

INFORME

DEPARTAMENTO/UNIDAD: Visión / Visión 3D

INFORME Nº: IV070016

TITULO

**ANÁLISIS ESTRUCTURAL POR ELEMENTOS
FINITOS DEL TORNILLO TPD-2f PARA
IMPLANTES DENTALES**

PETICIONARIO

Empresa: TALLADIUM ESPAÑA
Dirección: PLAÇA D'UTXESA 7, 5È A
Población: LLEIDA
C.P.: 25002
Provincia: LLEIDA
Telf.: 902101347
Fax:

FECHA DE INICIO: 28/05/07

FECHA DE FINALIZACIÓN: 8/06/07

Nº de Anexos: 0



DEPARTAMENTO: Visión / Visión 3D

INFORME Nº: IV070016

- 1. INTRODUCCIÓN**
- 2. ANTECEDENTES**
- 3. OBJETIVOS**
- 4. ANÁLISIS ESTRUCTURAL POR EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS**
 - 4.1. Propiedades mecánicas del material**
 - 4.2. Aplicación de cargas y restricciones de movimiento**
 - 4.2.1. Par de apriete**
 - 4.2.2. Restricción de giro**
 - 4.2.3. Restricción de desplazamiento**
 - 4.3. Modelo de elementos finitos**
 - 4.4. Análisis estructural**
 - 4.5. Resultados**
- 5. CONCLUSIONES**



DEPARTAMENTO: Visión / Visión 3D

INFORME Nº: IV070016

1. INTRODUCCION

Este informe concierne a la última fase de los estudios realizados sobre el tornillo TPD-2f del proyecto *TILITE TALLADIUM ESPAÑA* para la empresa Talladium España y llevado a cabo por AIDO Asociación Industrial de Óptica, Color e Imagen. Esta última fase contempla los análisis estructurales finales con el fin de verificar las modificaciones realizadas sobre el diseño del tornillo TPD-2f en la fase anterior

2. ANTECEDENTES

En las fases previas se habían realizado análisis por el método de los elementos finitos para evaluar la resistencia mecánica de piezas de implantes dentales pertenecientes a la empresa Talladium España. En base a los resultados obtenidos se realizó el rediseño del tornillo TPD-2f.

3. OBJETIVO

El objetivo de esta fase es verificar que las modificaciones realizadas sobre el diseño original del tornillo TPD-2f, aumentan su resistencia mecánica ante los esfuerzos previstos a los que se va a someter la pieza.

4. ANÁLISIS ESTRUCTURAL POR EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

A continuación se detallan los parámetros, simplificaciones y resultados del análisis estructural del tornillo TPD-2f para implantes dentales de la empresa Talladium España, utilizando el método de los elementos finitos a través del módulo Pro/Mechanica del software Pro/Engineer Wildfire 3.0.

4.1. Propiedades mecánicas del material

El material empleado en la fabricación de tornillos para prótesis dentales sobre implantes por la empresa Talladium España es una aleación de titanio alfa-beta; Ti6Al4V de grado 5 en estado de tratamiento térmico de normalizado.

La normativa actual que hace referencia a este tipo de implantes es la *ISO 5832-3 1996. Implantes para cirugía. Materiales metálicos. Aleaciones de Ti-6Al-4V*, la cual especifica los valores mínimos de las características mecánicas del material.

- tensión límite elástico: 780 N/mm²
- tensión de rotura: 860 N/mm²
- deformación a rotura: 10 %

Por otra parte, el cliente aporta información propia sobre las propiedades mecánicas del material que emplea, y como se puede ver a continuación, son valores superiores a los especificados en la norma.

- tensión límite elástico: 811 - 876 N/mm²
- tensión de rotura: 1028 - 1151 N/mm²
- deformación a rotura: 13 - 15 %

No obstante, debido a que no disponemos de una **certificación de los ensayos** para estos valores, y que son **insuficientes** para definir objetivamente el análisis por elementos finitos; se ha decidido **en favor de la seguridad** tomar los valores de la propiedades mecánicas de una base de datos genérica (www.matweb.com), y cuyos valores cumplen con la norma ISO 5823-3

Los valores de las propiedades mecánicas de la aleación Ti-6Al-4V grado 5 ELI (UNS 56401), para el cálculo y diseño del componente para el implante TPD-2F, son los siguientes:



DEPARTAMENTO: Visión / Visión 3D

INFORME Nº: IV070016

Properties	Value	Comment
Physical		
Density, g/cc	4.43	
Mechanical		
Hardness, Brinell	326	Estimated from Rockwell C.
Hardness, Knoop	354	Estimated from Rockwell C.
Hardness, Rockwell C	35	
Hardness, Vickers	341	Estimated from Rockwell C.
Tensile Strength, Ultimate, MPa	860	
Tensile Strength, Yield, MPa	790	
Elongation at Break, %	15	
Modulus of Elasticity, GPa	113.8	
Compressive Yield Strength, MPa	860	
Notched Tensile Strength, MPa	1170	K_t (stress concentration factor) = 3.5
Ultimate Bearing Strength, MPa	1740	$e/D = 2$
Bearing Yield Strength, MPa	1430	$e/D = 2$
Poissons Ratio	0.342	
Charpy Impact, J	24	V-notch
Fatigue Strength, MPa	300	1E+7 cycles, Unnotched
Fatigue Strength, MPa	140	at 1E+7 cycles. K_t (stress concentration factor) = 3.1
Fracture Toughness, MPa-m ^{1/2}	100	K_{IC}
Shear Modulus, GPa	44	
Shear Strength, MPa	550	Ultimate shear strength

Tabla 1- Propiedades Ti -6Al-4V, fuente <http://www.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MTP643>

4.2. Aplicación de cargas y restricciones de movimiento

4.2.1. Par de apriete

Las cargas aplicadas al tornillo TPD-2F son las producidas en el apriete del mismo sobre la estructura del implante dental, a través de una herramienta hexagonal tipo "Allen", con "punta de bola". En el análisis a realizar se ha establecido una serie de simplificaciones en la aplicación de la carga, con el fin de definir una distribución de la superficie de contacto idealizada, entre herramienta y tornillo:

- el contacto se produce sobre la mitad de las seis caras y en toda su longitud axial, del prisma hexagonal interno que conforman la cabeza del tornillo.
- La fuerzas distribuida en cada una de las seis superficie son iguales en magnitud y dirección tangencial al eje axial del tornillo

En la siguiente imagen se puede observar la localización y dirección de los vectores de la fuerza distribuida en la superficies.



