

MAYOR LÍMITE DE FLUENCIA PARA EL ACERO DE REFUERZO*

DAVID P. GUSTAFSON**

Se ha agregado una resistencia a fluencia más alta a la especificación ASTM A706/A706M para varillas de refuerzo de baja aleación

EL Subcomité A01.05 de la ASTM, Acero de Refuerzo, ha hecho una revisión importante a la norma A706/A706M "Especificación Estándar Para Varillas Lisas y Corrugadas de Acero con Baja Aleación Para Refuerzo del Concreto."¹ La especificación fue desarrollada a principios de los años 70's en respuesta a los requerimientos de la comunidad de ingeniería estructural para varillas de refuerzo con propiedades de tensión controlada, para usarse en estructuras resistentes a sismos y composición química restringida, para mejor soldabilidad. Para una discusión sobre los aspectos históricos y técnicos de la especificación, véase la Referencia 2. En un principio, en 1974, la especificación ASTM A706/A706M cubría únicamente varillas de grado 60 (420), pero para diciembre de 2009, incluía requisitos para varillas con una resistencia a fluencia mínima de 80 ksi (550 MPa) (designada como Grado 80 [550]). La elevación en la resistencia a fluencia fue especialmente alentada por los ingenieros estructurales, los productores de varillas, los fabricantes de varillas y contratistas de las áreas sísmicamente activas, debido a que las varillas con resistencias más altas pueden ayudar a reducir el congestionamiento del refuerzo y mejorar la capacidad de construcción, especialmente en estructuras resistentes a sismos.

PRUEBA DE LA PRODUCCION

En agosto de 2006, el primer borrador de la revisión propuesta fue desarrollado por el Grupo de Tarea Sobre Varillas de Refuerzo, del Subcomité A01.05, presidido por James G Hutchinson, quien trabajaba anteriormente en la Gerdau Ameristeel, Knoxville, TN. Durante las primeras correcciones de la revisión propuesta, surgió un problema importante: ¿era posible la producción comercial de varillas de Grado 80 (550)? Cuatro productores, con fábricas localizadas en California, Oregón, Washington y Carolina del Sur, se ofrecieron como voluntarios para hacer hornadas de prueba y resolver el problema. Una hornada de fundición es un lote de acero producido en una sola operación del horno. El tamaño de una hornada, por lo tanto, depende del equipo particular de una fábrica y sus procedimientos de producción. Las hornadas de prueba producidas en las cuatro fundidoras, variaban aproximadamente de 35 a 80 toneladas (32 a 72 toneladas métricas). Las hornadas de prueba fueron laminadas en varios tamaños de varillas de refuerzo, se probaron las muestras, y los resultados confirmaron que las varillas podían ser producidas dentro de los límites propuestos en las propiedades de tensión y composición química.

* Publicado en *Concrete International*, ACI, Abril 2010

**David P. Gustafson, FACI, Consultor de la Winthrop Harbord, IL. Después de recibir su doctorado en ingeniería civil de la Universidad de Tulane y ser Profesor Asistente en Ingeniería Civil en la Universidad Tecnológica de Michigan, prestó sus servicios en el equipo técnico de CRSI durante más de 32 años. Es miembro de los Comités ACI 222, Corrosión de Metales en el Concreto; 301, Especificaciones para el Concreto; y 318, Reglamento de Construcción para Concreto Estructural; y es Presidente del Subcomité A01.05, de la ASTM, Acero de Refuerzo. Es ingeniero estructural con licencia en Illinois e ingeniero profesional con licencia en Illinois, Michigan, y Wisconsin.

PROPIEDADES

Resistencia a tensión y a fluencia

Para las varillas de Grado 60 (420) y 80 (550), la ASTM A706/A706M prescribe resistencias a fluencia mínima y máxima, así como también resistencias a tensión mínimas (Tabla 1). La última versión de la ASTM A706/A706M permite que las resistencias a fluencias sean definidas usando, o bien el método de desplazamiento (*offset*) (0.2 % de desplazamiento) o bien la caída de la viga (alternativamente, la suspensión en el calibrador) de la máquina de pruebas de tensión.

