

BARRAS DE REFUERZO DE HORMIGÓN: MECANISMOS DE ENDURECIMIENTO Y PERFORMANCE EN USO*

Jorge Madias¹
Michael Wright²
Pedro Wolkowicz³

Resumo

Se analizan las distintas alternativas para la producción de barras de refuerzo de hormigón: endurecimiento por solución sólida ("dureza natural"); endurecimiento por temple y autorevenido en línea (Tempcore, Thermex, etc.) y endurecimiento por precipitación (microaleación con niobio, vanadio o titanio) y su influencia sobre la performance de las barras, en lo que hace a la resistencia a la corrosión, al fuego y a los sismos..

Palavras-chave: Vergalhão; Tempcore; Aço microligado; Sismo.

REINFORCING STEEL BAR: HARDENING MECHANISMS AND PERFORMANCE IN APPLICATION

Abstract

The alternatives for the production of concrete reinforcing bars are analyzed: solid solution hardening ("natural hardness"); quench hardening and self-tempering (Tempcore, Thermex, etc.) and grain refining / precipitation hardening (microalloying with niobium, vanadium, or titanium) and their influence on the performance of the rebar, regarding corrosion resistance, fire and earthquakes.

Keywords: Rebar; Tempcore; Microalloyed steel; Earthquake.

¹ Metallurgical Engineer, Director, metallon, San Nicolas, Buenos Aires, Argentina.

² Mechanical Engineer, Managing Director, Modern Metal Consulting, Singapur.

³ Mechanical Engineer, Consultant, Rosario, Santa Fe, Argentina.

1 INTRODUCCIÓN

La producción de barras de refuerzo de hormigón constituye un mercado muy importante para la siderurgia. El acero para estos productos se elabora generalmente en acerías eléctricas, aunque hay algunas acerías al oxígeno que lo producen. El afino se suele realizar en un horno cuchara, si está disponible, y el colado se realiza en máquinas de colada continua de palanquillas, con buza calibrada y lubricación con aceite, por contraposición a las barras y alambrones automotrices, que se producen en máquinas que utilizan buzas sumergidas y lubricación con polvo colador, debido a los requisitos de calidad superficial e interna que tienen estos productos.

En el proceso de laminación se utiliza en lo posible la carga en caliente, disminuyendo el consumo de combustible y aumentando la productividad del horno de precalentamiento. Se emplean laminadores continuos o abiertos, dependiendo del nivel de producción al que se apunta. Puede tratarse de laminadores que producen exclusivamente barras, con enfriamiento en lecho, o también de laminadores combinados, que incluyen salida de alambón. Muchos de estos laminadores, para mantener una productividad alta cuando laminan dimensiones pequeñas de barras, tienen la posibilidad de hacer laminación dividida (*slitting*) [2]. Un conjunto de cajas permite dividir la palanquilla en dos, tres o cuatro hilos (figura 1).

Otra alternativa son los laminadores de alta velocidad con *slitting* en dos hilos de 8 a 12 mm y bloques terminadores en ambas vías [3].

Recientemente han surgido opciones de miniplantas con pequeños hornos eléctricos o de inducción, colada continua sin corte, igualación de temperaturas con inductores y laminación en línea, con corte recién al finalizar la laminación.

En la fabricación de estos productos se privilegia la productividad y el bajo costo. Tiende a producirse cerca del mercado de consumo, La mayor parte de la producción es consumida en el mercado interno. Las normas varían de país a país en función de la proclividad a sufrir terremotos, la cultura local en materia de construcción y otros factores.

En la actualidad predominan tres opciones tecnológicas para el diseño del material de las barras de refuerzo: las barras de dureza natural, en las que el alto límite de fluencia se obtiene mediante el mecanismo de solución sólida de carbono y manganeso; las barras con tratamiento térmico en línea, de menor tenor de carbono y manganeso, y las barras microaleadas con niobio y/o vanadio. Cada una presenta determinadas particularidades y subsiste la discusión técnica en los organismos normalizadores, centros de investigación, fabricantes y usuarios, sobre la aptitud de cada una en lo que hace a la aptitud al doblado, soldabilidad, resistencia a la corrosión, comportamiento en sismos y ante incendios [4].

