

FATIGA EN IMPLANTES DENTALES

J.M. Ayllón, C. Navarro, J. Vázquez y J. Domínguez

Departamento de Ingeniería Mecánica y de los Materiales, Escuela Superior de Ingenieros. Camino de los Descubrimientos s/n, 41092, Sevilla, España.

*E-mail: cnp@us.es

RESUMEN

En este artículo se estudia el comportamiento ante la fatiga de implantes dentales de titanio comercialmente puro grado 4. Dichos implantes se ven sometidos a ciclos de carga y descarga durante la masticación, lo cual produce sobre el implante la acumulación de daño por fatiga y una posible rotura. En el trabajo se analizan la influencia de diversos factores: concentración de tensiones debido a la rosca externa y el tratamiento superficial. Para conseguir este objetivo se han diseñado una serie de ensayos a fatiga sobre geometrías sencillas (probetas lisas con y sin tratamiento superficial) y sobre implantes comerciales. Por otro lado, se han analizado las tensiones en el implante con ANSYS, a partir de ellas se ha obtenido el factor de intensidad de tensiones y se analizan las fases de iniciación y propagación. Finalmente se han comparado los resultados teóricos con los experimentales.

ABSTRACT

This paper studies the fatigue behaviour of dental implants made of commercially pure Titanium grade 4. These implants are subjected to loading and unloading during mastication, which produces an accumulation of damage in the implant and possibly a failure. This work analyses the influence of different factors: stress concentration at the external thread and the surface treatment. This objective is achieved by designing a series of fatigue tests in simple geometries (smooth specimens with and without the surface treatment) and in commercial implants. On the other hand, the stresses in the implant have been modelled with ANSYS, from these stresses the stress intensity factor is calculated and the initiation and propagation phases are analyzed. Finally the theoretical and experimental results have been compared.

PALABRAS CLAVE: Implantes dentales, Estimación de vida, Titanio.

1. INTRODUCCIÓN

Los implantes dentales se ven sometidos durante su vida a muchos ciclos de carga, principalmente los producidos durante la masticación. Debido a la fatiga pueden llegar a romperse, teniendo consecuencias graves desde el punto de vista clínico. El diseño de los implantes en cuanto a geometría y materiales es algo que evoluciona continuamente. Para poder evaluar la idoneidad de cada diseño se deben realizar unos ensayos normalizados de fatiga sobre los implantes. La norma utilizada a este fin en España es la UNE-EN ISO 14801 [1]. En ella se dice que hay que realizar una serie de ensayos de fatiga con distintos niveles de carga, cada vez de menor valor hasta conseguir que en un mismo nivel de carga haya tres ensayos de duración superior a 5 millones. Evidentemente, obtener esta curva requiere mucho

tiempo y dinero. De ahí viene el interés de aplicar modelos de predicción de vida para intentar mejorar el diseño sin recurrir a tantos ensayos.

No hay muchos trabajos que modelen y estudien numéricamente los implantes dentales. En estos trabajos se comparan las propiedades a fatiga de distintos materiales y el efecto de tratamientos superficiales [2,3] y se estima la vida de un implante basándose en cálculos numéricos [4].

El objetivo del presente artículo es desarrollar una metodología para poder estimar la vida de un implante basándose en las propiedades del material y en un modelo numérico del implante. En este trabajo se analizará el comportamiento del implante en un ensayo normalizado de fatiga. Un paso posterior sería simular

el proceso de fatiga durante el funcionamiento real del implante en la mandíbula.

El proceso de fallo por fatiga de un elemento cualquiera se puede dividir en dos fases: iniciación y propagación de una grieta. Dichas fases se modelan de forma distinta, se usan criterios de fatiga multiaxial para la primera y la mecánica de la fractura para la segunda. En teoría habría que combinarlas las dos pero debido a su dificultad en muchas ocasiones los modelos de predicción desprecian una u otra. En los casos prácticos donde se pueda asimilar que desde el principio hay defectos suficientemente grandes se podrá despreciar la fase de iniciación [5]. En otros se supondrá que casi toda la vida se emplea en iniciación [6]. Un modelo muy difundido es el de las distancias críticas, donde se evalúan las tensiones en el concentrador a una cierta profundidad para estimar el límite de fatiga [7] o incluso para estimar la vida [8]. Sin embargo, en ocasiones esto lleva a evaluar las tensiones a una distancia que puede ser de varios milímetros. En el caso del implante las dimensiones son tan pequeñas que esto resultaría imposible. Otros modelos de predicción combinan la iniciación y propagación de grietas [9,10].

