

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL Y DE RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DE ARMADURAS DE ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO AISI 304 Y DÚPLEX AISI 2304

Eduardo MEDINA SÁNCHEZ

Arquitecto Técnico
E. U. de Arquitectura Técnica de Madrid
Profesor Titular Interino
eduardo.medina@upm.es

Alfonso COBO ESCAMILLA

Dr. Ingeniero Industrial, Arquitecto y A. Técnico
E. U. de Arquitectura Técnica de Madrid
Catedrático de Escuela Universitaria
alfonso.cobo@upm.es

David MARTÍNEZ BASTIDAS

Dr. Ciencia y Tecnología de los Materiales
CENIM-CSIC
Investigador Ramón y Cajal
david.bastidas@cenim.csic.es

RESUMEN

Se ha evaluado el comportamiento mecánico y estructural de dos aceros inoxidable corrugados, el austenítico EN 1.4301 (AISI 304) y el dúplex EN 1.4362 (AISI 2304), y se han comparado con el tradicional acero al carbono B500SD. El estudio se ha realizado en tres niveles: a nivel de barra, estudiando las propiedades mecánicas y de ductilidad de los tres aceros; a nivel de sección, analizando el comportamiento a flexión por medio de diagramas momento-curvatura; y a nivel de pieza, ensayando una serie de vigas armadas con diferentes aceros y cuantías, y comprobando su comportamiento por medio de los diagramas carga-desplazamiento.

La comparación del comportamiento frente a la corrosión entre los dos aceros inoxidable se ha realizado mediante mediciones electroquímicas de armaduras embebidas en probetas de mortero contaminado con diferentes cuantías de cloruros.

PALABRAS CLAVE: Inoxidable, armaduras, durabilidad, corrosión, cloruros, ductilidad, hormigón.

1. Introducción

La característica que singulariza el corrugado de acero inoxidable frente al de acero al carbono es su excelente resistencia a la corrosión desencadenada por los iones cloruro. Los aceros inoxidable austeníticos y dúplex son los tipos recomendados para su utilización en el hormigón. El austenítico es el más utilizado y es conocida su resistencia a la corrosión en hormigones con gran contenido de cloruros. Su tolerancia a los cloruros es de 5 a 10 veces superior a la del acero al carbono [1]. El acero inoxidable dúplex es más económico que el austenítico, por su menor contenido de níquel, y sin embargo, presenta una mayor resistencia a la corrosión por picaduras de cloruros [2]. En todos los casos, los aceros inoxidable permiten relajar unas medidas de durabilidad del hormigón pensadas, en su origen, para proteger el acero al carbono [3-4].

Además, diferentes estudios demuestran que el uso combinado de barras de acero inoxidable y acero al carbono en la armadura de una misma estructura de hormigón no aumenta el riesgo de corrosión de dicha armadura en comparación con una armadura únicamente de acero al carbono,

incluso cuando dichas barras están en contacto eléctrico directo [5-6].

Por lo tanto, la utilización de armaduras de acero inoxidable, del tipo austenítico o dúplex, en la estructura completa, o sólo en algunos de sus elementos que vayan a estar expuestos a ambientes agresivos, especialmente con presencia de iones cloruro, mejora notablemente la durabilidad de la estructura, por lo que es una alternativa que está recibiendo cada vez más consideración, a pesar de su alto coste inicial en comparación con el acero al carbono.

Sin embargo, la utilización de armaduras de acero inoxidable es escasa y no se tiene conocimiento con detalle de su comportamiento mecánico y estructural, como sí se tiene del acero al carbono.

2. Experimental

Para evaluar el comportamiento mecánico y estructural de los aceros inoxidables corrugados, se han comparado dos tipos, el austenítico AISI 304 (EN 1.4301) y el dúplex AISI 2304 (EN 1.4362), cuya composición química se recoge en la Tabla 1, junto al acero al carbono B500SD. El estudio se ha realizado a nivel de barra, de sección y de pieza.

A nivel de barra, el estudio se ha desarrollado experimentalmente, ensayando a tracción barras corrugadas de diferentes diámetros de acuerdo a las normas UNE-EN 10002-1 y UNE-EN ISO 15630-1 [7-8], y analíticamente, estudiando los parámetros de ductilidad de cada uno de los aceros ensayados. Para los ensayos se eligieron los diámetros nominales de 8, 16 y 20 mm, el primero laminado en frío y los otros dos en caliente. Se han ensayado dos probetas de cada tipo.

