

Caracterización de barras corrugadas B-500-S. Estudio comparativo con las barras corrugadas B-400-S

MARÍA DE LA CONCEPCIÓN MERINO CASALS; MARÍA DEL PILAR HIERRO DE BENGÓA; DANIEL GALLARDO TEJERO (*)

RESUMEN En el estudio de las barras corrugadas de acero soldable para estructuras de hormigón armado de la calidad 500 de cuatro fabricantes españoles de los más importantes del mercado nacional, se ha tratado de establecer diferencias y similitudes entre las distintas siderurgias, mediante determinación de la composición, propiedades mecánicas y microestructura. Se realiza un estudio comparativo con las barras B-400-S.

CHARACTERIZATION OF B-500-S CORRUGATED BARS. COMPARATIVE STUDY WITH THE B-400-S CORRUGATED BARS

ABSTRACT A study of weldable steel corrugated bars of concrete structures of B-500-S grade steel from four of the most important Spanish manufactures was carried out in order to establish differences and similarities between them by means composition, mechanical properties and microstructure inspection. A comparative study of with B-400-S grade steel bars are also introduced.

Palabras clave: Barras corrugadas; Acero soldable; Caracterización; Hormigón armado; Armaduras; B500S; B400S.

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos de fabricación de las barras corrugadas B-500-S se realizan, de acuerdo con la norma UNE 36-068-94 que establece las condiciones de fabricación de las barras corrugadas de acero soldable a partir de semiproductos procedentes de lingotes o de colada continua, identificados por colada. De los tres métodos posibles de obtención de las barras es el de laminación en caliente y tratamiento térmico mediante el calor de laminación el más utilizado.

En este proceso de fabricación, al igual que en las barras B-400-S, después de la laminación en caliente se realiza el proceso "TEMPCORE". Las transformaciones que tienen lugar son similares a las que sufre el acero de la calidad B-400-S. Sin embargo hay diferencias en el proceso de temple ya que el límite elástico mínimo que deben presentar las barras B-500-S es de 500 MPa.

El estudio y caracterización de estas barras nos va a permitir establecer que diferencias en la microestructura justifican la mayor resistencia de estas barras, al partir en ambos casos, B-400-S y B-500-S, de la misma materia prima.

2. PARTE EXPERIMENTAL

Se estudiaron barras procedentes de cuatro fabricantes: AZMA, S.A., MARCIAL UCIN, S.A., SIDERÚRGICA SEVILLANA, S.A. y CELSA. La denominación de las siderurgias

se eligió de forma aleatoria con las letras A, B, C y D; desconociendo la letra asignada a cada fabricante.

Se disponía de barras de distintos diámetros de cada fabricante como se detalla en la tabla 1. Se realizaron análisis químicos de las barras de 12, 16 y 20 mm de diámetro de las cuatro siderurgias, ensayos mecánicos y de dureza Vickers sobre todos los diámetros de barra aportados por las cuatro siderurgias.

Para el estudio metalográfico se prepararon las muestras de acuerdo con los métodos convencionales de pulido y ataque de este tipo de acero. Se prepararon secciones transversales y longitudinales de las muestras y se determinó: el tamaño de grano austenítico, la macro y microestructura y se valoraron tanto cualitativa como cuantitativamente las inclusiones.

Se estudió la fractura de las muestras después de someterlas al ensayo de tracción. Todos los ensayos se realizaron siguiendo los mismos esquemas y normas que para las barras de la calidad B-400-S, detallados en el artículo anterior.

	DIÁMETROS (mm)						
	8	10	12	16	20	25	—
FABRICANTE A	8	10	12	16	20	25	—
FABRICANTE B	—	10	12	16	20	—	—
FABRICANTE C	8	10	12	16	20	25	—
FABRICANTE D	8	10	12	16	20	25	32

TABLA 1. Barras disponibles según fabricantes y diámetros.

(*) Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica. Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Complutense de Madrid.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. COMPOSICIÓN QUÍMICA

En la tabla 2 se muestran sólo los valores del carbono equivalente para las cuatro siderurgias. Observándose que no hay diferencias apreciables entre los cuatro fabricantes.

Los valores de composición química de las muestras analizadas están dentro de los valores máximos permitidos por la norma UNE 36-068-94. Al comparar los valores de las composiciones entre los distintos diámetros de barra de un mismo fabricante se observa que son muy similares, incluso entre las distintas siderurgias. Lo que implica que se utilizan los mismos procesos de fabricación de la materia prima para todas las barras elaboradas. Si se comparan estos resultados con los de las barras de la calidad B-400-S, se observa que no existen diferencias de composición entre las dos calidades.

