

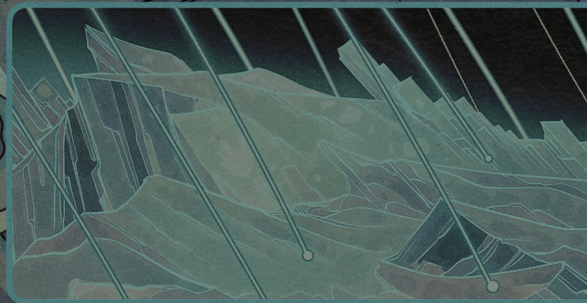


# Escudo de plata

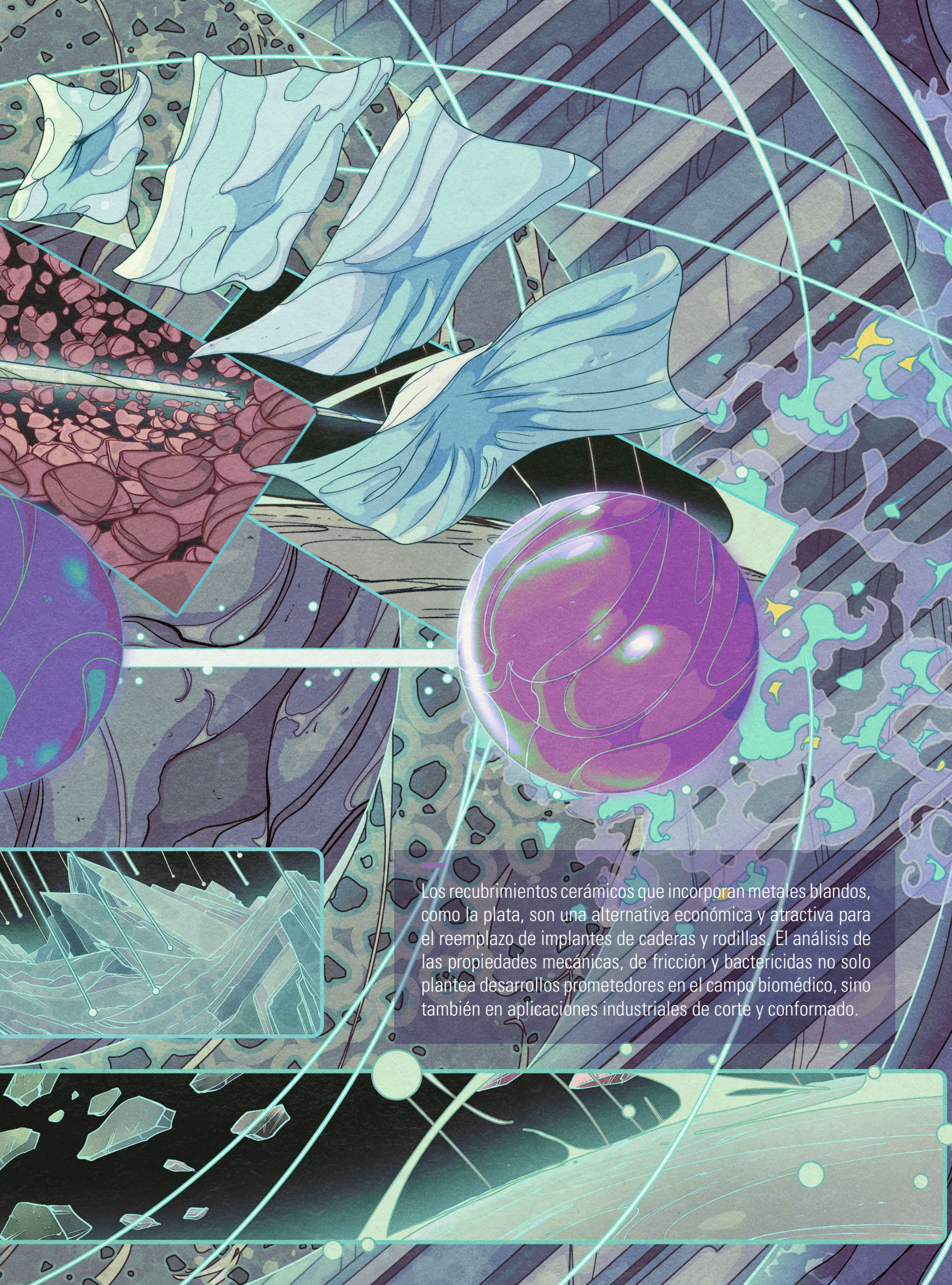
Análisis de propiedades mecánicas y bactericidas de un recubrimiento cerámico