Tabla 1 Composición química de los aceros ensayados [%].

| Acero | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Cu | N | Mo |
|-----------|------|------|------|--------|-------|-------|------|------|------|------|
| AISI 304 | 0,07 | 0,75 | 2,00 | 0,075 | 0,015 | 18,50 | 9,00 | - | - | - |
| AISI 2304 | 0,03 | 1,00 | 2,00 | 0,035 | 0,010 | 23,00 | 3,50 | 0,20 | 0,10 | 0,20 |
| B500SD | 0,45 | 0,22 | 0,72 | < 0,01 | 0,022 | 0,13 | 0,13 | 0,18 | - | - |

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos de tracción, se han calculado los parámetros de ductilidad de los tres aceros, de acuerdo a los siguientes criterios:

- El establecido en diferentes normativas europeas, concretamente la instrucción EHE-08, el Código Modelo 90, los Eurocódigos 2 y 8 [9-12], mediante los dos parámetros siguientes: la relación entre la carga de rotura y el límite elástico f_s/f_y o ratio de endurecimiento a tracción, y la deformación para la carga máxima $\varepsilon_{m\acute{a}x}$.
- El concepto de acero equivalente según el parámetro p de Cosenza (ec. 1), el área A_{nom} definido por Creazza (ec. 2) y el índice de tenacidad I_d de Ortega (ec. 3) [13-15]. Donde ε_{sh} es la deformación unitaria al final del escalón de cedencia (en su caso) y ε_y la deformación en el límite elástico.

$$p = \left(\frac{f_s}{f_y} - 1 \right)^{0,9} (\varepsilon_{m\acute{a}x} + 3\varepsilon_{sh})^{0,75} \quad (1)$$

$$A_{nom} = \frac{2}{3} (\varepsilon_{m\acute{a}x} - \varepsilon_y) (f_s - f_y) \quad (2)$$

$$I_d = \left(1 + \frac{f_s}{f_y} \right) \left(\frac{\varepsilon_{m\acute{a}x}}{\varepsilon_y} - 1 \right) \quad (3)$$

c.- La propuesta del CEB (Comité Euro-International du Béton) de una nueva clasificación de ductilidad del acero, basándose en la formulación de Cosenza, que para el de alta ductilidad o Clase S establece los siguientes límites [16]:

$$\left(\frac{f_t}{f_y} - 1 \right)_k \geq 0,13 \quad \text{y} \quad \varepsilon_u \geq 9\% \quad (4)$$

$$\left(\frac{f_t}{f_y} - 1 \right)_k \geq 0,15 \quad \text{y} \quad \varepsilon_u \geq 6\% \quad (5)$$

$$\left(\frac{f_t}{f_y} - 1 \right)_k \geq 0,17 \quad \text{y} \quad \varepsilon_u \geq 5\% \quad (6)$$

Respecto al estudio a nivel de sección, se han elaborado, por iteración, los diagramas momento-curvatura de dos secciones de vigas tipo, una viga plana de 50 x 30 cm y otra de canto de 30 x 50 cm, ambas armadas con diferentes cuantías de armadura (Tabla 2) y para cada uno de los aceros considerados, al carbono e inoxidable. Los armados se corresponden con un cálculo real de viga en edificación, completados con otros armados intermedios para elaborar los diagramas. A partir de los diagramas obtenidos, se han comparado los valores de ductilidad de la sección.

Tabla 2 Vigas consideradas en el estudio a nivel de sección.

| Vigas planas 50 x 30 cm | | | | Vigas de canto 30 x 50 cm | | | |
|-------------------------|----------|-----------|---------------|---------------------------|------------------|-----------|-------------------------------|
| Nº | Armadura | Cuantía ‰ | Observación | Nº | Armadura | Cuantía ‰ | Observación |
| P1 | 4 Ø12 | 3,02 | Cuantía mín. | C1 | 4 Ø12 | 3,02 | Cuantía mín. |
| P2 | 3 Ø16 | 4,02 | | C2 | 2 Ø16 y 1 Ø12 | 3,43 | ELU (flexión) ELS (flecha) |
| P3 | 5 Ø16 | 6,70 | ELU (flexión) | | | | |
| P4 | 6 Ø16 | 8,04 | ELS (fis.) | C3 | 4 Ø16 | 5,36 | ELS (fis.) |
| P5 | 7 Ø16 | 9,38 | | | | | |
| P6 | 5 Ø20 | 10,47 | | C4 | 6 Ø16 | 8,04 | |
| P7 | 6 Ø20 | 12,57 | | C5 | 6 Ø20 | 12,57 | |
| P8 | 8 Ø20 | 16,76 | ELS (flecha) | C6 | 8 Ø20 | 16,76 | |

Para el estudio a nivel de pieza, se han fabricado cuatro vigas de hormigón de 10 x 15 cm de sección y 1 metro de longitud, armadas con cercos Ø 8 colocados a 45° y a 7 cm en las vigas 1 y 3, y a 10 cm en las vigas 2 y 4, y longitudinalmente de la siguiente forma:

- Viga 1: dos barras Ø8 de acero B500SD.
- Viga 2: dos barras Ø16 de acero B500SD.
- Viga 3: dos barras Ø8 de acero dúplex AISI 2304.
- Viga 4: dos barras Ø16 de acero dúplex AISI 2304.

