

C.2. Ciencia e Ingeniería de los Materiales

Análisis de las propiedades mecánicas de aceros Dual Phase obtenidos a partir de productos de barras comerciales

Autor: Mateos, Alejandro; aamateos@unnoba.edu.ar

Co-autor(es): Lombardo, Gianluca; glombardo@comunidad.unnoba.edu.ar

Profesor/a guía: Castillo, María José; mariajose.castillo@nexo.unnoba.edu.ar

Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires

Resumen

Los aceros Dual Phase (DP), forman parte del grupo de aceros avanzados, éstos han sido ampliamente estudiados para uso en la industria automotriz. Sin embargo, su potencialidad en aplicaciones para la industria de la construcción ha sido muy poco investigada. Están compuestos por dos fases; una matriz de ferrita y una segunda fase dispersa de martensita. Los aceros DP combinan alta resistencia mecánica, alargamiento a rotura y capacidad de conformado, junto con una elevada capacidad de absorber energía. El objetivo de este trabajo es comparar las microestructuras y propiedades mecánicas de aceros DP obtenidos a partir de barras de uso comercial. Se partió de barras ADN 420 S de 8 mm de diámetro, las cuales fueron normalizadas. Se realizaron templados intercríticos a cinco temperaturas diferentes (710°C a 830°C), durante 30 minutos y enfriamiento en agua. Posteriormente, sobre las probetas templadas se realizó un revenido a 200 °C, durante 10 minutos y enfriamiento en horno con puerta abierta. Para las evaluaciones, microestructurales, se tomaron muestras de 10 mm de longitud, las mismas fueron incluidas, pulidas y atacadas químicamente con Nital 2. Se evaluó su microestructura y se cuantificaron las fases, encontrándose un incremento del porcentaje de martensita al incrementarse la temperatura de tratamiento. Para el análisis de propiedades mecánicas, se realizaron ensayos de tracción, determinándose la resistencia al límite proporcional (R_p), resistencia máxima (R_m) y alargamiento (A %). Tanto para R_m como para R_p los resultados mostraron una correlación directa con el porcentaje de martensita presente. Asimismo, se encontró que la dureza aumentó al incrementarse el porcentaje de martensita en detrimento de la ferrita presente.

Palabras Clave

Dual Phase, Industria de la Construcción, Propiedades Mecánica

Introducción

El hormigón es un material compuesto que, una vez endurecido, se asemeja a una piedra artificial. En general, todos los hormigones y, especialmente los convencionales, están formados por agregados, cemento y agua. Además de los componentes principales, hay otros componentes secundarios como, por ejemplo, aditivos, fibras, cargas, armaduras metálicas. En el hormigón armado ($H^{\circ}A^{\circ}$), la armadura constituye uno de los componentes fundamentales (Menéndez Méndez, Esperanza (2014)). Las barras de acero se disponen en las zonas sometidas a esfuerzos de tracción, que el hormigón simple no es capaz de soportar. Al ser utilizado en obras de ingeniería, el $H^{\circ}A^{\circ}$ experimenta el fenómeno de fisuración. Es por esto, que, en este material estructural, cada uno de los componentes, y su interacción, son sumamente importantes para determinar su desempeño en servicio. Las características plásticas del acero tienen gran importancia ya que evitan las roturas frágiles, redistribuyen esfuerzos y aumentan la capacidad de disipar energía bajo cargas dinámicas, como es el caso de las cargas sísmicas.

Diversos tipos de aceros pueden utilizarse como refuerzo en estructuras de hormigón. En nuestro país, las barras ADN 420 y ADN

420 S (IRAM-IAS U 500 207 (2004), IRAM-IAS U 500 528 (2004)), son frecuentemente utilizadas por sus características mecánicas y buena soldabilidad. Para la fabricación de mallas o estructuras tipo TRILOGIC, se utilizan productos especificados por la norma IRAM-IAS U500-26 (IRAM-IAS U 500 26 (2016)).