El modelo de predicción de vida utilizado en este trabajo se ha usado con éxito anteriormente en varios tipos de ensayos donde hay gradiente de tensiones: fretting fatiga con contacto cilíndrico, esférico y en la fatiga de una placa con agujero [11,12]. Este modelo combina las fases de iniciación y propagación sin definir a priori dónde termina una y empieza la otra. Además no plantea ningún problema a la hora de aplicarlo a piezas tan pequeñas como los implantes.

2. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

El material empleado en este estudio es titanio comercialmente puro de grado 4. Se trata de una fase α con un contenido en oxígeno del 0.4% en peso y un tamaño de grano de 20 micras. Este material está siendo actualmente utilizado en la fabricación de implantes en general y está sustituyendo al Ti-6Al-4V por carecer de elementos aleantes que pudieran resultar dañinos para el organismo como es el caso del vanadio. Tanto las probetas como los implantes fueron proporcionados por la empresa Galimplant®.

Para poder aplicar el modelo de predicción es necesario conocer las propiedades del material, las de fatiga y las de crecimiento de grieta. En la propagación se utilizarán las propiedades del crecimiento de grieta de una aleación Ti-6Al-4V [13], suponiendo que no son muy diferentes, ya que de momento no se dispone de las del material usado. Las constantes utilizadas son $C = 1.8 \cdot 10^{-13}$ y $n = 5$, para la velocidad en metros/ciclo, el factor de intensidad de tensiones en MPa $m^{0.5}$ y $R = 0$. Para las propiedades fatiga se realizaron una serie de ensayos que se muestran a continuación.

2.1. Sin tratamiento superficial

En la literatura existen pocos datos sobre este titanio por lo que resulta vital realizar una serie de ensayos y medidas para caracterizarlo. Por un lado se han realizado ensayos de tracción para determinar la resistencia a la tracción, $\sigma_u = 807$ MPa, límite elástico, $\sigma_y = 775$ MPa, y módulo de Young, $E = 104.5$ GPa. La rugosidad superficial medida es $R_a = 0.2 \mu m$.

Por otro lado se ha caracterizado el material a fatiga en ensayos con tensión media nula, $R = -1$, y frecuencia 10 Hz. Las probetas utilizadas se muestran en la figura 1 y la curva de fatiga obtenida en la figura 2.

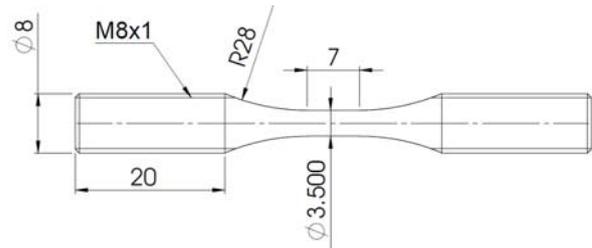


Figura 1. Probeta utilizada en los ensayos de fatiga. Cotas en milímetros.

2.2. Con tratamiento superficial

También se han ensayado probetas a fatiga con la misma geometría pero con el mismo tratamiento superficial que llevan los implantes. Este tratamiento se aplica con el objeto de que se produzca una mejor osteointegración del titanio con el hueso. El tratamiento, desarrollado por la empresa Galimplant® y llamado Nanoblast®, consiste en la generación de una superficie con un alto grado de pureza de TiO_2 y con una rugosidad en torno a $2 \mu m$. El inconveniente en cuanto a la fatiga es que dicho tratamiento produce un aumento de la rugosidad. La figura 2 muestra las curvas de fatiga del titanio empleado con y sin tratamiento superficial. Se observa cómo dicho tratamiento reduce la resistencia a fatiga, principalmente para vidas largas. La reducción del límite de fatiga es aproximadamente de un 12%.

