

INFLUENCIA DEL CARBONO EN LAS PROPIEDADES DEL ACERO PARA REFUERZO DE HORMIGÓN

Zenaida Paulette Frómata Salas*, Francisco Delás Magdaleón**

*Universidad de Oriente. Facultad de Construcciones. Departamento de Ingeniería Civil. Santiago de Cuba, **Empresa Siderúrgica ACINOX Las Tunas

Se estudia la influencia del contenido de carbono en las propiedades del acero cubano para considerar las implicaciones en el diseño sísmico. Se desarrolla un programa que incluye ensayos de composición química, dureza, doblado y soldadura a las barras de acero de grados G-40 y G-60. De los resultados se evidencia que el acero G-60 se fabrica con elevado contenido de carbono, que incrementa la capacidad resistente; pero disminuye la ductilidad, afecta la soldabilidad y lo hace inadecuado para las construcciones en zonas sísmicas. Se analiza la repercusión del carbono en la dureza del acero, que limita la ejecución del doblado del refuerzo para conformar los elementos estructurales. Se concluye acerca de la necesidad de reducir el por ciento de carbono, para que este material satisfaga las pretensiones de la Ingeniería Sismorresistente. Se dan recomendaciones para lograr el comportamiento dúctil del acero cubano.

Palabras clave: acero de refuerzo, carbono, ductilidad, diseño sismorresistente.

The influence of the content of carbon on cuban reinforcing steel is studied, about the conformance to requirements of the seismic design. An experimental program was developed, that include bent and rebend, hardness, welding testing and chemical composition tests to the bars of degrees G-40 and G-60. Of the results it is evidenced that the steel G-60 is manufactured with high content of carbon that although it increases the resistant capacity but reduces the ductility and make it inadequate for the constructions in seismic areas. Proposals are suggested to guarantee the ductile behaviour of the steel of national production.

Key words: reinforcing steel, carbon, ductility, design earthquake.

Introducción

El acero es una aleación de carbono con el hierro, de un contenido de carbono entre 0,1 y 1,9 % y puede tener más aleaciones como el azufre, fósforo, manganeso, silicio; siendo uno de los materiales más importante para la construcción.

El acero como constituyente del hormigón armado es esencial en las construcciones en zonas sísmicas, pues gracias a su ductilidad puede absorber las deformaciones ocasionadas por un terremoto y evitar pérdidas humanas y materiales ante la ocurrencia de un evento severo.

La tendencia mundial apunta hacia el incremento de la resistencia de este material, ya que se logra mayor capacidad resistente de las edificaciones, acompañada de la reducción del consumo de acero. Una de las formas más fácil y económica de lograrlo es aumentando el contenido de carbono, pero existe cierta polémica de que afecta severamente las propiedades del acero para su empleo en la construcción.

Las siderúrgicas se han dado a la tarea de sustituir sus antiguos aceros para lograr barras de alta resistencia. Sin embargo, este recurso de aumentar el carbono lo convierte en frágil y disminuye su capacidad de soldadura, entre otras afectaciones. De aquí que los expertos para clasificar a los aceros atendiendo a su soldabilidad, suelen utilizar un diagrama llamado "carbono contra carbono equivalente" figura 1. /1/



Fig. 1 Niveles de soldabilidad de las barras de acero estructural.

El carbono equivalente aportado por la composición química, se determina por la siguiente fórmula: 1a/2, 3/ ó 1b/4/.

$$CE = \% C + \frac{\% Mn}{6} + \frac{\% Cr + \% Mo + \% V}{5} + \frac{\% Ni + \% Cu}{15} \quad (1a)$$

$$CE = \% C + \frac{\% Mn}{6} + \frac{\% Cu}{40} + \frac{\% Ni}{20} + \frac{\% Cr}{10} - \frac{\% Mo}{50} - \frac{\% V}{10} \quad (1a)$$

En la figura 1 quedan definidas tres zonas. Los aceros comprendidos en la zona I son de óptima soldabilidad y se emplean en las instalaciones petroleras en el mar. En la II se incluyen los aceros de aleación aceptable donde por norma se hace un compromiso de soldabilidad. Los de la III no pueden tener, ningún compromiso de soldabilidad por el alto riesgo de fallo al ser soldados. El salto tecnológico para incrementar con carbono la resistencia implica que pasen de la zona II a la III, si estos aceros se llegaran a soldar con las técnicas tradicionales.