DEPARTAMENTO: Visión / Visión 3D

INFORME Nº: IV070016

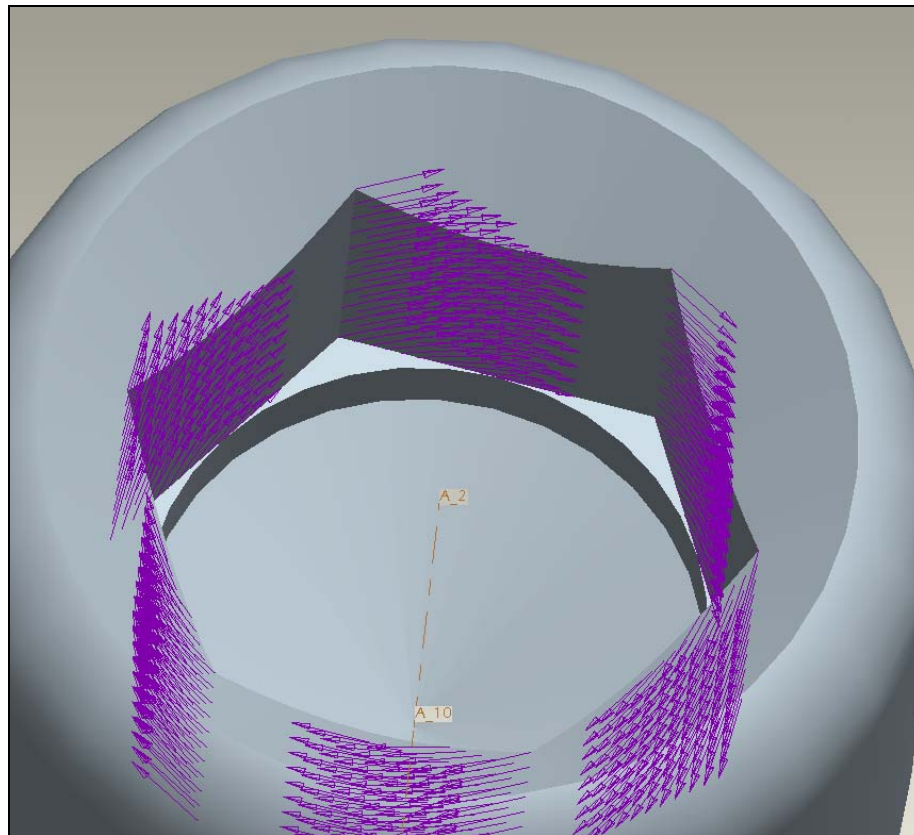


Ilustración 1 - Aplicación de las fuerzas generadas en el apriete del tornillo

El valor de la fuerza distribuida sobre las superficies se ha determinado a partir del par de apriete máximo indicado por el fabricante, que es de 35 N·cm, de la siguiente manera.

El sumatorio de momentos generados por todas las fuerzas distribuidas en la superficie ha de ser igual al par de apriete,

$$\sum M_i = 6 \cdot M_i = 35 \text{ N}\cdot\text{cm} = 350 \text{ N}\cdot\text{mm}$$

... por lo tanto, sobre cada superficie de apoyo se aplica una sexta parte del par de apriete total.

$$M_i = \frac{350}{6} \approx 58.3 \text{ N}\cdot\text{mm}$$

El par de apriete genera sobre la superficie de apoyo una fuerza distribuida que depende de la distancia al eje de giro (axial) del tornillo, como esta permanece constante la fuerza también lo será en cuanto a magnitud, y su valor viene determinado por la siguiente expresión:

$$M_i = F_i \cdot d \rightarrow F_i = \frac{M_i}{d} = \frac{58.3 \text{ N}\cdot\text{mm}}{0.65 \text{ mm}} \approx 89.7 \text{ N}$$

... siendo $d = 0.65 \text{ mm}$ la distancia entre el eje axial y la superficie de apoyo de la herramienta según se muestra en la siguiente figura.



DEPARTAMENTO: Visión / Visión 3D

INFORME Nº: IV070016

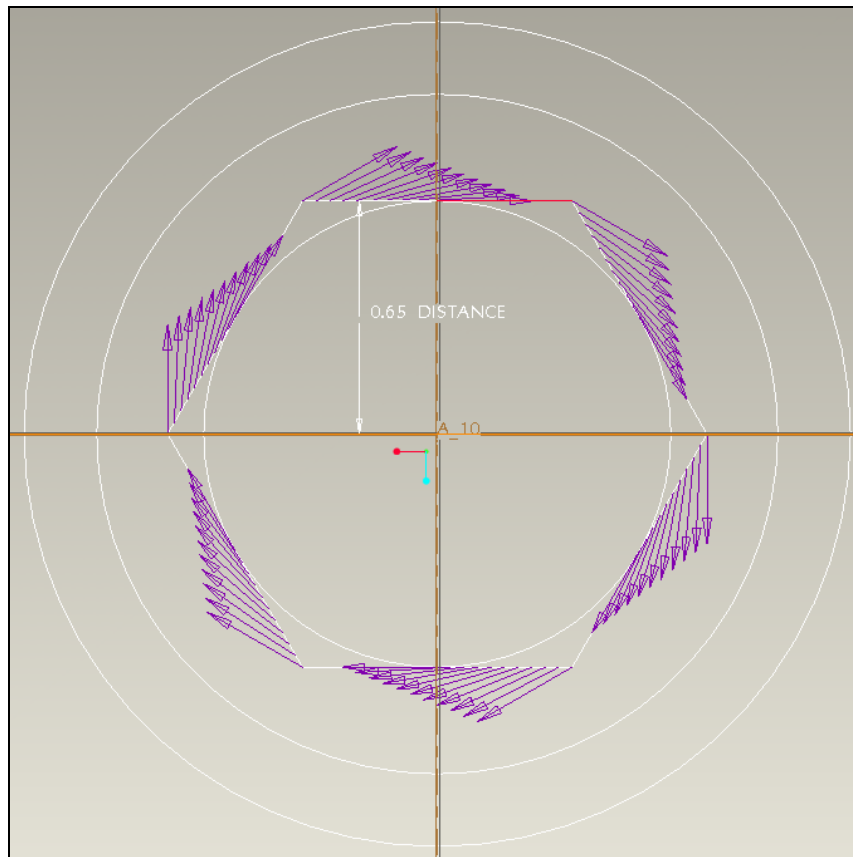


Ilustración 2 - Distancia entre eje axial y superficie de apoyo

4.2.2. Restricción de giro

Por el propio sistema de sujeción del tornillo, **el giro queda impedido por las fuerzas de rozamiento** generadas sobre las superficies de la hélice y la de la base de la cabeza del tornillo en contacto con el implante dental.

