

ALTERACIÓN DE LAS PRESTACIONES MECÁNICAS DE LAS ARMADURAS POR EXPOSICIÓN A ELEVADAS TEMPERATURAS.

C. Alonso¹, C. Bouteloup², M. Sanchez¹ y F.J. Recio

¹ Instituto de Ciencias de la Construcción “Eduardo Torroja”
C/ Serrano Galvache 4, 28033, Madrid, Spain
mcalonso@ietcc.csic.es

² Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. France

RESUMEN

El trabajo hace una revisión y análisis del efecto de las elevadas temperaturas sobre las armaduras. Se estudia la dispersión en la variación de propiedades sobre los distintos parámetros mecánicos que caracterizan a la armadura en función de la temperatura de exposición, tomando como partida datos de la literatura, procedentes tanto de ensayos sobre armaduras a alta temperatura (AT), como tras el enfriamiento, valores residuales, (R). A partir de la aplicación de un análisis estadístico se evalúa el efecto de estos parámetros sobre el riesgo asociado a la pérdida de las propiedades mecánicas de las armaduras por exposición al fuego. Adicionalmente, se realiza un estudio experimental sobre el efecto del diámetro en la respuesta de la armadura. Los resultados del análisis concuerdan con los valores de la bibliografía y los códigos (valores nominales) en cuanto a su tendencia en el comportamiento en función de la temperatura, pero estos son en general más conservadores que los datos experimentales. Existe una dispersión importante de valores para condiciones similares de exposición, que varía según el tipo de parámetro estudiado, que no puede ser atribuida a diferencias en el diámetro de la armadura; sin embargo las características del tipo de acero contribuyen a acrecentar estas dispersiones. Finalmente se ha encontrado que es posible establecer una función de correlación entre las propiedades determinadas a alta temperatura y que se podría predecir el comportamiento durante el desarrollo del incendio (AT) a partir de propiedades mecánicas residuales obtenidas tras el enfriamiento.

ABSTRACT

A literature review of the performance of reinforcement at high temperature is evaluated with respect to different mechanical parameters. Results at high temperature (AT) and after cooling, residual (R) are considered. A preliminary statistical approach is carried out to define the dispersion of the data for similar testing conditions. The influence of the type of steel is considered in passive rebar and active rebar, prestressed reinforcement. Additionally experimental work is performed to evaluate the effect of the temperature on the diameter of the reinforcement. The results show that literature data do not always agree with construction code data, being these last more conservative. The dispersion within identical temperature conditions can not be attributed to the diameter of the reinforcement, being more influencing the composition of the steel. Relationships between data at high temperature and residual have been found that could allow predicting from residual mechanical properties of reinforcements, their performance during fire developing.

PALABRAS CLAVE: Armaduras, Alta Temperatura, Dispersión, Parámetros Mecánicos

1. INTRODUCCIÓN

Los desastres ocurridos en los últimos años como consecuencia del fuego sobre estructuras de hormigón armado, llevan a considerar la importancia de valorar adecuadamente este tipo de acción que puede poner en riesgo la seguridad de las mismas. La acción del fuego sobre una estructura va a afectar notablemente a su vulnerabilidad y comportamiento estructural, tanto durante el incendio como en la situación post-incendio, en el enfriamiento.

A pesar de que se considera que el hormigón armado presenta una resistencia aceptable frente al fuego, su exposición prolongada a elevadas temperaturas lleva asociada una importante pérdida de prestaciones mecánicas. Dicha pérdida de propiedades se extiende no solo al recubrimiento de hormigón, sino también a las armaduras [1,2], a la vez que falla la adherencia hormigón/armadura [3].

Las elevadas temperaturas que se pueden desarrollar durante un incendio suficientemente prolongado, pueden alcanzar el nivel de la armadura y afectar a sus

propiedades mecánicas, que se manifiestan en pérdidas de la resistencia mecánica, al tiempo que se ve afectada la ductilidad del acero [4-16]. Una revisión bibliográfica como la realizada para el presente trabajo ha permitido poner de manifiesto los escasos datos experimentales publicados; siendo más escasos aún los trabajos realizados en los últimos 15 años. Por otro lado los propios códigos han adoptado los mismos valores nominales en las sucesivas actualizaciones.

