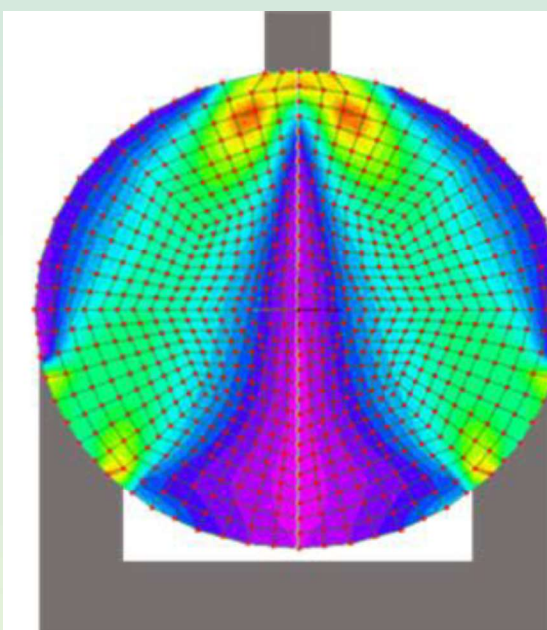


Trabajos premiados

JIM 2025



Evaluación de la resistencia al corte de mezclas asfálticas y simulación (elementos finitos) de tensiones de corte.

Ensayo de tracción indirecta por compresión diametral



Editorial

En este volumen de la Revista SAM correspondiente al año 2025, se presentan cuatro artículos basados en trabajos premiados durante el 9º Congreso de Jóvenes Investigadores en Materiales (JIM 2025), realizado en la Facultad Regional Concepción del Uruguay (Entre Ríos) de la Universidad Tecnológica Nacional, los días 25 y 26 de septiembre de 2025.

Estos trabajos corresponden a los siguientes premios:

Categoría ESTUDIANTES DE POSGRADO:

Ing. Cecilia Lucía Martinefski. Estudiante de Posgrado en FIO-UNICEN.

Categoría JOVEN PROFESIONAL:

Luis Zorzutti, Ingeniero Civil. IMAE, Universidad Nacional de Rosario.

Categoría FIN DE GRADO:

Joaquín Arauz Legnazzi y María Pía DiNanno. Proyecto Final de Ing. Civil, FIO, UNCPBA.

Categoría ESTUDIANTES DE GRADO:

Ariana Mendelevich, Estudiante de Ing. Electromecánica, UTN Fac. Reg. Concepción del Uruguay

Las imágenes inferiores de la tapa corresponden a ensayos de evaluación de la resistencia al corte de mezclas asfálticas y a la simulación por elementos finitos de tensiones de corte asociadas, y al ensayo de tracción indirecta por compresión diametral (autores: Luis Zorzutti y Fernando Martínez).



Dra. Ing. Elena Brandaleze
Editora

Departamento Metalurgia
Universidad Tecnológica Nacional
Facultad Regional San Nicolás



Comisión Directiva de la SAM

Presidenta:

Sonia Brühl (Concepción del Uruguay)

Vice Presidenta:

Alicia Ares (Misiones)

Secretaria:

María Cecilia Marinelli (Rosario)

Pro Secretario:

Roberto Lucci (Córdoba)

Tesorera:

Ana Velia Druker (Rosario)

Pro Tesorera:

Eugenia Dalibon (Concepción del Uruguay)

Vocales Titulares:

Ana Florencia Forte Giacobone
(Buenos Aires)

Nora Pellegrí (Rosario)

Amadeo Daniel Sosa (Mar del Plata)

Vocales Suplentes:

Matías Ramírez (San Nicolás)

Josefina Dib (Rosario)

María Emilia Furno (Mar del Plata)

Revisor de Cuentas:

Claudio Arenas (Buenos Aires)

Revisor de Cuentas Suplente:

Silvana Sommadossi (Neuquén)

Revista SAM

Editora:

Elena Brandaleze (San Nicolás)

Comité Editorial:

Alicia Ares (Misiones)

Edgardo Benavidez (San Nicolás)

INDICE

● Editorial

Elena Brandaleze

● Trabajos Técnicos

Optimización en la elaboración de agregados livianos para su uso como adsorbente de contaminantes.	1
<i>Cecilia Lucía Martinefsky.</i>	
Evaluación de la deformación permanente de mezclas templadas con emulsión asfáltica.	7
<i>Luis Zorzutti.</i>	
Valorización sostenible de palas eólicas: desempeño de sus residuos en mezclas cementicias.	13
<i>Joaquín Arauz Legnazzi, María Pía Di Nanno.</i>	
Nitruración iónica de AISI 316L: influencia de los parámetros de proceso en el comportamiento al desgaste y a la corrosión.	20
<i>Ariana Mendelevich.</i>	

Optimización en la elaboración de agregados livianos para su uso como adsorbente de contaminantes

Cecilia Lucía Martinefsky¹

Directora: Alejandra Tironi¹, Codirectores: Edgardo Fabián Irassar¹, Anabella Mocciano²

(1) Facultad de Ingeniería, CIFICEN (CONICET, CICPBA, UNCPBA), Av del Valle 5737, 7400 Olavarría, Argentina.

(2) Centro de Tecnología de Recursos Minerales y Cerámica, CETMIC (CONICET-UNLP-CICPBA), Con. Centenario y 506, 1897 Manuel B. Gonnert, Argentina.

* e-mail: cmartinefsky@fio.unicen.edu.ar

RESUMEN

Los agregados livianos presentan ventajas medioambientales en las construcciones por su capacidad de aislación térmica y acústica, pero también se pueden emplear para la adsorción de contaminantes. El objetivo de este trabajo es realizar una optimización en la elaboración de agregados livianos para el uso como adsorbente mediante un diseño de experimentos Doehlert, utilizando como principal materia prima el destape de canteras de caliza de Olavarría. La capacidad de remoción del agregado liviano óptimo fue evaluada mediante ensayos de adsorción del colorante aniónico Rojo Congo, empleando el agregado entero, molido y modificado con $MgCl_2$, obteniendo para este último el mejor resultado.

Palabras clave: Agregados livianos; Diseño de experimentos; Remoción de contaminantes; Colorante Rojo Congo.

ABSTRACT

The use of lightweight aggregates in construction has environmental benefits due to their thermal and acoustic insulation properties. In addition, they can be used for the adsorption of pollutants. This study aims to optimize the production of lightweight aggregates for use as adsorbents using a Doehlert experimental design and waste shales from a limestone quarry in Olavarría as the main raw material. Adsorption tests of the anionic dye Congo Red were used to evaluate the removal capacity of the optimal lightweight aggregate. The aggregate was tested whole, ground and modified with $MgCl_2$, and the best results were obtained for the last option.

Keywords: Lightweight aggregates; Experimental design; Contaminant removal; Congo red dye.

INTRODUCCIÓN

La producción de agregados livianos resulta de gran interés por tres ventajas medioambientales principales: i) es un producto que se puede producir total o parcialmente de residuos o pasivos ambientales; ii) es un producto que se puede aplicar en grandes volúmenes en diferentes sectores como construcción, agricultura, tratamiento de aguas y remediación de efluentes, hidroponía y techos verdes; y iii) presenta propiedades tecnológicas como gran porosidad, liviandad, baja conductividad térmica y acústica, pH neutro e inerte químicamente, que lo convierten en un material con potencial estratégico en sus aplicaciones [1]. Los agregados livianos artificiales consisten en pequeñas esferas con una corteza densa y un interior poroso. Las arcillas naturalmente disponibles son apropiadas como principal materia prima [2]. Durante el tratamiento térmico en su elaboración, es fundamental lograr la formación de una capa exterior con la viscosidad adecuada para retener los gases generados a partir de la deshidroxilación de los minerales arcillosos, o por la descomposición de otra especie [3]. La incorporación de un agente formador de poros con componentes orgánicos contribuye a la generación de gases y disminuye la temperatura de sinterización. Sin embargo, una menor temperatura de sinterización no implica necesariamente una transición a la fase vítrea con viscosidad suficiente para la retención de gases y expansión del agregado [4]. Las variables temperatura del tratamiento térmico, porcentaje de adición de agente formador de poros y tamaño de las esferas son variables determinantes de las propiedades del agregado liviano.

En la región de Olavarría (Prov. de Buenos Aires, Argentina), la disponibilidad de caliza necesaria para la producción de cemento se encuentra en estratos cada vez más inferiores, generándose un gran stock de lutitas de descarte durante el destape de las canteras. En la búsqueda de soluciones para su disposición y valorización, se ha planteado la posibilidad de estudiar la elaboración de agregados livianos a partir de estas

lutitas con minerales arcillosos illita y clorita. Por otro lado, estudios previos demostraron que el aceite de motor usado es un agente formador de poros viable [5]. El uso de aceite residual proveniente de una industria cementera, evitaría el uso de agentes provenientes de recursos naturales no renovables y/o costosos.

La combinación entre un diseño de experimentos y superficie de respuesta es una herramienta eficiente que permitiría entender cómo influyen las variables en las propiedades del agregado liviano obtenido. Doehlert [6] propuso un diseño experimental hexagonal para representar una superficie de respuesta cuadrática con una cantidad mínima de ensayos, siendo más económico que el diseño factorial tradicional. Para tres variables, los puntos están circunscritos en una esfera de radio unitario. A partir de los datos experimentales, es posible modelar su comportamiento y determinar las condiciones óptimas para las propiedades deseadas [7], en este caso para su aplicación como adsorbente de contaminantes.

La estructura porosa de los agregados livianos facilita los procesos de adsorción de contaminantes, conociéndose investigaciones en la remoción de diferentes metales pesados, colorantes, herbicidas, etc. Entre los colorantes, el Rojo Congo es un típico colorante aniónico ampliamente utilizado en industrias química, textil y bioquímica, con alta toxicidad. Una de las técnicas más efectivas para su remoción de los efluentes es mediante adsorción, y teniendo en cuenta que las moléculas de Rojo Congo presentan carga negativa en soluciones acuosas, los adsorbentes con carga positiva en la superficie son favorables para su adsorción [8]. El tratamiento de los agregados livianos con metales divalentes, como $MgCl_2$, mejora la porosidad y modifica el grupo funcional de la superficie adsorbida, lo que aumenta la capacidad de adsorción [9].

El objetivo de este trabajo es estudiar los efectos de la temperatura del tratamiento térmico, la adición de aceite residual como agente formador de poros y el tamaño inicial, en las propiedades de agregados livianos elaborados con lutita de destape de cantera. Se considera un diseño de experimentos Doehlert de tres factores y un modelado de superficie de respuesta, para obtener las condiciones óptimas en la elaboración de agregados livianos para su uso como adsorbente de contaminantes. Se evalúa la capacidad de remoción del colorante Rojo Congo en los agregados óptimos obtenidos, enteros y molidos, y de los mismos tratados con $MgCl_2$.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó una lutita del destape de canteras de caliza de Olavarría, Buenos Aires. La lutita contiene los minerales arcillosos illita y clorita, cuarzo, calcita y feldespato albita [10]. Se realizó una molienda hasta tamaño de partícula menor a 150 μm . Como agente formador de poros se utilizó un aceite residual de una industria cementera, el cual fue usado en la lubricación y refrigeración del reductor del molino de crudo.

La influencia de los factores temperatura del tratamiento térmico (T), porcentaje de adición de aceite residual (A) y diámetro inicial (d) en las propiedades de los agregados livianos se estudiaron con un diseño de experimentos Doehlert [6,11]. En la Tabla 1, se muestran los puntos del diseño y el valor de los factores, con triplicado del punto central. El rango de valores para cada factor se estableció a partir de ensayos exploratorios previos [10]: para T se consideró entre 1100°C y 1200 °C, para A entre 0,7 y 5,3 % en masa y para d entre 3,5 y 8,5 mm. Los rangos de valores se codificaron entre -1 y 1.