Con el fin de representar esta acción, se imposibilita el giro alrededor del eje axial del tornillo de las superficies resaltadas en las siguientes imágenes.



DEPARTAMENTO: Visión / Visión 3D

INFORME Nº: IV070016

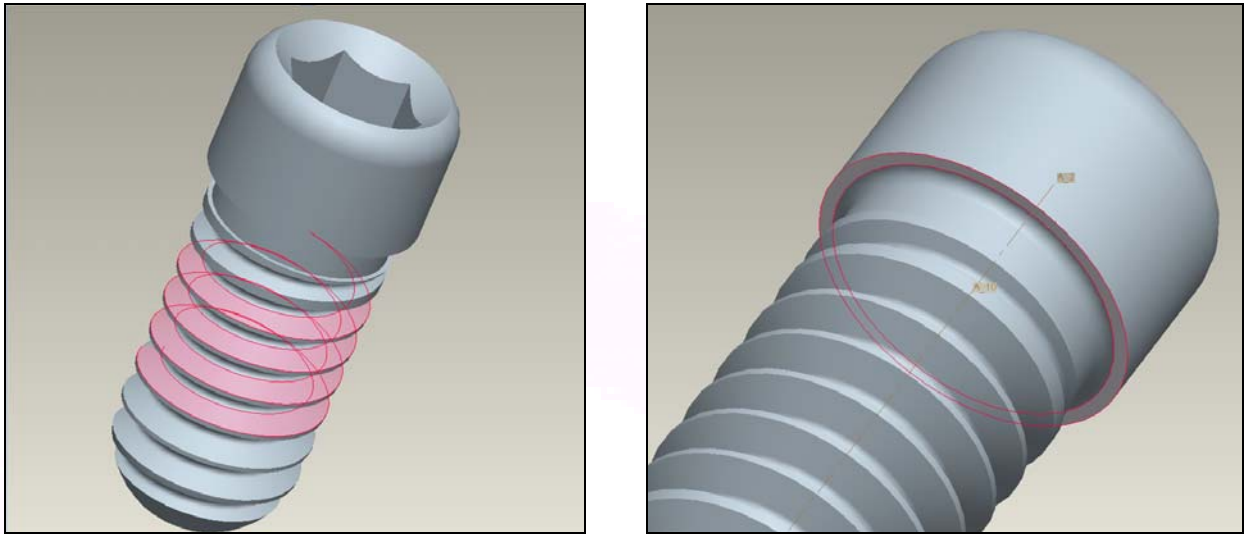


Ilustración 3 - Superficies restringidas en el giro

4.2.3. Restricción de desplazamiento

En el mismo supuesto anterior, la superficie de la hélice no está contenida en un plano perpendicular al eje de giro a diferencia de la base de la cabeza del tornillo. En este caso los esfuerzos de fricción que imposibilitan el giro sobre la superficie helicoidal, también **imposibilitan el desplazamiento en la dirección axial** de la misma.

Así mismo, podría tenerse en cuenta la restricción en esta dirección de la base de la cabeza del tornillo. No obstante, con el fin de evitar un modelo demasiado rígido por una restricción masiva que provoque resultados no coherentes, se ha descartado esta restricción.

Por último, para resolver el modelo numérico del mallado es necesario que estén restringidos los movimientos en todos los grados de libertad del espacio (tres desplazamientos y tres rotaciones). Es por ello, para que una vez más una restricción excesiva no afecte a los resultados, se ha impedido el todos los movimientos en un punto alejado de las zonas de mayor interés en el estudio de las tensiones. Este punto está situado sobre el centro de la superficie del casquete esférico que forma la punta del tornillo.

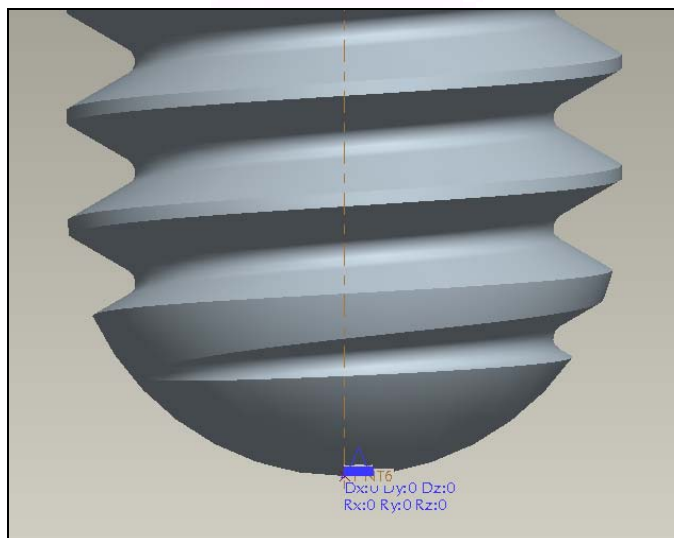


Ilustración 4 - Punto restringido completamente



DEPARTAMENTO: Visión / Visión 3D

INFORME Nº: IV070016

4.3. Modelo de elementos finitos

Para construir la malla de elementos finitos se ha empleado elementos sólidos tetraédricos tipo “p”, con comportamiento isotrópico y seis grados de libertad por nodo.

El tamaño de los elementos se ha fijado mediante una distribución uniforme de nodos sobre las entidades geométricas próximas a la parte inferior de la cabeza del tornillo, con el fin de obtener una definición aceptable de las tensiones en esta zona de estudio. En la siguiente imagen se puede apreciar las entidades sobre las cuales se ha definido el número de nodos y a partir de estos el tamaño de los elementos.

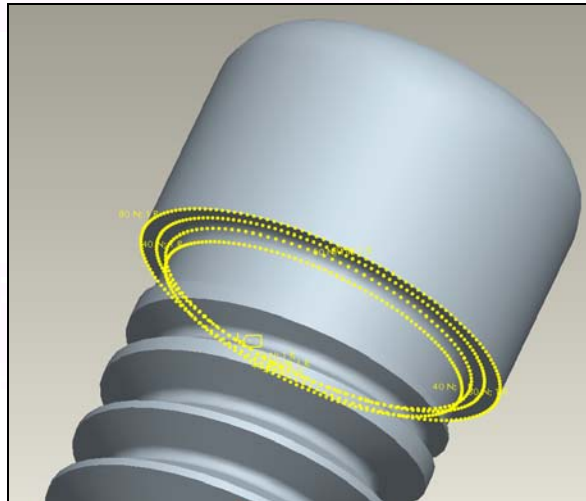


Ilustración 5 - Definición del número de nodos sobre la geometría

El mallado del modelo se genera automáticamente definidos los parámetros anteriores, con un computo total de 4476 elementos y 1531 nodos.

