

## **INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN LA RELAJACIÓN DEL ACERO DE PRETENSADO**

Gerbaudo Carlos F.<sup>1</sup>, Sialle Juan G.<sup>2</sup>

M.Sc. Ingeniero Civil

<sup>1</sup>F.C.E.F.y N. Univ. Nac. Córdoba, <sup>2</sup>INGROUP – Oficina de Proyectos

[cgerbaudo@hotmail.com](mailto:cgerbaudo@hotmail.com), [juangsialle@gmail.com](mailto:juangsialle@gmail.com)

### **RESUMEN**

En el presente trabajo se realiza, en primer término, un estudio del conocimiento actual del fenómeno de relajación en aceros de pretensado de alta resistencia, de los factores que influyen en el desarrollo de la relajación a lo largo del tiempo y de los diferentes modelos de relajación del acero y su aplicación práctica.

En segundo término, se presenta una calibración de la función de relajación del acero de pretensado a partir de los datos colectados en dos cables de pretensado correspondiente a los anclajes al terreno de una pila de puente, comparando los resultados de campo con las formulaciones teóricas propuestas según el enfoque americano y europeo, y el modelo de relajación del acero de pretensado propuesto en el Reglamento Argentino de Puentes CIRSOC 802.

Finalmente, se realiza un análisis de la influencia de la temperatura en el fenómeno de relajación del acero, y se realizan estimaciones del aumento de la pérdida de tensión por relajación teniendo en cuenta la temperatura de exposición del acero de pretensado.

### **ABSTRACT**

*This work firstly presents a review of the current state of knowledge of the relaxation phenomenon in high-strength prestressing steels, of the influencing factors that modify relaxation over long periods of time and of the different relaxation models and their practical application.*

*In the second instance, a calibration of the relaxation function of the prestressing steel is performed from the data collected in two prestressing cables corresponding to the ground anchors of a bridge pier, comparing the field results with the proposed theoretical formulations, according to the american and european approach, and the relaxation model proposed by Argentinian Bridge Code CIRSOC 802.*

*Finally, the influence of temperature is incorporated into the analysis of the relaxation of steel, and some estimations of the increase in stress loss due to the relaxation phenomenon are made, taking into account the exposure temperature of the prestressing steel.*

## INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se realiza un estudio del conocimiento actual del fenómeno de relajación en aceros de pretensado de alta resistencia, de los factores que influyen en el desarrollo de la relajación a lo largo del tiempo y de los diferentes modelos de relajación del acero y su aplicación práctica, luego se realiza una calibración de la función de relajación del acero de pretensado a partir de los datos colectados en dos cables de pretensado correspondiente a los anclajes al terreno de una pila de puente, comparando los resultados de campo con las formulaciones teóricas propuestas según el enfoque americano y europeo, y el modelo de relajación del acero pretensado del Reglamento CIRSOC 802, y finalmente, se incorpora la influencia de la temperatura en el análisis de la relajación del acero, y se presenta una propuesta de ajuste de la formulación del fenómeno de relajación teniendo en cuenta la variable de la temperatura.

## EL FENÓMENO DE RELAJACIÓN DEL ACERO

El fenómeno de relajación se define como la pérdida de tensión que experimenta un material sometido a una deformación constante. En el acero de pretensado, la relajación es una consecuencia de la viscoplasticidad del material, siendo las causas de la relajación las dislocaciones y reacomodos en la microestructura cristalina del acero solicitado en forma permanente, que generan flujo plástico en el tiempo, disminuyendo la tensión que aparece como respuesta a la deformación.

La magnitud de relajación que tendrá el acero de pretensado depende del procedimiento de fabricación y de la calidad del acero. Generalmente, la producción de los aceros de pretensado prevé la realización de tratamientos térmicos para disminuir las tensiones internas del material, denominándose estos aceros aliviados de tensiones. Por otra parte, existen aceros de pretensado denominados de “baja relajación” que son pre-estirados a diferentes temperaturas para producir una deformación permanente y disminuir la magnitud de la relajación. Actualmente, la mayoría de los sistemas de pretensado conformados por barras, alambres o cordones utilizan aceros de baja relajación.