Otra propiedad del acero relacionada con el carbono es la dureza del material, y cuando es excesiva limita la ejecución de los trabajos de doblado de las barras. La literatura /5/ refiere que al aumentar el contenido de carbono, la dureza superficial del acero varía. Se establecen relaciones entre el carbono, la dureza y otros parámetros como se muestra en la figura 2.

En la figura 2 convencionalmente HB es la dureza, σ_b es la resistencia máxima, δ el alargamiento, Ψ la estricción y a_{ae} la resiliencia. Las cifras tienen carácter de promedio y pueden oscilar dentro del $\pm 10\%$, en dependencia del contenido de impurezas y de las condiciones de enfriamiento después de la laminación.

Dado que las propiedades fundamentales del acero están estrechamente relacionadas con su composición química, el objetivo de esta investigación es evaluar cómo repercute en las propiedades físicas y mecánicas del acero cubano, las variaciones del contenido de carbono, sus limitaciones y las consecuencias que puede provocar para la seguridad estructural ante la ocurrencia de un sismo.

A tenor con lo anterior se realizó un estudio experimental que incluye ensayos de doblado, dureza, soldadura y composición química.

Materiales y métodos

Materiales

Se estudian los aceros para el refuerzo del hormigón de grados G-40 y G-60 con resistencia nominal de 300 y 420 MPa. Las barras corrugadas se obtienen mediante la laminación en caliente de palanquillas por el vaciado continuo de aceros fundidos provenientes del horno eléctrico /6/. En el muestreo se seleccionaron las barras de diferentes coladas de aceros procedentes de la siderúrgica ACINOX Las Tunas, para los diámetros nominales de 9,5; 12,7; 15,9; 19,1; 25,4 y 32,3 mm.

Las muestras se identificaron de la siguiente forma: D-40-10-1, D: representa ensayo de doblado, 40: Acero G-40, 10: diámetro comercial del acero de 9,5 mm; 1: muestra número 1.

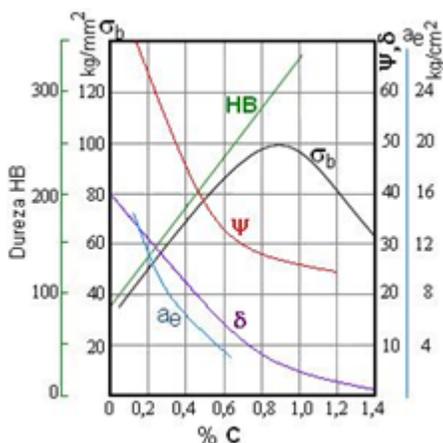


Fig. 2 Relación del carbono con las propiedades del acero.

Metodología de los ensayos

El programa experimental se desarrolló en ACINOX Las Tunas y en el Centro de Investigaciones Metalúrgicas de La Habana (CIME). El mismo consiste en una serie de ensayos de doblado, de dureza, soldadura, y el análisis de la composición química de los aceros a estudiar.

Comportamiento de los aceros al doblado

El ensayo de doblado es un índice de la capacidad de deformación plástica del material que da una medida de su ductilidad.

Método de ensayo de doblado simple

Este ensayo se efectuó según /7/ a tres muestras por cada diámetro, en la prensa IBERTEST de ACINOX con capacidad de 600kN, figura 3. Se dobla la barra 180° a temperatura ambiente, con un radio de giro de 3,5 veces el diámetro de la barra (dn) para las probetas de diámetro hasta 15,9mm; 5dn para las probetas de 19,1 y 25,4 mm y de 7dn para las de 32,3 mm de diámetro. Se plantea que no debe aparecer ningún tipo de grietas en la zona de doblado, ni fracturarse la probeta.