3.2. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

Las características mecánicas determinadas en el ensayo de tracción de todas las barras de los distintos diámetros y fabricantes se encuentran dentro de los valores establecidos para esta calidad en cuanto a sus características resistentes así como la relación tensión máxima / límite elástico (σ_B/σ_0) es en todos los casos superior a 1,05. En cuanto al alargamiento se observa que, en general, las barras de menor diámetro tienen mayor alargamiento que las de diámetro superior.

En la figura 1 se realiza un estudio comparativo de los valores del límite elástico de las barras encontrándose que además de superar el valor de 500 MPa, todos los fabricantes presentan valores similares.

Al comparar los resultados obtenidos para las barras de la calidad B-500-S con los de la B-400-S, se observa que los

	DIÁMETROS (mm)		
	12	16	20
FABRICANTE A	0,31	0,33	0,30
FABRICANTE B	0,34	0,31	0,32
FABRICANTE C	0,40	0,39	—
FABRICANTE D	0,35	0,32	0,36
$\%C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15}$			

TABLA 2. Porcentaje de carbono equivalente (C_{eq}) para las barras analizadas.

valores de límite elástico para las B-500-S es de 500 MPa y 400 MPa para las B-400-S, sobrepasando ambas calidades estos valores.

3.3. MICRODUREZA

Los valores medios de microdureza obtenidos de la zona central para las diferentes barras es de unas 100 unidades Vickers inferior a los de la zona periférica en todos los casos, siendo muy homogéneos los valores obtenidos dentro de cada zona para los cuatro fabricantes.

En la figura 2 se muestra la variación de la microdureza con el radio para las barras de 16 mm de diámetro. Se observa una microdureza muy elevada en la zona exterior y un descenso suave de ésta para alcanzar un valor medio en el centro, similar para todos los fabricantes.

En el caso de las barras B-400-S el descenso de microdureza es más brusco. Esto puede ser debido a una variación continua de la microestructura en las barras B-500-S.