La manera convencional de medir el fenómeno de relajación es a través de la llamada tasa de relajación del acero de pretensado, definida como la relación entre las pérdidas de pretensado por relajación y la tensión inicial de pretensado:

$$\rho(t) = \frac{\Delta\sigma_p(t)}{\sigma_{p0}} \quad (1)$$

en donde:

$\rho(t)$  = tasa de relajación

$\sigma_{p0}$  = tensión inicial de pretensado

$\Delta\sigma_p(t)$  = variación de tensión en el acero de pretensado luego de  $t$  horas

Generalmente, para caracterizar la relajación del acero de pretensado los fabricantes de acero suelen informar la tasa de relajación luego de 1000 horas a distintos niveles de tensión inicial de pretensado correspondientes a ensayos realizados a deformación constante y a temperatura constante de 20° C.

Las variables principales que influyen en el fenómeno de relajación son las características mecánicas del material, la relación entre la tensión inicial de pretensado y la tensión de fluencia o resistencia a tracción del acero y la temperatura a la que está sometido el acero durante la vida útil de la estructura, destacándose que para altas temperaturas la tasa de relajación del acero aumenta notablemente.

Los estudios realizados por numerosos investigadores, principalmente por el equipo del Profesor Zdeněk Bažant de la Universidad de Northwestern <sup>[1]</sup>, sobre las causas de deformaciones excesivas medidas en varios puentes existentes de grandes luces llegan a la conclusión que la pérdida de tensión del acero de pretensado por relajación en el tiempo es afectada significativamente por los cambios del nivel de deformación en el acero y por las altas temperaturas a las que suelen estar sometidos los cordones de pretensado en losas y almas de reducido espesor.

Este efecto es más notorio en estructuras de grandes luces con un alto grado de sensibilidad a los efectos de fluencia y retracción del hormigón, donde los cambios del nivel de deformación en el acero a lo largo del tiempo interactúan con la pérdida de tensión del acero de pretensado por relajación. En efecto, en estructuras de grandes luces con alta sensibilidad a los efectos de la fluencia, las pérdidas de pretensado debido a la relajación del acero no pueden calcularse de manera separada del análisis de los efectos de la fluencia y retracción del hormigón en la estructura, y viceversa, la relajación del acero influye en los efectos de la fluencia del hormigón.

Sin embargo, los códigos de diseño internacionalmente reconocidos, tanto europeos como americanos, presentan modelos de relajación del acero para deformación y temperatura constante, sin especificar fórmulas que permitan tener en cuenta estas variables, o dando un tratamiento simplificado de su efecto.

A la luz de los resultados experimentales, existen estudios actuales que presentan modelos ajustados para la relajación del acero que incluyen las variables de cambios de deformación y temperatura <sup>[1]</sup>.

## **MODELOS DE PÉRDIDA DE TENSIÓN POR RELAJACIÓN DEL ACERO**

En este apartado se presentan los modelos de relajación del acero de pretensado más usuales utilizados en la práctica ingenieril.

### **El enfoque americano**

El enfoque americano para abordar el fenómeno de relajación del acero de pretensado fue desarrollado sobre la base del trabajo realizado por Magura y sus colaboradores <sup>[2]</sup>, quienes recopilaron y estudiaron una amplia colección de ensayos de relajación realizados en diferentes laboratorios. A partir del análisis que llevaron a cabo,

concluyeron que una estimación satisfactoria de la tasa de relajación para cordones y alambres alivianados de tensiones puede obtenerse con la siguiente fórmula:

$$\rho(t) = \frac{\sigma_{p0} - \sigma_p(t)}{\sigma_{p0}} = \frac{\log(t)}{10} \left( \frac{\sigma_{p0}}{f_{py}} - 0.55 \right) \quad (2)$$

en donde:

$\rho(t)$  = tasa de relajación

$\sigma_{p0}$  = tensión inicial de pretensado

$\sigma_p(t)$  = tensión en el acero de pretensado luego de  $t$  horas

$f_{py}$  = tensión de fluencia del acero de pretensado.

Como se observa en la ecuación (2), la ley de desarrollo de la relajación según el enfoque americano es logarítmica y la cantidad total de relajación se calcula mediante la relación entre la tensión inicial de pretensado y la tensión de fluencia del acero de pretensado. La fórmula anterior de relajación para cordones y alambres alivianados de tensiones puede ser modificada para estimar la relajación en cordones de baja relajación. De acuerdo a Nawy [3]:

$$\rho(t) = \frac{\sigma_{p0} - \sigma_p(t)}{\sigma_{p0}} = \frac{\log(t)}{45} \left( \frac{\sigma_{p0}}{f_{py}} - 0.55 \right) \quad (3)$$