Se discuten brevemente las características de cada una de las tres alternativas mencionadas y luego se presentan investigaciones recientes sobre el comportamiento de las barras ante los diferentes requerimientos que se presentan a lo largo de su ciclo de vida.



Figura 1. Laminación dividida: formación de cuatro hilos a partir de una palanquilla (*slitting*) [2].

2 BARRAS DE DUREZA NATURAL

Las barras de refuerzo de dureza natural utilizan el clásico mecanismo de endurecimiento por solución sólida, obteniendo las propiedades mecánicas requeridas sobre la base de tenores elevados de carbono y manganeso. Su alto carbono equivalente, particularmente para los diámetros mayores, hace que se presenten dificultades si se requieren operaciones de soldadura. Cuando se utiliza este mecanismo de endurecimiento, la ductilidad se reduce proporcionalmente con el aumento en la resistencia.

A diferencia de las barras templadas en línea, no requieren equipamiento adicional en el laminador. Están presentes en muchos mercados, pero tienen un predominio particular en Estados Unidos. Esto se debe a un requerimiento de la norma ASTM A 706, que exige una relación entre la resistencia a la tracción y el límite de fluencia de 1,25 como mínimo [5]. Para esta relación, también conocida como relación de endurecimiento por deformación y como relación sísmica (RS), en otros países se exigen mínimos menores. En las barras templadas esta relación no es fácil de lograr en condiciones que sean económicas, como se verá en el párrafo correspondiente.

3 BARRAS TEMPLADAS Y AUTOREVENIDAS

Una vez finalizado el proceso de laminación, las barras, en estado austenítico ingresan a un sistema en que la superficie es refrigerada por agua, a una presión y caudal suficientes como para disminuir la temperatura de una capa superficial por debajo de la temperatura de formación de martensita. Cuando la barra abandona la zona refrigerada, el calor acumulado en el centro es conducido hacia el exterior, produciéndose el auto revenido de la capa de martensita. Finalmente, en el lecho de enfriamiento, el núcleo todavía austenítico se transforma a ferrita y perlita [6]. Con esta combinación de estructuras se obtiene una barra de alta resistencia soldable, con un tenor de carbono y manganeso bien por debajo del necesario para las barras de dureza natural. La aplicación de calor (como por ejemplo en procesos de soldadura) u operaciones de roscado pueden eliminar la resistencia otorgada por la capa externa templada.

Este proceso fue desarrollado por el Centre de Recherches Métallurgiques (CRM), de Lieja, Bélgica, bajo la denominación comercial de Tempcore, en la década de 1970. El sistema de enfriamiento consiste de varias cajas de enfriamiento con tubos en los que se introduce un caudal de agua de 600 a 800 m³/min, dependiendo del diámetro

de la barra que se está procesando, a una presión en el orden de 1,2 MPa [7]. Cuando la patente se venció, los diversos proveedores de trenes laminadores implementaron sistemas similares, bajo varias denominaciones. Sin embargo el proceso Tempcore conserva a la fecha ochenta licenciarios [8]. Posteriormente se desarrollaron otros procesos similares o con algunas diferencias.

Las barras templadas tienen un gradiente de dureza desde la superficie hacia el núcleo, que responde a las variaciones en microestructura que se logran con el tratamiento.

4 BARRAS MICROALEADAS

El recurso de usar elementos microaleantes responde a dos impulsos:

- 1) Productores de barras de dureza natural que necesitan producir barras de acero soldable
- 2) Cuando se requiere alto límite de fluencia

Los elementos a los que se recurre son usualmente el niobio, el vanadio o combinaciones de ambos. El mecanismo por el cual imparten mayor resistencia es el conocido como de endurecimiento por precipitación. Dependiendo de los tenores de microaleantes y de nitrógeno y carbono, a ciertas temperaturas, durante el proceso de laminación o el enfriamiento posterior al mismo, precipitan carbonitruros de niobio, vanadio o ambos, que generan un incremento de la resistencia mecánica. Los aceros microaleados comenzaron a ser adoptados para la fabricación de barras de refuerzo a fines de la década de 1960 [9].