**Magali Restrepo Posada**

Ingeniera de materiales,  
estudiante de maestría en Ingeniería de Materiales  
Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo de Materiales  
—CIDEMAT—, Facultad de Ingeniería  
[magali.restrepo@udea.edu.co](mailto:magali.restrepo@udea.edu.co)







Los recubrimientos cerámicos que incorporan metales blandos, como la plata, son una alternativa económica y atractiva para el reemplazo de implantes de caderas y rodillas. El análisis de las propiedades mecánicas, de fricción y bactericidas no solo plantea desarrollos prometedores en el campo biomédico, sino también en aplicaciones industriales de corte y conformado.



**S**e estima que en Colombia se realizan 10 000 reemplazos de cadera y rodilla al año que generan costos para el sistema de salud por cerca de \$ 90 000 millones. Según el *National Joint Registry* del Reino Unido, el número de reemplazos de cadera aumentó un 19,47 % y de rodilla un 27,72 % durante la última década. Al menos el 5 % de estas cirugías están sujetas a complicaciones asociadas a infecciones causadas principalmente por bacterias como *Staphylococcus aureus*, *Staphylococcus epidermidis*, *Escherichia coli* y *Pseudomonas aeruginosa*.

Un implante dental, un tornillo en la cadera y una rótula artificial son elementos que tienen en común funcionar como prótesis en el cuerpo humano y que están fabricados principalmente de materiales de aleaciones ferrosas, de cobalto-cromo y de titanio, siendo este último el material más usado en la actualidad para estas aplicaciones. Sin embargo, después de cierto tiempo (diez o quince años) pueden generar toxicidad en el cuerpo ocasionando que el implante deba ser extraído y reemplazado.

Una de las principales ventajas de los recubrimientos cerámicos, frente a los metálicos y poliméricos, es su elevado uso en aplicaciones biomédicas, en especial de implantes dentales y ortopédicos, pues presentan una buena combinación entre propiedades mecánicas, tribológicas (relacionadas con la resistencia a la fricción) y bactericidas. Los recubrimientos son capas que se ubican sobre un sustrato, en este caso sobre una aleación de titanio, con el fin de aumentar las propiedades del recubrimiento con metales blandos como la plata, el oro, el cobre, entre otros.

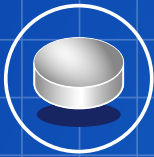
El interés por comprender el funcionamiento de los recubrimientos de nitrato de titanio aluminio vanadio plata, o TiAlVN(Ag), se origina a partir de la investigación del Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo de Materiales —CIDEMAT— de la Universidad de Antioquia titulada «Desarrollo de un recubrimiento de TiAlVN(Ag) obtenido por la técnica *magnetron sputtering* para aplicaciones biomédicas». Tuvo como objetivo principal reducir algunos fenómenos de desgaste del recubrimiento mediante la adición de la plata (Ag). Esta acción se fundamenta en el comportamiento autolubrificante de la plata, lo que implica su capacidad para deslizarse fácilmente sobre otra superficie sin necesidad de lubricación adicional. La plata, al ser insoluble en la mayoría de los nitratos (materiales cerámicos que se caracterizan por tener en su estructura química como elemento prin-

cial el nitrógeno), se aloja en forma de nanopartículas o esferas en la matriz del TiAlVN, actuando, entre otras cosas, como lubricante sólido. Estas propiedades hacen que dichos recubrimientos compuestos sean prometedores en el uso de herramientas de corte y conformado de materiales metálicos. Por ejemplo, podría contribuir a la reducción del desgaste aun a elevadas temperaturas como las que experimenta un disco de corte de una pulidora o cortadora.

