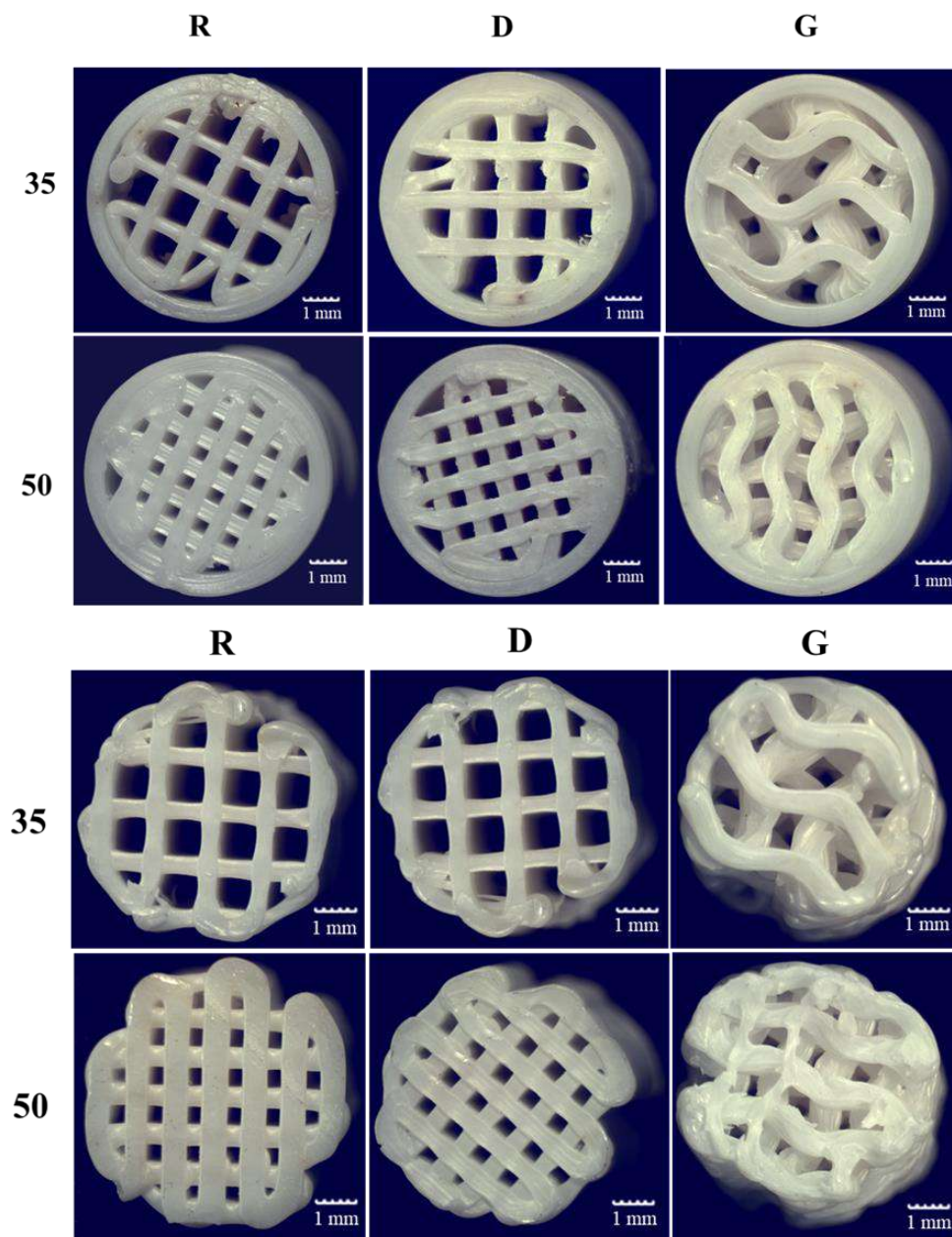


Material-ES

REVISTA DE LA SOCIEDAD ESPAÑOLA DE MATERIALES



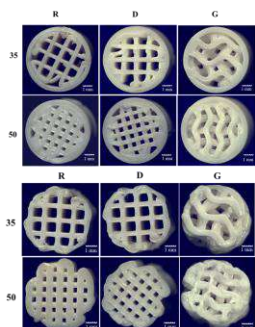


Imagen de Portada:

Piezas de YSZ para implantes óseos obtenidos mediante Fabricación por Filamento Fundido (FFF) modificando la densidad y morfología de relleno.

“Influencia de los patrones de impresión por filamentos fundidos en las propiedades mecánicas de implantes óseos de YSZ”

E. de Lamo; V. Axelrad; C. Berges; J. Hidalgo; G. Herranz

Editor

Rodrigo Moreno. *Instituto de Cerámica y Vidrio, CSIC. Madrid. España.*

Secretaría

Anna Muesmann. *SOCIEMAT. Madrid. España.*

Junta Directiva de SOCIEMAT

Presidente:

Juan José de Damborenea González

Vicepresidente:

Rodrigo Moreno Botella

Secretaria:

Gloria Patricia Rodríguez Donoso

Tesorera:

Anna M^a Muesmann Torres

Vocales:

M^a Victoria Biezma Moraleda

Jordi Díaz Marcos

Teresa Guraya Díez

Marta Mohedano Sánchez

Jon Molina Aldareguia

Sergio Ignacio Molina Rubio

Alberto Palmero Acebedo

Jose Ygnacio Pastor Caño

Gloria Pena Uris

Daniel Sola Martínez

URL: <http://sociemat.es>

Correo electrónico: info@sociemat.es / sociemat1996@gmail.com

Tel.: 618 170 493

Sociedad Española de Materiales SOCIEMAT

Entidad inscrita en el R^o Nacional de Asociaciones del

Ministerio del Interior, Grupo 1, Sección 1, Número Nacional 161428

ÍNDICE

ARTÍCULOS

Premio SOCIEMAT Mejor Trabajo de Fin de Grado en ingeniería en Materiales 2023

Diseño de un sistema in-situ de fragilización por hidrógeno en una máquina en ensayos de fatiga por flexión rotativa para alto número de ciclos

J.E. Muñoz-Manero; J. Calaf-Chica; M. Preciado; P.M. Bravo 61

Oxidación electrolítica con plasma de la aleación Al10Si1Mg DMLS: efecto de precursores

A. Aharram; R. Arrabal 65

Modelización computacional del metal duro WC-Co considerando orientación de grano y anisotropía a partir de tomografía FIB

D. Cruañes González; E. Jiménez Piqué; P. V. Sousa Machado 69

Influencia de los patrones de impresión por filamentos fundidos en las propiedades mecánicas de implantes óseos de YSZ

E. de Lamo ; V. Axelrad; C. Berges; J. Hidalgo; G. Herranz 74

I+D+i EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE MATERIALES

Análisis de los estereotipos de género y de la percepción que tiene el alumnado de primaria sobre la actividad científica y el papel de la ciencia en la sociedad. Un estudio a través del dibujo infantil

G. M Arzac; C. Rojas 78

EDITORIAL

Finalizamos el volumen nº 7 de la revista Material-ES correspondiente al año 2023 con una selección de trabajos presentados por jóvenes investigadores al Premio SOCIEMAT Fundación Caja de Ingenieros al Mejor Trabajo de Fin de Grado en Ingeniería en el área de Materiales en su edición de 2023. Una vez más, queremos destacar la gran calidad de los trabajos presentados y desde SOCIEMAT animamos a los estudiantes del área a continuar con sus apasionantes líneas de trabajo y felicitamos a todos los participantes y en especial al ganador de esta edición, José Enrique Muñoz Manero, de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Burgos. En el siguiente número (enero-marzo 2024) se publicarán los restantes trabajos presentados al concurso, todos ellos merecedores de toda nuestra atención.

El pasado 8 de noviembre se celebró, una vez más, el Día Mundial de los Materiales, con actos por distintos centros de la geografía española. El acto principal de SOCIEMAT se realizó en la ETSI de Caminos, Canales y Puertos de la UPM, organizado por el Prof. José Ygnacio Pastor. En el acto, se presentó la conferencia ganadora del mencionado Premio SOCIEMAT Fundación Caja de Ingenieros al Mejor Trabajo de Fin de Grado en Ingeniería en Materiales. También se presentaron los trabajos finalistas del Premio SOCIEMAT Mejor Trabajo Fin de Máster en Ciencia de Materiales, del que resultó ganador Lluís Casabona Cendra, de la Universidad Autónoma de Barcelona, ICMAB-CSIC, a quien queremos dar nuestra más cordial enhorabuena.

Por primera vez se presentó también el Premio MATERPLAT-SOCIEMAT Jóvenes Innovadores en Materiales al Mejor Trabajo Fin de Máster en Ciencia y Tecnología de Materiales con aplicación industrial, que recayó en Noemi Soldado Vilches, de la Universidad Complutense de Madrid.

El acto se inició con una conferencia de Perla Wahnón, Presidenta de la Confederación de Sociedades Científicas de España, COSCE, titulada “La importancia de las Sociedades Científicas en el avance científico-tecnológico y los retos sociales”. La jornada terminó con una ponencia de Amador González, Director de la ETS de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación, de la Universidad Politécnica de Madrid, UPM, titulada: “Materiales de ensueño: Ciencia ficción de los materiales”.

Para el año que viene tenemos muchas actividades nuevas, pero queremos destacar 3 eventos de gran repercusión en nuestra área. A nivel nacional, estamos ya organizando el 2º Congreso Nacional de Divulgación de Materiales, Materdivulga, que se celebrará los días 13-14 de junio en Toledo, y el Congreso Nacional de Materiales, CNMAT2024, que tendrá lugar en Málaga del 25 al 28 de junio. Poco después, a nivel internacional, FEMS organiza el Congreso FEMS-JUNIOR EUROMAT, que se celebrará del 15 al 18 de julio en Manchester (GB). Esperamos que podáis asistir y recalcamos nuestro interés primordial en potenciar la participación de los estudiantes. Para ello, en el CNMAT2024 se realizará nuevamente un concurso para estudiantes de grado, máster y doctorado.

Agradeciendo vuestra colaboración, desde SOCIEMAT os enviamos nuestros mejores deseos para el año entrante, en el que esperamos poder vernos y seguir compartiendo nuestra pasión por los materiales.

Premio SOCIEMAT Mejor Trabajo de Fin de Grado en Ingeniería en Materiales 2023

DISEÑO DE UN SISTEMA IN-SITU DE FRAGILIZACIÓN POR HIDRÓGENO EN UNA MÁQUINA EN ENSAYOS DE FATIGA POR FLEXIÓN ROTATIVA PARA ALTO NÚMERO DE CICLOS

J.E. Muñoz-Manero^{1}, J. Calaf-Chica¹, M. Preciado¹, P.M. Bravo¹*

¹ CIMA Research Group. Universidad de Burgos, Escuela Politécnica Superior. Campus Río Vena. Avda. Cantabria s-n. 09006. Burgos, ciemmat@ubu.es

Resumen: Si bien es verdad que el hidrógeno como vector energético puede ser una solución al problema energético actual, debemos afrontar los retos que supone su producción, almacenamiento y distribución. La mayor dificultad radica en la elección de los materiales utilizados, puesto que deben trabajar en una atmósfera rica en hidrógeno a alta presión. Esta circunstancia genera retos en materiales como el acero, principal componente de las vasijas de almacenamiento de hidrógeno, cuya fragilidad aumenta considerablemente como consecuencia de la difusión del H₂.

Actualmente se carece de ensayos de fatiga por flexión rotativa con fragilización in-situ debido a la ausencia de máquinas que estén adaptadas a dicha capacidad. El objeto de este trabajo es diseñar, fabricar y validar la adaptación de una máquina de fatiga por flexión rotativa integrando una celda electrolítica para la realización de ensayos bajo fragilización in-situ de hidrógeno. El reto radica en establecer la celda en un ensayo dinámico de hasta 5000 rev/min.

Palabras clave: Hidrógeno, fragilización, fatiga, flexión rotativa, celda electroquímica.

1. INTRODUCCIÓN.

Cuando se habla del futuro en términos energéticos es imposible no hacer referencia al hidrógeno. Numerosos expertos ya hablan de la conocida como “economía del hidrógeno”, esto es, que dicho combustible formará parte del conjunto de vectores que sustituirán a los combustibles fósiles [1]. En la Figura 1 es posible visualizar cómo la previsión de la demanda de energía es creciente mientras que la producción anual de combustibles fósiles está previsto que vaya decayendo.

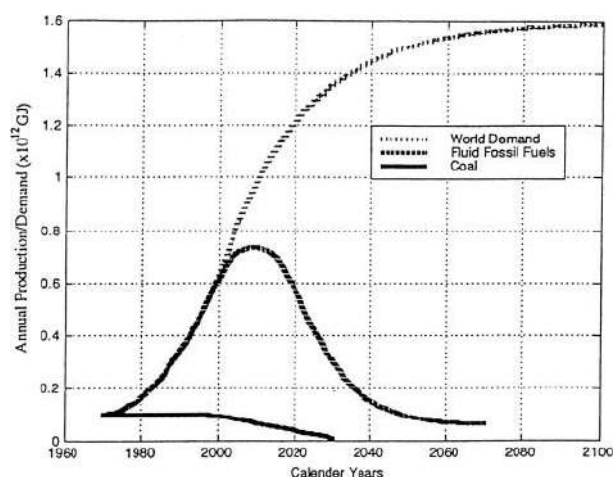


Figura 1. Previsión de producción y demanda de combustibles fósiles a futuro [2].

La Unión Europea es consciente de esta realidad, y está ejecutando un plan de impulso y desarrollo de la industria

del hidrógeno como vector energético en el sector del transporte, entre otros. Prueba de ello fue la sesión parlamentaria del 21 de octubre de 2022, donde se aprobó un objetivo de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero del 20% para 2035 y del 80% para 2050 [3].

Si bien es verdad que el hidrógeno puede ser una solución frente a los combustibles fósiles, también debemos pensar en su almacenamiento, transporte y distribución. Este aspecto podría ser un condicionante a la hora de utilizar el hidrógeno, debido a que el comportamiento de algunos materiales, en especial las aleaciones metálicas en una atmósfera rica en hidrógeno a alta presión, es diferente al que muestra en condiciones normales. El tamaño del átomo de hidrógeno le permite difundirse con relativa facilidad a través del material y acumularse en defectos y límites de grano, y ello acaba motivando un proceso de degradación de su ductilidad.

La expansión del mercado del hidrógeno, y la expectativa de un incremento exponencial de su producción, abre un escenario de interés a cualquier innovación que redujera la sensibilidad a la fragilización de las aleaciones metálicas económicamente más competitivas para la fabricación de hidroductos y depósitos.