Las vigas se han ensayado hasta la rotura a flexión, aplicando la carga en dos puntos equidistantes a un tercio de la longitud de la viga, y se ha comprobando el comportamiento a desplazamiento y resistencia por medio de los diagramas carga-desplazamiento.

Para el estudio de la resistencia a la corrosión por cloruros, se han elaborado cuatro probetas de mortero para cada uno de los dos aceros inoxidable, dosificadas respectivamente con 0, 0,4, 2 y 4 % de CaCl_2 en peso de cemento, en cada una de las cuales se han embebido dos barras corrugadas de 8 mm de diámetro. Las probetas se han curado durante 28 días y después se han mantenido en un recipiente hermético, con un 95 % aproximado de humedad, durante todo el periodo de tiempo en el que se han realizado los ensayos electroquímicos. Se ha medido la evolución en el tiempo del potencial de corrosión E_{corr} y de la resistencia de polarización R_p , a partir de la cual se ha obtenido la intensidad de corrosión i_{corr} .

3. Resultados y discusión

3.1. Ensayos a tracción de las armaduras

Los resultados de los ensayos de tracción de las barras corrugadas de los tres aceros, se recogen en la Tabla 3 (valores medios de las dos probetas ensayadas por cada diámetro y acero).

Tabla 3 Resultados medios de los ensayos de tracción de los tres aceros.

| Acero | Ø (mm) | f_s (N/mm ²) | f_y (N/mm ²) | E (N/mm ²) | ϵ_y (%) | $\epsilon_{\text{máx}}$ (%) | ϵ_{sh} (%) |
|-----------|--------|----------------------------|----------------------------|------------------------|------------------|-----------------------------|----------------------------|
| B-500-SD | 8 | 875 | 684 | 216.000 | 0,60 | 8,37 | - |
| | 16 | 736 | 602 | 207.000 | 0,54 | 13,32 | 1,50 |
| | 20 | 671 | 556 | 206.000 | 0,51 | 11,84 | 1,09 |
| AISI 304 | 8 | 1060 | 1027 | 145.000 | 1,14 | 5,82 | - |
| | 16 | 743 | 548 | 174.000 | 0,55 | 18,68 | - |
| | 20 | 728 | 507 | 179.000 | 0,52 | 30,12 | - |
| AISI 2304 | 8 | 1.066 | 1.003 | 189.000 | 0,85 | 7,02 | - |
| | 16 | 711 | 529 | 179.000 | 0,53 | 24,46 | - |
| | 20 | 747 | 609 | 184.000 | 0,57 | 25,62 | - |

Se comprueba que la resistencia máxima f_s y el límite elástico f_y sólo presentan diferencias con motivo del proceso de fabricación de las barras, laminadas en caliente o en frío, y no por el tipo de acero con el que están elaboradas. Las barras laminadas en caliente de los tres aceros toman valores de resistencia en el límite elástico entre 507 y 609 N/mm², por lo que a efectos de cálculo estructural, el valor característico de 500 N/mm² parece también el adecuado para los aceros inoxidable. Respecto a las barras laminadas en frío (Ø 8 mm), toman valores un 50 % más altos las de acero inoxidable que las de acero al carbono.

En cambio, respecto al módulo de elasticidad E, las diferencias son notables entre el acero al carbono y los inoxidable, y sin embargo, son despreciables por los diámetros de las barras o su proceso de fabricación. Sólo las barras laminadas en frío de acero inoxidable AISI 304 tienen valores claramente inferiores a sus homólogas laminadas en caliente.

Se desprende que el valor del módulo de elasticidad que se debe establecer para las armaduras de acero inoxidable es inferior a los 200.000 N/mm² que la instrucción EHE-08 fija para los aceros al carbono. Para este estudio se ha tomado como valor garantizado 170.000 N/mm². En algunos trabajos se pueden encontrar resultados similares [17-18] incluso en el caso de perfiles de acero austenítico laminados en frío [19].

3.2. Parámetros de ductilidad de las armaduras

A partir de los resultados de los ensayos de tracción, se han calculado los parámetros de ductilidad de cada armadura que se resumen en la Tabla 4.

En términos de f_s/f_y y de deformaciones máximas $\epsilon_{m\acute{a}x}$, hay diferencias notables entre los tipos de acero y entre los sistemas de fabricación. En el caso de las barras laminadas en caliente, todos los aceros cumplen con los requisitos mínimos de ductilidad que establecen las normativas consideradas pero, mientras que las barras de acero al carbono se quedan muy cerca de dichos límites mínimos, las barras de acero inoxidable los superan muy por encima, especialmente las deformaciones máximas, que llegan a duplicar a las del acero B500SD para algunos diámetros.