Si se disponen de datos de relajación otorgados por el fabricante del acero, se puede generalizar la ecuación anterior de la siguiente forma:

$$\rho(t) = \frac{\sigma_{p0} - \sigma_p(t)}{\sigma_{p0}} = \frac{\log(t)}{s} \left( \frac{\sigma_{p0}}{f_{py}} - 0.55 \right) \quad (4)$$

en donde  $s$  es un coeficiente que depende de las propiedades de relajación intrínseca para un determinado tipo de acero. Esta formulación se encuentra subyacente, por ejemplo, en la especificación AASHTO LRFD Bridge Design Specification que propone que la pérdida de pretensado debida a relajación puede ser calculada como:

$$\Delta f_{pR} = \Delta f_{pR1} + \Delta f_{pR2} \quad (5)$$

$$\Delta f_{pR1} = \frac{f_{pt}}{K_L} \left( \frac{f_{pt}}{f_{py}} - 0.55 \right) \quad (5.9.5.4.2c-1) \quad (6)$$

$$\Delta f_{pR2} = \Delta f_{pR1} \quad (5.9.5.4.3c-1) \quad (7)$$

en donde:

$\Delta f_{pR}$  = pérdida de tensión debida a relajación

$\Delta f_{pR1}$  = pérdida desde el momento de la transferencia y el completamiento del tablero

$\Delta f_{pR2}$  = pérdida desde el completamiento del tablero y el tiempo final

$K_L$  = coeficiente que depende del tipo de acero; 30 para cordones de baja relajación y 7 para los demás aceros de pretensado

$f_{pt}$  = tensión en el acero pretensado inmediatamente después de la transferencia

$f_{py}$  = tensión de fluencia del acero de pretensado

## El enfoque europeo

El enfoque europeo para el tratamiento de la relajación nace a partir de la tradición establecida por los grandes ingenieros europeos precursores en el uso del hormigón pretensado como el francés Eugène Freyssinet, el italiano Riccardo Morandi y el alemán Hubert Rüschi, quien como presidente de la Comisión de Trabajo “Hormigón Pretensado” publicó la DIN 4227 [4].

El enfoque europeo difiere del enfoque americano en el sentido de que la ley de desarrollo de la relajación es una función potencial, en lugar de la función logarítmica propuesta por la práctica americana. La *fib* (fédération internationale du béton), especifica en el Código Modelo 2010 (Model Code 2010) la siguiente fórmula para estimar la tasa de relajación del acero de pretensado, a deformación y temperatura constante de 20°C:

$$\rho(t) = \frac{\sigma_{p0} - \sigma(t)}{\sigma_{p0}} = \rho_{1000} \left( \frac{t}{1000} \right)^k \quad (8)$$

en donde:

$\rho(t)$  = tasa de relajación

$\sigma_{p0}$  = tensión inicial de pretensado

$\sigma_p(t)$  = tensión en el acero de pretensado luego de  $t$  horas

$\rho_{1000}$  = relajación intrínseca luego de 1000 horas

$k \approx \log(\rho_{1000} / \rho_{100})$  ;

$k = 0.12$  para aceros normales y  $0.19$  para aceros de baja relajación

$\rho_{100}$  = relajación intrínseca luego de 100 horas

La dependencia del nivel de tensión y del tipo de acero en la relajación en este caso se tiene en cuenta mediante la tasa de relajación intrínseca  $\rho_{1000}$ . El Código Modelo 2010 propone los siguientes valores de relajación en función de la relación entre la tensión inicial y la resistencia a tracción del acero de pretensado y de la clase de acero:

Clase de acero	$\sigma_{p0} / f_{pt}$	$\rho_{1000}$
Alambre / Cordón	70%	2.5%
Alambre / Cordón	80%	4.5%
Barras $\leq 15$ mm	70%	6%
Barras $> 15$ mm	70%	4%

Tabla 1. Relajación  $\rho_{1000}$  según el Código Modelo 2010 de la fib

Por otra parte, el Eurocódigo 2 – Diseño de Estructuras de Hormigón, código redactado por el CEN (Comité Europeo de Normalisation) en el año 2004, sigue con la tradición europea y otorga fórmulas matemáticas para el cálculo de relajación similares a las dadas en el Código Modelo 2010. Según el Eurocódigo 2, la tasa de relajación para diferentes clases de acero puede ser calculada como:

$$\begin{aligned}
 \text{Clase 1: } \rho(t) &= 5.39 \rho_{1000} e^{6.7\mu} \left(\frac{t}{1000}\right)^{0.75(1-\mu)} 10^{-5} \\
 \text{Clase 2: } \rho(t) &= 0.66 \rho_{1000} e^{9.1\mu} \left(\frac{t}{1000}\right)^{0.75(1-\mu)} 10^{-5} \\
 \text{Clase 3: } \rho(t) &= 1.98 \rho_{1000} e^{8.0\mu} \left(\frac{t}{1000}\right)^{0.75(1-\mu)} 10^{-5}
 \end{aligned} \tag{9}$$

en donde:

$\mu = \sigma_{p0} / f_{pt}$  = relación entre la tensión inicial de pretensado y la resistencia a tracción del acero

$\rho_{1000}$  = relajación intrínseca luego de 1000 horas

La dependencia del nivel tensional en la relajación queda establecida por el parámetro  $\mu$  y el tipo de acero influye en la elección de la clase de relajación.

### El modelo de relajación del Reglamento CIRSOC 802

En la República Argentina, el Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles (CIRSOC) presentó en el año 2019 el Reglamento Argentino de Puentes Carreteros CIRSOC 800, de aplicación al diseño, evaluación y rehabilitación de puentes carreteros.

El Reglamento de Puentes Carreteros CIRSOC 800 [5] adopta como base para su desarrollo la edición 2012 del documento AASHTO LRFD Bridge Design Specification [6], y se compone de cuatro partes numeradas desde el 801 al 804. Particularmente, la parte del Reglamento CIRSOC 802 es de aplicación a estructuras de hormigón. La

expresión que adopta el CIRSOC 802 para el cálculo de las pérdidas de pretensado debido a la relajación es idéntica a la expresión de la especificación base AASHTO.

Por otra parte, en los Comentarios del CIRSOC 802, se presenta una ecuación más precisa [7] para predecir la pérdida por relajación desde la transferencia del pretensado hasta el hormigonado o la colocación del tablero:

$$\Delta f_{pR1} = \left[ \frac{f_{pt}}{K'_L} \frac{\log(24t)}{\log(24t_i)} \left( \frac{f_{pt}}{f_{py}} - 0.55 \right) \right] \left[ 1 - \frac{3(\Delta f_{pSR} + \Delta f_{pCR})}{f_{pt}} \right] K_{id} \quad (10)$$

en donde:

$K'_L$  = coeficiente que depende del tipo de acero; 45 para cordones de baja relajación y 10 para los demás aceros de pretensado

$f_{pt}$  = tensión en el acero pretensado inmediatamente después de la transferencia

$f_{py}$  = tensión de fluencia del acero de pretensado

$\Delta f_{pSR}$  = pérdida de tensión debida a retracción

$\Delta f_{pCR}$  = pérdida de tensión debida a fluencia lenta

$K_{id}$  = factor que representa la restricción generada por la armadura pasiva adherente

$t$  = tiempo de hormigonado o completamiento del tablero en días

$t_i$  = tiempo inicial desde el tesado de los cordones hasta la transferencia del pretensado al hormigón en días

El primer término entre corchetes de (10) es la relajación intrínseca sin tener en cuenta la interacción producto del acortamiento del hormigón debido a la fluencia lenta y la retracción. El segundo término entre corchetes de (10) representa un coeficiente de reducción de la relajación intrínseca del acero de pretensado por la fluencia lenta y retracción del hormigón, y finalmente se introduce un factor de corrección por la restricción al acortamiento que ejerce la armadura pasiva.

Evaluando la relajación intrínseca del acero de pretensado, sin considerar la reducción del fenómeno de relajación por la interacción con fenómenos de fluencia lenta y retracción del hormigón, adoptando un valor por la restricción de la armadura pasiva  $K_{id}=1.0$ , y realizando la asunción que el tiempo inicial  $t_i$  es relativamente corto, comprendido para casos habituales entre 0.4 a 0.5 días, el valor  $\log(24t_i)$  es aproximadamente 1.0, luego midiendo el valor de  $t$  en horas, se obtiene la siguiente ecuación simplificada que representa la relajación intrínseca del acero de pretensado:

$$\Delta f_{pR1} = \frac{f_{pt}}{K'_L} \log(t) \left( \frac{f_{pt}}{f_{py}} - 0.55 \right) \quad (11)$$

Se puede observar que la ecuación simplificada (11) es idéntica a la expresión (4) de la práctica americana formulada por Nawy, con  $K'_L = s$ .