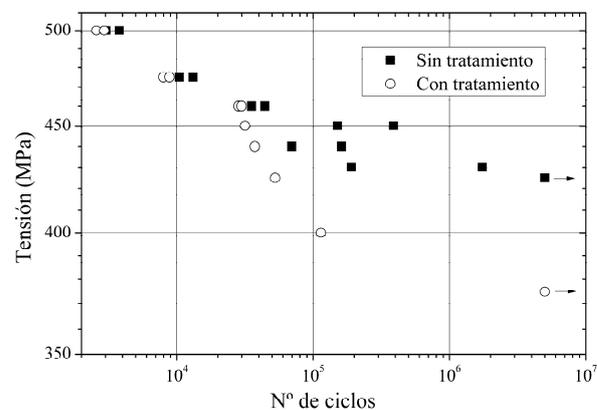


Figura 2. Curvas de fatiga del titanio puro grado 4 con y sin tratamiento superficial.

3. ENSAYOS DE IMPLANTES

En este apartado se muestran los implantes ensayados y los resultados obtenidos en los ensayos de fatiga sobre los mismos. La figura 3 muestra la geometría del implante ensayado y la figura 4 la forma de aplicación de la carga. Ésta se aplica según la norma UNE-EN ISO 14801, donde se especifica que la fuerza ha de aplicarse formando un ángulo de 30 grados respecto al eje del implante y que el coeficiente de asimetría de la carga sea $R = 0.1$. Los ensayos se realizaron a una frecuencia de 10 Hz. Se hicieron ensayos con cargas máximas de 220, 200, 160, 150 y 140 N que dieron vidas de 9545, 14630, 56398, 182613 y 185723 ciclos, respectivamente. Un ensayo con 130 N se interrumpió a los $5 \cdot 10^6$ sin romperse.



Figura 3. Geometría del implante ensayado.

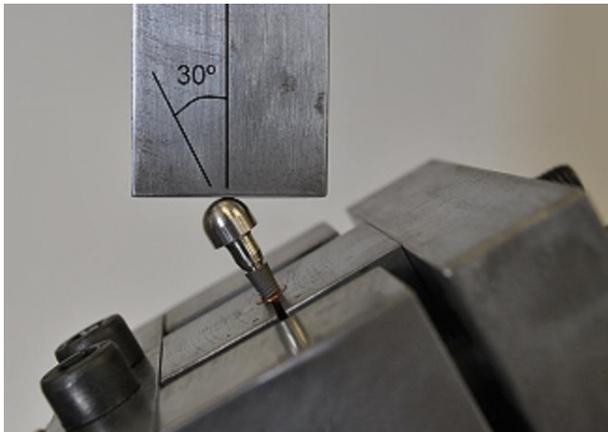


Figura 4. Montaje del ensayo del implante.

4. MODELO NUMÉRICO

El modelo numérico del implante ha sido realizado en ANSYS. El objetivo de este modelo numérico es obtener las tensiones y deformaciones en el implante así como el factor de intensidad de tensiones a lo largo del camino de la grieta. Con esta información se puede aplicar el modelo de cálculo descrito en el siguiente

apartado y obtener la vida a fatiga. El factor de intensidad de tensiones se ha obtenido utilizando una función de peso [14] a la que se le introduce la distribución de tensiones en el plano donde crece la grieta, calculada mediante el modelo de elementos finitos.

En el modelo del implante, figura 5, se han utilizado un total de 311064 elementos tetraédricos de 10 nodos solid 187 de ANSYS. El contacto entre el miembro hemisférico de carga y el pilar, así como el del pilar con el cuerpo del implante se ha modelado mediante un contacto tipo "bounded". Se han aplicado condiciones de desplazamiento nulo a los nodos situados en las crestas del roscado externo del cuerpo del implante. Esta condición de contorno en desplazamiento ha sido aplicada hasta una altura determinada, en concreto hasta 5 mm por debajo de la plataforma del cuerpo del implante. En la norma esta distancia es 3 mm. En este estudio se decidió aumentar esa distancia para alejar la zona de iniciación de la grieta de la zona de conexión entre el cuerpo del implante y el pilar. Esta zona presenta una geometría muy compleja y el análisis de la evolución de las tensiones en la misma será abordado en posteriores fases de este estudio. La densidad de elementos ha sido controlada en las distintas zonas del modelo. Se ha realizado un refinamiento de la malla en la zona de iniciación de la grieta, donde el tamaño de los elementos es de 6 micras.

