PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN 2020

MEMORIA DEL PROYECTO Nº 13

1. Datos del proyecto

Título: Influencia del shot peening en propiedades eléctricas y magnéticas de aceros ferritoperlíticos

Investigador/a/es responsable/es: Inés Fernández Pariente

Teléfono: 985181992 **E-mail:** inesfp@uniovi.es

Otros investigadores: María Florentina Barbés Fernández, María Arántzazu Argüelles Vélez

Empresas o instituciones colaboradoras: Arcelor-Mittal

2. Memoria descriptiva del proyecto

2.1 Resumen ejecutivo

El resumen ejecutivo del Proyecto debe ser una síntesis clara y concisa del trabajo realizado, describiendo brevemente los motivos que justifican su realización, los beneficiarios, los objetivos específicos y su grado de consecución, la metodología aplicada y los resultados obtenidos. Extensión: un máximo de 4000 caracteres, incluidos espacios.

Los aceros empleados en el sector del transporte ferroviario han de tener propiedades mecánicas excepcionales (resistencia mecánica, a la corrosión y al desgaste), a la vez que es de especial importancia el control de propiedades eléctricas y magnéticas, como la resistividad eléctrica (ρ), la permeabilidad magnética (μ), la imanación de saturación (M_s) y/o el campo coercitivo (H_C) de aquellos aceros empleados en la fabricación de los carriles, ya que estas magnitudes intervienen en los sistemas de frenado, como los basados en las corrientes de Eddy y/o los frenos magnéticos [1-3] o en los circuitos de vías [4,5], siendo esenciales para el buen funcionamiento del sistema. El continuo desarrollo de las calidades de acero comercializadas ha llevado a modificaciones en los valores de dichas propiedades, que deben mantenerse siempre en rangos que permitan garantizar las condiciones de seguridad, a la par de optimizar sus prestaciones, que incluyen la transmisión de información a través de vía o la transmisión de energía a través de la catenaria utilizando la vía como tierra, en un sistema de transporte ferroviario cada vez más exigente y en continuo desarrollo.
ArcelorMittal es, actualmente, el principal proveedor de carriles en España y uno de los más importantes para Europa y el resto del mundo. Mantener esta posición, en un mercado en el que la competitividad se ha visto fuertemente incrementada debido a la fuerza que han alcanzado empresas del sector en países como China, exige una continua mejora de los productos que, en el caso que nos ocupa, se concreta en una optimización de las propiedades eléctricas y magnéticas de los carriles, sin detrimento de las propiedades mecánicas requeridas.
Por este motivo, **ArcelorMittal, y concretamente su planta sita en Veriña (Gijón)**, está muy interesada en los resultados de este proyecto, cuyo objetivo ha sido, y está siendo, estudiar el efecto del tratamiento de Shot Peening (TSP) en las propiedades físicas mencionadas. Su implicación en el

mismo incluye el suministro de material a ensayar **(ya suministrado)** y la realización de medidas de ρ en condiciones normales de presión (P) y temperatura (T) sobre probetas de un tamaño que permita dar el salto a la escala industrial **(en curso)**.
Dado que la ρ se ve afectada por los defectos microestructurales y por el estado magnético del material, el **objetivo principal** de este proyecto ha sido someter aceros de carril a TSP, ya que estos influyen directamente en el primero de los aspectos mencionados, modificando variables como la densidad de dislocaciones o el tamaño de grano. Además, estas variaciones pueden penetrar hasta una profundidad diferente en la pieza tratada, en función de los parámetros del proceso [6-8]. Tras una caracterización inicial de los 2 aceros de carril en estudio (microestructural y de propiedades físicas), se han aplicado TSP convencionales y severos a 2 aceros de carril **(conseguido)**. Un **objetivo específico** ha sido evaluar cómo afectan dichos tratamientos a la ρ de los aceros, consiguiendo un aumento de la misma, en superficie **(conseguido)**, y minimizando, por tanto, la aparición de corrientes de fuga, así como conocer la alteración de su comportamiento magnético (μ, M_s y H_C), al objeto de confirmar la compatibilidad del material tratado con la aplicación conjunta de frenos por corrientes de Foucault y frenos magnéticos, que garantice la acción de frenada adecuada en un amplio rango de velocidades (0-350 Km/h) **(en curso)**. El segundo **objetivo específico** ha sido el análisis de la correlación entre las propiedades microestructurales y mecánicas generadas por los distintos TSP, y las propiedades eléctricas y magnéticas **(en curso)**. La caracterización de dichas propiedades ha sido parcial a fecha actual por lo que no se ha completado dicho análisis. Aún así, según los **resultados ya obtenidos**, se puede afirmar que los TSP causan un aumento claro de ρ respecto a su valor en el acero sin tratar.