En los últimos años, se ha desarrollado una familia de aceros denominada Aceros Avanzados de Alta Resistencia (AHSS: Advanced High Strength Steels) que presentan propiedades optimizadas respecto de los materiales convencionales. Dentro de esta familia se encuentran los Dual Phase (DP) cuya microestructura está constituida principalmente por partículas de martensita dispersas en una matriz de ferrita, donde dicha matriz garantiza una alta conformabilidad y la martensita proporciona alta resistencia. Los aceros DP se caracterizan por su comportamiento de fluencia continua, baja tensión de fluencia, relación favorable entre tensión de fluencia y tensión máxima (aproximadamente 0,5) y un alto nivel de elongación con un coeficiente de endurecimiento por trabajado elevado (Kelesternur et al, (2009)).

Los aceros DP han sido ampliamente estudiados para uso en la industria automotriz. Sin embargo, su potencialidad en aplicaciones de la industria de la

construcción ha sido muy poco investigada (Maffei et al, (2007)). Las propiedades ante mencionadas, sugieren que podrían presentar un fuerte impacto en cuanto a su uso en estructuras sismo-resistentes de hormigón armado, debido a su alta tasa de endurecimiento por deformación y su alta capacidad de absorción de energía.

En relación a la conformación de mallas de acero, éstas son en general electrosoldadas a través de procesos de soldadura por resistencia (RW: Resistance Welding), donde el calor generado para producir la unión surge de la resistencia que oponen las piezas de trabajo al paso de la corriente eléctrica, bajo la acción de presión mecánica. Específicamente, para la fabricación de mallas electrosoldadas a partir de la unión de barras, donde el número de soldaduras a realizar al mismo tiempo es elevado, se utiliza el proceso de soldadura por proyección, (PW: Projection Welding) el cual es una variante de RW. En este caso, el flujo de corriente es concentrado en puntos de contacto entre las partes a ensamblar, los cuales son utilizados para concentrar el calor durante el proceso de unión. La operación de soldadura PW implica la aplicación coordinada de corriente eléctrica y presión mecánica donde, la secuencia de operación debe, en primer lugar, generar suficiente calor para llevar un volumen

confinado del metal a la temperatura de forjado, y, en segundo lugar, el metal se enfría bajo presión (Zhang et al, H (2006)).

Objetivos

El objetivo de este trabajo es comparar las microestructuras y propiedades mecánicas de aceros DP obtenidos a partir de tratamientos térmicos de austenización parcial de barras de acero comercial ADN 420 S a fin de obtener un producto utilizable en la soldadura de mallas electrosoldadas para refuerzo de hormigón (IRAM-IAS U 500 006 (2016)).

Materiales y métodos

Para dar cumplimiento a este objetivo se partió de un acero comercial del tipo ADN 420 S, cuya composición química se muestra en la Tabla 1.

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Ceq
%	0,183	0,205	0,921	0,014	0,024	0,042	0,027	0,086	0,352

Tabla 1. Composición química de la barra ADN 420 S

Para la fabricación de las barras ADN 420 S, la barra laminada en caliente se somete a un sistema de enfriamiento con agua a presión, quedando la capa superficial de la barra con una estructura endurecida, mientras el núcleo permanece con una estructura austenítica. Luego de este enfriamiento en agua, la barra queda

expuesta al enfriamiento al aire, donde el calor latente del núcleo, le produce un revenido a la estructura martensítica de la capa superficial, mientras que la austenita del núcleo transforma a ferrita y perlita. La heterogeneidad microestructural de las barras, hizo necesario someter a las muestras de Acero ADN 420 S a un tratamiento térmico de normalizado a 850 °C, durante 20 min y enfriamiento al aire. Posteriormente, se realizaron templados intercríticos sobre las barras a temperaturas entre 710°C y 830°C. El tiempo de mantenimiento fue de 30 minutos y el enfriamiento se realizó en agua. (Tabla 2). Se trataron dos probetas por condición.