Se elaboraron pastas de lutita con los diferentes porcentajes en masa de aceite residual y agua, se moldearon esferas con los diferentes diámetros iniciales y se secaron en estufa a 105 °C. Las esferas se sinterizaron a las distintas temperaturas del diseño, colocando las mismas en la mufla una vez alcanzada la temperatura objetivo, con un tiempo de permanencia de 10 minutos y posterior enfriamiento a temperatura ambiente. Se determinó la densidad aparente de partícula (D) y la absorción de agua a 24 horas (W) de los agregados mediante picnometría (EN 1097-6). Se observó la microestructura en lupa a partir de un corte de los agregados con cámara Leica DMC4500. El software Statgraphics Centurion fue utilizado para el análisis estadístico de la influencia de los factores, el desarrollo de modelos, la construcción de las superficies de respuesta, y para predecir el valor de los factores que aseguren la obtención de un agregado liviano óptimo

(A) para su uso como adsorbente, a través de la función deseabilidad. La capacidad de remoción (Re) del agregado liviano óptimo fue evaluada mediante ensayos de adsorción del colorante aniónico Rojo Congo, empleando el agregado entero (Ae), molido con tamaño entre 600-2360 μm (Am) y ambos tratados con $MgCl_2$ (Ae-t y Am-t). El tratamiento se realizó agitando 24 h los agregados enteros o molidos con una solución de $MgCl_2$ 2M, en una relación de 1 g/50 ml, luego fueron filtrados, lavados y secados a 110 °C durante 24 h [9]. Se compararon los resultados con los medidos en un agregado comercial Liaperl® (L) con aplicación en filtrado de aguas residuales, en iguales condiciones (Le, Lm, Le-t y Lm-t). Se colocaron 0,3 g de agregado junto con 30 ml de solución acuosa de 20 mg/l de Rojo Congo (C0) en un erlenmeyer y se agitó a temperatura ambiente durante 24 h. Posteriormente la mezcla se filtró y se midió la concentración de Rojo Congo en el equilibrio (Ce) en un espectrofotómetro UV/Vis BioSmartest UV-5100PC a 497 nm. A partir de estas concentraciones se calculó el porcentaje de remoción utilizando la ecuación (1):

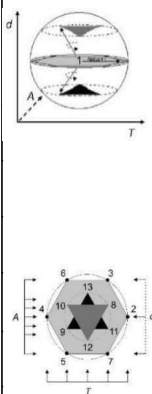
$$Re = (C_0 - C_e) \times 100 / C_0. \quad (1)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Puntos experimentales Doehlert

Los resultados de la densidad aparente de partícula y la absorción de agua de los agregados se muestran en la Tabla 1. La densidad varía entre 0,41 y 2,22 g/cm³ y la absorción de agua entre 0,08 y 10,2 % para los distintos puntos experimentales. De acuerdo a la norma EN 13055, un agregado se considera liviano cuando su densidad de partícula es menor a 2 g/cm³. El punto experimental 9 no cumple este criterio, por lo que no se puede considerar como agregado liviano, al igual que los puntos 4 y 13 que se encuentran muy cercanos a este límite. Para el uso de los agregados livianos como adsorbente se requiere una baja densidad para asegurar una mayor porosidad, aunque se recomienda que sea mayor a 1 g/cm³ para evitar que floten. Una mayor absorción de agua favorecería el proceso de adsorción. De los puntos experimentales se observa que la mayor absorción de agua se obtiene en el punto 10 (W = 10,2 %), sin embargo, cuenta con una densidad de sólo 0,63 g/cm³. Por lo anterior, para la optimización simultánea de estas dos propiedades, se proponen como valores deseados para la densidad entre 1,00-1,10 g/cm³ y para la absorción de agua del 9,0 %.

Tabla 1. Diseño experimental Doehlert para los factores temperatura del tratamiento térmico (T), porcentaje de adición de aceite (A) y diámetro inicial de los agregados (d) y los resultados experimentales de densidad de partícula (D) y absorción de agua (W).

Diseño Doehlert para 3 factores	Pto	Factores codificados			Factores experimentales			D (g/cm ³)	W (%)
		T	A	d	T (°C)	A (%)	d (mm)		
	1	0	0	0	1150	3,0	6	1,31 ± 0,04	2,0 ± 0,3
	1	0	0	0	1150	3,0	6	1,24 ± 0,04	2,4 ± 0,6
	1	0	0	0	1150	3,0	6	1,26 ± 0,02	2,0 ± 0,5
	2	1	0	0	1200	3,0	6	0,69 ± 0,01	2,5 ± 0,3
	3	0,5	0,866	0	1175	5,0	6	0,85 ± 0,03	2,5 ± 0,3
	4	-1	0	0	1100	3,0	6	1,98 ± 0,03	5,9 ± 0,3
	5	-0,5	-0,866	0	1125	1,0	6	1,68 ± 0,02	2,0 ± 0,6
	6	-0,5	0,866	0	1125	5,0	6	1,24 ± 0,01	7,2 ± 0,1
	7	0,5	-0,866	0	1175	1,0	6	1,08 ± 0,03	1,5 ± 0,2
	8	0,5	0,289	0,816	1175	3,7	8	0,41 ± 0,01	7,8 ± 0,3
	9	-0,5	-0,289	-0,816	1125	2,3	4	2,22 ± 0,02	1,7 ± 0,2
	10	-0,5	0,289	0,816	1125	3,7	8	0,63 ± 0,02	10,2 ± 0,5
	11	0,5	-0,289	-0,816	1175	2,3	4	1,66 ± 0,03	0,08 ± 0,01
12	0	-0,577	0,816	1150	1,7	8	0,83 ± 0,02	5,1 ± 0,5	
13	0	0,577	-0,816	1150	4,3	4	1,98 ± 0,03	0,08 ± 0,01	

Modelado y coeficientes de regresión

Al igual que en varios diseños de experimentos, la matriz del diseño Doehlert se ajusta mejor a una función con términos cuadráticos para describir las respuestas (y), como la expresada en la ecuación (2) [7]:

$$y = b_0 + b_1.T + b_2.A + b_3.d + b_4.T^2 + b_5.A^2 + b_6.d^2 + b_7.TA + b_8.Td + b_9.Ad \quad (2)$$

Los coeficientes de regresión b_i para las ecuaciones de ajuste de cada una de las propiedades medidas D y W en función de los factores T, A y d codificados se muestran en la Tabla 2. El estadístico R^2 indica en qué porcentaje el modelo explica la variabilidad de la propiedad medida, mientras que R^2 ajustada es más adecuada para comparar modelos con diferente número de variables independientes.

Tabla 2. Coeficientes de regresión (b_i) para el modelado de las propiedades de los agregados livianos (D: densidad de partícula, W: absorción de agua) con su p-valor, R^2 y R^2 ajustado.

Propiedad		b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	b_9	R^2	R^2_{Ajust}
D	Coeficiente	1,27	-0,544	-0,184	-0,815	0,065	-0,098	0,036	0,121	0,165	-0,305	98,78	96,60
	p-valor		0,001	0,010	0,001	0,187	0,096	0,369	0,101	0,071	0,023		
W	Coeficiente	2,133	-2,0	1,790	4,329	2,067	0,867	2,318	-2,425	0,369	2,900	99,49	98,56
	p-valor		0,003	0,004	0,001	0,010	0,054	0,007	0,012	0,342	0,010		

Los valores coloreados en azul en la Tabla 2 destacan los coeficientes de regresión con contribución significativa, es decir aquellos que tienen un p-valor menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0 %. El comportamiento de la propiedad densidad (D) podría describirse como una combinación lineal de los tres factores (b_1 , b_2 y b_3) y la interacción del porcentaje de aceite y diámetro inicial (b_9). La absorción de agua (W) requiere un modelo que considere, además del aporte lineal de los tres factores (b_1 , b_2 y b_3), el término cuadrático de la temperatura (b_4) y el diámetro inicial (b_6) y dos de las interacciones (b_7 y b_9). Para una mejor visualización, la figura 1 muestra las superficies de respuesta cuando una de las variables fija su valor codificado en 0. Para la propiedad densidad (Fig. 1 a, b y c), en general el incremento de la temperatura y del tamaño inicial contribuyen a una menor densidad, mientras que el incremento en el porcentaje de aceite presenta una tendencia que varía principalmente de acuerdo a la interacción con el diámetro inicial. Para la absorción de agua (Fig. 1 d, e y f), se observa que la mayor absorción se obtendría a menores temperaturas y mayores porcentajes de aceite y valores de diámetro inicial.

Optimización

A partir de la función deseabilidad [12] fue posible determinar los valores de los factores experimentales (T, A y d), para alcanzar la optimización simultánea de las dos propiedades medidas (D y W). Esta función adquiere valores entre 0 y 1 a medida que la respuesta se acerca al valor deseado. Para los valores deseados de densidad entre 1,00-1,10 g/cm³ y absorción de agua del 9,0 % mencionados anteriormente, los resultados de la optimización se observan en la Tabla 3. Para estos valores, la función deseabilidad alcanzó su máximo valor y el punto óptimo de los factores se encuentra dentro del dominio de la esfera del diseño ($T_2 + A_2 + d_2 \leq 1$). El punto óptimo obtenido no coincide con ninguno de los puntos del diseño, valiendo también como punto de verificación del diseño. Se observa un error relativo bajo entre el valor predicho y experimental para la densidad y un error relativo mayor para la absorción de agua, lo cual puede deberse al mayor desvío que presenta esta propiedad en los resultados experimentales (ver Tabla 1). El diámetro final promedio de los agregados livianos obtenidos es de $8,6 \pm 0,4$ mm.

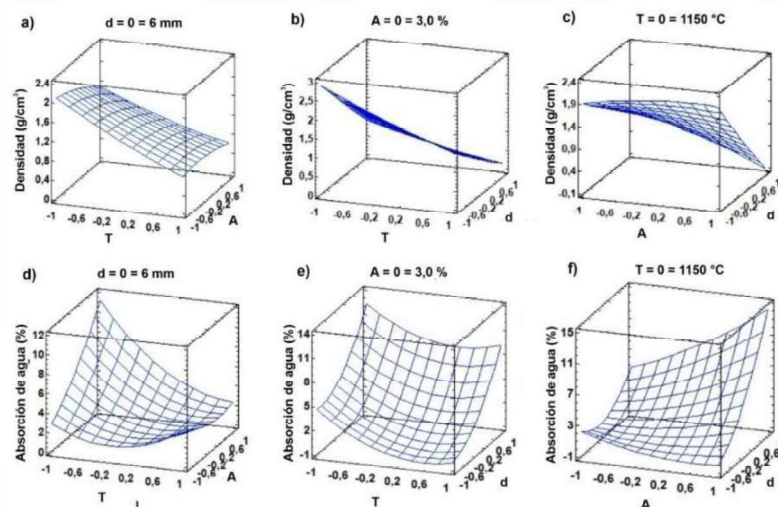
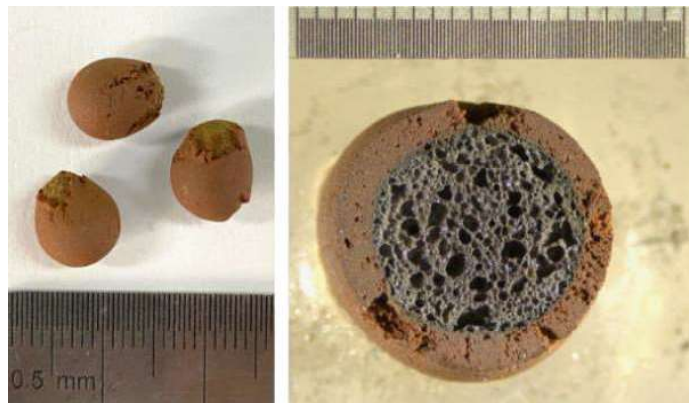


Figura 1. Superficies de respuesta (a) densidad a tamaño 6 mm, (b) densidad a porcentaje de aceite 3,0 %, (c) densidad a temperatura 1150 °C, (d) absorción de agua a tamaño 6 mm, (e) absorción de agua a porcentaje de aceite 3,0 %, (f) absorción de agua a temperatura 1150 °C.

Tabla 3. Resultados de la optimización de las propiedades densidad de partícula (D) y absorción de agua (W).

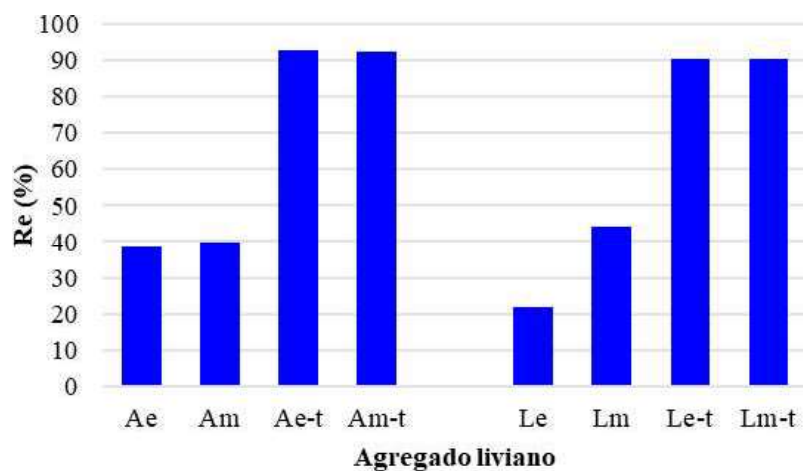
Optimización				Respuesta			
T (°C)	A (%)	d (mm)	Deseabilidad	Propiedad	Valor predicho	Valor experimental	Error relativo
-0,700 (1115 °C)	0,326 (3,75 %)	0,520 (7,3 mm)	1,0	D	1,0-1,1 g/cm ³	1,05 g/cm ³	< 0,5 %
				W	9,0 %	9,9 %	10,0 %

La estructura porosa de un corte del agregado liviano óptimo en lupa se observa en la Fig. 2. Se diferencia un interior color negro de mayor porosidad y una corteza rojiza de menor porosidad. Se observa una porosidad jerárquica, es decir, que los poros de menor tamaño están interconectados con los de mayor tamaño, propiedad que potencia el desempeño de este material como adsorbente. Debido a la expansión de los agregados durante el sinterizado, se forman grietas en la superficie y pierden ligeramente la esfericidad inicial.

