

# Efecto de la corrosión en barras de acero Dual Phase utilizando el método de sumersión salina y secado al aire de la norma DIN – EN 990

Effect of corrosion on Dual Phase steel bars using saline immersion method and air drying according to DIN – EN 990 standard

Presentación: 22/10/2023

## Hugo Martín Baeza

Laboratorio de Ensayos de Materiales y Estructuras (LEMEJ) – Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires – CIC, Junín, Argentina.

[hmbaeza@comunidad.unnoba.edu.ar](mailto:hmbaeza@comunidad.unnoba.edu.ar)

## Gianluca Lombardo

Laboratorio de Ensayos de Materiales y Estructuras (LEMEJ) – Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires – CIC, Junín, Argentina.

[glombardo@comunidad.unnoba.edu.ar](mailto:glombardo@comunidad.unnoba.edu.ar)

## Alejandro Andrés Mateos

Laboratorio de Ensayos de Materiales y Estructuras (LEMEJ) – Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires – CIC, Junín, Argentina.

[hmbaeza@comunidad.unnoba.edu.ar](mailto:hmbaeza@comunidad.unnoba.edu.ar)

## María José Castillo

Laboratorio de Ensayos de Materiales y Estructuras (LEMEJ) – Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires – CIC, Junín, Argentina.

DEYTEMA – Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional San Nicolás, San Nicolás, Buenos Aires, Argentina.

[mariajose.castillo@nexo.unnoba.edu.ar](mailto:mariajose.castillo@nexo.unnoba.edu.ar)

## Resumen

En el presente trabajo se realizaron ensayos de corrosión en aceros Dual Phase obtenidos a partir de barras comerciales mediante tratamientos térmicos intercríticos, utilizando el método de sumersión salina y secado al aire según norma DIN EN 990:2003-01. El objetivo de esta experiencia es poner a punto la técnica de sumersión salina y secado al aire con el fin de analizar el comportamiento a la corrosión de los aceros obtenidos con respecto a las barras comerciales comúnmente utilizadas en la industria de la construcción para el conformado de refuerzos de hormigón.

**Palabras clave:** corrosión, aceros de refuerzo, estudio comparativo.

## Abstract

In the present work, corrosion tests were carried out on Dual Phase steels obtained from commercial bars through intercritical heat treatments, using saline immersion method and air drying according to DIN EN 990:2003-01. The aim of this experience is to analyze corrosion behavior of steels obtained with respect to commercial bars commonly used in the construction industry for forming concrete reinforcements.

**Keywords:** corrosion, reinforcing steel, comparative study.

## Introducción

En los últimos años, los aceros avanzados de alta resistencia (AHSS: Advanced High Strength Steel) se han implementado ampliamente en la industria automotriz debido a su alta resistencia y tenacidad, permitiendo disminuir considerablemente el peso de los componentes. Entre los AHSS, se encuentran los aceros de doble fase (DP: Dual Phase), caracterizados por su elevada resistencia y ductilidad. Las propiedades mecánicas de los aceros DP pueden ser controladas a través de la variación de su fracción en volumen de martensita y ferrita en su composición microestructural [1]. A pesar de sus potenciales ventajas, el estudio y desarrollo de aceros DP para su aplicación en la industria de la construcción ha sido escaso. En la industria de la construcción, los productos de acero de mayor aplicación son las barras ATR 500, ADN 420 S y AL 220, ya sea siendo utilizadas como el elemento principal de refuerzo o como parte del conjunto resistente (mallas conformadas). Particularmente, las barras ATR 500 se encuentran disponibles comercialmente en mallas de acero electrosoldadas y sus propiedades mecánicas se rigen bajo norma IRAM/IAS U 500-26:2016 [2]. Además del estudio de las propiedades mecánicas de estos materiales, resulta importante evaluar el comportamiento a la corrosión en las barras de refuerzo. Este fenómeno afecta la vida útil de la estructura de hormigón debido a la disminución de sección provocada por la pérdida de masa en los refuerzos, afectando así al comportamiento mecánico del conjunto. Estos productos de corrosión poseen un volumen superior al del acero, generando esfuerzos internos que producen el agrietamiento y la disminución de la adherencia del hormigón con los refuerzos. Por tal motivo, resulta necesario conocer el comportamiento ante la corrosión de las diferentes composiciones microestructurales de los aceros DP. Diversos estudios han demostrado que estos aceros son capaces de resistir fenómenos de corrosión gracias a la distribución de fases en su microestructura [3][4][5]. En un estudio preliminar se han obtenido experimentalmente aceros DP mediante la realización de tratamientos térmicos en barras de acero comercial ADN 420 S y AL 220. El objetivo de esta experiencia es poner a punto la técnica de sumersión salina y secado al aire con el fin de analizar el comportamiento a la corrosión de los aceros obtenidos con respecto a las barras comerciales comúnmente utilizadas en la industria de la construcción para el conformado de refuerzos de hormigón.