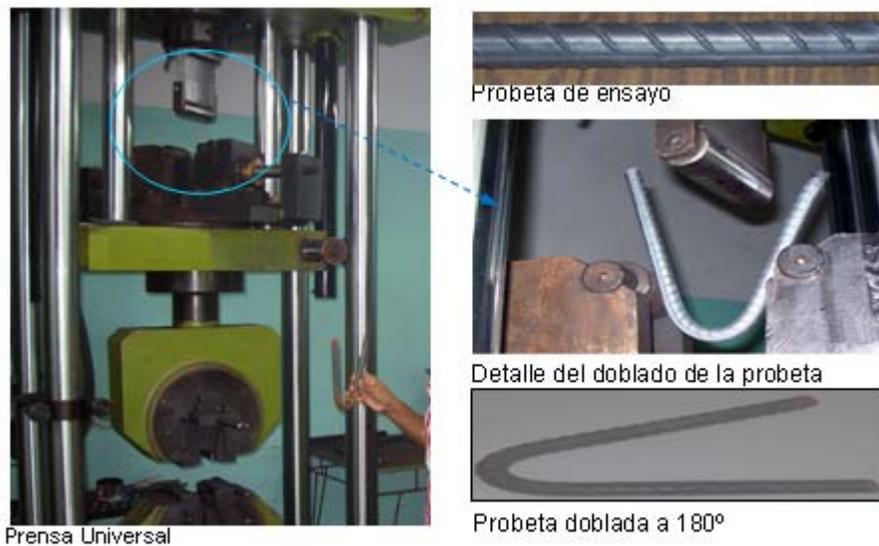


Fig. 3 Ensayo de doblado simple.

Método de ensayo de doblado y desdoblado

En este estudio se realizó una caracterización más severa del ensayo de doblado, valorando que el diseño sísmico es más exigente respecto a los dobleces para el armado. Se efectuó el ensayo por los procedimientos de la norma española /3/. Primeramente la probeta se dobla 90° a temperatura ambiente por medio de una máquina plegadora, luego se somete a 100 °C durante 30 min para

simular un efecto de envejecimiento, luego se deja enfriar y finalmente se desdobra 20°. Se ensayaron 180 probetas con longitudes de 500 mm para los diámetros menores de 19,1 mm y 700 mm para las probetas de 25,4 y 32,3 mm diámetro. Los mandriles escogidos tanto para el acero G-60 como para el G-40 se muestran en figura 4. No deben aparecer ni grietas ni fisuras, al finalizar el ensayo, en la zona del doblado (ni en la zona exterior ni en la interior de la probeta).



Doblado – desdoblado	
$\alpha = 90^\circ$	$\beta = 20^\circ$
\varnothing Diámetro de las barras	D Diámetro del mandril
$\varnothing \leq 16 \text{ mm}$	5 \varnothing
$16 < \varnothing \leq 25 \text{ mm}$	8 \varnothing
$25 < \varnothing \leq 40 \text{ mm}$	10 \varnothing

Diámetros del mandril para el ensayo

Fig. 4 Ensayo de doblado y desdoblado.

Comportamiento de dureza

Los ensayos de dureza Brinell y Vickers se realizaron en el Laboratorio del CIME, para relacionar la resistencia y la dureza del acero con su contenido de carbono y estudiar cualquier evidencia de la variación de la dureza en la longitud de las probetas y en su sección transversal, e inferir acerca de la calidad del material.