Los mecanismos de actuación del niobio y el vanadio son diferentes. El niobio actúa en tres aspectos: estando en solución sólida, traba el crecimiento de grano de la austenita durante el precalentamiento de las palanquillas. Luego demora la recuperación y la recristalización del material durante la laminación en caliente. Finalmente, la precipitación de pequeñas partículas de carbonitruro de niobio aumenta la resistencia mecánica de la ferrita (ver figura 2).

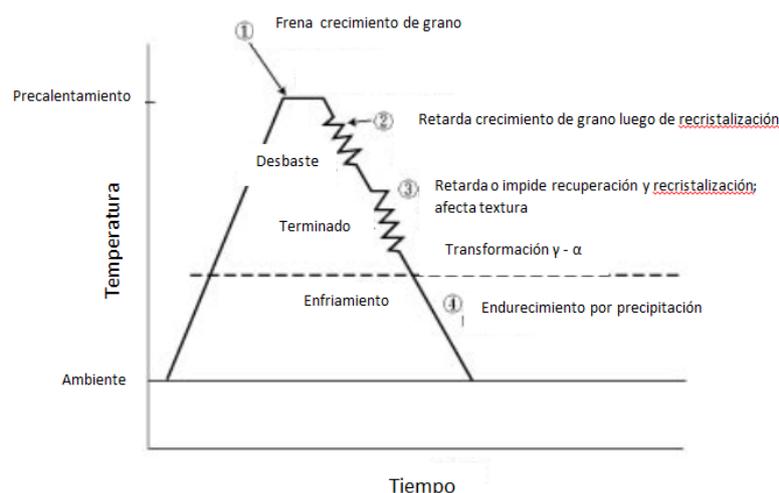


Figura 2. Efectos del niobio durante el precalentamiento, la laminación en caliente y el enfriamiento [10].

El efecto sobre las propiedades mecánicas es importante, aún para bajos contenidos de carbono, para los cuales la soldabilidad es alta. La temperatura a la que se realiza el precalentamiento, al influir sobre la puesta en solución del niobio, tiene importancia en cuanto a la actuación de los mecanismos de endurecimiento. A mayores

temperaturas de precalentamiento, mayor influencia ejerce el niobio sobre las propiedades mecánicas (figura 3).

Los carbonitruros de vanadio precipitan durante la laminación y el enfriamiento de las barras, a temperaturas inferiores a la de los carbonitruros de niobio.

Desde el punto de vista de la colada continua de palanquillas, la caída de la ductilidad del acero varía en tamaño y rango de temperaturas con la adición de elementos como Al, V, Nb y Ti; por lo tanto, deben tenerse las precauciones pertinentes para evitar el agrietamiento. Desde el punto de vista antisísmico, el vanadio y el titanio permiten obtener un alto alargamiento uniforme y una elevada relación de envejecimiento por deformación [11].