Tabla 4 Parámetros de ductilidad de las armaduras ensayadas.

| Acero | Ø (mm) | f_s/f_y | $\epsilon_{m\acute{a}x}$ (%) | ρ | A_{nom} (N/mm ²) | Id |
|-----------|--------|-----------|------------------------------|--------|--------------------------------|-----|
| B-500-SD | 8 | 1,28 | 8,37 | 1,56 | 1.025 | 58 |
| | 16 | 1,22 | 13,32 | 2,24 | 1.160 | 99 |
| | 20 | 1,21 | 11,84 | 1,85 | 885 | 94 |
| AISI 304 | 8 | 1,03 | 5,82 | 0,17 | 113 | 15 |
| | 16 | 1,36 | 18,68 | 3,55 | 2.383 | 138 |
| | 20 | 1,44 | 30,12 | 6,11 | 4.381 | 257 |
| AISI 2304 | 8 | 1,06 | 7,02 | 0,36 | 271 | 25 |
| | 16 | 1,34 | 24,46 | 4,22 | 2.937 | 193 |
| | 20 | 1,23 | 25,62 | 2,98 | 2.321 | 170 |

En cambio, en el caso de las barras laminadas en frío, diámetros Ø 8, se comprueba que, mientras las de acero B500SD cumplen con todos los requisitos de ductilidad, las armaduras de acero inoxidable sólo se acercan a los límites del Eurocódigo 2, que son los menos exigentes.

En cuanto a los criterios de ductilidad según el concepto de acero equivalente, los aceros inoxidables consiguen índices muy superiores a los del acero al carbono, a excepción nuevamente de las barras laminadas en frío, que alcanzan altas resistencias con escasas deformaciones.

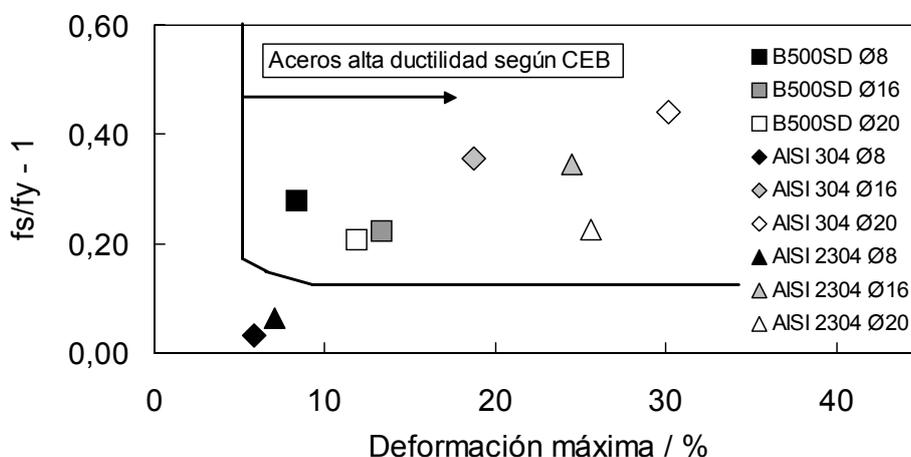


Figura 1. Clasificación de ductilidad del acero tipo S propuesta por el CEB y los parámetros obtenidos del acero al carbono B500SD y los inoxidables AISI 304 y 2304.

En el caso concreto del diámetro \varnothing 20 del acero AISI 304, el valor medio del parámetro p obtenido es de 6,11, lo que supone tener una capacidad de rotación $6,11/1,85 = 3,3$ veces superior a la barra similar de acero al carbono. En cambio, las barras de acero AISI 304 laminadas en frío tienen un parámetro p medio de 0,17 frente a 1,56 de sus homólogas de acero al carbono, es decir, proporcionan una capacidad de rotación 9,2 veces inferior.

Si se analiza la clasificación de ductilidad según la propuesta que realizó el CEB, los resultados se recogen en la figura 1. La línea quebrada gruesa establece el límite mínimo de valores para los aceros de alta ductilidad tipo "S" (según las ec. 4-6). Las dos armaduras que quedan fuera de la línea quebrada se corresponden a los diámetros inoxidables laminados en frío.

3.3. Cálculos a nivel de sección

A partir de los diagramas momento-curvatura calculados de las secciones de viga consideradas, en la Tabla 5 se recogen los resultados de curvatura elástica φ_e , curvatura última φ_u y ductilidad de la sección D_s , para el armado con acero al carbono y con acero inoxidable.