## Desarrollo

La corrosión se define como la reacción química o electroquímica entre un material y su entorno que provoca el deterioro del material y de sus propiedades (Botia, 1985).

La corrosión que afecta a un material depende de muchos factores tanto internos como externos al material capaces de crear una diferencia de potencial en su superficie. Los factores internos principales que generan heterogeneidades en la superficie son [6]:

- Impurezas en la matriz metálica.
- Partículas contaminantes en la superficie.

- Uniones bimetálicas.
- Discontinuidades en el recubrimiento superficial.
- Regiones sometidas a tensión y deformación elástica.

En cuanto a los factores externos (ambiente) que más influencia tienen en el proceso de corrosión resultan [6]:

- Temperatura: ante un aumento de temperatura, mayor es la probabilidad y la velocidad de corrosión.
- Presión: las diferencias de presiones a la que está sometido un metal ocasionan que, las áreas de menor presión actúen como ánodo y aquellas con mayor presión como cátodo provocando la migración de electrodos y la formación de óxido.
- Composición del medio en contacto con el metal: en medios acuosos es importante considerar:
  - Nivel de pH: a mayor acidez, mayor velocidad de corrosión.
  - Oxígeno y otros gases disueltos: mientras mayor sea la agitación del medio, mayor será el nivel de oxígeno disuelto lo que aumenta la velocidad de corrosión. Otros metales a tener en consideración son el cloro, amoníaco y el dióxido de carbono.
  - Nivel de dureza: la presencia de iones  $Ca^{+2}$  y  $Mg^{+2}$  son menos corrosivas ya que forman capas protectoras de carbonato sobre la superficie.
  - Presencia de sales: el nivel de salinidad del agua aumenta el efecto de la corrosión debido principalmente a un aumento de la conductividad.

Los productos derivados de la corrosión tienen mayor volumen que el acero, esto provoca tensiones que someten al hormigón a tracciones internas. Si los productos derivados de la corrosión no migran hacia la superficie a través de los poros, pequeñas cantidades de metal corroído generarán tensiones que superarán la resistencia a la tracción del hormigón llegando a producir desprendimientos del recubrimiento y dejando la armadura libre.

Cuando se produce corrosión en las barras de refuerzo, la capacidad mecánica de la armadura disminuye en forma proporcional a la pérdida de sección. La existencia de picaduras, actúan como concentradores de tensión y producen un estado triaxial de tensiones que fragiliza las barras. A medida que la corrosión aumenta, la armadura presenta una mayor disminución de su capacidad mecánica, de su ductilidad y de su resistencia a la fatiga. [6]

La corrosión de la armadura afecta al comportamiento adherente entre ésta y el hormigón circundante, a través de varios mecanismos:

- La aparición de productos de corrosión que están en contacto con el hormigón, variando la naturaleza de la interfase de unión entre ellos. Sin embargo, para niveles de corrosión iniciales, la adherencia aumenta.
- La corrosión afecta a la disminución de la altura de corruga, debido a la pérdida de masa que experimenta la armadura. En barras con una disminución de un 3 % de sección transversal, se manifiesta una disminución de la altura de corruga en un 20 %.
- La aparición de fisuras en el hormigón por el aumento del volumen de los productos de corrosión, disminuye la adherencia entre armadura y hormigón.
- La corrosión de armaduras transversales (estribos o cercos) modifica las condiciones de confinamiento del hormigón que rodea las armaduras.