**Figura 2.** Imagen de los agregados livianos óptimos y de un corte en lupa.

Adsorción

La Fig. 3 muestra el porcentaje de remoción (Re) de Rojo Congo para los distintos agregados. El agregado liviano óptimo entero (A_e) removió mayor cantidad de Rojo Congo de la solución que el agregado entero comercial (L_e). Para ambos agregados, la molienda (A_m y L_m) mejoró levemente la capacidad de remoción. Finalmente, el tratamiento de los agregados enteros y molidos con solución de MgCl₂ (A_{e-t}, A_{m-t}, L_{e-t} y L_{m-t}) mejora notablemente la capacidad de remoción, con valores superiores al 90 %. Para ambos agregados livianos, óptimo experimental y comercial, la molienda previa al tratamiento no influye en la capacidad de remoción. Por lo anterior se concluye que no resulta necesaria la molienda de los agregados previo al tratamiento con MgCl₂.

**Figura 3.** Resultados porcentaje de remoción (Re) de Rojo Congo para los distintos agregados.

CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos, se concluye que es posible sinterizar agregados livianos utilizando una lutita de destape de cantera y aceite residual como agente formador de poros. La utilización de un diseño de experimentos Doehlert de tres factores y un modelado de superficie de respuesta permitió modelar matemáticamente y determinar la temperatura del tratamiento térmico, porcentaje de adición de aceite residual y tamaño inicial de las esferas que optimicen las propiedades deseadas para el agregado. Fue posible obtener densidades entre 1,0 y 1,1 g/cm³ y absorción de agua del 9,9 % utilizando un porcentaje de aceite de 3,75 %, un tamaño de esferas de 7,3 mm y una temperatura de sinterizado de 1115 °C.

El agregado liviano óptimo entero removió mayor cantidad de Rojo Congo de la solución que el agregado entero comercial y la molienda mejoró levemente la capacidad de remoción para ambos agregados. Sin embargo, el tratamiento de los agregados enteros y molidos con solución de MgCl₂ representó una notable mejora de la capacidad de remoción, con valores superiores al 90 %. La molienda previa al tratamiento no mejora la capacidad de remoción, por lo que no resulta necesaria previo al tratamiento con MgCl₂. Lo anterior es de importancia tecnológica en cuanto a que evita la etapa de molienda en el procesamiento del adsorbente y a su vez se facilita el proceso de remediación de efluentes líquidos a mayor escala, al simplificar la separación adsorbente-efluente tratado por ser un agregado de diámetro aproximado de 8,6 mm.

REFERENCIAS

- [1] Cobo-Ceacero, C.J., (2023), Cotes-Palomino, T. (2023). Effect of the addition of organic wastes (cork powder, nut shell, coffee grounds and paper sludge) in clays to obtain expanded lightweight aggregates. *Cerám. y Vidrio* 62, 88-105. doi:10.1016/j.bsecv.2022.02.007.
- [2] Ayati, B., Ferrándiz-Mas, V., Newport, D., Cheeseman, C. (2018). Use of clay in the manufacture of lightweight aggregate. *Construction and Building Materials* 162, 124-131. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.12.018
- [3] Bernhardt, M., Justnes, H., Tellesbo, H., Wiik, K. (2014). The effect of additives on the properties of lightweight aggregates produced from clay. *Cement and Conc. Composites* 53, 233–238. doi:10.1016/j.cemconcomp.2014.07.005
- [4] Piszcz-Karaś, K., Klein, M., Hupka, J., Luczak, J. (2019). Utilization of shale cuttings in production of lightweight aggregates. *Journal of Environmental Management* 231, 232-240. doi:10.1016/j.jenvman.2018.09.101
- [5] Burbano-Garcia, C., Hurtado, A., Silva, Y.F., Delvasto, S., Araya-Letelier, G. (2021). Utilization of waste engine oil for expanded clay aggregate production and assessment of its influence on lightweight concrete properties. *Constr. and Build. Materials* 273, 121677. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.121677
- [6] Doehlert, D.H. (1970). Uniform Shell Designs. *Applied Statistics* 19, 231. doi:10.2307/2346327
- [7] Cerqueira, U.M.F.M., Bezerra, M.A., Ferreira, S.L.C., Araújo, R., da Silva, B.N., Novaes, C.G. (2021). Doehlert design in the optimization of procedures aiming food analysis - A review. *Food Chemistry* 364, 130429. doi:10.1016/j.foodchem.2021.130429
- [8] Zheng, Y., Cheng, B., Fan, J., Yu, J., Ho, W., 2021. Review on nickel-based adsorption materials for Congo red. *Journal of Hazardous Materials* 403, 123559. doi:10.1016/j.jhazmat.2020.123559
- [9] Kalhori, E.M., Yetilmezsoy, K., Uygur, N., Zarrabi, M., Shmeis, R.M.A. (2013). Modeling of adsorption of toxic chromium on natural and surface modified lightweight expanded clay aggregate (LECA). *Applied Surface Science* 287, 428-442. doi:10.1016/j.apsusc.2013.09.175
- [10] Martinefsky C., Mocciaro A., Irassar F., Tironi A. (2024). Agregados livianos a partir de lutita y aserrín. *Revista Hormigón*, 65, 5-14. <http://id.caicyt.gov.ar/ark:/s27189058/0zar7twr8>
- [11] Araujo, P., Janagap, S. (2012). Doehlert uniform shell designs and chromatography. *Journal of Chromatography B* 910, 14-21. doi:10.1016/j.jchromb.2012.05.019
- [12] Vera Candioti, L., De Zan, M.M., Cámara, M.S., Goicoechea, H.C. (2014). Experimental design and multiple response optimization. Using the desirability function in analytical methods development. *Talanta* 124, 123-138. doi: 10.1016/j.talanta.2014.01.034

Evaluación de la deformación permanente de mezclas templadas con emulsión asfáltica

Luis Zorzutti¹

Director: Fernando Martinez¹

(1) Facultad de Ingeniería, CIFICEN (CONICET, CICPBA, UNCPBA), Av del Valle 5737, 7400 Olavarría, Argentina.

(2) Universidad Nacional de Rosario, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras, Laboratorio Vial, Riobamba 250 bis, Rosario, Santa Fe.

* e-mail: zorzutti@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN

Las Mezclas Templadas son una clase de mezclas asfálticas que se fabrican a temperaturas inferiores a la de evaporación del agua, utilizando como ligante una emulsión asfáltica. Estas mezclas se consideran una alternativa sostenible, ya que ofrecen beneficios significativos en términos ambientales debido a su eficiencia energética en comparación con el método convencional, y sus características mecánicas son comparables a las de las mezclas en caliente. El presente estudio analiza el comportamiento de este tipo de mezcla frente a uno de los mecanismos de falla más relevantes en este tipo de materiales: la deformación permanente o ahuellamiento.

Palabras clave: Deformación permanente; Emulsión asfáltica, Materiales.

ABSTRACT

Warm Mixes are a class of asphalt mixtures manufactured at temperatures below the evaporation point of water, using an asphalt emulsion as a binder. These mixtures are considered a sustainable alternative, as they offer significant environmental benefits due to their energy efficiency compared to conventional methods, and their mechanical characteristics are comparable to those of hot mixes. This study analyzes the behavior of this type of mixture under one of the most significant failure mechanisms in this type of material: permanent deformation.

Keywords: Permanent deformation, Asphalt emulsion, Materials.

INTRODUCCIÓN

La sostenibilidad en la construcción y mantenimiento de rutas se enfoca en el uso eficiente de materiales reciclados, la reducción de residuos, el menor consumo de recursos naturales, la optimización energética y la disminución de emisiones contaminantes, buscando al mismo tiempo maximizar la vida útil del paquete estructural con los materiales empleados. En este ámbito, las mezclas asfálticas se clasifican principalmente en dos tipos: mezclas asfálticas en caliente (MAC) y mezclas asfálticas en frío (MAF). Las MAC, las más utilizadas mundialmente, requieren para su elaboración alcanzar temperaturas a más de 150°C, esto garantiza un excelente desempeño estructural, pero conlleva alto consumo energético y emisiones contaminantes aumentando la huella de carbono. Por el contrario, las MAF se elaboran a temperatura ambiente generalmente con emulsiones asfálticas, ofreciendo ventajas ambientales frente a su contraparte en caliente, pero con menor rendimiento estructural a mediano y corto plazo.

Como alternativa han surgido las Mezclas Templadas con Emulsión (MTE), fabricadas a temperaturas inferiores a 100°C. Estas combinan aspectos sostenibles de las MAF pero con un mejor desempeño mecánico, siendo actualmente implementadas con éxito en España y Portugal. Aunque no existen normas que las reglamenten a nivel nacional en Argentina para su diseño, únicamente una mención en la guía de buenas prácticas [1] donde se resalta la importancia de este tipo de material y su novedad en la implementación de rutas como así también su importancia ambiental, si se han desarrollado guías técnicas en Europa como las de la Junta de Andalucía [2], la Asociación Técnica de Emulsión Bituminosa [3] y el Gobierno Vasco [4].

Estudios previos han profundizado en la investigación de estas mezclas y su comportamiento analizaron sus propiedades viscoelásticas [5], mientras que trabajos posteriores como los de Martínez et al. [6] y Autelitano et al. [7], evaluaron su comportamiento mecánico al incorporar material reciclado (RAP), examinando variables clave para su mejor trabajo.

En el presente trabajo se busca analizar el comportamiento de las MTE frente a uno de los principales modos de falla de las mezclas asfálticas como es el ahuellamiento o deformación permanente, para ello se procede a trabajar con técnicas específicas de elaboración de las mezclas, probetas y una serie de ensayos de laboratorio que permiten determinar su comportamiento frente a este fenómeno.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de este trabajo se analiza una mezcla templada con emulsión (MTE) elaborada a partir de la base de un concreto asfáltico en caliente (MAC) diseñado mediante el método Marshall. Este diseño cumple con las características del pliego de especificaciones técnicas generales para concretos asfálticos en caliente y semicaliente de la Dirección de Vialidad de Argentina - DNV [8], correspondiente a mezclas densas. La mezcla en estudio también se ajusta a los entornos granulométricos requeridos para mezclas convencionales.

La MTE se desarrolló mediante la sustitución directa del contenido de cemento asfáltico CA30 presente en la MAC por su equivalente en ligante residual de la emulsión utilizada, manteniendo inalterada la composición original de la mezcla.

En el caso de la MAC, los agregados y el ligante se combinaron mediante un mezclador mecánico. Posteriormente, la mezcla sin compactar se extendió uniformemente en una bandeja plana y se introdujo en un horno a temperatura de compactación durante media hora.

Se adoptó un método similar al utilizado en las MAF según Ling y Bahía [9], con la diferencia característica del precalentamiento de los agregados. Para la MTE, los agregados se calentaron entre 95°C y 100°C y la emulsión a 60°C antes del mezclado en un baño de agua térmico. Una vez preparada, la mezcla se mantuvo en un horno a 80°C y 90°C durante 30 minutos, replicando así las condiciones reales de transporte y colocación.

Para ambos tipos de mezcla, se utilizó un compactador giratorio para fabricar probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro y altura. Estas probetas fueron aserradas transversalmente con un disco diamantado obteniendo muestras con espesores entre 60 y 63 mm como se observa en la figura 1. Se informa a modo de resumen en la tabla 1 las propiedades volumétricas principales de ambas mezclas en promedio



Figura 1 Secuencia de obtención de probetas para ensayos.

Tabla 1. Propiedades volumétricas promedio de las mezclas.

Mezcla	Da (g/cm ³)	Dtm (g/cm ³)	Va (%)	Vb (%)	VAM (%)	RBV (%)
MAC	2,505	2,631	4,8	12,0	16,8	71,5
MTE	2,487	2,618	5,0	11,9	17,0	70,5

Referencias:

Da: Densidad aparente (g/cm³)

Dtm: Densidad teórica máxima (g/cm³)

Va: Vacíos de aire de la mezcla (%)

Vb: Contenido volumétrico de ligante (%)

VAM: Vacíos de agregado mineral (%)

RBV: Relación betún vacíos (%)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El primero de los ensayos elegidos para la evaluación de las mezclas es el IDEAL-RT es un método de ensayo reciente diseñado para evaluar la resistencia al corte de mezclas asfálticas. A diferencia del ensayo tradicional de tracción indirecta (RTI), este método emplea un cabezal inferior en forma de U (figura 2.a) y se aplica una carga constante con una velocidad de 50 mm/min, la mezcla ensayada se acondiciona previamente a 50 °C, generando una curva carga-desplazamiento característica. Esta configuración produce un estado de tensiones de corte distinto al del RTI, y se valida mediante modelos de Elementos Finitos (figura 2.b).

Se calcula el parámetro RTindex para evaluar el desempeño de la mezcla frente a la falla por ahuellamiento a través de las ecuaciones (1 y 2):

$$RT_{index} = 0.0665 \times \tau \quad (1)$$

Donde τ : tensión de corte (kPa).