Las varillas de refuerzo de alta resistencia típicamente exhiben una curva de esfuerzo-deformación en forma de "casa redonda" (*round-house*), de modo que es posible que el método de desplazamiento sobreestime el valor de la resistencia a fluencia que debe ser usado en el método de diseño de resistencia del ACI 318. Para varillas de refuerzo con una resistencia a fluencia que exceda 60 ksi (420 MPa), el ACI 318-08, Sección 3.5.3.2, exige que la resistencia a fluencia se tome como la resistencia correspondiente a una deformación de 0.35%.³ Del mismo modo, la ASTM A706/A706M exige que el esfuerzo correspondiente a 0.35% de deformación sea reportado como no menor que 60 o 80 ksi (420 o 550 MPa) para varillas de Grado 60 (420) o Grado 80 (550), respectivamente.

La ASTM A 706/706M también impone una relación mínima de tensión-fluencia, exigiendo que la resistencia a tensión sea por lo menos 1.25 veces la resistencia a fluencia real (Tabla 1). El propósito de la relación mínima de tensión-fluencia, o el requisito de endurecimiento por deformación mínimo, es para asegurar que el incremento del momento de flexión en la región de articulación plástica pueda ser acomodado (esfuerzo de fluencia en un extremo de la región y necesariamente un esfuerzo mayor en el otro extremo), para evitar una falla frágil prematura

que resultaría cuando se estuviera excediendo la resistencia a tensión del acero.⁴ No existe un requisito correspondiente para la relación mínima de tensión-fluencia de las varillas en la ASTM A615/A615M.

Tal como se muestra en la Tabla 1, la ASTM A706/A706M también exige valores más grandes del alargamiento mínimo que la ASTM A615/A615M. Los requisitos más restrictivos para el alargamiento mínimo son con la intención de asegurar un comportamiento dúctil en las estructuras resistentes a sismos. Por ejemplo, mientras que la ASTM A706/A706M exige 12% de elongación para las varillas No. 8 (No. 125) en el Grado 60 (420) o en el Grado 80 (550), la ASTM A615/A615M exige únicamente 8 y 7% de alargamiento para las varillas No. 8 (No. 25) en los grados respectivos.

Composición química

Para acomodar la adición del Grado 80 (550) a la especificación, no se hicieron modificaciones a los requisitos para la composición química restringida. Los mismos límites en los elementos químicos individuales y el equivalente de carbón que se aplican al Grado 60 (420) también se aplican al Grado 80 (550).

¿Por qué el Grado 80 (550)?

Los requisitos del ACI 318-08 para las resistencias a fluencia especificadas del refuerzo y refuerzo transversal (f_y y f_{yt} , respectivamente) dictaban los límites de resistencia a fluencia en la ASTM A706/A706M. La Sección 9.4 limita los valores de f_y y f_{yt} usados en los cálculos, a 80 ksi (550 MPa). Las Secciones 10.9.3 y 21.1.5.4, sin embargo, permiten excepciones para refuerzo espiral y de confinamiento. Para estas aplicaciones, f_{yt} puede ser de hasta 100 ksi (690 MPa).

Muchas secciones del reglamento también limitan f_y a 60 ksi (420 MPa):

- Sección 11.4.2 para refuerzo cortante (estribos fabricados de varillas de refuerzo);

TABLA 1 Requisitos de tensión para varillas de acuerdo a la ASTM A706/A706M

	Grado 60 (420)	Grado 80 (550)
Resistencia a tensión*, mínima, psi (MPa)	80,000 (550)	100,000 (690)
Resistencia a fluencia, mínima, psi (MPa)	60,000 (420)	80,000 (550)
Resistencia a fluencia, máxima, psi (MPa)	78,000 (540)	98,000 (675)
Alargamiento en 8 pulgadas longitud (200 mm) mínimo %		
Varillas No. 3, 4, 5, 6 (10, 13, 16, 19)	14	12
Varillas No. 7, 8, 9, 10, 11 (22, 25, 29, 32, 36)	12	12
Varillas No. 14, 18 (43, 57)	10	10

* La resistencia a tensión no debe ser menor que 1.25 veces la resistencia a fluencia real.

- Sección 11.5.3.4 para refuerzo de torsión;
- Sección 11.6.6 para refuerzo de cortante-fricción;
- Sección 18.9.3.2 para refuerzo adherido en miembros de concreto presforzado;
- Sección 19.3.2 para refuerzo en cascarones y placas plegadas ; y
- Sección 21.1.5.2 para refuerzo en marcos de momento especial y en muros estructurales especiales.