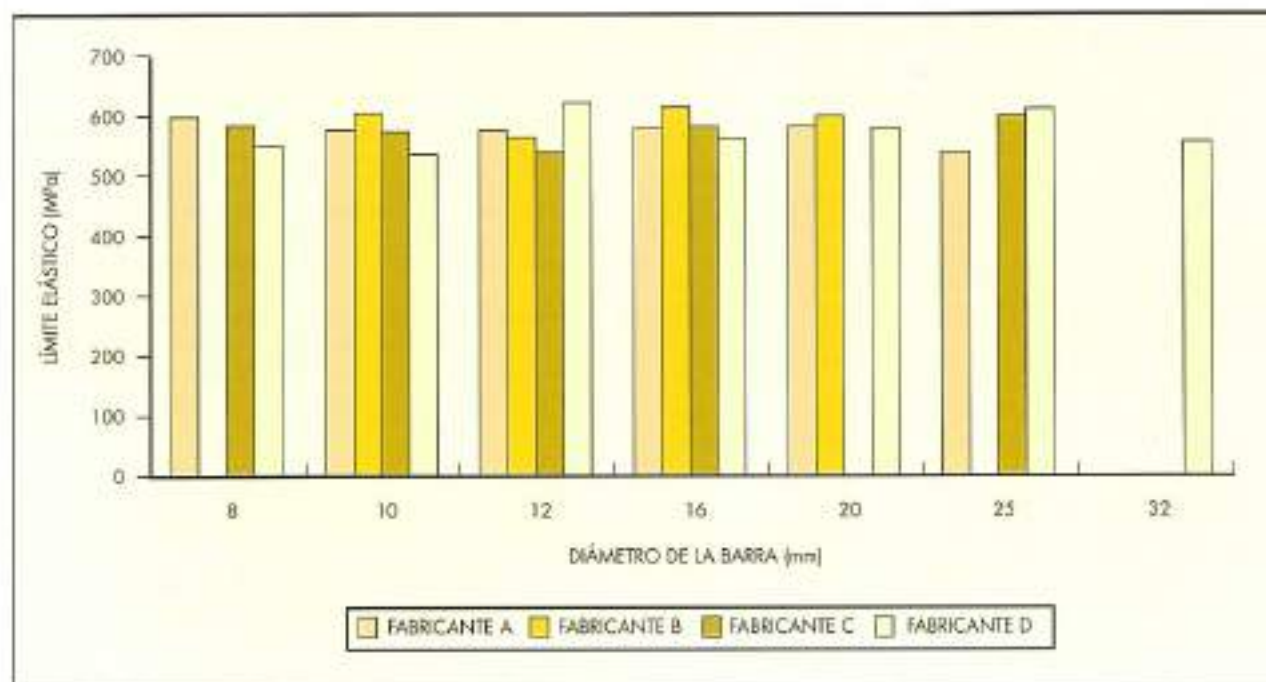


FIGURA 1. Límite elástico de los distintos diámetros y fabricantes.

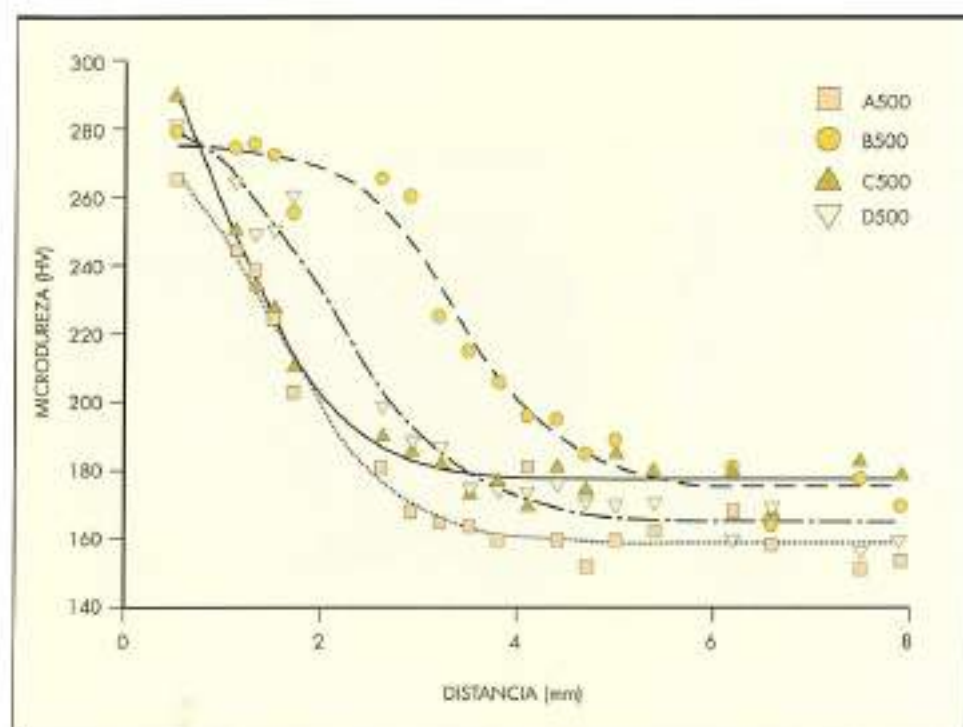


FIGURA 2. Evolución de la microdureza a lo largo del radio en las barras de 16 mm de diámetro.

3.4. MACROESTRUCTURA

En todas las muestras, se observó después de haber sido atacadas, una macroestructura constituida por anillos concéntricos de diferentes tonalidades de grises en la sección transversal según se muestra en la macrografía de la figura 3-a ($\varnothing$ 20 mm, fabricante A).

Las macroestructura que se muestra en la figura 3-b ($\varnothing$ 16 mm, fabricante B) corresponde a la sección longitudinal de la barra donde se aprecia una estructura orientada como resultado del proceso de laminación, así como dos franjas longitudinales en las zonas exteriores de la muestra que se corresponden con los anillos de la sección transversal.

Se ha medido sobre la macroestructura de la sección transversal de cada una de las barras, el diámetro de la zona central, el ancho de la corona intermedia así como el de la corona exterior, con el fin de poder relacionar las diferentes propiedades mecánicas obtenidas para las dos calidades de acero con su microestructura.

Si los porcentajes de la anchura respecto al diámetro para los distintos fabricantes son similares, se podría demostrar que el temple al que someten al final del proceso de laminación a las barras es el mismo, por lo que se han representado gráficamente los valores porcentuales de la anchura de la corona exterior de todas las siderurgias, figura 4; observándose que no existen grandes diferencias entre los cuatro fabricantes.

Se observa que en todos los casos de anchura de la corona exterior es superior en las barras B-500-S que en la B-400-S.

