

# REVISTA ESPAÑOLA ODONTOESTOMATOLÓGICA DE IMPLANTES

---

## ORIGINALES

- Diseño y desarrollo de componentes protésicos dentales del sistema de pilar dinámico, mediante ingeniería asistida por ordenador (CAE)
- Implante cigomático extrasinusal
- Márketing para secretarías de una consulta dental

## CASO CLÍNICO

- Resolución quirúrgica y protésica de gran atrofia mandibular combinando dos técnicas implantarias



Órgano Oficial  
de la Sociedad Española  
de Implantes

---

• Número 2 • Volumen XVI • Junio 2008

# Diseño y desarrollo de componentes protésicos dentales del sistema de pilar dinámico, mediante ingeniería asistida por ordenador (CAE)\*

*Design and development of dental prosthetic components for dynamic abutments, by means of computer aided engineering (CAE)*

## RESUMEN

El Pilar Dinámico® es un nuevo concepto para soluciones protésicas dentales a los existentes en el mercado, que palia los problemas de angulación de los implantes y la colocación de piezas intermedias (pilares angulados de titanio, transepiteliales angulados, pilares individualizados) que corrijan la angulación para después realizar la prótesis sobre ellas, reduciendo el coste y tiempo de fabricación de la prótesis.

En el desarrollo de esta solución innovadora se han utilizado materiales adecuados a la aplicación y a la normativa existente como es el Tilitite® (aleación biocompatible) y de herramientas de diseño e ingeniería asistida por ordenador, las cuales han permitido desarrollar el producto de forma más rápida y fiable, previniendo posibles defectos y debilidades de los componentes protésicos del Pilar Dinámico® en cuanto criterios resistencia y fiabilidad, en las fases previas del diseño.

Las simulaciones del comportamiento mecánico de los componentes protésicos del Pilar Dinámico®, en especial los tornillos, se ha realizado mediante análisis por elementos finitos contemplando las condiciones de carga más críticas que son las que se producen durante la colocación y apriete de los mismos.

**Palabras clave:** Odontología. Prótesis dentales. Tecnología dental. Diseño de prótesis dentales. Reparación de prótesis dentales.

## ABSTRACT

Dynamic Abutment® is a new concept of dental prosthesis for at the covered market, that suppress inaccurate angle problems of the root-form endosseous dental implants and auxiliary devices (bend titanium abutments, simple abutments, etc.) correct the angle for build the dental prosthesis after, cutting down cost price and making time.

At the development of this innovative appliance has used suitable materials for the application and current regulations just like is Tilitite® (biocompatibility alloy) and computer aided design and engineering tools. Theses have allowed develop the product earliest and more reliable, preventing possible faults and weakness of the Dynamic Abutment® components in terms strength and reliability, at the early design stages.

The mechanic behaviour simulations of the Dynamic Abutment® components, especially screws, have carried out by means of finite elements analysis taking into account the worst loads set which are when fit and tightened them.

**Key words:** Dentistry. Dental prosthesis. Dental technology. Dental prosthesis design. Dental prosthesis repair.

\*Entidades colaboradoras: Tallodium España, AIDO Instituto Tecnológico de Óptica, Color e Imagen. CDTI Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio

Esteban Xam-mar<sup>1</sup>  
Luis Granero<sup>2</sup>  
Francisco M. López Esteve<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Técnico Especialista en Prótesis Dental Talladium España  
<sup>2</sup>Licenciado en Física AIDO Instituto Tecnológico de Óptica, Color e Imagen  
<sup>3</sup>Ingeniero de Materiales AIDO Instituto Tecnológico de Óptica, Color e Imagen

CORRESPONDENCIA:  
Francisco Manuel López Esteve  
AIDO Instituto Tecnológico de Óptica  
Color e Imagen. Parque Tecnológico,  
Nicolás Copérnico 7-13  
46980 Paterna, Valencia

INTRODUCCIÓN

Hasta ahora las soluciones protésicas para implantología existentes en el mercado, para la técnica de sobrecolado, se restringen a aditamentos calcinables y aditamentos con la base mecanizada en oro. Dichas piezas limitan la solución a problemas de angulación de los implantes, no pudiendo trabajar directamente sobre el problema y teniendo que colocar piezas intermedias (pilares angulados de titanio, transeptiliales angulados, pilares individualizados...) que corrijan la angulación para después realizar la prótesis sobre ellas, incrementando el coste y tiempo de fabricación de la prótesis.