Las superficies de titanio presentan problemas debido a su baja dureza y una resistencia al desgaste relativamente pobre, lo que las hace susceptibles al desgaste adhesivo y por fatiga. Por ejemplo, se han encontrado problemas con estas aleaciones, principalmente en los implantes quirúrgicos, como las articulaciones artificiales de cadera y rodilla, puesto que se corroen después de diez o quince años de uso. Esta corrosión se atribuye principalmente a deficiencias en las propiedades tribológicas como el alto coeficiente de fricción y la alta sensibilidad al desgaste adhesivo. Además, las superficies de titanio pueden liberar iones metálicos de la aleación (de aluminio y vanadio), lo que genera irritación local de los tejidos del implante; en ocasiones, es necesario recurrir al reemplazo.

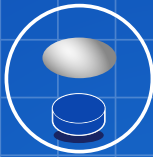
# TRIBOLOGÍA EN ACCIÓN

A través de la técnica *magnetron sputtering* se fabricó un recubrimiento cerámico compuesto de una matriz y un dopante (*plata - Ag*) sobre un sustrato que es una moneda hecha de una aleación de titanio. El recubrimiento dio lugar a un nuevo material que presentó mejores propiedades de fricción útiles en aplicaciones industriales de alto desgaste y propiedades antibacteriales para potenciales aplicaciones biomédicas.



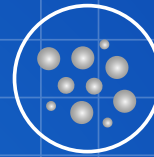
## SUSTRATO

Moneda de aleación de titanio (Ti6Al4V) caracterizada por su alto uso en aplicaciones biomédicas



## MATRIZ

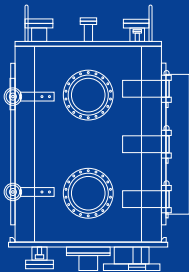
Compuesta de un nitruro de titano aluminio vanadio, que le da dureza y resistencia al material.



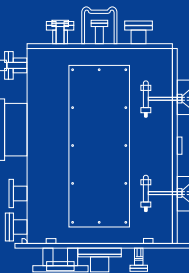
## PLATA (Ag)

Material dopante con propiedades antimicrobianas.

Vista frontal



Vista lateral



**Magnetron sputtering:** técnica para la fabricación de recubrimientos por deposición física de vapor.

**Tribología:** estudio del desgaste por fricción.

Termocupla: controla la temperatura.

Placa de plata Ag

Rotación del sustrato

Flujo de argón (Ar)  
Flujo de Nitrógeno (N<sub>2</sub>)

Placa de titanio aluminio vanadio (Ti6Al4V)

Magnetron

Magnetron

Corriente directa

Corriente directa

Voltaje Bias

Sistema de vacío

Ag Plata

Ar Argón

Al Aluminio

Ti Titanio

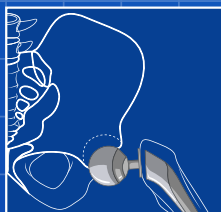
V Vanadio

N Nitrógeno

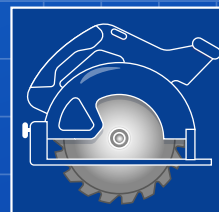
S N

Polos magnéticos que tiene el equipo: sur y norte

## POTENCIAL APLICACIÓN



En materiales médicos como quirúrgicos e implantes



En el ámbito industrial en herramientas de alto desgaste como en discos de corte para cortadoras de alta precisión

Una alternativa ampliamente utilizada para contrarrestar el desgaste es la nitruración por plasma de las aleaciones de titanio, a menudo seguida de la aplicación de un recubrimiento duro, por ejemplo, del nitruro de titanio (TiN), creando así los conocidos recubrimientos dúplex. Sin embargo, el proceso de nitruración del Ti6Al4V requiere de temperaturas superiores a los 650 °C, las cuales pueden disminuir las propiedades de la aleación y generar distorsiones en las piezas tratadas. Por su parte, los recubrimientos dúplex resultan ser una alternativa muy costosa. Por estas razones, la técnica *magnetron sputtering* se convierte en un camino fiable debido a la alta homogeneidad, compactación y pureza en los recubrimientos. Además, presenta una reducción de costos en comparación con los recubrimientos dúplex.