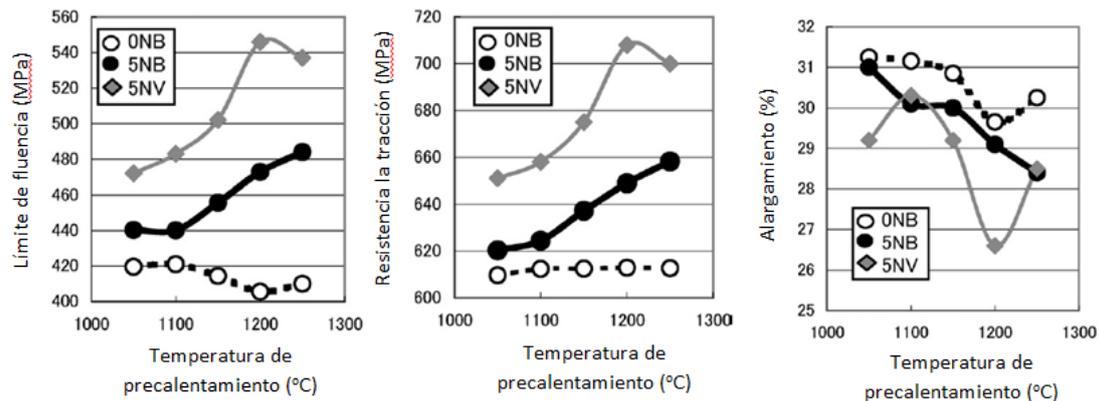


Figura 3. Influencia de la temperatura de precalentamiento sobre el límite de fluencia, la resistencia a la tracción y el alargamiento, para barras sin adición de microaleantes, con adición de niobio y con adición de niobio y vanadio [10]. 0NB: metal base; 5NB: con 0,05% Nb; 5NV: con 0,05% Nb y 0,05% V.

5 CORROSIÓN

En este aspecto se han contemplado dos situaciones diferentes: una es el aspecto superficial de las barras o rollos al momento de ser adquiridos o utilizados; otra es el comportamiento una vez sumergido en el concreto.

En el primer aspecto, se afirma que las barras de dureza natural están protegidas por una capa de cascarilla gruesa, en tanto que las tratadas tienen una capa de cascarilla fina y pueden oxidarse con más facilidad a la intemperie. Cabe mencionar que en el caso de barras en rollos, con el enderezado puede perderse una buena parte de la cascarilla gruesa.

Una investigación del Dr. Lundberg llega a la conclusión de que para mejorar la performance de las barras templadas en lo que hace a la corrosión de corto plazo, es conveniente que la temperatura de autorevenido sea baja, ver figura 4.

En lo que hace a la influencia del estado de la superficie del material previo a su inmersión en el concreto, sobre la corrosión posterior, los resultados de diversos estudios son contradictorios. Los autores que experimentaron con inmersión de las barras en hormigón con alto contenido de cloruros, encontraron que cuando la barra tenía la superficie oxidada se comportaba mejor. Esto se debe a que se demora la activación del acero. En cambio otros investigadores que estudiaron hormigones de bajo contenido de cloruro afirman lo contrario: la preoxidación favorece la corrosión [12].

En cuanto a la corrosión a largo plazo, en función del proceso utilizado en la fabricación de las barras, un estudio realizado en el centro de investigaciones de SABIC, el holding que incluye a la siderúrgica saudita Hadeed, llegó a la conclusión

luego de una exposición al aire de tres años de duración, que las barras tratadas se comportaban mejor que las de dureza natural en la exposición al aire (figura 5). El ensayo estándar para la medición de la actividad de corrosión en las barras sumergidas en hormigón se denomina medición de potencial de media celda. En SABIC se hizo un ensayo a lo largo de 450 días, exponiendo las barras sumergidas en concreto a una solución de cloruro, y se medía el potencial de media celda periódicamente, contra un electrodo estándar de referencia. La corrosión de las barras es más que 90% probable si el potencial medido de más negativo que -350 mV. Esta probabilidad cae al 10% si el potencial es más positivo que -200 mV. Entre -200 y -350 mV las condiciones son inciertas. En la figura 6 se presentan los potenciales medidos para barras templadas y barras de dureza natural [14]. Para las barras templadas lleva más tiempo alcanzar el potencial de -350 mV.

