

Exigencias al acero de refuerzo cubano ante la demanda sísmica

ZENAIDA PAULETTE FRÓMETA SALAS (*) y JOSÉ ÁNGEL VILLALONGA VIAÑEZ (**)

RESUMEN Se estudia el comportamiento del acero de refuerzo fabricado según la norma cubana NC 7:2002, para evaluar cómo satisface las necesidades del diseño sismorresistente. Con este propósito se desarrolla un programa experimental dirigido a verificar la geometría y a realizar ensayos de tracción, doblado y desdoblado, dureza y composición química para las barras de los grados G-40 y G-60 de diámetros comerciales entre 9,5 y 32,3 mm. De los resultados se comprueba que las barras de acero satisfacen los requerimientos de resistencia y los parámetros dimensionales establecidos por la norma cubana. Sin embargo, no todas las muestras cumplen con las exigencias que ciertos códigos disponen con la intención de garantizar la ductilidad para el adecuado desempeño de las construcciones de hormigón armado en zonas sísmicas. Se concluye acerca de la necesidad de considerar en la norma cubana de diseño de estructuras de hormigón y en la norma de materiales, los requisitos especiales para el acero, que atiendan las pretensiones de la Ingeniería Sismorresistente. Se dan recomendaciones para lograr el comportamiento dúctil del acero de producción nacional.

REQUIREMENTS TO CUBAN REINFORCING STEEL UNDER SEISMIC DEMAND

ABSTRACT *The behaviour of steel manufactured according to the Cuban standard NC 7:02 is studied, in order to evaluate about the conformance to requirements of the seismic design. Steel bars of Grade G-40 and G-60, of all commercial diameters between 10 and 32 mm, were test with this purpose. An experimental program was developed, that include dimensional verifications, tensile testing, bent and rebend, hardness testing and chemical composition tests. The results showed that steel bars satisfy geometric and tensile requirements of Cuban standard, however, some tested samples not fulfill the demands that establish some codes about the required ductility to adequate perform of building of reinforced concrete where prevalence the earthquake. Conclusions about the necessity to consider in the future Cuban standard, special requirements to steel that assist the necessities of the earthquake engineering. Proposals are suggested to guarantee the ductile behaviour of the steel of national production.*

Palabras clave: Acero de refuerzo, Barra, Ductilidad, Diseño sismorresistente, Hormigón armado.

Keywords: Reinforcing steel, Bars, Ductility, Design earthquake, Reinforced concrete.

1. INTRODUCCIÓN

Han sido muy discutidas las limitaciones del enfoque de los códigos de diseño sísmico, debido a que no conducen a un eficiente control de los daños, ni a una plena satisfacción de la filosofía de diseño sismorresistente.

Con el propósito de solventar dichas limitaciones se precisa disponer de una norma que atienda a estas necesidades; asumiendo que la corriente actual de diseño se basa en impedir que se desarrollen mecanismos frágiles. A tenor con lo anterior, países con un desarrollo tecnológico de avanzada tanto en la Ingeniería Sísmica como en la Construcción, realizaron cambios significativos en sus normativas, como son: NZS

3101:95, AS/NZS 4671:01, EHE: 07, ACI 318:05 y el Eurocódigo 8 (EC 8). Las modificaciones incluyen, entre varios aspectos, los requerimientos especiales del acero de refuerzo, que es el responsable de disipar la energía en las zonas escogidas estratégicamente (articulaciones plásticas).

De este modo el acero debe cumplir con tres condiciones básicas:

1. Baja variabilidad del límite elástico real contra el ofrecido por el fabricante.
2. Capacidad de endurecimiento por encima del límite elástico real.
3. Alta capacidad de deformación post-elástica.

Por lo antes expuesto, teniendo en cuenta que el 40% del territorio cubano está en zonas de riesgo sísmico (Figura 1) y unido al predominio de las construcciones de hormigón armado en el país, se necesita conocer las propiedades del acero de refuerzo que tienen mayor influencia en la respuesta sísmica. Para esto se desarrolló un proyecto de caracterización de los aceros de producción nacional.

(*) Ing. Civil. Doctoranda. Profesora. Universidad de Oriente. Facultad de Construcciones. Departamento de Ingeniería Civil. Avenida de Las Américas s/n. Santiago de Cuba.

(**) MSc. Ing. Metalúrgico. J. Laboratorio de Propiedades Mecánicas. Centro de Investigaciones Metalúrgicas. Ave. 51. No. 23611, La Lisa, Ciudad de la Habana. Cuba.

FIGURA 1. Mapa de Zonificación Sísmica de Cuba. (Tomado de NC 46:99. Construcciones Sismorresistentes. Requisitos básicos para el diseño y la construcción.)



El presente trabajo tiene como objetivo evaluar las exigencias al acero de refuerzo ante la demanda sísmica y como parte del proyecto se realizaron ensayos experimentales de caracterización de la geometría, tracción axial, doblado y desdoblado, dureza y composición química, para definir las propiedades que permitan verificar el desempeño sísmico de las edificaciones de hormigón armado (Álvarez y Frómata, 2007).

Las normativas cubanas NC 207:03 y NC 7:02 reflejan las exigencias de parámetros como la tensión en el límite de fluencia (f_y), la tensión máxima (f_u) y el alargamiento total del acero (δ); sin embargo no tienen en cuenta los requisitos para el uso de los aceros en las áreas vulnerables a terremotos. Códigos más exigentes como el EC 8, la NZS 3101 y el ACI 318, establecen los requerimientos que las barras deben satisfacer y que juegan un importante rol en la ductilidad global de la estructura; como son los valores límites de las tensiones, la relación de endurecimiento (f_u/f_y), la limitación de la sobrerresistencia de la tensión de fluencia ($f_{y_{real}}/f_{y_{nominal}}$) y los límites para la capacidad de deformación ($\epsilon_{máx}$). Otros argumentos son expresados concernientes a la aptitud ante el doblado y desdoblado de las barras de acero así como respecto a su composición química. Cambios en línea con lo anterior podrían ser incorporados a las normas cubanas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. MATERIALES

Se estudiaron los aceros de los grados G-40 y G-60 con niveles de fluencia nominal de 300 y 420 MPa. Las barras corrugadas utilizadas para el refuerzo de hormigón (Figura 2), se obtienen mediante la laminación en caliente de palanquillas de acero (NC 7:02). En el muestreo aleatorio se seleccionaron las barras de diferentes coladas de aceros procedentes de la Empresa Siderúrgica ACINOX Las Tunas, para los diámetros nominales de 9,5; 12,7; 15,9; 19,1; 25,4 y 32,3 mm.