En relación a la pérdida de pretensado de una sección compuesta, entre el momento de colocación del tablero y el tiempo final, el Reglamento CIRSOC 802 indica considerar una pérdida de segunda etapa de igual magnitud a la pérdida de primera etapa, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\Delta f_{pR2} = \Delta f_{pR1} \quad (12)$$

El análisis realizado muestra que las fórmulas de relajación intrínseca del Reglamento CIRSOC 802 derivan de las expresiones utilizadas en la práctica americana, siendo posible calibrar el valor de  $K'_L$  para el comportamiento de los aceros de pretensado utilizados en el país. Por otro lado, se reconoce en la ecuación (10) la utilidad del factor de corrección de la relajación intrínseca por los fenómenos de fluencia lenta y retracción del hormigón, y por la restricción al acortamiento ejercida por la armadura pasiva, que son necesarios tener en cuenta y evaluar en el caso del diseño de una pieza de hormigón pretensado.

## CALIBRACIÓN DE LA FUNCIÓN DE RELAJACIÓN PARA ACEROS DE FABRICACIÓN NACIONAL

A partir de los datos aportados por el fabricante de los cordones de pretensado Grado 270 de “Baja Relajación” que reporta una pérdida de tensión por relajación de 2.5 % para una relación entre la tensión inicial y la tensión de fluencia  $\sigma_{p0}/f_{py} = 0.70$  a un tiempo de 1000 horas y una temperatura de 20 °C, se procede a calibrar el coeficiente  $s$  de la formulación logarítmica propuesta por la práctica americana (Nawy), para una relación típica de tensión inicial de pretensado a tensión de fluencia del acero de 0.70.

El valor obtenido del coeficiente  $s$  es igual a 18, por lo que la ecuación de pérdida de tensión por relajación resulta:

$$\rho(t) = \frac{\sigma_{p0} - \sigma_p(t)}{\sigma_{p0}} = \frac{\log(t)}{18} \left( \frac{\sigma_{p0}}{f_{py}} - 0.55 \right) \quad (13)$$

Tal como se dedujo del análisis realizado con la formulación del Reglamento CIRSOC 802, es posible asignar a  $K'_L$  un valor de 18, de forma de calibrar la relajación intrínseca que surge de los ensayos y datos aportados por los fabricantes nacionales de acero de pretensado.

En la Figura 1 se presenta la función de relajación para la formulación del *fib*, y la formulación americana de Nawy, y la función de relajación ajustada con un factor  $s = K'_L = 18$  obtenido de la calibración de un acero pretensado nacional a 1000 h.

Del análisis de la Figura 1, se puede concluir que la función propuesta por Nawy con un coeficiente  $s = 45$  fue calibrada para aceros de baja relajación utilizados en EEUU, no presenta una buena correlación a edad temprana para los aceros de pretensado utilizados en nuestro país, resultando una pérdida por relajación a 1000 horas del 1.0 %, mientras que las funciones del *fib* y la fórmula de Nawy/CIRSOC 802 calibradas

arrojan el valor de 2.5 % a 1000 horas indicado por el fabricante. A largo plazo, la función del *fib* da un valor de relajación a tiempo infinito de 6.28 % mientras que la función calibrada de Nawy arroja un valor de pérdida a tiempo infinito de 4.17 %. En el caso del CIRSOC 802, considerando que la pérdida de segunda etapa es igual a la de primera etapa, la pérdida a tiempo infinito sería del 5 % (2 x 2.5%). Es importante destacar que la función de la práctica americana con un valor  $s = 45$  da un valor de pérdida por relajación a tiempo infinito de 1.67 %, inferior a la pérdida a 1000 h indicada por el fabricante, por lo que se considera que no es aplicable a los aceros de pretensado utilizados en el país.