HISTORIA DE LOS GRADOS

Esfuerzo de Trabajo

La ASTM A431, que fue publicada en 1959, cubría las varillas de refuerzo de Grado 75.⁵ La ASTM A432, que también fue publicada en 1959, cubría las varillas de Grado 60.⁶ En 1968, el Grado 60 y el Grado 65, junto con el Grado 40, fueron incorporados en la ASTM A615.⁷ Cuando el Subcomité de la ASTM empezó a explorar la conveniencia de agregar el Grado 80 (550) a la ASTM A706/A706M, los miembros del comité se preguntaron por qué sus predecesores habían seleccionado el Grado 75 en lugar del Grado 80, ya que la elección lógica hubiera sido mantener una progresión con los grados 40, 60 y 80 en lugar de los grados 40, 60 y 75. Yo creo que el razonamiento del Subcomité para el Grado 75 puede rastrearse hasta los requisitos en el ACI 318-51.⁸ Una disposición en esa edición limitaba el esfuerzo a compresión permisible nominal en el refuerzo de columnas verticales al 40% de f_y , pero sin exceder los 30,000 psi (207 MPa). Aunque el Grado 75 no fue citado por sí mismo, el Reglamento de 1951, en efecto, permitía el uso de refuerzo en columnas con resistencias de fluencia de hasta 30 ksi/0.40 = 75 ksi.

El ACI 318-56 incluía el mismo límite en resistencia a compresión permisible para diseños de esfuerzo de trabajo, pero también incluía el método de diseño de resistencia (a través de un Apéndice).⁹ Las disposiciones en el Apéndice limitaban el esfuerzo en refuerzo de tensión y compresión en la "carga última" al mínimo de f_y o 60 ksi. Mientras que la ACI 318-63¹⁰ ampliaba el límite de 40% de f_y para el diseño del esfuerzo efectivo de trabajo del ACI 318-56, las disposiciones del diseño de resistencia cambiaron. Cuando se usó el refuerzo con f_y en exceso de 60 ksi (420 MPa), se exigió que la resistencia a fluencia usada en el diseño se redujera a 0.85 f_y o 60 ksi (420 MPa), lo que fuera más grande, a menos que las pruebas de tensión demostraran que el esfuerzo en las varillas estaría limitado a 0.003 en la resistencia a fluencia especificada. El ACI 318-63

también permitía el uso de varillas de Grado 75 en tensión si las pruebas en los miembros estructurales típicos de tamaño natural mostraban un desempeño satisfactorio con respecto al agrietamiento en las cargas de servicio.

Con la ventaja de una percepción retrospectiva, yo creo que el Grado 80 debería haber reemplazado el Grado 75 en la especificación de A615 por los días en que en que se publicó el ACI318-71.11 Quizá el Subcomité consideró tal reemplazo, pero el modesto incremento de 5000 psi (35 MPa) en la resistencia a fluencia mínima pudo no haber sido considerado muy urgente. Poco tiempo después se dio un paso hacia atrás cuando el Grado 75 fue suprimido de la edición 1974 de la especificación A615¹² debido a que existía conflicto entre las definiciones de resistencia a fluencia en la ASTM A615 y el ACI 318-71. Mientras que la ASTM A615 exigía que la resistencia a fluencia mínima de 75,000 psi (518 MPa) correspondiera a una deformación por tensión de 0.6%, el ACI 318-71 prescribía que la resistencia a fluencia correspondiera a una deformación por tensión de 0.35%. El Grado 75 fue restablecido en la edición de 1987 de la ASTM A615, con las disposiciones para resistencia a fluencia compatibles con aquellas en el Reglamento ACI.

Trabajando más allá de ASTM A706 a ASTM A615

En agosto de 2006, cuando el Grupo de Tarea Sobre Varillas de Refuerzo de la ASTM decidió buscar afanosamente la adición de una resistencia a fluencia más alta a la especificación ASTM A706/A706M, ellos tuvieron la ventaja de empezar con un "hoja limpia de papel". Así pues, el objetivo del grupo de tarea era inmediatamente el Grado 80 (550). Sin embargo, es importante hacer notar que aunque el Grado 80 (550) recientemente también ha sido agregado a la ASTM A615/A615M, el Grado 75 (520) ha sido mantenido en la especificación por lo menos en el corto plazo.¹³ Esto se acomodará a los usuarios de las varillas de refuerzo del Grado 75 (520) que utilizan varillas para trabajos tales como pernos de techos para la industria de la minería. Así pues, la edición actual de la especificación, ASTM A615/A615M-09b, incluye los Grados 40 (280), 60 (420), 75 (520) y 80 (550). La ASTM A615/A615M también permite el uso del método de desplazamiento para determinar la resistencia a fluencia para los Grados 60 (420) y 80 (550) y exige que se reporte el esfuerzo correspondiente a 0.35% de la deformación y que no sea menor que la resistencia a fluencia mínima para cualquier grado. Al igual que en la ASTM A706/A706M, los requisitos de tensión en la ASTM

A615/A615M-09b están en armonía con la Sección 3.5.3.2 del ACI 318-08.