La tensión de corte τ se calcula como:

$$\tau = 0.356 \times \frac{P_{max}}{t \cdot w} \quad (2)$$

Donde:

Pmax: carga máxima (kN); t: espesor de la probeta (m); w: ancho del cabezal superior de carga (0,0191 m).

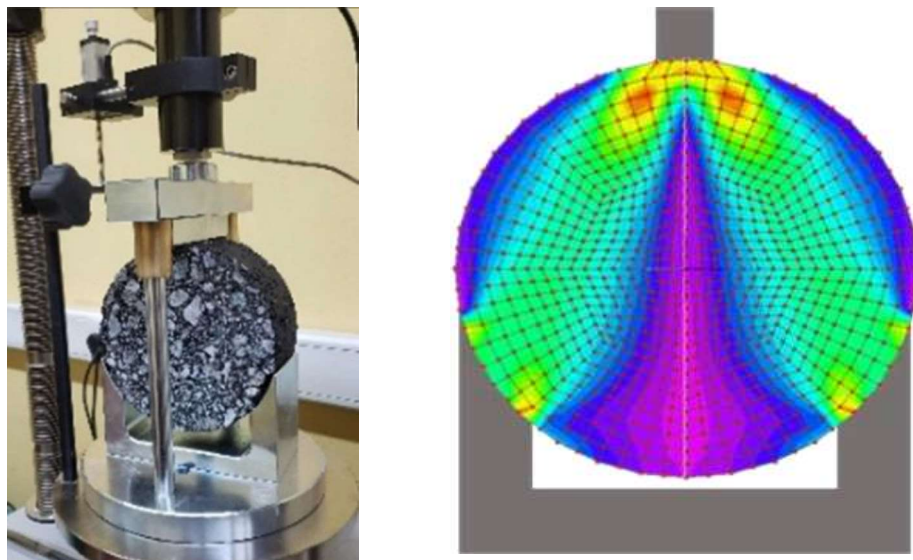


Figura 2 (a) Dispositivo de ensayo; (b) simulación tensiones de corte.

El ensayo se encuentra normalizado por ASTM como D8360-22 - *Standard Test Method for Determination of Rutting Tolerance Index of Asphalt Mixture Using the Ideal Rutting Test*.

Varios investigadores han evaluado esta configuración, estableciendo umbrales mínimos según su experiencia para determinar mediante este índice que mezclas se comporta en forma correcta al ahuellamiento. En particular, Vamsikrishna y Singh [10] propusieron correlacionando con los resultados del ensayo de Hamburgo una resistencia al corte τ mayor a 1000 kPa ($RT_{index} > 66$) para una buena resistencia al ahuellamiento de la mezcla asfáltica. En igual sentido, Zhou et al. [11] proponen un valor mínimo de la resistencia al corte τ igual a 980 kPa ($RT_{index} > 65$) en tanto que Boz et al. [12] proponen un valor de τ mayor a 850 kPa ($RT_{index} > 55$). En resumen RT_{index} resulta un índice válido para determinar el comportamiento al ahuellamiento de mezclas asfálticas, y por lo tanto es el que se utiliza junto con la tensión de corte para valorar las mezclas analizadas MAC y MTE si este índice resulta mayor representa una tendencia a un mejor comportamiento frente al ahuellamiento. A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los ensayos realizados a las mezclas MAC y MTE (figuras 3 y 4).

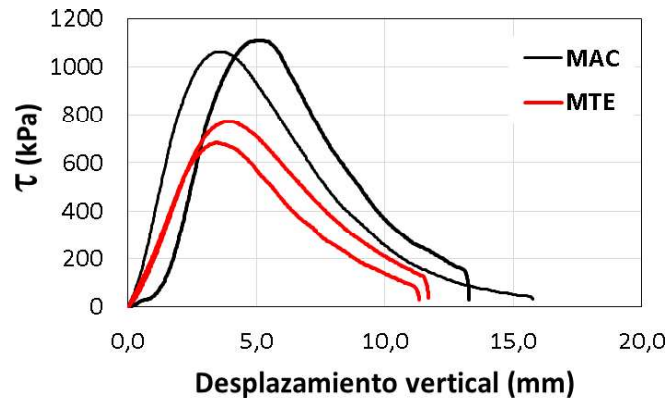


Figura 3. Curva τ -d del ensayo IDEAL-RT

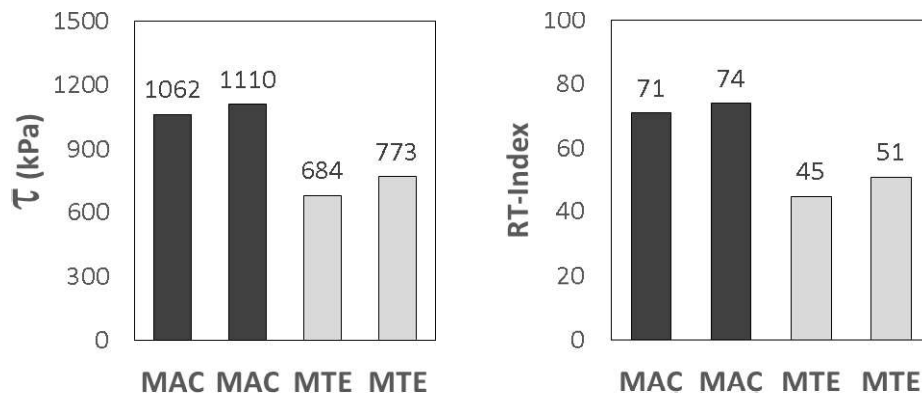


Figura 4. (a) Dispositivo de ensayo; (b) simulación tensiones de corte.

El siguiente ensayo que se utiliza para evaluar el comportamiento de las mezclas frente a la acción de la deformación permanente es el ensayo RTI-HT, el mismo consiste en la misma metodología de un ensayo de tracción indirecta por compresión diametral, pero con la salvedad que las mezclas se calientan a una temperatura de 50 °C la velocidad de aplicación de la carga es de 50 mm/min constante hasta la falla como se observa en la figura 5.



Figura 5. Dispositivo de ensayo.

Algunos investigadores como Christensen y Bonaquist [13] demostraron en algunos tramos de prueba que existe una buena correlación entre la tensión máxima del ensayo y la huella medida en los mismos. Otros estudios realizados por Vamsikrishna y Singh [10] comparando resultados del ensayo de Hamburgo y la Resistencia a la Tracción Indirecta a alta temperatura han propuesto un valor umbral crítico de RTI-HT de 135 kPa para la aprobación de las mezclas asfálticas.

La Resistencia a la Tracción Indirecta a alta temperatura RTI-HT se calcula mediante la ecuación (3):

$$RTI - HT = \frac{2 \cdot P_{max}}{\pi \cdot D \cdot t} \quad (3)$$

Donde: Pmax es la carga máxima (kN); t es el espesor de la probeta (m); D es el diámetro de la probeta (m). A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los ensayos realizados a las mezclas MAC y MTE (figura 6).

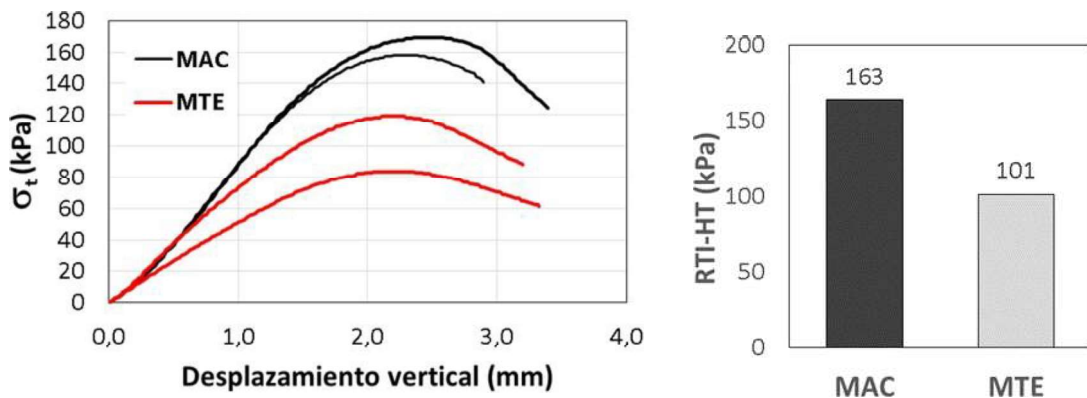


Figura 6. (a) Curva σ -d del ensayo RTI-HT; (b) resultados RTI-HT.



Figura 7. Apariencia de las mezclas asfálticas ensayadas.

CONCLUSIONES

Se obtuvieron resultados que confirman las expectativas iniciales a partir de los ensayos realizados: las mezclas asfálticas en caliente (MAC) demostraron un comportamiento adecuado, superando los umbrales mínimos establecidos en la bibliografía consultada. Por otro lado, las mezclas templadas con emulsión (MTE), si bien alcanzaron valores aceptables, no lograron cumplir con los requisitos mínimos necesarios para equipararse al desempeño de las MAC producidas mediante el método convencional de elaboración y compactación.

No se puede establecer que las mezclas MTE se comportarán de forma correcta frente al ahuellamiento y demás posibles formas de falla, se debe continuar investigando con otros tipos de emulsiones que puedan

mejorar el desempeño de las MTE, así como de evaluar estas mezclas mediante los ensayos específicos establecidos en el Pliego de especificaciones técnicas de Vialidad Nacional 2017 de, particularmente el ensayo de rueda cargada, que resulta fundamental para caracterizar su resistencia a la deformación permanente bajo cargas repetidas y a una temperatura de 60°C.

Se deberá profundizar el análisis con mayor cantidad de probetas elaboradas con distintos porcentajes de emulsión para valorar la influencia de la cantidad de ligante residual en las mezclas MTE y su incidencia en la deformación permanente.

REFERENCIAS

- [1] Vialidad Nacional. (2019). Guía de buenas prácticas para el control de calidad de mezclas asfálticas y aplicaciones bituminosas. Capítulo 11: Mezclas Asfálticas No Convencionales. https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/guia_de_buenas_practicas.pdf.
- [2] Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía. (2012). Recomendaciones para la redacción de: pliegos de especificaciones técnicas para el uso de mezclas bituminosas a bajas temperaturas.
- [3] Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas (ATEB). (2014). Mezclas templadas con emulsión bituminosa. Monografía.
- [4] Administración de la Comunidad Autónoma del País Vasco. (2022). Norma para el dimensionamiento de firmes de la red de carreteras del País Vasco
- [5] Martínez, F., Cauhapé Casaux, M., Zorzutti, L. y Angelone, S. (2019). Determinación de las propiedades visco-elásticas de una mezcla templada con emulsión asfáltica. XX Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto, Guadalajara (México).
- [6] Martínez, F., Cauhapé Casaux, M., Andreoni, S., Zorzutti, L. y Angelone, S. (2022). Caracterización del comportamiento de mezclas templadas con emulsión y RAP. XXI Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto, Punta del Este (Uruguay).
- [7] Autelitano, F. Garilli, E. and Giuliani, F. (2021). Half-warm mix asphalt with emulsion. An experimental study on workability and mechanical performances. 14th International scientific conference on sustainable, modern and safe transport. *Transportation Research Procedia* 55, 1081–1089.
- [8] Dirección Nacional de Vialidad de Argentina. Pliego de especificaciones técnicas generales para concretos asfálticos en caliente y semicaliente del tipo densos. Edición 2017. https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/petg_1.pdf.
- [9] Ling, C., y Bahia, H. U. (2018). Development of a volumetric mix design protocol for dense-graded cold mix asphalt. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*. <https://doi.org/10.1061/JPEODX.0000071>.
- [10] Vamsikrishna, G. and Singh, D. (2023) Comparison of Rutting Resistance of Plant Produced Asphalt Mixes Using Hamburg Wheel Tracker and Surrogate Simple Performance Tests: IDEAL-RT and HT-IDT. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Volume 35, Issue 12.
- [11] Zhou, F., Hu, S. and Newcomb, D. (2020). Development of a performance-related framework for production quality control with ideal cracking and rutting tests. *Construction and Building Materials* 261, 120549.
- [12] Boz, I., Coffey, G. P., Habbouche, J., Diefenderfer, S. D. and Ozbulut, O. E. (2022). A critical review of monotonic loading tests to evaluate rutting potential of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials* 335, 127484.
- [13] Christensen, D., and Bonaquist, R. (2007). Using the Indirect Tensile Test to Evaluate Rut Resistance in Developing Hot-Mix Asphalt Designs. *Transportation Research Circular Number E-C124*, Transportation Research Board, National Academies, Washington, D.C., p. 62 – 77.

Valorización sostenible de palas eólicas: desempeño de sus residuos en mezclas cementicias

Joaquín Arauz Legnazzi¹, María Pía Di Nanno²

Directores: Silvina Vanessa Zito¹, Manuela Barisoni²

(1) Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.

(2) Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Chubut, Argentina.