Los recubrimientos de matriz cerámica con metales blandos, como TiN-Ag, TaN-Cu, ZrN-Ag, presentan una buena combinación de dureza/tenacidad y resistencia al desgaste. La matriz cerámica (TiN, TaN, ZrN) aporta la dureza, mientras que la tenacidad y el bajo coeficiente de fricción es una contribución de la fase blanda y autolubrificante de la plata, que da lugar a un coeficiente de fricción más bajo, un menor desgaste y una mayor durabilidad del implante o la pieza recubierta. A su vez,

la plata mejora las propiedades biomédicas del recubrimiento al actuar como un agente antibacteriano, pues ayuda a combatir las infecciones relacionadas con los implantes al matar las bacterias o disminuir su proliferación. En casos extremos, estas infecciones pueden ocasionar el fracaso del implante.

La presencia de partículas de plata insolubles en la matriz de TiAlVN se confirmó mediante las técnicas de difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (SEM). Estos análisis revelaron que el incremento del contenido de plata afecta de manera considerable la estructura columnar (una estructura en forma de muro o columna característica del recubrimiento, como se observa en la figura 1) y conduce también a cambios de textura y de crecimiento preferencial del TiAlVN en el plano dos cero cero (200).

Por su parte, la dureza de los recubrimientos disminuyó con el aumento de contenido de plata debido a su baja dureza gobernada por la ley de mezclas de un material compuesto. Así mismo, las tensiones residuales del recubrimiento aminoraron con el contenido de plata, ya que esta asume buena parte de las tensiones mediante la deformación plástica.

Propiedades como la rugosidad y el espesor de los re-

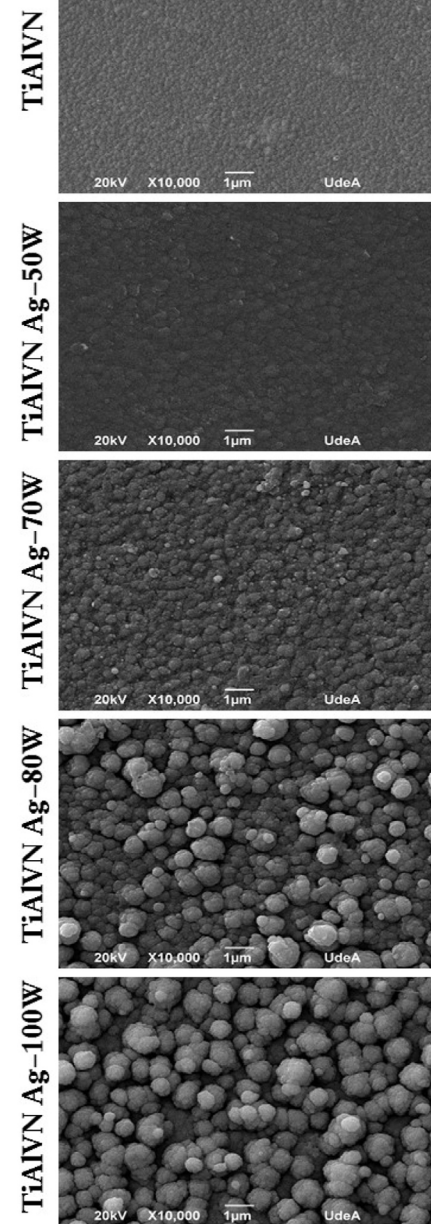
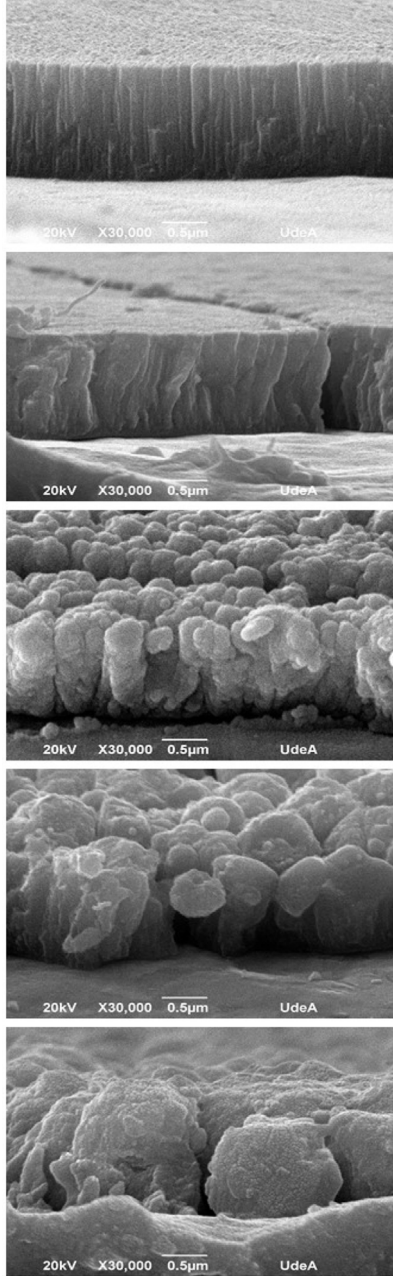