Aunque tanto la ASTM A615/A615M como la ASTM A706/A706M ahora cubren las varillas de Grado 80 (550), es importante hacer notar que la ASTM A706/A706M continúa colocando límites superiores sobre la resistencia a fluencia - un requisito fundamental para el uso satisfactorio en estructuras de concreto reforzado diseñadas para resistir sismos. De acuerdo con McDermott,³ el propósito de la limitación máxima en la resistencia a fluencia es asegurar que las varillas de refuerzo cedan antes de que el concreto se rompa, de tal manera que no se induzca una resistencia excesiva al momento de flexión dentro de la región de articulación plástica, lo que podría inducir un gran cizallamiento que dé como resultado fallas por cortante y/o adherencia. Mientras que la ASTM A706/A706M limita las resistencias a fluencia respectiva máximas para varillas de Grado 60 (420) y 80 (550) a 78 y 98 ksi (540 y 675), no existen límites correspondientes para las varillas ASTM A615/A615M.

La revisión de la ASTM A615/A615M para agregar el Grado 80 (550) fue un trabajo considerablemente menos desafiante que revisar la ASTM A706/A706M. El Grupo de Tarea Sobre Varillas de Refuerzo examinó los resultados de prueba de varios cientos de hornadas de varillas de Grado 75 (520) producidas por muchas fábricas. La revisión demostró que un gran porcentaje de las hornadas de Grado 75 cumplirían con los requisitos del Grado 80 (550) propuestos. Así pues, el único aspecto de la revisión que fue intensamente debatido fueron los requisitos de marcación para la designación de la resistencia a fluencia mínima.

Marcas de los grados

Para distinguir las nuevas varillas, la ASTM A706/A706M y la ASTM A615/A615M exigen marcas de identificación estampadas en la superficie de una varilla corrugada para denotar la designación del fabricante, el tamaño de la varilla, el tipo de acero, y la designación de la resistencia a fluencia mínima. La parte de la "designación de la resistencia a fluencia mínima" del esquema de marcas para las varillas de Grado 80 (550) requirió de un intenso debate durante las etapas finales del proceso de votación de la revisión propuesta. Finalmente se llegó al acuerdo de que las marcas requeridas para la resistencia a fluencia fueran, ya sea el número 80 para el Grado 80, 6 para el Grado 550, o tres líneas longitudinales continuas a través de los cinco últimos espacios de corrugado (Figura 1). El tipo de