Tabla 5 Curvaturas y ductilidad de la sección de las vigas armadas con acero al carbono y acero inoxidable.

| Viga | | Acero al carbono | | | Acero inoxidable | | |
|----------------------------|----|---|---|-------------------------------|---|---|-------------------------------|
| | | φ_e ($\text{mm}^{-1} 10^{-6}$) | φ_u ($\text{mm}^{-1} 10^{-6}$) | $D_s = \varphi_u / \varphi_e$ | φ_e ($\text{mm}^{-1} 10^{-6}$) | φ_u ($\text{mm}^{-1} 10^{-6}$) | $D_s = \varphi_u / \varphi_e$ |
| Plana 50x30 cm | P1 | 11,45 | 46,57 | 4,07 | 13,13 | 46,57 | 3,55 |
| | P2 | 12,05 | 48,53 | 4,03 | 13,87 | 48,69 | 3,51 |
| | P3 | 13,64 | 53,69 | 3,94 | 15,64 | 53,69 | 3,43 |
| | P4 | 14,53 | 45,04 | 3,10 | 16,69 | 45,04 | 2,70 |
| | P5 | 15,63 | 38,61 | 2,47 | 18,16 | 38,61 | 2,48 |
| | P6 | 16,89 | 34,59 | 2,05 | 19,10 | 34,59 | 1,81 |
| | P7 | 18,70 | 28,83 | 1,54 | 21,10 | 28,83 | 1,31 |
| | P8 | 14,18 (*) | 22,33 | 1,58 | 14,92 (*) | 23,37 | 1,57 |
| De canto 30x50 cm | C1 | 6,30 | 25,69 | 4,08 | 7,28 | 25,69 | 3,53 |
| | C2 | 6,43 | 26,11 | 4,06 | 7,42 | 26,11 | 3,52 |
| | C3 | 7,01 | 28,15 | 4,02 | 8,06 | 28,15 | 3,50 |
| | C4 | 7,86 | 27,03 | 3,44 | 9,02 | 27,66 | 3,07 |
| | C5 | 10,02 | 17,30 | 1,73 | 11,29 | 17,30 | 1,53 |
| | C6 | 12,23 | 12,97 | 1,06 | 8,50 (*) | 13,29 | 1,56 |

(*) En estos casos, el acero no alcanza su límite de fluencia. Esta curvatura se obtiene cuando el hormigón alcanza una deformación máxima del 2 ‰.

Los valores de ductilidad de sección son casi siempre superiores en las secciones armadas con acero al carbono que en las armadas con acero inoxidable, con incrementos de 0,01 a 0,55 puntos, es decir, hasta un 15 % de mejora en el caso de la viga C-1.

Esa superior ductilidad de sección con las armaduras de acero al carbono es consecuencia de la mayor curvatura elástica que proporciona a la sección el acero inoxidable, debido a su menor módulo de elasticidad, y de mantener iguales en ambos aceros los valores de las curvaturas últimas, por estar limitadas a la deformación máxima del acero del 10 ‰ según normativa.

Es decir, que un material más dúctil como es el acero inoxidable en comparación con el acero al

carbono, proporciona secciones menos dúctiles. La superior ductilidad del acero inoxidable respecto al acero al carbono se manifiesta para unas deformaciones que quedan fuera del cálculo estructural convencional, es decir, que no se puede aprovechar para aspectos tales como la redistribución de momentos, pero que tiene una ventaja importante en el caso de colapso de la estructura. En este caso, se debería establecer una “curvatura última de rotura” de la sección con una mayor deformación máxima del acero, que seguramente destacaría las excelentes cualidades de ductilidad de las armaduras de acero inoxidable.

3.4. Ensayos a flexión de las vigas

Los resultados de los ensayos a flexión de las cuatro vigas se resumen en la Tabla 6, donde $f_{c,real}$ es la resistencia real del hormigón obtenida de las probetas elaboradas al fabricar las vigas, $Q_{máx}$ es la fuerza de rotura máxima desarrollada por la máquina en el ensayo, $M_{máx}$ es el momento flector de rotura en el centro del vano ($M_{máx} = 0,5 \cdot Q_{máx} \cdot l / 3$), $\delta_{máx}$ es la flecha máxima marcada por la prensa, h_w es la altura de fisura más alta encontrada, medida desde la cara inferior de la viga y s_m es la separación media entre fisuras.

Tabla 6 Resultados de los ensayos de flexión de las cuatro vigas consideradas.

| Viga | Armadura y tipo de acero | $f_{c,real}$ (N/mm ²) | $Q_{máx}$ (kN) | $M_{máx}$ (kNm) | $\delta_{máx}$ (mm) | h_w (mm) | s_m (mm) |
|------|--------------------------|-----------------------------------|----------------|-----------------|---------------------|------------|------------|
| 1 | 2 Ø8 B500SD | 26,57 | 47,46 | 7,91 | 12,9 | 100 | 100 |
| 2 | 2 Ø16 B500SD | 27,37 | 98,93 | 16,48 | 6,3 | 54 | 110 |
| 3 | 2 Ø8 AISI 2304 | 26,57 | 68,21 | 11,37 | 12,6 | 95 | 97 |
| 4 | 2 Ø16 AISI 2304 | 27,37 | 103,72 | 17,28 | 6,7 | 70 | 72 |

En la figura 2 se recoge el diagrama carga-deformación de las cuatro vigas, donde se aprecia cómo el comportamiento de la viga armada con 2 Ø8 de acero al carbono es más dúctil que su homóloga armada con acero inoxidable, aunque alcanza menor carga máxima. Sin embargo, el comportamiento es muy similar entre las vigas armadas con dos Ø16, aunque la rotura de la viga armada con acero inoxidable es más progresiva.