El modelo en la zona alrededor del lugar de iniciación de la grieta es elastoplástico, siendo en el resto elástico. Se comprobó que en la zona limítrofe entre las dos el nivel de tensiones estaba dentro del régimen elástico, por lo que no se producían saltos bruscos de la tensión. La plasticidad se modeló mediante endurecimiento cinemático, obteniendo las propiedades de un ensayo realizado en el laboratorio.

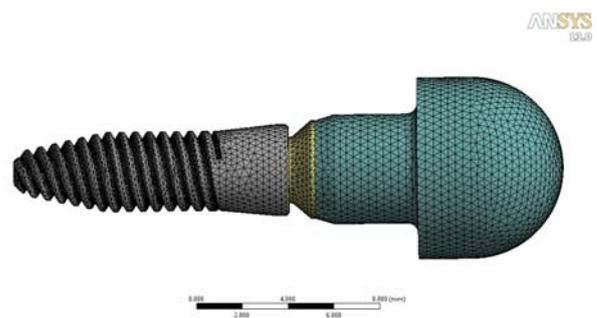


Figura 5. Modelo del implante.

La figura 6 muestra la distribución de la tensión de von Mises en la zona de la rosca. Hay que tener en cuenta que el implante, zona gris en la figura 5, es hueco y tiene una rosca interior. Por esta razón la distancia que recorrerá la grieta es tan pequeña. En la figura 7 se muestra la evolución de la tensión normal a la grieta a lo largo del camino de ésta para los cinco niveles de carga analizados. En todos ellos hay una plastificación en el

fondo de la rosca y la influencia del concentrador de tensiones llega hasta una profundidad de unas 100 micras.

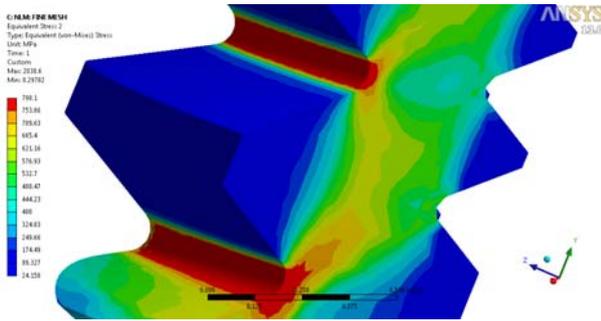


Figura 6. Distribución de tensiones en el fondo de la rosca.

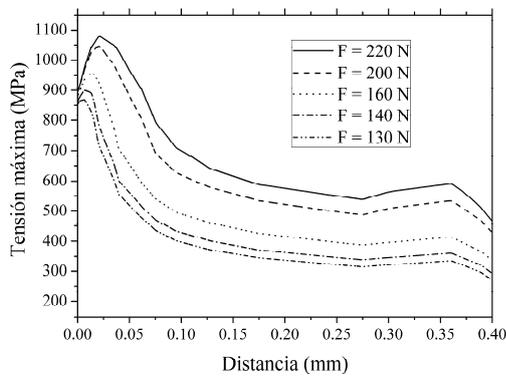


Figura 7. Tensión normal a la grieta en los cinco niveles de carga analizados.

5. MODELO TEÓRICO

En este trabajo se presenta un modelo para la predicción de vida que está basado en otro propuesto por los autores [12]. Tiene la característica de que combina las fases de iniciación y de propagación pero sin tener que definir previamente la longitud de grieta donde termina la iniciación y comienza la propagación. Cada fase se analiza por separado. La fase de iniciación se analiza determinando el número de ciclos necesarios para que se genere una grieta de longitud a . Dicho número se calculará a partir de las tensiones a lo largo del camino que sigue la grieta y de una curva de fatiga $\varepsilon-N$ que se detallará más adelante. El resultado es una curva, $a-N_i$, que representa los ciclos necesarios para originar una grieta de longitud a . En la fase de propagación se calcula el número de ciclos que tarda en propagarse una grieta desde cualquier longitud a hasta la rotura utilizando la mecánica de la fractura. Para ello se integra la ley de crecimiento desde cada longitud de grieta, a , hasta la rotura, obteniéndose la curva $(a-N_p)$. La suma de estas dos curvas daría la vida total en función de qué valor se tome de la longitud de grieta que separa las

fases de iniciación y propagación. Estas dos curvas muestran que cerca de la superficie domina el proceso de iniciación y lejos de ella el de propagación, de forma que el nexo entre las dos se encuentra en el mínimo de la curva de vida total descrita anteriormente. Por esta razón y porque además es el valor más conservativo, se toma como solución el mínimo de la curva.

