relevante cuando se desea realizar un estudio a fatiga del modelo pues, un incremento en los valores máximos en las tensiones da lugar a una vida a fatiga corta y que, según lo expuesto puede no corresponderse con el verdadero comportamiento de la pala.

7. En relación a la función real del modelo generado, dado que su peso ya se adecúa a los estándares actuales de los modelos de palas que pueden encontrarse en el mercado, se propone (bajo la premisa expuesta en el punto 6):
- Ejecutar, inicialmente, un estudio de la vida a fatiga del modelo presentado como referencia en la presente tesis.
  - Modificar el material de relleno con el cual se fabrica el núcleo, cambiando el compuesto de Goma EVA por un material tipo FOAM y con ello, observar como varía el comportamiento mecánico de la pala y analizar si, como indican los estudios, el uso del FOAM implica una reducción en la vida a fatiga de la pala.
  - Variar el material de los laminados, sustituyendo la fibra de vidrio por fibra de carbono. De esta manera, se puede analizar la reducción de peso supone emplear la fibra de carbono en lugar de fibra de vidrio y, a su vez, analizar el incremento de rigidez que implica el uso de la fibra de carbono.
  - Modificar el número de capas de laminados o su orientación en los distintos sub-componentes que conforman el modelo y, con ello, estudiar la manera en que varía el comportamiento mecánico del modelo.

En relación a futuras vías de investigación y desarrollo a las que abre las puertas el trabajo desarrollado en la presente tesis, encontramos:

1. Ejecutar el mismo análisis con distintas velocidades iniciales para la pelota con el objetivo de afinar el procedimiento de análisis estático.
2. Obtención de una curva que proporcione el tamaño de la huella de contacto que se establece entre la superficie de impacto y la pelota en función de la velocidad inicial que posea esta última al inicio del proceso.
3. Realizar un análisis a fatiga, en función de los materiales empleados para la fabricación de cada uno de los componentes que dan lugar a la pala.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

---

- I. Courel Ibáñez, J.; Sánchez-Alcaraz Martín, B.; García Benítez, S.; Echegaray, M. (2017). “Evolución del pádel en España en función del género y edad de los practicantes”. [En Línea]. CCD (Cultura, Ciencia y Deporte). Disponible en: <http://dx.doi.org/10.12800/ccd.v12i34.830> [Consultado el 4 de agosto de 2018].
- II. The Editors of Encyclopaedia Britannica. (21 de enero de 2018). “Platform Tennis”. [En Línea]. Encyclopaedia Britannica. Disponible en: <https://www.britannica.com/sports/platform-tennis> [Consultado el 4 de agosto de 2018].
- III. “About Platform Tennis”. [En Línea]. APTA (American Padel Tennis Association). Disponible en: [http://www.platformtennis.org/about\\_us/about\\_platform\\_tennis.htm](http://www.platformtennis.org/about_us/about_platform_tennis.htm) [Consultado el 7 de agosto de 2018].
- IV. “Correspondencia entre Unidades”. [En Línea]. CENAM (Centro Nacional de Metrología). Disponible en: [http://www.cenam.mx/CNM-MMM-PT-003.aspx#Tabla\\_13i\\_Longitud](http://www.cenam.mx/CNM-MMM-PT-003.aspx#Tabla_13i_Longitud) [Consultado el 7 de agosto de 2018]
- V. Sánchez-Alcaraz Martínez, Bernardino Javier. (10 de abril de 2013). “Historia del Pádel”. [En Línea]. Disponible en: [https://www.upo.es/revistas/index.php/materiales\\_historia\\_deporte/article/viewFile/800/652](https://www.upo.es/revistas/index.php/materiales_historia_deporte/article/viewFile/800/652) [Consultado el 13 de agosto de 2018].
- VI. “Ranking Masculino”. [En Línea]. WPT (World Padel Tour). Disponible en: <https://www.worldpadeltour.com/jugadores/?ranking=masculino> [Consultado el 13 de agosto de 2018].
- VII. De Marco, Juan Carlos; Nicastro, Óscar; Patti, Daniel. (agosto de 2017). “La Historia del Paddle (Pádel)”. [En Línea]. FIP (Federación Internacional de Pádel). Disponible en: [http://www.padelfip.com/wp-content/uploads/2017/08/2017\\_Historia-del-Padel\\_foto.pdf](http://www.padelfip.com/wp-content/uploads/2017/08/2017_Historia-del-Padel_foto.pdf) [Consultado el 14 de agosto de 2018].
- VIII. (1 de enero de 2017). “Reglamento de Juego del Pádel”. [En Línea]. FIP (Federación Internacional de Pádel). Disponible en: <file:///C:/Users/asus%20pc/Downloads/reglamento-de-juego-fip-2018.pdf> [Consultado el 14 de agosto de 2018].

- IX. Nebot Valls, Julián (2018). (30 de mayo de 2018). “Simulación Dinámica de una Pala de Pádel”. [En Línea]. UPV (Universitat Politècnica de València). Disponible en: <http://hdl.handle.net/10251/102872> [Consultado el 02 de agosto de 2018].
- X. (5 de octubre de 2011). “Estatutos de la Federación Española de Pádel”. [En Línea]. Disposición 15.668 del BOE núm. 240 de 2011. [Consultado el 03 de mayo de 2019].
- XI. Martín, Raúl D. “Consejos para comprar tu pala de pádel”. [En Línea]. Disponible en: <https://padelstar.es/palas-de-padel/comprar-pala-de-padel-consejos/> [Consultado el 14 de mayo de 2019].
- XII. Martín, Raúl D. “Guía para la compra de una pala de pádel”. [En línea]. Disponible en: <https://padelstar.es/wp-content/uploads/2014/08/Guia-para-Comprar-Palas-de-padel-1.pdf> [Consultado el 14 de mayo de 2019].
- XIII. “Momento de Inercia de una distribución continua de masa”. [En Línea]. Disponible en: [http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/solido/din\\_rotacion/inercia/inercia.htm#Momento%20de%20inercia%20de%20una%20distribución%20continua%20de%20mas](http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/solido/din_rotacion/inercia/inercia.htm#Momento%20de%20inercia%20de%20una%20distribución%20continua%20de%20mas) [Consultado el 16 de mayo de 2019].
- XIV. “Centro de Masas y Momento de Inercia”. [En Línea]. Disponible en: <http://www.elrincondelingeniero.com/centro-de-masas-e-inercia/> [Consultado el 16 de mayo de 2019].
- XV. García Díez, Sergio. (octubre de 2011) “Fibras y materiales de refuerzo: los poliésteres reforzados aplicados a la realización de piezas 3D”. [En Línea]. Disponible en: <http://www.ehu.eus/reviberpol/pdf/OCT11/garcia.pdf> [Consultado el 20 de mayo de 2019].
- XVI. Martín, Raúl D. “Materiales de una pala de pádel”. [En Línea]. Disponible en: <https://padelstar.es/videos-de-padel/materiales-de-las-palas-de-padel-video/#Material-del-NUCLEO-de-la-pala-de-padel> [Consultado el 20 de mayo de 2019].
- XVII. Pedro. “Tipos de fibra de carbono”. [En Línea]. Disponible en: <https://www.fibradecarbono.es/articulos/tipos-de-fibra-de-carbono/> [Consultado el 20 de mayo de 2019].
- XVIII. “Tecnología de los Plásticos”. [En Línea]. Disponible en: <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/12/fibra-de-vidrio.html> [Consultado el 23 de mayo de 2019].



- XIX. Pérez, Marco A.; Sánchez, Montserrat “Fundamentos de la mecánica de los materiales compuestos”. [En Línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/23648/200-663-1-PB.pdf> [Consultado el 28 de mayo de 2019].
- XX. Olascoaga Grijalba, Juan. “¿Conoces de qué material está compuesto tu pala de pádel?”. [En Línea]. Disponible en: <https://www.paddelea.com/articulos/2016/01/conoces-material-esta-hecha-pala-1924/> [Consultado el 29 de mayo de 2019].
- XXI. “Termoplástico”. [En Línea]. Disponible en: <https://www.arkiplus.com/termoplastico/> [Consultado el 31 de mayo de 2019].
- XXII. Pérez González, Antonio, Universitat Jaume I (UJI). “Coeficiente de Poisson” [En Línea]. Disponible en: [http://www.mecapedia.uji.es/coeficiente\\_de\\_Poisson.htm](http://www.mecapedia.uji.es/coeficiente_de_Poisson.htm) [Consultado el 31 de mayo de 2019].
- XXIII. Petr Vymlatil, [En Línea]. Disponible en: <https://www.eng-tips.com/viewthread.cfm?qid=443416> [Consultado el 17 de junio de 2019].

## 7 SIGLAS y ACRÓNIMOS

---

- I. APTA: *American Platform Tennis Association*. (Asociación Americana de *Platform Tennis*).
- II. EUA: Estados Unidos de América.
- III. SI: Sistema Internacional.
- IV. CENAM: Centro Nacional de Metrología.
- V. WPT: *World Padel Tour*. (Gira Mundial de Pádel).
- VI. FEP: Federación Española de Pádel.
- VII. FIP: Federación Internacional de Pádel.
- VIII. AJPP: Asociación de Jugadores Profesionales de Pádel.
- IX. FEA: *Finit Element Analysis*. (Análisis mediante el Método de los Elementos Finitos).
- X. UPV: *Universitat Politècnica de València*. (Universidad Politécnica de Valencia).
- XI. msnm: Metros Sobre el Nivel del Mar.
- XII. CSD: Consejo Superior de Deportes.
- XIII. SR: Sólido Rígido.
- XIV. FEE: Fuerza Estática Equivalente.
- XV. AEE: Análisis Estático Equivalente.
- XVI. MRUA: Movimiento Rectilíneo Uniformemente Acelerado.
- XVII. CDG: Centro de Gravedad.
- XVIII. HTT: *High Temperature Treatment*. (Tratamientos Térmicos de Alta Temperatura).
- XIX. ITT: *Intermediate Temperature Treatment*. (Tratamientos Térmicos de Temperatura Intermedia).
- XX. LS: *Load Step* (Casos de Carga).
- XXI. SC: Sistema de Coordenadas.

## 8 ANEXO

---

### 8.1. MACRO PARA LA SIMULACIÓN DINÁMICA DEL MODELO DE REFERENCIA PARA UNA VELOCIDAD INICIAL DE 20 m/s

**CASOINICIAL = 1**

**CASOFINAL = 4**

**POSY=**

**NTIEMPO = 0**

**/PREP7**

**\*VEC,MapForward,I,IMPORT,FULL,PALA\_1\_V20.full,FORWARD**

**\*vget,nodos,NODE,,nlist**

**\*get,NoNodos,node,0,count**

**/FINISH**

**/POST1**

**\*Get,eNum,elem,0,count**

**\*GET,NTIEMPO,ACTIVE,0,SET,NSET,LAST,CASOFINAL**

**\*DIM,POSY,ARRAY,NTIEMPO,6,1**

**\*DIM,VELOCIDADY,ARRAY,NoNodos,1**

**\*MSG,WARN, 'Numero total elementos:', NTIEMPO**

**%/&**

**%C %/&**



%/ &

%F %/ &

%/ &

NTIEMPO = 0

\*DO, ICASO, CASOINICIAL, CASOFINAL

\*GET, NSUBSTEPS, ACTIVE, 0, SET, NSET, LAST, ICASO

\*DO, ISTEP, 1, NSUBSTEPS-NTIEMPO

NTIEMPO = NTIEMPO + 1

SET, ICASO, ISTEP

\*GET, VTIEMPO, ACTIVE, 0, SET, TIME

POSY(NTIEMPO, 1) = VTIEMPO

ETABLE, DESPY, U, Y

SSUM

\*GET, sumaPOSY, SSUM, 0, ITEM, DESPY

sumaPOSY = sumaPOSY / eNum

POSY(NTIEMPO, 2) = sumaPOSY

\*vec, VelocidadTotal, D, import, RST, PALA\_1\_V20.rst, NTIEMPO, NTIEMPO, vsI

\*export, VelocidadTotal, apdI, Velocidad, 1, 1

\*DO, j, 1, NoNodos

NodGlob = nodos(j)

NodLoc = MapForward(NodGlob)

VELOCIDADY(j) = Velocidad(6\*(NodLoc-1)+3)



**\*ENDDO**

**\*vscfun,sumaVELOY,MEAN,VELOCIDADY**

**POSY(NTIEMPO,3) = sumaVELOY**

**ETABLE,VELOY,KENE**

**SSUM**

**\*GET,sumaVELOY,SSUM,0,ITEM,VELOY**

**POSY(NTIEMPO,4) = sumaVELOY**

**ETABLE,ENERGIA,SENE**

**SSUM**

**\*GET,sumaENERGIA,SSUM,0,ITEM,ENERGIA**

**POSY(NTIEMPO,5) = sumaENERGIA**

**FSUM**

**\*GET,FuerzaZ,FSUM,0,ITEM,FZ**

**POSY(NTIEMPO,6) = FuerzaZ**

**\*ENDDO**

**\*ENDDO**

**\*MWRITE,POSY,TPosVelEnerF.dat**

**(6(1X,F14.8))**

**POSY=**

**VELOCIDAD=**

**VelocidadY=**

**nodos=**

## 8.2. DATOS DEL FICHERO “TPosVelEnerF.txt”

Datos obtenidos al simular el modelo dinámico con una velocidad inicial para la pelota de 20,0 m/s.

**Tabla 15.** Parámetros obtenidos al ejecutar el ensayo dinámico para el comportamiento de la bola

PASO	TIEMPO (s)	POSICIÓN CDG PELOTA (m)	VELOCIDAD (m/s)	VELOCIDAD VALOR ABSOLUTO	FUERZA REACCIÓN PELOTA (N)	FUERZA REACCIÓN PELOTA (N)
1	0,99986875	0,01034983	0,00000000	0,00000000	-0,00000419	0,00000419
2	1,00000000	0,01034746	-20,00000000	20,00000000	-0,00000120	0,00000120
3	1,00002500	0,01034701	-19,94482112	19,94482112	-0,00000956	0,00000956
4	1,00005000	0,01034656	-19,92638691	19,92638691	-25,03216906	25,03216906
5	1,00006081	0,01034636	-19,90339212	19,90339212	-73,44109904	73,44109904
6	1,00006603	0,01034627	-19,88671314	19,88671314	-110,29373468	110,29373468
7	1,00007125	0,01034618	-19,86641646	19,86641646	-133,98105398	133,98105398
8	1,00007744	0,01034607	-19,83786481	19,83786481	-159,76774225	159,76774225
9	1,00008673	0,01034592	-19,78699127	19,78699127	-189,58686051	189,58686051
10	1,00009762	0,01034574	-19,72478253	19,72478253	-197,03511119	197,03511119
11	1,00010702	0,01034559	-19,67508279	19,67508279	-181,39928305	181,39928305
12	1,00011642	0,01034545	-19,62917166	19,62917166	-166,80379465	166,80379465
13	1,00013053	0,01034525	-19,56379070	19,56379070	-157,03218359	157,03218359
14	1,00015044	0,01034497	-19,47462459	19,47462459	-149,80137974	149,80137974
15	1,00017036	0,01034471	-19,38320051	19,38320051	-151,37992734	151,37992734
16	1,00018617	0,01034451	-19,30605516	19,30605516	-159,33207014	159,33207014
17	1,00020198	0,01034432	-19,22722483	19,22722483	-162,15879281	162,15879281
18	1,00021780	0,01034413	-19,14328169	19,14328169	-171,38357664	171,38357664
19	1,00023708	0,01034390	-19,03460681	19,03460681	-181,65034614	181,65034614
20	1,00024800	0,01034378	-18,97143280	18,97143280	-185,80937236	185,80937236
21	1,00025893	0,01034366	-18,90454631	18,90454631	-195,06785315	195,06785315
22	1,00027532	0,01034349	-18,79954349	18,79954349	-200,43897388	200,43897388
23	1,00029347	0,01034328	-18,68348284	18,68348284	-197,26531683	197,26531683
24	1,00031161	0,01034305	-18,56650742	18,56650742	-199,71066128	199,71066128
25	1,00033400	0,01034278	-18,42336510	18,42336510	-198,45194790	198,45194790
26	1,00035639	0,01034247	-18,27990770	18,27990770	-196,32954257	196,32954257
27	1,00037115	0,01034223	-18,18234654	18,18234654	-200,99886191	200,99886191
28	1,00038591	0,01034195	-18,08443189	18,08443189	-201,65170660	201,65170660
29	1,00040805	0,01034146	-17,93128492	17,93128492	-210,26874677	210,26874677
30	1,00043445	0,01034077	-17,71556938	17,71556938	-250,80503626	250,80503626
31	1,00045179	0,01034028	-17,55760650	17,55760650	-281,09964487	281,09964487
32	1,00046913	0,01033975	-17,40649211	17,40649211	-266,26022403	266,26022403
33	1,00049335	0,01033896	-17,21259959	17,21259959	-240,08424925	240,08424925
34	1,00051452	0,01033820	-17,04897590	17,04897590	-228,11713346	228,11713346
35	1,00053570	0,01033737	-16,87929939	16,87929939	-236,48076123	236,48076123

36	1,00056281	0,01033617	-16,64181715	16,64181715	-262,09804821	262,09804821
37	1,00057637	0,01033552	-16,51468830	16,51468830	-283,75202245	283,75202245
38	1,00058992	0,01033484	-16,38421485	16,38421485	-292,01280290	292,01280290
39	1,00061026	0,01033376	-16,18254295	16,18254295	-299,16871161	299,16871161
40	1,00063421	0,01033238	-15,94112319	15,94112319	-304,19035043	304,19035043
41	1,00065817	0,01033093	-15,70193867	15,70193867	-303,41612058	303,41612058
42	1,00068213	0,01032944	-15,46389740	15,46389740	-303,65055219	303,65055219
43	1,00071263	0,01032743	-15,15891380	15,15891380	-307,58600157	307,58600157
44	1,00073551	0,01032585	-14,93313616	14,93313616	-305,92383009	305,92383009
45	1,00075839	0,01032423	-14,70650616	14,70650616	-308,15520995	308,15520995
46	1,00077424	0,01032311	-14,54488910	14,54488910	-316,25930354	316,25930354
47	1,00079009	0,01032200	-14,38054346	14,38054346	-321,45224628	321,45224628
48	1,00081387	0,01032032	-14,12867944	14,12867944	-327,97484125	327,97484125
49	1,00083765	0,01031863	-13,87191122	13,87191122	-334,95173298	334,95173298
50	1,00085475	0,01031739	-13,68282988	13,68282988	-344,09802273	344,09802273
51	1,00086618	0,01031655	-13,55352948	13,55352948	-352,42660917	352,42660917
52	1,00087761	0,01031570	-13,42350954	13,42350954	-355,06945751	355,06945751
53	1,00089475	0,01031442	-13,22444228	13,22444228	-362,85839207	362,85839207
54	1,00091391	0,01031296	-12,99627556	12,99627556	-371,04835286	371,04835286
55	1,00093895	0,01031104	-12,69737639	12,69737639	-370,09778351	370,09778351
56	1,00097651	0,01030817	-12,26144002	12,26144002	-359,16748504	359,16748504
57	1,00100000	0,01030643	-11,99887235	11,99887235	-348,05523898	348,05523898
58	1,00102500	0,01030467	-11,72538021	11,72538021	-343,23999912	343,23999912
59	1,00105000	0,01030301	-11,45435931	11,45435931	-342,19431781	342,19431781
60	1,00108750	0,01030077	-11,04510742	11,04510742	-345,40058005	345,40058005
61	1,00111369	0,01029939	-10,75325899	10,75325899	-351,34427681	351,34427681
62	1,00113988	0,01029817	-10,45089953	10,45089953	-361,88831327	361,88831327
63	1,00117917	0,01029662	-9,96598993	9,96598993	-384,66691886	384,66691886
64	1,00120863	0,01029569	-9,58320884	9,58320884	-403,77885722	403,77885722
65	1,00123810	0,01029494	-9,19702423	9,19702423	-406,87540106	406,87540106
66	1,00128230	0,01029413	-8,61092965	8,61092965	-411,01255682	411,01255682
67	1,00131545	0,01029374	-8,16867884	8,16867884	-413,60395985	413,60395985
68	1,00134859	0,01029351	-7,73541202	7,73541202	-407,33836936	407,33836936
69	1,00139832	0,01029342	-7,11131569	7,11131569	-393,91681933	393,91681933
70	1,00143561	0,01029350	-6,65313486	6,65313486	-386,80281413	386,80281413
71	1,00147290	0,01029371	-6,18503977	6,18503977	-394,40662524	394,40662524
72	1,00152884	0,01029421	-5,46134375	5,46134375	-405,19037309	405,19037309
73	1,00161275	0,01029541	-4,35396948	4,35396948	-412,15409492	412,15409492
74	1,00167568	0,01029664	-3,52816544	3,52816544	-410,02338414	410,02338414
75	1,00173861	0,01029798	-2,72027910	2,72027910	-402,50422514	402,50422514
76	1,00183300	0,01029973	-1,54287411	1,54287411	-390,07132177	390,07132177
77	1,00190380	0,01030057	-0,67324765	0,67324765	-381,92519079	381,92519079
78	1,00197459	0,01030087	0,21252131	0,21252131	-388,71145906	388,71145906
79	1,00208079	0,01030031	1,54438557	1,54438557	-390,91311415	390,91311415
80	1,00216043	0,01029918	2,51046475	2,51046475	-379,64314191	379,64314191