2.2 Objetivos iniciales del proyecto y grado de consecución

El objetivo inicial del proyecto es optimizar las propiedades eléctricas y magnéticas en aceros ferritoperlíticos utilizados en carril, en lo que respecta a aplicaciones como el diseño de los sistemas de frenado o de posicionamiento del tren, con especial interés en la disminución de las corrientes de fuga.

Para ello se han sometido dos calidades distintas de acero ferritoperlítico a diferentes TSP, con el objetivo específico de introducir cambios a nivel superficial (microestructurales, nivel de tensiones residuales y endurecimiento por deformación) y analizar la correlación entre los parámetros del tratamiento aplicado y las propiedades eléctricas y magnéticas de los materiales tratados, consecuencia de los cambios mencionados. Un segundo objetivo es lograr un aumento de la resistividad eléctrica superficial a través de dichos TSP.

Respecto a la consecución, dado que la planificación programada se extendía a 9 meses y la contratación del estudiante ha sido de apenas 4 meses, y debido a diferentes contratiempos derivados, principalmente, de las dificultades provocadas por la pandemia del Covid-19, el cumplimiento del proyecto no ha llegado a su fin, si bien en la actualidad, la previsión es poder completar el trabajo planificado, en el plazo de 3 meses a contar desde la fecha de firma de esta memoria, quedando pendientes los aspectos que se detallan en el siguiente apartado y que se están llevando a cabo en la actualidad.

2.3 Tareas realizadas

1) Preparación de muestras y caracterización inicial de los aceros.

Se ha trabajado con dos calidades de acero ferritoperlítico, codificadas como E y R, suministradas por Arcelor-Mittal (Veriña, Gijón). Se han mecanizado muestras para los distintos ensayos, teniendo en cuenta los requisitos impuestos por las técnicas de caracterización eléctrica, principalmente, por ser

los más restrictivos, y se ha hecho la caracterización microestructural inicial de los mismos. Las muestras para las medidas de las propiedades eléctricas y magnéticas se han cortado en las instalaciones del laboratorio de Ciencia de los Materiales del campus de Gijón, mediante una cortadora de precisión.

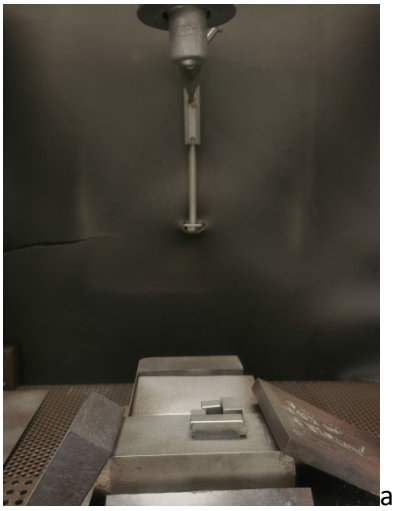
2) Tratamientos de Shot Peening.

Se han realizado diferentes TSP (convencionales y severos) utilizando diferentes niveles de energía, con el fin de conseguir una modificación a nivel microestructural, y de propiedades en la superficie de las muestras. Estos ensayos se han llevado a cabo en una máquina de SP neumática de proyección por presión directa (Figura 1), compuesta por una cabina de chorreado modelo GUYSON Euroblast 4 PF con deposito tipo G27, ciclón motorizado tipo 75/16 y colector de polvo modelo DC400, suministrada por Materias Primas Abrasivas, S.L., de la que dispone el laboratorio de Ciencia de los Materiales del campus de Gijón. Se ha trabajado a una presión de 2 bar, y se han utilizado proyectiles cerámicos de circona, con 0.3mm de diámetro (Figura 2).

Figura 1. Máquina de Shot Peening (laboratorio de Ciencia de los Materiales del campus de Gijón).

Figura 2. Proyectiles de circona utilizados en los tratamientos de SP.