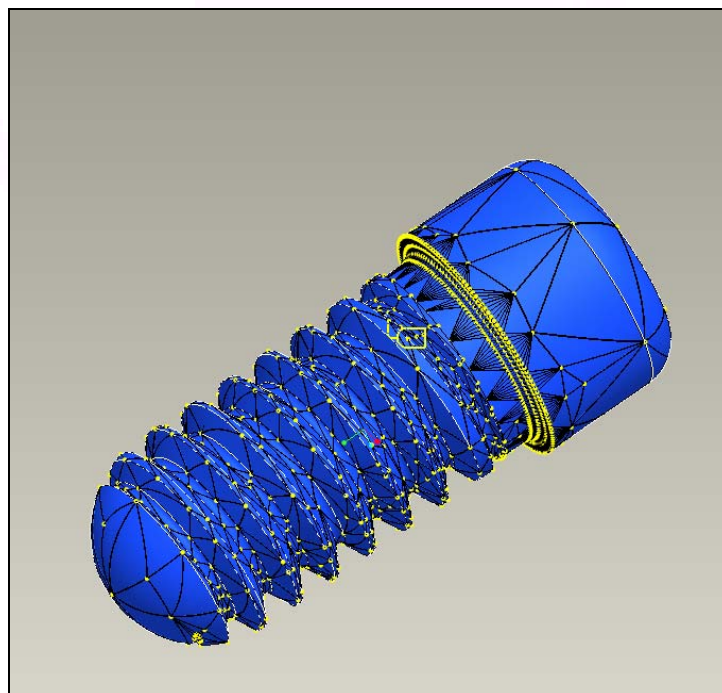


Ilustración 6 - Modelo de elementos finitos



DEPARTAMENTO: Visión / Visión 3D

INFORME Nº: IV070016

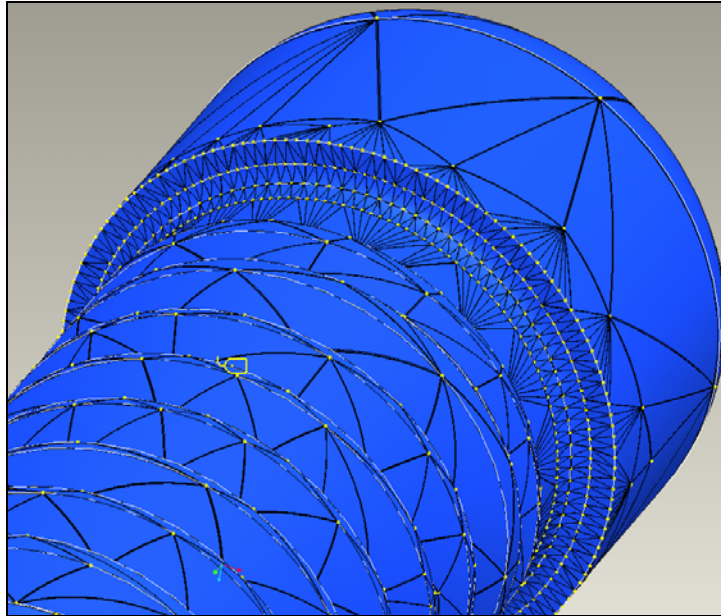


Ilustración 7 - Detalle de las zonas con malla más fina

4.4. Análisis estructural

El modelo numérico del modelo geométrico ya mallado en elementos finitos se resuelve mediante el análisis estático, y con la condiciones de carga y restricciones anteriormente descritas.

El método de resolución elegido se basa en la resolución del modelo numérico de elementos finitos ajustando el grado p de los elementos con el fin de obtener el nivel de convergencia establecido. Para este análisis se ha establecido un nivel de convergencia entre soluciones sucesivas de un 10% para desplazamientos locales, energía de deformación local y la raíz cuadrática media global de tensiones. En cuanto al orden p de los elementos, se ha fijado el intervalo entre 1 y 9, es decir las aproximaciones a la solución se realizan mediante ecuaciones polinomiales de hasta orden 9.



DEPARTAMENTO: Visión / Visión 3D

INFORME Nº: IV070016

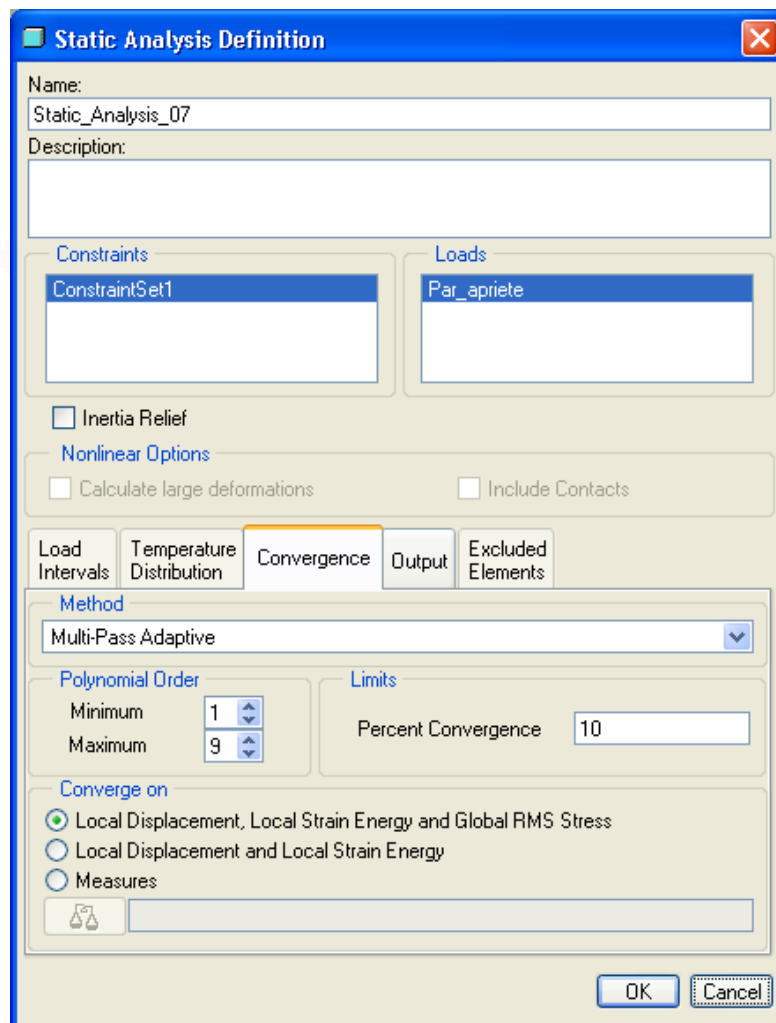


Ilustración 8 - Ventana de configuración de análisis estático

4.5. Resultados

Finalizado el análisis según la configuración del punto anterior, el índice global del error cuadrático medio de las tensiones se encuentra por debajo del 9.7%. Es decir que para el valor de las tensiones calculadas en el análisis existe una incertidumbre del $\pm 9.7\%$.