La solución propuesta de Pilar Dinámico® con el compuesto Tilite® de Talladium; aleación médicamente pura biocompatible aprobada por la FDA (Food and Drugs Administration), certificada en la ISO 9002 y con el marcado CE, con el que se

presentan estas bases mecanizadas para sobrecolar, revoluciona la implantología por su posibilidad de atornillar en angulación (Figura 1).

El Pilar Dinámico® consta de dos piezas, base y chimenea, conectadas entre si con un codo semiesférico, que sirve de articulación y la chimenea puede pivotar sobre la semiesfera de la base. Esta movilidad permite corregir la inclinación de los pilares en  $\pm 20^\circ$  en todas las direcciones respecto a la orientación del implante endoóseo, solucionando los problemas de angulación de manera rápida, sencilla y en una sola fase, además de no comprometer la estética de la prótesis dental. Ambas piezas pueden ser de material plástico calcinable, aunque para la base se suele emplear el Tilite® por su compatibilidad con los tejidos vivos (Figuras 2-4).



Figura 1. Compuesto Tilite con Titanio

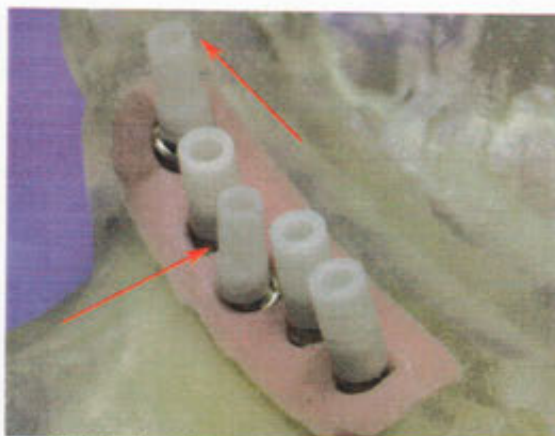


Figura 3. Aplicación del Pilar Dinámico® y corrección de la emergencia del tornillo

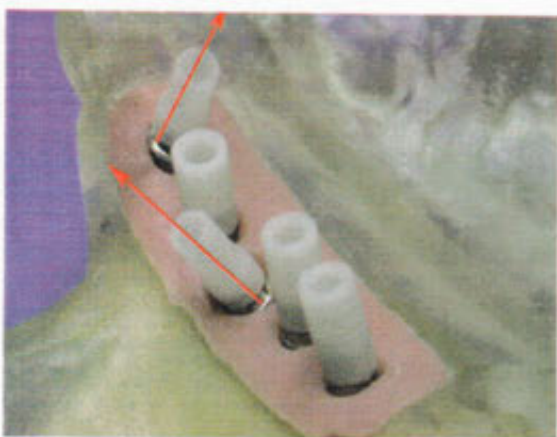


Figura 2. Caso 1. Implantes en 14, 16 problema de inclinación. Problemática emergencia de los tornillos



Figura 4. Caso solucionado. Modelado y colado, en una sola fase

El diseño del Pilar Dinámico® se ha llevado a cabo empleando herramientas de CAD (Computer Aided Design) en 3D, lo que ha permitido un desarrollo del producto más rápido y fiable, ya que al mismo tiempo que se realizaban las modificaciones en el diseño se comprobaba la funcionalidad de la articulación y su principal característica: la movilidad (Figuras 5-8).

La fijación del Pilar Dinámico® se realiza mediante una unión atornillada al implante. Los tornillos empleados son de una aleación de Ti-6Al-4V grado 5 ELI (Extra Low Interstitial) en estado de recocido (700-785°C), con una cantidad de impurezas prácticamente nula, especialmente en oxígeno y hierro.