Probeta	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
I 71	710	30
I 73	730	30
I 75	750	30
I 77	770	30
I 79	790	30
I 81	810	30
I 83	830	30

Tabla 2. Condiciones del tratamiento térmico de austenización parcial

El rango de los tratamiento térmicos fue seleccionado en base a los límites intercríticos propuestos por el volumen 4 del Handbook (ASM Handbook, 1991)

$$A_{c1}(^{\circ}\text{C}) = 723 - 20,7(\% \text{ Mn}) - 16,9(\% \text{ Ni}) + 29,1(\% \text{ Si}) - 16,9(\% \text{ Cr})$$

$$\text{Desviación estándar} = \pm 11,5 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad [1]$$

$$A_{c3}(^{\circ}\text{C}) = 910 - 203 \sqrt{(\% \text{ C})} - 15,2(\% \text{ Ni}) + 44,7(\% \text{ Si}) + 104(\% \text{ V}) + 31,5(\% \text{ Mo})$$

$$\text{Desviación estándar} = \pm 16,7 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad [2]$$

Según las correlaciones indicadas, los límites A_{c1} y A_{c3} son 709 °C y 832 °C, respectivamente.

Sobre cada una de las probetas templadas a diferentes temperaturas se realizó un revenido a 200 °C, durante 10 minutos y enfriamiento dentro del horno con puerta abierta (Tabla 3).

Probeta*	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
R 71	200	10
R 73	200	10
R 75	200	10
R 77	200	10
R 79	200	10
R 81	200	10
R 83	200	10

*Previa Austenización parcial

Tabla 3. Probetas templadas intercríticamente a las temperaturas indicadas en la Tabla 2 y posteriormente revenidas

Las probetas así obtenidas, templadas/revenidas y solo templadas, fueron preparadas para caracterización metalográfica (Microscopio óptico metalúrgico invertido XJL-20), para ello se cortaron muestras de tamaño metalográfico, las cuales fueron pulidas con papeles abrasivos de diferentes granulometrías (60, 120, 220, 320, 400 y 600). El pulido final se realizó con pasta diamantada de 6 y 1 μm . Para revelar la microestructura se utilizó Nital 2.

La evaluación mecánica se llevó a cabo mediante pruebas de microdureza con 1000 gf y 10 segundos de mantención (Microdurómetro Vickers DIGIMESS MHVD-1000 LCD), realizándose 5 improntas por muestra según la secuencia indicada en la Figura 1. Además, se realizaron ensayos de tracción en una Máquina Universal de Ensayos DIGIMESS de 600 kN de capacidad, determinándose el límite proporcional ($R_{p0,2}$), la resistencia a la tracción (R_m) y el alargamiento a rotura (A %).

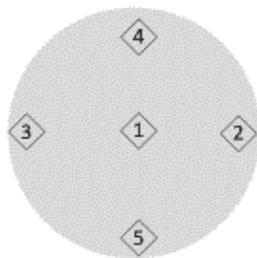


Figura 1. Esquema de indentaciones realizadas (Microdurómetro Vickers)

DIGIMESS MHVD-1000 LCD)

Resultados y discusión

La microfotografía de la Figura 2 permite observar la microestructura del acero ADN 420 S, como puede verse, se trata de una microestructura ferrítico perlítica típica de estos aceros.



Figura 2. Microestructura del metal base

La microdureza para este material fue de 158 Hv_1 . En cuanto a los resultados de la prueba de tracción, éstos pueden ser observados en la Tabla 4.

Probeta	$R_{p0,2}$ [Mpa]	R_m [Mpa]	A [%]	R_m/R_p
ADN 420 S	529	612	17,4	1,2

Tabla 4. Resultados de los ensayos de tracción en el acero ADN 420 S

En cuanto al tratamiento térmico de normalizado, la Figura 3 muestra la microestructura del acero ADN 420 S luego de normalizada. Asimismo, en la Tabla 5 se observan los resultados del ensayo de tracción. Por su parte, la microdureza permaneció constante (158 Hv_1) en

relación al material sin normalizar.