* e-mail: joaquinlegnazzi@gmail.com

RESUMEN

El trabajo analiza la viabilidad del aprovechamiento de residuos de palas de aerogeneradores (R.P.A.) en la construcción, enfocándose en tres posibles aplicaciones: como material cementicio suplementario, como reemplazo parcial del agregado fino y como fibra de refuerzo en mezclas cementicias. La investigación busca contribuir a la sostenibilidad mediante la valorización de residuos industriales, reduciendo el impacto ambiental y promoviendo un enfoque basado en los principios de la economía circular. Se propone caracterizar integralmente el material reciclado y evaluar su desempeño físico, mecánico y su durabilidad en morteros y hormigones. Esta aproximación permite optimizar su aprovechamiento según sus propiedades específicas y fomentar su incorporación en prácticas constructivas sostenibles.

Palabras clave: Residuos de palas eólicas; Economía circular; Reciclaje; Sostenibilidad; Hormigón.

ABSTRACT

This study evaluates the feasibility of recycling waste material from wind turbine blades for construction projects, focusing on three specific uses: as supplementary cementitious material, as partial replacement of fine aggregate, and as reinforcing fibers in cement-based mixtures. This research aims to make a contribution to sustainability by reutilizing industrial waste, reducing environmental impact and promoting an approach based on the principles of the circular economy. We provided a comprehensive characterization of the recycled material, its physical, mechanical, and durability performance in mortars and concrete. This approach allows for the optimized use of the material based on its specific properties and encourages its incorporation into sustainable construction practices.

Keywords: Wind turbine blade waste; Circular economy; Recycling; Sustainability; Concrete.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la demanda de energía a nivel mundial ha impulsado la búsqueda de fuentes renovables más sostenibles. Entre ellas, la energía eólica ha adquirido un papel central; sin embargo, su desarrollo también conlleva desafíos ambientales, entre los que destaca la gestión de residuos derivados de aerogeneradores en desuso. En particular, las palas de aerogeneradores, con una vida útil de entre 20 y 25 años, plantean un desafío significativo debido a que están fabricadas con materiales complejos y de difícil reciclaje, lo que representa una problemática creciente en términos de sostenibilidad [1]. Estas palas se constituyen principalmente por fibras de vidrio, y en algunos casos fibra de carbono, embebidas en resinas epoxi o poliéster, materiales que combinan ligereza y resistencia. A ello se suman núcleos de espuma de PVC o madera balsa, adhesivos estructurales y recubrimientos de poliuretano, que aportan rigidez y protección superficial. Esta heterogeneidad en su composición es lo que complica su reciclaje, impulsando la búsqueda de alternativas como la valorización energética, el coprocesamiento o su reutilización en nuevos productos.

En el marco de una investigación propia, se relevó parque por parque y la cantidad de aerogeneradores instalados en Argentina, identificando un total aproximado de 1989 aerogeneradores distribuidos en 91 parques eólicos. Las provincias de Buenos Aires (569), Chubut (455) y Santa Cruz (291) concentran la mayoría, por lo que enfrentarán mayores volúmenes de residuos en el futuro. Se estima que hacia 2035 habrá 379 aerogeneradores en desuso, y más de 1300 acumulados para 2051, lo que exige desarrollar desde ahora soluciones sostenibles para su tratamiento.

Una de las más prometedoras es su incorporación en materiales cementicios, como agregado o materia prima, ya que contienen sílice, alúmina y cal, reduciendo el consumo de materias vírgenes y la huella ambiental del hormigón. Distintos autores [2,3] evaluaron aplicaciones similares. El interés se potencia por el alto impacto

ambiental del cemento, industria responsable de gran parte de las emisiones globales de CO₂, asociadas a la descomposición de materias primas como la caliza y al uso de combustibles fósiles [4].

Este trabajo se centra en caracterizar el residuo de palas de aerogeneradores fuera de servicio y evaluar su viabilidad como material cementicio suplementario, reemplazo parcial del agregado fino y como fibra de refuerzo en mezclas cementicias, con el objetivo de optimizar su aprovechamiento según sus propiedades físico-químicas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Trituración del R.P.A. y caracterización del R.P.A. triturado

El proceso comenzó con el corte de una fracción de una pala de aerogenerador fuera de servicio, utilizando una amoladora para obtener fragmentos de aproximadamente 5 a 7 cm con forma prismática. Luego, el material fue triturado en un molino de martillos de alimentación y descarga continua. Posteriormente, se tamizó con una malla de 3/8" (9,5 mm), y las partículas retenidas fueron reprocesadas en el molino hasta que todo el material logró pasar por el tamiz. Se llevó a cabo una clasificación por tamaño del R.P.A. utilizando una serie de tamices con aberturas normalizadas y con el objetivo de evaluar la distribución de tamaños de fracciones. En la tabla 1 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 1. Retención parcial y acumulada en los tamices seleccionados del R.P.A. triturado.

Número tamiz	Abertura tamiz [mm]	% Retenido parcial	% Retenido acumulado
4	4,75	36,46	36,46
8	2,36	11,59	48,05
16	1,18	18,50	66,55
30	0,60	13,11	79,7
50	0,30	8,41	88,1
100	0,15	4,26	92,3

Se midieron el largo y grosor del R.P.A. triturado en las fracciones 3/8"-4, 4-8 y 8-16, obteniéndose valores promedio de 42 mm y 2,5 mm, 36 mm y 1,5 mm, y 21 mm y 1 mm, respectivamente. Las fracciones más finas no se midieron por su tamaño reducido.

La determinación de la densidad se llevó a cabo mediante el método del picnómetro, aplicando el procedimiento usado en la bibliografía consultada [2] y siguiendo la norma IRAM 1520 [5]. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Densidad por fracciones y muestra completa.

Fracción	Densidad [g/cm ³]
16-30	1,81
30-50	1,10
PT N° 50	2,38
Muestra completa	1,69

La composición química de la muestra total de R.P.A. triturado se determinó mediante fluorescencia de rayos X (FRX, en laboratorio externo), y los resultados se presentan en la tabla 3. En la misma se puede observar cómo componentes mayoritarios SiO₂ y Al₂O₃ (> 44.47%).

Tabla 3. Composición química de la pala del aerogenerador.

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	MnO	BaO	SrO	P ₂ O ₅	PPC
14,25	36,00	8,47	1,64	1,56	0,30	0,43	0,08	0,02	0,01	0,02	0,02	36,40

La actividad puzolánica de distintas fracciones de R.P.A. (16-30, 30-50 y PT N°50) se avaluó mediante el ensayo de Frattini siguiendo la norma IRAM 1651 [6] a la edad de 28 días. Este método se basa en comparar los puntos obtenidos del ensayo con la curva que corresponde a la isoterma de solubilidad del hidróxido de calcio (CH) a 40 °C. Cuando los puntos se ubican por debajo de dicha curva se evidencia consumo de CH y, por lo tanto, presencia de actividad puzolánica; mientras que, si los puntos se encuentran por encima, se interpreta ausencia de dicha actividad. Cada mezcla se preparó con 15 g de cemento CPN según IRAM 50000 [7], y 5 g de cada fracción. La fracción PT N°50 (P25-0) mostró una alta reactividad puzolánica, la fracción 16-30 y 30-50 presentaron una actividad moderada. Finalmente, el cemento, como es de esperar, no presentó actividad puzolánica. Los resultados se presentan en la figura 1.

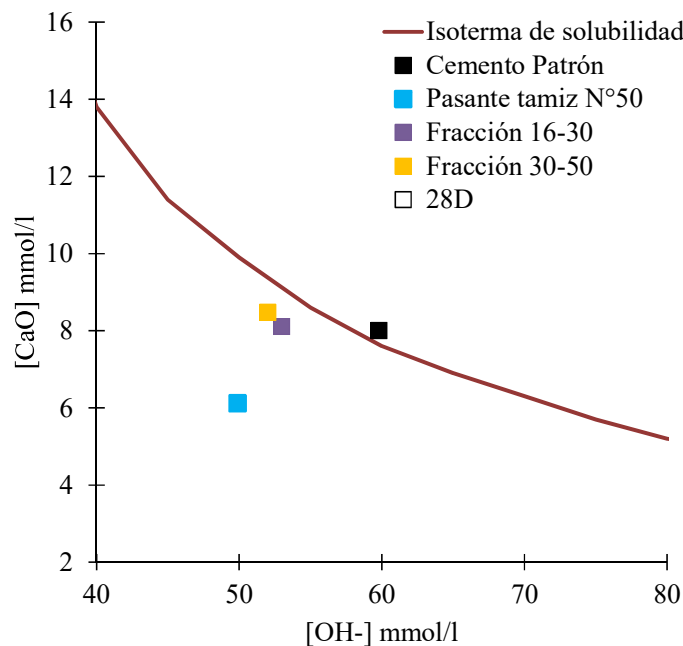


Figura 1. Actividad puzolánica a los 28 días.

Metodología

Para la elaboración de las diferentes mezclas cementicias (morteros y hormigones) se empleó un cemento portland puzolánico (CPP) según IRAM 50000. El mismo tiene una densidad de 2,92 g/cm³ y una superficie específica Blaine de 401 m²/kg.

Primeramente, se evaluó el R.P.A. triturado como adición al cemento. Se preparó una muestra Patrón (sin reemplazo) y otra con 25% de sustitución de cemento CPP por la fracción pasante del tamiz N°50 (P 25-0), que mostró mejor comportamiento puzolánico. La mezcla fue ensayada en fluidez según IRAM 1570 [8] y resistencia a compresión a 7 y 28 días según IRAM 1622 [9].

También, se evaluó el uso de R.P.A. triturado como reemplazo parcial del agregado fino en morteros, mediante la sustitución en volumen del 5%, 10% y 15% del total de arena por la fracción granulométrica 16-50, en los morteros denominados VF 5, VF 10 y VF 15, respectivamente. A estas mezclas se les incorporó un aditivo superplastificante en proporciones de 0,4% (1,8 g), 0,7% (3,14 g) y 1,0% (4,4 g) en relación al contenido de cemento (450 g). Las variantes fueron evaluadas mediante ensayos de fluidez [8], resistencia a compresión hasta 90 días y resistencia a flexión hasta 56 días [9].

Finalmente, se elaboró en laboratorio un hormigón con incorporación de la muestra completa del R.P.A. triturado como fibras (ver tabla 4), utilizando fracciones con sus respectivas medidas y porcentajes determinados en la caracterización previa, evaluando así su comportamiento global. Se utilizó un 1,5% en volumen de fibra por m³ (F 1,5%), proporción seleccionada en base a un estudio previo que evidencia buen desempeño sin comprometer las propiedades mecánicas ni la trabajabilidad [3]. También se preparó un hormigón de referencia sin fibras (Patrón). Para mantener la consistencia plástica, el hormigón con fibras requirió aumentar la dosis de aditivo, en comparación con el patrón, del 5% al 8,1% del peso del cemento

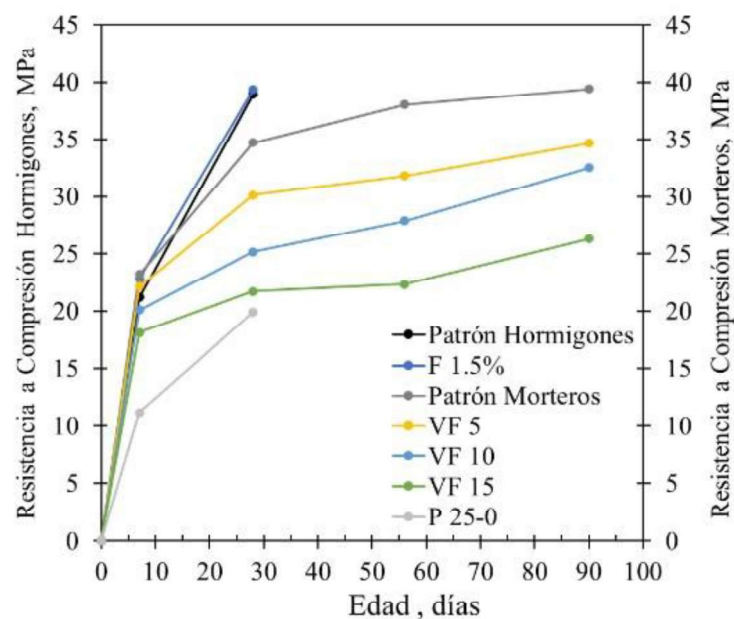
Tabla 4. Proporciones de los materiales utilizados para los hormigones en laboratorio.