Se ha realizado un montaje específico para permitir el tratamiento de muestras con la geometría requerida para las medidas de resitividad (1cm x 1cm x 1mm) minimizando el efecto de curvado que producen las energías de impacto en probetas con espesores pequeños (Figura 3).


a

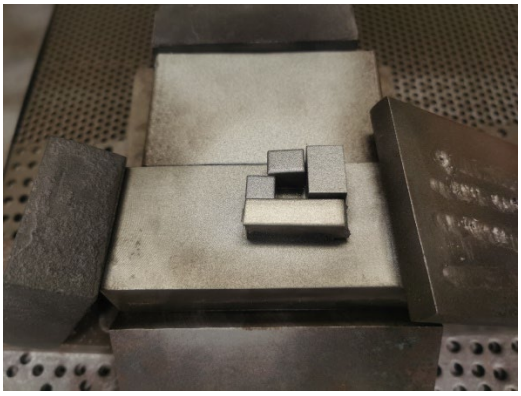

b

Figura 3. (a) Montaje para centrado y sujeción de muestra (b) Detalle ampliado del montaje.

3) Caracterización microestructural.

Se ha realizado un estudio microestructural de las muestras tratadas, en sección transversal, mediante microscopía óptica (MO), analizándose el efecto de los TSP desde la superficie hacia el interior. Para ello se han utilizado las desbastadoras y pulidoras, así como los microscopios ópticos Nikon Optiphot, Olympus y Nikon Eclipse MA200 de los que dispone el Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica, en el laboratorio del Campus de Gijón.

Ha quedado pendiente un estudio más detallado de los tamaños de grano, así como una caracterización mediante miscroscopía electrónica de barrido debido, nuevamente, a los retrasos impuestos por la pandemia. Todas estas tareas se completarán a lo largo de los próximos 3 meses.

4) Caracterización mecánica.

Se han realizado perfiles de microdureza desde la superficie tratada de los materiales hacia el interior, con el fin de evaluar la modificación inducida por el TSP en esta propiedad, utilizando para ello un microdurómetro de la marca Buehler Micromet.

Queda pendiente la caracterización del nivel de tensiones residuales y el endurecimiento por deformación a través del parámetro Full Width at Half Maximun (FWHM) inducido en las muestras por los TSP, mediante técnicas de difracción de rayos X (DRX), dado que el equipo ha sufrido una avería al inicio del período planificado para la ejecución del proyecto y los efectos de la pandemia en la actividad industrial han prolongado la baja del mismo hasta la fecha de firma de la presente memoria.

5) Determinación de las propiedades eléctricas y magnéticas de las probetas con o sin tratamiento superficial de Shot Peening.

Se han realizado medidas de ρ a temperatura ambiente y se ha llevado a cabo una caracterización magnética mediante la realización de ciclos de histéresis del material de partida (μ, M_S, H_C). Se han realizado medidas de ρ a temperatura ambiente sobre las probetas sometidas a los distintos TSP. Estas medidas se han llevado a cabo en un equipo PPMS (Physical Properties Measurement System)

perteneciente a los servicios científico técnicos de la Universidad de Oviedo. Para ello se ha utilizado el método de Van der Pauw [9,10].

Queda pendiente la caracterización magnética de dichas probetas tratadas y la realización de medidas análogas en probetas de mayor tamaño, que nos permitan hacer un salto de escala. Estas medidas se llevarán a cabo en el laboratorio de I+D de ArcelorMittal. Nuevamente, los retrasos son achacables a las circunstancias impuestas por la pandemia actual.

6) Análisis de los resultados y conclusiones.

Los resultados de los medidas realizadas según la descripción de las tareas anteriores han sido analizados con el fin de relacionar los efectos inducidos a nivel de propiedades eléctricas con las modificaciones inducidas a nivel microestructural por los TSP.

Debido a la consecución, solo parcial, de las actividades planificadas, este análisis no se ha completado a la fecha de firma de la presente memoria, quedando pendiente un análisis más pormenorizado de los cambios microestructurales, la caracterización mecánica, la caracterización magnética y un paso a mayor escala, así como un estudio de la correlación entre todos los parámetros y propiedades físicas, una vez se haya podido concluir sus medidas.