2.2. METODOLOGÍA DE LOS ENSAYOS Y CARACTERIZACIÓN DE LOS ACEROS DE REFUERZO PARA HORMIGÓN (G-40 Y G-60)

El programa experimental se desarrolló en el Centro de Investigaciones Metalúrgicas de La Habana (CIME). El mismo consiste en una serie de ensayos de tracción, la verificación de las propiedades geométricas, los ensayos de doblado y desdoblado, los ensayos de dureza y el análisis de la composición química de los aceros a estudiar.

2.2.1. Verificación de la geometría de las barras

En la verificación de la geometría de las barras se determinó el peso de 36 probetas (3 por cada diámetro para los dos gra-

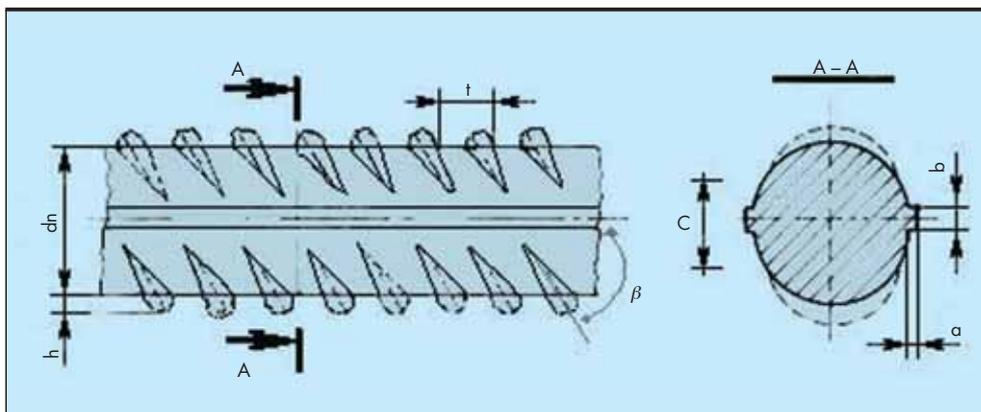


FIGURA 2. Barra de corruga helicoidal parcial de grados G-40 y G-60.

dos de aceros), se observó el acabado de las barras y fueron comprobados el ángulo de inclinación (β), el espaciamiento (t) y la altura mínima promedio de las corrugas (h), la altura (a) y el grueso del nervio (b), así como la máxima separación entre los extremos de las corrugas (C). La comprobación de estos aspectos se realizó en atención a la norma cubana de acero NC 7:02. El cálculo del área específica de las corrugas (fR) se efectuó conforme a lo establecido en la norma UNE EN 10080:06 y la norma neozelandesa NZS 4671:01, dado que la norma cubana no contempla esta importante medida para evaluar las propiedades de adherencia del acero con el hormigón.

El área específica de la corruga fR se define por la norma UNE EN 10080:06 como:

$$fR = \frac{1}{\pi d} \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{j=1}^m F_{Rij} \sin \beta_{ij}}{c_i} \quad [1]$$

Donde:

- n:** número de filas de las corrugas transversales en la circunferencia.
- m:** número de inclinaciones diferentes.
- F_R:** área de la sección longitudinal de la corruga en su plano.
- d:** diámetro nominal de la barra.
- β :** ángulo de la corruga respecto del eje de la barra.
- c:** separación de las corrugas transversales.

Para los aceros de producción nacional n es igual a 2, además existe un solo tipo de inclinación de las corrugas siendo m igual a 1, c se denomina por t y F_R se determinó considerando el promedio de la altura variable de la corruga.

Los resultados de las mediciones y el cumplimiento de las especificaciones de la NC 7:02 se muestran en la Tabla 1. Como se observa, en su mayoría se satisfacen los requisitos geométricos, aunque hay discrepancias no significativas en algunas probetas que no cumplen con la altura ni el espaciamiento entre las corrugas. Estas diferencias están aproximadamente en el orden del 1 al 3% mayor que lo especificado para el espaciamiento y del 6 al 13% menor que la altura mínima de las corrugas. En cuanto al ancho de los nervios no se cumplen con el límite máximo indicado y las diferencias son apreciables en el orden del 45 hasta el 140%. La inclinación de las corrugas se corresponde con lo normado, ya que todas tienen un ángulo de inclinación superior a 45 grados.

De los resultados expuestos en la Tabla 1 se observa que el 70% de las probetas supera el valor de 0,056 establecido como área mínima específica de las corrugas (UNE EN 10080 y NZS 4671) y algunas tienen un valor inferior a éste, con diferencias aproximadas del 3 al 15%. Se infiere así, la necesidad de realizar ensayos de adherencia y evaluar la participación del acero para el cumplimiento de su función en las estructuras de hormigón reforzado, de gran importancia para evitar daños cuando ocurra un sismo.

2.2.2. Estudio del comportamiento de los aceros a tracción

Los ensayos a tracción axial monótona hasta la rotura se realizaron en la Máquina Universal del Laboratorio de Propiedades Mecánicas del CIME, con una incertidumbre asociada al equipo de 0.48%, la temperatura ambiente de 27°C y la velocidad de ensayo según NC 165:02 y ASTM 370:08. Fueron ensayadas 160 probetas de sección transversal completa (sin maquinar) y una dimensión total de 410 mm, que comprende la longitud de ensayo de 200 mm.

El objetivo de este ensayo es valorar las propiedades de resistencia y deformación de los aceros que permiten evaluar

la calidad y conocer los parámetros que definen su ductilidad. Los resultados experimentales y el análisis estadístico para los valores medios de las probetas ensayadas se resumen en la Tabla 2.

Las curvas tensión-deformación de los valores medios fueron obtenidas de las mediciones experimentales, considerando el área nominal de las barras para determinar la tensión normal. En la Figura 3 se aprecia que ambos aceros tienen bien definida la zona de fluencia lo que demuestra que tienden al comportamiento dúctil. No obstante, el acero G-60 exhibe un escalón de fluencia más reducido y una mayor pendiente de endurecimiento. Además, a partir de las curvas se determinó el módulo de elasticidad de los aceros (E_s) como la pendiente de la porción lineal del diagrama (relación entre la tensión y su correspondiente deformación), se obtuvo el valor aproximado de 2×10^5 MPa.