Dado que la principal característica de la fragilización por hidrógeno es la pérdida de ductilidad, el nivel de alteración de la curva S-N sería un fiel reflejo de la capacidad de un material a verse afectado ante ambientes de este tipo. Dentro de las múltiples configuraciones de ensayo para estimar estas curvas S-N, se encuentra el ensayo de fatiga por flexión rotativa (ensayo FxFR), que

se caracteriza por ser uno de los métodos de ensayo más óptimo desde un punto de vista de tiempos y coste del ensayo. En la actualidad no existen ensayos FxFR con fragilización in-situ de hidrógeno debido a la ausencia de máquinas que estén adaptadas a dicha capacidad. Sin embargo, los reducidos costes que suponen los ensayos de fatiga en máquinas de FxFR aunados a la rapidez con la que éstos pueden ser efectuados, han generado la motivación de este trabajo de investigación: el diseño de un sistema in-situ de fragilización por hidrógeno en una máquina de fatiga por flexión rotativa para alto número de ciclos.

2. METODOLOGÍA.

2.1. Generación de hidrógeno.

La dificultad en el uso de hidrógeno (H_2) radica en que se trata de un vector energético que debe ser producido. Este problema está presente al emplearse como combustible, pero también lo vamos a encontrar al realizar ensayos de fragilización por hidrógeno.

Un ensayo de fragilización por hidrógeno consiste en estudiar el comportamiento de un material bajo atmósferas ricas en hidrógeno. Existen dos métodos para lograr la difusión de este elemento en el interior de la probeta:

- i. Difusión de hidrógeno a alta presión. Este método es el más fiel con el escenario real. El material a cargar se pone en contacto con una atmósfera de hidrógeno a alta presión.
- ii. Difusión del hidrógeno por carga catódica. El método se basa en el montaje de una celda electrolítica, en la que la probeta actúa como cátodo (electrodo de trabajo) y, usualmente, un electrodo de platino hace de ánodo (electrodo auxiliar), con ambos sumergidos en un electrolito conductor. La aplicación de una diferencia de potencial entre ambos electrodos hace que la solución electroquímica se descomponga y los iones de hidrógeno (protones) liberados sean atraídos electrostáticamente por el cátodo. El aumento de concentración de protones en la superficie de la probeta o electrodo de trabajo hace que se inicie un proceso de difusión del hidrógeno atómico H al interior de la probeta, logrando la carga buscada.

Existen ventajas e inconvenientes para cada método de carga. La carga por alta presión requiere una instalación más compleja y unos equipos más costosos que exigen importantes controles de seguridad. A cambio, es el método más fiel al escenario real. Por otro lado, la carga catódica se aleja del escenario real, pero refleja una sencillez y adaptabilidad del sistema muy superior. La versatilidad propia de este segundo método hace mucho más sencillo aunar el método de carga con la opción *in situ* de ensayo, que es el objetivo principal de este proyecto.

La elección de un sistema in situ o ex situ ha de basarse en el tipo de ensayo que se pretende realizar. En los casos en los que los tiempos de ausencia de carga de hidrógeno hasta la finalización del ensayo sean lo suficientemente cortos, la opción ex situ será la más adecuada, por su mayor sencillez y bajo coste. Pero en los casos de ensayos de larga duración, este sistema con ausencia de carga durante el ensayo, no es una opción viable, ya que el hidrógeno se iría difundiendo al exterior alterándose su concentración durante el ensayo. Por ende, los ensayos de fatiga de alto número de ciclos descartan la opción ex situ. Llegados a este punto, ante la disyuntiva de elegir entre un sistema de carga por alta presión o un sistema de carga catódica, la segunda opción es la óptima. Esto se debe a que la adaptación de un sistema de alta presión de hidrógeno que contuviera a la probeta de fatiga sería una instalación sumamente costosa y con amplios retos de seguridad. Si se pretende realizar ensayos de fatiga de alto número de ciclos, la opción más recomendable, por su bajo coste, es la fatiga por flexión rotativa. En este tipo de sistemas, existe una mordaza que no se encuentra anclada en la máquina y que cede cuando la probeta alcanza el fallo. Con ello, se producen movimientos relativos y aplicaciones de pares de fuerza que hacen imposible adaptar un contenedor de alta presión en la zona de la probeta donde acontece el proceso de fatiga. Esto llevaría a que la adaptación de un sistema de carga de alta presión en una máquina de fatiga por flexión rotativa, requeriría cubrir también las propias mordazas, aspecto que introduciría nuevas dificultades. Este análisis lleva a dejar clara la elección más pertinente para los ensayos de fatiga por flexión rotativa: carga de hidrógeno in situ por carga catódica. Éste es el sentido del actual proyecto: diseñar la adaptación de una máquina de fatiga por flexión rotativa para la carga in situ de hidrógeno por medio de carga catódica en una celda electrolítica.

2.2. Electrolito-electrodos empleados y esquema conceptual del sistema.

La difusión de hidrógeno por carga catódica se lleva a cabo por la electrólisis del agua. Para reducir la resistividad del electrolito existen múltiples opciones. Para el presente caso se eligió una disolución ácida de ácido sulfúrico (0.5 M de H_2SO_4) junto a tiourea CH_4N_2S (4 g/l) como facilitador del proceso de difusión, en base a investigaciones precedentes [4,5].

La liberación de hidrógeno se produce en la superficie de la muestra, al estar sumergida o en contacto con la solución ácida y utilizando un potencial adecuado y controlado por medio de un potencióstato para garantizar una densidad de corriente constante de 3 mA/cm². La probeta a ensayar actúa de cátodo (electrodo negativo de trabajo), y como ánodo (electrodo positivo auxiliar) se escogió acero inoxidable AISI 316 con la finalidad de reducir al máximo la oxidación de este electrodo y cuyos iones pudieran entrar en conflicto con la generación y difusión de hidrógeno en el electrodo de trabajo. Teniendo en cuenta que el electrodo de trabajo es una probeta que se encuentra en movimiento rotativo, la celda debía crear un espacio que contuviera el electrolito, mojara ambos electrodos y, a su vez, lograra todo esto sin

estar en contacto directo con la probeta en movimiento. Para lograr este objetivo se diseñó un sistema de bombeo de fluido que mantuviera de forma dinámica un volumen continuo de electrolito entre electrodo auxiliar y probeta, y fuera a la vez evacuado para verterse en un depósito que de nuevo alimentara al sistema cerrando el circuito del electrolito.

Para poder cerrar el circuito eléctrico en torno al potencióstato, se diseñó un montaje rotor-estator en el eje de la mordaza fija de la máquina. Ello obligaba a aislar eléctricamente ambos herrajes, fijo y móvil, al resto de la máquina. El uso de placas de polietileno para el aislamiento del herraje, así como arandelas poliméricas de alta resistencia para el aislamiento de sus correspondientes tornillos de amarre, fue la solución adoptada para el aislamiento eléctrico del circuito de la celda electrolítica.

La Figura 2 muestra un esquema conceptual de la celda electrolítica, y la Figura 3 representa la celda electrolítica utilizada en la máquina de fatiga para la fragilización in-situ de hidrógeno.

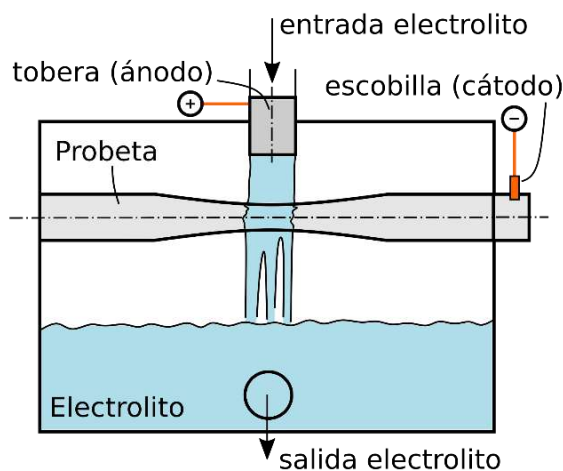


Figura 2. Esquema conceptual de la adaptación para fragilización in-situ de hidrógeno.

Para la verificación experimental se fabricaron 32 probetas de fatiga según ISO 1143, obtenidas de barra de diámetro 30 mm en acero calidad 42CrMo4 en estado normalizado (dureza 93.7 HRBW, equivalente a una resistencia a la tracción de 675 MPa). Se llevaron a cabo ensayos con distintos niveles de carga y tensión equivalente (ver Tabla 1) sin fragilización (ensayos codificados con el sufijo indicador *-x) y con fragilización por hidrógeno bajo la configuración de difusión por carga catódica indicada en párrafos anteriores (ensayos codificados con el sufijo indicador *-H2). Para los casos *-H2 se estableció un periodo de precarga de hidrógeno de 2 horas sin carga flectora y bajo las mismas condiciones de montaje del ensayo. Una vez alcanzado el tiempo de precarga se aplicaba la carga establecida en cada caso y se efectuaba el ensayo a una velocidad de giro de 2000 rpm.

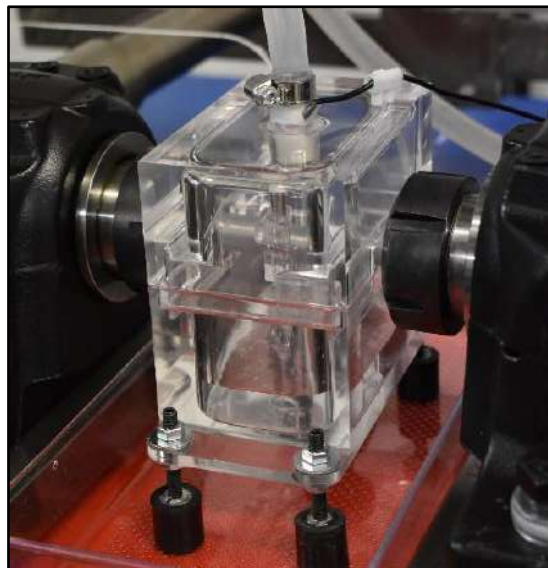


Figura 3. Celda electrolítica para carga catódica de hidrógeno.

Tabla 1. Masa y tensión máxima aplicada en las probetas de fatiga.

ID	masa (kg)	S (MPa)
S0	1.56	359.8
S1	1.82	420.5
S2	2.00	462.1
S3	2.84	656.9

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

La figura 4 muestra el potencial eléctrico registrado por el potencióstato durante la fase de precarga (120 min) y el ensayo de fatiga. Los saltos observados en los tiempos 60 min y 100 min corresponden con el movimiento manual del eje de la mordaza fija. El sistema rotor-estator genera una diferencia de potencial de aproximadamente 0.8 V, que cambia al rotar el eje. El salto de potencial a los 120 min corresponde con el inicio del ensayo de fatiga, y el último salto de potencial al final del ensayo se debe a la rotura de la probeta y al cambio que ello provoca en la resistencia del conjunto del circuito. La intensidad que debía controlar el potencióstato, establecida en 20 mA, mostró un registro con una media a lo largo de toda la precarga y ensayo de $20.009 \text{ mA} \pm 0.76 \text{ }\mu\text{A}$.

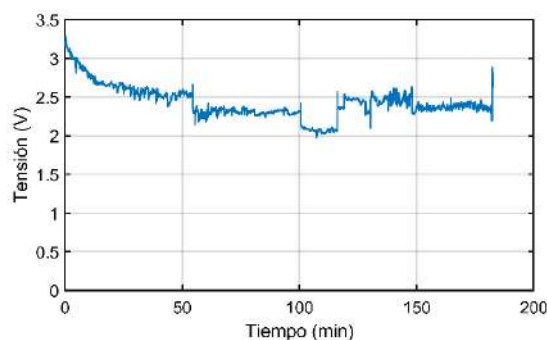


Figura 4. Tensión registrada por el potencióstato durante la fase de precarga y el ensayo de fatiga de la probeta S1.

La figura 5 muestra los resultados de los ensayos de fatiga efectuados según las indicaciones del apartado anterior. Se observó una clara disminución de los ciclos a rotura en los cuatro casos de carga estudiados, lo que confirmó el funcionamiento correcto de la celda electrolítica y su capacidad de cargar con hidrógeno a la probeta. La figura 5 incluye los intervalos de confianza de la regresión de cada familia de datos al 95%.

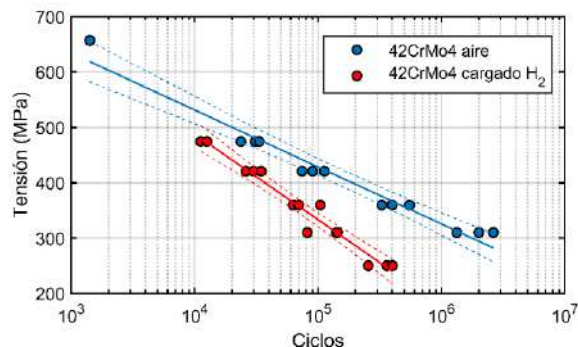


Figura 5. Curvas S-N (azul: sin carga H₂; rojo: con carga H₂) e intervalos de confianza de la regresión al 95%.

La figura 6 representa las superficies de fractura de las probetas S1-x y S1-H2, que confirman el incremento de fragilidad estimado por el registro de ciclos del ensayo de fatiga. La figura 6a, correspondiente a la probeta S1-x muestra una amplia superficie de crecimiento de grieta por fatiga, con una pequeña zona de fractura final (destacada en rojo). En cambio, la figura 6b, correspondiente a la probeta S1-H2, refleja una superficie de fractura final mucho más amplia y brillante. Todo ello, confirma el correcto funcionamiento de la celda de fragilización por carga catódica de hidrógeno.



Figura 6. (a) Superficie de fractura de la probeta S1-x, (b) Superficie de fractura de la probeta S1-H2.

4. CONCLUSIONES.

Este trabajo pretendía diseñar y fabricar la adaptación de una máquina de fatiga por flexión rotativa para la realización de ensayos bajo carga de hidrógeno. De los resultados obtenidos se puede concluir que el sistema de celda electrolítica de chorro de electrolito es lo suficientemente estable y fiable como para generar una fragilización por hidrógeno controlada en probetas de fatiga. Con ello, se ha adaptado un sistema de fragilización por hidrógeno a una de las configuraciones de máquina de ensayos de fatiga de coste más competitivo del mercado.

5. REFERENCIAS.

- [1] Hortal, M. A. & Barreras, A. L. M. (2007). El hidrógeno: Fundamento de un futuro equilibrado. Díaz de Santos.
- [2] Veziroğlu, T. N. & Şahin, S. (2008). 21st Century's energy: Hydrogen energy system. *Energy Conversion and Management*, 49(7), 1820-1831.
- [3] Members of The European Parliament Have Decided to Support a Hydrogen Based Green Transition in The Transport Sector. (2022, 21 octubre). Hydrogen Central.
- [4] Cauwels, M., et al. (2022). Influence of electrochemical hydrogenation parameters on microstructures prone to hydrogen-induced cracking. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 101, 104533.
- [5] Li, X., et al. (2015). Effect of cathodic hydrogen-charging current density on mechanical properties of prestrained high strength steels. *Materials Science and Engineering: A*, 641, 45-53.