Aún así, los resultados ya obtenidos son muy prometedores, pues apuntan a un claro efecto de los tratamientos realizados, sobre las propiedades objetivo de este análisis, que va en la dirección esperada, lo cual redundará en una mejora de las prestaciones de los carriles en aspectos como:

- los sistemas de detección de posición de tren,

- la transmisión de información a través de vía,

- la transmisión de energía a través de catenaria con vía como tierra o,

- los sistemas de frenado.

La correlación entre los efectos inducidos por el SP en superficie y las variaciones en las propiedades eléctricas y magnéticas, permitirá la toma de decisiones para continuar mejorando este tipo de producto.

2.4 Resultados obtenidos

Se han analizado dos grados de acero diferentes, codificados como acero E y acero R, por motivos de confidencialidad.

A partir de sendas barras prismáticas cuya dimensión mayor es paralela a la dirección de laminación se han extraído probetas longitudinales (paralelas a dicha dirección) y transversales (perpendiculares a dicha dirección) (Figura 4), con el fin de estudiar la posible influencia de la anisotropía derivada del conformado en la resistividad, dado que este efecto se sumaría al del TSP.

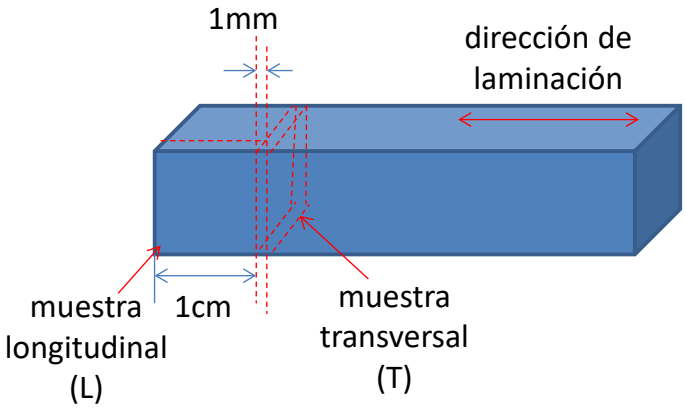


Figura 4. Esquema de la extracción de probetas para SP con requisitos geométricos para las medidas de resistividad eléctrica.

Se ha realizado una caracterización inicial de los materiales de partida, ambos aceros ferritoperlíticos. En la Figura 5 se muestra la microestructura del acero E, a modo de ejemplo.

Figura 5. Microestructura ferritoperlítica del acero E.

Se han recopilado los datos disponibles relativos a sus propiedades eléctricas y magnéticas, para tomarlas como punto de partida en el análisis del efecto de los distintos TSP a aplicar. Dichos datos se recogen en la Tabla 1.

MATERIAL	ρ (μΩ·cm)	μ_r max	H_C (A/m)	M_S (x10^{-5}A/m)
ACERO E	20.9	1441	318	0.016
ACERO R	23.8	-	924	1.8

Tabla 1. Propiedades eléctricas y magnéticas de los aceros E y R de partida (sin tratamiento SP)