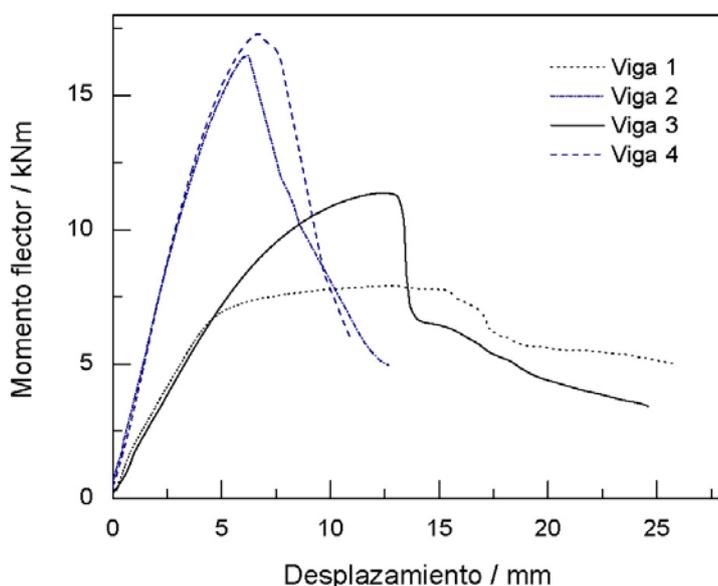


Figura 2. Diagrama carga-deformación de las cuatro vigas ensayadas.

Los cálculos teóricos de flecha instantánea δ y abertura de fisura característica w_k , utilizando la formulación recogida en la instrucción EHE-08, realizados para una carga Q registrada durante el ensayo, arrojan los resultados recogidos en la Tabla 7.

Tanto las flechas como las aberturas de fisura teóricas se corresponden fielmente con las reales medidas en el ensayo, lo que confirma el comportamiento de los aceros de acuerdo a sus características mecánicas obtenidas en los ensayos de tracción. En cambio, la separación media entre fisuras teóricas se corresponden aproximadamente con la mitad de las medidas en el ensayo, pero ésta circunstancia sólo se puede relacionar con las características del hormigón y el tamaño de las vigas, ya que las características del acero no intervienen en el cálculo teórico.

Tabla 7 Flecha, abertura y separación media entre fisuras según cálculo teórico de acuerdo a la EHE-08.

| VIGA | Q (kN) | δ (mm) | w_k (mm) | s_m (mm) |
|------|-----------|------------------|---------------|---------------|
| 1 | 40 | 0,3 | 0,29 | 56 |
| 2 | 90 | 0,1 | 0,13 | 44 |
| 3 | 55 | 0,3 | 0,48 | 56 |
| 4 | 95 | 0,1 | 0,17 | 44 |

3.5.- Resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables

Los ensayos electroquímicos se han realizado disponiendo una celda de tres electrodos: el de referencia (de calomelanos SCE), un contraelectrodo formado por un anillo de guarda de acero inoxidable de 7 cm de diámetro, y el electrodo de trabajo que es la barra corrugada a estudiar.

Para medir el potencial de corrosión E_{corr} , se deja estabilizar la barra de acero al menos veinte minutos una vez conectada al potencióstato. Posteriormente se ha aplicado el método de resistencia de polarización R_p , imponiendo a la barra una pequeña polarización de ± 15 mV, a una velocidad de 0.1667 mV/s, obteniéndose el diagrama I vs. E . La pendiente de la tangente al diagrama en el intervalo de $E_{corr} \pm 0.05$ mV es la R_p buscada. A partir del valor de R_p , se ha calculado la intensidad de corrosión i_{corr} , tomando el valor de 26 mV para el coeficiente B de Stern-Geary [20].

Después de medir R_p , se ha aplicado la técnica de pulsos, imponiendo a cada barra un potencial de + 50 mV durante un par de segundos y registrando la caída de potencial que experimenta la probeta durante los 120 segundos siguientes. A partir del gráfico potencial-tiempo obtenido (figura 3), se calcula gráficamente el valor del producto $C \cdot R_p$ por la distancia desde el origen a la intersección del valor $0,37 \cdot \eta_0$ con la curva descendente, siendo η_0 la altura del gráfico descontada la caída óhmica. El valor de la capacidad de la doble capa C que se tomaba en los cálculos para obtener el valor de R_p es de $5 \mu\text{F}/\text{cm}^2$. A partir de R_p se obtiene nuevamente i_{corr} .