OXIDACIÓN ELECTROLÍTICA CON PLASMA DE LA ALEACIÓN Al10SiMg DMLS: EFECTO DE PRECURSORES

A. Aharram¹, R. Arrabal¹

¹Departamento de Ingeniería Química y de Materiales, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040, España, aaharram@ucm.es

Resumen: La oxidación electrolítica con plasma (PEO) es una técnica de tratamiento superficial similar al anodizado que permite mejorar la resistencia a la corrosión y desgaste de aleaciones base aluminio. En el presente trabajo, se estudia el comportamiento a desgaste de la aleación Al10SiMg obtenida mediante fabricación aditiva y modificada superficialmente. Concretamente, se compara el anodizado duro frente a varios recubrimientos PEO. El objetivo es mejorar la resistencia al desgaste de la capa porosa superficial del recubrimiento PEO y reducir el consumo energético mediante diversas estrategias. Los resultados obtenidos revelaron que el uso de una capa de precursor obtenida por anodizado convencional permite mejorar la eficiencia energética del proceso PEO. Asimismo, la adición de partículas α -Al₂O₃ al electrolito consigue reducir el consumo energético en un 20%. Los estudios de desgaste muestran que el sistema PEO con adición de partículas puede llegar a ser competitivo frente al anodizado duro bajo las condiciones estudiadas.

Palabras clave: Al10SiMg; Manufactura aditiva; PEO; Consumo energético; Al₂O₃; Desgaste.

1. INTRODUCCIÓN.

El uso de aleaciones de Aluminio en la industria del transporte se ha visto incrementado de manera significativa durante la última década [1]. La principal fuerza impulsora es la reducción del peso de componentes para así disminuir el consumo energético y las emisiones de CO₂ [2]. Tradicionalmente, los componentes de geometría compleja suelen obtenerse a partir de aleaciones de moldeo. Las aleaciones de Al-Si destacan dentro de este grupo, debido a sus buenas propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión, baja densidad, excelente fluidez y colabilidad. Sin embargo, actualmente, se está recurriendo al uso de la técnica de manufactura aditiva (MA), debido a la capacidad que tiene de reducir el número de elementos de un ensamblaje a un único componente complejo y la reducción óptima del peso y de costes de utillaje. En la **Figura 1**, se pueden observar las diferencias microestructurales que hay entre las aleaciones de moldeo y las de manufactura aditiva. Los estudios relativos a corrosión y desgaste de aleaciones Al-Si obtenidas por MA revelan un comportamiento superior a las aleaciones obtenidas por moldeo.

El aluminio, por lo general, posee un buen comportamiento a corrosión debido a la formación de una película pasiva de alúmina (Al₂O₃). Sin embargo, la principal limitación es su baja resistencia a la corrosión en ambientes agresivos, produciéndose la reacción de corrosión. Con respecto a la resistencia al desgaste, presentan un buen comportamiento debido a la presencia de partículas duras de Si. No obstante, es frecuente recurrir a tratamientos como el anodizado para mejorar

sus prestaciones. La oxidación electrolítica con plasma (PEO por sus siglas en inglés) consiste en un tratamiento electroquímico con la generación de microdescargas que producen el engrosamiento de la capa natural de óxido del Al con el objetivo de conseguir una mejor resistencia frente a la corrosión o desgaste. Para reducir su consumo energético debido al uso de elevados voltajes y corriente. Existen estrategias como el ajuste del electrolito y señal eléctrica, pero no es suficiente. En estudios previos se ha demostrado que el empleo de precursores de 20-30 μ m, obtenidos por anodizado convencional en ácido sulfúrico [3], consigue un ahorro energético de hasta el 60%, aumentando la eficiencia del proceso.

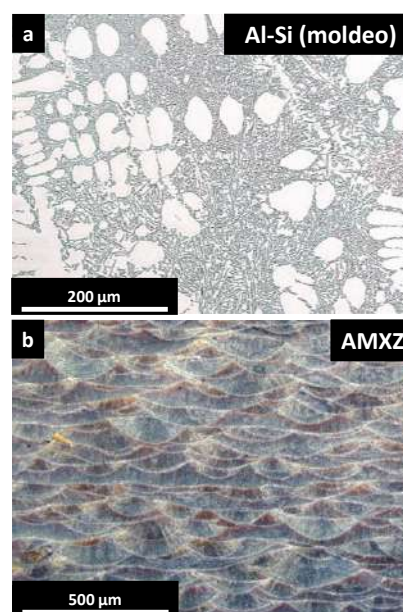


Figura 1. (a) Vista general de la aleación de Al-Si por moldeo (b) vista general de la aleación de Al-Si por manufactura aditiva.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

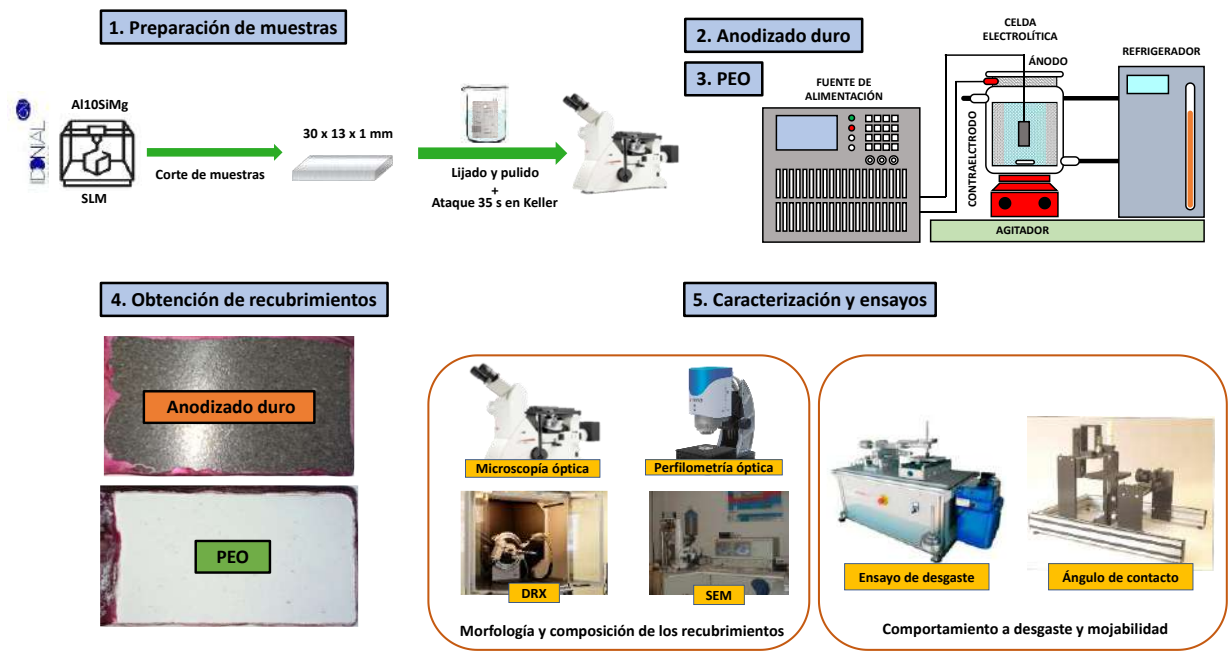


Figura 2. Procedimiento experimental realizado.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

3.1. Respuestas de voltaje y corriente.

Durante el anodizado duro, **Figura 3a**, el voltaje inicialmente aumenta rápidamente debido a la formación de una capa de óxido de aluminio en la pieza. Luego, entre 50 y 1000 segundos, el ritmo de crecimiento del voltaje disminuye, indicando estabilización de la capa de óxido. Después de 1000 segundos, el voltaje aumenta nuevamente debido al espesor o cambios en la capa. El proceso dura 2700 segundos para una capa de 20 μm , aproximadamente 30 μm por hora (**Tabla 1**). En la **Figura 3b**, se observa un gráfico que registra la respuesta de voltaje para tres tipos de electrolitos: PEO 1, PEO 2 y PEO 3.

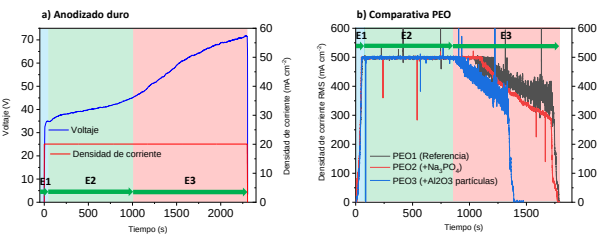


Figura 3. Respuestas de tiempo, voltaje y corriente (RMS). (a) Anodizado duro (HA) y (b) PEO.

La densidad de corriente aumenta constantemente en los primeros 60 segundos y luego se mantiene constante a 0,5 A/cm². El voltaje aumenta hasta llegar a +490/-110 V, momento en el que la corriente comienza a disminuir y a producirse descargas eléctricas suaves o "soft sparking". Tras 600 segundos, el proceso se detiene gradualmente en una rampa de 60 segundos. La capa de

óxido se forma principalmente donde ocurren las descargas eléctricas, pero siempre se mantiene una capa barrera de aproximadamente 500 nm en la interfaz entre el sustrato y el recubrimiento, según resultados anteriores en aleaciones de aluminio.

Tabla 1. Espesores (μm) promedios de los recubrimientos obtenidos: HA, PEO 1 y PEO 3.

HA	PEO 1	PEO 2	PEO3
22.1 $\pm$ 1.1	89 $\pm$ 2	108 $\pm$ 6	90 $\pm$ 3

La **Tabla 2** muestra el tiempo de caída de corriente, relacionado con la eficiencia. Los recubrimientos tienen igual grosor (90-100 μm), lo que permite comparar el consumo de energía utilizando el tiempo de caída como referencia. Independientemente del electrolito utilizado, en todos los casos se evidencia que el empleo del precursor obtenido por anodizado convencional tiene un efecto beneficioso desde el punto de vista energético, además de que el uso del electrolito utilizado para el PEO 3 muestra un ahorro de energía del 20%.

Tabla 2. Tiempo (s) de caída de cada electrolito.

PEO 1	PEO 2	PEO 3
1100	1100	867

3.2. Rugosidad y ángulo de contacto.

En la **Tabla 3** y la **Figura 4** se presentan datos sobre la rugosidad superficial y el ángulo de contacto de diferentes recubrimientos, aspectos importantes para sistemas sujetos a desgaste y en contacto con lubricantes a base de agua. En este estudio se utilizaron dos parámetros para medirla: Sa, que indica la altura promedio de las imperfecciones en un área específica, y

S10z, que considera las 5 protuberancias más altas y los 5 valles más profundos para cuantificarla. Los resultados de la **Tabla 3** muestran que el anodizado duro tiene menor rugosidad y menos imperfecciones que el recubrimiento PEO. En la **Figura 4**, se observa que la superficie del recubrimiento PEO 1 es más suave que el PEO 3. También, el anodizado duro reproduce la microestructura subyacente, mientras que el PEO no lo hace debido a su diferente proceso de crecimiento. Con respecto al ángulo de contacto, los resultados indican que el anodizado duro tiene una baja mojabilidad, en comparación con los recubrimientos de PEO.

Tabla 3. Medidas de rugosidad y ángulo de contacto (θ).

	HA	PEO 1	PEO 3
Sa (μm)	$0,90 \pm 0,08$	$5,80 \pm 0,19$	$6,2 \pm 0,5$
S10z (μm)	6 ± 2	41 ± 4	52 ± 7
$\theta(^{\circ})$	74 ± 6	25 ± 7	29 ± 7

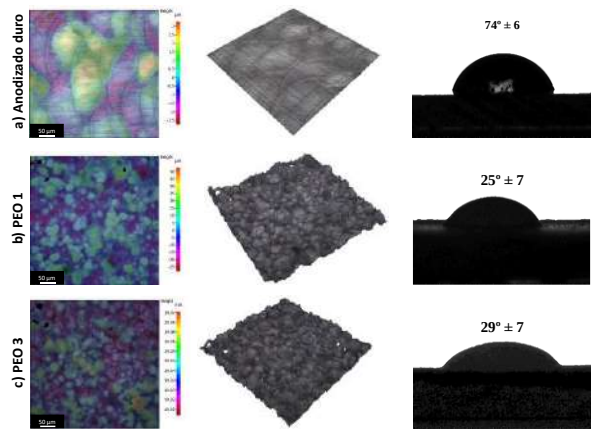


Figura 4. Imágenes 3D en color real e imágenes 2D combinando color real e información topográfica de la superficie de la aleación.

3.3. DRX Y SEM/EDS.

El análisis por DRX (**Figura 5**) muestra que el recubrimiento PEO 3 picos de $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ de, mientras que el PEO 1 solo muestra picos de mullita. Es importante mencionar que podría haber formación de Al_2O_3 amorfa y $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ en la capa superficial debido a la oxidación del sustrato, pero no se puede confirmar su presencia mediante DRX. La vista longitudinal, realizadas con el SEM (**Figura 6**), confirma la incorporación de partículas de $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ en la superficie del recubrimiento, y se observa que su morfología se mantiene sin cambios significativos. Los análisis 2 y 4 en la **Tabla 4** (análisis EDS) indican un mayor contenido de aluminio en las áreas con más partículas de alúmina. En las secciones transversales se nota que las partículas también afectan el interior del recubrimiento, lo que reduce la porosidad y disminuye el contenido de silicio, como se ve en los análisis 9-10 en comparación con 5-6.

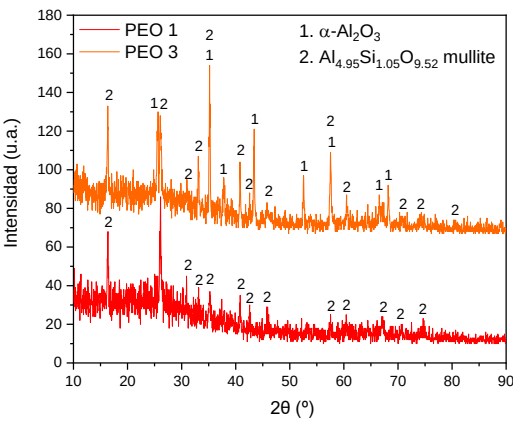


Figura 5. Difractograma de los recubrimientos PEO 1 y PEO 3 bajo ángulo rasante.

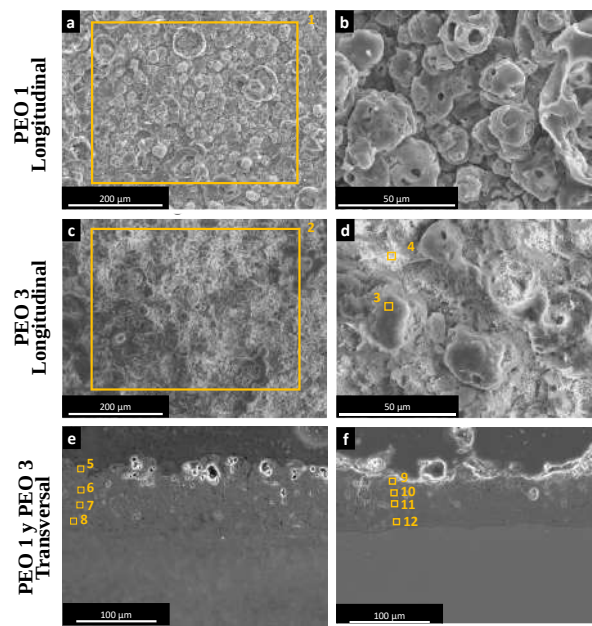


Figura 6. Microscopía electrónica SEM de los recubrimientos.