Este componente es el que sufre en mayor medida esfuerzos mecánicos, generados principal-

mente en la colocación y posterior sujeción del Pilar Dinámico®. Es por ello que sea necesario el garantizar su resistencia. Las uniones atornilladas se fundamentan en el uso de unos elementos roscados, en este caso el tornillo y el implante endoóseo, que ejercen una presión suficiente sobre la base del Pilar Dinámico® con el fin de asegurar la unión de ambas piezas. Para ello se aplica un giro y un par de apriete al tornillo mediante una herramienta especial, que presiona la base del pilar sobre el implante. Esta presión, o también llamada precarga de apriete, y las fuerzas de rozamiento generadas en las superficies en contacto, impiden el aflojamiento de la unión.

El análisis por elementos finitos permite el evaluar la resistencia mecánica sobre el modelo CAD

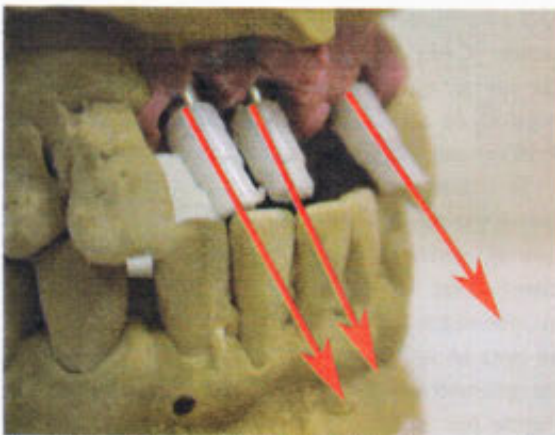


Figura 5. Caso 2. Puente de 12-22. Aplicando los pilares sobrecolables tenemos un problema estético por la emergencia de los tornillos



Figura 7. Modelado del caso. Emergencia lingualizada

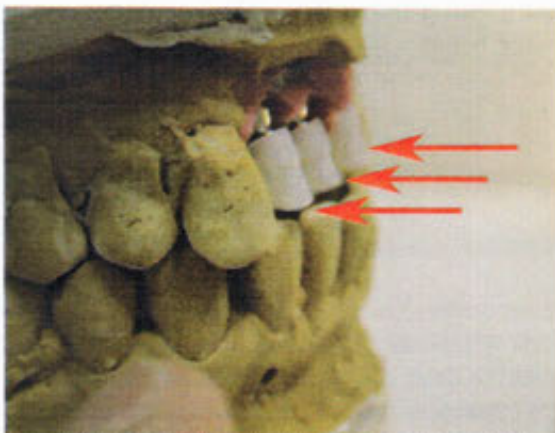


Figura 6. Colocamos 3 Pilares Dinámicos® y los angulamos, solucionando el caso fácilmente



Figura 8. Caso 2 solucionado sobre 3 pilares dinámicos

del tornillo de manera precisa y localizada en las fases previas del diseño, analizando las posibles debilidades y causas de fallo, como pueden ser concentración de tensiones, deformaciones permanentes o su sensibilidad al fallo por fatiga.

La incorporación de las herramientas de CAD y CAE en el desarrollo del Pilar Dinámico® han hecho posible el alcanzar la solución y el cumplimiento de requisitos que se pretendían en los primeros prototipos y pruebas, que han validado los diseños y estudios realizados. De manera inherente se han reducido los tiempos y costes en el desarrollo e innovación de este novedoso y revolucionario producto para la elaboración prótesis dentales.

### MATERIAL Y MÉTODO

#### Tecnología CAD-CAE

El diseño innovador del Pilar Dinámico® se ha llevado a cabo mediante la herramienta de diseño mecánico asistido por ordenador (CAD) ProEngineer Wildfire 3, que ha servido para el modelado en tres dimensiones de cada una de las piezas que lo componen, su ensamblaje y el estudio del mecanismo de la unión que le permite orientarse alrededor del eje axial del implante (Figura 9).

El diseño de todos los componentes del Pilar Dinámico® con esta herramienta de CAD es paramétrico. Es decir, que todas las entidades geométricas que definen la pieza están gobernadas por una o varias cotas. Esto posibilita que la geometría



Figura 9. Diseño tridimensional en distintos estados de visualización; alámbrico para la chimenea y sombreado para la base

y dimensiones de la pieza se modifiquen rápidamente, ajustándose a las necesidades del proceso de diseño.