Las propiedades mecánicas de los aceros G-40 y G-60 que se muestran en la Tabla 2 se corresponden con el promedio de 15 probetas de cada diámetro, con la excepción de los diámetros de 12,7 mm del acero G-40 y de 15,9 mm del acero G-60 para los que se ensayaron 10 probetas. En base a las prescripciones de la NC 7, todas las muestras exhiben valores conformes con las características mecánicas mínimas garantizadas por el suministrador; el límite de fluencia (f_y) mayor que 300 MPa para el acero G-40, y mayor que 420 MPa para el acero G-60. La tensión máxima (f_u) resultó mayor que 413 MPa para el acero G-40, y mayor que 578 MPa para el acero G-60. Los valores obtenidos son comparables con la certificación ofrecida por el fabricante (Tabla 3).

Evaluando la ductilidad a través de la relación f_u/f_y se obtiene para el acero G-40 un valor de 1,49 y para el G-60 de 1,66; siendo así se cumple con el mínimo de 1,25 establecido por algunos códigos para el diseño sísmico (ACI 318 y CSR). Por otra parte la norma NZS 4671 y el EC 8 estipulan los límites de f_u/f_y entre 1,15 y 1,35; como se observa los aceros cubanos superan excesivamente este límite máximo de 1,35 obtenido de una serie de experimentos que definen un umbral, para lo cual solamente dentro de este rango las estructuras pueden considerarse dúctiles.

Otro análisis fundamental es la evaluación de la relación entre el límite de fluencia real y el valor de fluencia nominal (f_{yreal}/f_{ynom}), pues el ACI 318 señala que el empleo de armadura longitudinal con resistencia más elevada que la supuesta en el diseño conducirá a esfuerzos de cortante y de adherencia no previstas en el cálculo que pueden originar fallas frágiles, por lo que establece el valor de 1,3 como límite máximo. Se cumple este requisito con valores de 1,17 para el acero G-40 y para el G-60 de 1,07.

Un razonamiento sobre las deformaciones obtenidas revela que se satisface ampliamente lo recomendado por la NC 7:02 en cuanto al alargamiento total (δ) medido en una longitud de ensayo de 200 mm, en el momento de la fractura de la probeta. Para el acero G-40 se alcanzó el valor de δ igual a 21,65 %, mayor que el normado de 12 % y un valor igual a 14,98 % para el acero G-60, mayor que el 9% señalado por dicha norma.

Un parámetro adicional para definir la ductilidad es el alargamiento bajo carga máxima ($\epsilon_{m\acute{a}x}$), que representa la deformación uniforme de la probeta cuando alcanza tensión f_u . De los resultados de esta investigación se obtienen valores de $\epsilon_{m\acute{a}x}$ igual a 17,16 % para el acero G-40 y de 14,92 % para el acero G-60. La dispersión de estos valores es mayor que para f_u/f_y , lo que puede ser atribuido a la dificultad en la medición de este parámetro. De esta manera se satisfacen los criterios del EC 8 que consideran valores de $\epsilon_{m\acute{a}x}$ superiores al 8 % y la norma NZS 4671 superiores al 10 y al 15 %.

EXIGENCIAS AL ACERO DE REFUERZO CUBANO ANTE LA DEMANDA SÍSMICA

Probeta			Masa lineal (kgf/m)		Corrugas transversales (mm)						Nervios longitudinales (mm)				β grados	fR	
Grado	σ	#			Espaciamiento t		Altura promedio h		Máx. separación C		Altura a		Grueso b				
			Kg/m(%dif)	Esp	Medida	Esp	Medida	Esp	Medida	Esp	Medida	Esp	Medida	Esp			
G40	9,5 mm	1	0,56 (0,63)	0,56	6,79	(4,7-6,7)	0,88	> 0,4	3,50	< 3,5	0,82	(0,47-1,33)	2,54	(0,76-1,02)	65	0,090	
		2	0,58 (0,53)		6,70		0,75		2,95		0,86		2,37		66	0,082	
		3	0,56 (0,68)		6,69		0,79		2,50		0,97		2,30		64	0,088	
		G60	1		0,56 (0,69)		6,66		0,66		3,52		0,82		2,35	62	0,066
			2		0,58 (3,75)		6,70		0,73		3,40		1,18		2,33	60	0,072
			3		0,59 (5,83)		6,73		0,66		3,38		1,45		2,54	60	0,065
G40	12,7 mm	1	0,95 (4,04)	0,994	7,96	(6,3-8,9)	0,79	> 0,5	3,90	< 4,9	0,88	(0,63-1,77)	3,10	(1,01-2,03)	60	0,069	
		2	0,95 (4,23)		7,94		0,84		*		0,82		3,19		60	0,077	
		3	0,95 (3,82)		7,97		0,82		3,81		0,79		2,61		60	0,071	
		G60	1		0,99 (0,10)		7,78		1,02		4,45		1,11		2,98	61	0,088
			2		0,99 (0,28)		7,82		1,15		4,46		1,31		3,02	60	0,098
			3		0,99 (0,07)		7,99		1,13		4,50		1,32		3,03	60	0,094
G40	15,9 mm	1	1,56 (0,45)	1,552	11,35	(7,9-11,1)	0,93	> 0,7	5,38	< 6,1	1,74	(0,79-2,22)	3,31	(1,27-2,54)	60	0,056	
		2	1,56 (0,77)		11,40		1,02		5,30		1,67		3,44		58	0,059	
		3	1,57 (1,29)		11,51		0,97		5,52		1,73		3,40		60	0,053	
		G60	1		1,48 (4,64)		11,12		0,88		4,53		0,84		3,63	60	0,057
			2		1,49 (4,52)		11,72		0,91		4,22		1,14		3,60	59	0,056
			3		1,48 (4,25)		11,00		0,92		3,90		1,18		3,48	61	0,062
G40	19,1 mm	1	2,13 (4,47)	2,235	13,02	(9,5-13,3)	1,01	> 1,0	5,40	< 7,3	1,45	(0,95-2,67)	3,08	(1,52-3,06)	58	0,054	
		2	2,19 (1,83)		12,42		0,98		5,57		2,31		2,97		60	0,056	
		3	2,18 (2,37)		12,88		1,02		5,90		1,84		2,96		62	0,056	
		G60	1		2,13 (4,69)		12,76		0,98		6,07		0,67		4,39	58	0,052
			2		2,12 (5,19)		12,72		0,94		5,37		0,79		4,70	61	0,053
			3		2,11 (5,46)		12,76		0,86		4,90		0,70		4,37	57	0,047
G40	25,4 mm	1	3,60 (7,63)	3,973	16,17	(12,7-17,8)	1,31	> 1,3	6,68	< 9,7	2,42	(1,27-3,55)	3,25	(2,03-4,00)	61	0,059	
		2	3,89 (2,01)		16,17		1,37		7,33		1,69		4,10		62	0,061	
		3	3,94 (0,83)		16,17		1,71		6,47		1,41		4,05		61	0,078	
		G60	1		3,91 (1,64)		17,87		1,13		6,92		2,22		3,80	61	0,045
			2		3,81 (3,98)		17,97		1,08		6,09		2,68		3,44	60	0,044
			3		3,82 (3,90)		18,00		0,99		5,84		2,17		3,38	61	0,041
G40	32,3 mm	1	6,51 (1,17)	6,404	21,37	(16,1-22,5)	1,82	> 1,6	9,38	< 12,4	2,74	(1,52-4,52)	5,75	(2,55-5,16)	60	0,060	
		2	6,38 (0,31)		21,67		1,76		10,0		3,50		5,28		61	0,054	
		3	6,65 (3,79)		21,40		1,95		9,74		2,93		5,43		60	0,064	
		G60	1		6,72 (5,00)		22,84		1,63		9,74		3,24		6,50	60	0,050
			2		6,73 (5,15)		21,70		1,48		10,3		3,05		5,21	60	0,047
			3		6,68 (5,72)		22,87		1,50		9,51		3,48		6,10	62	0,047