Tabla 4. Análisis EDS longitudinal (L) y transversal (T) de los recubrimientos estudiados.

Muestra	Espectro	O	Na	Mg	Al	Si	K
		(% atómico)					
PEO 1 (L)	1	64,4	1,4	-	19,0	12,1	3,1
	2	63,9	1,0	-	25,8	7,2	2,2
PEO 3 (L)	3	58,3	0,7	5,84	21,8	11,3	2,1
	4	63,8	0,8	-	27,0	5,1	3,3
PEO 1 (T)	5	49,6	-	-	33,0	16,4	1,1
	6	48,2	1,9	-	31,6	17,3	1,0
	7	46,8	-	-	48,0	4,6	0,6
	8	45,4	-	-	45,1	8,5	1,0
PEO 3 (T)	9	60,9	1,2	-	25,7	10,3	1,8
	10	59,4	-	-	25,0	14,8	0,8
	11	57,4	-	-	30,6	11,5	0,4
	12	56,2	0,5	-	31,1	10,1	2,1

3.4. Ensayos de desgaste.

Tras 70 m de recorrido, el desgaste es mayor con 10 N en comparación con 5 N. La huella del anodizado duro es más estrecho que el de los recubrimientos PEO, donde además muestra microagrietamiento en áreas cercanas a la huella. A mayores aumentos, se observa mejor la superficie de desgaste de las muestras (**Figura 7 g, h, i**), donde se distingue una tribocapa lisa y agrietada, con desprendimiento en varias zonas. Los análisis EDS ponen de manifiesto que en el caso de los recubrimientos PEO la tribocapa incorpora material de la contramuestra (1-2% at. W), indicando un mecanismo de desgaste donde participan fenómenos de adhesión (**Tabla 5**). Por tanto, los mecanismos principales de desgaste observados son de agrietamiento para la muestra de anodizado duro y adhesión y agrietamiento para los recubrimientos PEO. El hecho de que se produzca adhesión en estos últimos está relacionado con su mayor dureza (~600 HV en su parte externa) cuando se comparan con el anodizado duro sobre este tipo de material (200-300 HV).

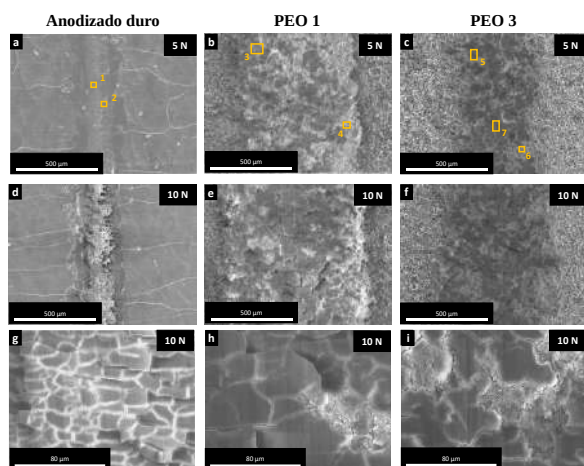


Figura 7. Huellas de desgaste en los recubrimientos HA, PEO 1 y PEO 3. (a,b,c) 5 N, (d,e,f) 10 N, (g,h,i) 10 N detalle.

Tabla 5. Análisis EDS longitudinal de los recubrimientos ensayados con el tribómetro.

Muestra	Espectro	O	Na	Al	Si	K	S	W
		(% atómico)						
HA (5 N)	1	68,0	-	24,3	4,5	-	3,2	-
	2	66,1	-	25,5	5,1	-	3,3	-
PEO 1 (5 N)	3	65,7	1,4	18,2	9,9	3,5	-	1,3
	4	62,8	-	21,9	11,1	4,1	-	-
PEO 3 (5 N)	5	65,8	-	22,8	6,8	2,8	-	1,8
	6	65,4	-	24,5	7,9	2,2	-	-
	7	63,4	-	23,3	8,3	3,0	-	2,0

En la **Tabla 6** se presentan los valores de coeficiente de fricción son altos (>0.5) en todos los recubrimientos, indicando desgaste en seco.

Tabla 6. Datos coeficiente de fricción de los recubrimientos con cargas 5 N Y 10 N.

Carga	HA	PEO1	PEO3
5 N	0,7 ± 0,2	0,6 ± 0,2	0,6 ± 0,2
10 N	0,7 ± 0,2	0,7 ± 0,1	0,6 ± 0,1

En la **Figura 8** se presentan los perfiles de las huellas de desgaste después de 70 m de ensayo con cargas de 5 y 10 N, el recubrimiento HA tiene el mejor rendimiento a 5 N (~2 µm de profundidad de huella), mientras que PEO 3 es el mejor a 10 N (~9 µm de profundidad de huella).

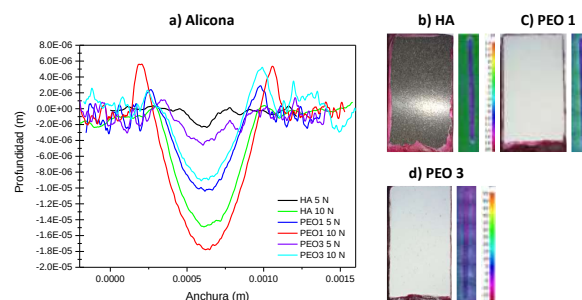


Figura 8. a) Perfiles de las huellas de desgaste, y b, c, d) aspecto superficial antes y después del ensayo de desgaste (10 N) para los recubrimientos.

4. CONCLUSIONES.

Se han desarrollado exitosamente recubrimientos que incorporan partículas de α - Al_2O_3 mediante el tratamiento PEO. Los resultados muestran que el tratamiento PEO 3, que incluye partículas de alúmina, reduce significativamente el consumo de energía y mejora la resistencia al desgaste, especialmente a cargas elevadas. Además, se observa que los recubrimientos PEO son hidrófilos, a diferencia del anodizado duro. Los análisis mediante DRX y SEM confirman la presencia de partículas de alúmina en el recubrimiento PEO 3, conservando su morfología, sin cambios significativos. Los resultados de SEM/EDS revelan una reducción de la porosidad y del contenido de Si en el interior del recubrimiento.

5. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] I. Polmear, D. StJohn, J.-F. Nie, M. Qian, Light Alloys: Metallurgy of the Light Metals, 5ed, Butterworth-Heinemann, 2017.
- [2] Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de Las Regiones: El Pacto Verde Europeo [COM (2019) 640 final de 11.12.2019, Document 52019DC0640].
- [3] E. Matykina, R. Arrabal, M. Mohedano, B. Mingo, J. González, A. Pardo, M.C. Merino, Recent advances in energy efficient PEO processing of aluminium alloys. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 27 (2017) 1439-1545.

MODELIZACIÓN COMPUTACIONAL DEL METAL DURO WC-Co CONSIDERANDO ORIENTACIÓN DE GRANO Y ANISOTROPÍA A PARTIR DE TOMOGRAFÍA FIB

Diego Cruaños González¹, Emilio Jiménez Piqué^{1,2}, Pedro Vinícius Sousa Machado¹

¹ Department of Materials Science and Engineering, EEBE – Campus Diagonal Besòs, Universitat Politècnica de Catalunya – BarcelonaTech, 08019 Barcelona, Spain, diego.cruanes@upc.edu

² Barcelona Research Center in Multiscale Science and Engineering, Campus Diagonal Besòs, Universitat Politècnica de Catalunya – BarcelonaTech, 08019 Barcelona, Spain

Resumen: Este estudio busca simular la microestructura del metal duro WC-Co, considerando la orientación de los granos y la anisotropía del WC. Para lograrlo, se crea una malla del material con cada grano identificado y se añade comportamiento anisotrópico al modelo de simulación. Para la reconstrucción del material, se utilizan imágenes obtenidas mediante FIB/SEM y analizadas por EBSD de dos grados diferentes y se verifica su correcta reconstrucción. Para su simulación, a partir del modelo de microplanos M7WC, se implementa anisotropía en sus parámetros y se ajusta a datos experimentales teniendo también control sobre su orientación.

Palabras clave: WC-Co, Tomografía 3D, Análisis por elementos finitos, Modelo de microplanos

1. INTRODUCCIÓN.

El metal duro carburo de tungsteno-cobalto (WC-Co) es un material ampliamente utilizado en diversas aplicaciones industriales, especialmente en herramientas de corte. Esto se debe a su excepcional dureza, resistencia al desgaste y resistencia mecánica [1]. Estas propiedades son resultado de la combinación de dos fases principales: una fase metálica compuesta de cobalto (Co) y una fase cerámica compuesta de carburo de tungsteno (WC).

El estudio de la microestructura del material proporciona una comprensión tanto de su relación con otras propiedades microestructurales [2, 3, 4, 5] como de sus propiedades mecánicas. Para la caracterización mecánica, se han llevado a cabo diversos ensayos, como la nanoindentación [6], los micropilares [7] y los nanocables [8]. Muchos de estos estudios han explorado el comportamiento anisotrópico del WC.

Este estudio continúa la línea de investigación que, desde hace tiempo, busca simular el material para poder predecir su funcionamiento en un caso real [9, 10]. Sin embargo, en este caso, se busca no solo comprender su comportamiento a nivel macroestructural, sino también a nivel microestructural. Para ello, se necesita tener una geometría y un modelo computacional que representen fielmente al material.

En estudios previos se han logrado generar mallas tridimensionales separando las dos fases utilizando imágenes tomadas por FIB/SEM (Focused Ion Beam/Scanning Electron Microscopy) [11] e incluso analizando por EBSD (Electron Backscatter Diffraction) para poder observar la orientación de grano de WC [12]. Además, se ha desarrollado un modelo funcional de simulación que utiliza microplanos, permitiendo simular de manera conjunta las dos fases del material [13].

En este artículo se persigue continuar con la idea de combinar la obtención de una geometría tridimensional para la caracterización de materiales y, además, se busca

modificar el modelo de simulación M7WC con el objetivo de considerar de forma individual cada uno de los granos e implementar la respuesta anisotrópica del material.

2. MATERIALES.

Para este estudio se han utilizado imágenes tomadas en la *Universität des Saarlandes* mediante un FIB/SEM y analizadas por EBSD. Esto resulta en un conjunto de imágenes a lo largo de la profundidad con información sobre la orientación de los granos.

Se analizan dos grados distintos del metal duro WC-Co. Se asigna “Medium” al primer grado y “Submicron” al segundo grado. Estas designaciones se basan en norma ISO/DIS 4499-2, que utiliza el tamaño de grano para diferenciar entre los diferentes grados.

Estas imágenes, a pesar de estar tomadas por EBSD, no tenían un mapa de orientaciones cristalográficas. Únicamente se disponía imágenes en escala de grises (Figura 1). El volumen de estudio de cada grado se muestra en la Tabla 1.

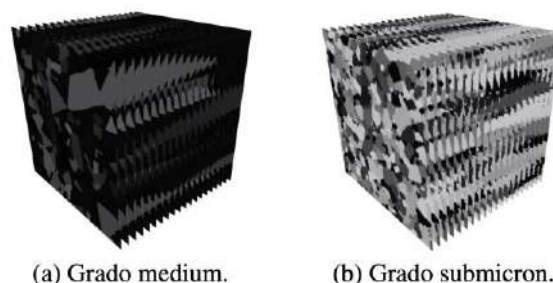


Figura 1. Conjunto de imágenes como datos de origen.

Para procesar las imágenes y obtener la geometría en 3D se tiene acceso a una licencia de Avizo. Posteriormente, para realizar las simulaciones, se utilizará el programa Abaqus. Además, se utilizará el programa MATLAB para funciones intermedias o para la obtención de otros resultados.

Tabla 1. Dimensiones de los volúmenes utilizados para cada grado.

	Medium	Submicron
Tamaño del voxel (nm)	100x100x100	100x100x100
Tamaño del cubo (μm)	15.0x15.0x19.1	15.0x16.0x14.0

3. MÉTODOS.

3.1. Caracterización microestructural.

Para la caracterización de la microestructura del metal duro, se analizarán diversos parámetros con el fin de comparar los dos grados en estudio.

I. Volumen relativo de cada fase.

La cantidad de cada fase es crucial para las propiedades finales del material [2].

En este estudio se define este parámetro como el porcentaje en volumen del cobalto (%_{VCo}). Este valor se calcula a partir de los volúmenes de cada fase de la tomografía, como se muestra en la Ecuación 1.

$$\%_V C_{o3D} = \frac{V_{Co}}{V_{Co} + V_{WC}} \quad (1)$$

A modo de verificación se estudiará la cantidad de cada fase en cada fotografía FIB (Ecuación 2).

$$\%_V C_{o2D} = \frac{N_{Co}}{N_{Co} + N_{WC}} \quad (2)$$

Para la caracterización de la microestructura del metal duro, se analizarán diversos parámetros con el fin de comparar los dos grados en estudio.

II. Tamaño de grano del carburo.

El tamaño de los granos de carburo también afecta a sus propiedades y a la distribución final de los granos [3]. Se suele utilizar para definir este tamaño el diámetro del grano (d_{WC}). Para obtener este valor se utilizará el diámetro de las esferas aproximadas de cada grano.

III. Contigüidad del carburo.

La contigüidad de los granos de WC (C_{WC}) es un parámetro utilizado que relaciona la cantidad de contactos entre granos de WC de la cantidad de contacto entre Co y WC [4].

Se estudiará la contigüidad tridimensional por medio de la Ecuación 3 [5].

$$C_{3D} = \frac{2S_{WC/WC}}{2S_{WC/WC} + S_{WC/Co}} \quad (3)$$

donde $S_{WC/Co}$ y $S_{WC/WC}$ son las superficies de contacto entre carburo y metal y entre carburos, respectivamente. Estos datos se obtienen a partir de la superficie tridimensional.

A modo de comparación se estudiará el valor de la contigüidad bidimensional de cada corte de material (Ecuación 4) [5].

$$C_{2D} = \frac{2N_{WC/WC}}{2N_{WC/WC} + N_{WC/Co}} \quad (4)$$

Este parámetro también se va a utilizar para definir el tono de gris perteneciente a la matriz metálica.