Modificaciones en las características del acero, tipo de acero (composición y propiedades mecánicas) parecen influir en la respuesta del mismo a las altas temperaturas. Así, la respuesta de los aceros de pretensado frente a la acción del fuego es más crítica, ya que sus propiedades mecánicas se ven afectadas a temperaturas inferiores, aunque el número de datos publicado es aún mas escaso [16].

En el presente trabajo se ha tratado de evaluar la dispersión en la respuesta mecánica frente a la acción de las altas temperaturas de armaduras de acero teniendo en cuenta el tipo de acero y el diámetro de la armadura

2. DISPERSION EN LA RESPUESTA MECANICA DE LAS ARMADURAS A ALTAS TEMPERATURAS. INFLUENCIA DEL TIPO DE ACERO

La exposición de las armaduras, tanto para aceros pasivos como para aceros activos, a elevadas temperaturas implica una pérdida progresiva de sus propiedades mecánicas al aumentar la temperatura de exposición. Esta pérdida de las propiedades mecánicas se manifiesta en parámetros como: la carga máxima (f), el límite elástico (σ_y), el módulo de Young (E) o el alargamiento (ϵ).

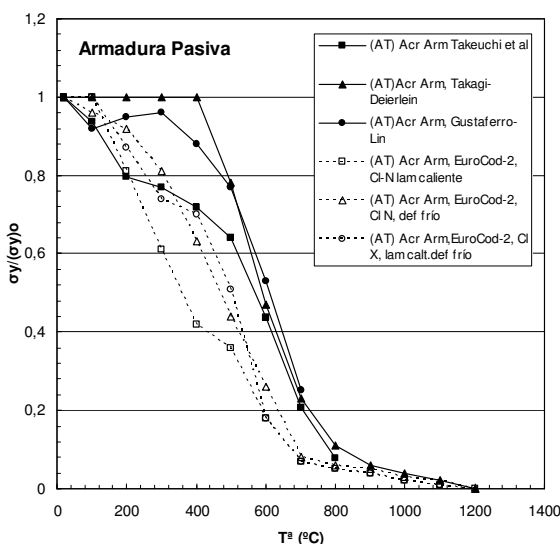


Figura 1. Variación del límite elástico a alta temperatura, según a bibliografía, para armaduras pasivas.

En general para el acero pasivo, los datos de la bibliografía [7,8, 13,15 16] indican una conservación de la mayor parte de sus propiedades hasta temperaturas entre 400 y 500°C, en particular la f_{max} , siendo mas sensible en el caso del límite elástico como se aprecia en la figura 1. Aunque algunos autores, como [7], presentan datos con pérdidas significativas a menores temperaturas, posiblemente asociado con el hecho de que ha empleado aceros mecanizados a los que han eliminado la corruga.

Por otro lado, los códigos que, toman valores nominales, son más restrictivos en general y presentan pérdidas de hasta el 50% a 400°C. Es destacable que en la reducción de propiedades influye el tipo de acero, bien sea laminado en caliente, que es mas sensible que el deformado en frío, posiblemente asociado, en parte, con cambios en la microestructura del material tras el tratamiento.

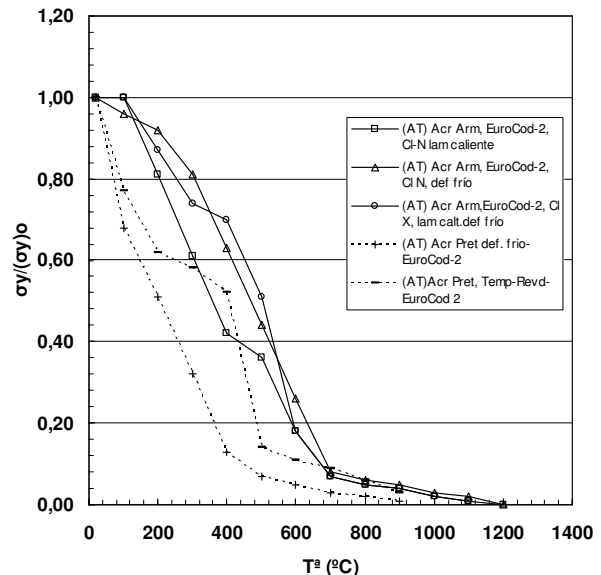


Figura 2. Variación del límite elástico a alta temperatura, según los códigos, para distintos tipos de armadura (pasiva y activa).