Los resultados que nos interesan extraer son:

- tensión equivalente de von Mises
- índice de fallo

Con el primer resultado podremos analizar la distribución de tensiones originadas por el esfuerzo de apriete, permitiéndonos identificar y las zonas más críticas y cuantificar el nivel tensional al que se somete la pieza en esa zona.

En el segundo resultado comparamos directamente mediante la teoría de fallo para materiales dúctiles (von Mises), las tensiones generadas con la tensión límite elástica del material que se había definido el punto "Propiedades mecánicas del material" (790 N/mm^2) a través de la siguiente expresión.

$$\text{Índice de fallo} = \text{tensión de von Mises} / \text{tensión límite elástico}$$



DEPARTAMENTO: Visión / Visión 3D

INFORME Nº: IV070016

Al visualizar los resultados correspondientes a la tensión equivalente de von Mises, se aprecia claramente que existe dos zonas donde los valores de la tensión son más elevados.

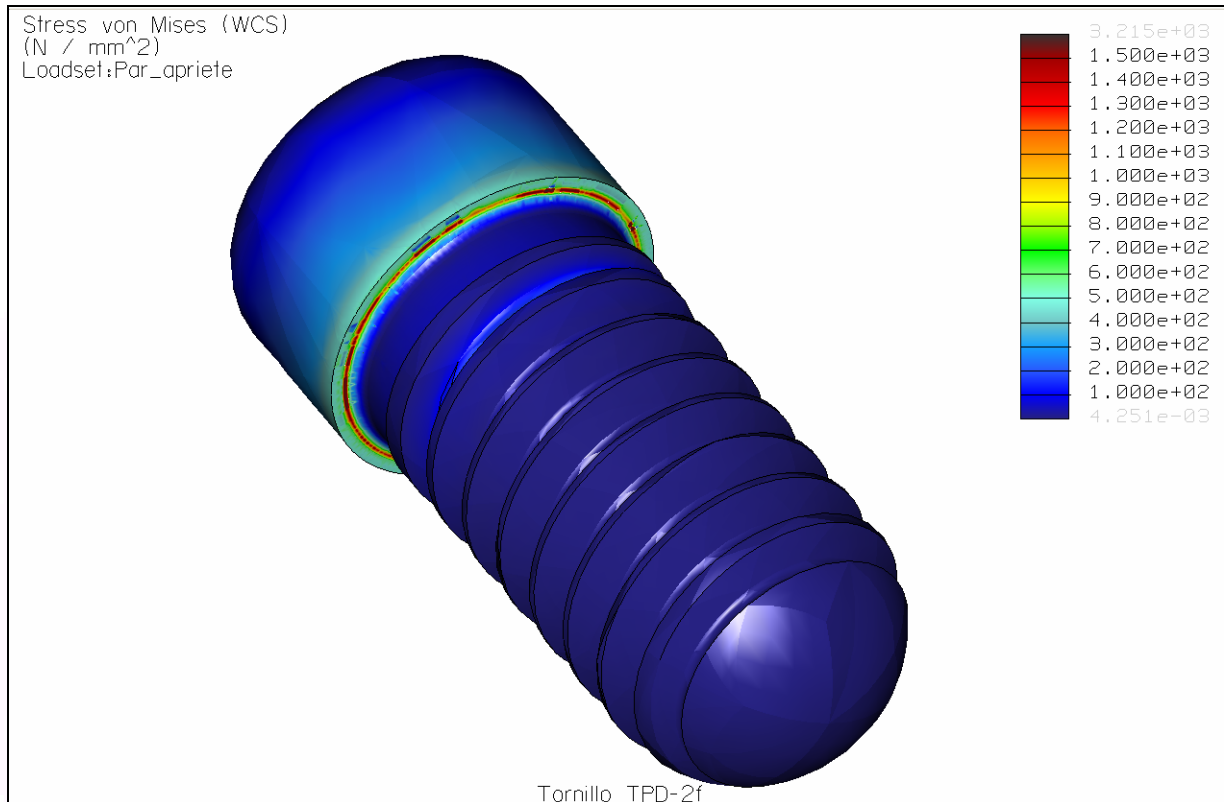


Ilustración 9 - Distribución de tensiones de von Mises en la base de la cabeza del tornillo

La primera es en la base de la cabeza del tornillo, donde a la vez destaca una línea en la parte inferior con una elevada concentración de tensiones. Este efecto no es significativo ya que es una singularidad propia de las restricciones impuestas y el análisis por elementos finitos. Esto se explica debido a que las restricciones se han aplicado en la superficie plana de la parte inferior de la cabeza del tornillo (es decir, la que apoya sobre el implante dental) y al mallar el modelo geométrico los nodos se ubican sobre las curvas que cierran estas superficies. Estos nodos tiene impedido el giro alrededor del eje axial del tornillo a diferencia de los nodo situados en las curvas de las superficies adyacentes del modelo geométrico que conforman el redondeo entre la cabeza y la caña del tornillo. Al existir un elevado gradiente de tensiones en dirección radial, las aproximaciones numéricas de los elementos tipo p empleados no alcanzan a definirlo en las proximidades de curva, apareciendo la singularidad que provoca la concentración de tensiones. Es te efecto podría reducir empleando elementos tipo h con tamaños de elementos mas pequeños y una mayor densidad de nodos en esa zona. No obstante, prescindiríamos de la ventaja de los elementos tipo p, capaces de ajustarse mejor a geometrías complejas. En resumen, conociendo estas limitaciones y las causas que provocan este efecto, no lo tendremos en cuenta como una concertación de tensiones característica de la pieza.

Desestimando este aspecto se observa que el valor de las tensiones de von Mises en esta zona se encuentran ente el intervalo de 500 a 600 N/mm², atendiendo a la leyenda cromática, y por debajo del limite elástico del material que se encuentra próximo a los 800 N/mm².

Las tensiones que visualizamos son las generadas en los puntos de la superficie exterior y como puede verse en la siguiente imagen son mayores que las producidas en el interior de la pieza. Esto es debido al propio esfuerzo de torsión que provoca el apriete, donde las tensiones mayores se producen en los puntos más alejados del eje de torsión, como se explica a continuación:



DEPARTAMENTO: Visión / Visión 3D

INFORME Nº: IV070016

Las tensiones cortantes provocadas por los esfuerzos de torsión se determinan a través de la siguiente expresión de la teoría de resistencia de materiales,

$$\tau = \frac{M \cdot r}{J}$$

... donde M es el par de apriete aplicado, r es el radio y J es el momento de inercia polar, siendo las tensiones directamente proporcionales al radio. Justificando que para puntos mas alejados del centro, mayores tensiones.