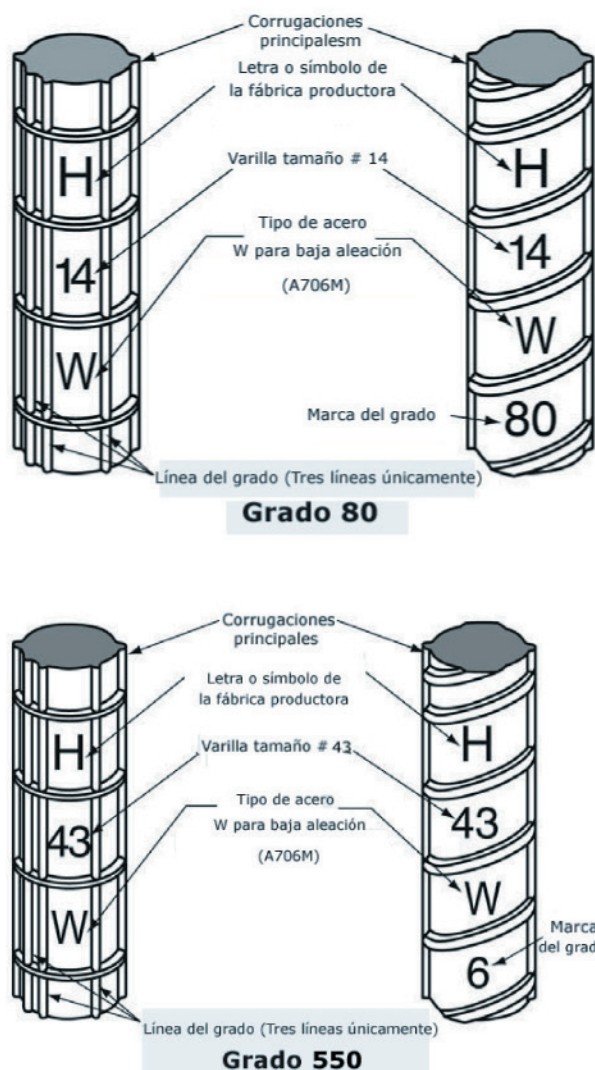


Fig. 1: Marcas de identificación para varillas que satisfacen las especificaciones ASTM A706/A706M: (a) Grado 80; (b) Grado 550.

acero está indicado por una letra W para las varillas que satisfacen la ASTM A 706/A706M.

SE CUMPLIO LA VISION DE HOGNESTAD

Como una "fuerza" en la industria por su involucramiento y contribuciones al ACI 318 y a otros reglamentos y normas, el finado Eivind Hognestad estableció una legendaria carrera en la Portland Cement Association. En octubre de 1967, Hognestad ofreció una conferencia como invitado en la Reunión de Otoño Sobre Negocios, del Instituto de Acero de Refuerzo para Concreto (CRSI). El título de su presentación fue "Tendencias en las Demandas del Consumidor para Nuevos Grados del Acero de Refuerzo."¹⁴ Con base en lo que él percibió como las necesidades en el diseño de miembros estructu-

rales de concreto reforzado y para la construcción de estructuras de concreto reforzado, Hognestad hizo una exposición razonada para los grados de las varillas de acero de refuerzo que deberían ser producidas y estar disponibles en el mercado en los años 70s y más adelante. El propuso tres grados: los Grado 60, 60W, y 80W – la “W” designando las varillas de refuerzo con composición química restringida.

Cuando la revisión de la ASTM A706/A706M recibió la aprobación final, se me ocurrió que la proposición visionaria de Hognestad finalmente se había hecho realidad, aunque solo 40 años después de su elocuente presentación a la industria del acero de refuerzo.

Referencias

1. ASTM A 706/A 706M-09b, “Standard Specification for Low-Alloy Steel Deformed and Plain Bars for Concrete Reinforcement,” ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009, 7 pp.
2. Gustafson, D.P., “Re-Visiting Low-Alloy Steel Reinforcing Bars,” Concrete International, V.29, No. 1, Jan. 2007, pp. 55-59.
3. ACI Committee 318, “Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI318-08) and Commentary,” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2008, 473 pp.
4. McDermott, I.F. “Interrelationships between Reinforcing Bar Physical Properties and Seismic Demands.” ACI Structural Journal, V. 95, No. 2, Mar.-Apr. 1998, pp. 175-182.
5. ASTM A431, “Specifications for High Strength Deformed Billet-Steel Bars for Concrete Reinforcement with 75,000 psi Minimum Yield Strength,” ASTM International, West Conshohocken, PA, 1959. (withdrawn)
6. ASTM A432, “Specifications for Deformed Billet-Steel Bars for Concrete Reinforcement with 60,000 psi Minimum Yield Strength,” ASTM International, West Conshohocken, PA, 1959. (withdrawn)
7. ASTM A615, “Standard Specification for Deformed Billet-Steel Bars for Concrete Reinforcement.” ASTM International, West Conshohocken, PA, 1968.
8. ACI Committee 318, “Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI318-51),” ACI JOURNAL, Proceedings V 22, No. 8, Apr. 1951, pp. 589-652.
9. ACI Committee 318, “Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI318--56),” ACI JOURNAL, Proceedings V 27, No. 9, May 1956, pp. 913-986.
10. ACI Committee 318. “Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-63).” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1963.144 pp.
11. ACI Committee 318, “Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-71),” American Concrete Institute e. Farmington Hills, MI, 1971, 78 pp.
12. ASTM A615. “Standard Specification for Deformed and Plain Billet-Steel Bars for Concrete Reinforcement,” ASTM International. West Conshohocken. PA, 1974.
13. ASTM A615/A615M-09b, “Standard Specification for Deformed and Plain Carbon-Steel Bars for Concrete Reinforcement.” ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009, 6 pp
14. Hognestad, E., “Trends in Consumer Demands for New Grades of Reinforcing Steel,” Proceedings, Fall Business Meeting, Concrete Reinforcing Steel Institute, 1965, pp. 22-32. Published as PCA Development Department Bulletin D 130