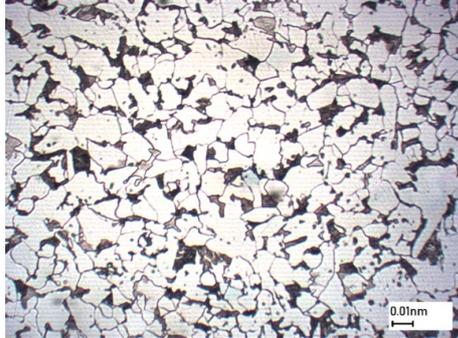


Figura 3. Barra de acero ADN 420 S normalizada (850 °C - 20 min - enfriamiento al aire)

Probeta	Rp _{0,2} [Mpa]	Rm [Mpa]	Rm/Rp	A [%]
ADN 420 S Normalizada	350	524	1,5	17,4

Tabla 5. Resultados de los ensayos de tracción en el acero ADN 420 S normalizado

Metalografía

En la Figura 4 se muestran microfotografías tomadas a 500 X de las muestras templadas intercríticamente a diferentes temperaturas y aquellas templadas y luego revenidas.

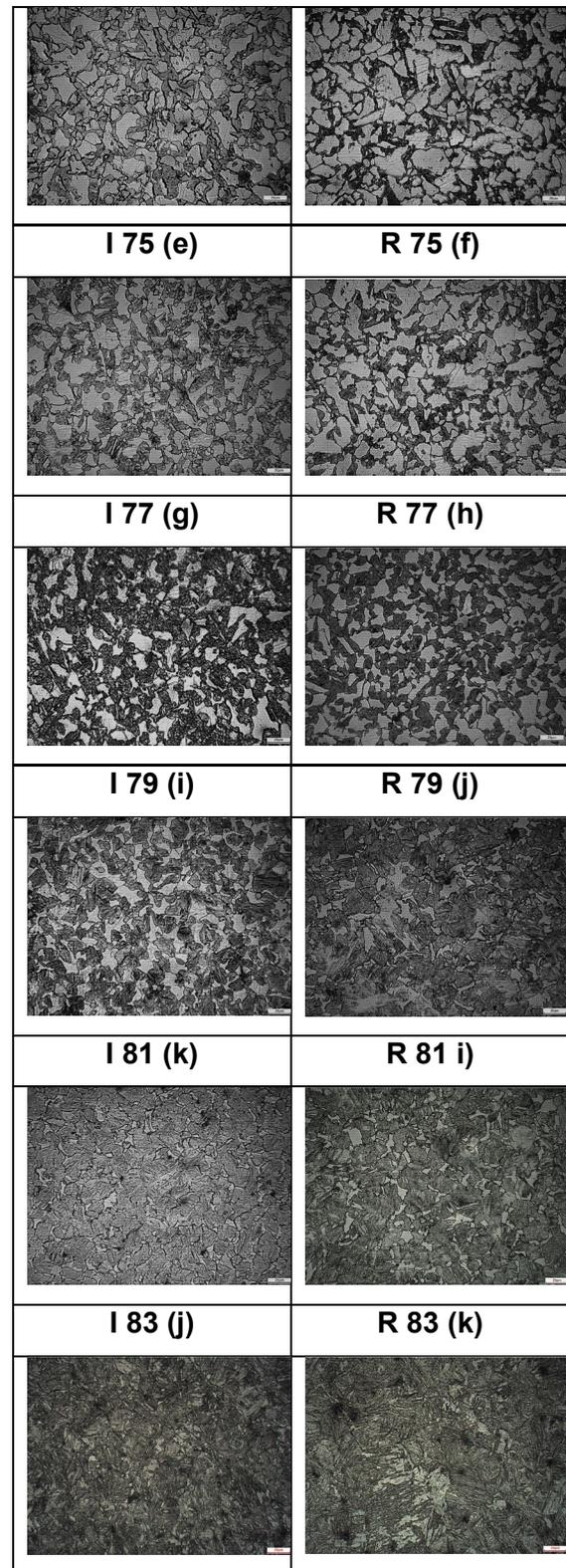
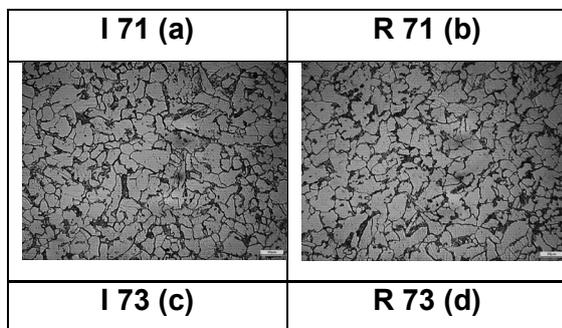