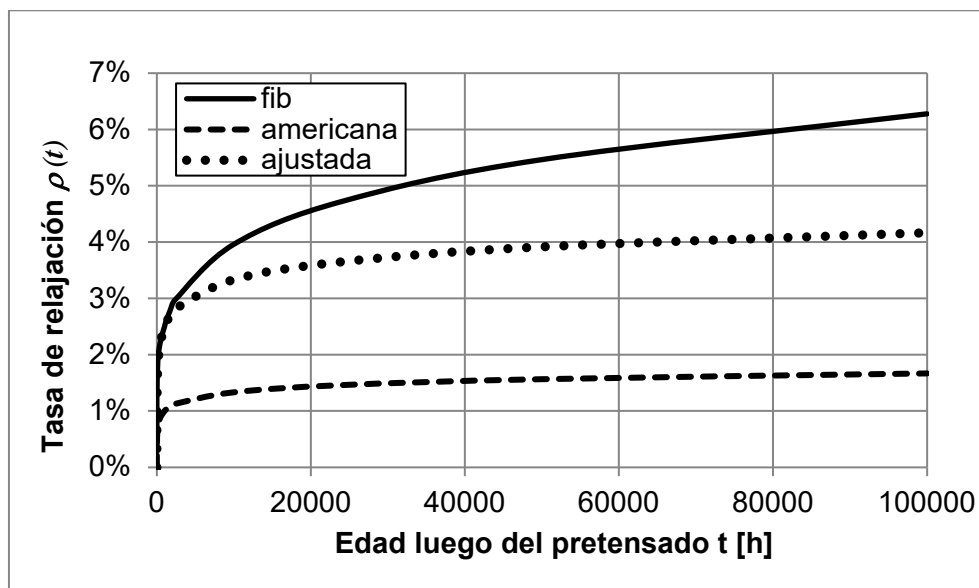


Figura 1. Comparación de función de relajación para *fib*, Nawy y Nawy ajustado

## CALIBRACIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES

En el presente apartado se presenta la calibración de un conjunto de mediciones experimentales realizadas en dos cables de pretensado que forman parte de los anclajes al terreno de la Pila 1 del Viaducto 3 del Camino de las Altas Cumbres, en la Ruta Provincial N° 34, Provincia de Córdoba.

En la Figura 2 se presentan las dos curvas de comportamiento de los cables pretensados sometidos a una tensión inicial, donde se observa la pérdida de tensión registrada en el tiempo, pudiéndose ser asignado este fenómeno a la relajación “intrínseca” del acero de pretensado, ya que corresponden a un par de cables de pretensado sometidos a una tensión uniforme anclados en un bulbo desarrollado en el macizo rocoso, y se considera que no existen otras pérdidas de tensión asociadas a fenómenos de fluencia o retracción del material en el cual se ancla el cable o son poco significativas y pueden ser despreciadas. El análisis de estas mediciones es de interés ya que se cuenta con un registro continuo de tensiones de 559 días.

La relación de la tensión inicial de tiro a la resistencia del acero del cable 1 y 2 es de 0.58 y 0.56 respectivamente, y se registró una pérdida de tensión a 1000 horas

comprendida entre 1.0 y 1.5 % que se corresponde con los datos del fabricante del cordón que indica una pérdida de relajación del 1.0 % para una relación de tensión de tiro inicial a resistencia del 60 %. También se puede deducir de las mediciones que la pérdida de relajación del acero a 559 días es del orden del 3 % para los cables medidos.