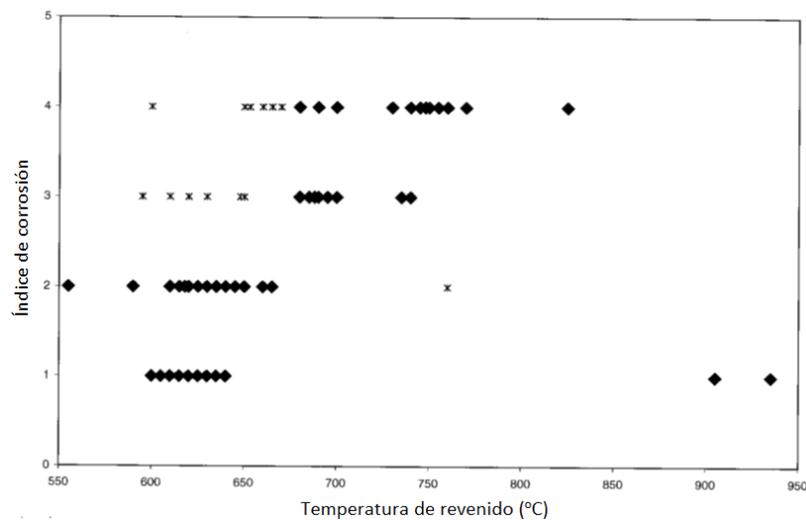


Figura 4. Influencia de la temperatura de auto revenido de barras tratadas, sobre el grado de corrosión a 48 horas [13].

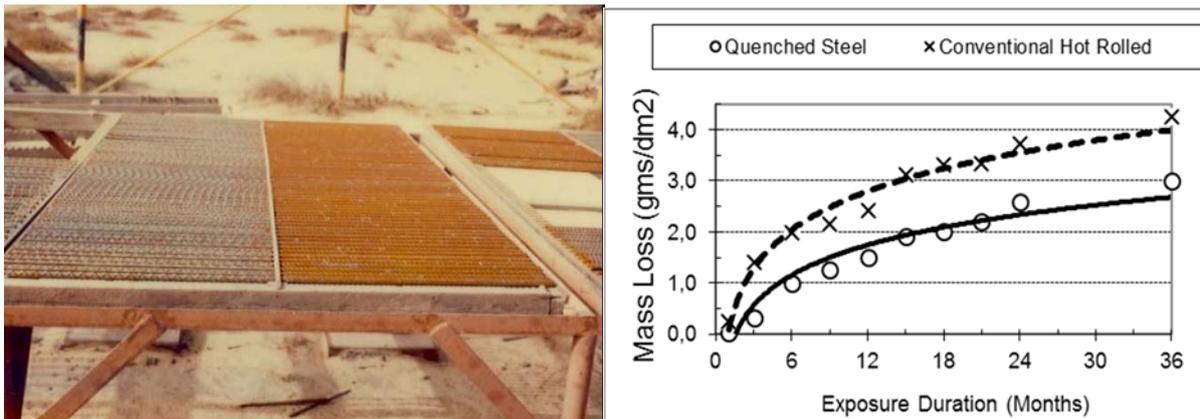


Figura 5. Exposición de muestras de barras de refuerzo al aire (arriba) y pérdida de masa a lo largo de 36 meses de exposición [14].

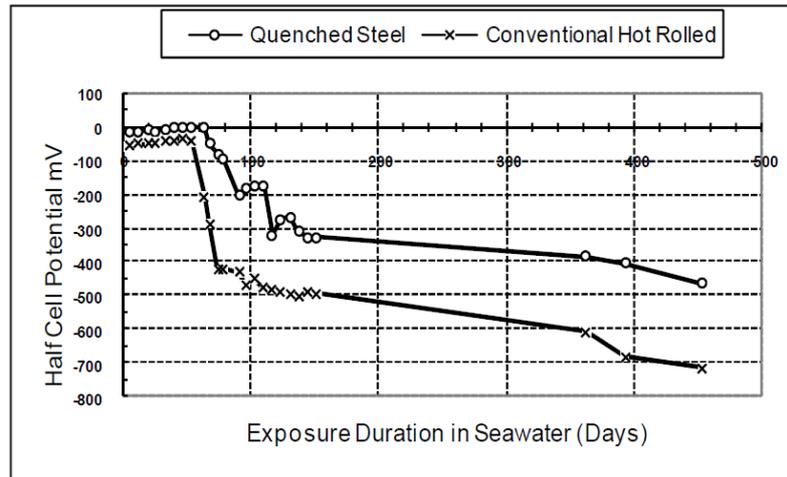


Figura 6. Medições de potencial de meia célula para barras temperadas e de dureza natural imersas em hormigão, a lo largo de 450 días [14].