El ensamblado de las piezas se realiza teniendo como referencia las propias entidades geométricas como pueden ser superficies, aristas y vértices. Lo que permite verificar rápidamente si existían interferencias entre los componentes, así como definir las tolerancias dimensionales de los ajustes con el fin de asegurar la correcta funcionalidad.

Los modelos CAD son el punto de partida para la posterior simulación de los esfuerzos que van actuar sobre las distintas piezas. El modelo tridimensional actúa como un prototipo virtual sobre el que se realizan pruebas y se analizan los resultados, sin la necesidad de llegar a fabricar el prototipo físico.

La herramienta de ingeniería asistida por ordenador (CAE) para el estudio de la resistencia de las piezas que componen el Pilar Dinámico® el modulo de análisis por elementos finitos (MEF) de ProEngineer Wildfire 3, denominado ProMechanica.

El análisis por elementos finitos es un método numérico de cálculo que sirve para simular el comportamiento físico de un objeto bajo unas condiciones de contorno específicas, idealizando su geometría en un modelo matemático. El MEF se basa en la división de un objeto en "elementos" de geometría sencilla, cuyo comportamiento está regido por ecuaciones diferenciales que describen el fenómeno físico. Estos "elementos" tienen formas básicas (líneas, cuadrados, tetraedros,...) que se ajustan a la geometría del objeto, interconectándose entre ellos a través de puntos en común denominados nodos, y formando una malla tridimensional. Sobre esta malla de elementos finitos se le atribuye las condiciones de contorno (restricciones de movimiento, fuerzas, temperaturas, etc.). El modelo matemático de la malla, se representa como un sistema matricial que se resuelve mediante técnicas numéricas (Figura 10).

#### Planteamiento y análisis

El diseño del nuevo pilar para la ubicación del implante debía cumplir los siguientes requisitos:

- Inclinación variable en cualquier dirección.
- Compatible con la mayoría de los implantes endoóseos existentes en el mercado.

- Resistencia mecánica durante su colocación y vida en servicio.

Con el fin de dotar de inclinación en cualquier dirección del pilar respecto al eje axial del implante, era necesario articular la unión entre la base del pilar y la chimenea. La solución fue una articulación semiesférica, con una capacidad de inclinación de la chimenea de  $\pm 20^\circ$  respecto al eje axial y en cualquier dirección del plano normal, sin que esto dificultara su instalación. Mediante el diseño y modelado de las piezas en tres dimensiones se optimizó las características geométricas de la unión y de los componentes para que permitieran la movilidad anteriormente enunciada (Figura 11).

El elemento de sujeción al implante, tornillo de Ti-6Al-4V grado 5 ELI, se ha diseñado y dimensionado para adaptarse a la geometría del Pilar

Dinámico®, además de soportar los esfuerzos generados en su colocación y durante su vida útil. Es por ello que era necesario el evaluar la resistencia mecánica de los tornillos que se diseñaban o las modificaciones que surgían sobre diseños ya existentes, empleando herramientas de ingeniería asistida por ordenador (CAE); en concreto el análisis por elementos finitos.

Los primeros pasos a seguir fueron el determinar la magnitud de las cargas y las superficies donde se aplican.

Las cargas aplicadas al tornillo son las producidas en el apriete del mismo sobre la estructura de la base mecanizada del pilar; 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.
- Las fuerzas distribuidas en cada una de las seis superficies 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 las superficies (Figura 12).



Figura 10. Distribución de tensiones en el tornillo TPD2f debidas al apriete

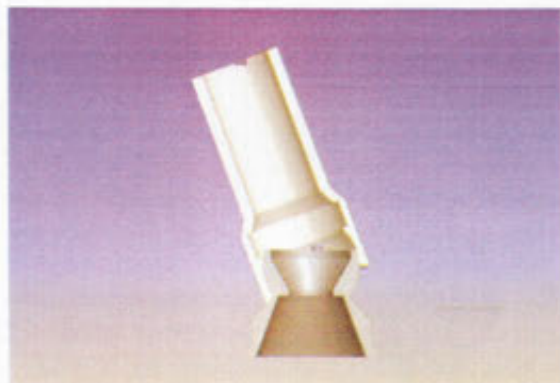


Figura 11. Vista de sección que permite mostrar la capacidad de angulación del Pilar Dinámico®



Figura 12. Fuerzas originadas en el apriete

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.