3.2. Caracterización mecánica – Nanoindentación.

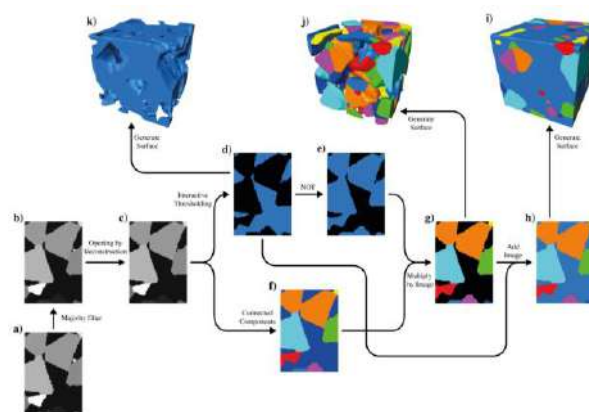
La nanoindentación, o indentación instrumentada, es una técnica utilizada para evaluar las propiedades de un material o recubrimiento. Durante la carga y descarga se registran datos de carga y desplazamiento del indentador en cada instante de tiempo con una alta resolución. Como resultado, se obtiene una curva carga-desplazamiento y la huella final de la indentación de las que se pueden obtener distintas propiedades del material [14].

Durante este estudio se va a utilizar un indentador de tipo Berkovich. En este tipo de indentadores el inicio de la descarga se puede tratar como una descarga elástica [15] y mediante el método de Oliver y Pharr [16] se puede obtener la dureza y el módulo elástico del material.

3.3. Tomografía por FIB/EBSD.

Para obtener la reconstrucción tridimensional del material a partir del conjunto de imágenes, se han procesado mediante el software de análisis de imágenes Avizo [17]. Se ha separado cada una de las fases y, dentro de la fase cerámica, se ha separado cada uno de los granos.

La Figura 2 muestra la metodología seguida en la reconstrucción. Para la caracterización del material se puede examinar cualquiera de los pasos que puedan ser relevantes.

**Figura 2.** Proceso para la obtención de la geometría tridimensional.

Además, para facilitar trabajos futuros similares se ha automatizado el proceso.

3.4. Análisis por elementos finitos – Microplanos.

Para simular todo el material se va a utilizar un modelo de microplanos. Este modelo, en lugar de utilizar

tensores de segundo orden para su cálculo, utiliza vectores. En cada diferencial del material se encuentra un poliedro compuesto por microplanos [18]. Cada microplano tiene un vector normal ($\hat{n}$) y dos vectores cortantes: $\hat{m}$ y $\hat{l}$ (Figura 3).

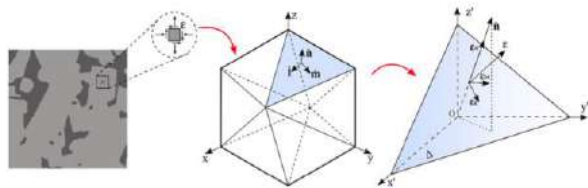


Figura 3. Sistema de microplanos [13].

En un modelo de microplanos el tensor de deformación se proyecta en cada uno de los microplanos y se calculan sus micro-tensiones para, finalmente, obtener el tensor de tensiones. [19, 13]

3.4.1. M7WC y MPJ2.

El modelo M7WC, utilizado para el WC, es un modelo para simular WC adaptado del M7 utilizado para el hormigón. Este modelo se basa en la existencia de bordes que son fronteras de tensión-deformación que cada microplano no puede superar. [19, 20, 13]

El modelo MPJ2, que simula el Co, es más adecuado para materiales dúctiles y se basa en reproducir la transición entre la región elástica y plástica. [13, 21].

3.4.2. Anisotropía en el modelo.

El modo de añadir la anisotropía en el modelo se basa en el estudio realizado por Brocca et al., 2001 [22]. Para ello se debe implementar, a los parámetros con anisotropía, la ecuación de un elipsoide. A modo de ejemplo, se muestra E_N en la Ecuación 5.

$$E_N = \left\{ \left(\frac{n_1}{E_{Nx}} \right)^2 + \left(\frac{n_2}{E_{Ny}} \right)^2 + \left(\frac{n_3}{E_{Nz}} \right)^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Donde n_1 , n_2 y n_3 son las componentes del vector normal y E_{Nx} , E_{Ny} y E_{Nz} son las constantes para cada una de las direcciones. Esta misma idea se ha implementado en otros 7 parámetros.

Para lograr controlar la orientación de la anisotropía se han utilizado matrices de rotación mediante los ángulos de Euler ($R_y(\alpha)$, $R_z(\beta)$ y $R_y(\gamma)$) aplicados a los vectores normales de los microplanos [23].

$$\hat{n}_{\mu, \text{rot}} = [[\hat{n}_{\mu} \cdot R_y(\alpha)] \cdot R_z(\beta)] \cdot R_y(\gamma) \quad (6)$$

Para controlar el ángulo se utiliza una matriz de $m \times 3$ donde cada fila es α_m , β_m y γ_m , y m es el número de grano.

3.4.3. Simulación.

En el programa Abaqus se prepara una simulación de una nanoindentación para posteriormente poder ajustar el modelo con anisotropía (Figura 4). Los parámetros de ensayo son los utilizados por Roa et al. (2015) [5].

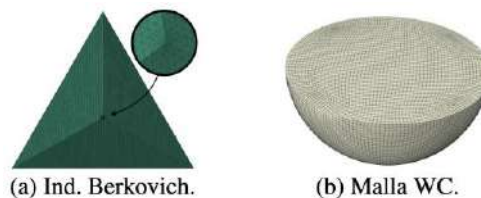


Figura 4. Elementos de la simulación en Abaqus.

De esta simulación se obtienen los datos del desplazamiento y carga del indentador para así poder obtener la curva carga-desplazamiento característica de una nanoindentación.

4. RESULTADOS.

4.1. Generación de la superficie.

La Figura 5 muestra un esquema de la Reconstrucción de cada grado separado por fases.

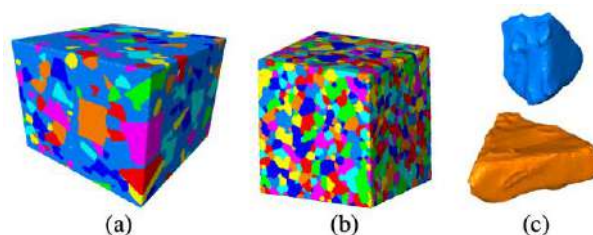


Figura 5. Reconstrucción de cada grado separado por fases (a-Medium y b-Submicron) y visualización de dos granos próximos (c).

4.2. Caracterización.

A partir de la reconstrucción y evaluando las imágenes, se obtienen todos los valores para caracterizar cada grado (Tabla 2).

Tabla 2. Resumen de la caracterización de cada grado del WC-Co.

Variables	Medium	Submicron
Color Co	1799	0
%vCo _{3D} (%)	49.72	2.15
%vCo _{2D} (%)	48.15 ± 3.67	3.30 ± 1.05
Tamaño grano (μm)	2.15 ± 0.89	0.66 ± 0.68
Densidad granos (granos/μm ³)	49.72	2.15
C _{WC,3D}	24.70	95.29
C _{WC,2D}	26.06 ± 3.34	93.30 ± 1.89

4.3. Calibración del modelo M7WC con anisotropía.

Se ajustan los parámetros para aproximar la simulación a los datos experimentales obtenidos por Roa et al. (2015) [5]. Los datos obtenidos se comparan con los experimentales en la Figura 6.

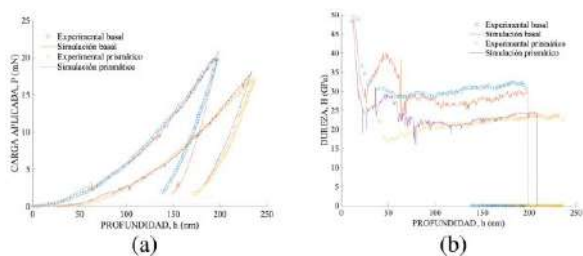


Figura 6. Comparación de los datos obtenidos de la simulación y de los experimentales [5] de fuerza (a) y de dureza (b) respecto la profundidad. El plano prismático se ha desplazado 25 nm a la derecha para mejorar su visualización.

4.4. Simulación con microestructura.

Para cada grado se genera una malla con toda la microestructura de un nanocable a traccionar y de un cubo a comprimir (Figura 7). Los resultados de los ensayos de carga-desplazamiento se muestran en la Figura 8.

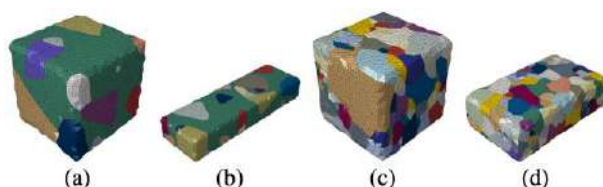


Figura 7. Mallas del grado Medium (a y b) y del Submicron (c y d) para simular en Abaqus.

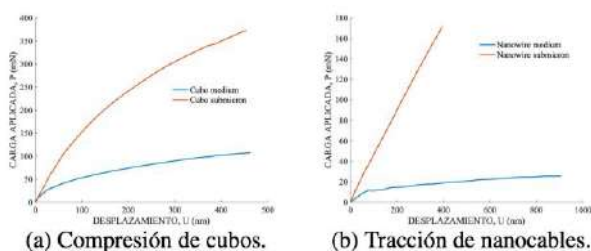


Figura 8. Gráficos de carga-desplazamiento de las microestructuras simuladas.

5. CONCLUSIONES.

En cuanto a la reconstrucción a partir de las imágenes FIB:

- Se ha ideado un modo analítico de encontrar el color asociado al ligante del metal duro.
- Se ha creado un modo de obtener la reconstrucción tridimensional con la matriz metálica en un único grupo y con los granos cerámicos en el resto. Además, se ha automatizado el proceso.
- Se ha caracterizado cada uno de los grados de WC-Co dando datos coherentes con lo observado o lo conocido. Además, se ha contrastado la información de distintos modos para, así, tener mayor certeza de la fiabilidad de la reconstrucción.
- Se ha podido observar la forma de los granos y comprobar la orientación de algunos de ellos.

En cuanto a la simulación del material:

- Se ha conseguido añadir anisotropía utilizando la ecuación del elipsoide en los parámetros del modelo M7WC.
- Se ha podido recrear el comportamiento durante un ensayo de nanoindentación mostrado en los datos experimentales.
- Se ha logrado controlar la orientación de la anisotropía en el modelo pudiendo ser independiente para cada grano.
- Se ha logrado simular una microestructura completa obteniendo una malla a partir de la reconstrucción.

6. REFERENCIAS.

- [1] L. Prakash, "Fundamentals and general applications of hardmetals," in *Comprehensive Hard Materials*. Elsevier, 2014, vol. 1, pp. 29–90.
- [2] S. Lay and J.-M. Missiaen, "Microstructure and morphology of hardmetals," in *Comprehensive Hard Materials*. Elsevier, 2014, vol. 1, pp. 91–120.
- [3] L. Makhele-Lekala, S. Luyckx, and F. Nabarro, "Semi-empirical relationship between the hardness, grain size and mean free path of wc-co," *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 19, pp. 245–249, 7 2001.
- [4] S. Luyckx and A. Love, "The dependence of the contiguity of wc on co content and its independence from wc grain size in wc-co alloys," *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 24, pp. 75–79, 1 2006.
- [5] B. Roebuck and E. Bennett, "Phase size distribution in wc/co hardmetal," *Metallography*, vol. 19, pp. 27–47, 2 1986.
- [6] J. Roa, E. Jimenez - Pique, C. Verge, J. Tarragó, A. Mateo, J. Fair, and L. Llanes, "Intrinsic hardness of constitutive phases in wc-co composites: Nanoindentation testing, statistical analysis, wc crystal orientation effects and flow stress for the constrained metallic binder," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 35, pp. 3419–3425, 11 2015.
- [7] T. Csanádi, M. Bl'anda, A. Duszová, N. Q. Chinh, P. Szommer, and J. Dusza, "Deformation characteristics of wc micropillars," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 34, pp. 4099–4103, 12 2014.
- [8] T. Namazu, T. Morikaku, H. Akamine, T. Fujii, K. Kuroda, and Y. Takami, "Mechanical reliability of fibfabricated wc-co cemented carbide nanowires evaluated by mems tensile testing," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 150, pp. 126–134, 12 2015.
- [9] Z. Liu, C. Yue, X. Li, X. Liu, S. Y. Liang, and L. Wang, "Research on tool wear based on 3d fem simulation for milling process," *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 4, p. 121, 12 2020.
- [10] S. Faris, S. Salman, and M. Mohamed, "Prediction of cutting tool performance with double rake geometry using finite element technique," *Journal*

- of Engineering and Applied Sciences, vol. 13, pp. 10 502–10 509, 01 2018.
- [11] E. Jiménez-Piqué, M. Turon-Vinas, H. Chen, T. Trifonov, J. Fair, E. Tarrés, and L. Llanes, “Focused ion beam tomography of wc-co cemented carbides,” *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 67, pp. 9–17, 9 2017.
- [12] I. Borgh, P. Hedström, J. Odqvist, A. Borgenstam, J. Ågren, A. Gholinia, B. Winiarski, P. J. Withers, G. E. Thompson, K. Mingard, and M. G. Gee, “On the three-dimensional structure of wc grains in cemented carbides,” *Acta Materialia*, vol. 61, pp. 4726–4733, 8 2013.
- [13] P. V. S. Machado, F. C. Caner, L. Llanes, and E. J. Pique, “A computational framework for micromechanical modelling of WC-Co composites,” *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 111, p. 106053, 2 2023.
- [14] E. Jiménez-Piqué, “Indentation of ceramics” in *Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses*. Elsevier, 2021, pp. 718–732.
- [15] A. C. Fischer-Cripps, *Nanoindentation*. Springer New York, 2002.
- [16] W. Oliver and G. Pharr, “An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments,” *Journal of Materials Research*, vol. 7, pp. 1564–1583, 6 1992.
- [17] T. Scientific, *Avizo Software 9 User’s Guide*. Thermo Scientific, 2018.
- [18] P. Bažant and B. H. Oh, “Efficient numerical integration on the surface of a sphere,” *ZAMM Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, vol. 66, pp. 37–49, 1986.
- [19] F. C. Caner and Z. P. Bažant, “Microplane model m7 for plain concrete. i: Formulation,” *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 139, pp. 1714–1723, 12 2013.
- [20] F. C. Caner, Z. P. Bažant, and R. Wendner, “Microplane model m7f for fiber reinforced concrete,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 105, pp. 41–57, 6 2013.
- [21] M. Brocca and Z. P. Bažant, “Microplane constitutive model and metal plasticity,” *Applied Mechanics Reviews*, vol. 53, pp. 265–281, 10 2000.
- [22] M. Brocca, Z. P. Bažant, and I. M. Daniel, “Microplane model for stiff foams and finite element analysis of sandwich failure by core indentation,” *International Journal of Solids and Structures*, vol. 38, no. 44, pp. 8111–8132, 2001.
- [23] T. Csanádi, M. Bl’anda, N. Q. Chinh, P. Hvizdoš, and J. Dusza, “Orientation-dependent hardness and nanoindentation-induced deformation mechanisms of wc crystals,” *Acta Materialia*, vol. 83, pp. 397–407, 1 2015.