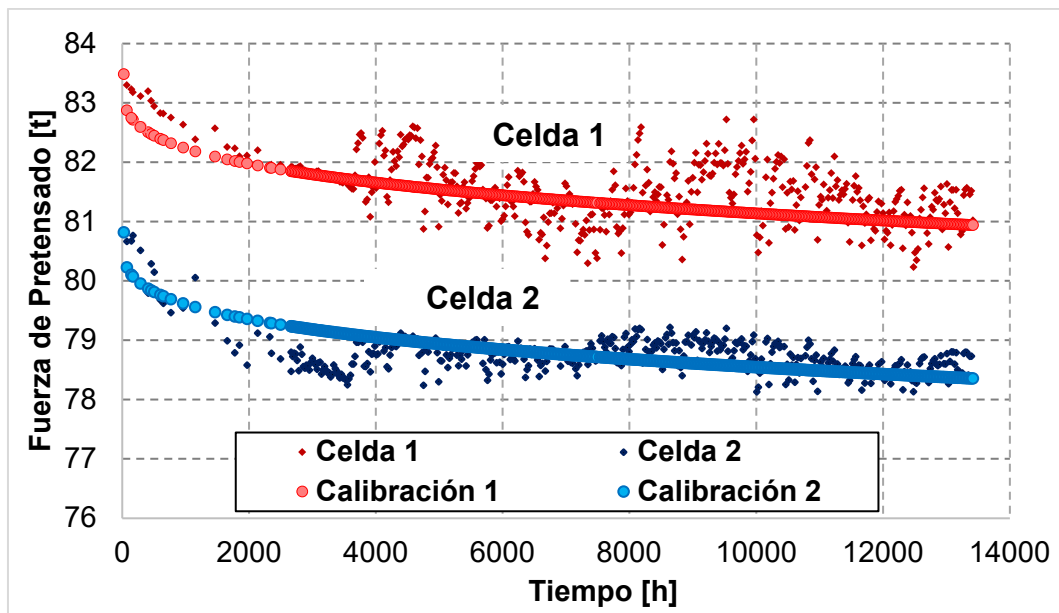


Figura 2. Curva de medición de fuerza en 2 cables de pretensado

Se ha aplicado la fórmula de cálculo de relajación del Código Modelo 2010 del *fib* con una tasa de relajación a 1000 horas de 1.5%, pudiéndose observar que la formulación del *fib* presenta una buena correspondencia con las mediciones realizadas. Extrapolando con la fórmula del *fib*, para una pérdida de tensión a 1000 horas de 1.5 %, resulta una pérdida de relajación a tiempo infinito del 5.2 %, que sería el valor que el proyectista debería considerar para calcular la fuerza final de pretensado y definir la cantidad de cordones necesarios para el anclaje.

El resultado de los análisis de los datos experimentales muestra que la fórmula del *fib* permite ajustar adecuadamente la función de relajación del acero de pretensado en el tiempo partiendo del dato de pérdida de relajación a 1000 horas.

## EFFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA RELAJACIÓN DEL ACERO

En función de numerosos ensayos realizados y del estudio del comportamiento de pérdidas de tensión de pretensado en estructuras de hormigón pretensado existentes, se ha podido determinar que el efecto de la temperatura es muy importante en la relajación del acero, ya que produce una activación de la energía del flujo viscoplastico del metal <sup>[1]</sup>.

Los ensayos experimentales de relajación del acero de pretensado realizados por Shinko Wire Company y Rostásy y colaboradores <sup>[8]</sup>, para diferentes rangos de

temperaturas, muestran que la pérdida de tensión por relajación de acero se incrementa significativamente con el aumento de la temperatura, tal como se aprecia en la Figura 3. Se puede deducir de los resultados de los ensayos, para un acero de pretensado de baja relajación con una tensión inicial de 70 % de la tensión de fluencia y 1 % de pérdida por relajación a 1000 horas a 20°C, que la pérdida por relajación a 10000 horas resulta del 2 %, 3 % y 5 % para temperatura de 20°C, 55°C y 70°C respectivamente.

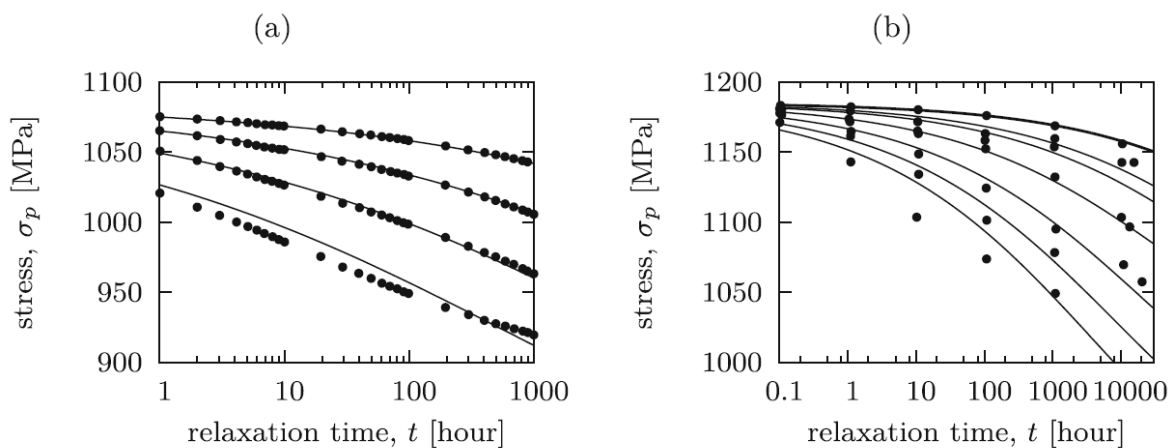


Figura 3. Ajuste de los ensayos de relajación del acero de pretensado a diferentes temperaturas por el modelo de Bazant & Yu (2013): a) Ensayos de Shinko Wire Company, niveles de temperatura de 20°C, 40°C, 60°C y 80°C (curvas superior a inferior), b) Rostasy & Thienel, niveles de temperatura 20°C, 55°C, 70°C, 110°C, 130°C, 155°C y 175°C (curvas superior a inferior)

Por ejemplo, cuando la temperatura de exposición del acero de pretensado es cercana a los 50°C se puede predecir que la pérdida de tensión por relajación del acero pretensado podría aumentar hasta un 50 % respecto a las estimaciones realizadas con una formulación para temperatura constante de 20°C.