En la figura 4 se muestra la evolución durante los primeros seis meses de los valores de E_{corr} y de i_{corr} de los dos aceros inoxidables, austenítico y dúplex, embebidos en mortero de dosificación 1:3, una relación a/c de 0,5 y un 4 % de cloruro cálcico, que es la cantidad más alta y desfavorable de las estudiadas.

El comportamiento de los dos inoxidables es muy similar entre sí, pero siempre con inferiores valores de intensidad de corrosión en el dúplex. El potencial de corrosión, después de formarse la capa pasiva en ambos aceros, se estabiliza en la franja de valores que se considera de

probabilidad inferior al 10 % para que se presente la corrosión del metal, es decir, superior a -120 mV. Por su parte, la intensidad de corrosión se encuentra muy por debajo del límite de $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, lo que indica una corrosión insignificante en términos de vida útil de la estructura, es decir, los dos aceros se encuentran en estado pasivo.

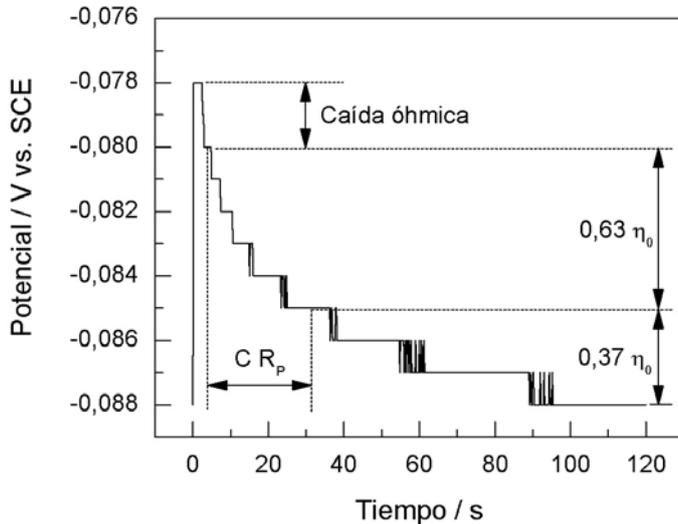


Figura 3. Gráfico obtenido al aplicar un escalón de potencial durante unos segundos.

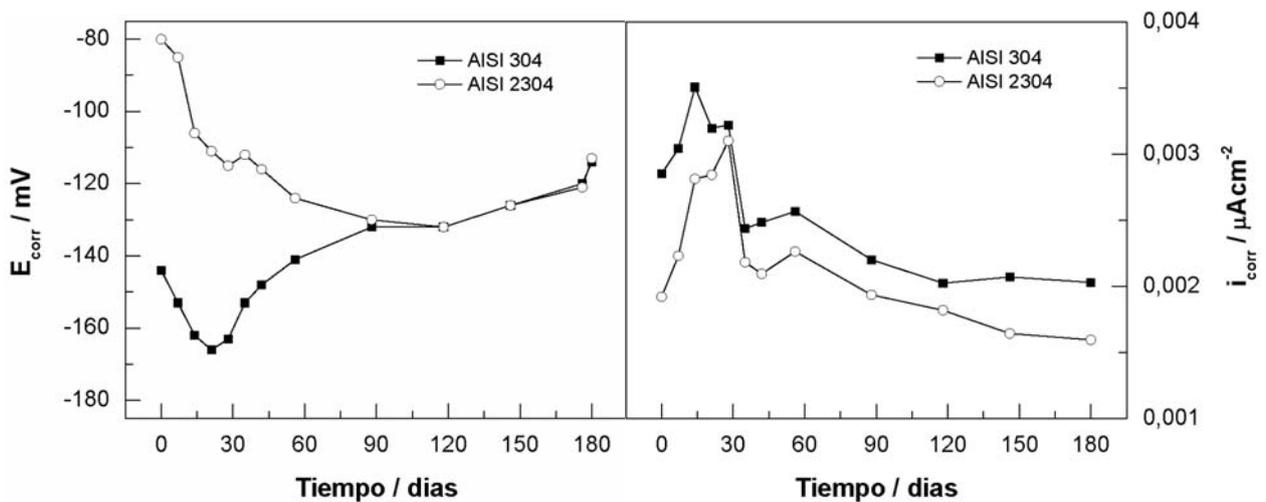


Figura 4. Evolución de los valores de E_{corr} e i_{corr} en mortero con un 4% de cloruros.