3.5. TAMAÑO DE GRANO AUSTENÍTICO

Los valores obtenidos de la medida del tamaño de grano según la norma UNE 7-280 en la zona central de cada una de las barras estudiadas, se recogen en la tabla 3.

Comparando los índices de grano de los distintos fabricantes para cada diámetro, hay una gran homogeneidad en

los tamaños de grano, por lo que no existen diferencias entre las cuatro siderurgias en cuanto al control del tamaño de grano. Se aprecia un menor tamaño de grano en las barras de menor diámetro y mayor en los diámetros superiores como consecuencia del mayor número de reducciones de sección que experimentan las barras de diámetro más pequeño en el tren de laminación.

No existen diferencias entre las dos calidades en cuanto al tamaño de grano.

3.6. MICROESTRUCTURA

Se realizó el estudio de la microestructura de todas las barras, tanto en sus secciones transversales como longitudinales.

Debido a la fina microestructura que presentan las barras, la observación de la sección longitudinal a pocos aumentos solo ha permitido establecer una estructura en bandas de la zona central de las barras, figuras 5-6, donde las zonas claras son de ferrita y las de perlita son algo más os-

$\varnothing$ BARRA (mm)	ÍNDICE DE GRANO, G			
	FABRICANTES			
	A	B	C	D
8	8	—	7	8
10	7	7	7	7
12	7	8	7	6
16	7	7	7	7
20	6	6	—	6
25	5	—	5	5
32	—	—	—	5

TABLA 3. Índice de grano para cada fabricante y diámetro.

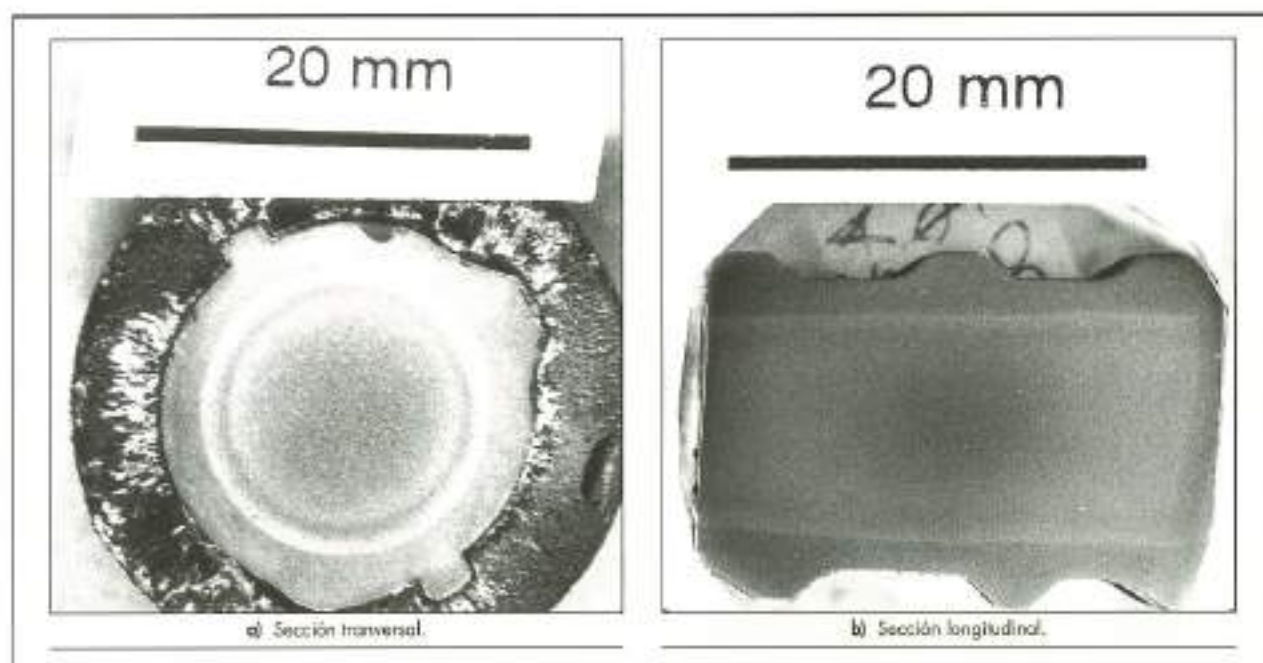


FIGURA 3. Macroestructuras en dos secciones de la barra.

curas, aunque no se diferencian muy bien unas de otras, evidenciando una variación continua de la microestructura.