INFLUENCIA DE LOS PATRONES DE IMPRESIÓN POR FILAMENTOS FUNDIDOS EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE IMPLANTES ÓSEOS DE YSZ

E. de Lamo, V. Axelrad, C. Berges, J. Hidalgo, G. Herranz

Universidad de Castilla-La Mancha, E. T. S. de Ingeniería Industrial – INEI (Instituto de Investigaciones Energéticas y Aplicaciones Industriales), Avda. Camilo José Cela s/n.13071. Ciudad Real,

Elena.Lamo@alu.uclm.es

Resumen: La reparación de defectos óseos de gran envergadura representa un desafío en la ortopedia y traumatología actual. Para abordar esta problemática, es esencial emular con precisión los diseños y la distribución de la porosidad ósea, al tiempo que se garantiza el cumplimiento de los requisitos biomecánicos y biofuncionales de los tejidos óseos. En este trabajo, se ha logrado el procesamiento de filamentos aptos para la técnica de Fabricación de Filamento Fundido (FFF), con una elevada carga de nanopartículas de YSZ. Además, se ha emprendido una investigación de la influencia del tamaño y distribución de la porosidad y la combinación óptima de regiones densas y porosas mediante el diseño de diferentes patrones de impresión en las propiedades de los implantes para ajustarlas a las del hueso del paciente, promoviendo una mejor biofuncionalidad y abriendo paso a nuevas perspectivas en el desarrollo de implantes óseos altamente personalizados y de gran resistencia.

Palabras clave: Injerto óseo, andamio, FFF, YSZ, porosidad, propiedades mecánicas.

1.- INTRODUCCIÓN.

Las patologías relacionadas con los defectos óseos afectan a millones de personas en todo el mundo. Como solución a esta problemática existen los injertos óseos. Los injertos naturales obtenidos del propio paciente, huesos donantes o animales conllevan el riesgo de infecciones retrasando la recuperación del paciente [1], es por ello que existen los injertos óseos sintéticos, también conocidos como andamios óseos [2]. Con el fin de reducir el tiempo de recuperación y los daños ocasionados en el paciente se propone la fabricación aditiva de injertos óseos porosos personalizados para cada defecto y paciente, suponiendo un gran reto novedoso en el que el material, técnica de procesado y microarquitectura interna de los mismo desempeñan el papel principal de este trabajo.

Existen dos tipos de hueso en relación a su estructura. Un hueso cortical o compacto que se encuentra en la periferia y presenta mayor resistencia mecánica debido a una mayor densidad. Y un hueso trabecular en el interior formado por trabéculas o poros permitiendo el desarrollo de las funciones metabólicas y biológicas, adhesión y crecimiento celular [3]. Por ello el control de la porosidad en los injertos juega un papel fundamental ya que es sabido que al aumentar la porosidad se reducen las propiedades mecánicas, pero favorece las biológicas [4].

Como materiales, destacan los cerámicos y polímeros bio compatibles y bioactivos con el objetivo de conseguir la máxima similitud al hueso natural. En este trabajo se decide utilizar circona estabilizada con Itria al 3% molar, 3-YSZ, pues presenta las altas propiedades mecánicas ideales para soportar altas cargas en implantes para grandes defectos óseos. La 3-YSZ muestra una gran resistencia a la fractura comparado con otros biomateriales, manteniendo buenas

propiedades biológicas por no presentar toxicidad y tener baja adhesión bacteriana [5].

En cuanto a la técnica de fabricación, la fabricación aditiva permite un control de la microarquitectura en tamaño y forma del poro [6] para adaptarla a la del hueso natural. Se elige la técnica de Fabricación por Filamento Fundido (FFF) debido a su baja inversión inicial, bajo tiempo de producción y alto grado de industrialización frente a otras técnicas [7]. La microarquitectura interna de los andamios óseos queda definida por el parámetro de impresión *infill* o relleno. Se pretende diseñar diferentes patrones de impresión modificando la morfología, densidad de relleno y la presencia de partes densas y porosas con el objetivo de emular la estructura ósea y encontrar un equilibrio entre las propiedades mecánicas y biológicas de los injertos óseos.

Esta combinación de material, técnica de procesado y diseño de microarquitecturas internas resulta de gran novedad para la comunidad científica pues a día de hoy no se conocen estudios de las propiedades de los injertos óseos con diferentes *infill* utilizando el material y la técnica descritos.

2.- PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

Las probetas de ensayos utilizadas en este trabajo se producen siguiendo el procedimiento habitual para la FFF. Primeramente se hace una mezcla de polvo cerámico de 3-YSZ de tamaño de partícula de 40 nm con un sistema ligante, basado en diversos polímeros termoplásticos y adaptado a la fabricación de filamentos flexibles de este material. Para ello se emplea una mezcladora ThermoHaake, modelo Haake Rheocord 252p. Se selecciona un volumen de polvo del 50 % y unas condiciones de mezclado de 160 °C, 40 rpm y 90 min.

A partir de estas mezclas, se extruye un filamento en un reómetro capilar Dynisco LCR 7000. Se ajustan las temperatura, diámetro del capilar y velocidad de extrusión hasta conseguir un filamento homogéneo con propiedades que permiten bobinarlo y utilizarlo como consumible en una impresora 3D.

Mediante un sistema CAD, se diseñan probetas cilíndricas de 9 mm de diámetro y 9 mm de longitud destinadas a realizar ensayos de compresión. Se probaron doce arquitecturas diferentes de implante variando el porcentaje de relleno, el patrón de impresión y la opción de una capa exterior emulando la estructura cortical del hueso humano.

Una vez se ajustaron las condiciones de impresión para la obtención de piezas libre de defectos, se procedió a la eliminación del sistema ligante. Esta se realiza en un horno Hobersal 12PR450SCH con un ciclo térmico en aire con rampas a distintas temperaturas, diseñada para obtener piezas libres de defectos y una eliminación completa de los componentes orgánicos. Tras el proceso de eliminación se obtienen las denominadas piezas en marrón, las cuales se introducen en un horno tubular Hobersal ST186030 en el cual, mediante un ciclo térmico a 1400 °C y 1 h, se sinterizan las piezas, otorgándoles sus propiedades finales.

Finalmente, se llevan a cabo los ensayos de compresión. Dichos ensayos se realizan en un sistema electromecánico de la marca MTS Critterion con un vídeo-extensómetro, el cual permite grabar los ensayos facilitando la realización de un análisis de las deformaciones de las probetas mediante una Correlación Digital de Imágenes (DIC). Utilizando el software *SolidWorks* se realiza una Simulación de Elementos Finitos (SEF) de todos los patrones de impresión diseñados con el objetivo de explicar los mecanismos de fractura de las piezas ensayadas a compresión.

3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

3.1. Obtención de filamentos.

Primeramente se mezcla el polvo con el ligante. La Figura 1 muestra la gráfica del par torsor frente al tiempo, permitiendo evaluar la homogeneidad de la mezcla. Pasados los primeros 30 minutos de mezclado, el par comienza a disminuir hasta que a los 90 minutos el par torsor se estabiliza, siendo indicativo de una mezcla homogénea de todos los componentes. Por otro lado, el par de estabilización permite tener una estimación indirecta de la fluidez de la mezcla. Ésta presenta valores altos del par (~ 16 Nm), indicando una baja fluidez y por tanto alta viscosidad. Esto no supuso un problema para el hilado e impresión de filamento.

Para la extrusión de filamento se ha utilizado un diámetro de la boquilla de 1,7mm. Tras varios ensayos en un rango de condiciones se observa que al modificar la velocidad de extrusión se modifican las propiedades del filamento debido a la velocidad de enfriamiento y/o el diferente reordenamiento de las cadenas de ligante. Se decide que las condiciones de extrusión que proporcionan un diámetro homogéneo y las mejores propiedades al filamento son 120 °C y 150 mm/s.

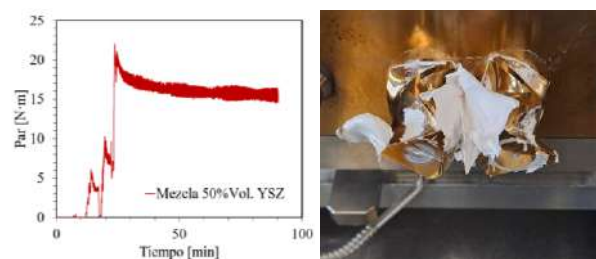


Figura 1. (Izquierda) Control del par durante el mezclado con 50 %vol. de carga cerámica. (Derecha) Rotores en el *feedstock* al terminar el mezclado.

3.2. Diseño y obtención de los patrones de impresión.

Dado que el injerto óseo debe presentar un equilibrio entre las propiedades mecánicas y las biológicas, se han diseñado diferentes patrones de impresión modificando la morfología y densidad de relleno. La Figura 2 muestra el diseño CAD con los cortes en las direcciones longitudinales y transversales de los doce patrones de impresión estudiados.

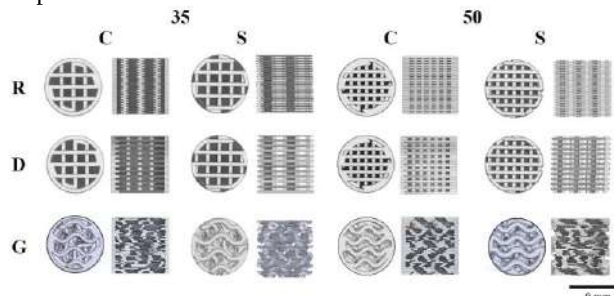


Figura 2. Vista de secciones transversales y longitudinales de los diseños de patrones de impresión elegidos.

Un primer diseño consiste en una morfología rectilínea alternando 90° la dirección de impresión en cada capa, designada con el código “R”. Este es el patrón más recurrente en implantes óseos y se elige con el objetivo de favorecer las propiedades mecánicas frente a las biológicas. Otra morfología seleccionada, designada como “D”, se trata de una morfología rectilínea alternando 90° la dirección de impresión cada dos capas con el fin de favorecer las propiedades biológicas por un mayor tamaño de poro. Por último, con el objetivo de favorecer las propiedades biológicas frente a las mecánicas, se decide la morfología giroide, “G”, cuya geometría de capas no es reiterativa lo que favorece la proliferación del tejido óseo. En cuanto a la densidad de relleno se eligen dos, 50 % y 35 %, es decir, 50 % y 65 % de porosidad. Además se añade el parámetro de diseño de *outershell*, es decir, un reborde externo sobre la probeta. “C” cuando las piezas este reborde, o “S” cuando las probetas carecen él.

3.3. Caracterización de piezas sinterizadas.

Tras la eliminación del sistema ligante y el posterior proceso de sinterización se realiza una caracterización de las probetas en contracción volumétrica y tamaño de poros. Se determina que se produce una contracción volumétrica media de 50 ± 2 % de las piezas finales respecto de las piezas en verde (Figura 3).

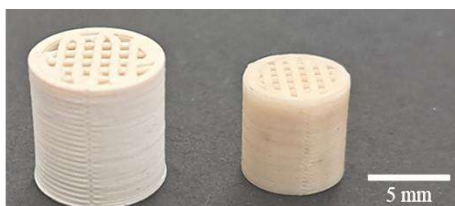


Figura 3. Ejemplo de contracción de volumen en piezas de la misma condición de patrón de impresión.

Para medir el tamaño del poro, se realizan cortes en las direcciones transversal y longitudinal a las probetas. Debido a la dificultad para determinar el tamaño de poro de las probetas de patrón giroide por su forma irregular, solo se ha determinado el tamaño de poro de los patrones rectilíneos. En la dirección transversal (Figura 4), el tamaño del poro es $880 \pm 22 \mu\text{m}$ para las probetas de densidad de relleno del 35 % y $440 \pm 32 \mu\text{m}$ para las de densidad de relleno del 50 %. Estos valores están dentro del rango de tamaño de poro que favorece el crecimiento capilar dentro del injerto ($300 \mu\text{m} - 1 \text{ mm}$) [8]. En la dirección longitudinal (Figura 5) se obtienen los resultados de la Tabla 1. Para los diseños R y D se obtienen valores dentro del rango de $100\text{-}200 \mu\text{m}$, que se ha demostrado que es el idóneo para favorecer el crecimiento celular [8].

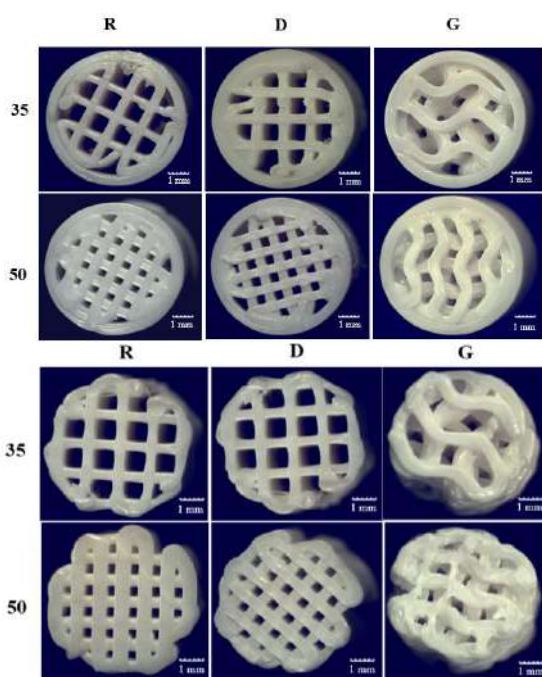


Figura 4. (Arriba) Corte transversal de las condiciones O tras la sinterización utilizando la Lupa. **(Abajo)** Corte transversal de las condiciones S tras la sinterización utilizando la lupa.

Tabla 1. Altura de poro en la dirección longitudinal en las condiciones de impresión rectilíneas.

	R	D
35	$90 \pm 24 \mu\text{m}$	$116 \pm 26 \mu\text{m}$
50	$111 \pm 28 \mu\text{m}$	$216 \pm 33 \mu\text{m}$

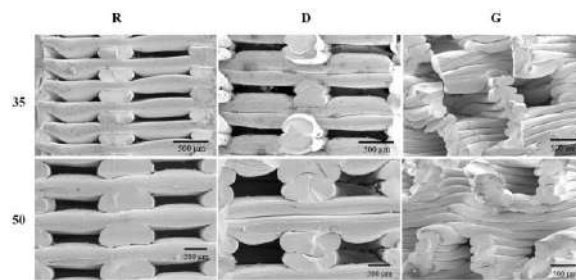


Figura 5. Vista al SEM de los cortes longitudinales de los patrones de impresión tras la sinterización.

3.4. Ensayos de compresión.

Los resultados de los ensayos de compresión se recogen en las gráficas de la Figura 6. Se observa una clara diferencia en las probetas sin *outershell*, S, presentando las probetas R los mejores resultados a compresión, seguidas de las D y, por último, las G. Además se comprueba que las probetas con una densidad de relleno mayor, presentan mejor resistencia a compresión. Por el contrario, las probetas C no presentan diferencias claras, aunque si presentan mejores resultados frente a las S. El *outershell* podría estar actuando como elemento estructural otorgando integridad a las probetas.