Figura 4. Microfotografías de las muestras I (austenizadas parcialmente) y R

(austenizadas parcialmente y luego revenidas)

En todos los casos, puede observarse, el incremento en el contenido de martensita al aumentar la temperatura de tratamiento térmico desde 730 a 830 °C. Esta observación se corroboró cuantitativamente, a partir de la medición de fases realizadas (ASTM E 562 – 02 (2002)) (Tabla 6). La probeta tratada a 710 °C presenta estructura ferrítico perlítica, debido a que no se superó la temperatura subcrítica.

Probeta	% Ferrita	% Martensita
I 71*	FERRITA/PERLITA	
I 73*	63	37
I 75*	58	42
I 77*	55	45
I 79*	28	72
I 81*	14	86
I 83*	7	93

Tabla 6. Resultados de la cuantificación de fases

En la Figura 5 se puede observar la variación de la cantidad de ferrita y martensita para las probetas templadas intercríticamente.

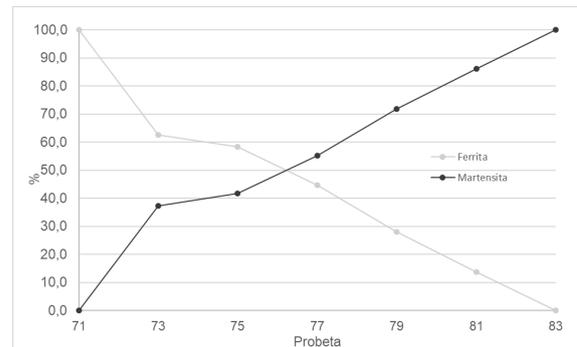


Figura 5. Evolución de la cantidad de ferrita y martensita para las probetas tratadas intercríticamente.

Propiedades mecánicas

Ensayo de tracción

La Norma IRAM IAS U 500-026 establece los requerimientos mínimos para barras ATR 500 N para el conformado de mallas electrosoldadas (Tabla 7).

Designación del alambre	Límite convencional de fluencia característico ^a	Resistencia a la tracción característica ^a	Alargamiento porcentual de rotura característico ^a
	R _{p0,2}	R	A ₁₀
	MPa	MPa	%
ATR 500	500	550	6

^a Ver 3.6.

Tabla 7. Características mecánicas obtenidas del ensayo de tracción para barras ATR 500 N

En la misma norma se establece, además, que el valor de la resistencia a la tracción debe ser igual o mayor que 3 % del valor del límite convencional a fluencia obtenido en el ensayo para cada determinación individual.

Asimismo, el reglamento argentino para estructuras sismorresistentes prevé una relación R_m/R_p mínima de 1,25 para las barras utilizadas en estas estructuras (CIRSOC 103 – Parte 2 (2005)). Actualmente, las barras ADN 420 cumplen el requerimiento, pero su homónima soldable (ADN 420 S) no lo hace.