Los códigos diferencian no solo para distintos tipos de armaduras pasivas, sino también para armaduras activas, figura 2, siendo estas últimas aún más sensibles a las elevadas temperaturas. Los aceros activos para pretensado, tienen diferencias significativas a los aceros pasivos tanto en composición, microestructura como en propiedades mecánicas, cuando se exponen a elevadas temperaturas ven afectadas sus propiedades a temperaturas mas bajas, incluso a 200°C [7,13,15]. Nuevamente los códigos son mas restrictivos, siendo mas sensible el acero de pretensado deformado en frío que el templado y revenido, posiblemente también asociado a la microestructura diferente entre ambos tipos de aceros.

Sin embargo, el efecto de la temperatura depende del tipo de parámetro medido; así en el caso de la carga

máxima existe mucha menos dispersión entre los datos encontrados a las distintas temperaturas, tanto de la bibliografía como de los códigos, figura 3.

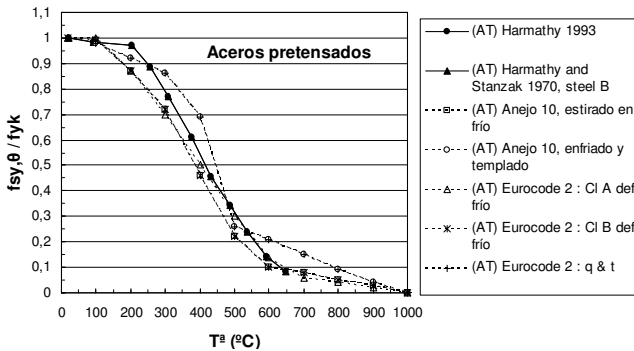


Figura 3. Variación de la carga máxima a alta temperatura, para armadura activa.

Estas diferencias en comportamiento según la propiedad medida, se aprecia mas claramente en la figura 4, para los valores medios calculados para los parámetros f_{max} , E y σ_y .

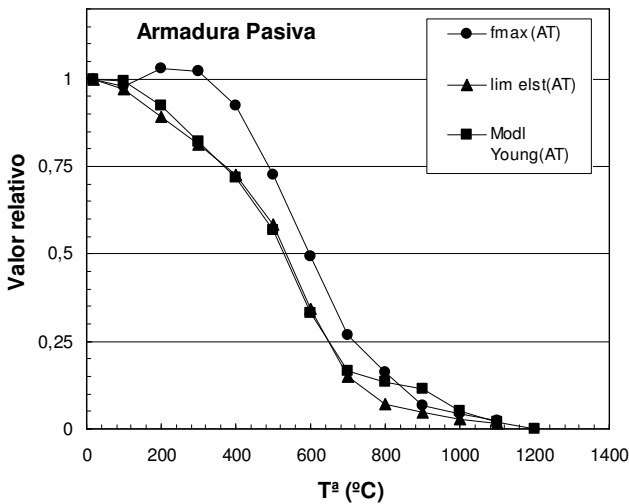


Figura 4. Reducción de factores para las relaciones tensión-deformación en armaduras pasivas a alta temperatura

En el caso del alargamiento, ϵ , la respuesta a alta temperatura indica para las armaduras pasivas, un aumento de la deformación, de manera que a $T^a > 400^\circ\text{C}$ se produce un importante ductilización del acero, que aumenta entre 400 y 700°C , no se han encontrado datos de este parámetro para las armadura activas.

De todos los parámetros mecánicos evaluados el límite elástico es el que presenta mayores dispersiones, que se van atenuando a temperaturas superiores a 700°C donde todos concuerdan que hay una perdida casi total de propiedades.

A la vista de los datos encontrados en la literatura es posible hacer una valoración estadística que permita de forma más rigurosa determinar la reducción en los

parámetros mecánicos de las armaduras expuestas a la acción del fuego, con el fin de poder aplicar modelos probabilistas que permitan valorar, de forma mas rigurosa, la seguridad de la estructura durante el incendio.