4. Conclusiones

Las armaduras de acero inoxidable estudiadas se diferencian del acero al carbono B500SD en dos características mecánicas importantes, por un lado presentan una ductilidad muy superior cuando las barras son laminadas en caliente, y por otro alcanzan un módulo de elasticidad inferior, lo que condiciona su comportamiento a nivel de sección y a nivel de pieza.

Respecto a la resistencia a la corrosión por cloruros, ninguna de las dos armaduras inoxidables presentan valores de intensidad de corrosión que indiquen inicio de corrosión por picaduras tras embeberlas en morteros con hasta un 4 % de cloruro cálcico y mantenerlas con un 95 % de humedad durante seis meses.

- [1] KNUDSEN A. and SKOYSGAARD A., "Stainless steel reinforcement", *Concrete Engineering International* 3, vol. 5, 2001, pp. 59-62.
- [2] BAUTISTA A., BLANCO G., VELASCO F., GUTIERREZ A., PALACÍN S., SORIANO L., y TAKENOUTI H., "Pasivación de aceros inoxidable dúplex en disoluciones que simulan el hormigón contaminado con cloruros". *Materiales de construcción* 57, 288, 2007, pp. 17-32.
- [3] HIGHWAYS AGENCY. *Design Manual for Roads and Bridge. Volume 1. Section 3. Part 15: BA 84/02 Use of Stainless Steel Reinforcement in Highway Structures*, Highways Agency, London, 2002.
- [4] GEDGE G., "Structural properties of stainless steel rebar", *Symposium Structural applications of stainless steel in building and architecture*, EUROINOX, Septiembre 2000, Bruselas. (www.euro-inox.org).
- [5] QIAN S., QU D., and COATES G., "Galvanic coupling between carbon steel and stainless steel reinforcements", *Canadian Metallurgical Quarterly* 4, vol. 45, 2006, pp. 475-484.
- [6] ABREU C.M., CRISTÓBAL M.J., MONTEMOR M.F., NÓVOA X.R., PENA G., y PÉREZ M.C., "Galvanic coupling between carbon steel and austenitic stainless steel in alkaline media", *Electrochimical Acta* 47, 2002, pp. 2271-2279.
- [7] AENOR, *UNE-EN 10002-1 Materiales metálicos. Ensayos de tracción. Parte I: Método de ensayo a temperatura ambiente*. Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, 2002.
- [8] AENOR, *UNE-EN ISO 15630-1 Aceros para el armado y el pretensado del hormigón. Métodos de ensayo. Parte I: Barras, alambres y alambión para hormigón armado*. Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, 2003.
- [9] COMISIÓN PERMANENTE DEL HORMIGÓN, *EHE-08 Instrucción de hormigón estructural*. Ministerio de Fomento, Madrid, 2008.
- [10] AENOR, *UNE-ENV 1992-1-1: EUROCÓDIGO 2 Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación*. Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, 1993.
- [11] AENOR, *EN 1998-1: EUROCÓDIGO 8 Proyecto de estructuras frente a sismo. Parte 1: Reglas generales, acciones sísmicas y reglas para edificación*. Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, 1998.
- [12] GEHO-CEB, *Código modelo CEB-FIP 1990*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, 1995.
- [13] COSENZA E., GRECO C. y MANFREDI, G., "An equivalent steel index in the assessment of the ductility performances of the reinforcement", *Comité Euro-International du Béton*, Bulletin nº 242, Ductility of Reinforced Concrete Structures, Stuttgart, 1998, pp. 157-170.
- [14] CREAZZA G. y RUSSO S., "A new proposal for defining the ductility of concrete reinforcement steels by means of a single parameter", *Comité Euro-International du Béton*, Bulletin nº 242, Ductility of Reinforced Concrete Structures, Stuttgart, 1998, pp. 171-181.
- [15] ORTEGA H., *Estudio experimental de la influencia del tipo de acero en la capacidad de redistribución en losas de hormigón armado*, Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, 1998.
- [16] CEB, *Ductility of reinforced concrete structures*, Comité Euro-International du Béton, Bulletin nº 242, Stuttgart, 1998.
- [17] CASTRO H., RODRIGUEZ C., BELZUNCE F.J. Y CANTELI A.F., "Mechanical properties and corrosion behaviour of stainless steel reinforcing bars", *Journal of Materials Processing Technology* 143-144, 2003, pp. 134-137.
- [18] REAL E., RODRÍGUEZ C., BELZUNCE F.J. Y CANTELI A.F., "Comportamiento a fatiga de armaduras de refuerzo de acero inoxidable dúplex sometidas a shot-peening", *Anales de Mecánica de la Fractura* 25, vol. 1, 2008, pp. 367-372.
- [19] GARDNER L., TALJA A. Y BADDOO N.R., "Structural design of high-strength austenitic stainless steel", *Thin-walled structures* 44, 2006, pp. 517-528.
- [20] STERN M. y GEARY A.L., *Journal of the Electrochemical Society* 104, 1957, pp. 56-63.