

# Capítulo

# 7

## Conclusiones y perspectivas futuras

### 7.1 CONCLUSIONES

1. El tratamiento termoquímico de nitruración del titanio cp y de la aleación Ti6Al4V produce una capa homogénea de color dorado metálico en la superficie de las muestras tratadas de titanio y de la aleación Ti6Al4V, con incrementos de la dureza superficial de hasta un 500% respecto al material no tratado.
2. El incremento de dureza obtenido en las muestras estudiadas no se reduce únicamente a la superficie, sino que también se produce en la zona cercana a la superficie, de hasta 50  $\mu\text{m}$  de profundidad, con valores de dureza en el interior del material tratado que siguen una ley exponencial decreciente.
3. El tratamiento de nitruración reduce el coeficiente de fricción de dos muestras nitruradas hasta valores de 0,08, siendo el valor nominal del coeficiente para la fricción de un sistema de titanio sin tratar de 0,6, y con obtención de reducciones del coeficiente de desgaste de más de un orden de magnitud en las condiciones ensayadas.
4. La capa de nitruros formada tiene un espesor de 1–2  $\mu\text{m}$ . El componente principal de la capa es el nitruro  $\epsilon$  de titanio, con presencia minoritaria de nitruro  $\delta$  de titanio. El espesor de la capa obtenida es bastante regular, y está formado por pequeños granos de nitruros con diámetros del orden de los 50–100 nm.
5. El material situado bajo la capa de nitruros se enriquece con nitrógeno, formando una zona con un espesor variable, del orden de los 10  $\mu\text{m}$ , con una microestructura de titanio fase  $\alpha$  con los parámetros de red distorsionados por la incorporación de nitrógeno intersticial.
6. Las propiedades mecánicas de las muestras de la aleación Ti6Al4V nitruradas presentan una reducción de propiedades inferior al 5% respecto al material no tratado, y un aumento en el módulo de elasticidad.
7. El comportamiento a fatiga oligocíclica es ligeramente superior al del material tratado térmicamente en las mismas circunstancias, si bien la resistencia a fatiga del Ti6Al4V nitrurado es un 10% inferior a la del Ti6Al4V *mill-annealed*.
8. El potencial de circuito abierto del titanio y del Ti6Al4V nitrurado tiende a valores más nobles cuanto mayor es el tiempo de inmersión en HBSS.
9. Todas las muestras nitruradas estudiadas exhiben un buen comportamiento electroquímico en la zona de trabajo de un implante (0–500 mV), con un comportamiento de pasividad y con una intensidad de corrosión inferior a la de las muestras no tratadas, presentando una elevada capacidad de repasivación de la capa superficial de pasivado.
10. Todas las muestras nitruradas presentan elevadas resistencias de transferencia, indicativas de una muy reducida intensidad de corrosión, si bien disminuyen tras largos periodos de inmersión en HBSS hasta valores del orden del 1 M $\Omega$  para el titanio y 0,2–0,5 M $\Omega$  para las muestras de Ti6Al4V, típicos de muestras no nitruradas.
11. La liberación de iones del Ti6Al4V en ausencia de desgaste es muy reducida, y tiende a concentrarse de forma local en el tejido cercano al implante. La nitruración del Ti6Al4V no parece afectar al volumen de iones liberados.

12. Las observaciones histológicas no han mostrado señales claras de toxicidad en los animales implantados con implantes nitrurados, ya que algunas peculiaridades observadas se apreciaron también en los animales implantados con muestras no tratadas.

## 7.2 PERSPECTIVAS FUTURAS

A partir de los estudios y discusiones presentados en esta Tesis Doctoral, las perspectivas de trabajos futuros se orientan en dos direcciones.

En un primer plano estarían los trabajos destinados a completar los aspectos de caracterización mostrados. En concreto, se podría estudiar la modificación de la composición química en las capas superficiales del Ti6Al4V nitrurado mediante técnicas no usadas en esta Tesis. La opción más plausible sería realizar este estudio mediante *Glow Discharge Plasma Spectroscopy*, una técnica de reciente aparición que permite realizar estudios de composición cuantitativa en profundidad de un material.

También sería interesante realizar un estudio del comportamiento electroquímico del titanio y del Ti6Al4V nitrurado tras largos períodos de inmersión en medio fisiológico, para simular en lo posible la situación de trabajo de una prótesis o implante. De cara a una posible aplicación industrial, sería necesario realizar un estudio de la biocompatibilidad a largo plazo del titanio y Ti6Al4V nitrurado, tanto *in vivo* como *in vitro*.

Otro punto que sería interesante complementar sería el estudio de la liberación de iones de muestras de Ti6Al4V nitrurado con el estudio de los iones de aluminio o vanadio al medio.

En un segundo plano, se encontrarían los estudios relativos a la mejora de las propiedades del tratamiento, de cara a su uso en componentes articulares. Para ello, sería necesario estudiar una optimización del tratamiento para reducir la rugosidad superficial, o bien estudiar las posibilidades existentes de pulido de la superficie obtenida.

Tras superar dicho obstáculo, un trabajo muy interesante sería el estudio del desgaste de componentes articulares nitrurados en simuladores de cadera o rodilla, a fin de simular en lo posible el sistema tribológico real. Complementario con dicho estudio, también sería interesante la realización de un estudio de las partículas generadas por el desgaste y de su efecto en los tejidos biológicos.

Finalmente, sería de interés la realización de un estudio de los posibles tratamientos térmicos a aplicar tras la nitruración que permitieran mejorar las propiedades de resistencia a fatiga, así como de tratamientos superficiales posteriores como el *shot peening*.