Materiales	Peso Patrón [kg]	Volumen Patrón [L]	Peso con 1.5% fibras [kg]	Volumen con fibras [L]
Cemento CPP ARS	360,00	124,57	354,60	122,70
Agua	180,00	180,00	177,30	177,30
Piedra 6-20	980,00	365,87	965,30	360,38
Arena 0-6	584,63	216,70	575,86	213,45
Arena silícea	232,13	92,87	228,65	91,48
Fibra		0,00	25,43	15,00
Aire		20,00		19,70
Totales	2336,76	1000,00	2327,13	1000,00

En estado fresco, se midió la consistencia con el cono de Abrams (IRAM 1536) [10] y la fluidez con la mesa de Graff (IRAM 1690) [11]. Luego se moldearon probetas cilíndricas (10 × 20 cm) y vigas prismáticas (7,5 × 9 cm), compactando en dos capas. Tras 24 h en laboratorio, se curaron en agua saturada con cal a 23 ± 2 °C. Se evaluaron propiedades mecánicas como resistencia a compresión, tracción, flexión y módulo de elasticidad a distintas edades (7 y 28 días), siguiendo las nomas IRAM 1546 [12], 1658 [13], 1547 [14] y 1865 [15], respectivamente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La incorporación de R.P.A. como adición redujo la fluidez del mortero al 77,8 %, frente al 100 % del Patrón. Según Oliveira et al. [16], esto se debe a la menor densidad y mayor área superficial del R.P.A., que aumentan la absorción de agua y disminuyen la trabajabilidad. En resistencia a compresión, el Patrón llegó a los 34 MPa a los 28 días, mientras que el P 25-0 alcanzó el 60 % (figura 2). Según Baturkin et al. [3] esta disminución puede relacionarse con la dilución del cemento, una mayor relación agua/cemento efectiva y a la presencia de compuestos orgánicos no reactivos que limitan la actividad puzolánica del sistema. Dado que el cemento CPP ya contiene sustitución de clínker, el agregado de R.P.A. podría comprometer aún más el desempeño incrementando ese porcentaje de reemplazo total.

**Figura 2.** Resistencia a compresión de los hormigones y de los morteros.

Como agregado fino, el R.P.A. también redujo la fluidez de los morteros en línea con lo observado por Oliveira et al. [16] y mencionado anteriormente. En compresión, todas las mezclas con R.P.A. mostraron valores inferiores al mortero Patrón, con descensos más marcados a mayor porcentaje de reemplazo (Figura 2). Este comportamiento coincide con lo reportado por Batukrin et al. [3] y Revilla et al. [2], quienes lo atribuyen al efecto de dilución del cemento y a la presencia de materiales con baja adherencia.

Por otro lado, la resistencia a flexión mostró una evolución más variable: aunque inicialmente fue menor, algunas mezclas lograron igualar o superar al Patrón (figura 3). Esto fue evidenciado por Revilla et al. [2], quienes señalan el rol del R.P.A en la mejora del comportamiento a flexión.

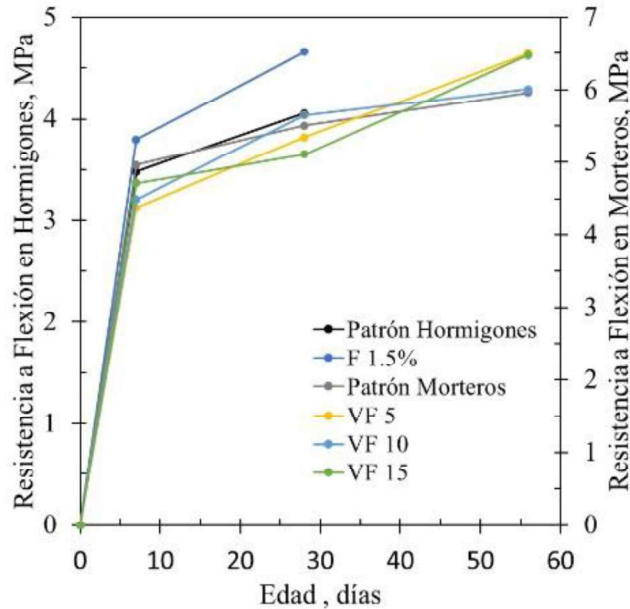


Figura 3. Resistencia a flexión de los hormigones y de los morteros.

El hormigón con R.P.A. triturado como fibra (F 1,5 %) presentó menor trabajabilidad que el Patrón, con una reducción de la fluidez (de 210 % a 137,5 %) y del asentamiento (de 6 cm a 0 cm), aunque mantuvo buena cohesión. Esta disminución se relaciona con la incorporación de fibras, que aumentan la superficie a humedecer y reducen el agua libre [17]. En estado endurecido, mostró mejoras mecánicas en comparación con el Patrón. En compresión (figura 2), su resistencia fue similar o ligeramente superior, atribuida a una mejor distribución de esfuerzos gracias a las fibras. En flexión (figura 3), también superó al Patrón, reforzando la tenacidad y resistencia al agrietamiento [3].

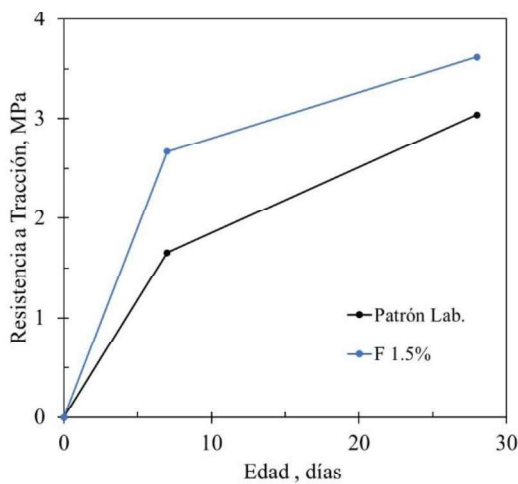


Figura 4. Resistencia a tracción de los hormigones Patrón y F 1,5%.

En tracción (figura 4), se observaron incrementos significativos a todas las edades, lo que indica una eficaz acción de puenteo que limita la apertura de fisuras [2]. En cuanto al módulo de elasticidad, fue ligeramente inferior al del Patrón (93 % a los 28 días), posiblemente por la influencia del R.P.A. y la inclusión de materiales más deformables como la madera de balsa, que reducen la rigidez del compuesto [2].

CONCLUSIONES

El R.P.A. presenta características particulares, como su baja densidad y elevada absorción de agua, que condicionan su incorporación en mezclas cementicias. Por ello, al realizar los reemplazos se recomienda expresarlos en términos de volumen equivalente y no de peso, ya que un reemplazo en base a la masa conduciría a introducir volúmenes excesivos de R.P.A., distorsionando la proporción real de los componentes de la mezcla.

En morteros, la incorporación de R.P.A. como adición parcial mostró una resistencia a compresión menor, aunque estable en el tiempo, siendo viable para aplicaciones no estructurales. En reemplazos de agregado fino en volumen, la fracción más fina presentó un mejor desempeño en compresión que la fracción más gruesa y el desempeño en resistencia a flexión mostró diferencias mucho más atenuadas, pudiendo superar al Patrón en ciertos casos y edades.

En hormigón, la inclusión de R.P.A. en bajas proporciones (1,5 %) arrojó resultados positivos. Las fibras redujeron la trabajabilidad y rigidez, pero mejoraron la cohesión. A su vez, se logra una reducción en el peso total de materiales necesarios para producir 1 m³ de hormigón y se obtienen resultados superiores en las tres sollicitaciones analizadas: compresión, tracción y flexión, sin afectar la resistencia del material. Esto optimiza el consumo de insumos, lo que puede traducirse en beneficios tanto económicos como ambientales durante la producción y transporte del hormigón.

En conclusión, la incorporación de R.P.A. en morteros y en hormigones es técnica y mecánicamente viable en bajas proporciones y bajo condiciones de control de calidad aportando a la valorización de un residuo complejo del sector eólico bajo un enfoque de economía circular. Esto abre el camino a futuras investigaciones orientadas a su reutilización sustentable.

REFERENCIAS

- [1] Endesa (2023). ¿Cuál es la Vida Útil de los Aerogeneradores? <https://www.endesa.com/es/la-cara-e/energias-renovables/repotenciacion-parques-eolicos>.
- [2] Revilla-Cuesta, V., Manso-Morato, J., Hurtado-Alonso, N., Skaf, M., & Ortega-López, V. (2024). Mechanical and environmental advantages of the revaluation of raw-crushed wind-turbine blades as a concrete component. *Journal of Cleaner Production*, 82, 108383. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.108383>.
- [3] Baturkin, D., Hissime, O. A., Masmoudi, R., Tagnit-Hamou, A., & Massicotte, L. (2021). Valorization of recycled FRP materials from wind turbine blades in concrete. *Resources, Conservation & Recycling*, 174, 105807. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105807>.
- [4] Habert, G., Miller, S. A., John, V. M., Provis, J. L., Favier, A., Horvath, A., & Scrivener, K. L. (2020). Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. *Nature Reviews Earth & Environment* volume 1, 559–573 <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3>.
- [5] IRAM 1520: Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2004). Agregados finos. Métodos de laboratorio para la determinación de la densidad real, de la densidad relativa aparente y de la absorción de agua. (Norma IRAM 1520:2004). IRAM.
- [6] IRAM 1651: Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2013). Cemento. Métodos de ensayo de actividad puzolánica (Norma IRAM 1651:2013). IRAM.
- [7] IRAM 50000: Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (201). Cementos. Cementos para uso general. Composición y requisitos (Norma IRAM 50000:2017). IRAM.
- [8] IRAM 1570: Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2013). Morteros para mampostería. Determinación de la consistencia. Método de escurrimiento (Norma IRAM 1570:2013). IRAM.
- [9] IRAM 1622: Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2013). Determinación de resistencias mecánicas (Norma IRAM 1622:2013). IRAM.
- [10] IRAM 1536: Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2013). Método de ensayo de la consistencia utilizando el tronco de cono (Norma IRAM 1536:2013). IRAM.
- [11] IRAM 1690: Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2013). Método de ensayo de la consistencia utilizando la mesa de Graf (Norma IRAM 1690:2013). IRAM.
- [12] IRAM 1546: Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2013). Método de ensayo de compresión (Norma IRAM 1546:2013). IRAM.

- [13] IRAM 1658: Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2013). Determinación de la resistencia a la tracción simple por compresión diametral (Norma IRAM 1658:2013). IRAM.
- [14] IRAM 1547: Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2013). Ensayo de tracción por flexión (Norma IRAM 1547:2013). IRAM.
- [15] IRAM 1865: Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2013). Métodos de ensayo para la determinación del módulo de elasticidad estático y de la relación de Poisson de probetas y testigos cilíndricos de hormigón sometidos a esfuerzos de compresión axial (Norma IRAM 1865:2013). IRAM.
- [16] Oliveira, P. S., Antunes, M. L. P., da Cruz, N. C., Rangel, E. C., de Azevedo, A. R. G., & Durrant, S. F. (2020). Use of waste collected from wind turbine blade production as an eco-friendly ingredient in mortars for civil construction. *Journal of Cleaner Production*, 274, 122948. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122948>
- [17] Fu, B., Liu, K. C., Chen, J. F., & Teng, J. G. (2021). Concrete reinforced with macro fibres recycled from waste GFRP. *Construction and Building Materials*, 310, 125063. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125063>.

Nitruración iónica de AISI 316L: influencia de los parámetros de proceso en el comportamiento al desgaste y a la corrosión

Ariana Mendelevich ¹

Tutora: Eugenia Laura Dalibón ¹

(1) Grupo de Ingeniería en Superficies (GIS), Facultad Regional Concepción del Uruguay, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina.

* e-mail: mendelevichari@gmail.com

RESUMEN

Los aceros inoxidable austeníticos se caracterizan por su buena resistencia a la corrosión e integridad mecánica en ambientes agresivos, debido a su elevado contenido de cromo y níquel. La nitruración iónica, como tratamiento superficial, promueve la difusión de nitrógeno y genera una capa de austenita expandida. El objetivo de este trabajo es analizar y comparar el comportamiento al desgaste y a la corrosión de distintas muestras de AISI 316L nitruradas por plasma en distintas condiciones de tiempo, temperatura y atmósfera reactiva. Los resultados muestran que el tratamiento de larga duración mejora significativamente la dureza y la resistencia al desgaste en comparación con el acero sin tratar. Por otro lado, las muestras procesadas durante menor tiempo también evidencian mejoras notables, particularmente en la resistencia a la corrosión respecto a las muestras sometidas al tratamiento más prolongado.

Palabras clave: Acero inoxidable austenítico, Nitruración iónica, Desgaste, Corrosión.

ABSTRACT

Austenitic stainless steel is characterized by good corrosion resistance and mechanical integrity in aggressive environments, due to its high chromium and nickel content. Ion nitriding, as a surface modification treatment, promotes nitrogen diffusion, resulting in an expanded austenitic phase. The aim of this work is to analyze and compare the corrosion and wear behavior of different AISI 316L samples nitrided under different time, temperature and reactive atmosphere conditions. Results show that the longer treatment significantly improves hardness and wear resistance compared to the untreated material. In contrast, samples subjected to shorter treatments also exhibit notable improvements, particularly in corrosion resistance, when compared to the sample processed for longer durations.

Keywords: Austenitic stainless steel, Ion nitriding, Wear, Corrosion.

INTRODUCCIÓN

Los aceros inoxidable austeníticos se emplean extensamente en diversas aplicaciones industriales debido a su elevada resistencia a la corrosión, atribuida a la formación de una película superficial pasiva. No obstante, su baja dureza y deficiente comportamiento tribológico pueden comprometer la vida útil de los componentes cuando están expuestos a mecanismos de desgaste severo [1].