5.1. Fase de iniciación

El modelo presentado en este artículo analiza la fase de iniciación basándose en el trabajo de McClung et al. [15] para entallas. El primer paso consiste en la obtención de una curva de fatiga, $\varepsilon-N|_{a_i}$, en probetas lisas y sin entalla que proporcione el número de ciclos necesario para generar una grieta de longitud a_i en función de la deformación aplicada. Para cada nivel de deformaciones, ε_j , el número de ciclos de esta curva, $N_{\varepsilon_j a_i}$, se obtiene a partir de la ecuación:

$$N_{\varepsilon_j a_i} = N_{\varepsilon_j} - N_p(a_i) = N_{\varepsilon_j} - \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{f(a)} \quad (1)$$

Donde N_{ε_j} es el número de ciclos hasta el fallo obtenido en un ensayo de fatiga simple con tensión ε_j , a_i es la longitud de grieta, a_f es la longitud a la que se produce la fractura y $f(a)$ es la ley de crecimiento. A estas curvas, $\varepsilon-N|_{a_i}$, se les llamará curvas de iniciación.

En el caso de que se estuviera aplicando el modelo a un ensayo de fatiga simple se podría calcular el número de ciclos necesario para generar una grieta de longitud, a_i , utilizando la curva apropiada, $\varepsilon-N|_{a_i}$.

En el caso de una pieza con un estado multiaxial y gradiente de tensiones, se puede aplicar el mismo proceso aunque con algunas modificaciones. En primer lugar, es necesario un criterio de fatiga multiaxial, en este caso se empleará el de Fatemi-Socie [16]. Posteriormente se calcula el parámetro de Fatemi-Socie (FS) para cada nivel de deformación en las curvas de iniciación, $\varepsilon-N_i|_{a_i}$, obtenidas anteriormente. Con esto se construyen las nuevas curvas $FS-N_i|_{a_i}$. Por otro lado, cuando hay una entalla la tensión disminuye rápidamente con la profundidad, desde un máximo en la superficie. La vida de iniciación estimada será una u otra en función de dónde se evalúe el parámetro de daño utilizado, FS en este caso. La opción que se considera más apropiada es calcular el FS medio entre la superficie y la longitud de grieta a_i , y con él entrar en la curva $FS-N_i|_{a_i}$ y obtener el número de ciclos necesario para generar una grieta de longitud a_i . Evidentemente, el cálculo será aproximado al usar un valor medio, lo cual tiene asociado un cierto error, tanto mayor cuanto mayor sea la zona sobre la que se calcula

el valor medio del parámetro de daño. Esta opción significa que se está haciendo la hipótesis de que a igual valor medio del parámetro de daño en la zona, igual número de ciclos para iniciar la grieta de esa longitud.

5.2. Fase de propagación

Para la fase de propagación se emplea la mecánica de la fractura, tomando como longitud inicial una longitud genérica, a . La ley de crecimiento utilizada trata de modelar también el crecimiento de grietas pequeñas dado que la longitud de iniciación definida puede ser del orden de micras. La forma de hacerlo es introduciendo un umbral de crecimiento modificado en función de la longitud de grieta [12]:

$$\frac{da}{dN} = C \left(\Delta K^n - \left(\Delta K_{th\infty} \cdot \left(\frac{a^f}{a^f + a_0^f - l_0^f} \right)^{1/2f} \right)^n \right) \quad (2)$$

donde $\Delta K_{th\infty}$ es el umbral de crecimiento de grieta larga, f es un parámetro que de forma general se toma igual a 2.5 [17], l_0 es la distancia típica hasta la primera barrera microestructural y a_0 es la llamada constante de El Haddad:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\Delta K_{th\infty}}{\Delta \sigma_{FL}} \right)^2 \quad (3)$$

siendo $\Delta \sigma_{FL}$ el límite de fatiga. El factor que multiplica al umbral de crecimiento de grieta larga en la ecuación (2) proviene de la aproximación teórica al diagrama de Kitagawa-Takahashi, en el que se representa la tensión umbral en función de la longitud de grieta

La evolución del factor de intensidad de tensiones, calculado con la función de peso [14], en los cinco ensayos analizados se muestra en la figura 8.