Método de ensayo de dureza Brinell

El ensayo consiste en estampar una bola de diámetro (D) en la superficie de la probeta mediante una carga F, la dureza Brinell se expresa como el cociente de la carga de ensayo por el área de la huella (d) dejada por la bola. Este ensayo se realizó según las normas /8,9 /con un Durómetro Brinell de un rango de medición (0 -150) kgf y la incertidumbre de $\pm 0,33$. Se le midió la dureza

Brinell (HB) a 36 probetas en cinco puntos de su superficie longitudinal. Figura 5. El número de dureza Brinell es calculado por:

$$HB = \frac{2 F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2)$$

Se establece una relación aproximada multiplicando el número Brinell por un factor que varía según el material y se estima la resistencia a rotura del acero por la expresión siguiente:

$$R_m = HB \times k \quad (3)$$

Para los aceros al carbono se toma un factor de cálculo $k=0,36$

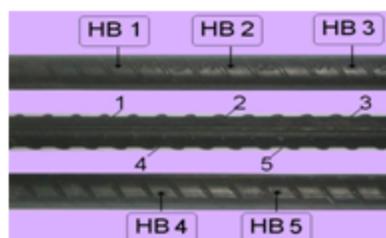
Además se estima el contenido de carbono mediante la expresión siguiente:

$$\% C = \frac{HB - 80}{141} \quad (4)$$



Durómetro Brinell

5 puntos de medición:
3 en la cara longitudinal superior
2 en la cara longitudinal inferior



Puntos de medición de dureza

Fig. 5 Ensayo de dureza Brinell.

Método de ensayo de dureza Vickers

El ensayo consiste en hacer penetrar en el material una pirámide de diamante. El número de dureza Vickers se determina por la fórmula:

$$HV = \frac{P}{F} \text{ kg/mm}^2 \quad (5)$$



Durómetro Vickers



Puntos de medición de HV en un corte

Fig. 6 Ensayo de dureza Vickers.

Método de ensayo de soldadura

El efecto de la soldadura de los aceros se estudió para los diámetros de 10,16, 25 y 32mm según /11/. Los parámetros utilizados para la soldadura fueron:

1. Preparación de las barras para la soldadura a tope con unión tipo bisel V.
2. Preparación de los biseles por las especificaciones de la tecnología de soldadura usada.
3. Se emplearon distintos tipos de electrodos: a) Tipo R-13 (cubano, de Nuevitas), b) ANO - 4 (Soviético), c) LB - 52 (Japonés, de KOBE-STEEL).

Composición química de los aceros

El ensayo de la composición química de las coladas de acero se realizó en ACINOX, para determinar el contenido de carbono, silicio, manganeso, fósforo y azufre de las muestras tomadas durante el vaciado del acero fundido. También se realizaron los ensayos de comprobación de la

Donde P es la carga en kg y F es el área de la huella piramidal en mm². Se empleó un Durómetro Vickers, en un rango de 5 a 10 kgf y una incertidumbre de 0,31 a una temperatura de 27± 20C. El ensayo se realizó por la norma /10/ y las probetas fueron ensayadas, con tres cortes transversales en el sentido longitudinal y con un barrido en cada corte de cinco puntos figura 6.

composición química a 36 muestras de las barras de acero, estos ensayos se desarrollaron en el CIME para determinar los mencionados elementos químicos y el carbono equivalente.

Evaluación de los resultados

El comportamiento y los resultados de los ensayos de doblado, dureza, soldadura y composición química se tabularon y analizaron para su valoración.

Evaluación del comportamiento al doblado

Las probetas ensayadas, no mostraron grietas en la cara exterior de la zona del plegado por efectos de aplastamiento al ser dobladas 1800 a temperatura ambiente. Debido a la energía de deformación que se almacena en las barras durante la operación de doblado, éstas tienden a enderezarse, por tanto la barra una vez retirada de la máquina tiene un ángulo de doblado ligeramente inferior al realmente utilizado durante el ensayo, figura 3. De los resultados se valora que

todas las barras, para los dos grados de acero, satisfacen los requerimientos de la norma de doblado simple.