La ingeniería de superficies de aceros inoxidable austeníticos se ha establecido como una herramienta fundamental para optimizar el comportamiento tribológico del material base, en particular su resistencia al desgaste, complementando así su integridad mecánica en ambientes corrosivos [1].

Uno de los tratamientos termoquímicos que puede utilizarse es la nitruración, enfocada en mejorar las propiedades de la superficie de metales ferrosos, como el acero, en el que por difusión de N se altera su microestructura [2].

En el caso de los aceros inoxidable austeníticos, los procesos de nitruración producen una capa de solución sólida sobresaturada metaestable, conocida como austenita expandida o fase S. Esta capa se caracteriza por tener una alta dureza (cerca de 5 veces el valor del sustrato), con una concentración de nitrógeno de 30 a 40% atómico [3]. Esto produce la distorsión de la red de la matriz austenítica, un aumento de las tensiones residuales y, consecuentemente, aumento de la dureza y mejora en las propiedades tribológicas.

Mientras que el tratamiento a altas temperaturas acelera la difusión intersticial de átomos de N, también se acelera la difusión sustitucional de Cr. Para evitar la formación de fases de nitruro de cromo, que son perjudiciales para la resistencia a la corrosión del material, los tratamientos termoquímicos suelen realizarse como procesos de baja temperatura, del orden de 400 °C a 500 °C, lo cual, sin embargo, también depende de

la duración y condiciones del tratamiento [4].

Diversos estudios han abordado la nitruración de aceros inoxidables bajo distintas condiciones de proceso, analizando su influencia en la capa modificada [1,2,5]. Si bien se reconoce que el nitrógeno puede beneficiar la resistencia a la corrosión [6], ciertos parámetros pueden perjudicarla. Por ello, resulta clave ajustar las condiciones del tratamiento para mejorar propiedades como la dureza y la resistencia al desgaste sin comprometer la resistencia a la corrosión.

En este trabajo se comparan dos tratamientos de nitruración iónica con descarga DC pulsada, uno en un equipo industrial, en un proceso de 20 horas, y otro en un equipo experimental, en un proceso de 4 horas. Se analiza la influencia de las condiciones de tratamiento, especialmente la duración, sobre las características microestructurales, mecánicas y de resistencia a la corrosión de la capa superficial.

MATERIALES Y MÉTODOS

El material base utilizado para el desarrollo de esta investigación fue acero inoxidable comercial AISI 316L, que posee bajo contenido de carbono, del orden del 0,03%, cromo entre un 16 a 18%, níquel entre un 10 a 14% y un máximo de molibdeno de 2 a 3%.

Las superficies de las muestras de ambos grupos, cortadas de barras de 25 mm de diámetro, fueron lijadas con papel de SiC hasta una granulometría 1000 y pulidas con pasta de diamante de 1 μm . A continuación, fueron nitruradas en distintas condiciones. El primer tratamiento, denominado N₄, fue realizado en un reactor de plasma pulsado de corriente continua, con un volumen dentro de la cámara de aproximadamente 1m³, en la Universidad Técnica de Bergakademie, Freiberg, Alemania. El proceso se realizó a una temperatura de 430°C durante 4 horas, en una atmósfera compuesta por 50% H₂- 50% N₂. El segundo grupo de muestras, denominado N₂₀, fue nitrurado en un reactor industrial de la Empresa IONAR S.A. a una temperatura de 420°C durante 20 horas, en una mezcla gaseosa de 20% N₂ - 80% H₂.

Se realizaron cortes en algunas muestras que fueron luego incluidas en resina fenólica, seguidas de un proceso de lijado y pulido con pasta de diamante de 1 μm . La microestructura de las capas modificadas se examinó utilizando un microscopio óptico (MO). Se midió dureza superficial de la capa tratada a través del microdurómetro Shimadzu con indentador Vickers, utilizando cargas de 25 y 50 gramos, con un tiempo de indentación de 10 segundos.

Para analizar el comportamiento al desgaste de las muestras se llevaron a cabo pruebas de deslizamiento rotacional tipo Pin-on-Disk según la Norma ASTM G99, utilizando como contraparte una bolilla de compuesto cerámico (Al₂O₃) de 6 mm de diámetro, cargas normales de 3 N y distancias lineales recorridas de 500 m con radios de trayectoria de 6 mm. Se midió el coeficiente de fricción en función de la distancia para cada muestra. Posteriormente, se empleó un rugosímetro para obtener los perfiles de las huellas de desgaste y así calcular el volumen desgastado. Además, se realizaron ensayos de abrasión de un cuerpo del tipo Scratch Test (ASTM G171-03), utilizando un indentador cónico de diamante. Las cargas empleadas fueron de 20 y 50 N, con una trayectoria de 5 mm y una velocidad constante de 10 mm/min. Con el objetivo de analizar los resultados de los ensayos se tomaron perfiles de las huellas, para examinar el daño causado en las muestras.

Los ensayos electroquímicos se realizaron a temperatura ambiente y presión atmosférica en una celda de tres electrodos, utilizando como electrolito NaCl al 3,5%. Como electrodo de referencia se empleó un electrodo de calomel saturado (SCE) y un alambre de platino como contraelectrodo. La velocidad de barrido de potencial en los ensayos fue de 0,25 mV/s y el límite superior de corriente se estableció en 500 μA y 3000 mV en cuanto a tensión. Se tomaron micrografías ópticas de las muestras antes de comenzar el ensayo y posterior a su finalización, con el objetivo de comparar los mecanismos de corrosión presentes en la capa superficial. Todos los resultados extraídos se compararon con una muestra patrón de acero AISI 316L.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Microestructura y dureza

El espesor de la capa modificada, determinado mediante MO, fue de $(5,21 \pm 0,29) \mu\text{m}$ para las muestras N₄ y de $(14,44 \pm 0,24) \mu\text{m}$ para las muestras N₂₀, tal como se muestra en la Fig. 1.

En ambas micrografías se observa una estructura homogénea correspondiente a austenita expandida (γN), con un frente de capa homogéneo y bien definido, en concordancia con las características típicamente reportadas en la bibliografía [7]. Esta capa, comúnmente denominada “capa blanca” debido al color que adquiere tras el ataque con reactivo Marble, corresponde a una solución sólida sobresaturada de nitrógeno, también conocida como “fase S” [8]. En la capa de mayor espesor se identifican irregularidades y discontinuidades que no se observan en la de menor espesor.

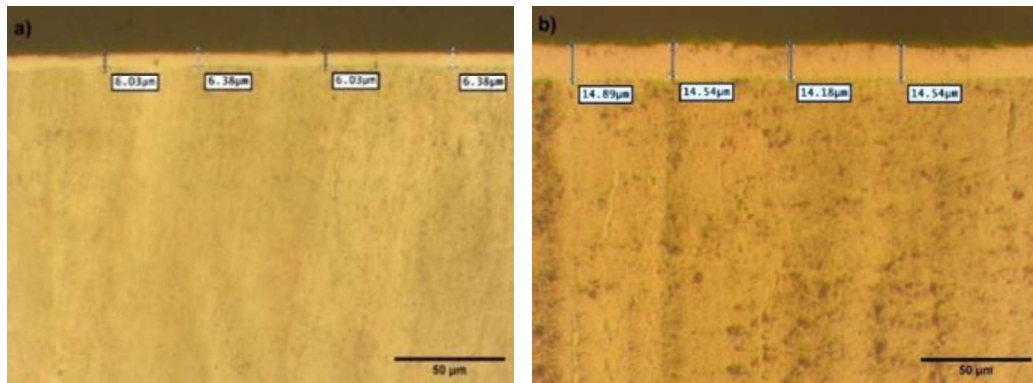


Figura 1. Micrográficas ópticas de la sección transversal: (a) N₄, (b) N₂₀.

Con el objetivo de obtener resultados de la dureza superficial se utilizó un microdurómetro con indentador Vickers, con cargas de 25 y 50 gramos, donde se obtuvieron los resultados ilustrados en la Fig. 2. La variación de carga busca obtener una menor profundidad de penetración y así disminuir la influencia del sustrato en el resultado.

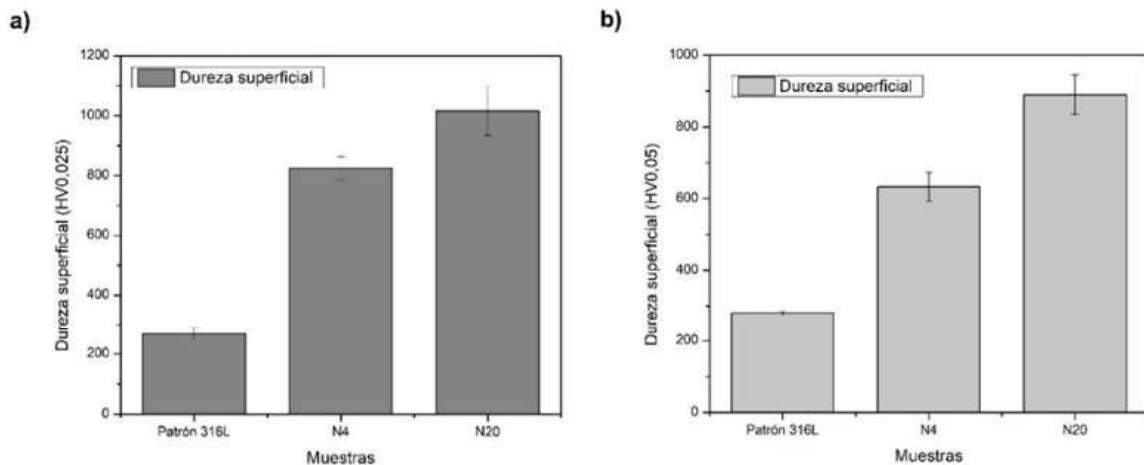


Figura 2. Resultados de dureza superficial con carga de: (a) 25 gramos, (b) 50 gramos.

En ambos casos, las muestras nitruradas presentaron una dureza mayor que el acero sin tratar. Las muestras nitruradas en un tratamiento de 20 h alcanzaron aproximadamente 1000 HV, mientras que para el de 4 h, 800 HV, con una carga de 25 g. Para las muestras N₄ y N₂₀ los valores de dureza alcanzados son 2,2 y 3,2 veces mayores que para el acero no tratado, respectivamente.

Este resultado se atribuye al efecto del tiempo de tratamiento sobre la difusión de nitrógeno en la estructura austenítica, al prolongarse la nitruración, se favorece la penetración del nitrógeno y se forma una capa endurecida más gruesa, lo que eleva la dureza superficial [5].

Comportamiento al desgaste

En las pruebas de Pin-on-Disk, todas las muestras nitruradas mostraron una mejor resistencia al desgaste que las muestras no tratadas. Como se puede apreciar en la Fig. 3a, la pérdida de volumen relevada en las muestras nitruradas es aproximadamente dos órdenes de magnitud menor que en las muestras sin tratamiento, bajo las mismas condiciones de ensayo. Estos resultados son consistentes con lo reportado previamente en la literatura [9,10].

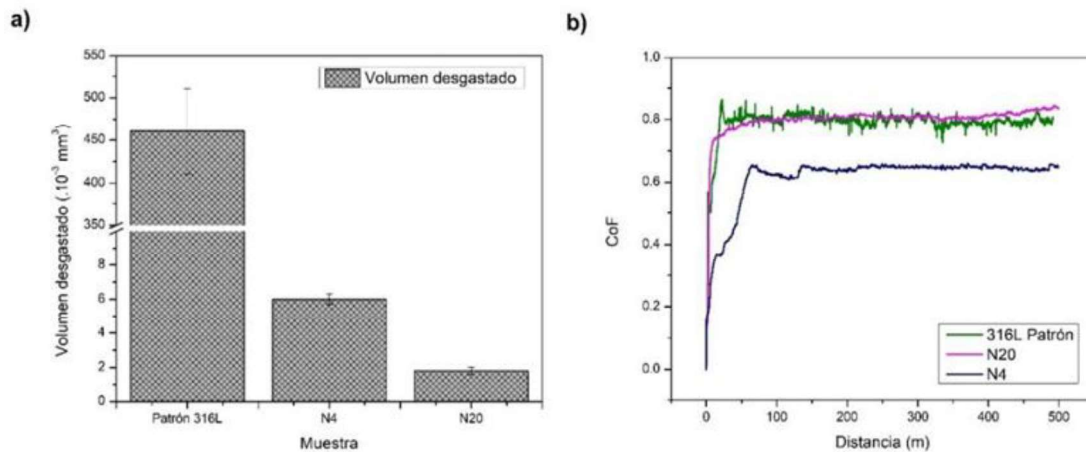


Figura 3. (a) Volumen desgastado en ensayos de Pin-on-Disk, (b) coeficiente de fricción.