A partir de experiencias previas y mediante la realización de tratamientos térmicos intercríticos, se seleccionaron 4 condiciones que permitieron obtener barras de acero DP que cumplan con la normativa aplicable [7][8][9][10]. Los tratamientos térmicos fueron realizados sobre barras de acero ADN 420 S y AL 220, manteniendo como

referencia las barras ATR 500. Adicionalmente, sobre una muestra de ADN 420 S se realizó un tratamiento de revenido. Los ensayos de corrosión se llevaron a cabo sobre 7 barras de 250 mm de longitud. Las propiedades mecánicas de las mismas se presentan en la Tabla 1. Para la confección de las probetas de corrosión, cada barra fue seccionada en la mitad, obteniendo así, 14 probetas de 125 mm cada una para la ejecución de los ensayos (dos probetas por condición). Los ensayos de corrosión se realizaron siguiendo la metodología indicada en la norma DIN EN 990:2003-01[11]. Se empleó el método 2 “Prueba de corta duración con humectación alterna en solución de cloruro de sodio y secado al aire”, la cual consiste en 10 ciclos de inmersión de las probetas en una solución acuosa de NaCl al 3 % en masa durante 2 horas y posterior secado con un tiempo que puede variar entre 70 horas y 7 días. Por otro lado, y según lo indicado por la normativa aplicada, se mantuvieron 14 probetas testigos, las cuales fueron expuestas al aire.

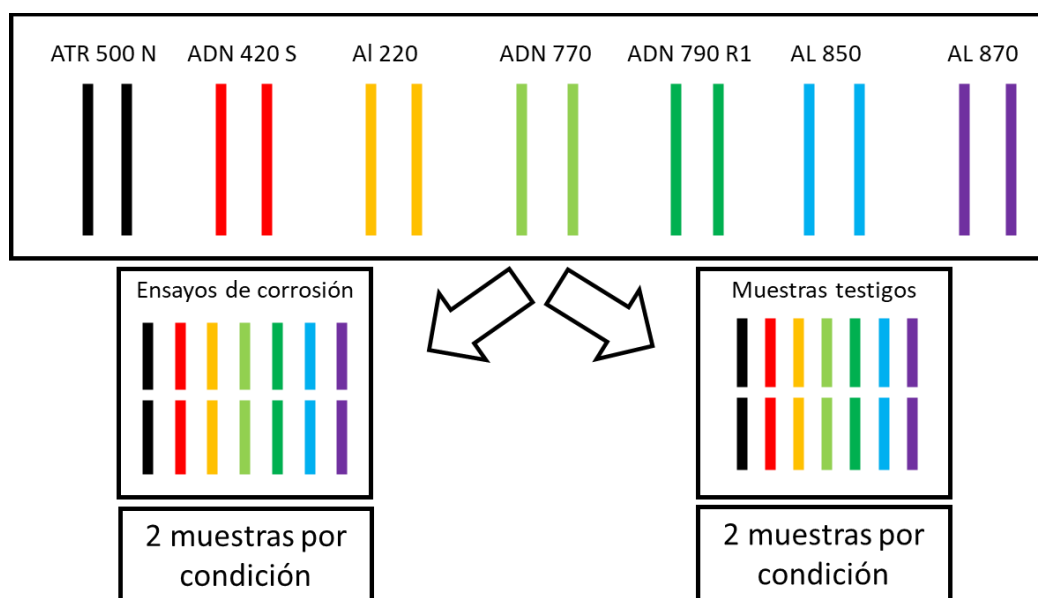
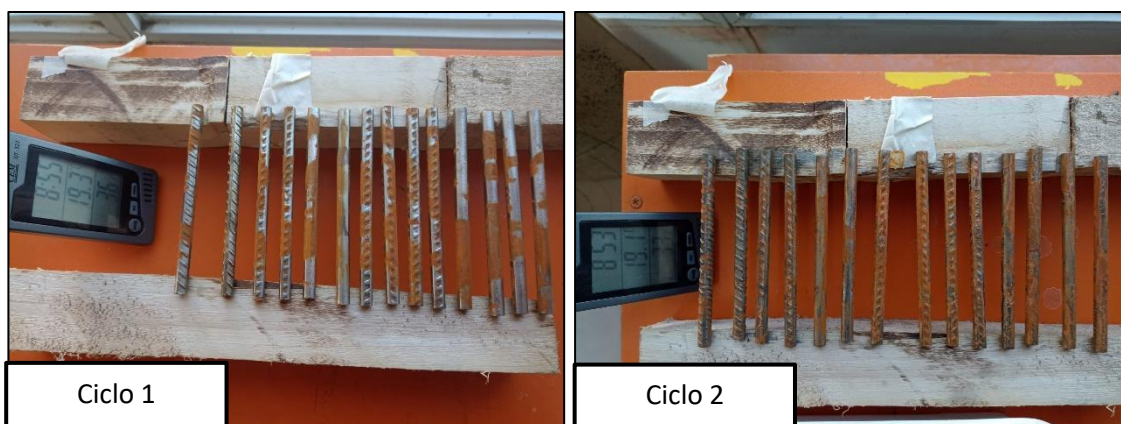


Figura 1. Selección de muestras

De cada una de las probetas se calculó un diámetro equivalente a partir del volumen obtenido empleando el Principio de Arquímedes, para determinar el área superficial utilizada en el cálculo de la velocidad de corrosión.