TABLA 1. Verificación de los requisitos del corrugado de las barras de acero de refuerzo. **NOTA:** Los valores mas oscuros representan los requisitos que no se cumplen. Esp.: especificaciones. Máx. separación (C): cuerda de 12,5 % del perímetro nominal (NC 7:02).

EXIGENCIAS AL ACERO DE REFUERZO CUBANO ANTE LA DEMANDA SÍSMICA

G - 40	fy (MPa)	Sd fy (MPa)	f _{yk} (MPa)	fu (MPa)	Sd fu (MPa)	fu/fy (MPa)	$\frac{f_{yreal}}{f_{ynom}}$	δ (%)	Sd δ (%)	ε _{máx} (%)	Sdε _{máx} (%)	ε _{end} (%)	Sdε _{end} (%)
9,5 mm	375,1	8,29	360,5	555,2	11,59	1,48	1,25	21,23	1,71	17,26	1,08	3,78	0,25
12,7 mm	341,6	8,52	326,0	508,7	9,608	1,49	1,14	20,45	1,86	16,23	1,45	4,15	0,45
15,9 mm	354,2	7,28	341,4	527,4	15,21	1,49	1,18	22,97	1,70	17,47	0,52	3,74	0,28
19,1 mm	340,3	6,29	329,3	520,4	9,120	1,53	1,13	22,50	1,67	17,37	0,88	3,93	0,22
25,4 mm	341,6	5,36	332,2	512,4	10,03	1,50	1,14	21,80	1,59	17,12	1,00	4,00	0,37
32,3 mm	352,2	11,8	331,4	514,2	5,240	1,46	1,17	20,92	1,07	17,48	0,90	3,50	0,50
Promedio	350,8	7,92	336,8	523,0	10,13	1,49	1,17	21,65	1,60	17,16	0,97	3,85	0,34
Desv. Est.	13,3	2,24	12,72	17,08	3,26	0,02	0,04	0,960	0,27	0,47	0,13	0,53	0,12
Coef. Var.	0,038	0,283	0,038	0,033	0,322	0,015	0,038	0,044	0,17	0,028	0,137	0,14	0,36
Conf 95%	10,64	1,795	10,18	13,66	2,609	0,02	0,035	0,771	0,22	0,38	0,11	0,43	0,10
G - 60	fy (MPa)	Sd fy (MPa)	f _{yk} (MPa)	fu (MPa)	Sd fu (MPa)	fu/fy (MPa)	$\frac{f_{yreal}}{f_{ynom}}$	δ (%)	Sd δ (%)	ε _{máx} (%)	Sdε _{máx} (%)	ε _{end} (%)	Sdε _{end} (%)
9,5 mm	457,0	18,5	424,5	746,5	28,90	1,63	1,09	15,20	1,71	14,70	1,26	2,59	0,29
12,7mm	462,1	9,85	444,8	780,3	9,46	1,69	1,10	14,43	1,29	14,30	0,97	2,85	0,43
15,9 mm	440,5	15,13	412,8	709,3	29,06	1,61	1,05	17,00	1,39	16,32	1,40	3,10	0,37
19,1 mm	455,8	9,86	438,4	749,5	11,19	1,64	1,09	15,06	1,03	14,97	0,93	3,05	0,29
25,4 mm	447,1	6,11	436,3	742,1	7,83	1,66	1,06	14,20	1,48	14,21	1,30	3,00	0,44
32,3 mm	436,7	8,24	422,2	742,4	10,20	1,70	1,04	14,30	1,60	15,01	0,98	2,83	0,46
Promedio	449,9	11,28	429,8	745,0	16,11	1,66	1,07	15,03	1,42	14,92	1,14	2,90	0,38
Desv. Est.	10,05	4,63	11,96	22,61	10,03	0,03	0,02	1,05	0,24	0,76	0,20	0,19	0,07
Coef. Var.	0,022	0,410	0,028	0,030	0,623	0,020	0,022	0,070	0,17	0,051	0,178	0,065	0,19
Conf 95%	8,04	3,701	9,57	18,09	8,027	0,027	0,019	0,839	0,19	0,61	0,16	0,15	0,06

fy y Sdfy: tensión media y desviación estándar en el límite de fluencia.
 f_{yk}: resistencia característica del acero (la NC 207:03 que fija en un 5% la probabilidad de valores menores).
 fu y Sdfu: tensión máxima y su desviación estándar.
 f_{yreal} y f_{ynomin}: tensiones de fluencia real y nominal.
 δ y Sd δ: elongación permanente porcentual o alargamiento total en 200 mm y su desviación estándar.
 ε_{máx} y Sdε_{máx}: deformación bajo la tensión máxima y su desviación estándar.
 ε_{end} y Sdε_{end}: deformación en el inicio del endurecimiento y su desviación.
 Desv. Est.: desviación estándar.
 Coef. Var.: coeficiente de variación.

TABLA 2. Propiedades mecánicas de las barras de los aceros G-40 y G-60 obtenidas en los ensayos a tracción.