81	1,00224008	0,01029749	3,43760076	3,43760076	-364,87526897	364,87526897
82	1,00229981	0,01029590	4,11081345	4,11081345	-353,40257489	353,40257489
83	1,00235955	0,01029408	4,76552219	4,76552219	-343,65700115	343,65700115
84	1,00244915	0,01029099	5,69117925	5,69117925	-323,82832243	323,82832243
85	1,00251635	0,01028850	6,32491528	6,32491528	-295,81203934	295,81203934
86	1,00258355	0,01028597	6,90705969	6,90705969	-271,22109325	271,22109325
87	1,00263395	0,01028410	7,31579605	7,31579605	-253,47538153	253,47538153
88	1,00268435	0,01028229	7,70178310	7,70178310	-239,76662747	239,76662747
89	1,00275995	0,01027977	8,25377362	8,25377362	-228,37784717	228,37784717
90	1,00281666	0,01027804	8,65605897	8,65605897	-222,18786908	222,18786908
91	1,00287336	0,01027650	9,04588306	9,04588306	-216,74113141	216,74113141
92	1,00295841	0,01027452	9,59523932	9,59523932	-203,22732176	203,22732176
93	1,00302220	0,01027331	9,97815982	9,97815982	-186,38552293	186,38552293
94	1,00308599	0,01027232	10,33406456	10,33406456	-171,48910069	171,48910069
95	1,00313383	0,01027174	10,57976076	10,57976076	-157,06861909	157,06861909
96	1,00318167	0,01027126	10,80405800	10,80405800	-142,89552840	142,89552840
97	1,00325343	0,01027072	11,10836994	11,10836994	-128,43960847	128,43960847
98	1,00332519	0,01027037	11,39405438	11,39405438	-119,76931020	119,76931020
99	1,00335210	0,01027030	11,50026755	11,50026755	-118,45903078	118,45903078
100	1,00337901	0,01027030	11,60704130	11,60704130	-119,03767417	119,03767417
101	1,00340593	0,01027036	11,70893129	11,70893129	-113,01387397	113,01387397
102	1,00344629	0,01027050	11,85252940	11,85252940	-106,52271897	106,52271897
103	1,00350684	0,01027065	12,05881279	12,05881279	-103,16039399	103,16039399
104	1,00355225	0,01027072	12,19958326	12,19958326	-94,65825598	94,65825598
105	1,00359767	0,01027074	12,32076189	12,32076189	-81,34485333	81,34485333
106	1,00366578	0,01027065	12,46388918	12,46388918	-63,39539586	63,39539586
107	1,00371687	0,01027048	12,54609422	12,54609422	-48,04205890	48,04205890
108	1,00376796	0,01027021	12,61211665	12,61211665	-38,41595941	38,41595941
109	1,00384459	0,01026965	12,69332723	12,69332723	-31,98979794	31,98979794
110	1,00390207	0,01026910	12,74927732	12,74927732	-30,33582641	30,33582641
111	1,00395954	0,01026847	12,80043209	12,80043209	-28,41656969	28,41656969
112	1,00404575	0,01026738	12,84837006	12,84837006	-17,99855902	17,99855902
113	1,00411041	0,01026647	12,86236653	12,86236653	-7,44106113	7,44106113
114	1,00417507	0,01026546	12,86535015	12,86535015	-2,51063711	2,51063711
115	1,00427206	0,01026381	12,85993337	12,85993337	-0,03737320	0,03737320
116	1,00434480	0,01026245	12,85410171	12,85410171	-0,00000316	0,00000316
117	1,00441754	0,01026102	12,84771808	12,84771808	-0,00000597	0,00000597
118	1,00452665	0,01025880	12,83877371	12,83877371	0,00000054	0,00000054
119	1,00469032	0,01025527	12,82870028	12,82870028	-0,00000311	0,00000311
120	1,00493582	0,01024899	12,82146218	12,82146218	-0,00000450	0,00000450
121	1,00511995	0,01024324	12,82107684	12,82107684	-0,00001324	0,00001324
122	1,00530408	0,01023683	12,82388955	12,82388955	-0,00000553	0,00000553
123	1,00558027	0,01022752	12,83072218	12,83072218	0,00000133	0,00000133
124	1,00599455	0,01021682	12,83867880	12,83867880	0,00000077	0,00000077
125	1,00649455	0,01020790	12,83921122	12,83921122	0,00000363	0,00000363



<b>126</b>	1,00699455	0,01019820	12,83403311	12,83403311	0,00000037	0,00000037
<b>127</b>	1,00749455	0,01018512	12,83055185	12,83055185	-0,00000184	0,00000184
<b>128</b>	1,00800000	0,01017096	12,83155951	12,83155951	-0,00000029	0,00000029



### 8.3. DISTRIBUCIÓN DE TENSIONES Y DEFORMACIONES PARA LAS DISTINTAS CAPAS DEL LAMINADO

En el presente apartado se adjuntan las imágenes que muestran la manera en que se distribuyen las tensiones (principales y de Von Mises) y las deformaciones principales, así como la deformación asociada a la tensión de Von Mises, para cada una de las capas del laminado, usado en el proceso de modelado de las superficies de impacto de la pala<sup>15</sup>.

Las ilustraciones se corresponden con los datos obtenidos durante la ejecución del ensayo dinámico para una velocidad inicial de la pelota de 20 m/s.

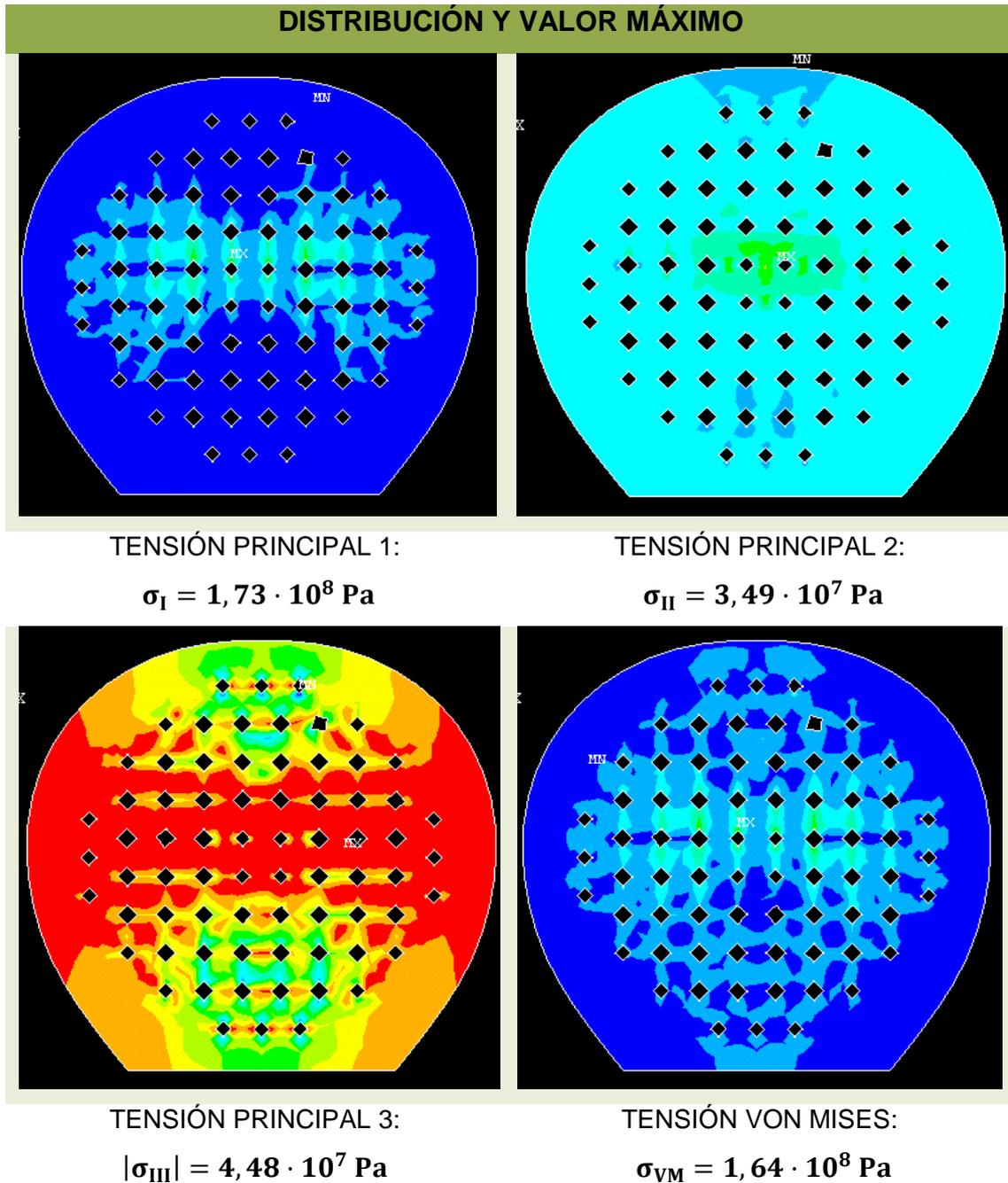
---

<sup>15</sup> Se emplea una página entera bien para las tensiones bien para las deformaciones de cada una de las capas que conforman el laminado de cada una de las dos superficies de impacto. De este modo, los resultados se pueden observar de forma más nítida, no habiendo de voltear las páginas para verificar resultados relacionados.

### 8.3.1 SUPERFICIE DE IMPACTO DELANTERA

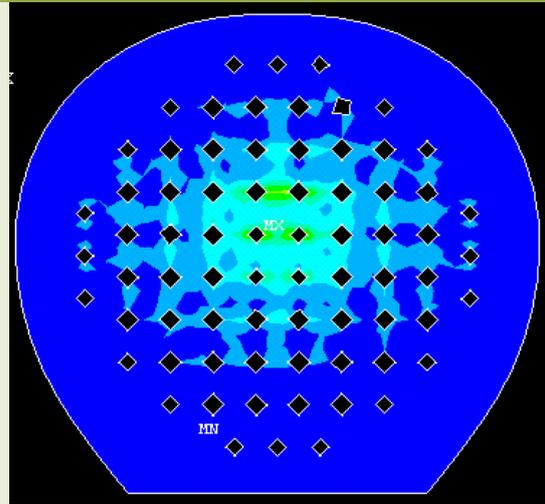
#### 8.3.1.1 CAPA 1 DEL LAMINADO

- TENSIONES



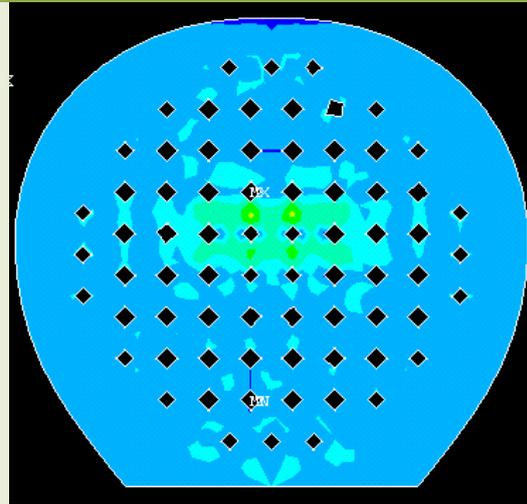
- **DEFORMACIONES**

**DISTRIBUCIÓN Y VALOR MÁXIMO**



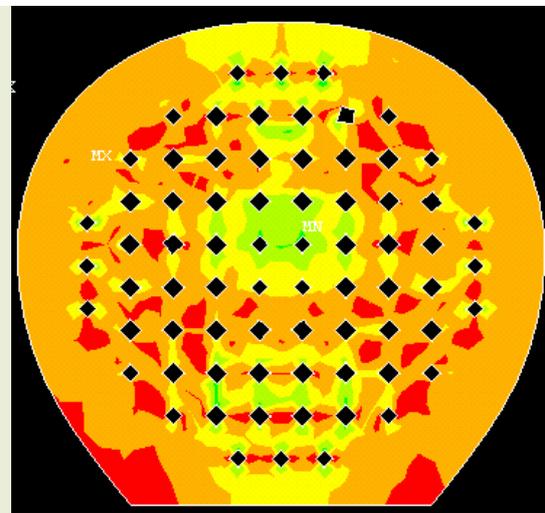
DEFORMACIÓN PRINCIPAL 1:

$$\epsilon_I = 0,004558$$



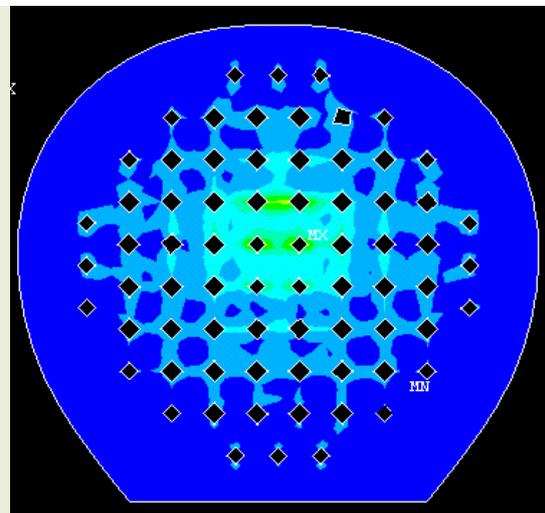
DEFORMACIÓN PRINCIPAL 2:

$$\epsilon_{II} = 0,002138$$



DEFORMACIÓN PRINCIPAL 3:

$$|\epsilon_{III}| = 0,001476$$



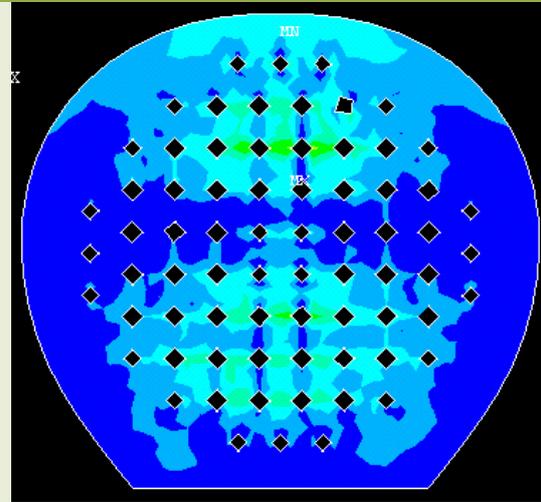
DEFORMACIÓN VON MISES:

$$\epsilon_{VM} = 0,005118$$

### 8.3.1.2 CAPA 2 DEL LAMINADO

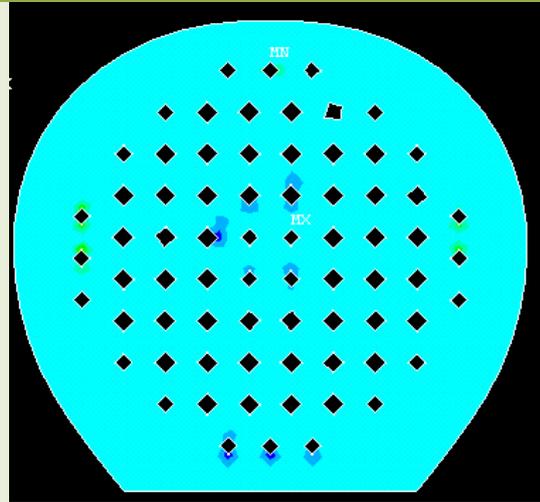
- TENSIONES

#### DISTRIBUCIÓN Y VALOR MÁXIMO



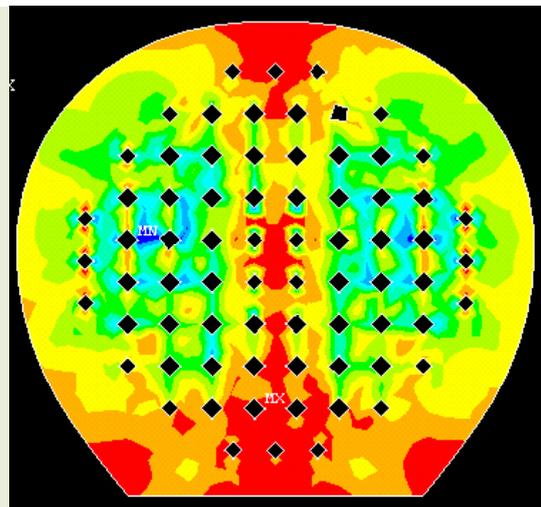
TENSIÓN PRINCIPAL 1:

$$\sigma_I = 1,43 \cdot 10^8 \text{ Pa}$$



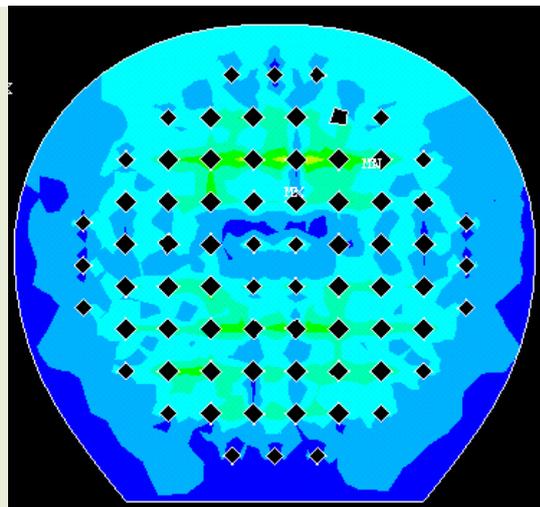
TENSIÓN PRINCIPAL 2:

$$\sigma_{II} = 1,41 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$



TENSIÓN PRINCIPAL 3:

$$|\sigma_{III}| = 4,67 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$

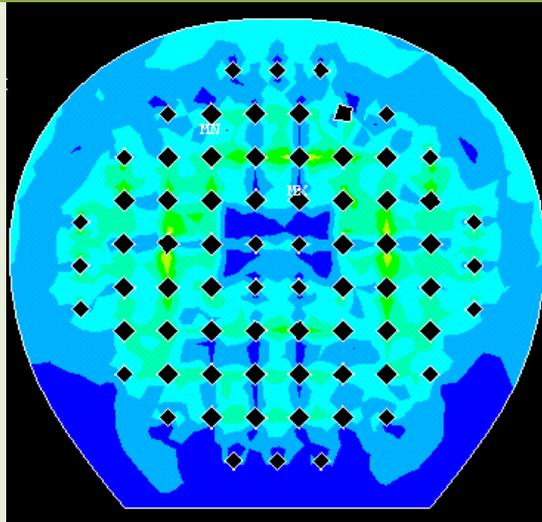


TENSIÓN VON MISES:

$$\sigma_{VM} = 1,41 \cdot 10^8 \text{ Pa}$$

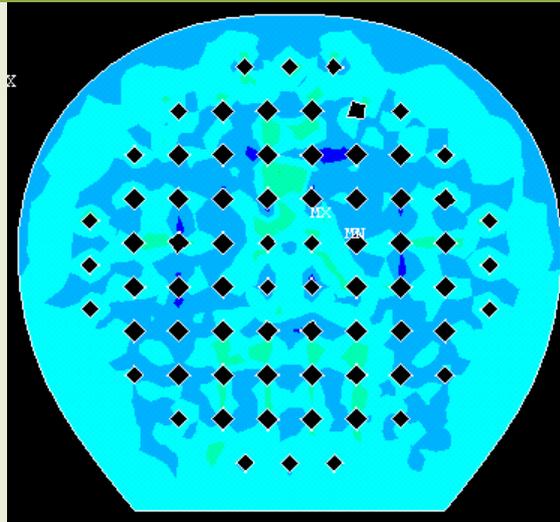
• DEFORMACIONES

DISTRIBUCIÓN Y VALOR MÁXIMO



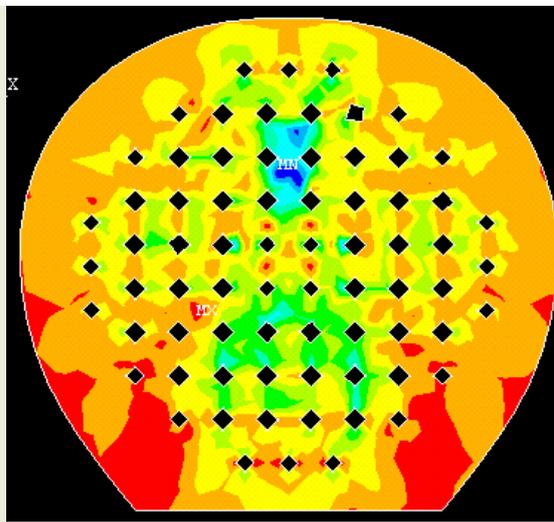
DEFORMACIÓN PRINCIPAL 1:

$$\epsilon_I = 0,002674$$



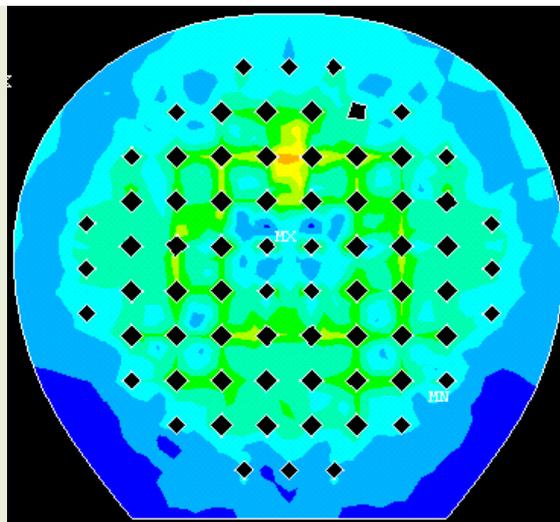
DEFORMACIÓN PRINCIPAL 2:

$$\epsilon_{II} = 0,001077$$



DEFORMACIÓN PRINCIPAL 3:

$$|\epsilon_{III}| = 0,001832$$



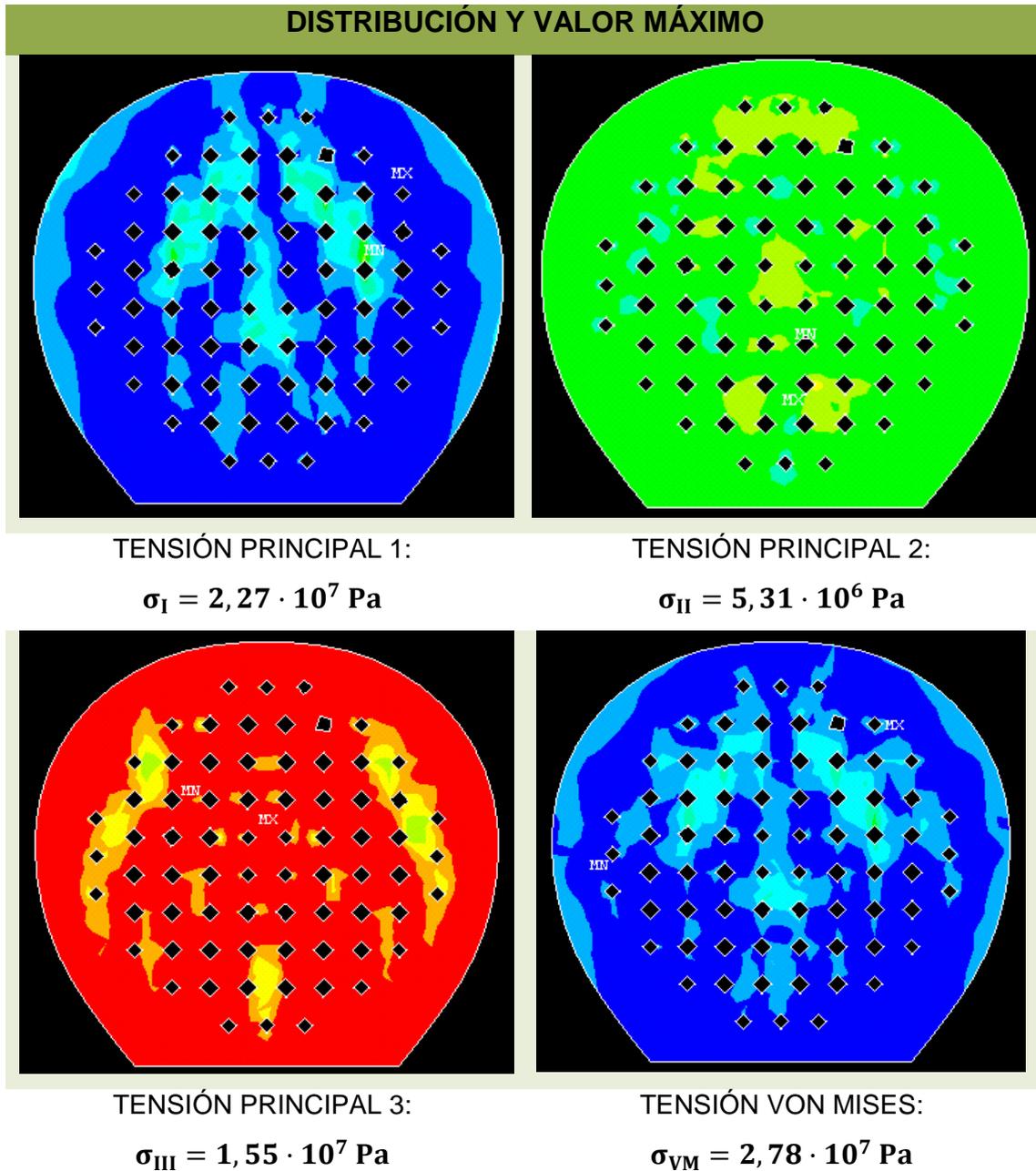
DEFORMACIÓN VON MISES:

$$\epsilon_{VM} = 0,003174$$

## 8.3.2 SUPERFICIE DE IMPACTO TRASERA

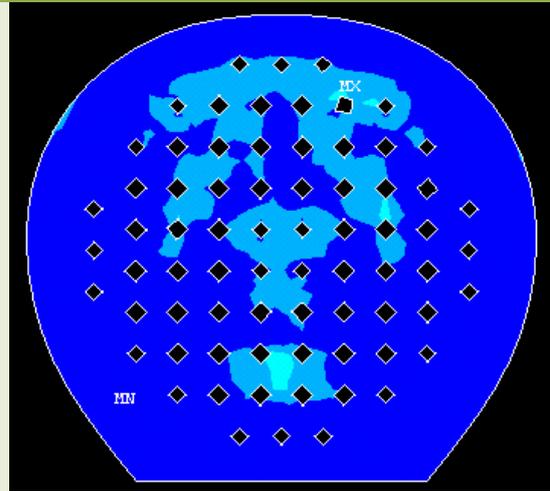
### 8.3.2.1 CAPA 1 DEL LAMINADO

- TENSIONES



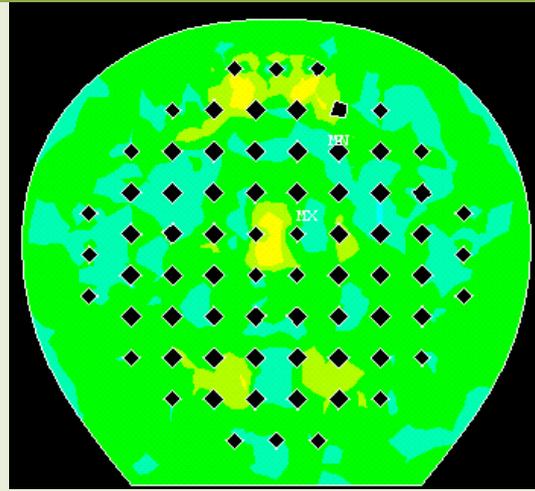
- **DEFORMACIONES**

**DISTRIBUCIÓN Y VALOR MÁXIMO**



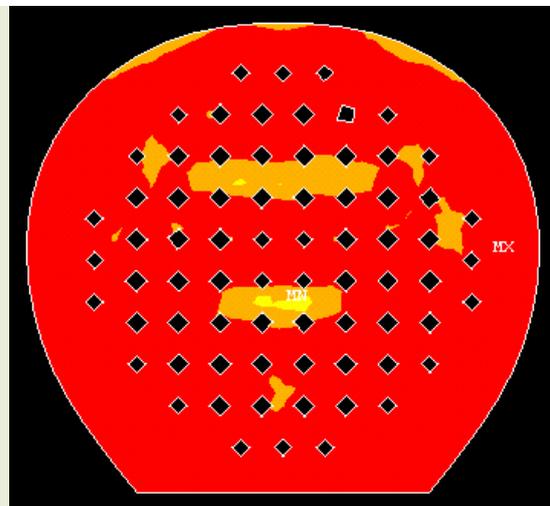
DEFORMACIÓN PRINCIPAL 1:

$$\epsilon_I = 0,000910$$



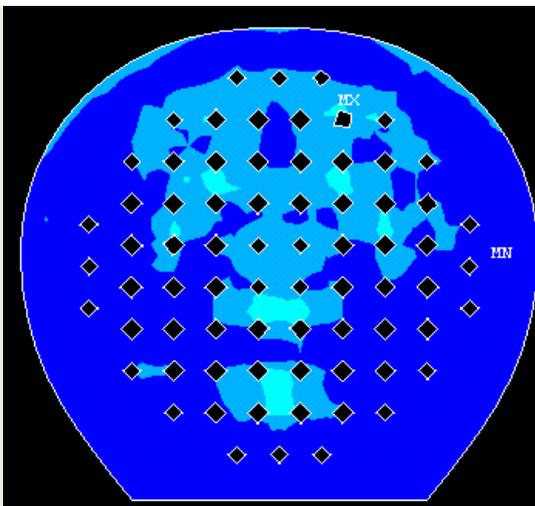
DEFORMACIÓN PRINCIPAL 2:

$$\epsilon_{II} = 0,000195$$



DEFORMACIÓN PRINCIPAL 3:

$$|\epsilon_{III}| = 0,000800$$



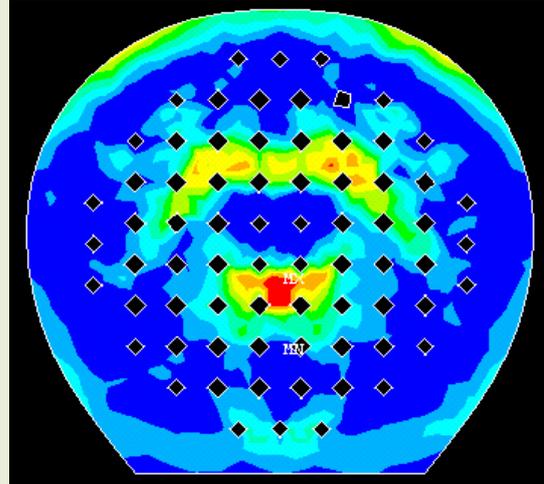
DEFORMACIÓN VON MISES:

$$\epsilon_{VM} = 0,001020$$

### 8.3.2.2 CAPA 2 DEL LAMINADO

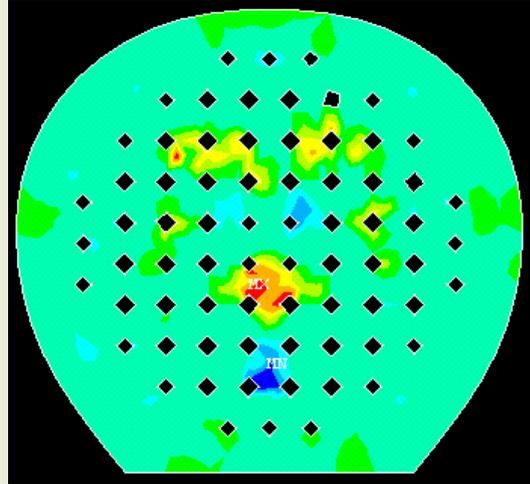
- TENSIONES

#### DISTRIBUCIÓN Y VALOR MÁXIMO



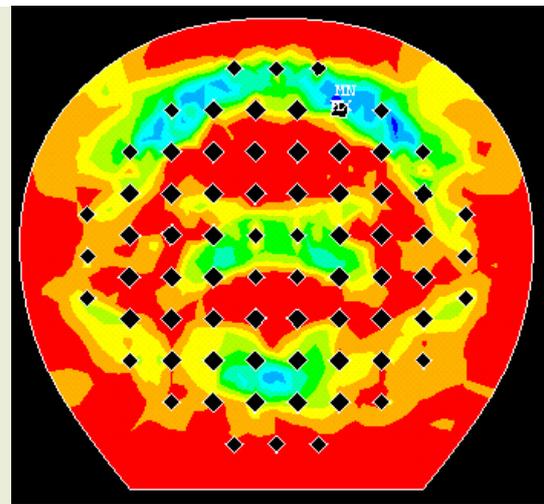
TENSIÓN PRINCIPAL 1:

$$\sigma_I = 2,31 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$



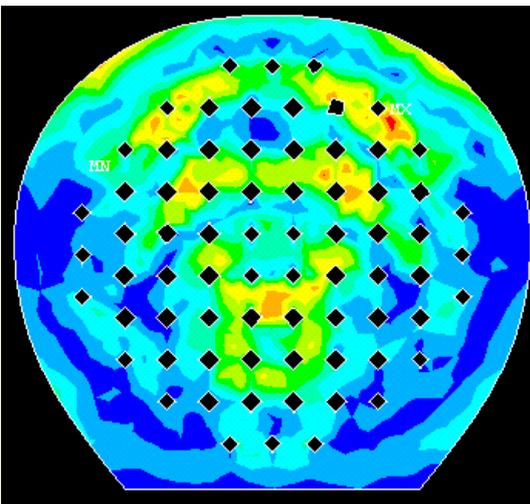
TENSIÓN PRINCIPAL 2:

$$\sigma_{II} = 4,17 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$



TENSIÓN PRINCIPAL 3:

$$|\sigma_{III}| = 2,09 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$

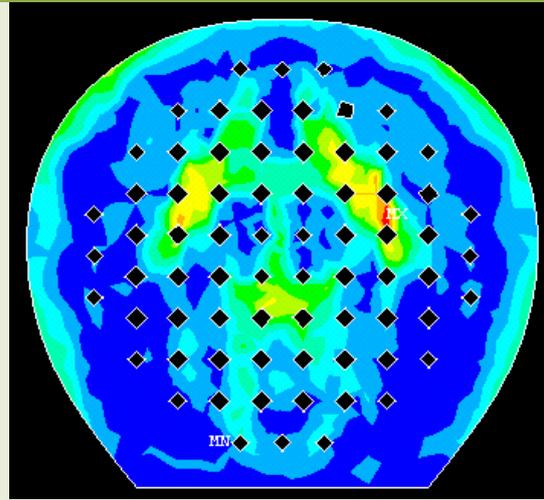


TENSIÓN VON MISES:

$$\sigma_{VM} = 2,53 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$

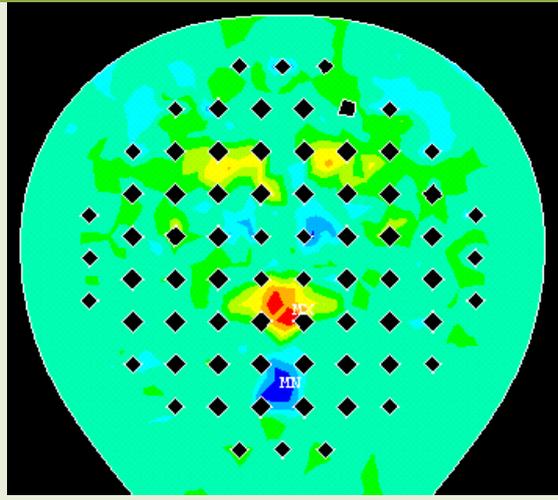
- **DEFORMACIONES**

**DISTRIBUCIÓN Y VALOR MÁXIMO**



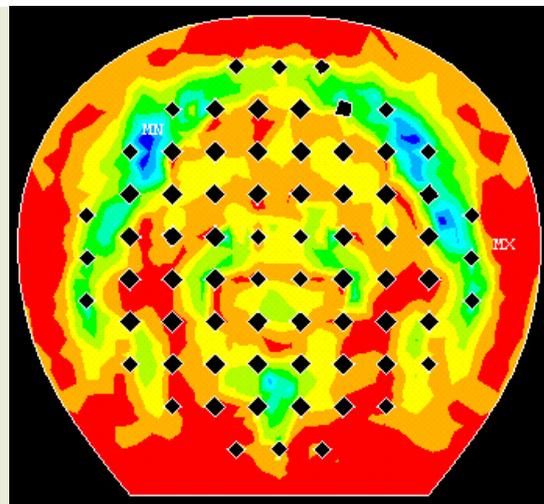
DEFORMACIÓN PRINCIPAL 1:

$$\varepsilon_I = 0,000737$$



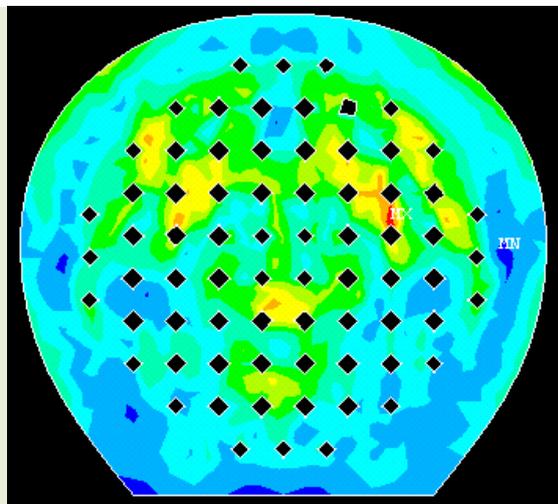
DEFORMACIÓN PRINCIPAL 2:

$$\varepsilon_{II} = 0,000378$$



DEFORMACIÓN PRINCIPAL 3:

$$|\varepsilon_{III}| = 0,000521$$



DEFORMACIÓN VON MISES:

$$\varepsilon_{VM} = 0,000834$$



## 8.4. MACRO PARA EL CÁLCULO DEL ÁREA DE CONTACTO

Teniendo en cuenta que los “*Element Type*” 8 y 9 se corresponden con los elementos “*TARGE170*” y “*CONTA174*”, respectivamente, la macro que permite hallar el área real de contacto entre la pala y la pelota en el momento en que la superficie de contacto es máxima<sup>16</sup> es:

```
ESEL,R,TYPE,,9
```

```
ETABLE,ESTAT,CONT,STAT !Almacena la información “Status” del contacto  
establecido
```

```
ESEL,S,ETAB,ESTAT,8,9 !Selecciona solamente los elementos que realmente  
están en contacto entre la pala y la pelota
```

```
ETABLE,C_AREA,VOLU
```

```
SSUM
```

```
*GET,T_AREA,SSUM,0,ITEM,C_AREA !Almacena toda la información en un  
parámetro
```

```
MY_AREA_1=T_AREA
```

---

<sup>16</sup> Dicho instante debe imponerse manualmente, según el procedimiento explicado en el Apartado 3.1.1. El tiempo es 1,00195 s.



## 8.5. MACRO DEL “LOAD STEP 1”

A continuación, se expone de modo resumido el contenido de la macro relativa al “Load Step 1”. Como se ha comentado durante el desarrollo de la memoria, en ella se introducen las restricciones de desplazamiento que fijan el modelo en el espacio.

**\_LSNUM=1 !Se especifica el Caso de Carga con el que corresponde la macro**

**ANTYPE,0 !Se especifica el tipo de análisis que se realiza (de tipo estático).**

**NLGEOM,1**

**KBC,1**

**TREF,298.150000**

**IRLF,0**

**BFUNIF,TEMP,\_TINY**

**ACEL,0.00000000,0.00000000,0.00000000**

**OMEGA,0.00000000,0.00000000,0.00000000**

**DOMEGA,0.00000000,0.00000000,0.00000000**

**CGLOC,0.00000000,0.00000000,0.00000000**

**CGOMEGA,0.00000000,0.00000000,0.00000000**

**DCGOMG,0.00000000,0.00000000,0.00000000**

**AUTOTS,ON**

**DELTIM,0.200000000,0.00000000,0.00000000**

**KUSE,0**

**TIME,1.00000000 !Se especifica el tiempo de inicio del análisis**



**ALPHAD,0.00000000**

**BETAD,0.00000000**

**DMPRAT,0.00000000**

**DMPSTR,0.00000000**

**CNVTOL,F,100000.000,5.000000000E-03,0,-1.00000000**

**CNVTOL,U,0.00000000,5.000000000E-03,2,0.00000000**

**CNVTOL,M,100.000000,5.000000000E-03,2,-1.00000000**

**CRPLIM,0.100000000,0**

**CRPLIM,0.00000000,1**

**NCNV,1,0.00000000,0,0.00000000,0.00000000**

**NEQIT, 0**

**PRED,OFF,,OFF**

**ERESX,DEFA**

**OUTRES,ALL,LAST,**

**D,138781,UZ,-1.000000000E-03,0.00000000** !Se especifica un micro-desplazamiento en dirección negativa de la componente “Z” para cada uno de los nodos que surgen al discretizar las superficies de impacto. De este modo, se dota al laminado de la tensión superficial necesaria para evitar errores de simulación.

**D,138790,UZ,-1.000000000E-03,0.00000000**



. !Se sigue el mismo esquema para el resto de nodos que surgen al discretizar la superficie de impacto

.

.

D,143667,UZ,-1.000000000E-03,0.00000000

D,168215,UX,0.00000000,0.00000000

D,168215,UY,0.00000000,0.00000000

D,168215,UZ,0.00000000,0.00000000

D,168215,ROTX,0.00000000,0.00000000

D,168215,ROTY,0.00000000,0.00000000

D,168215,ROTZ,0.00000000,0.00000000

. !Se sigue el mismo esquema con el resto de nodos que surge al discretizar las líneas donde se refleja la geometría del mango de la pala.

.

.

D,173966,UX,0.00000000,0.00000000

D,173966,UY,0.00000000,0.00000000

D,173966,UZ,0.00000000,0.00000000

D,173966,ROTX,0.00000000,0.00000000

D,173966,ROTY,0.00000000,0.00000000

D,173966,ROTZ,0.00000000,0.00000000

/GOPR



## 8.6. MACRO DEL “LOAD STEP 2”

En este apartado, se introduce a modo de resumen el contenido de la macro relativa al “Load Step 2”. En dicho Caso de Carga se define la presión que, aplicada sobre el área contacto equivalente, debe reproducir las sollicitaciones mecánicas a través de un AEE, tal como se observan al estudiar el ensayo dinámico.