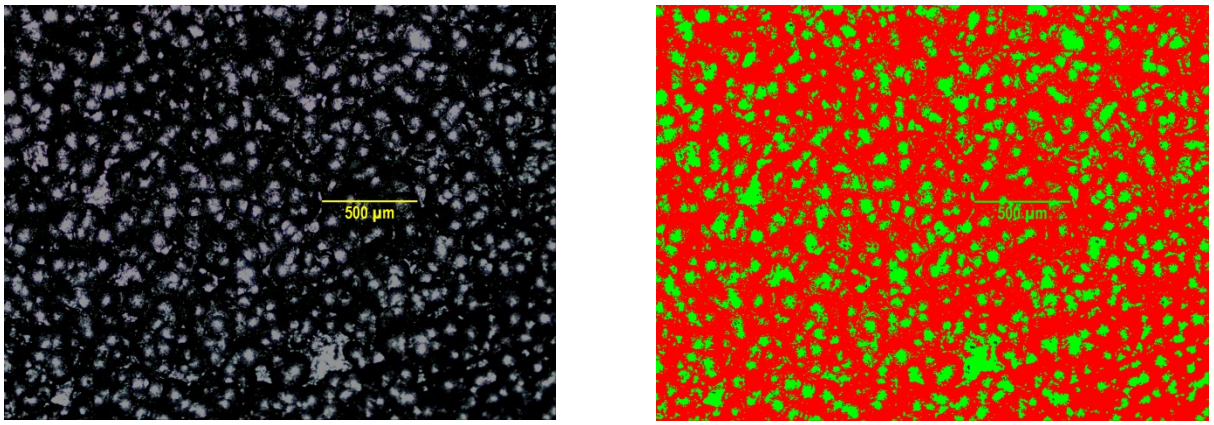
Se han realizado TSP con proyectiles cerámicos de circona, de diámetro 0,3mm. El SP es un tratamiento de deformación plástica en frío que consiste en hacer impactar un flujo de proyectiles esféricos de tamaño homogéneo contra la superficie del componente, controlando los parámetros de aplicación (diferencia fundamental con el granallado). Cada uno de estos impactos genera una huella en el material, y el conjunto de todas ellas genera un campo de tensiones residuales de compresión, ya que la capa superficial, deformada plásticamente, impide la recuperación de la capa inferior, que sólo sufre deformación elástica. La recuperación de su posición original tras el impacto de los proyectiles, se ve impedida debida a la deformación plástica más superficial, originándose de este modo el campo de tensiones residuales. Además de la alteración del campo tensional, el SP produce un endurecimiento de la capa superficial por deformación, al mismo tiempo que aumenta la rugosidad. Dependiendo de los parámetros del proceso de aplicación del tratamiento, el porcentaje de superficie afectada puede variar, conociéndose esto como % de cobertura (C).

Para la determinación de los tiempos necesarios para obtener % cobertura concretos, se ha calculado el parámetro AR, disparando probetas durante tiempos de 1s con el resto de parámetros de ensayo fijados (distancia, presión, tipo de proyectil…). Mediante un programa de análisis de imagen, se ha determinado el valor de C tras ese tiempo de TSP (ver Figura 6), y despejando en la ecuación de Avrami (1), se ha obtenido el valor del parámetro AR, que se mantiene constante mientras no se varíen el resto de parámetros del proceso. Esto permite obtener una relación entre C y el tiempo de disparo (Tabla 2).

$$C = 100*(1*e^{-ARt}) \quad (1)$$

MATERIAL	100%	500%	1000%
ACERO E	3.25	16.25	32.50
ACERO R	3.95	19.75	39.50

Tabla 2. Tiempos de cobertura (en segundos) para la obtención de distintos % de cobertura de SP en los aceros E y R.



a b

Figura 6. Superficie expuesta a shot peening durante 1 segundo (a) Fotografía tratada con Corel Paint Shop Pro XI (b) Fotografía de la misma región tras aplicar la rutina del procesador de imágenes.

Conocidos los tiempos, se han realizado distintos TSP para obtener distintos valores de C en probetas L y T de cada uno de los aceros a estudiar, aunque solo se ha llegado a completar la serie de ensayos correspondientes al acero E.

Se han medido las rugosidades y se han hecho perfiles de dureza de las probetas L y T del acero E con el mayor valor de C utilizado (1000%). A modo de ejemplo, en la Figura 7 se muestra la evolución de la rugosidad, con un aumento de C para las muestras L y T del acero R. Se observa que los valores de la rugosidad obtenidos para las probetas transversales es mayor que la obtenida para las longitudinales, sometidas a igual tratamiento de SP, tanto en el acero E como en el R.

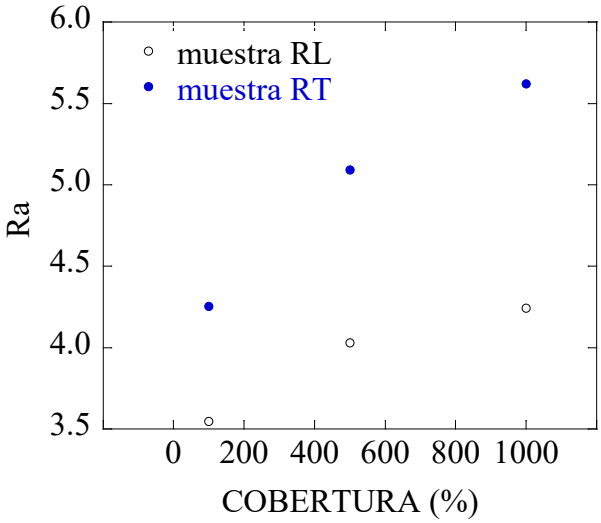


Figura 7. Evolución de la rugosidad de las muestras RL y RT con el parámetro C.