Aceros	fy promedio (MPa)	Desv. Estándar fy (MPa)	fu promedio (MPa)	Desv. Estándar fu (MPa)	δ promedio (%)	Desv. Estándar δ (%)
G-40	360,94	20,34	522,17	36,41	21,07	2,22
G-60	460,59	36,50	718,82	58,00	15,38	3,45

TABLA 3. Propiedades mecánicas de las coladas de los aceros G-40 y G-60.

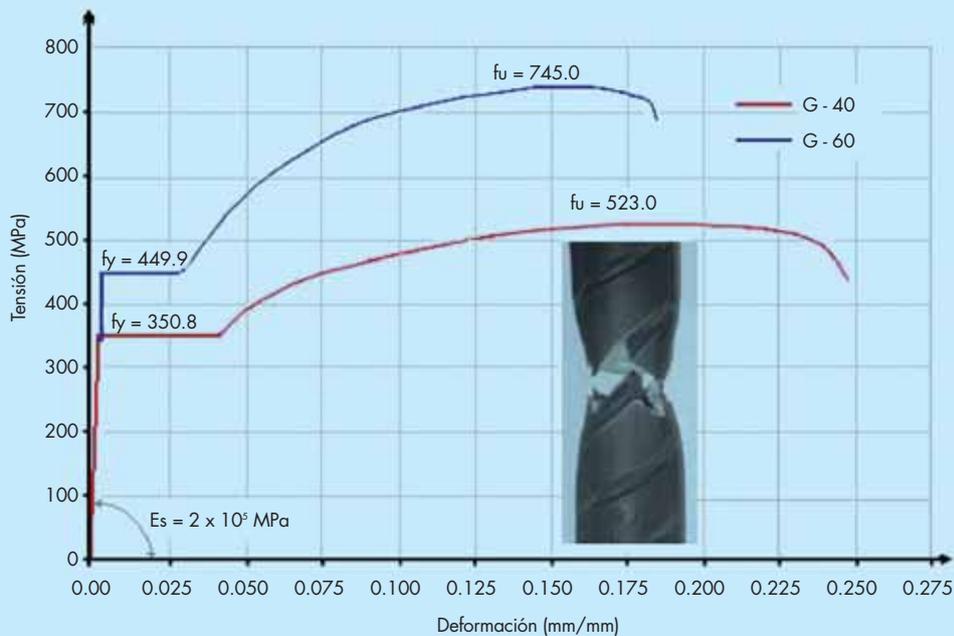
Fuente: Resumen de los resultados ofrecidos por la Siderúrgica ACINOX Las Tunas, correspondientes a los ensayos realizados para el control de la calidad de la producción certificada desde el año 2001 hasta el año 2008.



Máquina Universal de ensayo

Probetas de acero

Fractura dúctil de la probeta



Curvas tensión-deformación de los valores medios de los aceros G-40 y G-60

FIGURA 3. Ensayo del acero de refuerzo a tracción axial.

La fractura de las barras de acero se manifestó bajo grandes deformaciones, con disminución gradual de la sección transversal y con un estrechamiento local (cuello) que se inició para valores cercanos a la tensión máxima hasta producirse la división de la probeta en dos trozos. La ruptura se produce en forma de cono, a lo largo de la superficie, con un ángulo de 45 grados. El fallo se caracteriza por una fractura fibrosa de tipo dúctil para la generalidad de las probetas de los dos grados de acero, como se observa en la Figura 3.

2.2.3. Comportamiento de los aceros al doblado

El ensayo de doblado es otro índice de la capacidad de deformación plástica del material que da una medida de su ductilidad. Los ensayos de doblado simple se efectuaron según la NC 165, en la prensa universal IBERTEST de la Empresa Siderúrgica ACINOX de Las Tunas. Dicha norma considera el doblado de la barra a 180° y a temperatura ambiente. Se escogió un diámetro del mandril de 3,5 veces el diámetro nominal de la barra (d_n) para las probetas de diámetro menor de 19,1



FIGURA 4. Ensayo de doblado a los aceros G-40 y G-60.

mm; un mandril de 5dn para las probetas de 19.1 y 25,4 mm y un mandril de 7dn para las de 32,3 mm de diámetro. Todas las muestras ensayadas cumplen con los requerimientos del doblado simple, no mostrando grietas en la cara exterior por efectos de aplastamiento (Figura 4a).

En este estudio se realizó también una caracterización más severa del ensayo de doblado. De este modo se efectuó el ensayo de doblado y desdoblado siguiendo los procedimientos de la instrucción española EHE: 07. Primeramente se dobla la probeta a temperatura ambiente por medio de una máquina figuradora con un ángulo de 90°, luego se somete a 100°C durante 30 minutos para simular un efecto de envejecimiento, luego se dejó

enfriar y finalmente se desdobló a un ángulo de 20°. Se ensayaron 180 probetas y los mandriles escogidos tanto para el acero G-60 como para el G-40 se muestran en Figura 4b.

Los resultados de los ensayos de doblado y desdoblado demuestran que las probetas del acero G-40 cumplen con lo estipulado por la EHE, sin sufrir daños que alteren sus características mecánicas ni muestras de fragilidad del material. Sin embargo, algunas probetas del acero G-60 desarrollaron pequeñas fisuras en la superficie después del desdoblado, principalmente las de diámetros iguales o superiores a 19,1 mm, lo que indica que este proceso somete al acero a grandes deformaciones. 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 4b muestra las grietas como consecuencia de este ensayo, concluyéndose que en el caso de los aceros de elevada resistencia y diámetros grandes se muestra la gran dureza del material debido al alto contenido de carbono en su composición.

2.2.4. Comportamiento de dureza de los aceros

Los ensayos de dureza Brinell y Vickers fueron realizados en el Laboratorio del CIME, con el objetivo de relacionar la resistencia del acero con su contenido de carbono, también se evaluó la variación de la dureza en la longitud de las probetas y en su sección transversal, lo que nos permitió inferir acerca de la calidad del material.

• Ensayo de dureza Brinell

Este ensayo se realizó según las normas NC 04-10 y ASTM E10 con un Durómetro Universal Brinell marca IBERTEST 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). Con el ensayo de dureza HB se comprobó que existe una adecuada correlación entre la dureza del material y las tensiones máximas alcanzadas en los ensayos de tracción. Al tiempo se valora preliminarmente el contenido de carbono de los aceros. La Tabla 4 muestra que los por cientos de carbono son elevados, resultando valores de 0,38% como promedio para el acero G-40 y de 0,568% para el acero G-60, estos resultados son superiores al valor de 0,30% que recomiendan ciertas normas extranjeras como contenido máximo de carbono en la barra terminada.