La microestructura que aparece en cada una de las zonas observadas en las macros es la misma para todas las barras de la calidad 500.

En la zona central aparece una estructura ferrítico-perlítica como se muestra en la figura 7 (A-500), si se compara con la microestructura de la calidad 400, se observa un aspecto más acicular de los granos de ferrita y en menor proporción, donde las colonias perlíticas aparecen más abiertas como consecuencia del enfriamiento más rápido que sufren

las barras de la calidad 500. Al aumentar la velocidad de enfriamiento las líneas de equilibrio del diagrama hierro-carbono se desplazan hacia abajo retrasándose el comienzo de la transformación de la austenita. La ferrita aparece en estructura de Windmanstätten y la austenita remanente alcanza la temperatura eutéctica con menor porcentaje de carbono, por lo que la perlita tiene un menor contenido en carbono y en consecuencia la relación ferrita/cementita es mayor y la perlita presenta una estructura más abierta, figura 8 (A-500).

La zona exterior de las barras presenta una microestructura formada por martensita revenida con algún cristal de

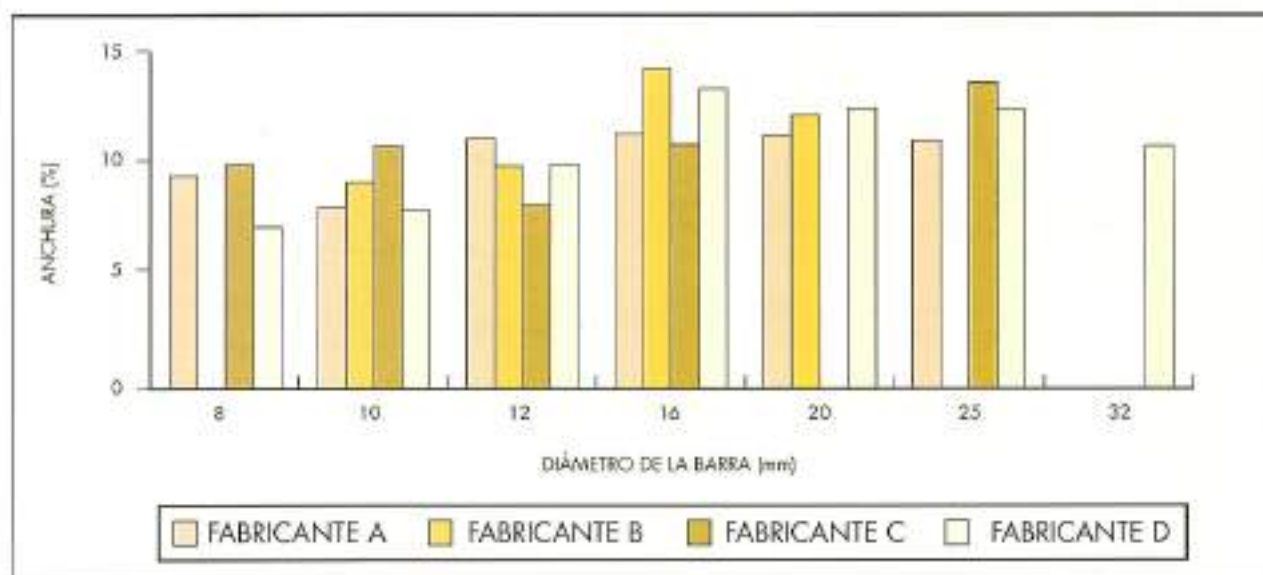


FIGURA 4. Anchura de la corona exterior (%) para cada diámetro de barra.



FIGURA 5. Microestructura en la sección longitudinal (100 X).

ferrita acicular de color blanco, como se muestra en la figura 9 (D-500), siendo esta estructura la misma que la de las barras de la calidad 400 en la misma zona. Aunque la severidad del temple es mayor en las barras de la calidad 500, el efecto del temple en la zona exterior es el mismo para ambas calidades por lo que se origina la misma microestructura, diferenciándose ambas en el espesor de dicha zona, siendo mayor en las barras de la calidad 500.