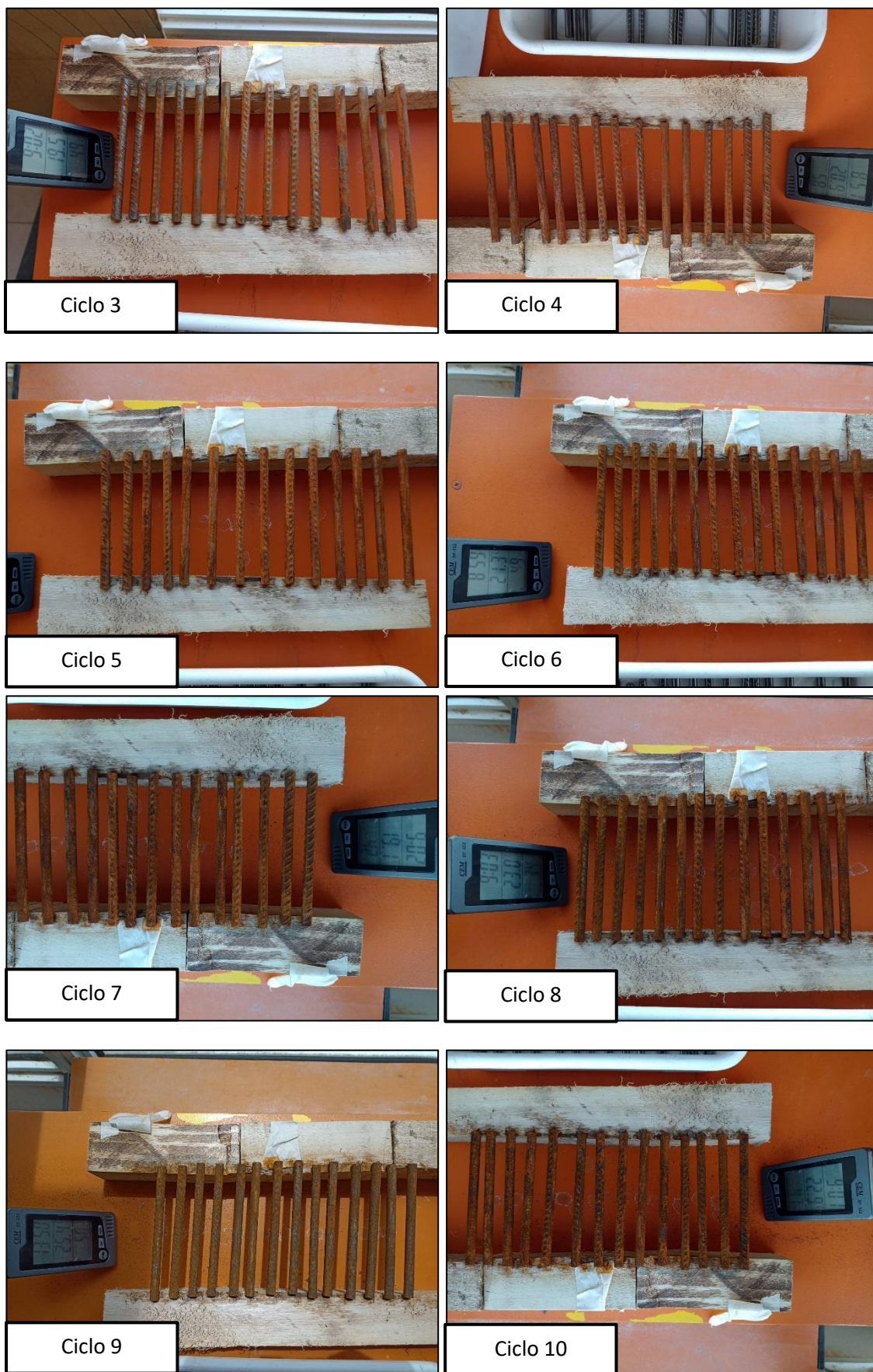


Figura 2. Ciclos de corrosión

Al finalizar los 10 ciclos de corrosión, las probetas se sometieron a un procedimiento de limpieza siguiendo la norma ISO 8407[12]. Esta técnica inicia con un cepillado suave de las probetas con un cepillo de cerdas metálicas. Luego se realizó una inmersión de las piezas durante 30 minutos en un baño a 85°C utilizando una disolución limpiadora, elaborada con 50 g de hidróxido de sodio, 200 g de zinc granulado y agua destilada hasta completar 1000 ml. Una vez finalizado el baño, se limpiaron las piezas con agua, etanol y secado. Por último, las probetas fueron pesadas en una balanza con precisión de 1mg. Este procedimiento de limpieza se repitió hasta que las muestras presentaron un peso constante, registrando el peso de todas las muestras.