Se aprecia que debe existir una tendencia a disminuir el contenido de carbono de los aceros de producción nacional y con ello mejorar su aptitud ante el doblado y desdoblado, así como su comportamiento en zonas sísmicas. Por lo tanto, es necesario realizar un ensayo de composición química para determinar con exactitud la composición de los elementos de estos aceros y de esta forma limitar su contenido para que responda a las exigencias para dichas zonas.

• Ensayo de dureza Vickers

La dureza HV se determinó con un Durómetro Vickers, en un rango de 5 a 10 kgf y una incertidumbre de 0,31, a una temperatura de 27 ± 2 C. El ensayo se realizó por las normas NC 04-11 y ASTM E 92. Fueron ensayadas 72 probetas de los dos tipos de aceros, con tres cortes transversales en el sentido longitudinal y con un barrido en cada corte de cinco puntos, desde el centro de la sección hasta el borde como se muestra en la Figura 5.

Se observa una tendencia de distribución de la dureza con un incremento, generalmente, del centro hacia los bordes de la sección transversal de las probetas; no obstante se presenta alguna dispersión en las muestras del acero G-60. El promedio de la dureza en las secciones transversales experimenta muy pequeñas variaciones a lo largo de la longitud de las barras, de aquí que pueda valorarse de buena la calidad en el proceso de fabricación del material. En las Tablas 4 y 5 se exponen los resultados de los ensayos para los aceros G-40 y G-60.

2.2.5. Composición química de los aceros

La tecnología de fabricación del acero en Cuba, al no poder incorporar siempre manganeso y otras aleaciones, ha obligado a

eleva el contenido de carbono para aumentar la resistencia, lo que conlleva a una disminución de la ductilidad, afectando también la soldabilidad y su adherencia con el hormigón.

En esta investigación se realizó el análisis químico a las barras de los aceros G-40 y G-60 considerando 3 réplicas por diámetro y los resultados están en la Tabla 6. El resumen de las coladas de la producción de las barras realizada por la Siderúrgica ACINOX Las Tunas en el período 2001-2008 se expone en la Tabla 7.

Se comprobó que los aceros cumplen con lo previsto por la NC 07 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 como el CSR, la EHE: 07, la NZS 4671 y el EC 8, establecen un estricto control de la composición química del acero como exhibe la Tabla 8.

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.

3. CONCLUSIONES

En línea con el alcance de la investigación se evaluaron las exigencias a los aceros cubanos para enfrentar la demanda sísmica. Las conclusiones son sacadas sobre la base de los resultados y las respuestas a los ensayos.

- Se revela que una cantidad considerable de barras satisface el área mínima de corruga f/R y una minoría muestra una pequeña diferencia, no obstante, será necesario realizar ensayos de adherencia y evaluar su actuación con el hormigón. El ancho de los nervios supera el valor máximo, aspecto que influye en el doblez de la barra.
- Se satisfacen los requisitos de resistencia y deformación de la norma cubana. De igual forma se cumplen las prescripciones para zonas sísmicas que estipulan otras normas extranjeras, como el alargamiento máximo y las relaciones (f_u/f_y) y (f_{yreal}/f_{ynom}) , sin embargo, algunas barras no están acorde con otros necesidades de ductilidad al exceder el máximo de la relación f_u/f_y establecido por códigos europeos.
- El análisis estadístico de las propiedades mecánicas y la gran aproximación con lo que certifica el fabricante hacen constar que la calidad de la actual producción del acero ha mejorado respecto a anteriores sondeos (Rubiera y Medina, 1987), a pesar de ciertas dispersiones en las deformaciones por lo complejo de su medición. Sobre esta base, puede confiarse la evaluación de exigencias sismorresistentes al acero cubano que garanticen la resistencia y la seguridad.
- Todas las barras pasan el ensayo de doblado en frío conforme con la NC 7. Las barras del acero G-40 satisfacen