La zona intermedia comprendida entre la zona central y periférica se muestra en la figura 10 (D-500), en ella se

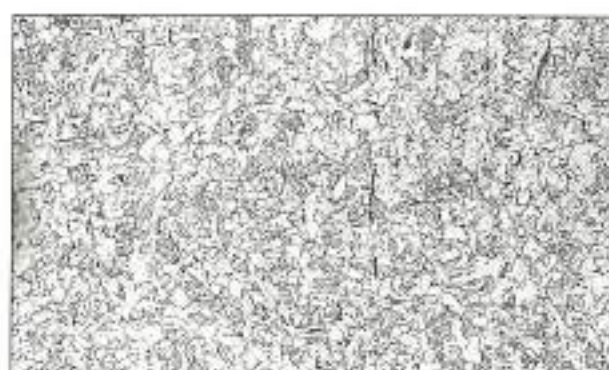


FIGURA 6. Detalle de la figura 5 (500 X).

observan tanto la zona exterior (izquierda de la micrografía) de martensita revenida como la zona central de ferrita y perlita (derecha de la micrografía) y una zona intermedia donde se aprecia un ennegrecimiento de dicha zona. Cerca de la zona central aparece una microestructura de bainita revenida con perlitas globulares en los límites de grano como se aprecia en la figura 11 (D-500); mientras que cerca de la zona martensítica se aprecia una microestructura de bainita revenida como se observa en la figura 12 (C-500).



FIGURA 7. Microestructura ferrítico-perlítica en la zona central de la barra (500 X).



FIGURA 9. Microestructura de martensita revenida en la zona exterior de la barra (500 X).



FIGURA 8. Detalle de la figura 7 (1.000 X).

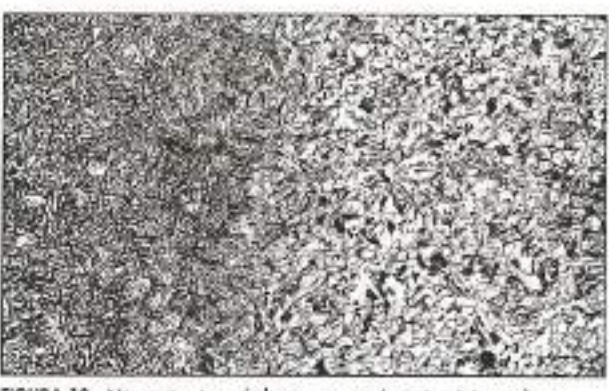


FIGURA 10. Microestructura de las tres zonas (exterior, intermedia y central) de la barra (500 X).



FIGURA 11. Microestructura de bainita revenida y perlita globular en la zona intermedia próxima al círculo central (500 X).

Esta variación de microestructura en las barras de la calidad 500 va a justificar el porqué la variación de la microdureza de la zona periférica a la central es menos acusada en las barras de la calidad 500, mientras que en las barras de la calidad 400 desciende bruscamente de una zona a otra.

La microestructura de las barras de la calidad 500 presentan fases más duras que las de las calidad 400, originadas como consecuencia de haber sufrido un temple más severo, por lo que es lógico que presenten mayor dureza y resistencia mecánica que sus homólogas de la calidad 400.

3.7. VALORACIÓN DE INCLUSIONES

La presencia de inclusiones en un acero es indeseable porque se deterioran sus propiedades mecánicas. Estos aceros presentan diferentes tipos de inclusiones, que se encuentran repartidas indistintamente por toda la sección longitudinal de la barra.



FIGURA 12. Microestructura de bainita revenida en la zona intermedia próxima a la corona exterior (500 X).

El estudio de las inclusiones cualitativa y cuantitativamente se realizó por distintos métodos con el fin de llegar a conclusiones coincidentes.

3.7.1. Valoración cuantitativa

La determinación cuantitativa de inclusiones se ha realizado según los métodos A y D de la norma ASTM E-45 95. Al ser los resultados obtenidos de los niveles de severidad de las inclusiones muy similares para las barras de una calidad y fabricante determinado, se ha realizado este estudio en las barras de 16 mm de diámetro porque son las más representativas de los cuatro fabricantes. Los resultados obtenidos por ambos métodos son coincidentes, siendo las áreas relativas del total de las inclusiones con respecto al área total barrida en cada muestra entre el 10 y el 15‰ excepto en el fabricante D que no supera el 4‰. Observándose, en general que el ‰ de inclusión es superior en las B-500-S que B-400-S.