En el roscado del tornillo sobre el implante dental, la base de la cabeza del tornillo asienta en la base del pilar dinámico y provoca una fricción entre las superficies en contacto. El tornillo y continuará girando hasta que se obtenga un equilibrio entre el par aplicado a la cabeza y el par de reacción del montaje. Por tanto, el tornillo actúa como un muelle tensionado por ambos extremos; cabeza y rosca, y la presión generada en estas zonas de contacto contribuyen al par de reacción: la fricción entre las roscas coincidentes y un par inducido debido a la tensión del tornillo (F) en la base de la cabeza del tornillo, llamada precarga. La relación de equilibrio del par inducido por la tensión del tornillo se expresa de forma matemática con la siguiente expresión, donde se relaciona el par de apriete "T" con la precarga "Fi":

$$T = \frac{F_i d_m}{2} \left( \frac{1 + \pi \mu d_m \sec \alpha}{\pi d_m - \mu d_m \sec \alpha} \right) + \frac{F_i \mu_c d_c}{2}$$

- $d_m$ : diámetro medio de la rosca.
- $p$ : paso de la rosca.
- $\beta$ : ángulo de la base cónica de la cabeza.
- $\mu$ : coeficiente rozamiento.
- $d_c$ : diámetro medio de la base de la cabeza.



Figura 13. Superficie de la rosca sobre las que se aplican las restricciones de movimiento que simulan el contacto



Figura 14. Superficie de la cabeza del tornillo donde se aplican las restricciones de movimiento simulando el contacto con el Pilar Dinámico



Figura 15. Malla de elementos finitos adaptados a la geometría de la pieza

Como se ha señalado anteriormente, los esfuerzos de fricción generados en la rosca impiden que esta siga girando y avanzando a través de la hélice de la rosca hembra del implante. Con el fin de representar esta restricción, se impide el giro alrededor del eje axial del tornillo de las superficies resaltadas en las siguientes imágenes (Figuras 13 y 14), así como el desplazamiento axial.

Para construir la malla de elementos finitos se han empleado elementos sólidos tetraédricos tipo "p", con comportamiento isotrópico y seis grados de libertad por nodo, capaces de adaptarse a la geometría del tornillo y simular el compor-

tamiento mecánico del material. 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 (Figura 15).

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. Es decir que la solución numérica aproximada del análisis tiene una desviación máxima del 10% respecto del valor exacto, que debido a la capacidad de cálculo que requeriría sería inviable obtener este resultado.

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 hasta de orden 9. Las aproximaciones polinomiales de mayor orden se alcanzan en zonas críticas donde los gradientes de tensiones y deformaciones son elevados.

## 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" ( $790 \text{ N/mm}^2$ ) a través de la siguiente expresión.

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

Este parámetro es un ratio que nos muestra en nivel de exigencia mecánica en cuanto a la resistencia del material. Valores próximos, o superiores, a 1 indican que se ha alcanzado el nivel máximo de resistencia admisible mientras que valores próximos a 0 todo lo contrario.

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 (Figura 16).

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 tienen impedido el giro alrededor del eje axial del tornillo a diferencia de los nodos situados en las curvas de las superficies adyacentes del modelo geométrico

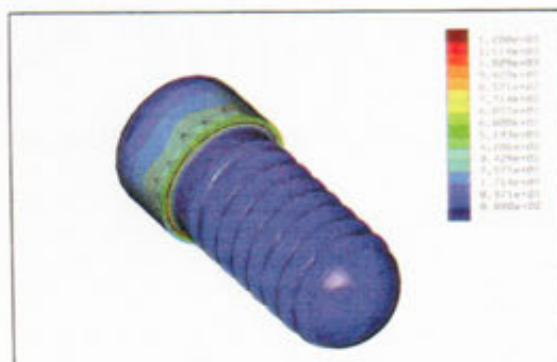


Figura 16. Distribución de tensiones de von Mises





Figura 17. Representación mediante isosuperficies del índice de fallo, las zonas con colores más cálidos son las más propicias a sufrir fallo