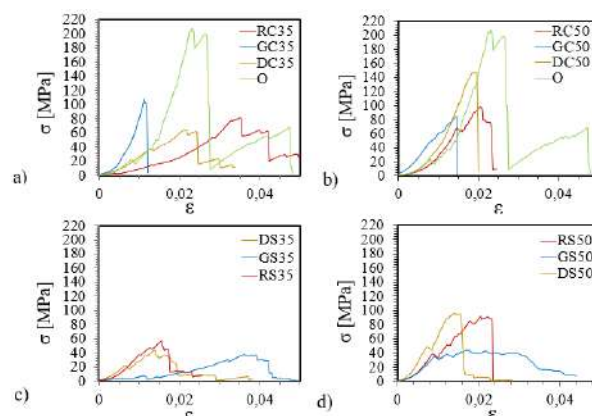


Figura 6. Comparativa de las curvas de compresión resultantes de piezas con diferentes patrones de impresión: **(a)** Infill del 35 % y con *outershell*, **(b)** Infill del 50 % y con *outershell*, **(c)** Infill del 35 % y sin *outershell*, **(d)** Infill del 50 % y sin *outershell*.

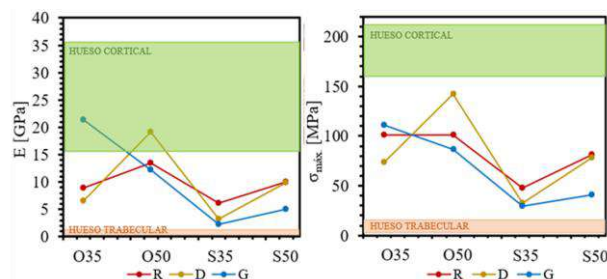


Figura 7. Gráfica comparativa de los resultados de módulo elástico y tensión máxima para las distintas condiciones de impresión.

La Figura 7 compara los resultados de Módulo de Young y resistencia a compresión de los diferentes diseños de implante y con las propiedades típicas de hueso cortical y trabecular. Se ha conseguido reducir el módulo de Young de la YSZ con 200 GPa [9] a valores

comprendidos dentro del rango del hueso natural (0,01-36 GPa) [10] en los doce patrones de impresión permitiendo de esta forma que no se produzca el apantallamiento del hueso.

3.5. Mecanismos de fallo.

Mediante el video-extensómetro es posible comprobar que las columnas o pilares del interior de las piezas con morfología de relleno rectilínea formadas por la coincidencia de puntos de apoyo entre sus capas actúan como elemento de soporte, algo que no sucede en las probetas giroides (Figura 8).

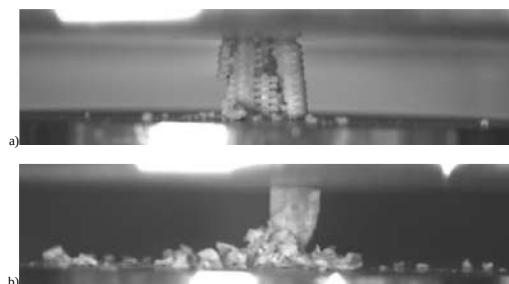


Figura 8. (a) Rotura en columnas típica de probetas de *infill* rectilíneo. (b) Rotura en fragmentos pequeños típica de probetas de *infill* giroide.

Los resultados de simulación de elementos finitos, mostrados en la Figura 9, confirman que el *outershell* actúa como elemento estructural soportando la mayor parte de la carga, del mismo modo que los pilares internos de las condiciones rectilíneas. Estos resultados permiten explicar el comportamiento a compresión de los diferentes diseños.

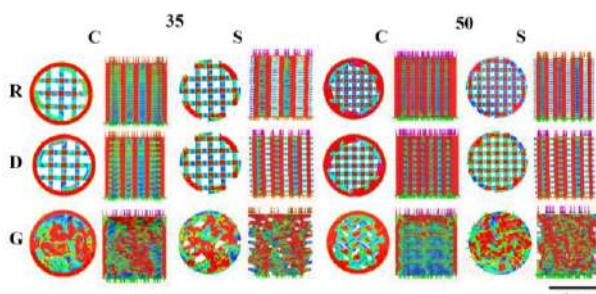


Figura 9. Esquema de las vistas de cortes en planta y frontal de las condiciones de patrones de impresión obtenidas de las tensiones de Von Mises mediante la simulación de elementos finitos.

4.- CONCLUSIONES.

En este trabajo se realiza un estudio detallado del efecto de la arquitectura porosa de implantes de YSZ destinados a reparar grandes lesiones óseas en zonas con grandes solicitaciones mecánicas. Para ello se diseñaron y fabricaron satisfactoriamente implantes con un filamento desarrollado específicamente para esta tecnología.

El ensayo mecánico de las diferentes arquitecturas ha demostrado que al aumentar la densidad de relleno de las probetas mejoran las propiedades mecánicas, que el *outershell* actúa como elemento estructural y que la condición R es la morfología de relleno que proporciona los mejores resultados en cuanto a propiedades

mecánicas. Sin embargo, las propiedades mecánicas conseguidas con todos los diseños se asemejan a las del hueso humano. Mediante la morfología y densidad de relleno en el diseño de las probetas de compresión se ha conseguido ajustar el tamaño de la porosidad a los valores que la bibliografía asegura que favorece el crecimiento celular y capilar en los injertos óseos. Mediante el uso de diferentes rellenos y patrones, se pueden ajustar las propiedades biomecánicas y biofuncionales adecuadas a cada tipo de hueso y paciente, lo que supone un gran avance en este campo.

5.- REFERENCIAS.

- [1] L. Polo-Corrales, M. Latorre-Esteves y J. E. Ramírez-Vick, «Scaffold Design for Bone Regeneration» *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, vol. 14, pp. 15-56, 2014.
- [2] R. Lanza, R. Langer, J. P. Vacanti y A. Atala, *Principles of tissue engineering*, 3ª ed., 2020.
- [3] L. Mathieu, T. Müller, P. Bourban, D. Pioletti, R. Müller y J.-a. Manson, «Architecture and properties of anisotropic polymer composite» *Biomaterials*, vol. 27, pp. 905-916, 2006.
- [4] C. M. Murphy, M. G. Haugh y F. J. O'Brien, «The effect of mean pore size on cell attachment, proliferation and migration in collagen-glycosaminoglycan scaffolds for bone tissue engineering» *Biomaterials*, vol. 31, pp. 461-466, 2010.
- [5] Green, Hannink y Swain, «Transformation Toughening of Ceramics» CRC Press Inc., 1989.
- [6] C. Jiao, D. Xie, Z. He, H. Liang, L. Shen, Y. Yang, Z. Tian, G. Wu y C. Wang, «Additive manufacturing of Bio-inspired ceramic bone Scaffolds: Structural Design, mechanical properties and biocompatibility» *Materials & Design*, vol. 217, p. 110610, 2022.
- [7] T. McNulty, F. Mohammadi, A. Bandyopadhyay, D. Shanefield, S. Danforth y A. Safari, «Development of a binder formulation for fused deposition of ceramics» *Rapid Prototyping Journal*, vol. 4, pp. 2-4, 1998.
- [8] B. Xu, K.-W. Lee, W. Li, M. J. Yaszemski, L. Lu, Y. Yang y S. Wang, «A comparative study on cylindrical and spherical models in fabrication of bone tissue engineering scaffolds: Finite element simulation and experiments» *Materials & Design*, vol. 211, p. 110150, 2021.
- [9] Z. Q. Meng y D. Y. Jiang, «Measuring Mechanical Properties of Zirconia Dentals Crowns by Nanoindentation» *Keey Engineering Materials*, vol. 591, pp. 150-153, 2013.
- [10] L. Rincón-Kohli y P. K. Zysset, «Multi-axial mechanical properties of human trabecular bone» *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, vol. 8, p. 195-208, 2009.

I+D+i EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE MATERIALES

ANÁLISIS DE LOS ESTEREOTIPOS DE GÉNERO Y DE LA PERCEPCIÓN QUE TIENE EL ALUMNADO DE PRIMARIA SOBRE LA ACTIVIDAD CIENTÍFICA Y EL PAPEL DE LA CIENCIA EN LA SOCIEDAD. UN ESTUDIO A TRAVÉS DEL DIBUJO INFANTIL

Gisela M Arzac, Cristina Rojas

Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla. CSIC-Univ. Sevilla, Américo Vespucio 49, 41092, Sevilla,
gisela@icmse.csic.es

Resumen: Estudiamos los dibujos de casi 100 alumnos/as de diferentes grados de la escuela primaria con el objetivo de evaluar los estereotipos de género y la percepción del alumnado sobre la ciencia. La asociación persona investigadora-hombre, con aspecto estereotipado sigue vigente entre los dibujos de los niños y se hace prevalente cerca de los 12 años. Las niñas, tienden a dibujar más mujeres investigadoras con un aspecto físico menos estereotipado. Sin embargo, en la medida que el alumnado se hace mayor, independientemente del sexo, se observa una tendencia a asociar a la persona investigadora con el hombre. Tanto niños como niñas, perciben a la ciencia como capaz de resolver sus problemas o intereses, y se creen que se desarrolla principalmente en un contexto de laboratorio, aunque también se han mostrado en los dibujos otros contextos

Palabras clave: estereotipos de género, percepción de la ciencia, escuela primaria, dibujo

1. INTRODUCCIÓN: EL ESTEROTIPO DEL “CIENTÍFICO LOCO”.

En un conocido estudio [1] realizado con dibujos infantiles recolectados en los Estados Unidos y Canadá durante los años 1966 a 1977, se le pidió a casi 5000 alumnos y alumnas de escuela primaria que dibujaran a una persona investigadora (“draw a scientist”). Menos del 1% de los dibujos analizados contenían una mujer investigadora. La mayoría del alumnado, tanto niñas como niños dibujaron a un hombre que en líneas generales presentaba las siguientes características:

- i) Lleva gafas de seguridad y bata no necesariamente blanca
- ii) Tiene pelo facial
- iii) Se muestra en solitario y portando algún material de laboratorio
- iv) Tiene un aspecto extravagante incluso parece “loco”

Esta imagen indicaba un claro estereotipo de género que relacionaba al hombre como principal actor en el ámbito de la investigación. Recientemente, un meta estudio [2] realizado sobre dibujos recolectados durante 5 décadas indica que este estereotipo se ha ido debilitando con el tiempo, probablemente por el incremento de la participación de la mujer en la vida científica y la visibilización creciente en los medios de comunicación e información.

Nuestro objetivo principal como científicas divulgadoras del 11F (<https://11defebrero.org/>), es contribuir a eliminar estereotipos de género y mostrar con nuestras charlas y talleres que las mujeres también hacemos ciencia, inspirando así a las niñas y adolescentes a verse capaces de elegir carreras STEM

en caso de que así lo deseen. Sin embargo, a pesar de que la iniciativa del 11F lleva más de cinco años, seguimos observando que prevalece entre el alumnado de primaria, ESO y Bachillerato, esta imagen del científico loco como representante de la persona investigadora. Por este motivo, durante el mes de noviembre de 2022, realizamos este estudio cuyos resultados mostramos a continuación.

2. NUESTRO ESTUDIO.

Como actividad en clase, les hemos propuesto a niñas y niños de la escuela primaria que dibujaran a una persona investigando. Hemos recabado dibujos de alumnado en tercero, quinto y sexto grado de colegios de la provincia de Sevilla. En total hemos estudiado alrededor de 100 dibujos y se considera un estudio preliminar. También les hemos pedido que escribiesen sobre el dibujo una pregunta que le harían a la persona investigadora. Por último, pero no menos importante, les preguntamos si esa persona investigadora dibujada representaba a ellos mismos y solo en un 3% dio una respuesta positiva. Esto indica que lo que están dibujando es la imagen que ellos tienen de los investigadores/as y no que se imaginen a sí mismos/as en ese rol.

3.. RESULTADOS.

3.1. ¿Sigue vigente el estereotipo del hombre-científico loco?

Del total de los dibujos estudiados, un 47% corresponde a mujeres investigadoras, siendo la población de niñas del 50%, lo cual resulta muy alentador. En general, las niñas tienden a dibujar mujeres investigando mientras

que los niños dibujan a hombres. En un pequeño porcentaje, se observan parejas mixtas tanto cuando dibujan las niñas como los niños. Conforme avanza la escolarización, tanto las niñas como los niños tienden a dibujar más hombres investigando. En el caso de los niños, en sexto grado se ha observado que el 100% dibuja hombres. Una tendencia similar se ha observado en un estudio muy reciente realizado en nuestro país con más de 1000 dibujos realizados por alumnado en la misma edad escolar [3].

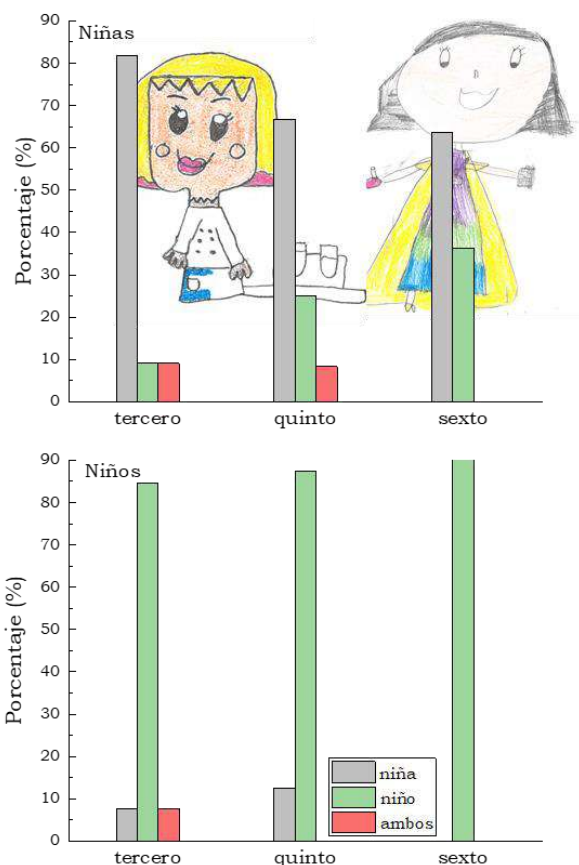


Figura 1. Porcentaje de dibujos que contienen niñas, niños o parejas mixtas de personas investigando, agrupados por niñas y niños

Cuando observamos los dibujos realizados por las niñas, vemos que tienen una imagen más realista de lo que sería una investigadora mujer. Se dibuja generalmente una mujer más bien “normal”, con un aspecto cuidado y no desaliñado, empleando en muchos casos los elementos de protección. Eventualmente aparece una mujer investigadora con aspecto de heroína. Sin embargo, todavía entre los niños, cuando dibujan a un hombre investigando, hay una alta permanencia del estereotipo del científico loco. Se observa en general, que en la medida que aumenta la edad del alumnado, la dedicación que se le ha puesto al dibujo disminuye.