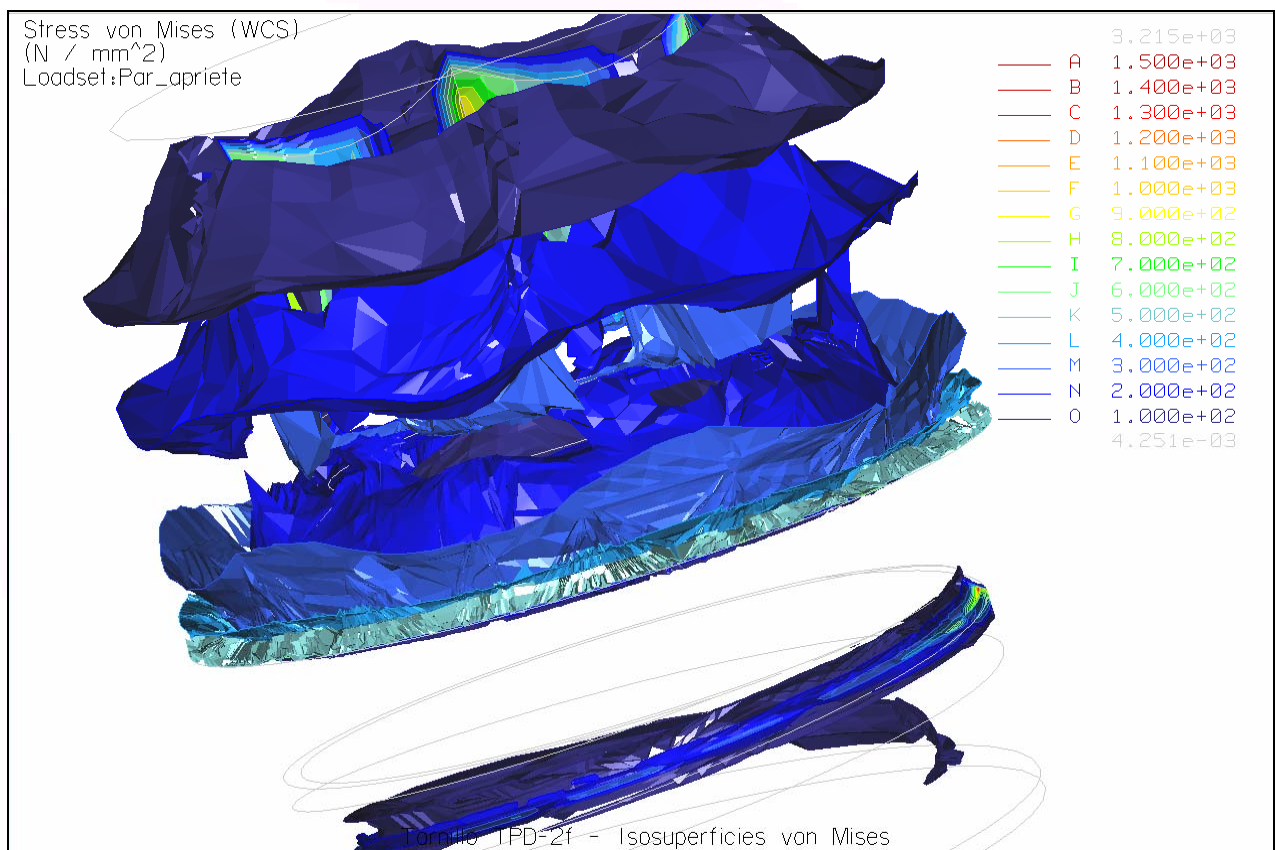


Ilustración 10 - Isosuperficies de tensiones de von Mises

En el caso del índice de fallo se observa una distribución similar al de las tensiones, y excluyendo igualmente la misma zona concentración de tensiones comentada previamente, el índice de fallo se establece entre 0.5 y 0.6.