El valor del coeficiente de fricción (CoF) de las muestras tratadas en el ensayo de 20 horas fue aproximadamente 0,2 mayor que el de la muestra N_4 , como puede observarse en la Fig. 3b. Considerando que la fuerza de fricción puede originarse por abrasión, corte y adhesión, en este caso, el aumento de abrasión se debe a partículas desprendidas de la capa nitrurada durante el ensayo [11]. Aunque la muestra N_{20} presenta menor desgaste debido a su mayor dureza, estas partículas generan mayor abrasión local, elevando su coeficiente de fricción respecto a la muestra tratadas en el ensayo de menor duración.

La resistencia al desgaste de la capa nitrurada se incrementó en función del aumento en la duración del tratamiento. Bajo las condiciones de carga evaluadas, se evidencia una correlación directa entre la resistencia al desgaste, la dureza superficial y el espesor de la capa formada. Si bien la capa obtenida tras un tratamiento de 4 horas presenta un espesor significativamente menor en comparación con la correspondiente a 20 horas, es capaz de proporcionar una mejora sustancial en la resistencia al desgaste del acero sin tratar.

En las muestras nitruradas (Fig. 4a y 4b) se observan surcos suaves en la dirección del deslizamiento (scratching), junto con regiones más oscuras que podrían indicar desgaste oxidativo. En la muestra sin tratamiento el ancho de la huella y la deformación fue mayor que para las demás muestras (Fig. 4c).

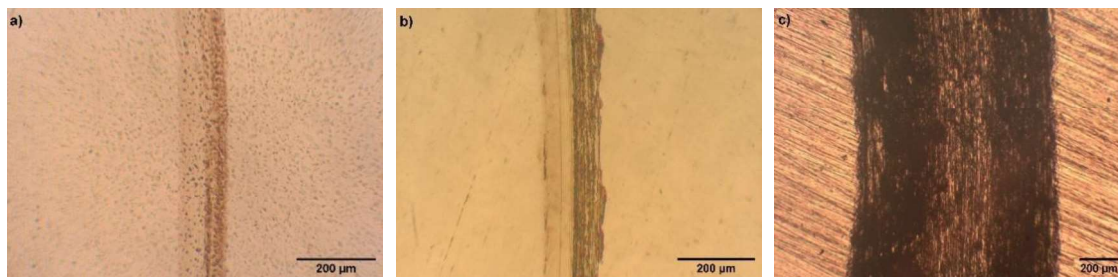


Figura 4. Huellas de Pin-on-Disk, (a) N_4 , (b) N_{20} , (c) Patrón 316L.

En los ensayos de Scratch Test, como se puede apreciar en la Fig. 3, todas las probetas ensayadas presentan una zona deformada, o de acumulación de material en los bordes debido a la deformación mecánica.

Se observa que la muestra N_{20} presenta huellas más superficiales y estrechas, especialmente para cargas elevadas, lo que indica una mayor resistencia al rayado, atribuida a su mayor dureza superficial y mejor respuesta frente a la deformación plástica. En cambio, las muestras N_4 y la muestra patrón exhiben huellas considerablemente más profundas, especialmente el acero sin tratar, lo que evidencia su baja resistencia mecánica superficial y mayor susceptibilidad al desgaste abrasivo.

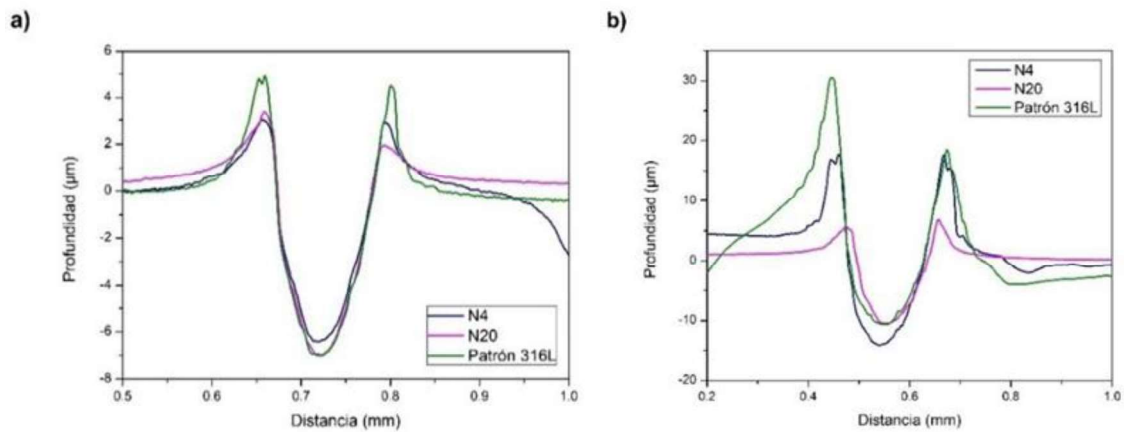


Figura 5. Perfil de las huellas de Scratch Test para (a) 20 N, (b) 50 N.

Según los perfiles de huella y los factores de abrasión presentados en la Tabla 1, se observa que en la muestra N₄, incluso bajo una carga de 20 N, se alcanzó la totalidad del espesor de la capa nitrurada. Esto resultó en un mecanismo de desgaste caracterizado por la combinación de deformación plástica y desprendimiento de material debido a la acción abrasiva [10].

Tabla 1. Factor de abrasión para los ensayos de Scratch Test.

Muestra	F _{ab, 20N}	F _{ab, 50N}
N ₄	0,45	0,53
N ₂₀	0,61	0,20

Comportamiento a la corrosión

Considerando el comportamiento frente a la corrosión, se compararon ambos tratamientos con la muestra patrón. Las muestras N₄ mostraron una mejor resistencia dado que su potencial de corrosión y de ruptura (E_{rup}) fueron más nobles y la densidad de corriente cuasi-pasiva fue menor, como puede observarse en la tabla 2. En cualquier caso, las muestras nitruradas tuvieron una densidad de corriente cuasi-pasiva más baja que las muestras no tratadas a un mismo valor de potencial aplicado, es decir, presentaron mejor resistencia a la corrosión en este medio, como se muestra en la Fig. 4.

Tabla 2. Potenciales aplicados y resultados.

Muestra	E _{corr} (mV)	Comportamiento	E _{rup} -E _{corr} (mV)
N ₄	66	Potencial de ruptura: 351 mV Densidad de corriente cuasi-pasiva: 0,6 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	285
N ₂₀	-62	Potencial de ruptura: 296 mV Densidad de corriente cuasi-pasiva: 0,8 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	358
Patrón 316L	-116	Potencial de ruptura: 305 mV Densidad de corriente cuasi-pasiva: 1,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	421

Las curvas de polarización de las muestras se ejemplifican debajo, comparando ambos tratamientos con la muestra patrón.

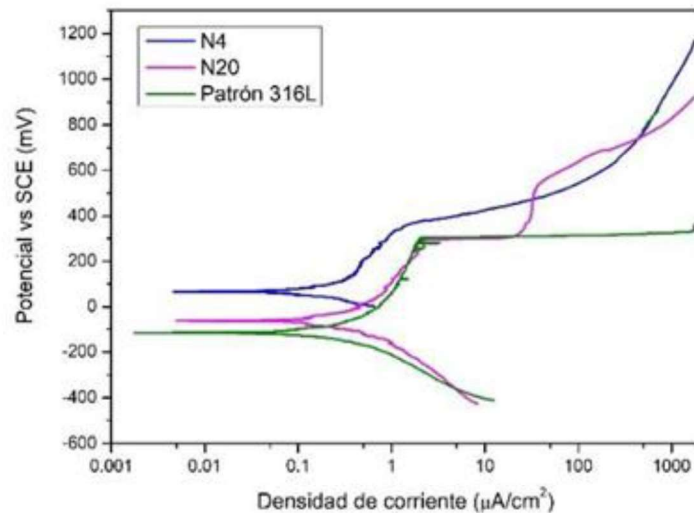


Figura 6. Curvas de polarización para el ensayo potenciodinámico.

El comportamiento menos noble a la corrosión de la capa de mayor espesor, ilustrados en la tabla 2 y Fig. 6, podría estar asociado a la presencia de defectos o discontinuidades de la capa superficial observados en las micrografías (Fig. 1), que facilitarían la penetración del electrolito y el contacto de la solución corrosiva con el sustrato. Posterior a los ensayos, la superficie de las muestras fue analizada mediante MO. Las muestras tratadas presentaron pits de corrosión (Fig. 7a y 7b). La muestra patrón no solo presentó corrosión por picado, sino que además se encontró corrosión por crevice en la superficie.

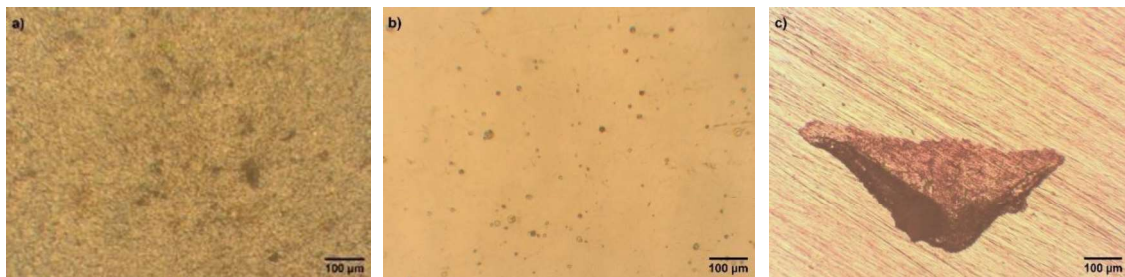


Figura 7. Micrografías ópticas de la superficie de las muestras posterior al ensayo potenciodinámico: (a) N4, (b) N20, (c) Patrón.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permiten determinar que el tratamiento de nitruración con una duración de 20 horas presentó significativamente mejor comportamiento al desgaste que el acero AISI 316L nitrurado durante 4 horas, al igual que un considerable aumento de la dureza.

Por otro lado, las muestras N4 presentaron mejor comportamiento a la corrosión y una mejora del comportamiento al desgaste con respecto al acero sin tratar. Considerando la diferencia de duración entre ambos tratamientos, los resultados obtenidos con un tiempo de tratamiento 5 veces menor son altamente satisfactorios y sugieren que, a nivel industrial, reducir el tiempo de proceso podría ser una opción eficiente sin comprometer las propiedades del material.

REFERENCIAS

- [1] Borgioli, F; Fossati, A; Galvanetto, E; Bacci, T. (2005). Glow-discharge nitriding of AISI 316L austenitic stainless steel: Influence of treatment temperature. *Surf. and Coat. Tech*; 200(7). doi: 10.1016/j.surfcoat.2004.07.110.
- [2] Fernandes, F; Heck, S; Pereira, R.G; Lombardi, A; Casteletti, L.C. (2010). Wear of plasma nitrided and nitrocarburized AISI 316L austenitic stainless steel. *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng*; 20 (2).
- [3] Bell, T. (2008) Current Status of Supersaturated Surface Engineered S-phase Materials. *Key Eng. Mater*; 373-374.

- [4] Jafarpour, S.M; Martin, S; Schimpf, C; Dalke, A; Biermann, H; Leineweber, A. (2024). Comparative Plasma Nitrocarburizing of AISI 316L and AISI 304 Steels Using a Solid Carbon Active Screen: Differences in the Developing Microstructures. *Metall. Mater. Trans*; 55. doi: 10.1007/s11661-024-07351-6.
- [5] Menthe, E; Bulak, A; Olfe, J; Zimmermann, A; & Rie, K.T. (2000). Improvement of the mechanical properties of austenitic stainless steel after plasma nitriding. *Surf. and Coat. Tech.* doi: 10.1016/S0257-8972(00)00930-0.
- [6] Fossati, A; Borgioli, F; Galvanetto, E; Bacci, T. (2006). Corrosion resistance properties of glow-discharge nitrided AISI 316L austenitic stainless steel in NaCl solutions. *Corros. Sci*; 48. doi: 10.1016/j.corsci.2005.06.006.
- [7] Borowski T; Kulikowski K. (2020). Influence of nitrided and nitrocarburised layers on the functional properties of nitrogendoped soft carbon-based coatings deposited on 316L steel under DC glow discharge conditions. *Surf. and Coat. Tech*; 92. doi: 10.1016/j.surfcoat.2020.125705.
- [8] Spies, H.J; Eckstein, C; Biermann, H; Franke, A. Corrosion behaviour of stainless steels after low temperature thermochemical treatment. *Materialwiss. Werkst.* 2010, 41.
- [9] Sun, Y; Bell, T. (1998). Sliding wear characteristics of low temperature plasma nitrided 316 austenitic stainless steel. *Wear*, 218(2). doi: 10.1016/S0043-1648(98)00199-9.
- [10] Li, C. X; Bell, T. (2004). Sliding wear properties of active screen plasma nitrided 316 austenitic stainless steel. *Wear*, 256(11–12). doi: 10.1016/j.wear.2003.07.006.
- [11] Dalibón, E. L; Prieto, G; Tuckart, W. R; & Brühl, S. P. (2022). Tribological behaviour of a hyperlox coating deposited over nitrided martensitic stainless steel. *Surf. Topogr: Metrol. Prop*; 10(3). doi: 10.1088/2051-672X/ac8946