Los resultados de los ensayos de doblado y desdoblado revelaron que las probetas del acero G-40 no sufrieron daños ni presentaron grietas que alteren sus características mecánicas, ni muestras de fragilidad del material, por lo cumplieron con la norma. El acero G-60 manifestó un comportamiento diferente, pues en algunas probetas se desarrollaron pequeñas fisuras en la superficie después del desdoblado, principalmente las de diámetros superiores a 19,1 mm, lo que indica que este proceso somete al acero a un proceso de endurecimiento por deformación. En el caso de las probetas de 32,3 mm dobladas con un diámetro del mandril inferior al recomendado, por no disponer de otro, resultó difícil el doblado por lo grande del diámetro de la barra, en relación a un diámetro de mandril. La figura 4 muestra las grietas como consecuencia de este ensayo, estas se manifiestan en el contacto entre la corruga y la superficie cilíndrica de la barra. Se considera que en el caso de los aceros de elevada resistencia y diámetros grandes se pone de manifiesto la gran dureza del material debido al alto contenido de carbono en su composición que afecta la capacidad de doblado.

Evaluación del comportamiento de dureza

Ensayo de dureza Brinell

La tabla 1 muestra los valores de dureza y resistencia teórica máxima obtenidos como promedio de las cinco mediciones efectuadas en cada probeta. Se tabula además el por ciento de carbono como un estimado a partir de la fórmula (3).

Existe una tendencia a una distribución uniforme de la dureza superficial para todas las barras de acero, con dispersiones no significativas. Existe correspondencia entre los valores de dureza obtenidos y las tensiones estimadas, teniendo en cuenta que la norma cubana /6/ establece límites mínimos para la tensión máxima de 420 y 578 MPa para los aceros G-40 y G-60 respectivamente. Los por cientos estimados de carbono son elevados para el acero G-60, que supera el valor máximo 0,55 % de carbono equivalente normado. Es necesario realizar un ensayo de composición química para determinar con exactitud la composición de los elementos de estos aceros.

Tabla 1
Resultados del ensayo de dureza Brinell en los aceros G-40 y G-60

Probetas	HB _{prom} Kg/mm ²	σ _{t teor.prom} (MPa)	C (%)	Probetas	HB _{prom} Kg/mm ²	σ _{t teor.prom} (MPa)	C (%)
HB-40-10-1	133	469,5	0,38	HB-60-10-1	151	532,4	0,50
HB-40-10-2	124	436,4	0,31	HB-60-10-2	157	553,6	0,54
HB-40-10-3	134	473,1	0,38	HB-60-10-3	152	537,3	0,51
Promedio	130	459,7	0,36	Promedio	153	541,1	0,52
HB-40-13-1	110	389,4	0,21	HB-60-13-1	175	617,1	0,67
HB-40-13-2	116	408,1	0,25	HB-60-13-2	170	600,2	0,64
HB-40-13-3	113	399,6	0,24	HB-60-13-3	165	583,2	0,60
Promedio	113	399,1	0,23	Promedio	170	600,2	0,64
HB-40-16-1	121	427,9	0,29	HB-60-16-1	128	453,3	0,34
HB-40-16-2	126	445,5	0,33	HB-60-16-2	166	584,6	0,61
HB-40-16-3	125	442,7	0,32	HB-60-16-3	166	584,6	0,61
Promedio	124	438,7	0,31	Promedio	153	540,9	0,52
HB-40-19-1	127	447,1	0,33	HB-60-19-1	158	556,4	0,55
HB-40-19-2	129	456,3	0,35	HB-60-19-2	155	548,6	0,53
HB-40-19-3	133	470,4	0,38	HB-60-19-3	144	508,4	0,45
Promedio	130	457,9	0,35	Promedio	152	537,8	0,51
HB-40-25-1	155	548,6	0,53	HB-60-25-1	161	567,0	0,57
HB-40-25-2	134	473,1	0,38	HB-60-25-2	173	612,2	0,66
HB-40-25-3	136	480,8	0,40	HB-60-25-3	183	645,4	0,73
Promedio	142	500,8	0,44	Promedio	172	608,2	0,65
HB-40-32-1	149	526,2	0,48	HB-40-32-1	186	656,8	0,64
HB-40-32-2	153	540,3	0,45	HB-40-32-2	195	688,6	0,76
HB-40-32-3	150	529,7	0,45	HB-40-32-3	198	699,2	0,68
Promedio	151	532,1	0,46	Promedio	193	681,5	0,69