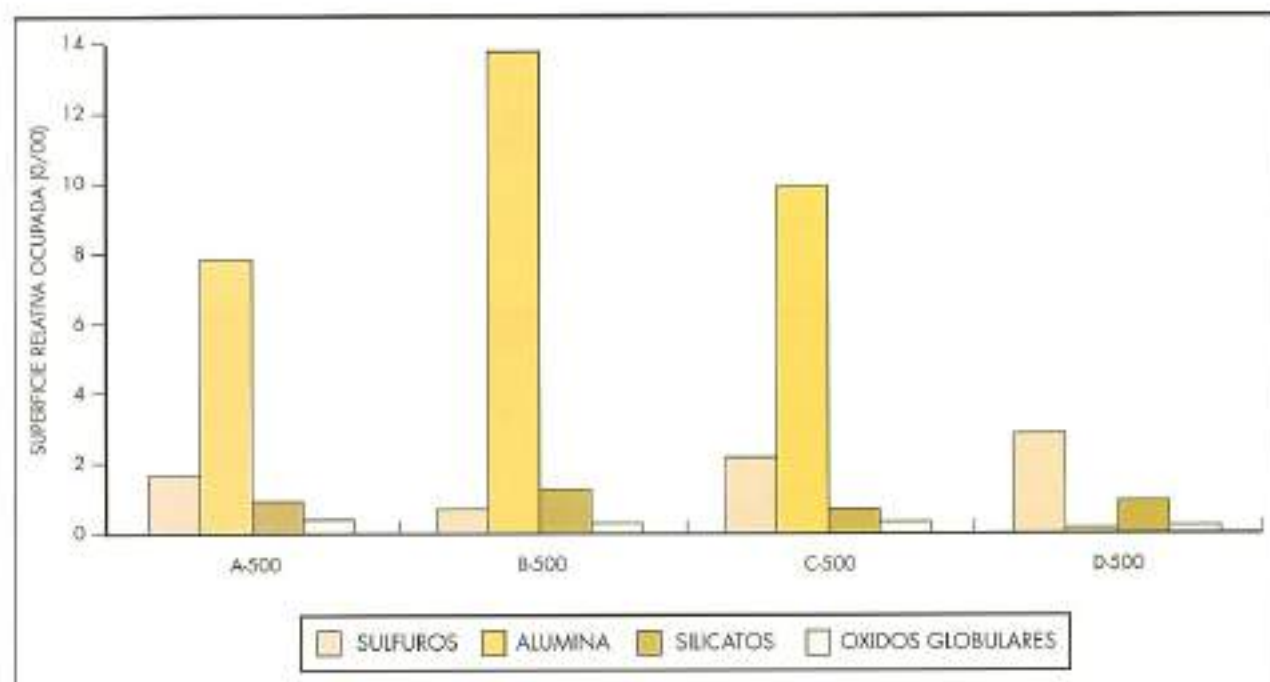


FIGURA 13. Superficie relativa total ocupada para cada uno de los diferentes tipos de inclusiones en las barras de 16 mm de diámetro.

Atendiendo a la forma y aspecto de las inclusiones según la norma ASTM E-45, las inclusiones de tipo alúmina son las que se presentan en mayor cantidad, siendo entre el 75 y 85% del total de las inclusiones, excepto en la muestra D con un contenido de un 3% del total. Mientras que el contenido de inclusiones de tipo óxido globular es inferior al 3% del total de inclusiones. La cantidad de inclusiones de tipo sulfuro varía entre el 5 y el 15% del total de las inclusiones detectadas, excepto en el fabricante D que supone el 72% del total. El contenido de inclusiones de tipo silicato varía entre 4 y 8% del total, excepto en el fabricante D que supone el 23%.

El área ocupada por las inclusiones no es homogénea entre los distintos fabricantes como se puede apreciar en la figura 13.

3.7.2. Valoración cualitativa

La valoración cualitativa de las inclusiones mediante microscopía óptica permitió diferenciar en todas las barras estudiadas cuatro tipos de inclusiones, identificándolas según la norma UNE 36-431.

El estudio de la identidad química las inclusiones observadas en las muestras mediante microanálisis de espectros de energía (EDS) por microscopía electrónica de barrido, reveló que la morfología asignada a cada tipo de inclusión no se correspondía con la composición detectada en el análisis, llegándose a los mismos resultados que en el trabajo correspondiente a la "Caracterización de Barras Corrugadas B-400-S".

4. FRACTURA

Los resultados obtenidos del estudio de la fractografía de las barras corrugadas de la calidad B-500-S coinciden con los del estudio realizado para las barras de la calidad B-400-S.