3.2 El contexto en que se desarrolla la actividad investigadora.

Hemos visto que la respuesta no depende de si el alumnado es niño o niña, por lo que se han agrupado los

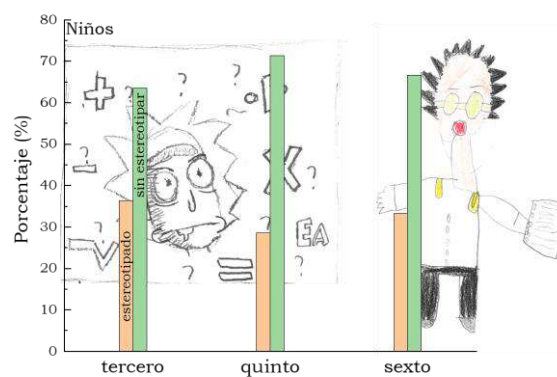


Figura 2. El estereotipo del científico “loco” según los niños

resultados. La mayoría dibuja a la persona investigando en un laboratorio. Le sigue el dibujo de la persona investigando sin ningún contexto, como máximo con algún material en mano. Un porcentaje de alumnado dibuja a una persona impartiendo lo que sería una práctica de laboratorio, probablemente porque asisten regularmente a clases allí. Sólo algunos dibujos muestran una persona investigando en un contexto de oficina, empleando como única herramienta un ordenador, y en algunos casos nos encontramos con el dibujo de un laboratorio casero, como si investigar fuese una actividad que se realiza en el tiempo libre, tal vez por influencia de you tube. Cabe resaltar que la propuesta específica que se dibuje a una persona investigando, por lo que se está excluyendo en cierta forma la posibilidad de que el alumnado dibuje un equipo de investigación, lo cual se asemeja más a la realidad.

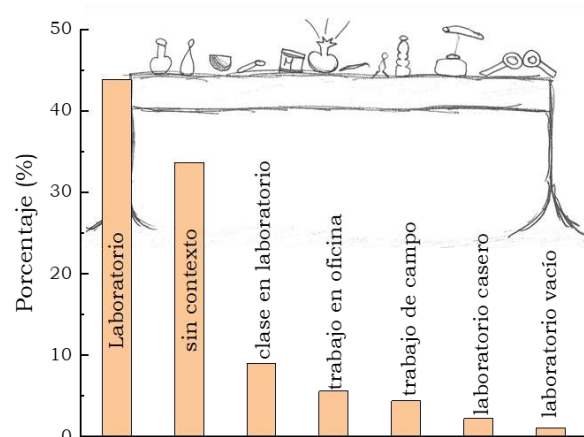


Figura 3. El contexto en el que se desarrolla la ciencia según niñas y niños

3.3 El rol de la ciencia para las niñas y los niños de hoy.

Cuando se pidió al alumnado participante que escribiese una pregunta para la persona investigadora que han representado, la temática más recurrente tiene que ver con el tipo de tareas que involucra nuestro trabajo

científico, aquello que investigamos y hacemos en el día a día. Les preocupa en muchos casos el grado de dificultad de nuestra tarea y el origen de nuestra vocación. Le siguen en orden de interés nuestra capacidad para realizar pociones, lo cual da una idea de una imagen idealizada de nuestra tarea propia de la edad infantil. La preocupación por el CoVid-19 y las vacunas en general se mantiene presente en el momento de la realización del estudio.

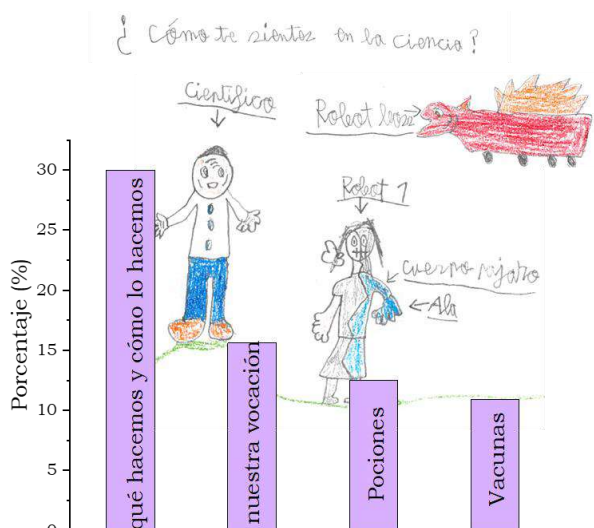


Figura 4. Preocupaciones e inquietudes de los niños y niñas de hoy respecto de nuestra actividad

No se ha plasmado en el gráfico, pero también les preocupa: el cómo no sentimos con nuestro trabajo, los años de profesión que hacen falta para poder inventar algo, como será la sociedad del futuro, cual es el origen (y el destino) de la humanidad. Esto muestra que el alumnado percibe a la ciencia como un instrumento capaz de resolver problemas de la sociedad, pero de manera muy general e inespecífica. El único problema concreto que han identificado como posible de resolver a través de la ciencia, es el del CoVid-19.

4.- CONCLUSIONES.

Muchos años han pasado ya desde que se detectó por primera vez en el imaginario popular la tradicional imagen del científico loco investigando en soledad. Los niños y niñas de hoy, parecen tener una imagen menos estereotipada de la persona investigadora, con mayor participación de las mujeres, especialmente cuando son niñas las que realizan los dibujos. Existe una cierta prevalencia del estereotipo del científico loco, que se ve más marcada cuando son niños que dibujan y se acercan a sexto grado de primaria. El contexto del trabajo científico sigue siendo para ellos el del laboratorio, pero poco a poco aparece el ordenador como herramienta y el campo como lugar de trabajo. En cuanto su percepción de nuestra función, parecen tener claro que el rol de la ciencia tiene que ver con resolver los retos de la sociedad, pero sin tener bien identificado el tipo de reto, excepto en el caso del CoVid-19. Por otra parte, muestran muchísima curiosidad por conocer el trabajo científico y su metodología.

Todo esto demuestra que todos los esfuerzos realizados desde distintos ámbitos (medios de comunicación, textos escolares, trabajo docente, iniciativas como el 11F, etc) está contribuyendo en la eliminación de estereotipos de género en la investigación científica. En el futuro, sería muy recomendable la intensificación de los esfuerzos para el alumnado a partir de 12 años, edad donde pareciera haber un retroceso hacia el estereotipo del científico loco.

Resultaría también muy interesante el poder desarrollar herramientas alternativas al dibujo para realizar este mismo estudio con alumnado de la ESO y Bachillerato. La repetición de este estudio de manera periódica, sostenida en el tiempo, con poblaciones más grandes sería de alto interés, así como una comparación entre escuelas donde llega el 11F con aquellas que no. También sería interesante reformular la/s pregunta/s de modo que no se excluya la formación de equipos de investigación, más acorde con la realidad.

Todas aquellas tareas como comunicar, divulgar y enseñar la ciencia como herramienta para resolver problemas concretos de la humanidad deberá intensificarse porque la percepción general es que la ciencia sirve a la sociedad, pero no les queda muy claro qué y cómo lo hace concretamente. Por último, sería relevante preguntarse, tal vez, si todas estas acciones tan necesarias de visibilización de la mujer investigadora a través de diversos medios está llegando realmente a los niños, y si éstos en algún punto, no se están sintiendo excluidos y se estén resistiendo de manera consciente o inconsciente a romper con estos estereotipos.

5.- REFERENCIAS.

- [1] D.W. Chambers (1983). Stereotypic images of the scientist: The Draw-A-Scientist test. *Science Education*, 67, 255–265. <https://doi.org/10.1002/sce.3730670213>
- [2] David I. Miller, Kyle M. Nolla, Alice H. Eagly and David H. Uttal. (2018) The Development of Children's Gender-Science Stereotypes: A Meta-analysis of 5 Decades of U.S. Draw-A-Scientist Studies. *Child Development* 89(6), 1943-55. <https://doi.org/10.1111/cdev.13039>
- [3] Grupo Científico "Mujer y Ciencia" de la SEBBM. Análisis de los estereotipos de género en ciencia a través del concurso "Dibuja una persona que se dedique a la ciencia y ponle un nombre". *Revista de la SEBBM*, Diciembre de 2022.

Agradecimientos.

Proyecto Materland: la aventura continúa. FCT-22-18133 con la colaboración de la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología (FECYT), Ministerio de Ciencia e Innovación. Agradecemos a las niñas y niños que colaboraron con nosotras realizando los dibujos.

NORMAS DE PRESENTACION DE LA REVISTA “MATERIAL-ES”

A. Pérez¹, M. Martínez¹, J. López²

¹Centro y dirección 1, antper@unizere.es

²Centro y dirección 2

Resumen: En el siguiente texto se presentan las normas para la presentación de los trabajos completos. (*El formato en el que se presenta el presente texto, sirve de orientación a la estructura del trabajo*). El no cumplimiento de estas directrices puede implicar la exclusión del trabajo en la revista.

Palabras clave: palabras clave que caractericen el contenido del artículo separadas por comas.

1. EXTENSIÓN.

Se admitirán trabajos completos de hasta 4 páginas (máximo) incluyendo todas las secciones, ajustándose al formato que se indica a continuación. Para su correcto procesamiento, el fichero resultante deberá tener un tamaño menor a 10 MB.

2. FORMATO GENERAL.

Los márgenes serán de 2 cm en todos los casos (superior, inferior, derecha e izquierda). El texto debe ajustarse a 2 columnas (Excepto el Título, Autores y Resumen), con espaciado entre columnas de 1cm. Se utilizará espaciado simple entre líneas de texto dejando una línea en blanco entre párrafos (sin sangrado), así como entre el encabezado de cada apartado y el texto.

Tipo de letra para el texto principal: Times New Roman 10.

3. TÍTULO.

Centrado la parte superior de la primera hoja sin dejar espacio. Letra: Times New Roman 12, mayúsculas y **negrita**.

4.- AUTORES.

El nombre de los autores constará centrado debajo del título, dejando una línea en blanco. Tipo de letra: Times New Roman 11 **negrita cursiva** y en minúsculas. Deberá subrayarse el nombre del autor que presenta el trabajo y la pertenencia a distintos centros se indicará con un superíndice detrás del nombre.

Tras una línea en blanco, se indicará la filiación de los autores. Debe hacerse constar la dirección de correo electrónico del ponente. La dirección de cada centro, en su caso, se incluirá en una línea diferente. Times New Roman 11.

5.- RESUMEN.

No excederá las 150 palabras en la versión castellano. Se colocará debajo de los autores tras 4 líneas en blanco. El texto principal a doble columna comenzará tras dos líneas en blanco de las palabras clave.

6.- ENCABEZADOS.

Los encabezamientos de los distintos apartados se mecanografiarán en mayúsculas y en negrita y serán numerados correlativamente. Los subencabezados, en su caso, deberán ir en minúsculas y subrayados.

7.- ECUACIONES Y FÓRMULAS.

Se recomienda mecanografiar las fórmulas dejando una línea en blanco antes y después de las mismas y consignando su número de referencia entre paréntesis en el margen derecho.

8.- FIGURAS Y TABLAS.

Las figuras aparecerán insertadas en el lugar del texto que les corresponda.

Como norma general, las tablas y figuras deberán ocupar el ancho de columna, aunque en caso necesario pueden prepararse para abarcar el ancho de hoja. Las figuras, a las que se hará referencia en el texto, aparecerán numeradas correlativamente y con un pie de figura que tendrá la estructura que se muestra en el siguiente ejemplo:

Figura 1. Sección longitudinal del pliegue 2 A. Pliegue en la parte interna del codo. 2,4x.

Las tablas tendrán el mismo tipo de letra que el texto, anteponiendo a cada tabla el número y título correspondiente en la forma que se indica:

Tabla 1. Composición química de los aceros.

9.- REFERENCIAS

Se citarán en el texto con el número correspondiente entre corchetes: [1]. Aparecerán agrupadas en la última sección. Las referencias se numerarán correlativamente en el orden que aparecen en el texto, con la forma siguiente:

[1] Kamdar, M. H., “Embrittlement by Liquid and Solid Metals”, Ed. The Metallurgical Society, 1984.

SCIENTIFIC JOURNAL "MATERIAL-ES" GUIDELINES FOR PRESENTATION

A. Pérez¹, M. Martínez¹, J. López²

1 Group and address 1, antper@unizere.es

2 Group and address 2

Summary: In the following text are described the guidelines for presenting complete works. (*The format in which this text is presented, serves as an orientation of the work structure*). Failure to comply these guidelines may involve the exclusion of the work from the magazine.

Keywords: keywords that characterize the article content separated by commas.

1. EXTENSION.

Full papers of up to 4 pages (maximum) including all sections will be accepted, according format to these rules. For a correct processing, the resulting file size must be less than 10 MB.

2. GENERAL FORMAT.

The margins will be 2 cm in all cases (upper, lower, right and left). The text must be adjusted to 2 columns (except the Title, Authors and Summary), with 1 cm. spacing between columns. Simple spacing will be used between lines of text leaving a blank line between paragraphs (without bleed), as well as between the heading of each section and the text.

Main text formatted in Times New Roman font size 10.

3. TITLE.

At the top of the first sheet, centered without leaving space. Times New Roman font size 12, caps and **bold**.

4. AUTHORS.

The name of the authors will be centered below the title, leaving a blank line. Times New Roman font size 11 **bold, italics and lowercase**. The name of the author presenting the work should be underlined, and membership in different groups will be indicated by a superscript after the name.

After a blank line, the authors affiliation will be indicated. The rapporteur's e-mail address must be included. Each center's address, if so, will be included in a different line, Times New Roman font size 11.

5. SUMMARY.

It will not exceed 150 words in the English version. It will be placed below the authors after 4 blank lines. The main text in double column will begin after the keywords and two blank lines.

6. HEADINGS.

Different sections headings will be typed in **CAPITAL LETTERS, BOLD** and will be numbered correlatively. Subheadings, if applicable, should be lowercase and underlined.

7. EQUATIONS AND FORMULAS.

It is recommended to type the formulas leaving a blank line before and after them and entering their reference number in parentheses in the right margin.

8. FIGURES AND TABLES.

The figures will appear inserted in the corresponding place of the text.

As a general rule, tables and figures should occupy the column width, although if necessary they can be prepared to cover all the sheet width. The figures, to which reference will be made in the text, will appear numbered correlatively and with a figure foot that will have the structure shown in the following example:

Figure 1. Longitudinal section of the fold 2 A. Fold in the inner elbow side. 2,4x.

The tables will have the same format as the text, placing the corresponding number and title before each table as shown:

Table 1. Chemical composition of steels.

9. REFERENCES.

They will be cited in the text with the corresponding number in brackets: [1]. They will be presented grouped in the last section. The references will be numbered correlatively in the order they appear in the text, with the following form:

[1] Kamdar, M. H., "Embrittlement by Liquid and Solid Metals", Ed. The Metallurgical Society, 1984.