Los resultados obtenidos muestran que las probetas austenizadas parcialmente, sin revenir, en ningún caso alcanzan los requerimientos mínimos establecidos por dicha norma, principalmente debido a que no se alcanzó el mínimo porcentaje de alargamiento requerido en las probetas ferrítico martensíticas. Sin embargo, la probeta R 79, es decir, templada parcialmente a 790 °C y luego revenida, alcanzó los requerimientos mínimos establecidos por norma, así como también una buena relación entre R_m/R_p , superior a lo requerido por el reglamento argentino aplicable (Tabla 8).

I 83	1025	1423	1,39	5,5
R 71	396	679	1,71	6,0
R 73	439	875	1,99	5,5
R 75	497	975	1,96	6,0
R 77	566	1018	1,80	5,4
R 79	689	1140	1,65	6,3
R 81	890	1245	1,40	3,3
R 83	1121	1396	1,25	5,5

Tabla 8. Resultados de tracción para las probetas I (austenizadas parcialmente) y R (austenizadas parcialmente y luego revenidas)

En la figura 6 se puede observar la gráfica tensión-deformación específica (σ - ϵ) donde se evidencia la fluencia continua que presentan los aceros DP y a su vez, se observa el efecto del revenido, disminuyendo levemente las resistencias R_p y R_m y, generando un incremento de la elongación porcentual.

Probeta	$R_{p0,2}$ [Mpa]	R_m [Mpa]	R_m/R_p	A [%]
I 71	386	605	1,57	9,0
I 73	489	957	1,96	5,0
I 75	523	1015	1,94	5,0
I 77	635	1102	1,74	4
I 79	674	1180	1,75	4,5
I 81	857	1304	1,52	3,8

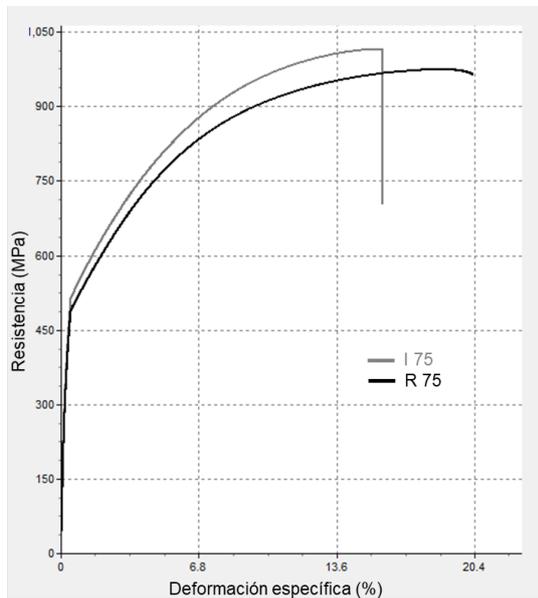


Figura 6. Gráfica (σ - ϵ) para la probeta I 75 ($R_m = 1015$ MPa) y R 75 ($R_m = 975$)

Microdureza

Las probetas I 71 presentó valores de microdureza correspondientes a una estructura ferrítico perlítica, lo que también pudo evidenciarse en la microfotografía correspondiente (Figura 4 (a)).

Para el resto de las muestras, se observaron valores de microdureza acordes a estructuras ferrítico martensíticas, donde la dureza se incrementa consecuentemente con el aumento de fase martensítica. Asimismo, las probetas revenidas a 200 °C y 10 minutos de mantención, presentaron valores de dureza menores que las solo austenizadas parcialmente debido a que se genera la segregación por difusión del carbono en las dislocaciones con la

consecuente formación de precipitados de carburos de hierro e y de cementita provocado por el tratamiento térmico (Rodríguez-Baracaldo *et al.* (2016)) (Tabla 9).