Figura 3. Proceso de limpieza

Una vez determinada la pérdida de masa del metal, y conociendo el área superficial, se calculó la velocidad de corrosión ( $R_c$ ) con la ecuación 1a y posteriormente fue expresada en términos de longitud ( $R_c'$ ) ecuación 1b [12].

$$a) \quad R_c = \frac{\text{Pérdida de masa}}{\text{Área de la muestra}} \left( \frac{gr}{m^2} \right) \quad b) \quad R_c' = \frac{R_c \left( \frac{gr}{m^2} \right)}{\text{Densidad del material} \left( \frac{gr}{m^3} \right)} (m)$$

Ecuación 1. Velocidad de corrosión

Es importante aclarar que en trabajos previos se ha evaluado el comportamiento de estos materiales a través de su caracterización microestructural y mecánica. Para ello, se seccionaron y prepararon metalográficamente las muestras correspondientes, posteriormente las mismas fueron evaluadas mediante microscopía óptica y se cuantificaron las fases presentes. Por otro lado, el comportamiento mecánico se analizó a través de ensayos de tracción y microdureza Vickers. La Tabla XXX resume los resultados obtenidos. [8][9]

En la Tabla 1 se presentan las composiciones químicas de los aceros analizados, así como también su carbono equivalente ( $C_{eq}$ ).

Acero	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	V	Ni	Cu	Ceq
ATR 500 N	0,160	0,680	0,170	0,015	0,019	0,070	0,000	0,000	0,060	0,000	0,291
ADN 420 S	0,186	0,920	0,207	0,014	0,025	0,042	0,002	0,003	0,027	0,086	0,357
AL 220	0,090	0,450	0,140	0,016	0,020	0,070	0,000	0,000	0,060	0,000	0,183

Tabla 1. Composición química.

En la Tabla 2 se presentan los resultados del ensayo de corrosión de las probetas estudiadas y de sus propiedades mecánicas.

PROBETA	T° de T.T	Tiempo de mantenimiento (min)	Tipo de enfriamiento	Ferrita (%)	Martensita (%)	Rp (Mpa)	Rm (Mpa)	A (%)	HV	Área total a corrosión (mm <sup>2</sup> )	Velocidad de corrosión (µm)
ATR 500	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	709	784	7,2	231	3345,6	6,92
ADN 420 S	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	529	612	17,4	158	3330,79	6,31
AL 220	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	343	460	21,7	128	3411,39	6,53
ADN 420 S 770	770 °C	30	Agitación con agua	55	45	662	1102	4	340	3325,21	7,47
ADN 420 S 790*	790 °C	30	Agitación con agua	28	72	689	1140	6,3	353	3274,94	7,34
AL 220 850	850 °C	30	Agitación con agua	58	42	528	756	6,7	238	3383,99	6,76
AL 220 870	870 °C	30	Agitación con agua	57	43	661	800	5,8	248	3370,81	6,17

\* Con tratamiento térmico adicional de revenido a 200 °C, 10 minutos, horno abierto.

Tabla 2. Resumen de resultados.

En la Figura 1 se presentan las velocidades de corrosión de cada una de las condiciones estudiadas.