3. INFLUENCIA DEL DIAMETRO DE LA ARMADURA

La influencia del diámetro de la armadura ha sido estudiada experimentalmente en [16], aunque no aporta datos concretos, concluye que tanto el tamaño como la sección de acero tienen poca influencia en la propiedad medida. Dada la escasez de información se hizo un estudio experimental del parámetro diámetro de la armadura.

Se emplearon armaduras del tipo 500 SD, de alta ductilidad, de 6, 10, 12 y 16mm de \varnothing . Se cortaron en barras de 35cm y se sometieron a un calentamiento a $10^\circ\text{C}/\text{min}$ hasta alcanzar la temperatura crítica: 200, 400, 500, 700, 900 y 1100°C . Se mantuvo la temperatura durante $\frac{1}{2}$ hr seguido de un enfriamiento rápido con la puerta del horno abierta. Se ensayaron 6 armaduras para cada T^a y \varnothing con el fin de poder tomar valores medios y determinar la variabilidad en el ensayo. Las roturas se realizaron tras e enfriamiento, por lo que los datos son residuales (R).

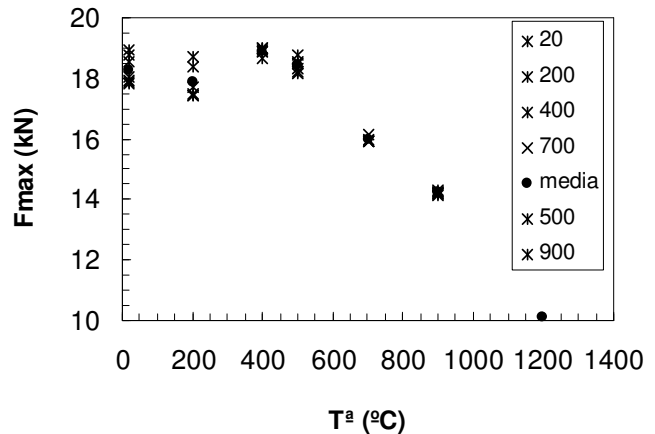


Figura 5. Dispersión de la carga máxima para armadura de 6mm diámetro

La respuesta de las propiedades mecánicas de las armaduras, independientemente del diámetro de la misma, es similar. Se comprueba que apenas existe dispersión para barras idénticas, como se aprecia en la figura 5.

Por otro lado los valores medios de la evolución del parámetro mecánico con la temperatura son muy similares para los distintos diámetros ensayados, como se deduce de la figura 6, y con la media de los valores de la bibliografía. Estos resultados permiten concluir que el diámetro de la armadura no es un parámetro crítico que afecte al comportamiento de la misma

cuando queda expuesta a elevadas temperaturas, por lo que es posible adoptar valores medios.

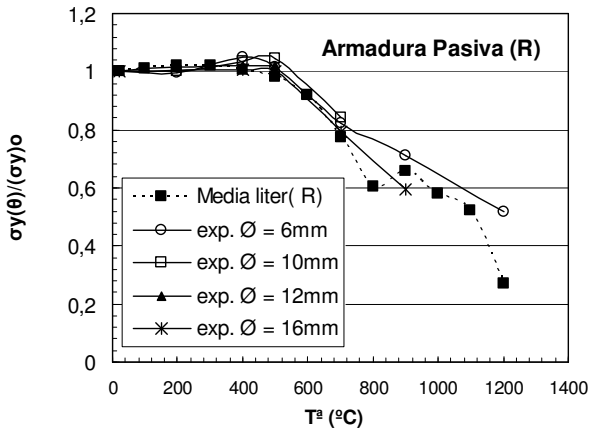


Figura 6. Influencia del diámetro de armadura en el límite elástico por exposición a altas temperaturas. Valores residuales.

4. CORRELACION ENTRE LA RESPUESTA A ALTA TEMPERATURA Y LA RESPUESTA RESIDUAL

Como se ha ido deduciendo de los resultados de la bibliografía las armaduras pasivas expuestas a elevadas temperaturas, si no se superan los 400°C mantienen la mayor parte de sus propiedades mecánicas, sobre todo la f_{max} (figura 7), aunque el nivel de pérdida depende del tipo de parámetro ensayado, siendo mas sensible para σ_y y E.