Se ha realizado un estudio metalográfico de las muestras tratadas. En la **Figura 8** se muestra, a modo de ejemplo, la microestructura de la sección de la probeta EL tratada con un 1000% de cobertura (máxima cobertura analizada hasta el punto de desarrollo alcanzado en el proyecto a fecha de firma de la presente memoria). En ella se puede apreciar el efecto de deformación de los granos más superficiales debido al TSP.

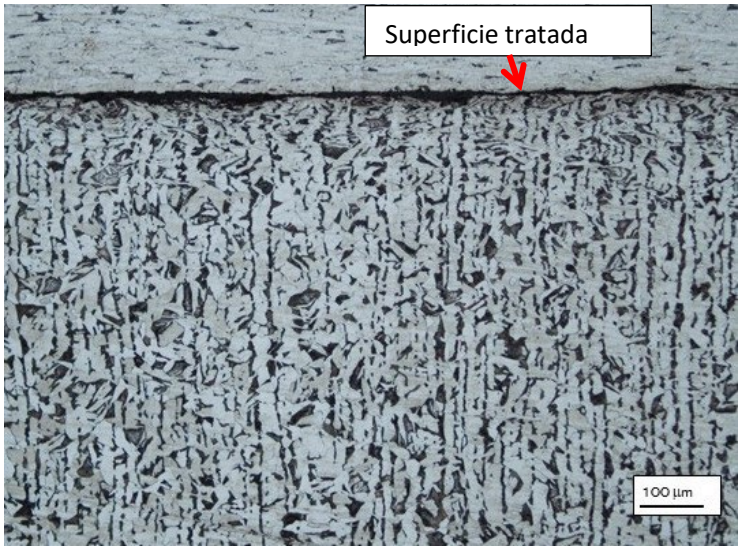


Figura 8. Microestructura de la probeta EL tras tratamiento SP con 1000% de cobertura. Se aprecia la deformación de los granos próximos a la superficie.

Se han medido los perfiles de dureza de las muestras EL y ET correspondientes a este tratamiento más severo aplicado, al considerarse que será el que tenga mayor efecto, de producirse, sobre las propiedades físicas a estudiar, quedando pendiente la extensión del análisis al resto de TSP. En la Figura 9 se muestra la microestructura de la sección de la muestra EL con las huellas de las microdurezas practicadas sobre ella. En la Figura 10 se muestran los resultados de estas medidas. Se aprecia que, para ambas muestras, ET y EL, el valor de la dureza no estabiliza hasta una profundidad de más de 400µm, lo que implica que más del 40% del espesor de las muestras está afectado por el tratamiento, y lo hace con una evolución muy similar en ambas. Además, el incremento de la dureza es en ambos casos de ~20%.

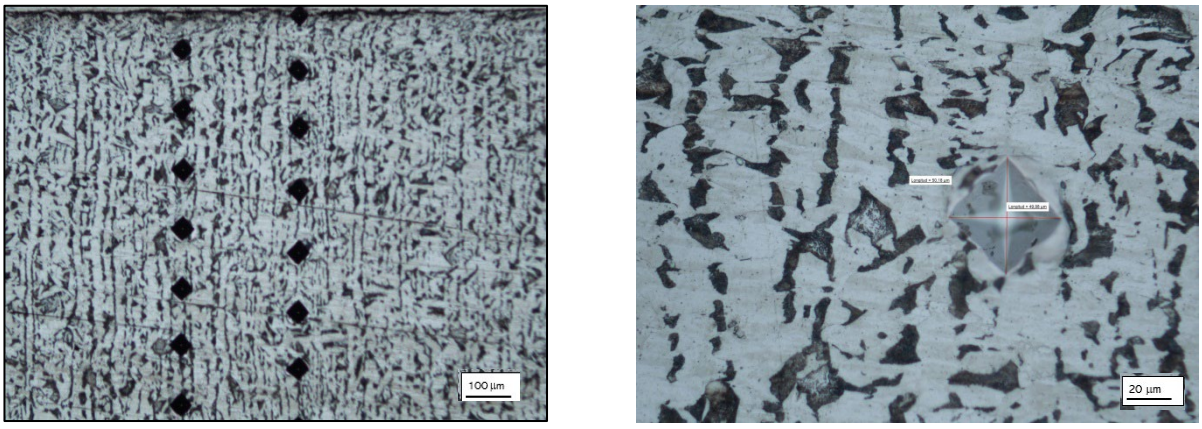


Figura 9. (izqda.) Perfil de microdurezas sobre microestructura de probeta EL tratada con 1000% de cobertura en SP; (drcha.) Ampliación de huellas de microdureza. Se aprecia la deformación de los granos.