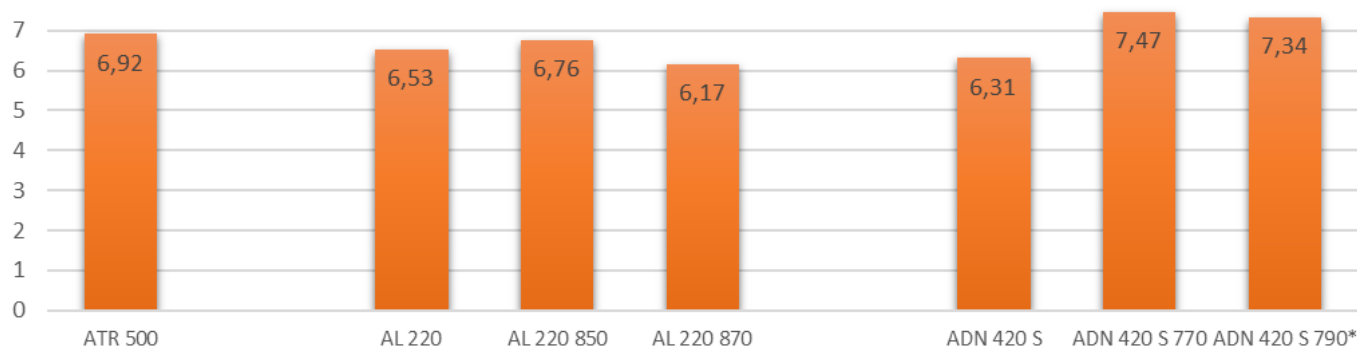


Figura 1. Velocidad de corrosión.

## Conclusiones

Este trabajo permitió, a través de la puesta a punto de la técnica de sumersión salina y secado al aire para la evaluación del comportamiento a la corrosión en aleaciones ferrosas, estudiar el desempeño de aceros para refuerzo en hormigón de diferente procedencia (uso comercial y tratados térmicamente). En este sentido, se encontró que el acero DP AL 850 posee propiedades mecánicas que cumplimentan la norma aplicable al ATR 500 y un comportamiento similar frente a la corrosión, pero con una mejor relación de endurecimiento ( $R_m/R_p=1,43$ ). Se observa, en general, que la presencia de martensita aumenta la velocidad de corrosión respecto a la microestructura ferrítico-perlítica de los aceros base (excepto para el acero AL 220 870). Sin embargo, para los aceros DP obtenidos, el aumento del contenido de martensita disminuye la velocidad de corrosión. Por otro lado, considerando los DP con similares contenidos de martensita (AL 220 870 y ADN 420 S 770), puede observarse que la velocidad de corrosión del ADN 420 S 770 es significativamente mayor. Este comportamiento podría vincularse al mayor contenido de C presente en dicha fase martensítica.



## Referencias

- [1]. T. Kumar Pal, K. Bhowmick. Resistance spot welding characteristics and high cycle fatigue behavior of DP 780 steel sheet. *Journal of materials and engineering and performance* 2012;21(2): 280-285.
- [2]. IRAM/IAS U 500-26:2016. Alambres de acero para armadura en estructuras de hormigón
- [3]. Covarrubias Alvarado, O., Rodríguez López, P. Propiedades de resistencia a la corrosión de aceros aleados al Si embebidos en mortero. *Ciencia UANL*, Vol. IV, No. 2, 2001.
- [4]. Hamzah, E., Guan, G. C., Abd Rahman, I., Ismail, M. Corrosion performance of dual-phase steel embedded in concrete. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, Volume 35, Number 2B, October 2010.
- [5]. Caprili, S., et al. New generation of high-ductile Dual-Phase steel reinforcing bars. *Construction and Building Materials* 179 (2018) 66–79.
- [6]. Querol Martí, M. Estudio comparativo de la normativa existente para la evaluación del grado y velocidad de corrosión en aceros para la construcción. Universidad Politécnica de Catalunya.
- [7]. Castillo, M. J., Mateos, A. A., Lombardo, G., Svoboda, H. Tratamientos térmicos para la obtención de aceros dual phase. Congreso Internacional de Soldadura. Mayo 2021.
- [8]. Mateos, A. A., Lombardo, G. Análisis de las propiedades mecánicas de aceros Dual Phase obtenidos a partir de productos de barras comerciales. XXVIII Jornada de Jóvenes Investigadores. Noviembre 2021.
- [9]. Castillo, M. J., Mateos, A. A., Svoboda, H. Caracterización de aceros dual phase para su utilización como barras en refuerzo de hormigón. SAM CONAMET. Mayo 2022.
- [10]. Castillo, M. J., Mateos, A. A., Troffe, V., Svoboda, H. Desarrollo de mallas electrosoldadas de alta resistencia para refuerzo de estructuras de hormigón. *Revista SAM*, N°2, p.07-12. 2019.
- [11]. DIN EN 990:2003-01. Test methods for verification of corrosion protection of reinforcement in autoclaved aerated concrete and lightweight aggregate concrete with open structure
- [12]. International Organization for Standardization. (2021). Corrosion of metals and alloys – Removal of corrosion products from corrosion test specimens. (ISO 8407).