Acero	Dureza Brinell HB (Kg/mm ²)			Tensión máxima σ _{t teor.prom} (MPa)			Carbono estimado C (%)		
	X	S	C.V	X	S	C.V	X	S	C.V
G-40	132	13,22	0,10	464,7	46,7	0,10	0,358	0,085	0,24
G-60	166	16,08	0,097	584,9	56,9	0,097	0,590	0,080	0,14

X: promedio; **S:** desviación estándar **CV:** coeficiente de variación

Propiedades de dureza Vickers

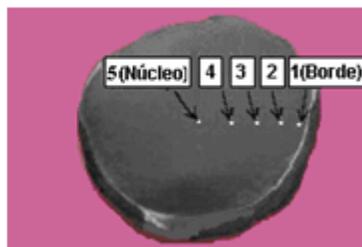
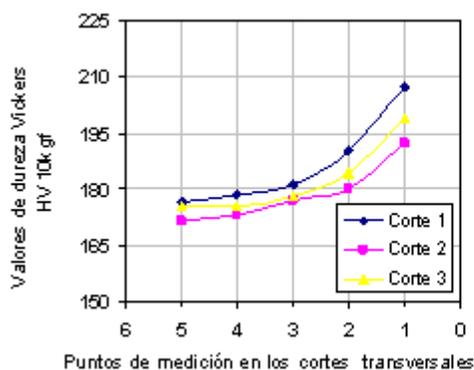
La tabla 2, a manera de ejemplo, muestra la variación de la dureza HV para dos probetas del acero G-40. Los valores de dureza entre tres cortes de una misma barra exhiben poca variación. En el caso del G-60, las mayores dispersiones se tienen para las barras de los diámetros

menores con valores de coeficiente de variación superiores al 10%. La tabla 3 resume el promedio de los dos aceros.

La distribución de la dureza en el corte manifiesta una tendencia de un incremento, del centro hacia los bordes de la sección transversal de las probetas; se presenta alguna dispersión en las muestras del acero G-60. El promedio de la dureza en las secciones transversales experimenta muy pequeñas variaciones en la longitud de las barras.

Tabla 2
Resultados del ensayo de dureza Vickers en los aceros G-40

Probetas	Cortes	Valores de dureza Vickers HV10 Acero G-40 (10 kgf)								
		Mediciones en los cortes transversales					Análisis estadístico			
		5 Núcleo	Pto 4	Pto 3	Pto 2	1 Borde	X	S	CV	
HV-40-10-1	1	168,2	175,6	177,7	182,2	182,3	177,2	5,17	0,029	
	2	174,5	175,6	183,4	190,5	217,5	188,3	15,7	0,083	
	3	167,3	169,5	170,2	175,6	176,6	171,8	3,68	0,021	
							179,9	7,46	0,041	
HV-40-10-2	1	166,2	166,2	169,3	170,3	170,3	168,5	1,88	0,011	
	2	162,3	166,2	167,2	174,5	184,5	170,9	7,84	0,046	
	3	170,2	168,2	175,4	178,1	178,7	174,1	4,22	0,024	
							170,4	1,73	0,010	



Valoración de dureza HV en tres cortes. Probeta HV-40-10-1

Tabla 3
Resultados del ensayo de dureza Vickers en (kgf/mm²) G-40 y G-60

Acero	HV mín	HV máx	HV promedio	Desv Estándar	Coef. de Variación
G-40	170,9	211,8	190,6	15,79	0,089
G-60	214,3	336,6	261,9	52,57	0,20

Evaluación de los resultados de las barras soldadas

En las barras de 10 mm de diámetro para los dos aceros G-40 y G-60 la rotura en casi la totalidad se produjo por el metal base. No se presentaron problemas con las soldaduras. Estas barras, por su pequeño diámetro, muy pocas veces son soldadas cuando se usan como refuerzo principal.