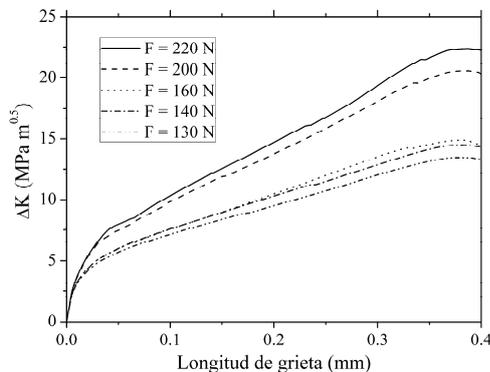


Figura 8. Evolución del factor de intensidad de tensiones en los cinco casos analizados.

5.3. Combinación de la iniciación y propagación

Una vez que se han obtenido las dos curvas mencionadas ($a - N_p$ y $a - N_i$), representadas en la figura 9 para el ensayo con $F = 220 \text{ N}$, se suman las dos obteniéndose una curva que representa la vida total en función del valor que se tome para la longitud de iniciación. El mínimo se toma como la vida a fatiga y el punto donde se produce el mínimo se toma como la longitud de iniciación. Este modelo se puede comparar con otros donde se define a priori la longitud a partir de la cual se toma propagación. Aplicar dicho modelo sería el equivalente a entrar en la gráfica de la figura 9 con una longitud de grieta a preestablecida obteniéndose una vida de iniciación y de propagación. La ventaja del modelo propuesto es que es más conservativo y no hay que tomar una decisión sobre cuándo termina una fase y empieza la otra.

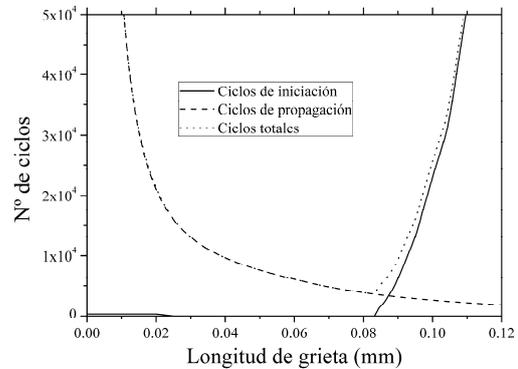


Figura 9. Aplicación del modelo de predicción en el ensayo con $F = 220 \text{ N}$.

6. ESTIMACIÓN DE VIDA Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

En la figura 10 se muestran los resultados de los ensayos a fatiga en implantes junto con las predicciones teóricas utilizando el modelo explicado en el apartado anterior. Las predicciones son razonables y algo conservativas. La pendiente de la curva estimada es prácticamente igual a la de los ensayos. Es importante resaltar que todo el proceso de iniciación y propagación de grieta tiene lugar en menos de medio milímetro y que el modelo es capaz de reflejarlo de forma aceptable.

Aparte de los posibles errores del modelo, otra razón para las diferencias obtenidas puede ser el error de caracterización del material, tanto en iniciación como en propagación, ya que el número de ensayos realizados es relativamente pequeño. Por ello, a la vista de los resultados puede decirse que independientemente de su ajuste razonable a los experimentos, es necesario realizar un mayor número de ensayos de caracterización así como de implantes completos. En este último caso

será interesante tener más resultados a cada nivel de carga y para cargas correspondientes a vidas más largas.

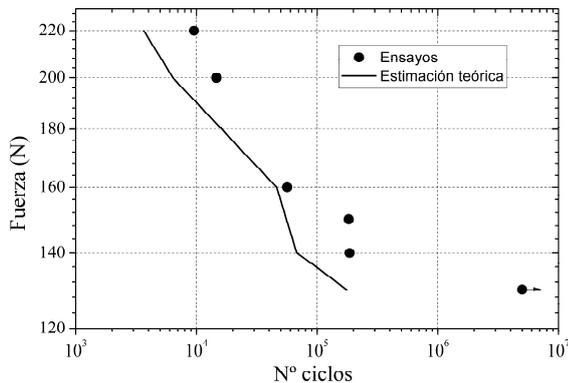


Figura 10. Ensayos de fatiga en implantes y estimaciones teóricas.