5. CONCLUSIONES

- El estudio realizado ha permitido establecer que el proceso de fabricación de las barras corrugadas de acero soldable para hormigón de la calidad B-500-S, ha sido el mismo al no encontrarse diferencias apreciables entre los cuatro fabricantes analizados. Siendo similar que el de las barras de la calidad B-400-S, diferenciándose en la etapa de temple, al ser ésta más severa en las B-500-S.
- Las barras de la calidad B-500-S presentan valores del límite elástico superiores a 500 MPa en todos los casos, siendo su fractura dúctil con una corona exterior frágil.
- La microestructura de las barras está formada por cuatro zonas concéntricas: una central ferrítico-perlítica rodeada de un anillo de bainita revenida con perlitas globulares y éste a su vez de otro de bainita revenida, y por último de un anillo de martensita revenida. Existe mayor variedad de microestructuras que en las B-400-S.

- Los valores de microdureza confirman la presencia de estas zonas a lo largo del radio de la barra, justificando el descenso más suave de la microdureza en las barras B-500-S por la microestructura de dichas barras.
- La calidad B-500-S presenta una microestructura formada por constituyentes más finos y las dos coronas exteriores más anchas justifican los valores mayores de resistencia mecánica de dichas barras con respecto a las de la calidad B-400-S.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la C.I.C.T., la financiación de este proyecto de investigación (MAT94-0664-CO2-O2).

6. BIBLIOGRAFÍA

1. Norma UNE 36-068-94. Barras corrugadas de acero soldable para armaduras de hormigón armado.
2. ECONOMOPULOS, M.; RESPEN, Y.; LESSEL, G. and STEFFES, G. Application of Tempecore Process to the Fabrication of High Yield Strength Concrete-Reinforcing Bars, CRM No. 45, December (1975).
3. WEISE, H.; KRÄNER, W.; BARTELS and BRAND W. Reinforcing Steel for Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Structures, STEEL, A Handbook from Materials Research and Engineering, Vol. 2: Applications, (1993).
4. LLEWELL, D. T.; STEELS. Metallurgy and Applications, Second Edition, Butterworth-Heinemann Ltd., Oxford (1992).
5. Norma UNE 7-027-51. Determinación cuantitativa del manganeso en los aceros empleados en la construcción.
6. Norma UNE 36-315-91. Determinación espectrofotométrica del fósforo en aceros y fundiciones.
7. Norma UNE 36-314-90. Determinación espectrofotométrica del silicio en aceros y fundiciones.
8. Norma UNE 7-474-92 (Partes 1 y Erratum). Materiales metálicos. Ensayo de tracción.
9. Norma UNE 7-423-92 (Partes 1, 2 y 3). Materiales metálicos. Ensayo de dureza. Ensayo Vickers.
10. Norma UNE 7-280-72. Determinación del tamaño de grano en aceros.
11. Norma UNE 36-431-81. Método de determinación del contenido de microinclusiones no metálicas en productos de acero por el método micrográfico, con ayuda de imágenes tipo.
12. Norma ASTM E-45 95. Standard test methods for determining the inclusion content of steel.

NOTA IMPORTANTE: Los autores quieren rectificar la afirmación aparecida en el número 108 de esta revista, en el artículo Caracterización de barras corrugadas B-400-S. Se interpretó erróneamente la norma, tomándose como A_0 los valores de alargamiento a rotura. Por lo que todas las barras ensayadas cumplen los mínimos establecidos en la norma 36-068-94.



GEOCISA

GEOTECNIA Y CIMENTOS S.A.

AENOR
ER
Empresa
Registrada
ER-4234/95



TRATAMIENTO MEDIANTE
JET-GROUTING DE LAS PILAS 4, 5 Y 6
DEL PUENTE SOBRE EL RIO
GUADALQUIVIR DE LA VARIANTE DE
ALCALA DEL RIO (SEVILLA).

RECONOCIMIENTOS GEOTECNICOS GEOLOGICOS Y GEOFISICOS
AUSCULTACION Y CONSERVACION DE CARRETERAS
REHABILITACION DE ESTRUCTURAS
ENSAYOS Y CONTROL DE CALIDAD
INGENIERIA MEDIO AMBIENTAL
CIMENTACIONES ESPECIALES
TRATAMIENTO DEL TERRENO
ESTUDIO DE PATOLOGIAS

Centro Regional Zona Sur. Ctra. del Copero s/n · 41012 SEVILLA
Telf. 95/429 63 60 · Fax 95/429 63 90