DEPARTAMENTO: Visión / Visión 3D

INFORME Nº: IV070016

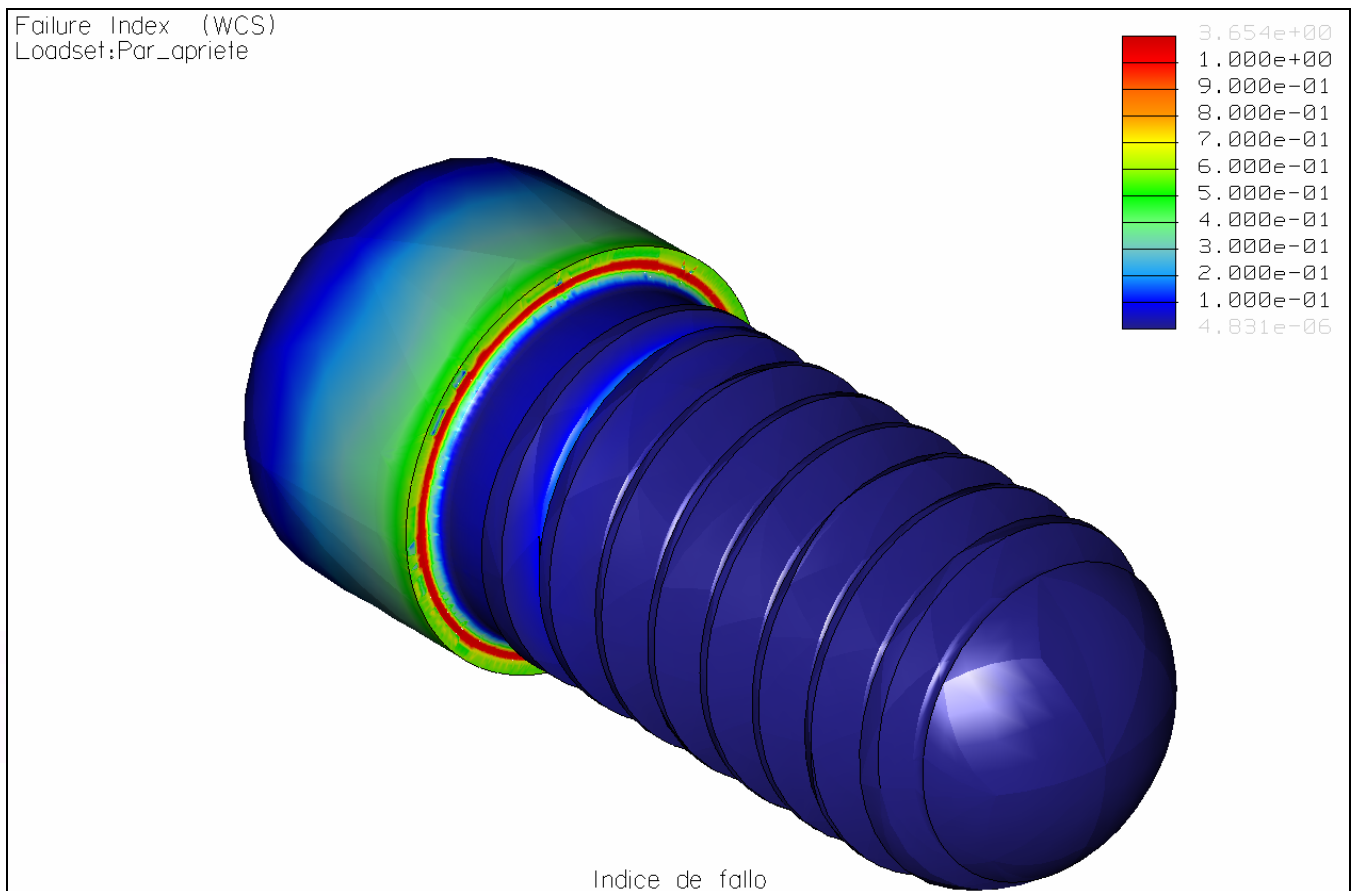


Ilustración 11 - Distribución del índice de fallo

Un estudio más detallado de las tensiones de von Mises y el índice de fallo, sobre una zona representativa del modelo nos aportan un valor característico que nos permita extraer las conclusiones a posteriori. Se ha tomado como zona representativa para la toma de valores la arista inferior de la cabeza del tornillo y se representan en las siguientes gráficas

En el gráfico se muestra en color azul y línea continua el valor de las tensiones y en color naranja el valor del índice de fallo en los nodos situados sobre la arista. Las líneas discontinuas son el promedio de estas magnitudes siendo para las tensiones de von Mises de 500 N/mm^2 y para el índice de fallo de 0.63.



DEPARTAMENTO: Visión / Visión 3D

INFORME Nº: IV070016

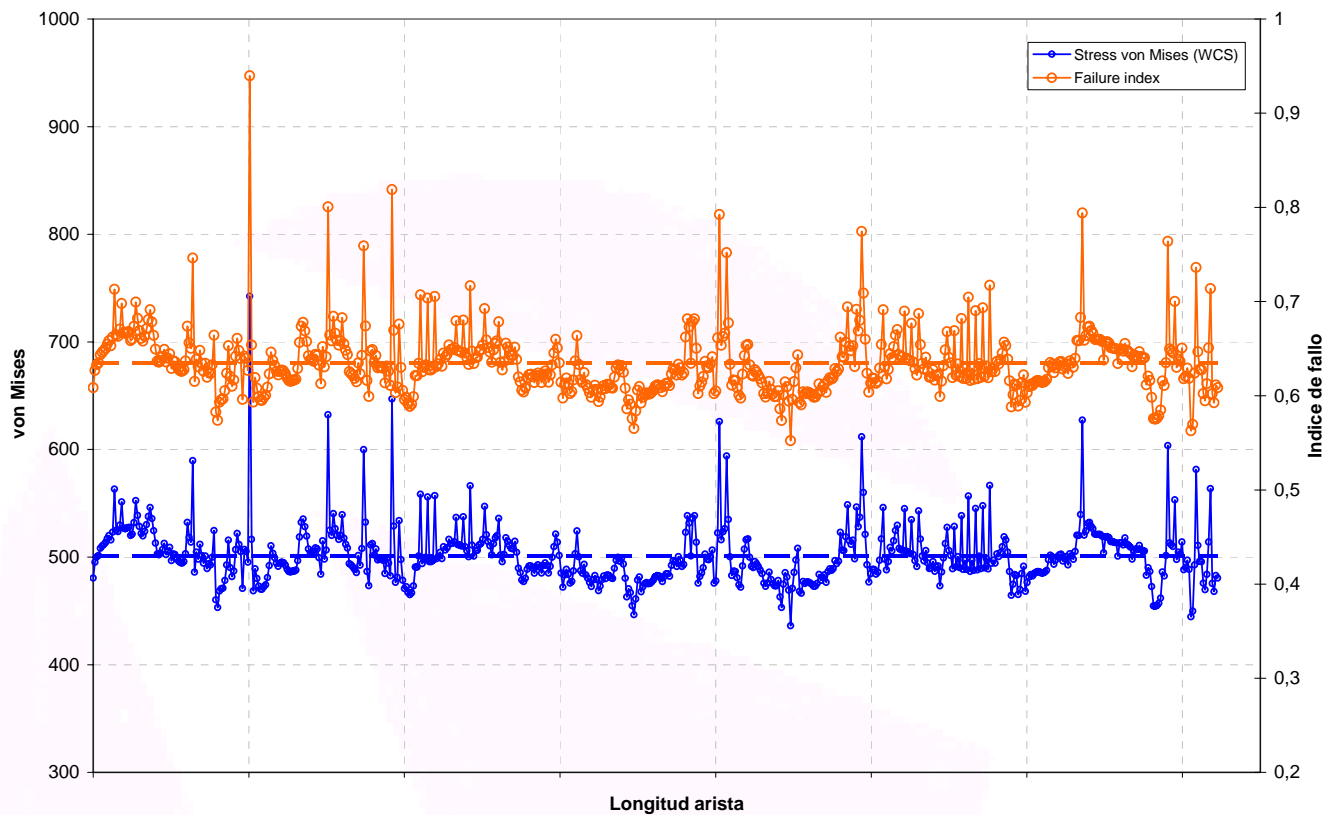


Ilustración 12 - Gráfico valores nodales de von Mises e índice de fallo

Otra zona donde se observan valores de tensiones elevados son las zonas donde se han aplicado las fuerzas que simulaban el contacto con la herramienta. Atendiendo a las simplificaciones realizadas en la aplicación de cargas expuestas en apartados anteriores, estos resultados no son determinantes a la hora de evaluar la resistencia mecánica de esta zona por las siguientes razones:

- la aplicación de cargas y las superficies de apoyo son una aproximación idealizada
- no se tiene en cuenta en el análisis la dureza superficial del material, ni su comportamiento plástico