Figura 1. Recubrimientos de TiAlVN (Ag) a diferentes potenciales

Fuente: Marín et al. (2022).

cubrimientos aumentaron con el incremento de plata debido a cambios morfológicos inducidos por el material dopante, como la interrupción del crecimiento columnar cuando este se segrega en los límites del grano y en los espacios intercolumnares de la estructura.



Los espesores de los recubrimientos no fueron mayores a una micra, mucho menores al de un cabello humano, debido a la aglomeración de partículas de plata y la formación de Ag-clústeres en la superficie del recubrimiento como resultado del proceso de difusión de las partículas de Ag durante el tratamiento térmico.

El coeficiente de fricción disminuyó con el aumento en el contenido de plata debido a sus propiedades autolubricantes. Sin embargo, a un porcentaje mayor a 28,6 % at de Ag (porcentaje atómico de plata) el coeficiente de fricción comienza a aumentar, debido al exceso de este material en la superficie del contracuerpo durante el ensayo tribológico, lo que conduce a un fuerte desgaste, fundamentalmente de tipo adhesivo.

Los resultados permiten concluir que, con excepción del recubrimiento con el mayor contenido de plata, estos recubrimientos compuestos poseen un gran potencial para ser aplicados, no solo en instrumentación quirúrgica, sino también en diferentes tipos de implantes, por su adecuado balance entre dureza y tasa de desgaste, y por el posible efecto bactericida que le puede conferir a la pieza recubierta, lo cual representa un alto valor agregado a la misma. X

#### Referencias

Marín, F. L., Gilberto, G. y Torres, G. (2022). Influence of silver content on microstructural, bactericidal, and cytotoxic behavior of TiAlVN (Ag) composite coatings deposited by magnetron sputtering. *Materials Chemistry and Physics*, 291, 126776. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126777>.

#### Glosario

**El desgaste adhesivo:** propiedad tribológica que puede medirse a partir de la resistencia resultante del deslizamiento de las asperezas (impurezas de recubrimiento) durante el movimiento frente a un contracuerpo (un material que se utiliza como blanco de prueba en tribología y que se fracturan por este movimiento), dependiendo de la magnitud de las fuerzas que tiene el sistema.

**Material dopante:** material que se agrega al recubrimiento, en este caso, la plata.

**Plano dos cero cero (200):** direcciones cristalográficas de la plata obtenida por la difracción de rayos X en el recubrimiento.

**TiAlN:** nitrato de titanio aluminio.

**TiAlVN:** nitrato de titanio aluminio vanadio.

**TiAlVN(Ag):** nitrato de titanio aluminio vanadio plata.