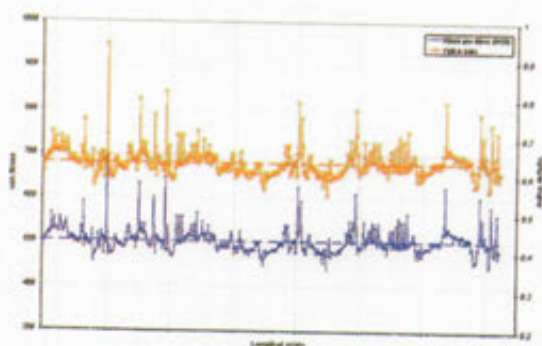


Figura 18. Gráfico que muestra los valores de tensiones de von Mises y el índice de fallo en la zona más crítica del tornillo

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. Este efecto podría reducir empleando elementos tipo h con tamaños de elementos más 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/mm<sup>2</sup>,

atendiendo a la leyenda cromática, y por debajo del límite elástico del material que se encuentra próximo a los 800 N/mm<sup>2</sup>.

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:

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 más alejados del centro, mayores tensiones.

En el caso del índice de fallo se observa una distribución similar al de las tensiones, y excluyendo igualmente la misma zona de concentración de tensiones comentada previamente, el índice de fallo se establece entre 0.5 y 0.6 (Figura 17).

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 (Figura 18) 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. La líneas discontinuas son el promedio de estas magnitudes siendo para las tensiones de von Mises de 500 N/mm<sup>2</sup> y para el índice de fallo de 0.63.

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.

## DISCUSIÓN

El Pilar Dinámico® es un nuevo concepto para soluciones protésicas dentales a los existentes en el mercado, que suprime la mayor parte de los problemas de angulación de los implantes y la colocación de piezas intermedias (pilares angulados de titanio, transeptiliales angulados, pilares individualizados) que corrijan la angulación para después realizar la prótesis sobre ellas, reduciendo el coste y tiempo de fabricación de la prótesis.

En el desarrollo de esta solución innovadora se han utilizado materiales adecuados a la aplicación y a la normativa existente como es el Tilite® (aleación biocompatible) y de herramientas de diseño e ingeniería asistida por ordenador, las cuales han permitido desarrollar el producto de forma más rápida y fiable, previniendo posibles defectos y debilidades de los componentes protésicos del Pilar Dinámico® en cuanto criterios resistencia y fiabilidad, en las fases previas del diseño.

Las simulaciones del comportamiento mecánico de los componentes protésicos del Pilar Dinámico®, en especial los tornillos, se ha realizado mediante análisis por elementos finitos contemplando las condiciones de carga más críticas que son las que se producen durante la colocación y apriete de los mismos.

Los resultados obtenidos muestran que las tensiones originadas por dichas acciones ( $500 \text{ N/mm}^2$ ) se encuentran por debajo de la tensión límite elástica del material ( $790 \text{ N/mm}^2$ ), 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  $800 \text{ N/mm}^2$ ) deducimos que no supondrá el fallo de esta parte de la pieza. La resistencia superficial por esfuerzos de contacto de los materiales esta 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,  $320 \text{ HB}$  aproximadamente, tiene una resistencia superficial equivalente de  $1000 \text{ N/mm}^2$ . Esta resistencia es superior a las tensiones que se han obtenido en el análisis de los elementos finitos y bajo este argumento se concluye que no se produciría daño en esta zona de la pieza.

Por último, destacar la utilización de herramientas CAD-CAE en el diseño del Pilar Dinámico® ha permitido que el proceso de desarrollo de producto pase del método de prototipo-prueba a una nueva sistemática. En vez de incurrir en los costos y retrasos relacionados con la construcción y pruebas de prototipos físicos, se analiza el modelo virtual, para simular las iteraciones prototipo-prueba y optimizar los diseños basándose en una comprensión exhaustiva de la geometría y el comportamiento mecánico de los componentes del Pilar Dinámico®.

## AGRADECIMIENTOS

Al Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (Ministerio de Industria, Turismo y Comercio), CDTI, por el apoyo y la financiación del proyecto de I+D: "Tilite".

Al Sr. Mariano Bueno Ros por la aportación gráfica.