7. CONCLUSIONES

El resultado de este trabajo muestra que el modelo de predicción de vida propuesto, y utilizado también en otras situaciones distintas, es muy versátil y robusto, adaptándose a las distintas circunstancias.

Es importante resaltar que dicho modelo se adapta a la predicción de vida en implantes, elementos que dadas sus pequeñas dimensiones pueden presentar problemas de escala. En cualquier caso, este estudio debe ser extendido mediante una caracterización del material más completa y un mayor número de ensayos de comprobación en implantes.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Ministerio de Ciencia e Innovación la financiación de la investigación a través del proyecto DPI2011-23377 y a la empresa Galimplant® por el suministro de sus implantes y probetas de ensayo.

REFERENCIAS

[1] UNE-EN ISO 14801. Odontología. Implantes. Ensayos de fatiga dinámica para implantes dentales endoóseos. Abril 2008.

[2] Papakyriacou M., Mayer H., Pypen C., Plenk Jr H., Stanzl-Tschegg S. *Effects of surface treatments on high cycle corrosion fatigue of metallic implant materials. International Journal of Fatigue*, pp. 873-886, 2000.

[3] Sevilla P., Sandino C., Arciniegas M., Martínez-Gomis J., Péraire M., Gil F.J. *Evaluating mechanical properties and degradation of YTZP*

dental implants. Materials Science and Engineering, pp. 14-19, 2010.

[4] Kayabasi O., Yüzbaşıoğlu E., Erzincanlı F., *Static, dynamic and fatigue behaviours of dental implant using finite element method. Advances in Engineering Software*, pp. 649-658, 2006.

[5] Newman, J.C., Phillips, E.P., Swain, M.H. *Fatigue-life prediction methodology using small-crack theory. International Journal of Fatigue*, pp.109-119, 1999.

[6] Giannakopoulos, A.E., Suresh, S. *A three-dimensional analysis of fretting fatigue. Acta. Mater.*, pp.177-192, 1998.

[7] Taylor, D., *Geometrical effects in fatigue: a unifying theoretical model. International Journal of Fatigue*, pp.413-420, 1999.

[8] Susmel, L., Taylor, D., *A novel formulation of the theory of critical distances to estimate lifetime of notched components in the medium-cycle fatigue regime. Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, pp.567-581, 2007.

[9] Szolwinski, M.P., Farris, T.N., *Observation, analysis and prediction of fretting fatigue in 2024-T351 aluminum alloy. Wear* 221, pp.24-36, 1998.

[10] Dowling, N.E., *Notched member fatigue life predictions combining crack initiation and propagation. Fatigue of Engng. Mater. and Struct* 2, pp.129-138, 1979.

[11] Navarro, C., Muñoz, S., Domínguez, J., *On the use of multiaxial fatigue criteria for fretting fatigue life assessment. International Journal of Fatigue*, pp.32-44, 2008.

[12] Navarro, C., Vázquez, J., Domínguez, J., *A general model to estimate life in notches and fretting fatigue. Engineering Fracture Mechanics*. pp.1590-1601, 2011.

[13] Kirkpatrick, GW. *Fretting fatigue analysis and palliatives. Master Thesis, Massachusetts Institute of Technology*, 1999.

[14] Orynyak, I.V., Borodii, M.V., *Point Weight Function Method Application for Semi-Elliptical Mode I Cracks, International Journal of Fracture*, pp.117-124, 1995.

[15] McClung, R.C., Francis, W.L., Hudak Jr., S.J., *A new approach to fatigue life prediction based on nucleation and growth, 9th International Fatigue Congress*, Atlanta, mayo 2006.

[16] Fatemi, A., Socie, D., *A critical plane approach to multiaxial fatigue damage including out-of-phase loading, Fatigue and Fract of Engng Mater and Struct*, pp.145-165, 1988.

[17] Vallellano, C., Domínguez, J., Navarro, A., *On the estimation of fatigue failure under fretting conditions using notch methodologies, Fatigue Fract Engng Mater Struct.*, pp.469-478, 2003.