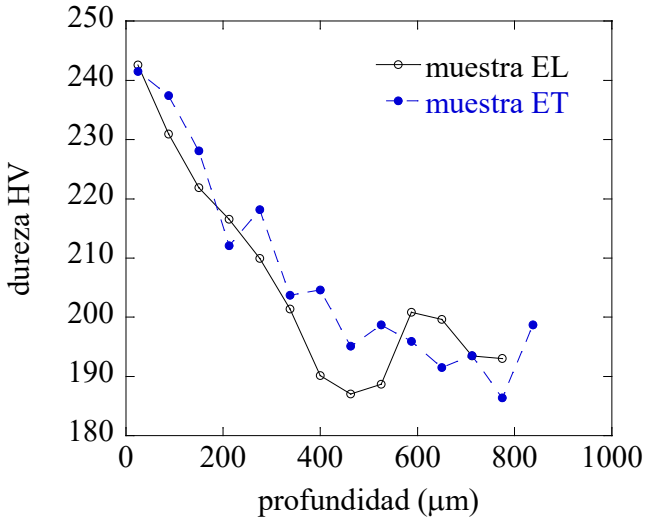


Figura 10. Perfil de durezas correspondiente a las muestras EL y ET.

Se ha medido la resistividad eléctrica en las dos series tratadas de acero E (L y T) y en la serie L del acero R. Los resultados se muestran en la Figura 11, en la que se puede apreciar el mayor valor de esta propiedad para aquellas probetas tratadas con mayores energías de proyectil (1000% de cobertura). En el caso del acero E, tanto las muestras L como las T, presentan un aumento de ρ respecto al valor de la muestra sin tratamiento, en torno al 10%, mientras que la muestra L medida en el caso del acero R presenta un aumento de ρ, tras el tratamiento SP, de un 30%, aproximadamente. Se aprecia una diferencia de ~0.3% en los valores netos de resistividad, entre las dos orientaciones L y T del mismo acero (E).

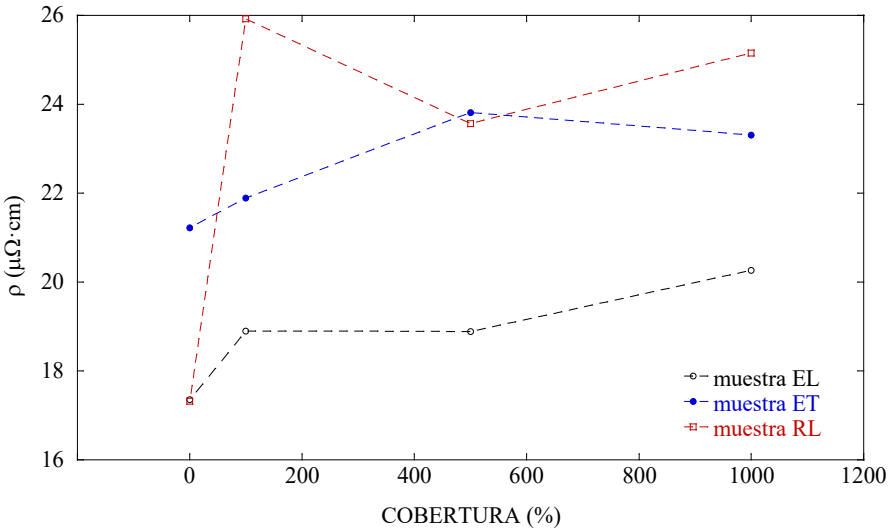


Figura 11. Resistividad eléctrica frente a % de cobertura en el tratamiento de SP para las dos muestras (L y T) del acero E y para la muestra L del acero R.