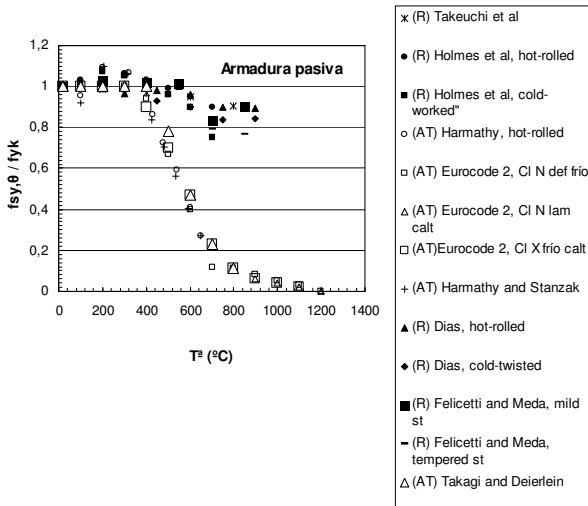


Figura 7. Evolución de la carga máxima en función de las condiciones de exposición. AT valores a alta temperatura, R valores residuales (frío)

Sin embargo esta reducción en propiedades mecánicas depende de las condiciones en las que se realiza la medida, es más significativa a alta temperatura (AT) que una vez que se ha enfriado, ya que entonces la armadura recupera parte de esta caída.

Los distintos parámetros mecánicos que caracterizan a la armadura presentan una capacidad determinada de recuperarse tras la exposición a elevadas temperaturas que varía en función de la temperatura alcanzada y que es independiente de la dispersión asociada al parámetro concreto, como se aprecia en las figuras 7 y 8, para la carga máxima y el límite elástico respectivamente en armaduras pasivas.

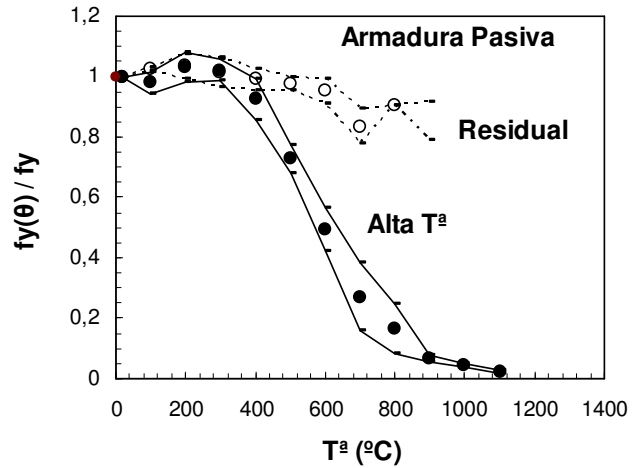


Figura 7. Dispersión para la carga máxima para AT y R en armaduras pasivas

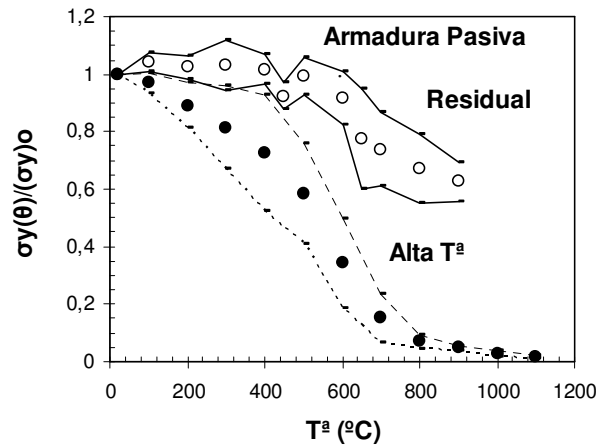


Figura 8. Dispersión del límite elástico para AT y R en armaduras pasivas

Al intentar establecer una correlación entre la pérdida de propiedades a elevada temperatura (AT) con la capacidad de recuperación tras el enfriamiento (R), el proceso sigue una evolución lineal en dos etapas, como se aprecia en la figura 9, para la carga máxima para el caso de armaduras activas: 1) Una primera entre 20 y 400°C y 2) otra entre 400 y 800°C.