6 COMPORTAMIENTO EN SISMOS

Cuando el objetivo es cumplir con normas que exigen una relación entre resistencia a la tracción y límite de fluencia de 1,25 como mínimo, hay limitaciones con el proceso de temple en línea. En las barras templadas, la capa externa con martensita tiene menor respuesta a la deformación plástica que el núcleo (figura 8, izquierda). La barra en su conjunto se comporta como un promedio ponderado de las propiedades de la capa externa y el núcleo (figura 7, derecha). Por lo tanto, resulta difícil obtener una alta relación entre resistencia a la tracción y límite de fluencia [15]. También hay que tener en cuenta las diferencias en diámetro, ya que se pueden obtener capas de alta resistencia de diferente espesor, que pueden afectar esta relación.

El Dr. Xu Youlin, de la Academia China de Investigación en Construcción, ha realizado un detallado estudio sobre la performance de las barras en ocasión del terremoto de Wenchuan, en China, en el año 2008, mostrando casos concretos que reflejan los distintos modos de fractura (ver figura 8) [16]. Sus conclusiones descalifican el uso de barras torsionadas en frío, que prácticamente no poseen alargamiento, y ponen el acento en la necesidad de utilizar materiales que posean una alta relación entre la resistencia a la tracción y el límite de fluencia.

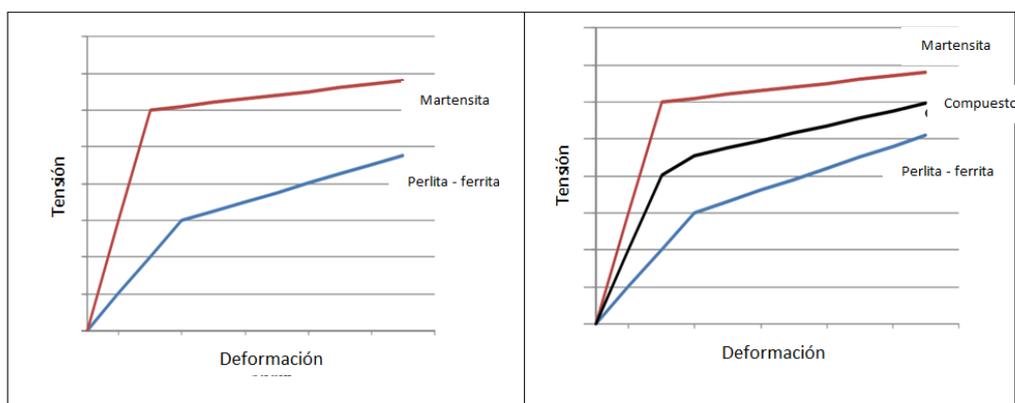


Figura 7. Izquierda: esquema comparativo de las curvas tensión – deformación correspondientes a la capa externa templada y el núcleo perlítico – ferrítico. Derecha: esquema de la curva tensión deformación de la barra, promediando las curvas correspondientes a las dos partes de que está compuesta [16].



Figura 8. Terremoto de Wenchuan. Edifício colapsado, com rotura frágil (izquierda); edifício com estribos en las columnas, que se agrietó pero no colapsó en el terremoto (derecha) [16].

Japón por su parte ha sufrido el terremoto Kanto en 1923, con la destrucción de 450.000 edificios y pérdida de 143.000 vidas humanas. En 1995 se produjo el terremoto de Hanshin-Awaji, con el colapso de 104.906 edificios y 6.433 muertes. El código japonés de construcción exige cálculos estructurales incluyendo esfuerzos sísmicos desde 1924, siendo el primero en el mundo en exigirlo [17]. La norma japonesa JIS exige alto alargamiento, aún para las barras de máxima resistencia a la tracción.