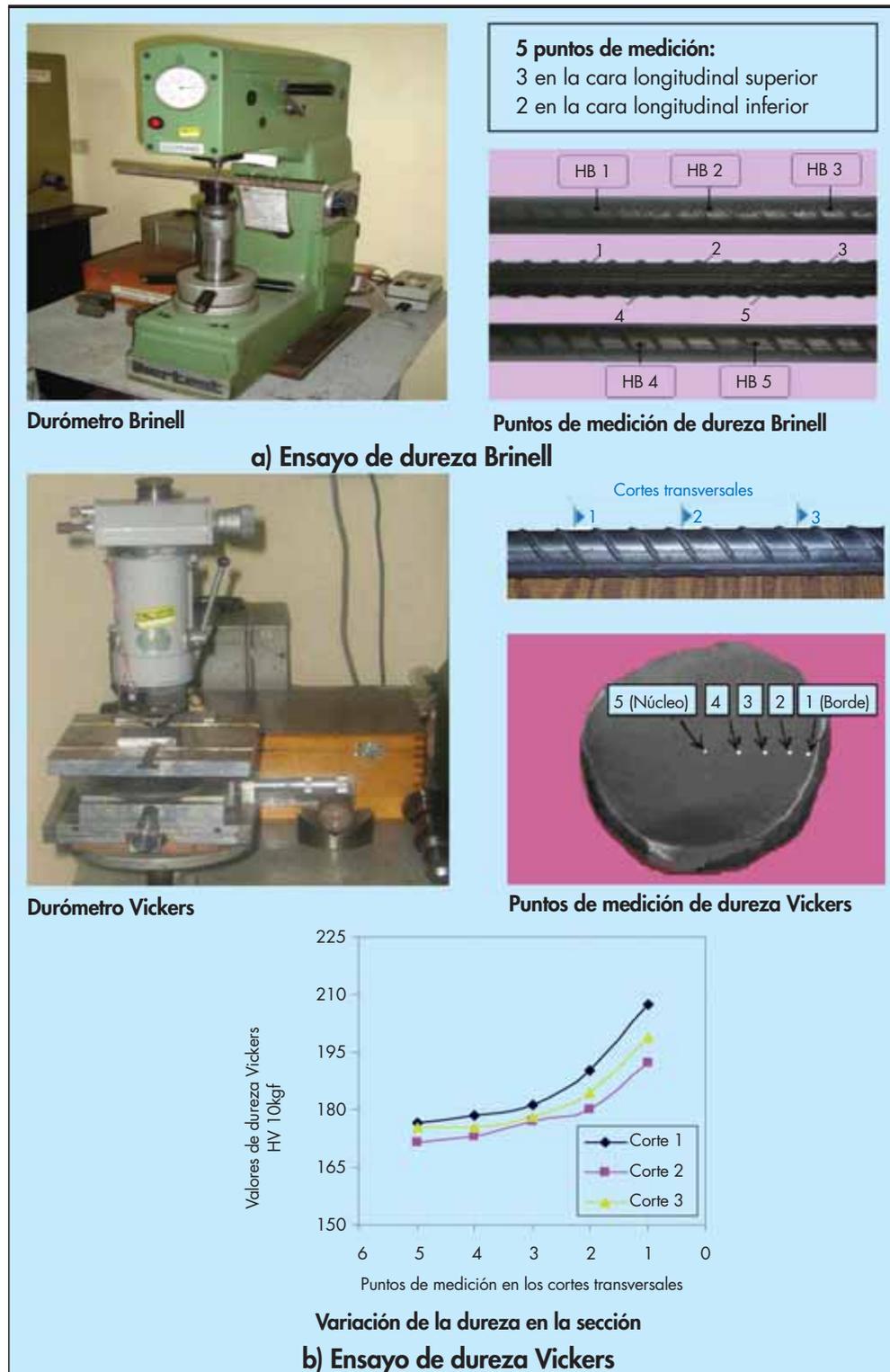


FIGURA 5. Ensayo de dureza a las barras de acero G-40 y G-60.

el ensayo de doblado y desdoblado; sin embargo, del acero G-60, solo cumplen las barras de diámetros inferiores a 19 mm, pues se experimentaron grietas visibles en la superficie de las barras de 32 mm, en el desdoblado, como consecuencia de su dureza y elevado contenido de carbono. Esto es preocupante para lograr que el

acero G-60 sea apropiado para los requisitos de armado y detallado del diseño sismorresistente.

- Se destaca una consistencia aceptable de la dureza en la longitud de la barra, lo que verifica la calidad apropiada del acero. Se manifiestan valores elevados de dureza para

EXIGENCIAS AL ACERO DE REFUERZO CUBANO ANTE LA DEMANDA SÍSMICA

Muestra	Área mm ²	HBmáx Kgf/mm ²	σteór.prom (MPa)	C (%)	Muestra	Área mm ²	HBmáx Kgf/mm ²	σteór.prom (MPa)	C (%)	
HB-40-10-1	71	142	501,487	0,38	HB-60-10-1	71	154	543.866	0,50	
HB-40-10-2	71	136	480,297	0,31	HB-60-10-2	71	170	600.372	0,54	
HB-40-10-3	71	181	639,219	0,38	HB-60-10-3	71	170	600.372	0,51	
Promedio			540,330	0,36	Promedio			581.536	0,52	
HB-40-13-1	129	113	399,070	0,21	HB-60-13-1	129	179	632.156	0,67	
HB-40-13-2	129	125	441,450	0,25	HB-60-13-2	129	176	621.560	0,64	
HB-40-13-3	129	118	416,730	0,24	HB-60-13-3	129	167	589.770	0,60	
Promedio			419,080	0,23	Promedio			614.497	0,64	
HB-40-16-1	199	124	437,918	0,29	HB-60-16-1	199	134	473.230	0,34	
HB-40-16-2	199	131	462,639	0,33	HB-60-16-2	199	193	681.590	0,61	
HB-40-16-3	199	138	487,361	0,32	HB-60-16-3	199	173	610.967	0,61	
Promedio			462,640	0,31	Promedio			588.590	0,52	
HB-40-19-1	284	136	480,300	0,33	HB-60-19-1	284	182	642.750	0,55	
HB-40-19-2	284	138	487,360	0,35	HB-60-19-2	284	164	579.180	0,53	
HB-40-19-3	284	146	515,610	0,38	HB-60-19-3	284	152	536.800	0,45	
Promedio			494,420	0,35	Promedio			586.240	0,51	
HB-40-25-1	510	162	572,119	0,53	HB-60-25-1	510	182	642.750	0,57	
HB-40-25-2	510	138	487,360	0,38	HB-60-25-2	510	193	681.598	0,66	
HB-40-25-3	510	140	494,420	0,40	HB-60-25-3	510	193	681.598	0,73	
Promedio			517,970	0,44	Promedio			668.649	0,65	
HB-40-32-1	819	149	526,200	0,48	HB-40-32-1	819	186	656.878	0,64	
HB-40-32-2	819	153	540,330	0,45	HB-40-32-2	819	195	688.660	0,76	
HB-40-32-3	819	150	529,740	0,45	HB-40-32-3	819	198	699.257	0,68	
Promedio			532,090	0,46	Promedio			681.598	0,69	
Acero	Tensión teórica promedio (σteór.prom) (MPa)					Por ciento de Carbono (C) (%)				
	Media	Desviación	Mín	Máx	Coef.Variación	Media	Desviación	Mín	Máx	Coef.Variación
G-40	494.42	46.405	419.1	540.3	0.094	0.36	0.085	0.23	0.46	0.24
G-60	620.18	44.260	581.5	681.6	0.071	0.59	0.080	0.51	0.69	0.14

TABLA 4. Ensayo de dureza Brinell.

el acero G-60 que se relacionan con el elevado contenido de carbono y la tecnología de fabricación del material.

- 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 sismorresistentes.
- En general las barras de los aceros cubanos exhiben un comportamiento que se destaca por una baja variabilidad del límite elástico real frente al ofrecido por el fabricante, adecuada capacidad de endurecimiento y de deformación, mostrando un escalón de fluencia bien definido.