PROBETA	HV ₁
I 71	196
I 73	292
I 75	316
I 77	340
I 79	353
I 81	378
I 83	441
R 71	177
R 73	226
R 75	240
R 77	310
R 79	353
R 81	394
R 83	450

Tabla 9. Valores de microdureza medidos en las probetas I (austenizadas parcialmente) y R (austenizadas parcialmente y luego revenidas)

Conclusiones

A partir de los tratamientos térmicos ejecutados, se pudo obtener un acero Dual Phase obtenido de un acero al carbono comercial.

Se comprobó experimentalmente que los límites A_{c1} y A_{c3} se condicen con la correlación matemática adoptada.

La resistencia proporcional (R_p), la resistencia máxima (R_m) y la dureza aumentan con la temperatura de tratamiento térmico de austenización parcial. No obstante, para las probetas solo templadas intercríticamente, la elongación no cumplió con el mínimo establecido por norma.

El tratamiento térmico de revenido, a partir de su efecto sobre la difusión del carbono, permitió que la probeta R 79 alcance la elongación mínima establecida por la norma IRAM IAS U 500 026.

Para los tratamientos térmicos intermedios dentro del rango austenítico, las barras de acero DP presentaron una excelente relación R_m/R_p que le confiere a las estructuras un amplio margen de seguridad desde el punto de vista resistente. En este sentido, la probeta R 79 alcanzó una relación R_m/R_p de 1,65 superior a lo establecido en el reglamento argentino para estructuras sismorresistentes, lo que reafirma alto coeficiente de endurecimiento por deformación característico de estos materiales.

Bibliografía

ASM Handbook Volumen 4. Heat Treating. 1991
ASTM E 562 – 02. Standard Test Method for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count. ASTM

International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.

CIRSOC. Reglamento Argentino para Estructuras Sismoresistentes – Parte II. Av. Leandro N. Alem 1067 – 7° piso - Buenos Aires. 2005

IRAM-IAS U 500 06. Mallas de alambres de acero soldados para armadura en estructuras de hormigón. Perú 552/6, C1068AAB, Buenos Aires, Argentina. 2016.

IRAM-IAS U 500 26. Alambres de acero para armadura en estructuras de hormigón. Perú 552/6, C1068AAB, Buenos Aires, Argentina. 2016.

IRAM-IAS U 500 207. Barras de acero conformadas de dureza natural soldables, para armadura en estructuras de hormigón. Perú 552/6, C1068AAB, Buenos Aires, Argentina. 2004.

IRAM-IAS U 500 528: barras de acero conformadas de dureza natural, para armadura en estructuras de hormigón. Perú 552/6, C1068AAB, Buenos Aires, Argentina. 2004.

Kelesternur, O., Halidun Kelestemur M. & Yildiz, S. (2009). Improvement of Mechanical Properties of Reinforcing Steel Used in the Reinforced Concrete Structures. *Journal of Iron and Steel Research International*, 16 (3), 55-63.

- Maffei, B., Salvatore, W. & Valentini, R. (2007). Dual-phase steel rebars for high-ductile r.c. structures, Part 1: Microstructural and mechanical characterization of steel rebars. *Engineering Structures*, 29, 3325-3332.
- Menéndez Méndez, Esperanza. (2014). *Interacción del hormigón con el medioambiente. Acciones físico-químicas* [Cursos avanzados Eduardo Torroja "Durabilidad, Rehabilitación y Sostenibilidad].
- Rodríguez-Baracaldo, R., Arroyo-Osorio, J.M., Parra-Rodríguez, Y. (2016). Influencia del proceso de revenido en el comportamiento mecánico de un acero de fase dual de uso industrial automotriz. *Ingeniare. Rev. chil. ing.* vol.24 no.1. ISSN 0718-3305.
- Zhang, H., Hang, H. & Senkara, J. (2006). *Resistance Welding: Fundamentals and Applications*. CRC Press.