La mayoría de las barras de 16 mm de diámetro del acero G-40, rompieron por el metal base y lo mismo resultó para los otros diámetros, coinci-

diendo con la más baja cantidad de carbono estimada con respecto al acero G-60. El G-40 resultó un acero con un límite elástico marcado entre 380 y 403 MPa.

Las barras del acero G-60 soldadas con ANO-4 rompieron todas las soldaduras, aunque con valores de resistencia por encima de los 500 MPa. Las soldaduras con R-13 rompieron 4 por la soldadura y 2 por el metal base aunque su menor valor fue de 512 MPa. De las soldadas con LB-32 sólo una rompió por la soldadura, pero a un valor similar a las que rompieron por el metal base,

siempre para valores altos de resistencia. Este tipo de acero tiene un contenido de carbono más alto que el G-40.

Las barras de 25 y 32 mm de diámetro del G-60, como es natural al aumentar su diámetro, resultaron más difíciles de soldar con calidad, pues hay que depositar más capas de electrodo y el tiempo de calentamiento es mayor. En este grupo de ensayos (15 en total) las soldaduras realizadas con electrodos ANO - 4 y R-13 todas rompieron por la soldadura, con valores altos de resistencia entre 670 y 699 MPa.

En general resultaron positivos los ensayos de soldadura para el acero G-40, para todos los diámetros. En el acero G-60, debido a su elevado contenido de carbono los resultados fueron negativos con predominio de la rotura de las soldaduras. Lo que evidencia, la necesidad de comprobar la composición química de estos aceros para llegar a conclusiones sobre su aptitud para ser soldado por los métodos convencionales.

Evaluación de la composición química

Al disponer de una vasta estadística que permitió alcanzar resultados concluyentes acerca de la composición química de los aceros cubanos, se presenta solo un resumen en las tablas 4 y 5 de los valores promedios de los resultados de la composición química

obtenidos para las coladas de acero y para el ensayo de las barras. De esta forma se puede comprobar que los aceros cumplen con lo previsto por la norma cubana respecto al valor 0,06 % como contenido máximo de fósforo y de azufre.

Tradicionalmente la norma cubana no especifica límites para algunos elementos químicos del acero, y se ha considerado esto como un convenio entre el suministrador y el usuario. En este sentido, dadas las exigencias que impone la amenaza sísmica, importantes normas extranjeras /4,12/ establecen un estricto control de la composición química del acero como exhibe la tabla 6.

Del análisis químico realizado se pone de manifiesto que los aceros cumplen con los porcentajes máximos permisibles de los elementos químicos establecidos en las mencionadas normas. Sin embargo, para el caso del acero G-60, fue superado el carbono en un 35 % para las coladas y en un 28 % para las barras. Respecto al carbono equivalente para este mismo acero se excedió el límite máximo para las coladas en un 14 % y para las barras en un 4,36 %, valorándose que el G-60 no cumple con los requerimientos para el carbono, se infiere que es menos dúctil que el G-40 y además que resultará más difícil el doblado y desdoblado, así como sus características de adherencia. Finalmente se considera que no debe ser soldado por los métodos convencionales.

Tabla 4
Composición química de las barras de los aceros G-40 y G-60

Aceros	Elementos químicos componentes de las barras (%)											
	Carbono		Manganeso		Fósforo		Azufre		Silicio		CEquív.	
	X	S	X	S	X	S	X	S	X	S	X	S
40	0,249	0,039	0,71	0,067	0,025	0,006	0,025	0,004	0,145	0,018	0,384	0,045
60	0,423	0,021	0,79	0,060	0,019	0,006	0,026	0,001	0,198	0,024	0,574	0,015

Tabla 5
Composición química de las coladas de los aceros G-40 y G-60.
(Recepción 2001-08 por ACINOX)

Aceros	Elementos químicos componentes de las barras (%)											
	Carbono		Manganeso		Fósforo		Azufre		Silicio		CEquív.	
	X	S	X	S	X	S	X	S	X	S	X	S
40	0,247	0,014	0,767	0,037	0,022	0,005	0,019	0,005	0,166	0,018	0,396	0,014
60	0,406	0,038	0,849	0,136	0,021	0,003	0,021	0,011	0,209	0,040	0,568	0,036