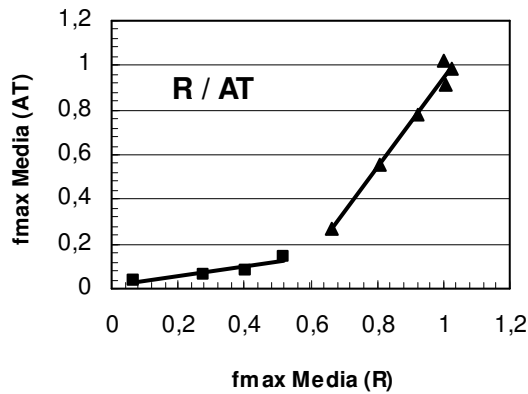


Figura 9. Correlación AT vs. R. para el límite Elástico. Armadura Activa

Las tablas I y II recogen los valores correspondientes a los ajustes lineales a partir de las medias obtenidas de los datos de la bibliografía, tanto para armaduras pasivas como para armaduras activas en ambas etapas. La bondad de dichos ajustes se pone de manifiesto en el valor de R^2 superior en todos los casos a 0.85. Un ajuste a una única función continua también sería posible de establecer, de tipo exponencial.

Tabla 1. Respuesta a alta T^a (AT) vs Respuesta tras el enfriamiento (R), para armaduras pasivas.

R/A T	T °C	Función	R^2
fmax	20-800	$f_m(AT) = 5.67f_m(R) - 4.73$	0.91
Lim Elast	20-400	$\sigma_y(AT) = 3.22\sigma_y(R) - 2.35$	0.85
Lim Elast	400-800	$\sigma_y(AT) = 0.48\sigma_y(R) - 0.22$	1
Mod Yong	20-400	$E(AT) = 9.29E(R) - 9.91$	0.87
Mod Yong	400-800	$E(AT) = 0.69E(R) - 0.58$	0.99

Tabla II. Respuesta a alta T^a (AT) vs Respuesta tras el enfriamiento (R), para armaduras activas.

R/A T	T °C	Función	R^2
fmax	20-400	$f_m(AT) = 2.04f_m(R) - 1.09$	0.98
fmax	400-800	$F_m(AT) = 0.72f_m(R) - 0.21$	0.98
Lim Elast	20-400	$\sigma_y(AT) = 1.58\sigma_y(R) - 0.87$	0.96
Lim Elast	400-800	$\sigma_y(AT) = 0.53\sigma_y(R) - 0.10$	0.98
Mod Yong	20-400	$E(AT) = 1.89E(R) - 0.80$	0.93
Mod Yong	400-800	$E(AT) = 0.19E(R) - 0.003$	0.94

Finalmente se ha intentado validar este tipo de ajuste aplicandole a los resultados experimentales obtenidos con armaduras pasivas y distintos diámetros. Donde a partir de los datos residuales (R) de los parámetros mecánicos se ha intentado determinar el factor de pérdida a alta temperatura (AT). En la figura 10 se presentan los resultados del ajuste para el caso de las armaduras con 6 mm de diámetro.

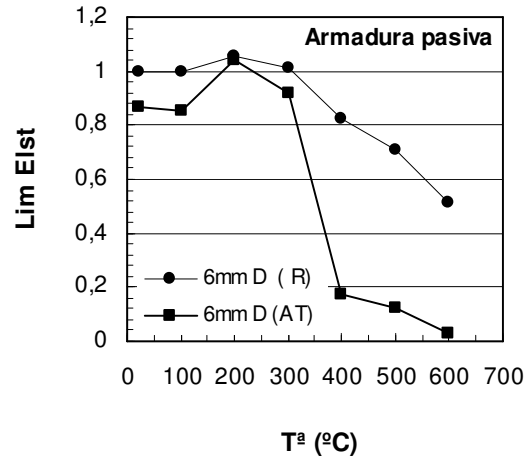


Figura 10. Correlación AT vs. R. para el Límite Elástico. Armadura pasiva

5. CONCLUSIONES

A partir de los estudios realizados se han podido extraer las siguientes consideraciones finales:

- Las armaduras de acero cuando se encuentran expuestas a elevadas temperaturas sufren una reducción de sus propiedades mecánicas. Existe un rango de dispersión de pérdida de propiedad para idénticas condiciones de exposición que depende de diferentes factores.
- El factor de reducción depende del tipo de parámetro mecánico y del tipo de acero.
- Del tipo de acero: Las armaduras activas son más susceptibles a sufrir una mayor reducción de propiedades que las armaduras pasivas. De igual forma los aceros de armaduras pasivas laminados en caliente son más sensibles que los deformados en frío.
- El diámetro de la armadura no afecta a la pérdida de propiedades siendo más sensible el tipo de acero.
- La pérdida de propiedades que se producen por las elevadas temperaturas, pueden recuperarse parcialmente al alcanzar el estado de enfriamiento.

- Es posible obtener una relación lineal en dos etapas para cada parámetro mecánico que permita determinar a partir de datos residuales la respuesta a alta temperatura de las armaduras.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al proyecto HABITAT-2030 (PSS-380000-2006) del MEC la financiación obtenida para el presente estudio. A p. Tanner y R. Ingorani por sus valiosos comentarios

REFERENCIAS

- [1] Bazant Z., Kaplan M.F. Concrete at high temperatures, material properties and mathematical models. U.K. Longman Group Limited, *Concrete Design and construction series*, 1996, 413.
- [2] Harmathy T.Z. Fire safety Design and Concrete. U.K : Longman Scientific and Technical, *Concrete Design and construction series*, 1993, p412.
- [3] Morley, P.D. and Royles, R., The influence of high temperature on the bond in reinforced concrete, *Fire safety journal*, 2 (1979) 243-255.
- [4] Simmons W.F., Cross H.C. Elevated temperatures properties of carbon steels. Philadelphia. *American Society for Testing Materials*, 1955, p63.
- [5] Eurocode 3-Part 1.2: General rules – Structural Fire Design. Design of Steel Structures. Bruxelles. *Comité Européen de Normalisation*, Abril 2005
- [6] Felicetti R., Meda A. Residual behaviour of reinforcing steel bars after fire. In : BALAZS G.L., BOROSNYOI A., Fib Synopsium « Keep concrete attractive ». *Budapest University of Technology and Economics*, 2005, p.1148-1155
- [7] Takeuchi M., Hiramoto M., Kumagai N., Yamazaki N., Kodaira A., Sugiyama K. Material properties of concrete and steel bars at elevated temperatures. Edt. KUSSMAUL K., Smirt-12. *Elsevier Science Publication*, 1993, p.133-138.
- [8] Harmathy T. Z., Stanzak W. W. Elevated temperature tensile and creep properties of some structural and prestressing steels. In : Fire test performance. *American Society for Testing and Materials*, 1970, 186 p.
- [9] Standard Methods of Fire Tests of Building Construction and Materials, E119-83. Annual Book of ASTM Standards Vol. 04.07, *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, 1984
- [10] Assessment and Repair of Fire-damaged Concrete Structures. Concrete Society Technical Report TR.033, *The Concrete Society, UK*, 1990
- [11] Repairability of fire damaged structures. *CIB W14 Report, Fire Safety Journal, Special Issue, Vol.16, No.4*, 1990.
- [12] FIB Task Group V.2 : Management, Maintenance and Strengthening of Concrete Structures – Appendix 7: *Assessment of Fire Damage to Structures*. Abril 1999
- [13] Takogi, J. Deierlein G.G., Strength design criteria for steel members at elevated temperature. *Journal of Constructional Steel Research*, 2007, Vol.63, n°8, p.1036-1050
- [14] Gustafsson A.H., Lin T.D. Rational design of reinforced concrete members for fire resistance. *Fire Safety Journal*, 1986, Vol.11, p.85-98
- [15] Dias W. P. S. Some properties of hardened cement paste and reinforcing bars upon cooling from elevated temperature. *Fire and Materials*, 1992, Vol.16, p.29-35
- [16] Holmes M., Anchor R.D., Cook G.M.E., Crook R.N. The effects of elevated temperatures on the strength properties of reinforcing and prestressing steels. *The Structural Engineer*, 1982, Vol.60.