Bajo las extremas condiciones sísmicas, las estructuras de las construcciones sufren un pequeño número de ciclos de desplazamiento muy grandes. El comportamiento de las barras de refuerzo en estas condiciones se puede estudiar mediante ensayos de fatiga de bajo ciclo. Por ejemplo, un estudio de estas características sobre barras templadas, con nervaduras y lisas, así como barras sometidas a otros tratamientos térmicos, a granallado y a corrosión, permitió concluir que la presencia de las nervaduras reduce la performance de las barras bajo carga cíclica; que la ductilidad del acero es el parámetro más importante para mejorar la resistencia a la fatiga de bajo ciclo y que la corrosión es extremadamente peligrosa para el comportamiento ante estos esfuerzos [18].

7 COMPORTAMIENTO EN INCENDIOS

Una vez que a seguridad humana ha sido garantizada en un incendio, es necesario evaluar la capacidad de soporte de la estructura que estuvo expuesta al fuego. Para ello es importante conocer las propiedades residuales de los materiales dañados. Las propiedades residuales del concreto se conocen bien. Pero los datos sobre las barras son escasos.

En la Universidad de Tecnología de Milán, Italia, se ha realizado un estudio comparativo del comportamiento residual de diferentes tipos de barras luego de ser sometidas al calor, hasta 850 °C. Entre ellas, barras de dureza natural y barras templadas en línea. En la Figura 9 se presenta una comparación en el límite de fluencia de las diferentes barras ensayadas. Se observa que las barras de dureza natural mantienen mejor su límite de fluencia que las barras templadas, luego de ser sometidas al fuego [190].

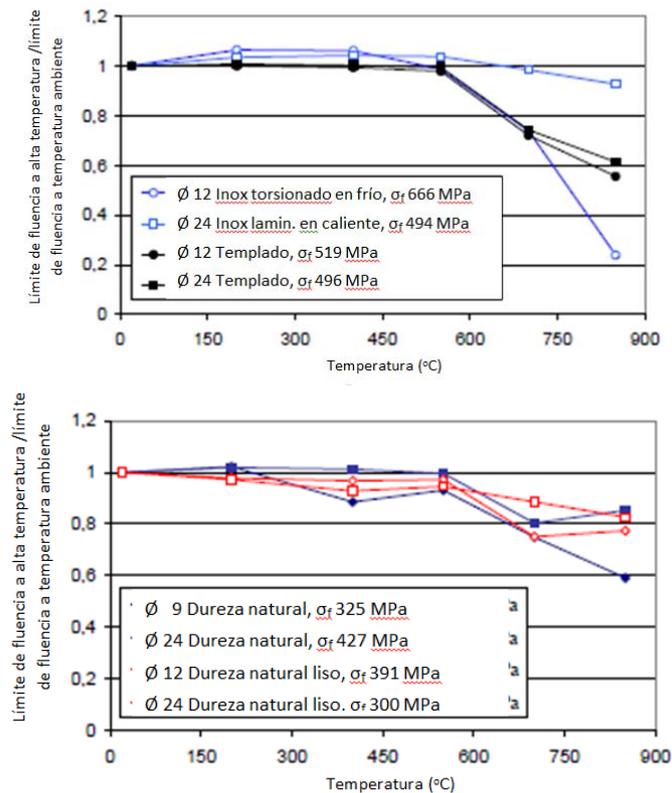


Figura 9. Evolución del límite de fluencia para los distintos tipos de barras de refuerzo, en función de la temperatura soportada durante el incendio [19].

8 CONCLUSIONES

En la fabricación de barras de refuerzo de hormigón conviven diversos diseños de material y equipamiento para la obtención de las propiedades mecánicas requeridas. Los aceros torsionados en frío, que pierden todo alargamiento luego del procesamiento, son todavía importantes en China e India, pero van siendo abandonados. Predominan actualmente tres tecnologías de endurecimiento: solución sólida, endurecimiento por precipitación y endurecimiento por temple y autorevenido en línea. Cada una de ellas tiene características particulares en cuanto a sus propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión, resistencia al fuego y comportamiento en sismo. A su vez, las normas nacionales no siguen un modelo único e influyen la tecnología utilizada para producir las barras. Es conveniente tanto para los productores como los usuarios, y los organismos reguladores, manejar estos conceptos para seleccionar las alternativas más adecuadas.