**\_LSNUM=2 !Se especifica el Caso de Carga con el que corresponde la macro**

**ANTYPE, 0**

**NLGEOM,1**

**KBC,1**

**TREF,298.150000**

**IRLF,0**

**BFUNIF,TEMP,\_TINY**

**ACEL, 0.00000000,0.00000000,0.00000000**

**OMEGA, 0.00000000,0.00000000,0.00000000**

**DOMEGA,0.00000000,0.00000000,0.00000000**

**CGLOC,0.00000000,0.00000000,0.00000000**

**CGOMEGA,0.00000000,0.00000000,0.00000000**

**DCGOMG,0.00000000,0.00000000,0.00000000**

**AUTOTS,ON**

**DELTIM,0.10000000,0.00000000,0.00000000**

**KUSE,0**

**TIME,2.00000000**



**ALPHAD,0.00000000**

**BETAD,0.00000000**

**DMPRAT,0.00000000**

**DMPSTR,0.00000000**

**CNVTOL,F,100000.000,5.000000000E-03,0,-1.00000000**

**CNVTOL,U,0.00000000,5.000000000E-03,2,0.00000000**

**CNVTOL,M,100.000000,5.000000000E-03,2,-1.00000000**

**CRPLIM,0.100000000,0**

**CRPLIM,0.00000000,1**

**NCNV,1,0.00000000,0,0.00000000,0.00000000**

**NEQIT,0**

**PRED,OFF,,OFF**

**ERESX,DEFA**

**OUTRES,ALL,LAST,**

**SFE,1718,1,PRES,1,R5.0**

**-117310.000,-117310.000,-117310.000,-117310.000**

**SFE,1718,1,PRES,2,R5.0**



**0.00000000,0.00000000,0.00000000,0.00000000 !Se sigue un proceso análogo con el resto de nodos creados para discretizar la nueva superficie de impacto.**

•

•

•

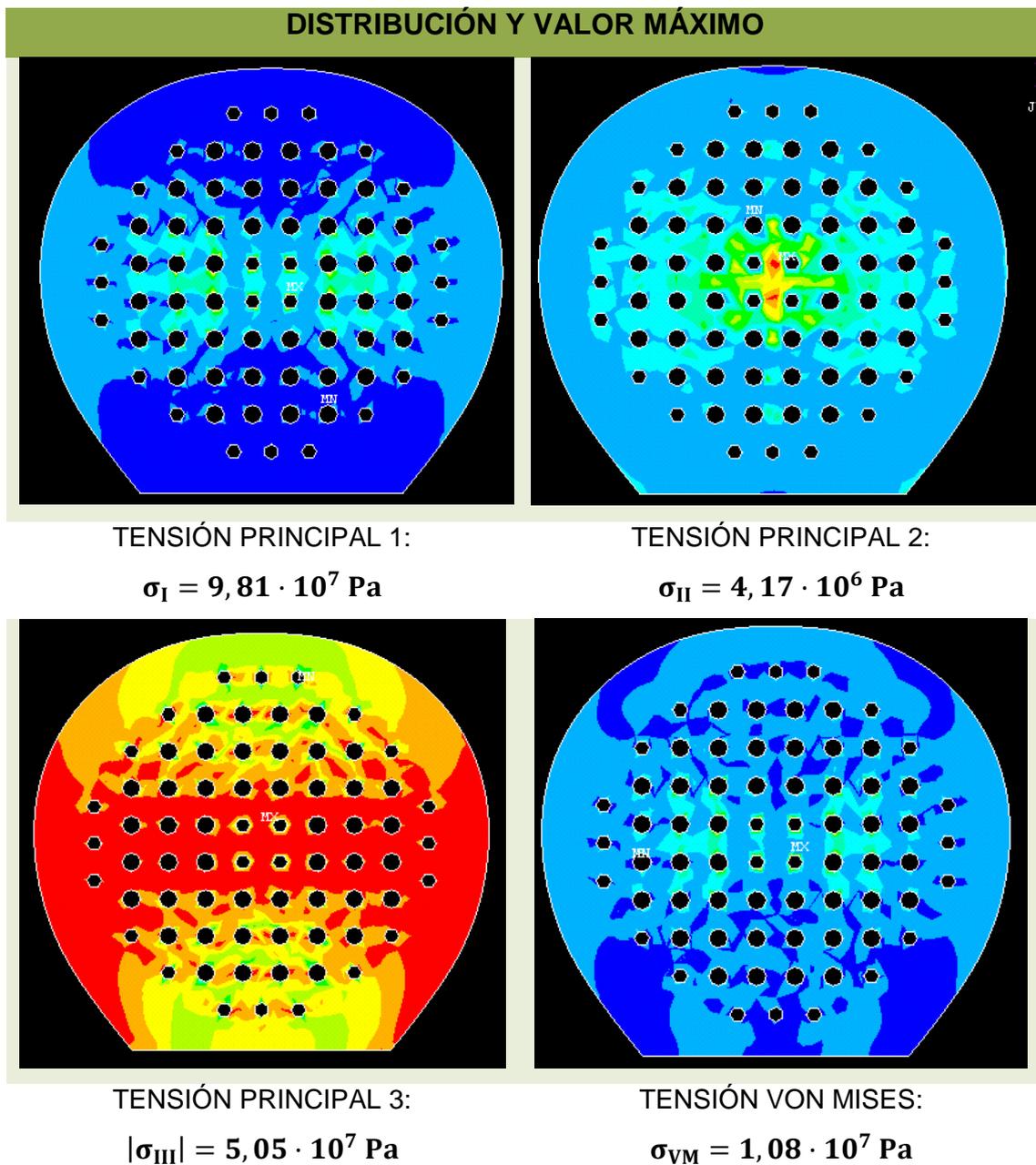
**/GOPR**

## 8.7. DISTRIBUCIÓN DE LAS SOLICITACIONES MECÁNICAS PARA EL AEE INICIAL

### 8.7.1 SUPERFICIE DE IMPACTO FRONTAL

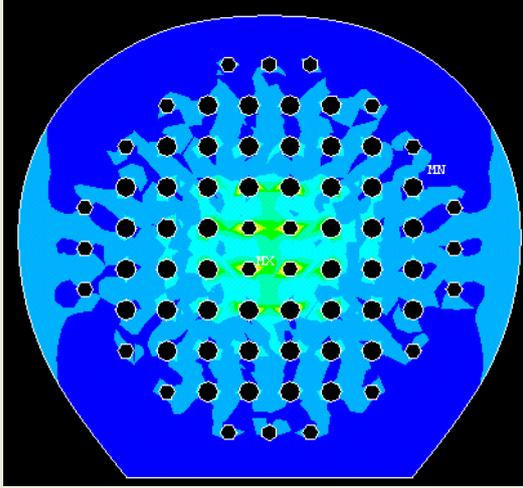
#### 8.7.1.1 CAPA 1 DEL LAMINADO

- TENSIONES



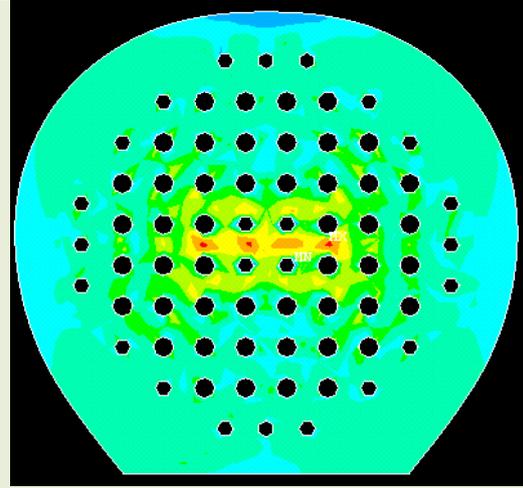
- **DEFORMACIONES**

**DISTRIBUCIÓN Y VALOR MÁXIMO**



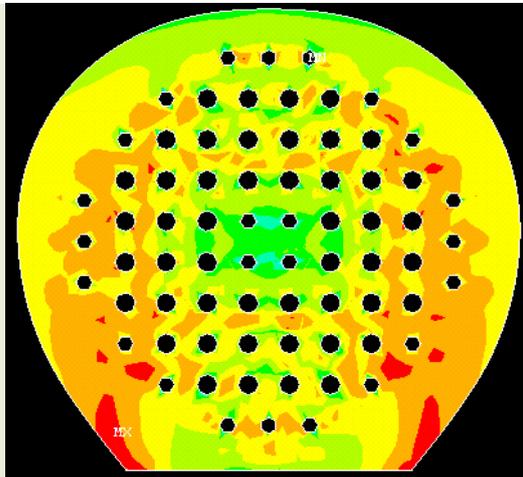
DEFORMACIÓN PRINCIPAL 1:

$$\epsilon_I = 0,002730$$



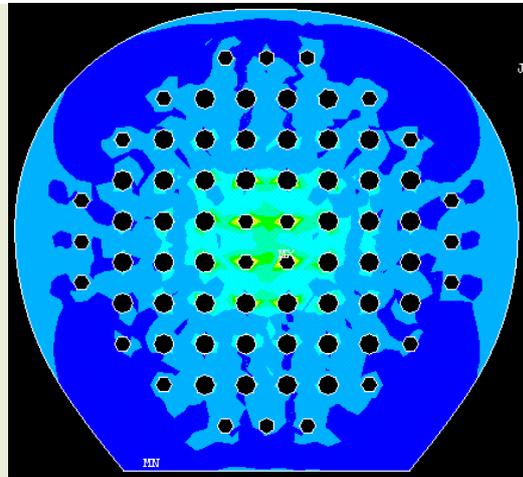
DEFORMACIÓN PRINCIPAL 2:

$$\epsilon_{II} = 0,000653$$



DEFORMACIÓN PRINCIPAL 3:

$$|\epsilon_{III}| = 0,000944$$



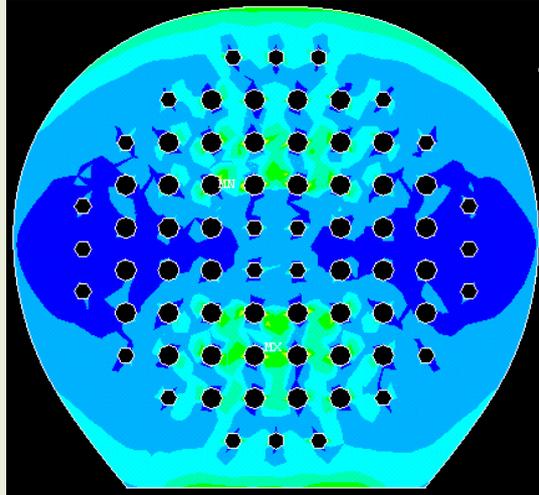
DEFORMACIÓN VON MISES:

$$\epsilon_{VM} = 0,003162$$

### 8.7.1.2 CAPA 2 DEL LAMINADO

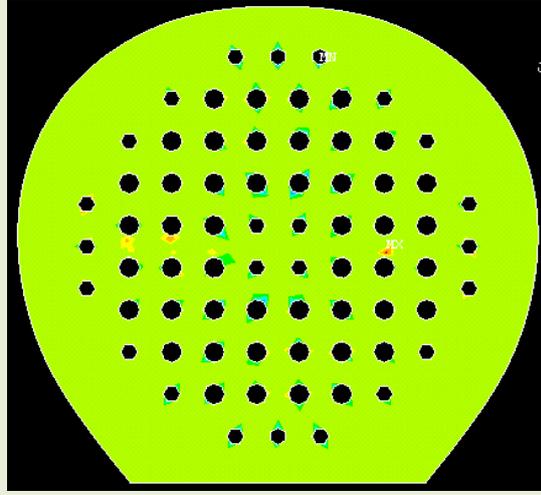
- TENSIONES

#### DISTRIBUCIÓN Y VALOR MÁXIMO



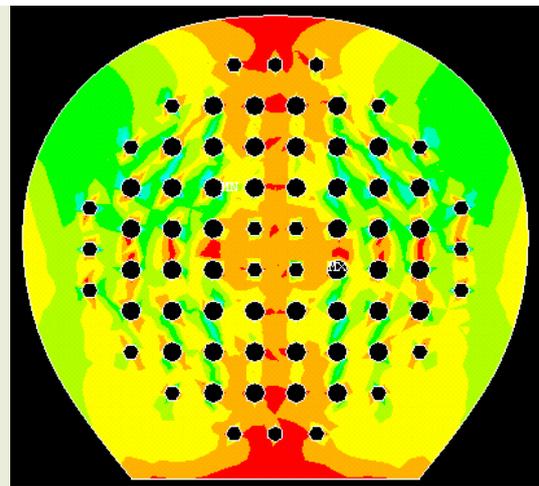
TENSIÓN PRINCIPAL 1:

$$\sigma_I = 9,72 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$



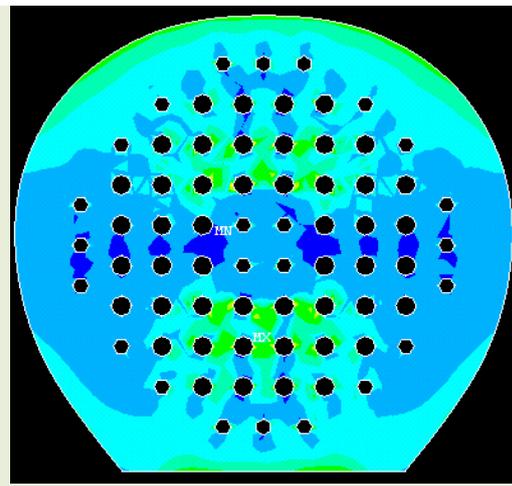
TENSIÓN PRINCIPAL 2:

$$\sigma_{II} = 3,96 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$



TENSIÓN PRINCIPAL 3:

$$|\sigma_{III}| = 4,45 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$

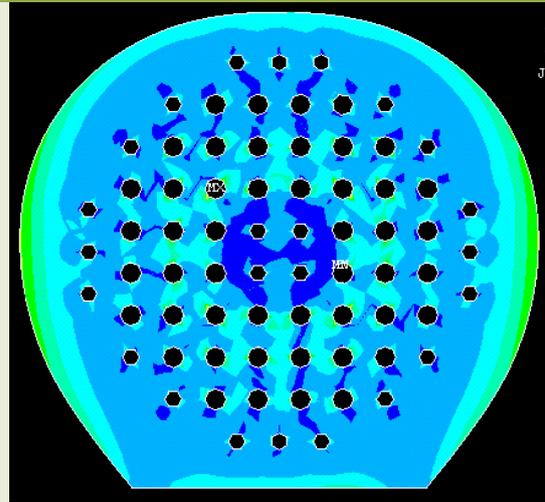


TENSIÓN VON MISES:

$$\sigma_{VM} = 9,60 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$

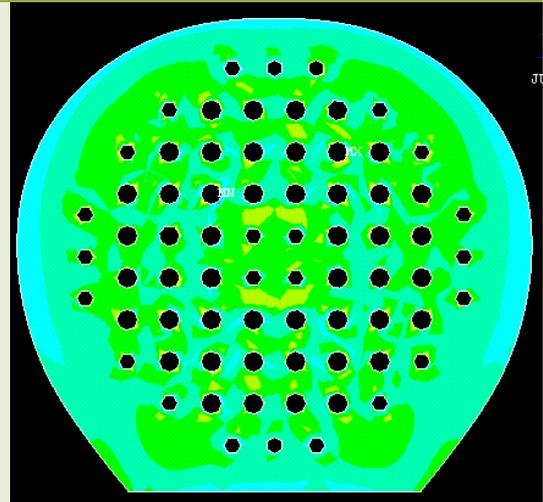
- **DEFORMACIONES**

**DISTRIBUCIÓN Y VALOR MÁXIMO**



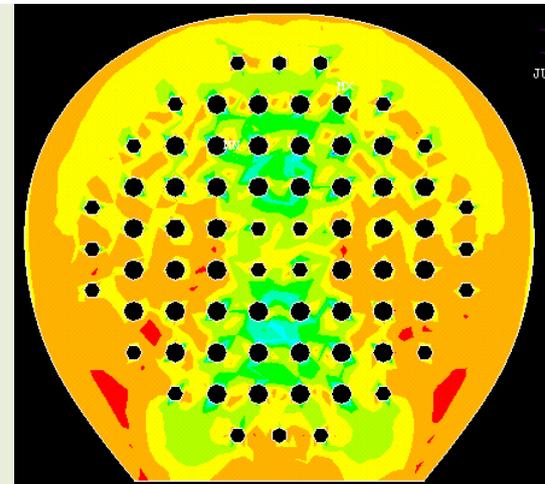
DEFORMACIÓN PRINCIPAL 1:

$$\epsilon_I = 0,002455$$



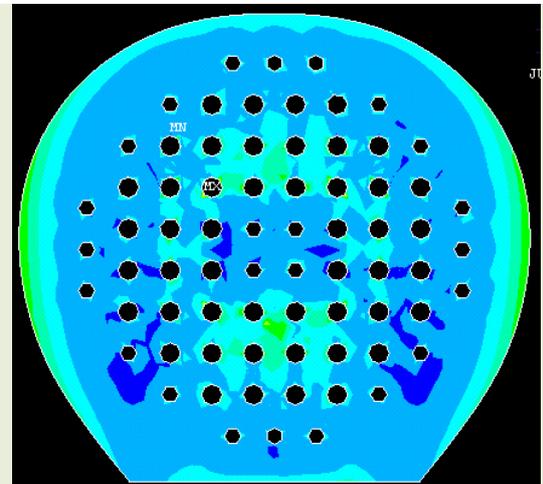
DEFORMACIÓN PRINCIPAL 2:

$$\epsilon_{II} = 0,000473$$



DEFORMACIÓN PRINCIPAL 3:

$$|\epsilon_{III}| = 0,001483$$



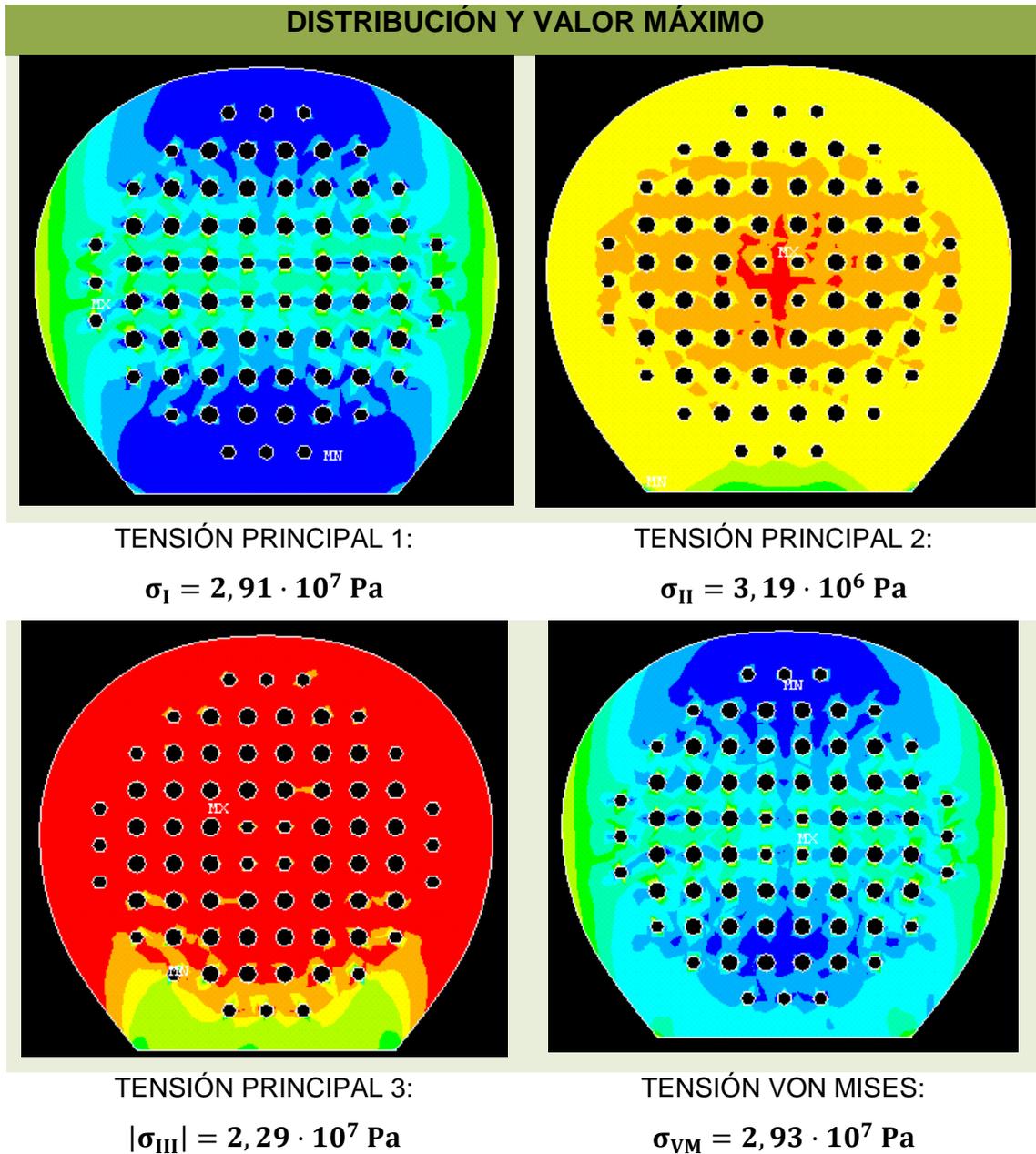
DEFORMACIÓN VON MISES:

$$\epsilon_{VM} = 0,002744$$

## 8.7.2 SUPERFICIE DE IMPACTO TRASERA

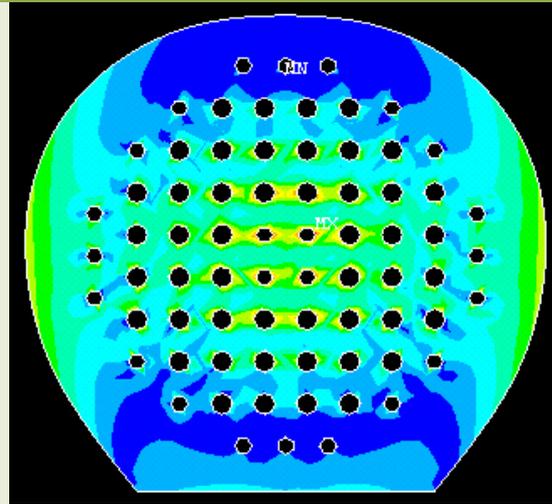
### 8.7.2.1 CAPA 1 DEL LAMINADO

- TENSIONES

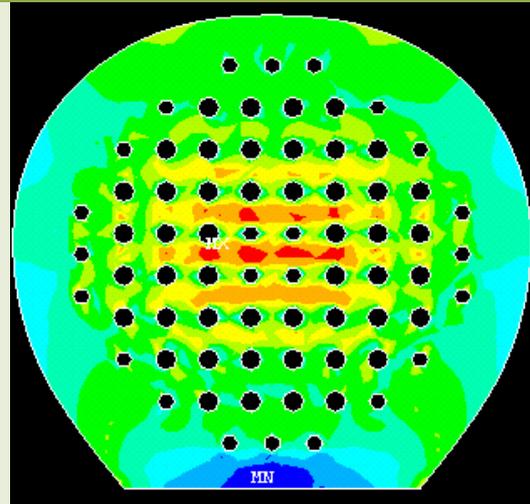


- DEFORMACIONES

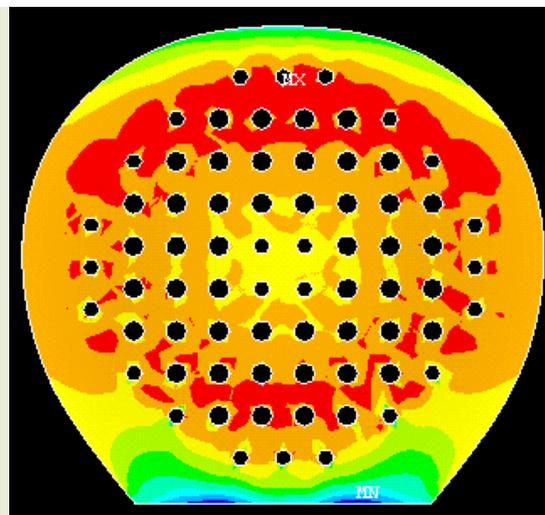
DISTRIBUCIÓN Y VALOR MÁXIMO



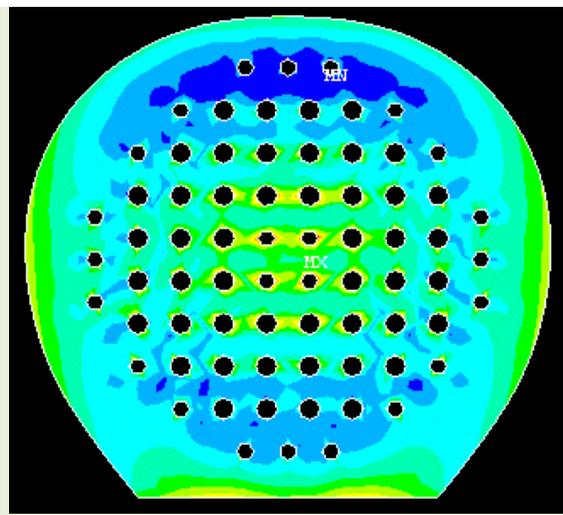
DEFORMACIÓN PRINCIPAL 1:  
 $\epsilon_I = 0,000604$



DEFORMACIÓN PRINCIPAL 2:  
 $\epsilon_{II} = 0,000206$



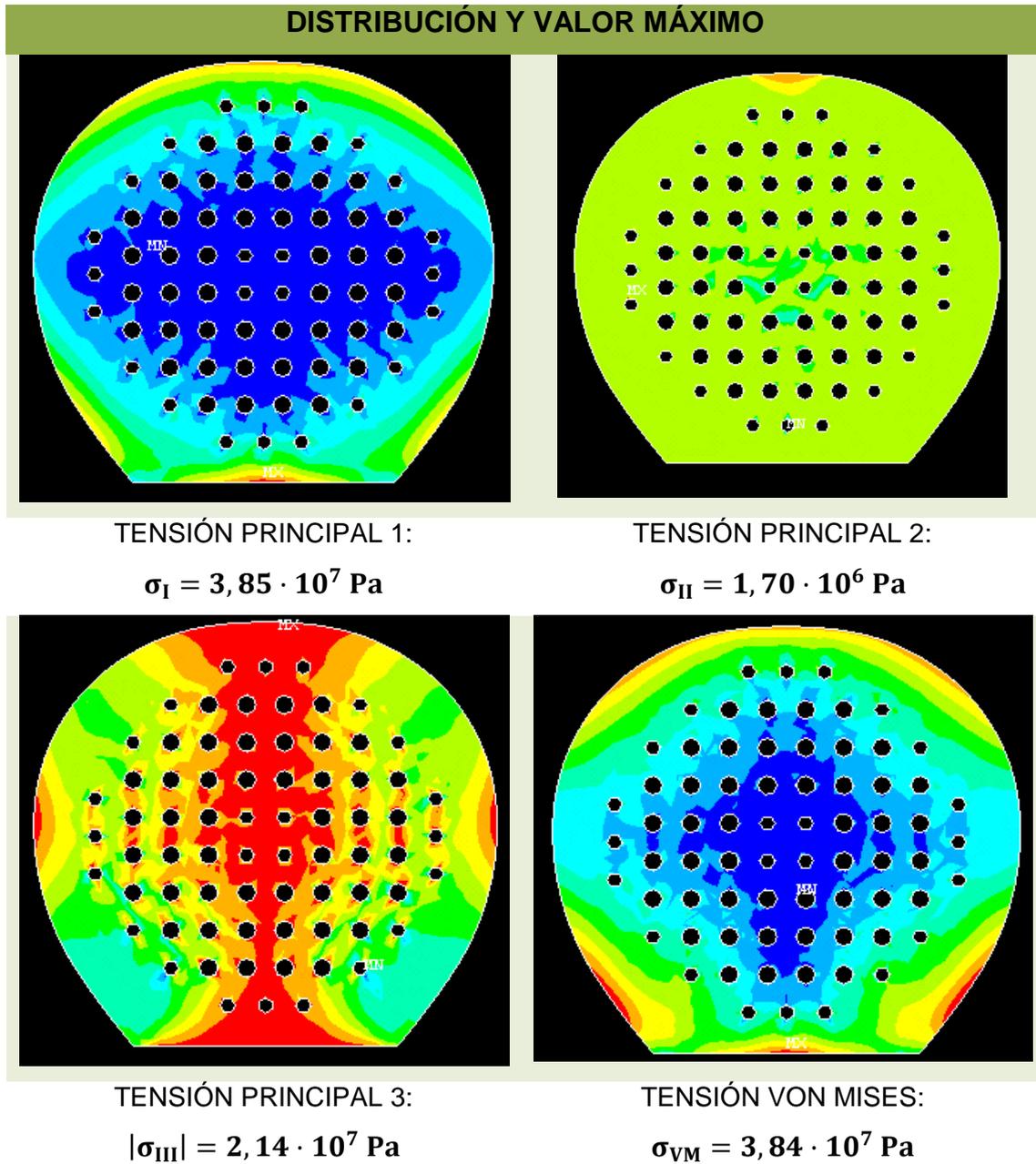
DEFORMACIÓN PRINCIPAL 3:  
 $|\epsilon_{III}| = 0,000482$



DEFORMACIÓN VON MISES:  
 $\epsilon_{VM} = 0,000698$

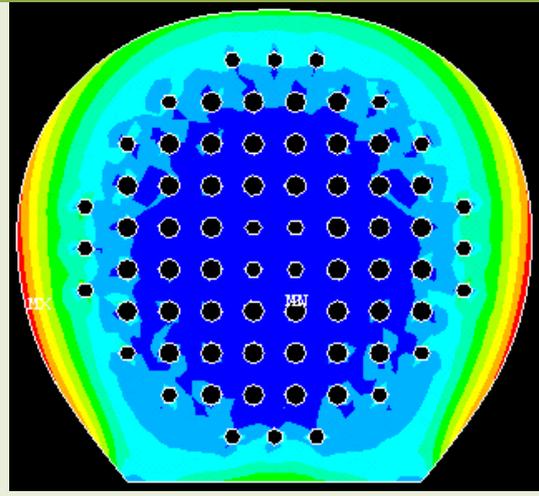
### 8.7.2.2 CAPA 2 DEL LAMINADO

- TENSIONES**



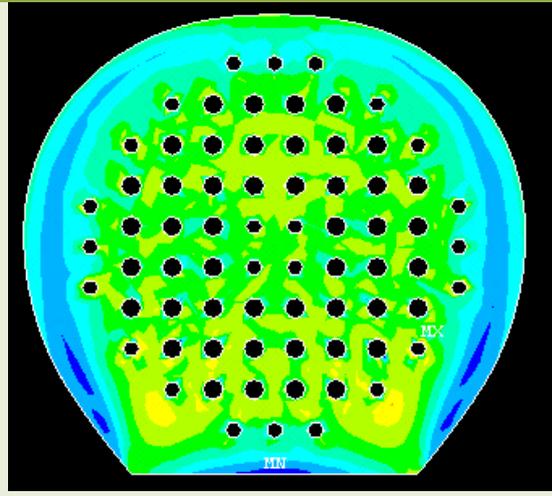
- DEFORMACIONES

DISTRIBUCIÓN Y VALOR MÁXIMO



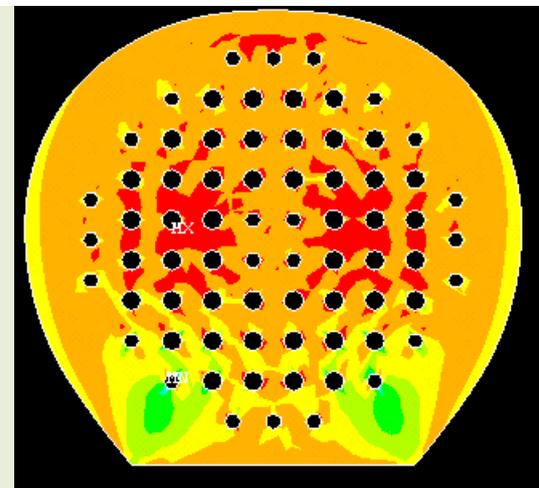
DEFORMACIÓN PRINCIPAL 1:

$$\varepsilon_I = 0,001223$$



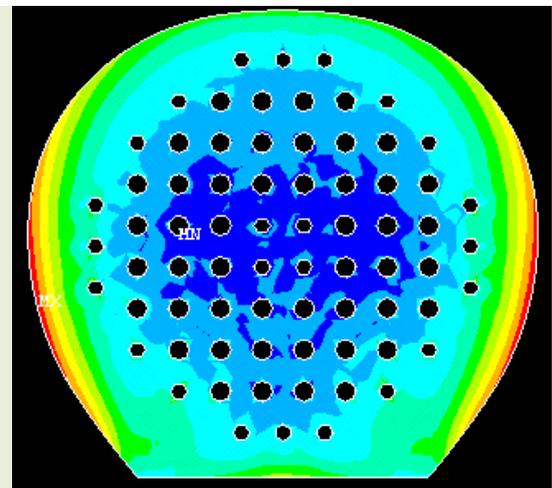
DEFORMACIÓN PRINCIPAL 2:

$$\varepsilon_{II} = 0,000150$$



DEFORMACIÓN PRINCIPAL 3:

$$|\varepsilon_{III}| = 0,000902$$



DEFORMACIÓN VON MISES:

$$\varepsilon_{VM} = 0,001377$$

## 8.8. ANÁLISIS SOLICITACIONES MECÁNICAS AEE INICIAL

Comparación de las solicitaciones mecánicas obtenidas en el AEE frente a las mismas obtenidas durante el Análisis Dinámico.

**Tabla 16.** Variación valores pico para las solicitaciones mecánicas analizadas en la propuesta inicial para el AEE

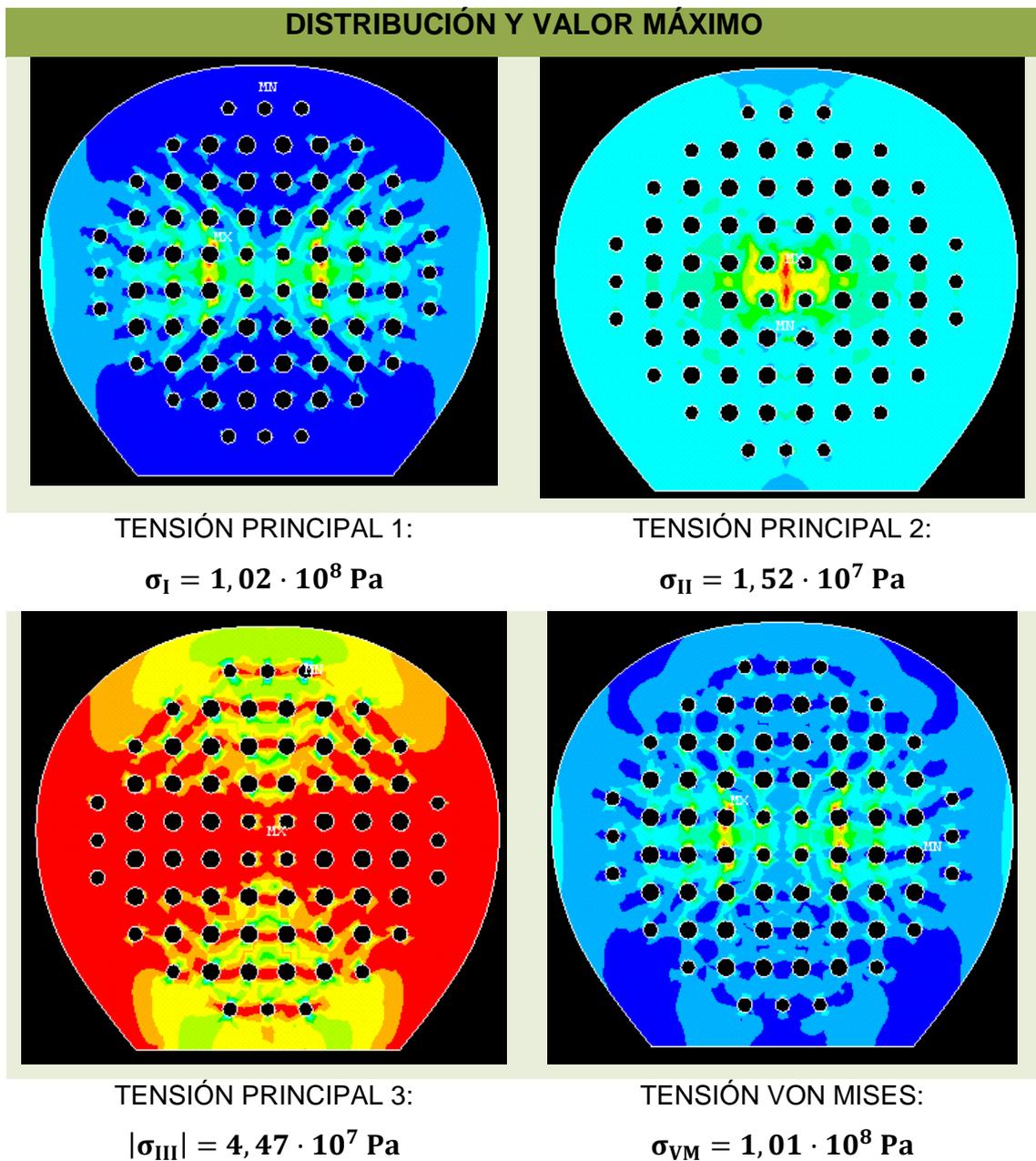
SUPERFICIE IMPACTO	LAMINADO	SOLICITACIÓN MECÁNICA	ENSAYO DINÁMICO	ENSAYO ESTÁTICO	DESVIACIÓN
FRONTAL	1	TENSIÓN PRINCIPAL 1	1,7300E+08	9,8100E+07	-43,29%
		TENSIÓN PRINCIPAL 2	3,4900E+07	1,2600E+07	-63,90%
		TENSIÓN PRINCIPAL 3	4,4800E+07	5,0500E+07	+12,72%
		TENSIÓN VON MISES	1,640008	1,0800E+08	-34,15%
		DEF. PRINCIPAL 1	4,5580E-03	2,7300E-03	-40,11%
		DEF. PRINCIPAL 2	2,1380E-03	6,5300E-04	-69,46%
		DEF. PRINCIPAL 3	1,4760E-03	9,4400E-04	-36,04%
		DEF. VON MISES	5,1180E-03	3,1620E-03	-38,22%
	2	TENSIÓN PRINCIPAL 1	1,4300E+08	9,7200E+07	-32,03%
		TENSIÓN PRINCIPAL 2	1,4100E+07	3,9600E+06	-71,91%
		TENSIÓN PRINCIPAL 3	4,4600E+07	4,7600E+07	+6,73%
		TENSIÓN VON MISES	1,4100E+08	9,6000E+07	-31,91%
		DEF. PRINCIPAL 1	2,6740E-03	2,4550E-03	-08,19%
		DEF. PRINCIPAL 2	1,0770E-03	4,7300E-04	-56,08%
DEF. PRINCIPAL 3		1,8320E-03	1,4830E-03	-19,05%	
DEF. VON MISES		3,1740E-03	2,7440E-03	-13,55%	
TRASERA	1	TENSIÓN PRINCIPAL 1	2,2700E+07	2,9100E+07	+28,19%
		TENSIÓN PRINCIPAL 2	5,3100E+06	3,1900E+06	-39,92%
		TENSIÓN PRINCIPAL 3	1,5500E+07	2,2900E+07	+47,74%
		TENSIÓN VON MISES	2,7800E+07	2,9300E+07	+05,40%
		DEF. PRINCIPAL 1	9,1000E-04	6,0400E-04	-33,63%
		DEF. PRINCIPAL 2	1,9500E-04	2,0600E-04	+05,64%
		DEF. PRINCIPAL 3	8,0000E-04	4,8200E-04	-39,75%
		DEF. VON MISES	1,0200E-03	6,9800E-04	-31,57%
	2	TENSIÓN PRINCIPAL 1	2,3100E+07	3,8500E+07	+66,67%
		TENSIÓN PRINCIPAL 2	4,1700E+06	1,7000E+06	-59,23%
		TENSIÓN PRINCIPAL 3	2,0900E+07	2,1400E+07	+02,39%
		TENSIÓN VON MISES	2,5300E+07	3,8400E+07	+51,78%
		DEF. PRINCIPAL 1	7,3700E-04	1,2230E-03	+65,94%
		DEF. PRINCIPAL 2	3,7800E-04	1,7500E-04	-53,70%
DEF. PRINCIPAL 3		5,2100E-04	9,0200E-04	+73,13%	
DEF. VON MISES		8,3400E-04	1,3770E-03	+65,11%	