DEPARTAMENTO: Visión / Visión 3D

INFORME Nº: IV070016

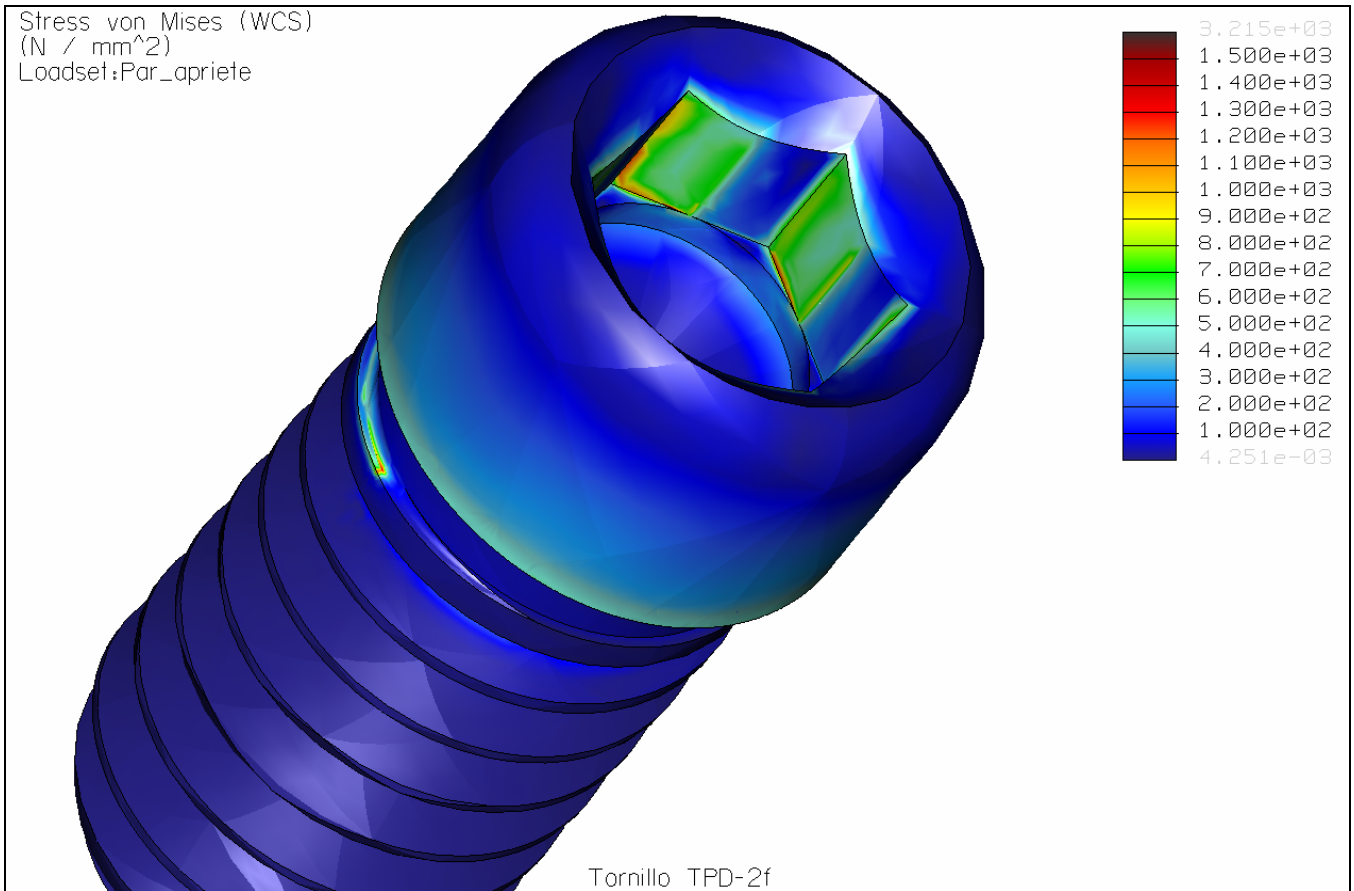


Ilustración 13 - Distribución de tensiones de von Mises sobre las superficies de apoyo de la herramienta



DEPARTAMENTO: Visión / Visión 3D

INFORME Nº: IV070016

5. CONCLUSIONES

Las modificaciones efectuadas sobre el diseño del tornillo TPD-2f aumentan la resistencia mecánica para los esfuerzos previstos, con respecto al diseño anterior.

En el análisis por elementos finitos se ha considerado una aplicación de fuerzas estáticas debido a los esfuerzos realizados en la fijación y apriete de los implantes dentales de la empresa Talladium España. Los resultados obtenidos muestran que las tensiones originadas por dichas acciones (500 N/mm^2) se encuentran por debajo de la tensión límite elástica del material (790 N/mm^2), a partir de la cual las deformaciones provocadas hacen que la pieza quede inutilizable.

El índice de fallo (0.63) obtenido a partir de la teoría de fallo de von Mises o Energía de la Distorsión es suficiente para las acciones previstas. No obstante, si aparecen cargas variables en el tiempo durante la vida en servicio de la pieza, sería necesario el enfocar un análisis a fatiga para comprobar su resistencia mecánica bajo estas condiciones.

Por otra parte, el análisis realizado no es determinante para evaluar la resistencia mecánica de la cabeza del tornillo, ya que en esta zona se produce el contacto de la herramienta y el tornillo. Las simplificaciones realizadas en este contacto son solamente aproximaciones idealizadas, y sería necesario el realizar un análisis específico sobre esta zona para que fuese concluyente y tuviese en cuenta las distintas variables como: superficies de contacto, y dureza de los materiales de herramienta y tornillo.

Sin embargo, por las tensiones alcanzadas en estas superficies (entre 700 y 800 N/mm^2) deducimos que no supondrá la falla de esta parte de la pieza. La resistencia superficial por esfuerzos de contacto de los materiales está relacionada con la dureza que adquiere la superficie, por ejemplo para un acero de dureza similar al de la aleación Ti-6Al-4V en estado normalizado, 320 HB aproximadamente, tiene una resistencia superficial equivalente de 1000 N/mm^2 . Esta resistencia es superior a las tensiones que se han obtenido en el análisis de los elementos finitos y bajo este criterio se deduce que no se produciría daño en la pieza.



DEPARTAMENTO: Visión / Visión 3D

INFORME Nº: IV070016



* AIDO garantiza la confidencialidad de los datos reflejados en este informe

* Este informe no será válido si presenta tachaduras o enmiendas.

* Queda prohibida la reproducción total o parcial de este informe en cualquier medio o por cualquier medio sin el consentimiento expreso de AIDO y del peticionario.

Responsable del Informe:

Fecha, firma y cargo.

Revisor del informe:

Fecha, firma y cargo