Dado que aún no se han completado todas las series de medidas de rugosidad y resistividad eléctrica de los dos materiales en estudio, así como los perfiles de durezas, y que no ha sido posible determinar las tensiones residuales ni el parámetro FWHM por haber estado de baja el equipo de DRX hasta la fecha actual, no es posible sacar todas las conclusiones que de este proyecto se pueden derivar, ni establecer una correlación entre los parámetros del tratamiento: los microestructurales, las propiedades mecánicas, las eléctricas y las magnéticas. Sin embargo, a la vista de los resultados ya alcanzados, se puede adelantar que el TSP tiene un claro efecto sobre el valor de la resistividad eléctrica, aumentándolo en un % notable, siendo éste uno de los objetivos principales del proyecto. Debe hacerse notar que, dado que se trata de un efecto superficial, las medidas sobre probetas de mayores dimensiones (menor porcentaje de volumen de material afectado) serán determinantes a la hora de evaluar el efecto del SP en la resistividad de un carril.

2.5 Trabajos o necesidades futuras

Dado que el desarrollo de las actividades planificadas aún está en curso, no se proponen aquí trabajos a futuro, a la espera de los resultados finales del presente proyecto.

2.6 Divulgación de los resultados (publicaciones, artículos, ponencias…)

Pendiente de la finalización del presente proyecto cuyo desarrollo está en curso a fecha de firma de la presente memoria.

Referencias:

[1] Sergey Kitanov, aantolu Podol'skii; Analysis of Eddy-Current and Magnetic Rail Brakes for High-Speed Trains; The Open Transportation Journal **2008**, 2, 19-28.
[2] Der-Ming Ma, Jaw-Kuen Shiau; The Design of Eddy-Current Magnet Brakes, Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering **2011**, 35(1), 19-37.
[3] Yusuf Yasa, Eyyup Sincar, Baris Tugrul Ertugrul, Erkan Mese; A multidisciplinary design approach for electromagnetic brakes; Electric Power Systems Research **2016**, 141, 165–178.
[4] Jean-Luc Wybo; Track circuit reliability assessment for preventing railway accidents; Safety Science **2018**, 110, 268–275.
[5] Yang Yang, Gang Wua, Zhi-Shen Wu, Jian-Biao Jiang, Xue-Bin Wang; Structural performance of ballastless track slabs reinforced with BFRP and SFCB; Composites: Part B **2015**, 71, 103–112.
[6] Juan González, Luis-Borja Peral, Chiara Colombo, Ines Fernández-Pariente; A Study on the Microstructural Evolution of a Low Alloy Steel by Different Shot Peening Treatments; Metals **2018**, 8, 187.
[7] S. Bagherifard, I. Fernandez-Pariente, R. Ghelichi, M. Guagliano. Effect of severe shot peening on microstructure and fatigue strength of cast iron. International Journal of Fatigue. 2014. 65. 64-70.
[8] Juan González, Sara Bagherifard, Mario Guagliano, Ines Fernández Pariente. Influence of different shot peening treatments on surface state and fatigue behaviour of Al 6063 alloy. Engineering Fracture Mechanics. 2017. 185. 72-81.
[9] L. J. van der Pauw, Philips Res. Repts. 13, p. 1 (1958).
[10] Quantum Design Application Note 1076-304, Rev. A0, March 2007.

3. Memoria económica

Financiación		Personal	Inventariable	Fungible	Otros gastos
IUTA	SV-19-GIJÓN-13	1806.36€	-	-	-
Otras fuentes	Referencia proyecto/contrato	-	-	-	-
Estudiante con ayuda a la investigación	Nombre	José María Echevarría Barriga			
	Tareas	Apoyo a todas las actividades: tratamientos, caracterización, análisis y difusión de resultados.			
	Período	10/09/2020-31/12/2020			

4. Otros proyectos y contratos con financiación externa

Título del proyecto/contrato	Influencia del hidrógeno en el comportamiento a fractura y fatiga de uniones soldadas en aceros estructurales para aplicaciones energéticas
Referencia	(MCIU-19-RT12018-096070B-C31)
Investigador/a/es principal/es	Cristina Rodríguez
Equipo investigador	Cristina Rodríguez, Javier Belzunce, Inés Peñuelas, Inés Fernández Pariente…
Periodo de vigencia	Hasta 31/12/2021
Entidad financiadora	Ministerio de Ciencia Innovación y Universidades
Cantidad subvencionada	108.900€