Tabla 6
Requisitos de composición química en las normas extranjeras

Producto	% máximos en los elementos					
	Carbono	Manganeso	Fósforo	Azufre	Silicio	CEquiv.
Colada	0,30	1,30	0,035	0,045	0,50	0,50
Barra	0,33	1,56	0,043	0,053	0,55	0,55

Conclusiones

- Todas las barras de los dos grados de acero cumplieron los requerimientos del ensayo de doblado en frío.
- El acero G-40 satisface el ensayo de doblado y desdoblado; pero del acero G-60, no cumplieron las barras de diámetros superiores a 19 mm, con grietas en su superficie durante el desdoblado. El acero G-60 puede presentar dificultades para el armado y detallado del diseño sismorresistente.
- Las lecturas de la dureza indicaron una consistencia a través de la longitud de la barra, pero hay variaciones de la dureza dentro de los cortes. Los valores de dureza del acero G-60 fueron elevados lo que se relaciona con el alto contenido de carbono y la tecnología de fabricación del material, esto debe ser controlado para evitar el fallo frágil, y problemas de fisuración.
- El acero G-60 tiene un mal comportamiento pues la mayoría de las barras rompieron por la soldadura, aunque superaron el límite mínimo de resistencia
- El acero G-60 no cumple con los por cientos de carbono y carbono equivalente, con restricciones en cuanto a su soldabilidad y capacidad de doblez para fines sísmicos. El mismo aparenta ser muy duro con riesgos de reducir su ductilidad y posibilidad de ser soldado por los métodos convencionales.

Recomendaciones

- Para no limitar el uso del acero G-60 en zona sísmica y aprovechar su resistencia, debe incrementarse la ductilidad y soldabilidad reduciendo su contenido de carbono, esto puede alcanzarse por las siguientes vías:
1. Con la inclusión en la composición química de pequeñas cantidades (microaleantes) de cromo, vanadio, molibdeno en forma de ferroaleaciones.

2. Con la tendencia actual de someter las barras a un temple superficial, utilizando el propio calor remanente de la laminación, haciendo pasar luego las barras por una línea de enfriamiento rápido con agua.

En los dos casos se garantiza: elevada resistencia, excelentes propiedades de ductilidad y desdoblado, la posibilidad de ser soldados a temperatura ambiente, respondiendo así de forma adecuada ante un evento sísmico.

Bibliografía

1. <http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/080/htm/acero.htm>, Acero y los sismos.
2. NC 192:07 *Hormigón Hidráulico. Cálculo de la resistencia característica real a la compresión*, Oficina Nacional de Normalización, La Habana, Cuba, 2007.
3. UNE-EN 10080:06, *Acero para el armado del hormigón. Acero soldable para armaduras de hormigón armado*, Norma Europea, 2006.
4. CSR: 1998 *Código Colombiano de Construcciones Sismorresistentes*, Colombia, 1998.
5. Gulíáev, A., *Metalografía*, t.1, Editorial Mir, Moscú, págs. 335, 1990.
6. NC 7:02, *Barras de acero para refuerzo de hormigón*, Especificaciones, Norma Cubana, Oficina Nacional de Normalización, La Habana, 2002.
7. NC 165:02, *Barras de acero para refuerzo de hormigón*, Ensayos de tracción y doblado, Norma Cubana, 2002.
8. NC 04-10:72, *Ensayo de dureza Brinell en materiales metálicos*, Cuba, 1972.
9. ASTM E10:07a *Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials*, Philadelphia, USA, 2007.
10. ASTM:E92:03, *Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials*, Philadelphia, USA, 2003.
11. ANSI/AWS Standard, *Structural Welding Code-Reinforcing Steel*.
12. EC 8, *European Committee for Standardization Eurocode 8. Design provisions for earthquake resistance of structures*, Part 1-1: 1998.