REFERENCIAS

1. Worldsteel Association Economics Committee, "Steel Statistical Yearbook 2012", Brussels, Belgium, 2012.
2. Zanon, A.; De Giorgio, T.; Iogna Prat, E.; Odorico, M.; Pesamosca, R.; Alves Ferreira Junior, N.; "Latest improvements to increase reliability and productivity on multi-slitting processes". 40th ABM Rolling Seminar, Belo Horizonte, Brazil, October 2010, pp. 281-293.
3. Wolkowicz, P. Apunte Curso Laminação de Produtos Largos metallon, Plaza Real Suites Hotel, Rosario, agosto de 2015..

4. Madias, J.; "Barras de refuerzo de hormigón: alternativas tecnológicas y comportamiento en el uso". Acero Latinoamericano, No. 540, septiembre-octubre 2013, p. 34-43.
5. ASTM Standard A 706/A 706M-09, "Standard Specification for Low-Alloy Steel Deformed Bars for Concrete Reinforcement". ASTM International, West Conshohocken, Estados Unidos, 2009.
6. Lundberg, S.-E.; "Quenched and Self-tempered Rebar – Process Overview, Layouts, Operational Parameters and Cost Savings". AISTech Conference Proceedings – Volume II, pp. 717-726.
7. www.crm-group.be, visitado en setiembre de 2013
8. Florindo Lourenço, J.P.; "Estudo do comportamento de varões de aço para betão obtidos através do processo Tempcore". Dissertação para obtenção do grau de mestre, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal, outubro de 2012.
9. Sage, A.M.; Effect of vanadium, nitrogen, and aluminium on the mechanical properties of reinforcing bar steels". Metals Technology, February 1976, pp. 65-70.
10. Hashimoto, Sh.; Nakamura, M.; "Effects of microalloying elements on mechanical properties of reinforcing bars". ISIJ International, Vol. 46, 2006, No. 10, pp. 1510-1515.
11. Milbourn, D.; Yu, L.; "Metallurgical benefits of vanadium microalloying in producing high strength seismic grade rebar". Proceedings of the International Seminar on Production and Application of High Strength Seismic Grade Rebar Containing Vanadium. 2010, pp. 32-43.
12. Lundberg, S.-E.; "Optimization of corrosion resistance and mechanical properties on quenched and tempered rebar". Scandinavian Journal of Metallurgy 2002, 31, pp. 234-240.
13. Novak, P.; Mala, R.; Joska, L.; Influence of pre-rusting on steel corrosion in concrete". Cement & Concrete Research, 31 (2001), pp. 589-593.
14. Mehmood, T; Al-Shalfan, W.; "Effect of rebar production technology on their corrosion behavior in concrete". 4th Conference on Uses of Steel, November 2008, Rosario, Argentina, pp. 13-20.
15. Allen, M.; "Quench and tempering: an unfamiliar process in North America". AISTech 2010 Proceedings – Volume II, pp. 707-715.
16. Xu, Y.; "Optimization and selection of reinforced steel bar applicable in the code for concrete structures of P.R. China – Discussion about the performance of the reinforced steelbar in the Wenchuan earthquake disaster". Proceedings of the International Seminar on Production and Application of High Strength Seismic Grade Rebar Containing Vanadium. 2010, pp. 17-31.
17. Miyajima, M.; "The Japanese experience in design and application of seismic grade rebar". Proceedings of the International Seminar on Production and Application of High Strength Seismic Grade Rebar Containing Vanadium. 2010, pp. 12-16.
18. Roberti, R.; Cornacchia, G.; Faccoli, M.; "On the extremely low cycle fatigue behavior of the concrete reinforcing bar B450C (FeB44k) Steel". Convegno Nazionale IGF XXI, Cassino (FR), Italia, Giugno 2011, p. 181 – 190.
19. Felicetti, R.; Meda, A.; "Residual behaviour of reinforcing steel bars after fire". Proc. FIB Symposium Keep Concrete Attractive, Budapest, Hungary, May 2005, pp. 1148-1155.