4. RECOMENDACIONES

- En la revisión de las normas cubanas de diseño y de materiales deben considerarse los requisitos especiales a exigir al acero cubano para que se ajuste a las necesidades de la Ingeniería Sismorresistente.
- Realizar los ensayos de adherencia, de soldabilidad y los ensayos dinámicos para obtener una caracterización más completa del desempeño de los aceros de producción nacional.
- Mantener en la norma el requisito de elongación total pero elevando su límite a valores superiores, así como

EXIGENCIAS AL ACERO DE REFUERZO CUBANO ANTE LA DEMANDA SÍSMICA

Probetas	Cortes	Valores de dureza Vickers HV10 Aceros G-40 y G-60 (10 Kgf)							
		Mediciones en los cortes transversales					Análisis estadístico		
		5 Núcleo	Punto 4	Punto 3	Punto 2	1 Borde	Promedio	Promedio	Desviación Estándar
HV40-10-1	1	168,2	175,6	177,7	182,2	182,3	177,2	179,9	7,46
	2	174,5	175,6	183,4	190,5	217,5	188,3		
	3	167,3	169,5	170,2	175,6	176,6	171,8		
HV40-13-1	1	176,5	178,6	181,4	190,2	207,5	186,8	182,7	4,04
	2	169,3	175,2	177,1	180,2	192,1	178,8		
	3	175,5	175,2	184,4	178,1	198,7	182,4		
HV40-16-1	1	171,3	182,2	193,0	208,8	210,2	193,1	192,6	6,52
	2	188,1	196,8	196,8	196,8	216,0	198,9		
	3	166,2	170,3	186,9	194,2	211,7	185,9		
HV40-19-1	1	162,3	162,3	164,3	170,3	175,6	166,9	170,9	5,74
	2	162,3	162,3	167,2	171,3	177,8	168,2		
	3	171,3	174,5	176,7	176,7	188,1	177,4		
HV40-25-1	1	163,3	164,3	165,2	167,2	167,2	165,4	205,6	35,06
	2	217,5	220,5	222,0	226,7	264,1	230,2		
	3	216,0	216,0	220,5	223,6	229,9	221,2		
HV40-32-1	1	198,5	198,5	198,5	210,8	225,1	206,3	211,8	5,59
	2	199,9	208,5	208,5	215,6	226,3	211,8		
	3	179,9	207,1	215,6	218,2	266,4	217,5		
HV60-10-1	1	194,2	202,0	206,0	208,8	254,4	213,1	214,3	2,44
	2	200,7	207,4	214,5	216,1	225,1	212,8		
	3	207,4	207,4	219,0	223,6	228,3	217,1		
HV60-13-1	1	198,6	220,4	225,4	227,9	234,5	221,4	214,4	7,56
	2	209,3	208,6	210,9	221,4	227,4	215,5		
	3	198,3	200,2	200,4	211,4	221,6	206,4		
HV60-16-1	1	221,6	229,2	223,3	223,3	230,5	225,6	228,9	2,89
	2	226,2	226,1	226,9	236,8	236,0	230,4		
	3	231,2	230,3	236,2	224,1	232,1	230,8		
HV60-19-1	1	294,3	369,6	404,9	412,6	459,0	388,1	336,6	79,31
	2	274,3	369,6	379,7	412,6	445,6	376,4		
	3	233,2	234,9	245,2	248,8	264,1	245,2		
HV60-25-1	1	229,9	240,0	256,3	276,4	280,8	256,7	264,0	18,34
	2	238,2	248,8	264,1	296,7	376,3	284,8		
	3	217,5	229,9	229,9	241,7	333,0	250,4		
HV60-32-1	1	298,5	298,5	298,5	320,8	327,0	308,7	313,3	4,41
	2	300,1	308,4	311,2	315,3	333,3	313,7		
	3	279,9	307,4	321,6	338,2	340,1	317,5		
Acero		HV mínimo	HV máximo	HV promedio		Desviación Estándar	Coefficiente 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		

TABLA 5. Ensayo de dureza Vickers a los aceros G-40 y G-60.

Aceros	Elementos químicos componentes de las barras (%)											
	Carbono		Manganeso		Fósforo		Azufre		Silicio		C equivalente	
	Media	Desv.	Media	Desv.	Media	Desv.	Media	Desv.	Media	Desv.	Media	Desv.
G-40	0,249	0,039	0,713	0,067	0,025	0,006	0,025	0,004	0,145	0,018	0,384	0,045
G-60	0,423	0,021	0,786	0,060	0,019	0,006	0,026	0,001	0,198	0,024	0,574	0,015

TABLA 6. Composición química de las barras de los aceros G-40 y G-60 (Ensayos realizados en el CIME).

Aceros	Elementos químicos componentes de las barras (%)											
	Carbono		Manganeso		Fósforo		Azufre		Silicio		C equivalente	
	Media	Desv.	Media	Desv.	Media	Desv.	Media	Desv.	Media	Desv.	Media	Desv.
G-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
G-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 7. Composición química de las coladas de los aceros G-40 y G-60. (Recepción 2001-08 por ACINOX).

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

TABLA 8. Requisitos de composición química en las normas extranjeras.

introducir el concepto alargamiento bajo la carga máxima ($\epsilon_{m\acute{a}x}$).

- 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.

5. BIBLIOGRAFÍA

ACI 318: 2005 Reglamento para las construcciones de concreto estructural y comentarios. Farmington Hill. USA.
 AS/NZS 4671: 2001 Steel Reinforcing Materials. Standard Association of New Zealand. Wellington.
 ASTM 370: 2008 Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. USA.
 ASTM E 92: 2003 Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials. Philadelphia, USA.
 ASTM E10: 2007 Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials. Philadelphia, USA.
 CSR: 1998 Código Colombiano de Construcciones Sismorresistentes. Colombia.

EC 8: 1998 Euro code 8. Design provisions for earthquake resistance of structures. Part 1-1. CEN.

EHE: 2007. Instrucción de Hormigón Estructural. Ministerio de Fomento. España.

Frómata, Z. Álvarez, E., y Castaño, T. 2007 Evaluación del desempeño sísmico de un edificio rigidizado mediante pórticos dúctiles de hormigón armado. Revista de Ingeniería Civil, España, No 146, p (27-38).

ISO 6892: 2001 Metallic materials. Tensile testing at ambient temperature. International Standard.

NC 04-10 y 11: 1972 Ensayo de dureza Brinell y dureza Vickers en materiales metálicos. La Habana. Cuba.

NC 165:2002 Barras de acero para refuerzo de hormigón. Ensayos de tracción y doblado. Cuba.

NC 207:2003 Requisitos Generales para el Diseño y Construcción de Estructuras de Hormigón, Cuba.

NC 46: 1999 Construcciones sismorresistentes. Requisitos básicos para el Diseño y la Construcción. Cuba.

NC 7: 2002 Barras de acero para refuerzo de hormigón. Especificaciones. Cuba.

NZS 3101: 1995 Concrete Structures Standard Part 1- The Design of Concrete Structures, New Zealand.

Rubiera, J. Medina F. 1987 Estudio del acero de refuerzo A-40 para hormigón armado en Cuba. Cuba.

UNE-EN 10080:2006. Acero para el armado del hormigón. Norma Europea.