## 8.9. DISTRIBUCIÓN DE LAS SOLICITACIONES MECÁNICAS PARA EL AEE MODIFICADO

### 8.9.1 SUPERFICIE DE IMPACTO FRONTAL

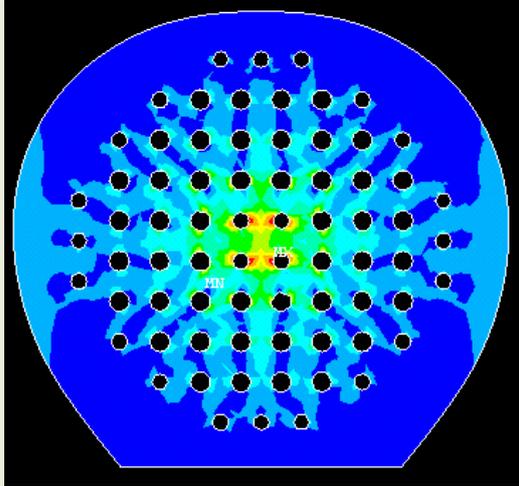
#### 8.9.1.1 CAPA 1 DEL LAMINADO

- TENSIONES



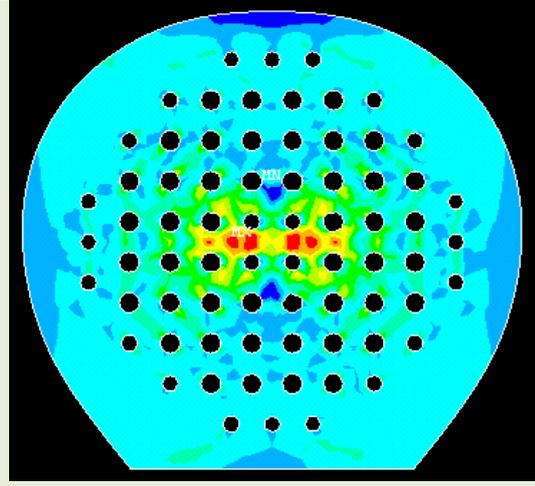
- DEFORMACIONES

DISTRIBUCIÓN Y VALOR MÁXIMO



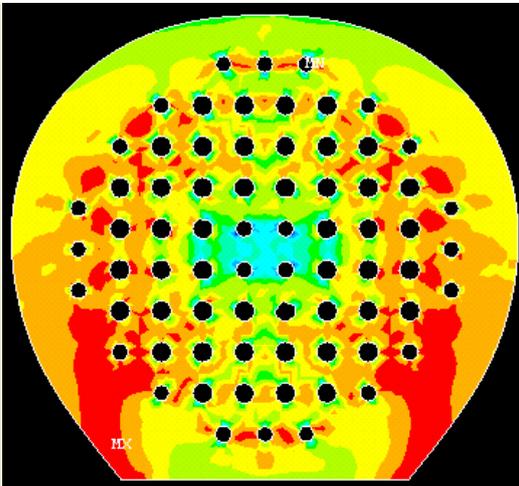
DEFORMACIÓN PRINCIPAL 1:

$$\epsilon_I = 0,002789$$



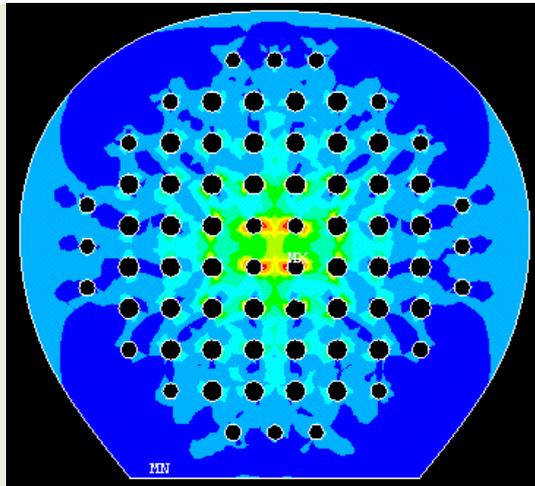
DEFORMACIÓN PRINCIPAL 2:

$$\epsilon_{II} = 0,000777$$



DEFORMACIÓN PRINCIPAL 3:

$$|\epsilon_{III}| = 0,000832$$



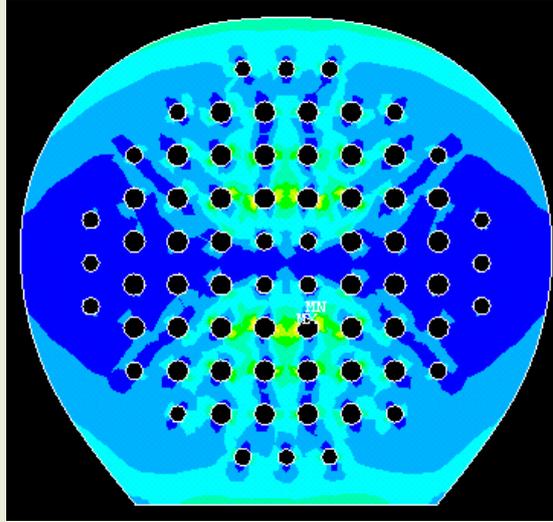
DEFORMACIÓN VON MISES:

$$\epsilon_{VM} = 0,003135$$

### 8.9.1.2 CAPA 2 DEL LAMINADO

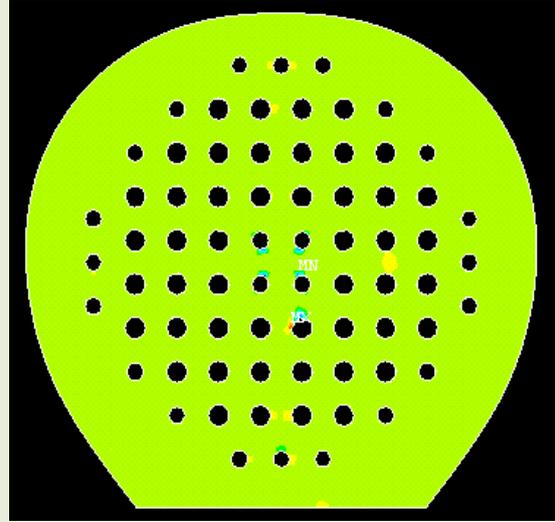
- TENSIONES

#### DISTRIBUCIÓN Y VALOR MÁXIMO



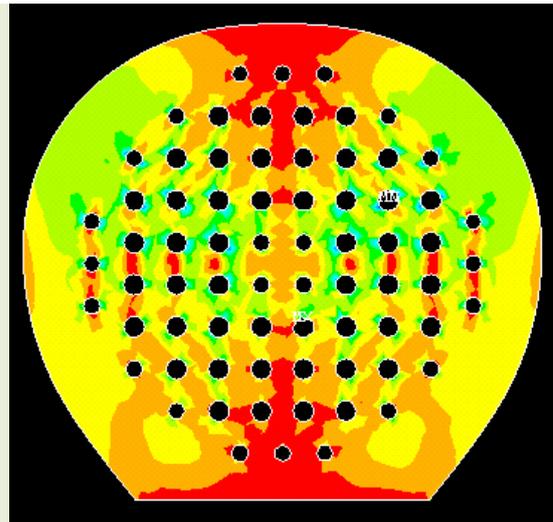
TENSIÓN PRINCIPAL 1:

$$\sigma_I = 1,26 \cdot 10^8 \text{ Pa}$$



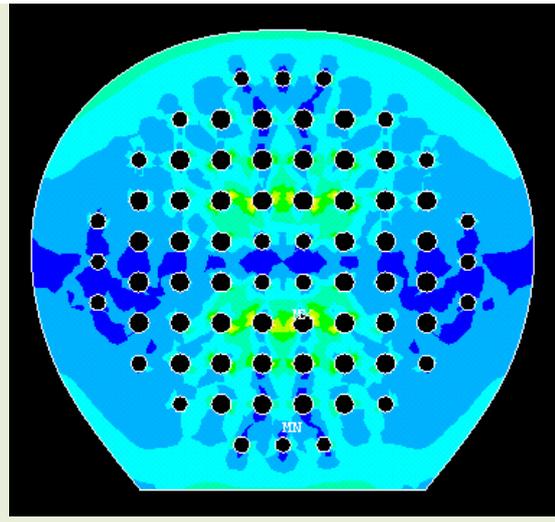
TENSIÓN PRINCIPAL 2:

$$\sigma_{II} = 5,05 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$



TENSIÓN PRINCIPAL 3:

$$|\sigma_{III}| = 4,51 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$

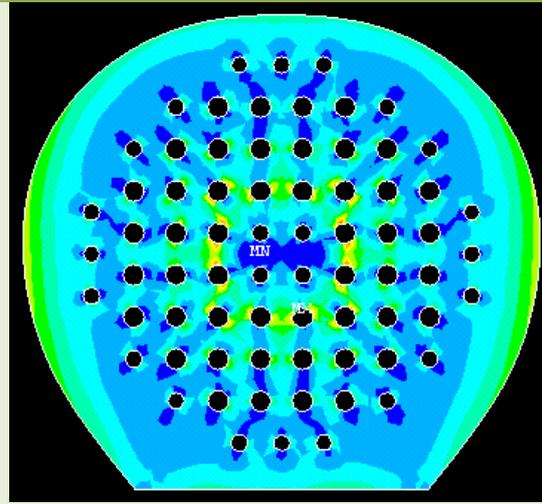


TENSIÓN VON MISES:

$$\sigma_{VM} = 1,26 \cdot 10^8 \text{ Pa}$$

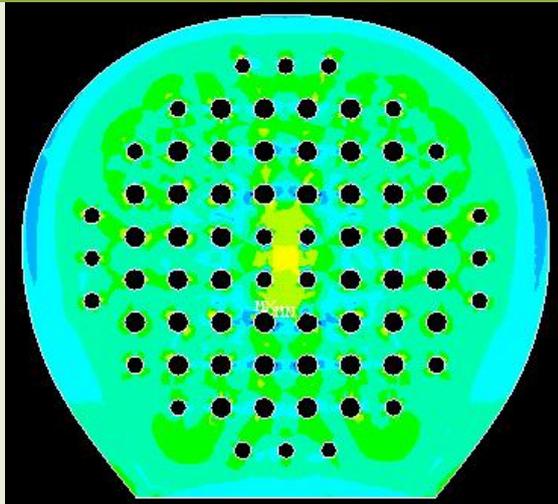
- **DEFORMACIONES**

**DISTRIBUCIÓN Y VALOR MÁXIMO**



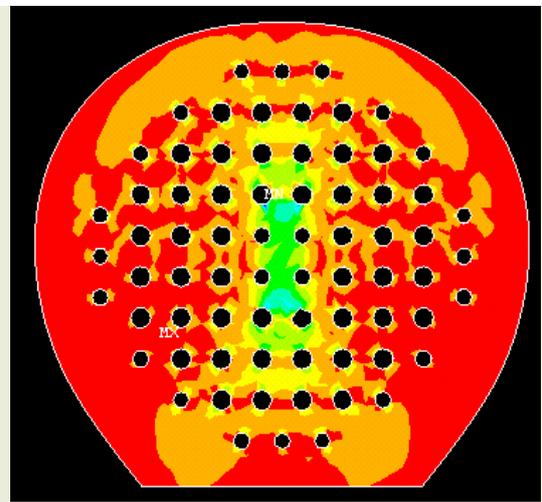
DEFORMACIÓN PRINCIPAL 1:

$$\varepsilon_I = 0,002380$$



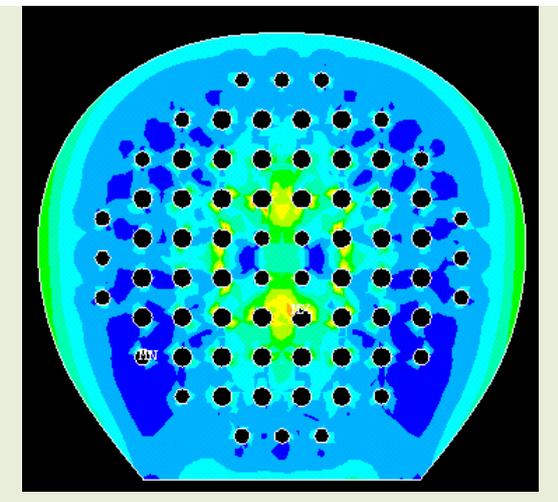
DEFORMACIÓN PRINCIPAL 2:

$$\varepsilon_{II} = 0,000472$$



DEFORMACIÓN PRINCIPAL 3:

$$|\varepsilon_{III}| = 0,002398$$



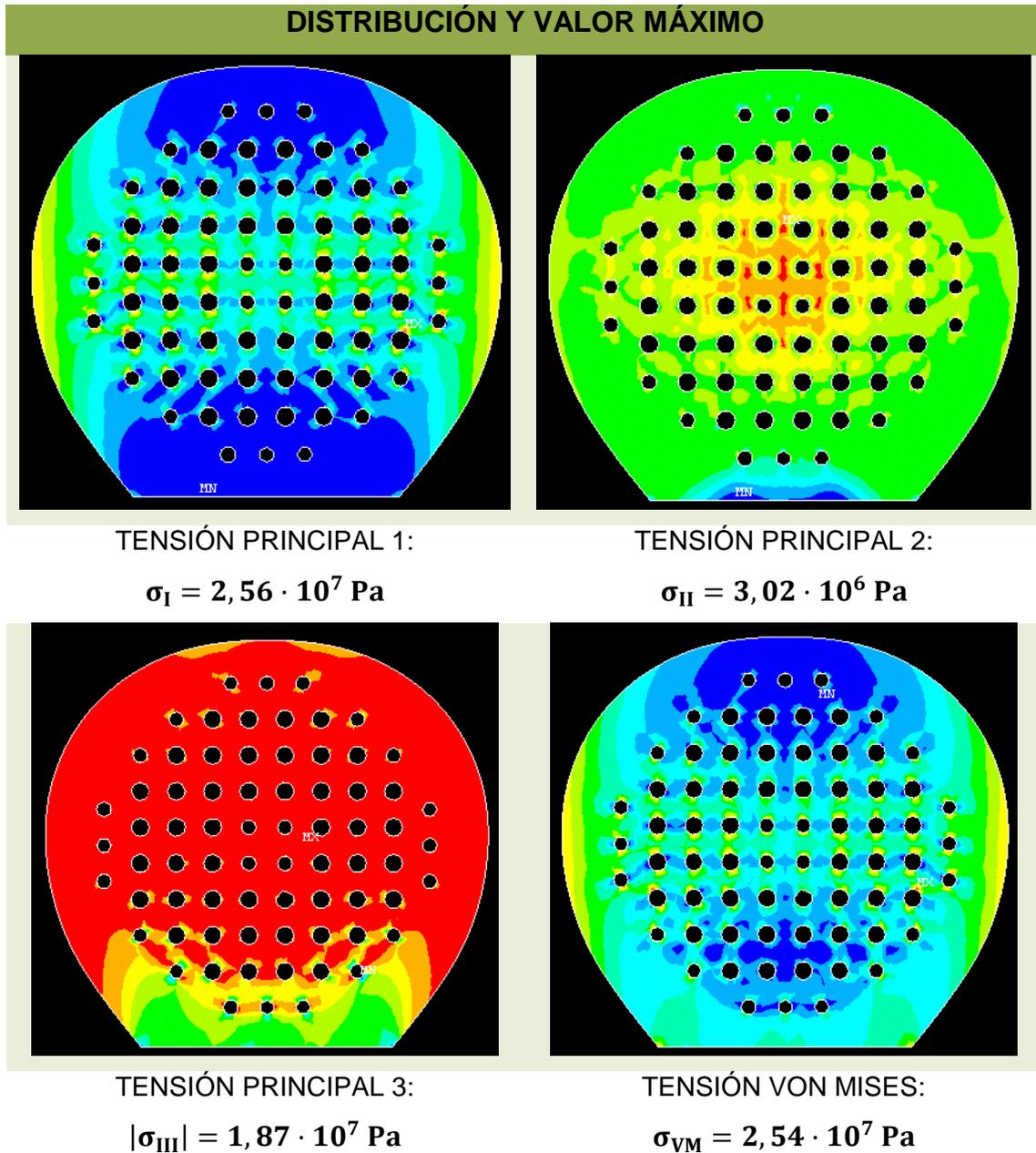
DEFORMACIÓN VON MISES:

$$\varepsilon_{VM} = 0,002790$$

## 8.9.2 SUPERFICIE DE IMPACTO TRASERA

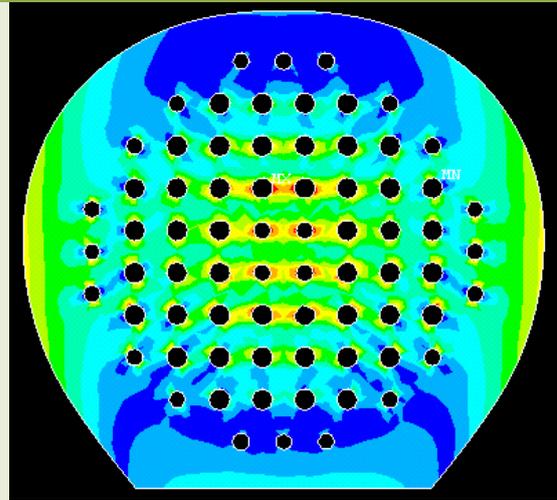
### 8.9.2.1 CAPA 1 DEL LAMINADO

- TENSIONES



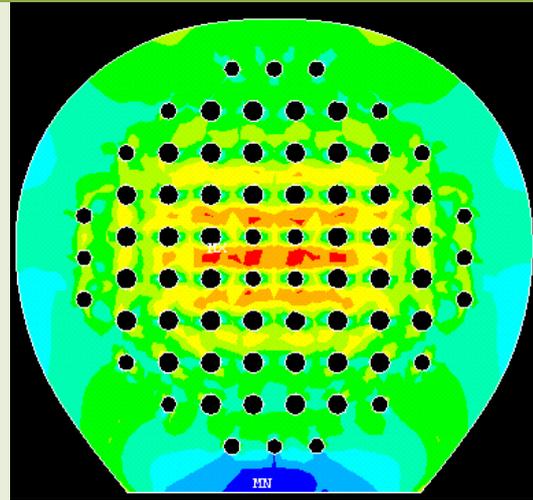
- **DEFORMACIONES**

**DISTRIBUCIÓN Y VALOR MÁXIMO**



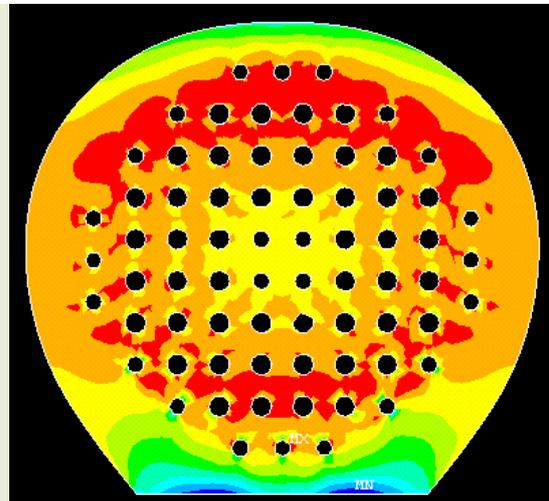
DEFORMACIÓN PRINCIPAL 1:

$$\epsilon_I = 0,000516$$



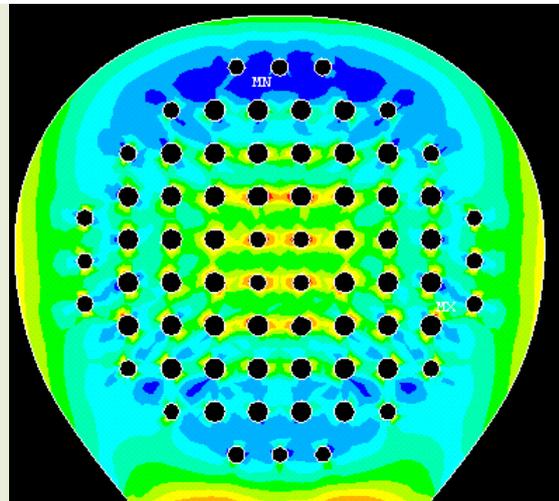
DEFORMACIÓN PRINCIPAL 2:

$$\epsilon_{II} = 0,000211$$



DEFORMACIÓN PRINCIPAL 3:

$$|\epsilon_{III}| = 0,000459$$



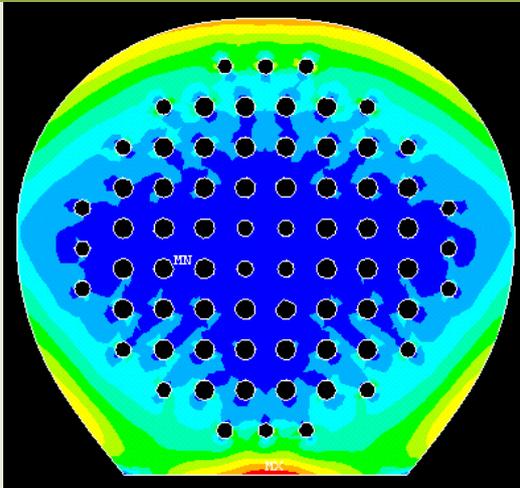
DEFORMACIÓN VON MISES:

$$\epsilon_{VM} = 0,000583$$

### 8.9.2.2 CAPA 2 DEL LAMINADO

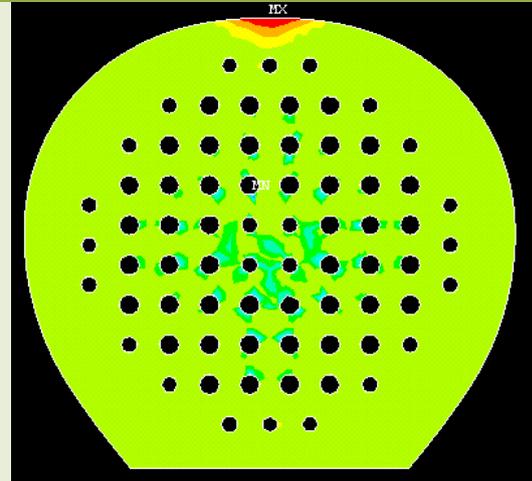
- TENSIONES**

#### DISTRIBUCIÓN Y VALOR MÁXIMO



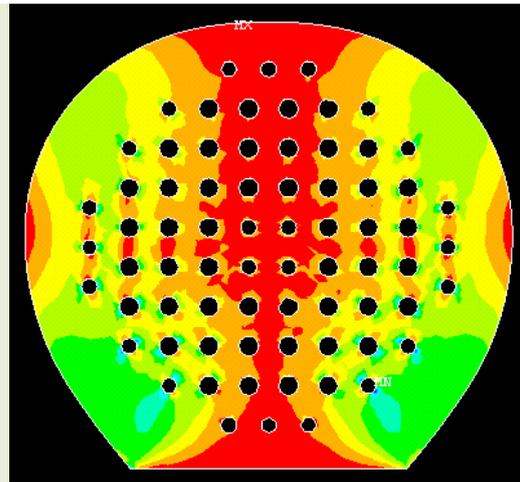
TENSIÓN PRINCIPAL 1:

$$\sigma_I = 3,59 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$



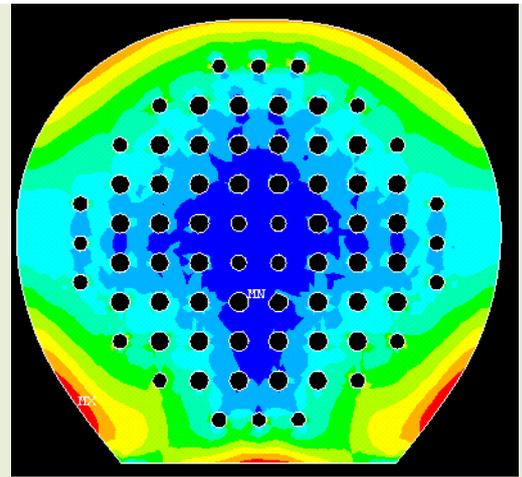
TENSIÓN PRINCIPAL 2:

$$\sigma_{II} = 1,15 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$



TENSIÓN PRINCIPAL 3:

$$|\sigma_{III}| = 2,44 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$

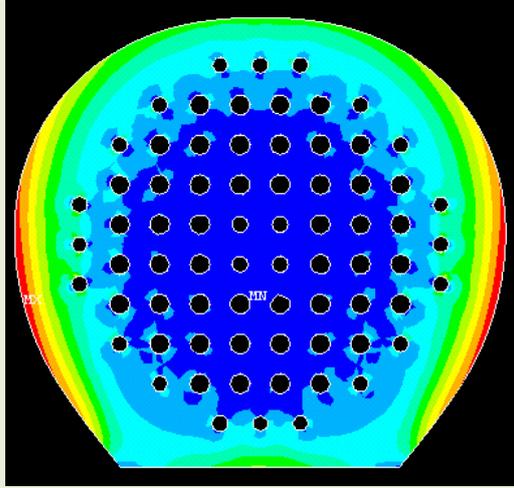


TENSIÓN VON MISES:

$$\sigma_{VM} = 3,69 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$

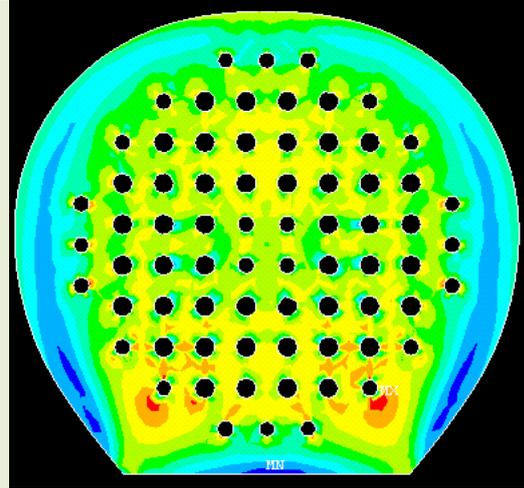
- **DEFORMACIONES**

**DISTRIBUCIÓN Y VALOR MÁXIMO**



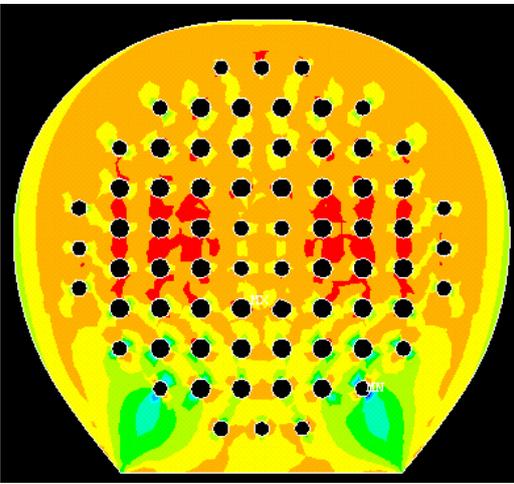
DEFORMACIÓN PRINCIPAL 1:

$$\epsilon_I = 0,001165$$



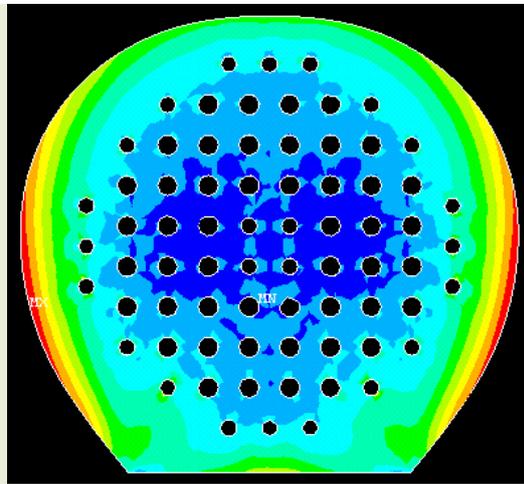
DEFORMACIÓN PRINCIPAL 2:

$$\epsilon_{II} = 0,000168$$



DEFORMACIÓN PRINCIPAL 3:

$$|\epsilon_{III}| = 0,000745$$



DEFORMACIÓN VON MISES:

$$\epsilon_{VM} = 0,001312$$

## 8.10. ANÁLISIS DE LAS SOLICITACIONES MECÁNICAS PARA EL AEE MODIFICADO

Comparación de las solicitaciones mecánicas obtenidas en el AEE Modificado frente a las mismas obtenidas durante el Análisis Dinámico.

**Tabla 17.** Variación valores pico para las solicitaciones mecánicas analizadas para la primera modificación de la zona de contacto

SUPERFICIE IMPACTO	LAMINADO	SOLICITACIÓN MECÁNICA	ENSAYO DINÁMICO	ENSAYO ESTÁTICO	DESVIACIÓN
FRONTAL	1	TENSIÓN PRINCIPAL 1	1,7300E+08	1,0200E+08	-41,04%
		TENSIÓN PRINCIPAL 2	3,4900E+07	1,5200E+07	-56,45%
		TENSIÓN PRINCIPAL 3	4,4800E+07	4,4700E+07	-0,22%
		TENSIÓN VON MISES	1,6400E+08	1,0100E+08	-38,41%
		DEF. PRINCIPAL 1	4,5580E-03	2,7890E-03	-38,81%
		DEF. PRINCIPAL 2	2,1380E-03	7,7700E-04	-63,66%
		DEF. PRINCIPAL 3	1,4760E-03	8,3200E-04	-43,63%
		DEF. VON MISES	5,1180E-03	3,1350E-03	-38,75%
	2	TENSIÓN PRINCIPAL 1	1,4300E+08	1,2600E+08	-11,89%
		TENSIÓN PRINCIPAL 2	1,4100E+07	5,0500E+06	-64,18%
		TENSIÓN PRINCIPAL 3	4,4600E+07	4,5100E+07	1,12%
		TENSIÓN VON MISES	1,4100E+08	1,2600E+08	-10,64%
		DEF. PRINCIPAL 1	2,6740E-03	2,3800E-03	-10,99%
		DEF. PRINCIPAL 2	1,0770E-03	4,7200E-04	-56,17%
DEF. PRINCIPAL 3		1,8320E-03	2,3980E-03	30,90%	
DEF. VON MISES		3,1740E-03	2,7900E-03	-12,10%	
TRASERA	1	TENSIÓN PRINCIPAL 1	2,2700E+07	2,5600E+07	12,78%
		TENSIÓN PRINCIPAL 2	5,3100E+06	3,0200E+06	-43,13%
		TENSIÓN PRINCIPAL 3	1,5500E+07	1,8700E+07	20,65%
		TENSIÓN VON MISES	2,7800E+07	2,5400E+07	-8,63%
		DEF. PRINCIPAL 1	9,1000E-04	5,1600E-04	-43,30%
		DEF. PRINCIPAL 2	1,9500E-04	2,1100E-04	8,21%
		DEF. PRINCIPAL 3	8,0000E-04	4,5900E-04	-42,63%
		DEF. VON MISES	1,0200E-03	5,8300E-04	-42,84%

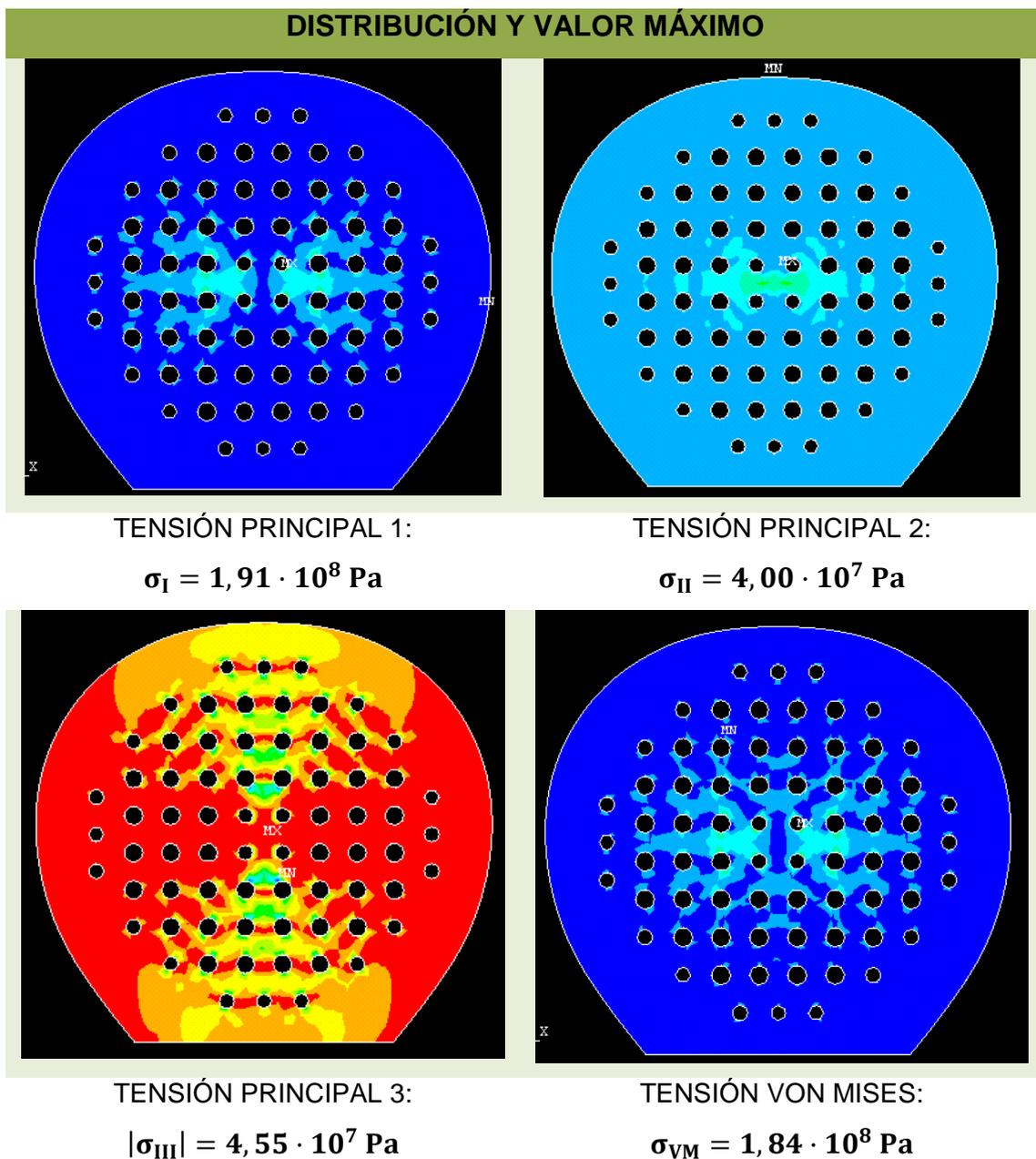
2	<b>TENSIÓN PRINCIPAL 1</b>	2,3100E+07	3,5900E+07	55,41%
	<b>TENSIÓN PRINCIPAL 2</b>	4,1700E+06	1,1500E+06	-72,42%
	<b>TENSIÓN PRINCIPAL 3</b>	2,0900E+07	2,4400E+07	16,75%
	<b>TENSIÓN VON MISES</b>	2,5300E+07	3,6900E+07	45,85%
	<b>DEF. PRINCIPAL 1</b>	7,3700E-04	1,1650E-03	58,07%
	<b>DEF. PRINCIPAL 2</b>	3,7800E-04	1,6800E-04	-55,56%
	<b>DEF. PRINCIPAL 3</b>	5,2100E-04	7,4500E-04	42,99%
	<b>DEF. VON MISES</b>	8,3400E-04	1,3120E-03	57,31%

## 8.11. DISTRIBUCIÓN DE LAS SOLICITACIONES MECÁNICAS PARA LA 2ª MODIFICACIÓN PROPUESTA PARA EL AEE

### 8.11.1 SUPERFICIE DE IMPACTO FRONTAL

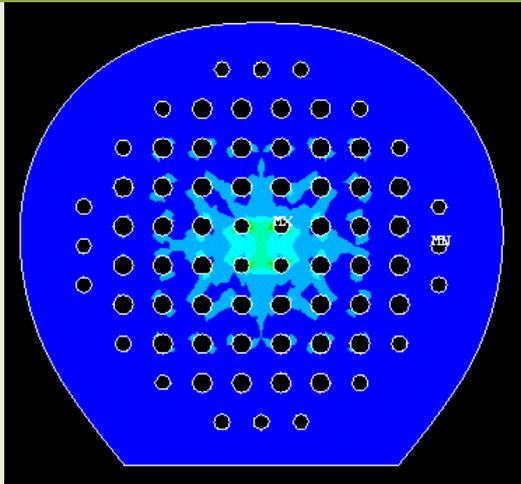
#### 8.11.1.1 CAPA 1 DEL LAMINADO

- TENSIONES



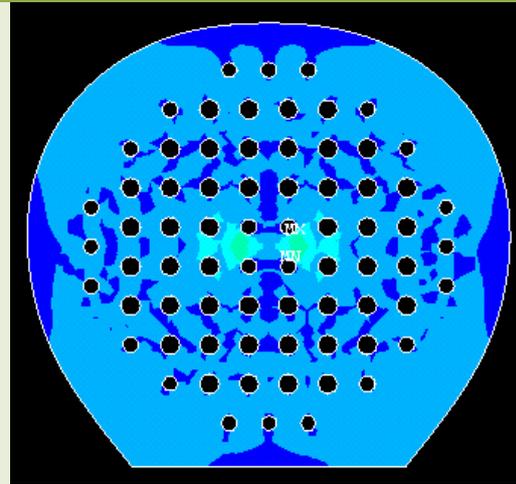
- DEFORMACIONES

DISTRIBUCIÓN Y VALOR MÁXIMO



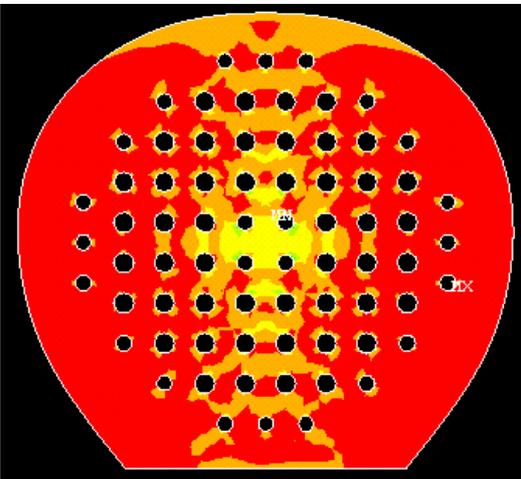
DEFORMACIÓN PRINCIPAL 1:

$$\epsilon_I = 0,005583$$



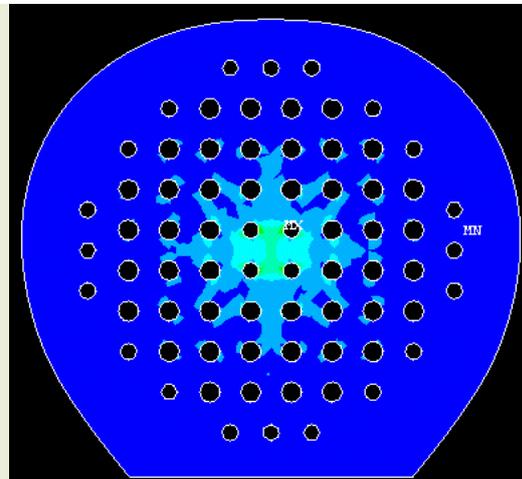
DEFORMACIÓN PRINCIPAL 2:

$$\epsilon_{II} = 0,002807$$



DEFORMACIÓN PRINCIPAL 3:

$$|\epsilon_{III}| = 0,001884$$



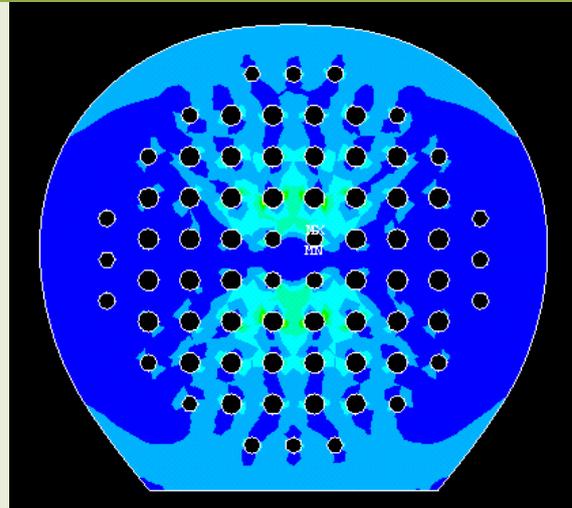
DEFORMACIÓN VON MISES:

$$\epsilon_{VM} = 0,006251$$

### 8.11.1.2 CAPA 2 DEL LAMINADO

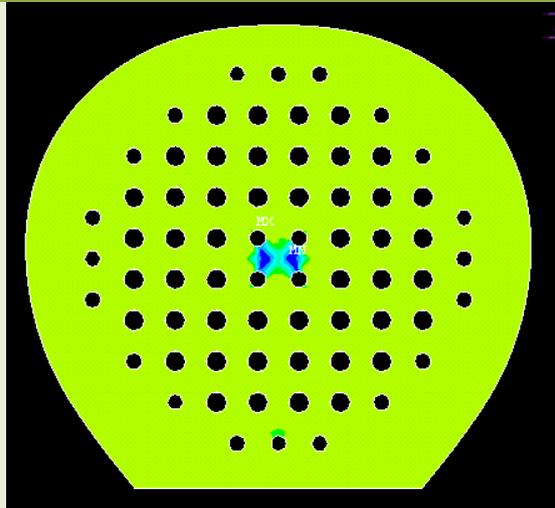
- TENSIONES

#### DISTRIBUCIÓN Y VALOR MÁXIMO



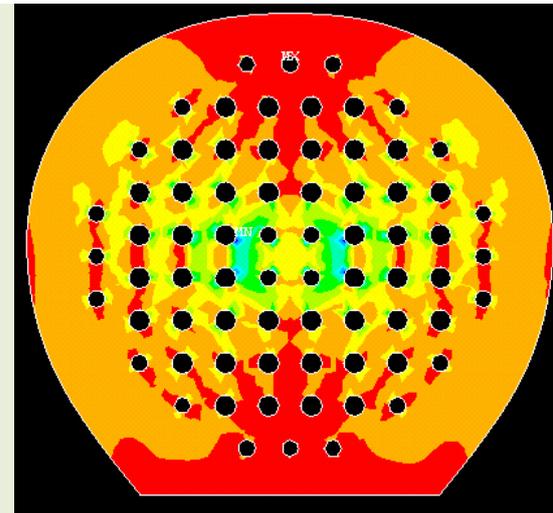
TENSIÓN PRINCIPAL 1:

$$\sigma_I = 1,53 \cdot 10^8 \text{ Pa}$$



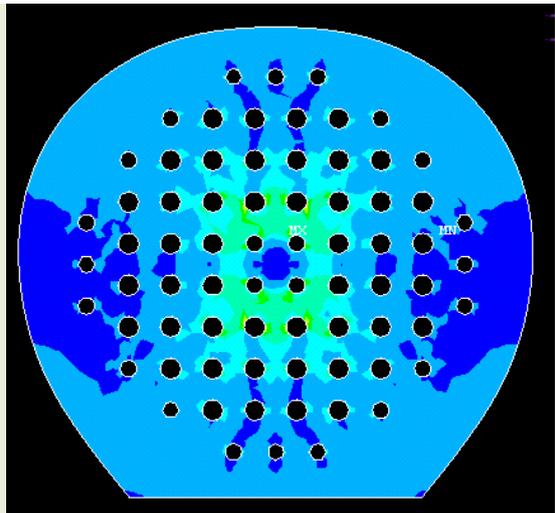
TENSIÓN PRINCIPAL 2:

$$|\sigma_{II}| = 1,48 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$



TENSIÓN PRINCIPAL 3:

$$|\sigma_{III}| = 5,45 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$

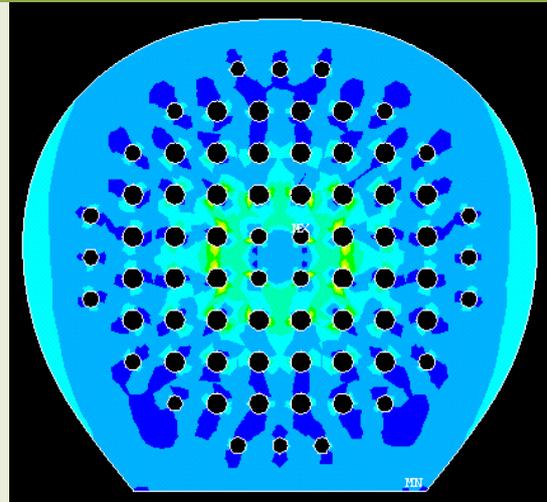


TENSIÓN VON MISES:

$$\sigma_{VM} = 1,53 \cdot 10^8 \text{ Pa}$$

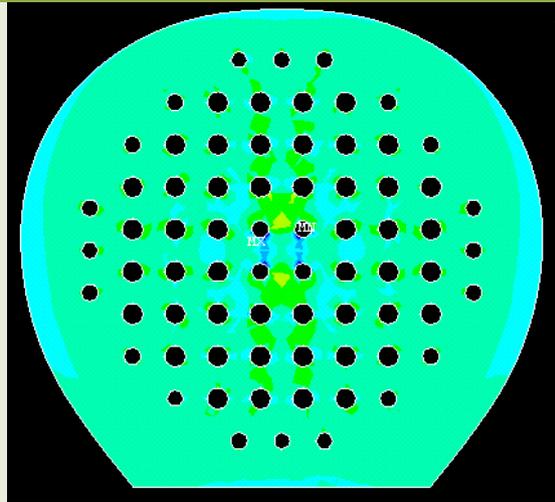
- **DEFORMACIONES**

**DISTRIBUCIÓN Y VALOR MÁXIMO**



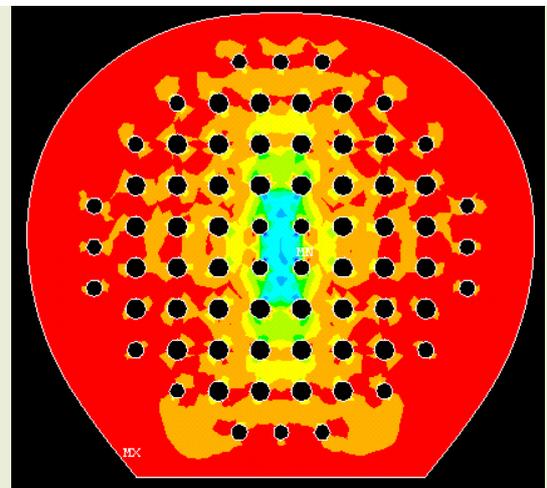
DEFORMACIÓN PRINCIPAL 1:

$$\epsilon_I = 0,002882$$



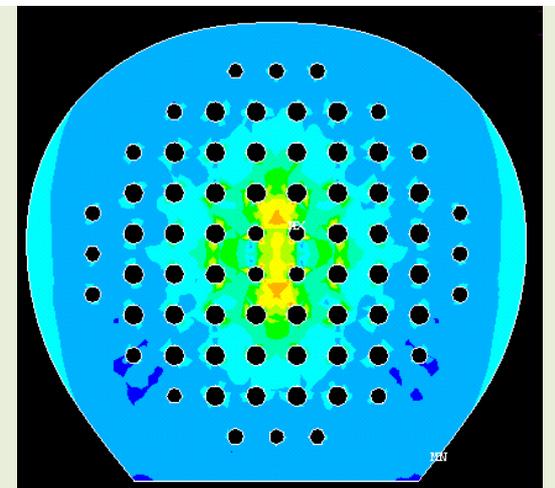
DEFORMACIÓN PRINCIPAL 2:

$$\epsilon_{II} = 0,000914$$



DEFORMACIÓN PRINCIPAL 3:

$$|\epsilon_{III}| = 0,002598$$



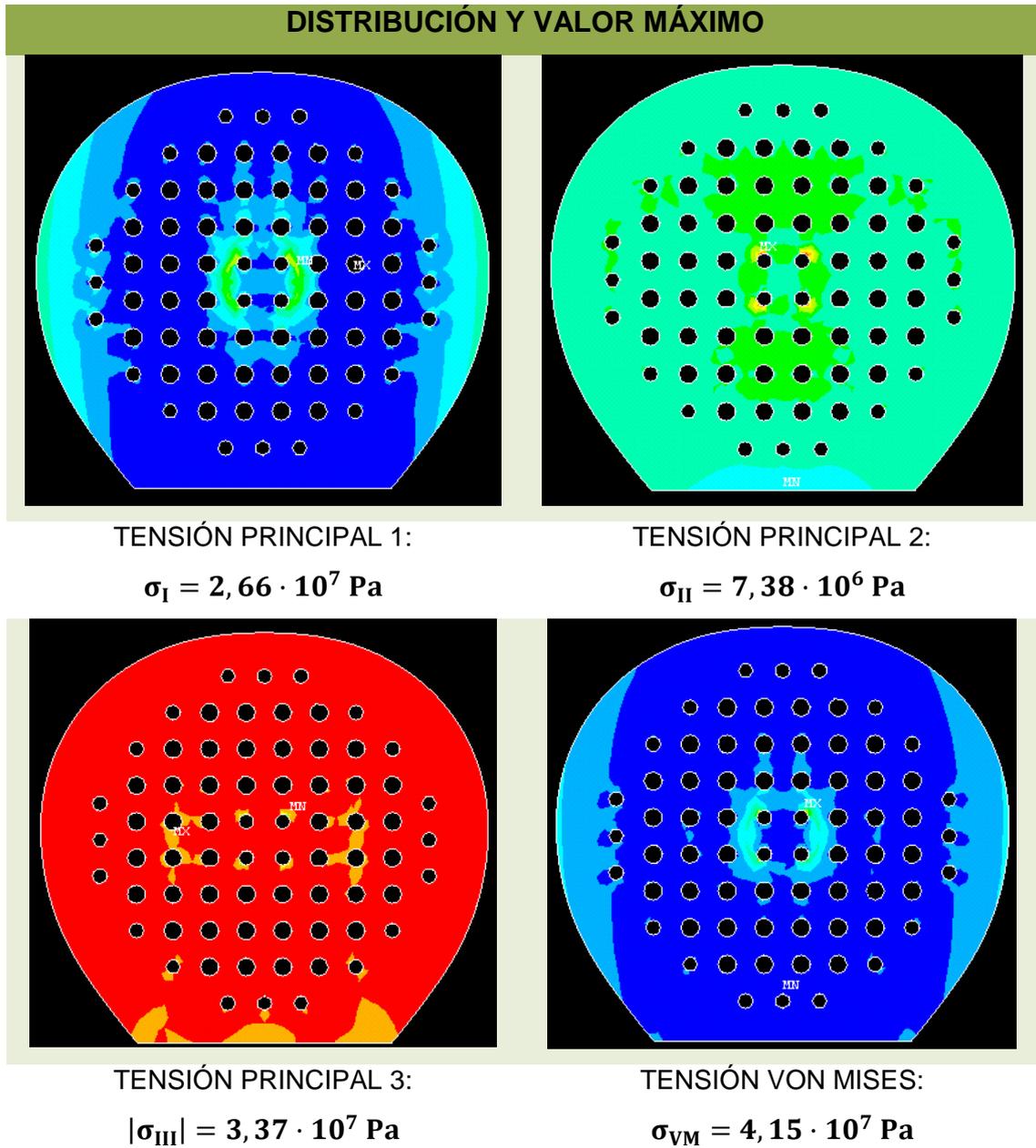
DEFORMACIÓN VON MISES:

$$\epsilon_{VM} = 0,003383$$

## 8.11.2 SUPERFICIE DE IMPACTO TRASERA

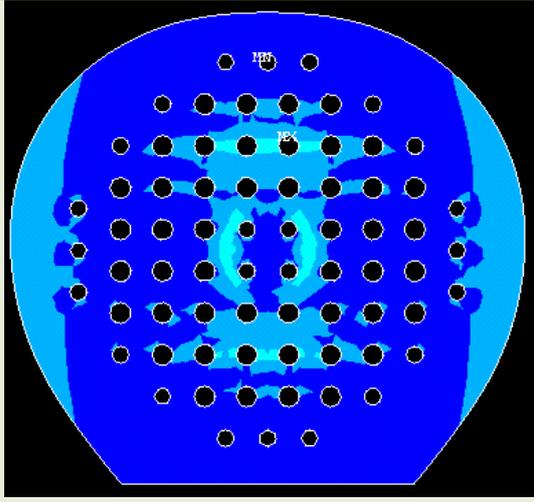
### 8.11.2.1 CAPA 1 DEL LAMINADO

- TENSIONES



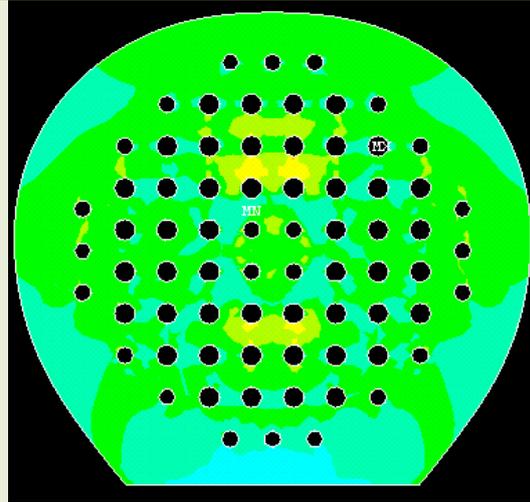
- **DEFORMACIONES**

**DISTRIBUCIÓN Y VALOR MÁXIMO**



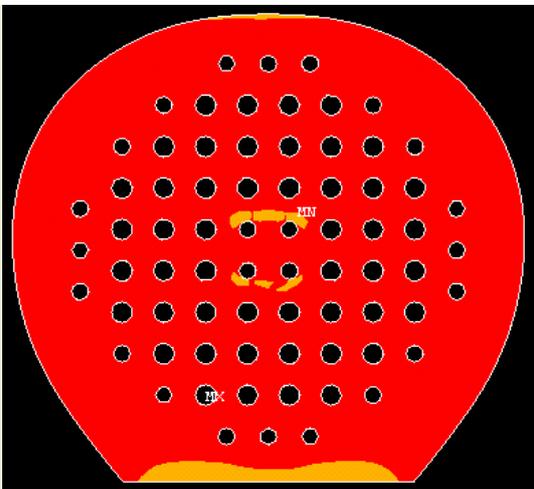
DEFORMACIÓN PRINCIPAL 1:

$$\epsilon_I = 0,000918$$



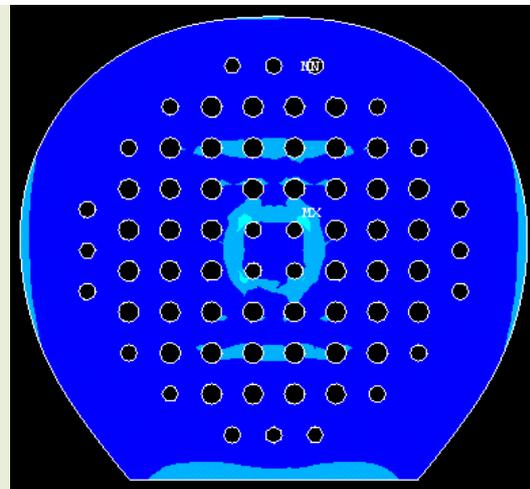
DEFORMACIÓN PRINCIPAL 2:

$$\epsilon_{II} = 0,000203$$



DEFORMACIÓN PRINCIPAL 3:

$$|\epsilon_{III}| = 0,001497$$



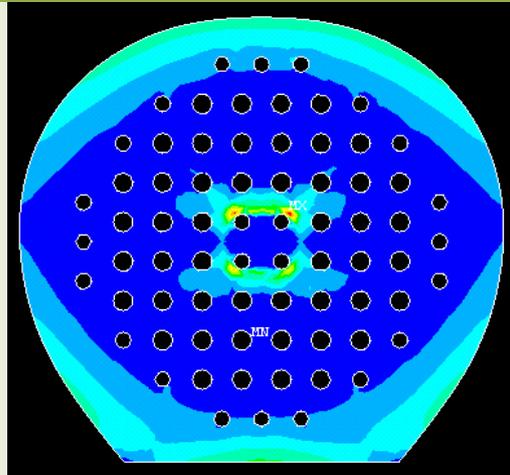
DEFORMACIÓN VON MISES:

$$\epsilon_{VM} = 0,001687$$

### 8.11.2.2 CAPA 2 DEL LAMINADO

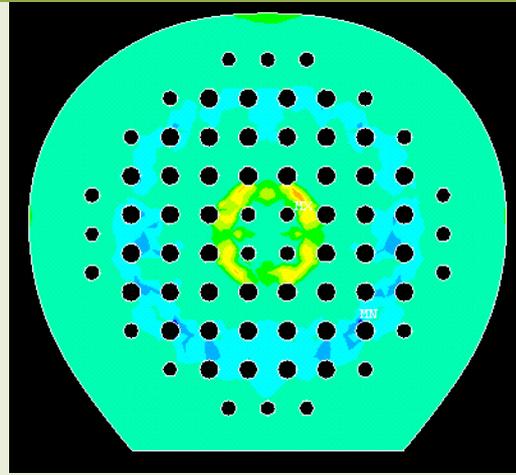
- TENSIONES

#### DISTRIBUCIÓN Y VALOR MÁXIMO



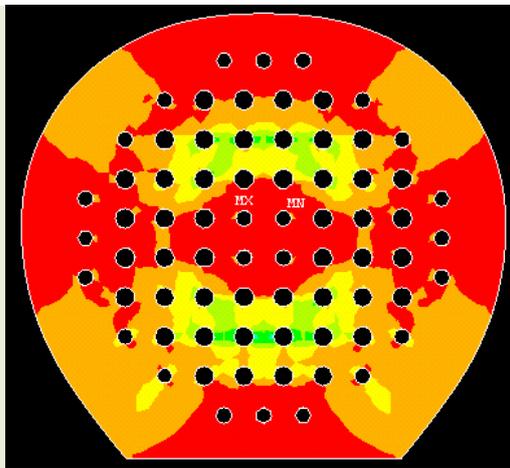
TENSIÓN PRINCIPAL 1:

$$\sigma_I = 4,53 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$



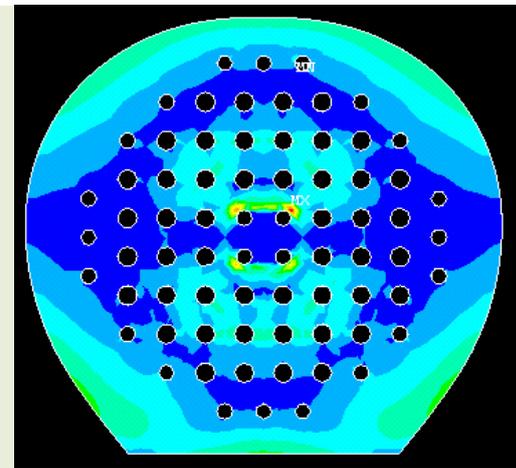
TENSIÓN PRINCIPAL 2:

$$\sigma_{II} = 4,77 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$



TENSIÓN PRINCIPAL 3:

$$|\sigma_{III}| = 3,37 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$

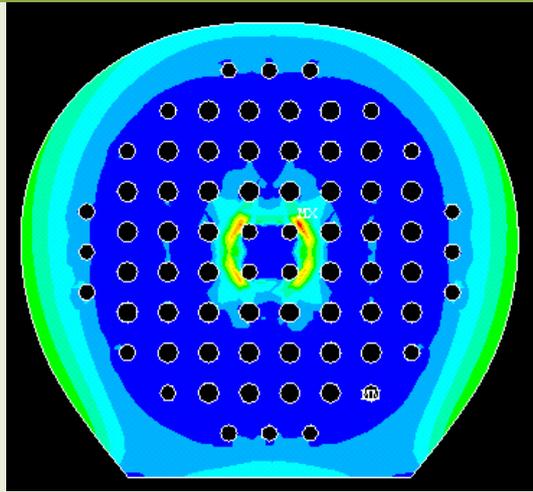


TENSIÓN VON MISES:

$$\sigma_{VM} = 4,50 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$

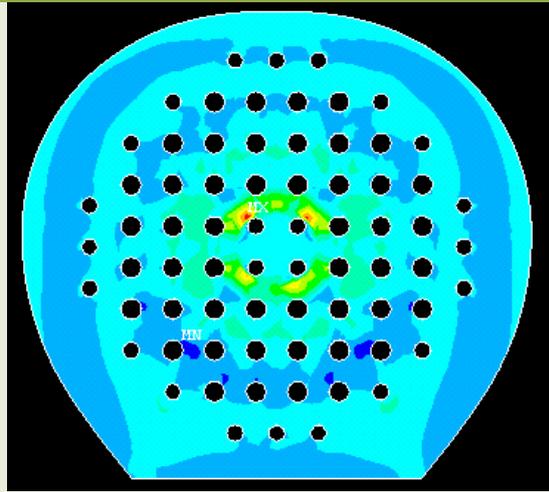
- **DEFORMACIONES**

**DISTRIBUCIÓN Y VALOR MÁXIMO**



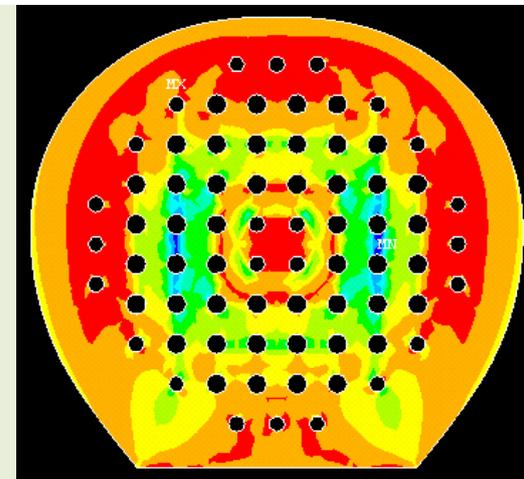
DEFORMACIÓN PRINCIPAL 1:

$$\epsilon_I = 0,001206$$



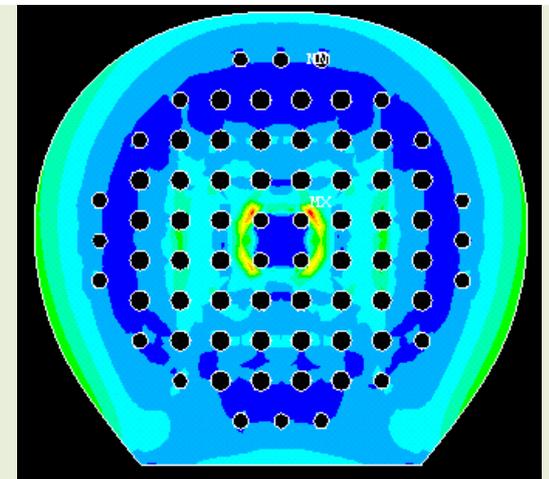
DEFORMACIÓN PRINCIPAL 2:

$$\epsilon_{II} = 0,000435$$



DEFORMACIÓN PRINCIPAL 3:

$$|\epsilon_{III}| = 0,000550$$



DEFORMACIÓN VON MISES:

$$\epsilon_{VM} = 0,001423$$

## 8.12. ANÁLISIS DE LAS SOLICITACIONES MECÁNICAS PARA LA 2ª MODIFICACIÓN PROPUESTA PARA EL AEE

**Tabla 18.** Variación valores pico para las solicitaciones mecánicas analizadas para la segunda modificación de la zona de contacto

SUPERFICIE IMPACTO	LAMINADO	SOLICITACIÓN MECÁNICA	ENSAYO DINÁMICO	ENSAYO ESTÁTICO	DESVIACIÓN
FRONTAL	1	TENSIÓN PRINCIPAL 1	1,7300E+08	1,9100E+08	10,40%
		TENSIÓN PRINCIPAL 2	3,4900E+07	4,0000E+07	14,61%
		TENSIÓN PRINCIPAL 3	4,4800E+07	4,5500E+07	1,56%
		TENSIÓN VON MISES	1,6400E+08	1,8400E+08	12,20%
		DEF. PRINCIPAL 1	4,5580E-03	5,5830E-03	22,49%
		DEF. PRINCIPAL 2	2,1380E-03	2,8070E-03	31,29%
		DEF. PRINCIPAL 3	1,4760E-03	1,8840E-03	27,64%
		DEF. VON MISES	5,1180E-03	6,2510E-03	22,14%
	2	TENSIÓN PRINCIPAL 1	1,4300E+08	1,5300E+08	6,99%
		TENSIÓN PRINCIPAL 2	1,4100E+07	1,4800E+07	4,96%
		TENSIÓN PRINCIPAL 3	4,4600E+07	5,4500E+07	22,20%
		TENSIÓN VON MISES	1,4100E+08	1,5300E+08	8,51%
		DEF. PRINCIPAL 1	2,6740E-03	2,8820E-03	7,78%
		DEF. PRINCIPAL 2	1,0770E-03	9,1400E-04	-15,13%
DEF. PRINCIPAL 3		1,8320E-03	2,5980E-03	41,81%	
DEF. VON MISES		3,1740E-03	3,3830E-03	6,58%	
TRASERA	1	TENSIÓN PRINCIPAL 1	2,2700E+07	2,6600E+07	17,18%
		TENSIÓN PRINCIPAL 2	5,3100E+06	7,3800E+06	38,98%
		TENSIÓN PRINCIPAL 3	1,5500E+07	3,3700E+07	117,42%
		TENSIÓN VON MISES	2,7800E+07	4,1500E+07	49,28%
		DEF. PRINCIPAL 1	9,1000E-04	9,1800E-04	0,88%
		DEF. PRINCIPAL 2	1,9500E-04	2,0300E-04	4,10%
		DEF. PRINCIPAL 3	8,0000E-04	1,4970E-03	87,13%
		DEF. VON MISES	1,0200E-03	1,6870E-03	65,39%
	2	TENSIÓN PRINCIPAL 1	2,3100E+07	4,5300E+07	96,10%
		TENSIÓN PRINCIPAL 2	4,1700E+06	4,7700E+06	14,39%
		TENSIÓN PRINCIPAL 3	2,0900E+07	3,3700E+07	61,24%



		<b>TENSIÓN VON MISES</b>	2,5300E+07	4,5000E+07	77,87%
		<b>DEF. PRINCIPAL 1</b>	7,3700E-04	1,2060E-03	63,64%
		<b>DEF. PRINCIPAL 2</b>	3,7800E-04	4,3500E-04	15,08%
		<b>DEF. PRINCIPAL 3</b>	5,2100E-04	5,5000E-04	5,57%
		<b>DEF. VON MISES</b>	8,3400E-04	1,4230E-03	70,62%