La relajación del acero de pretensado sometido a deformación y temperatura variable puede ser descrita mediante un modelo constitutivo que incluye la deformación viscosa mediante una ecuación diferencial función de la temperatura, la deformación y la tensión del acero de pretensado. La formulación completa de un modelo constitutivo de la relajación del acero de pretensado derivada y calibrada experimentalmente puede verse en el artículo técnico de [1].

## CONCLUSIONES

En función de los estudios realizados y el análisis de los datos experimentales se pueden alcanzar las siguientes conclusiones:

- El resultado de los análisis de los datos experimentales muestra que la fórmula potencial propuesta en el código europeo del *fib* permite ajustar

adecuadamente la función de relajación del acero de pretensado en el tiempo partiendo del dato de pérdida de relajación a 1000 horas.

- La ecuación propuesta por la práctica americana para la evaluación de la pérdida de relajación del acero no estima correctamente la relajación de los aceros de fabricación nacional, particularmente porque la formulación americana fue calibrada para aceros de pretensado de baja relajación utilizados en Estados Unidos. Por lo tanto, se considera que no es posible aplicar directamente esta formulación para el caso de otros aceros de pretensado que presenten un comportamiento diferente en relación a la pérdida de relajación a tensión constante.
- En el caso de la formulación de relajación del Reglamento CIRSOC 802, es posible calibrar el coeficiente  $K'_L$  para una pérdida de relajación de 2.5 % para  $f_{pi}/f_{py}=0.7$ , 1000 horas y 20°C resultando un factor  $K'_L = 18$ . Por otro lado, es importante mencionar la utilidad de la formulación del CIRSOC 802 que considera los factores de corrección de la relajación intrínseca por los fenómenos de fluencia lenta y retracción del hormigón y el efecto de la restricción ejercida por la armadura pasiva adherente.
- En efecto, en una pieza típica de hormigón pretensado se producen simultáneamente los fenómenos de fluencia y retracción del hormigón con la relajación del acero, por lo que la tensión y deformación del acero de pretensado disminuye con el tiempo, y las pérdidas por relajación del acero son menores a las estimadas con una formulación a deformación constante, por lo que es necesario aplicar un factor de corrección menor que 1.0 a la sumatoria de las pérdidas diferidas de pretensado, ya que existe una interacción entre los fenómenos de pérdida de tensión por relajación y acortamiento del cable por fluencia y retracción del hormigón. Existen numerosas formulaciones en los códigos de diseño y en la bibliografía especializada para contemplar este efecto de simultaneidad, resultando valores de corrección comprendidos entre 0.7 y 0.9 para casos convencionales de piezas de hormigón pretensado. Tal como se mencionó, el Reglamento CIRSOC 802 provee un término explícito en su formulación de relajación para evaluar el efecto de interacción con la fluencia lenta y retracción, y otro coeficiente para considerar la restricción ejercida por la armadura pasiva adherente.
- Para estructuras que presenten alta sensibilidad a los efectos de fluencia del hormigón y relajación del acero, será necesario aplicar técnicas de análisis refinadas combinadas con ensayos de los materiales que permitan definir en forma experimental las funciones de fluencia del hormigón y relajación del acero.
- Finalmente, es importante destacar que es necesario contemplar la temperatura a la que se encuentran sometidos los cables de pretensado, ya que en espesores de alma reducidos o en losas superiores expuestas al asoleamiento, estos cables pueden alcanzar temperaturas muy superiores a los 20°C, que corresponde a la temperatura de aplicación de las fórmulas de los diferentes códigos, y por ejemplo a temperaturas comprendidas entre 50 y

60°C de podrían producir pérdidas por relajación del acero mayores al 50 % de las estimadas para la temperatura de 20°C de referencia utilizadas en las formulaciones de los códigos. Una forma de minimizar el efecto de la temperatura es ubicar los cables de pretensado lejos de las caras expuestas al asoleamiento y el caso de losas utilizar carpetas de rodamiento de baja conductividad térmica o provistas de una capa de aislación térmica.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Z. P. Bažant and Q. Yu, "Relaxation of prestressing steel at varying strain and temperature: Viscoplastic constitutive relation," *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, vol. 139, p. 814–823, 2013.
- [2] D. D. Magura, M. A. Sozen and C. P. Siess, "A study of stress relaxation in prestressing reinforcement," *PCIJ*, vol. 9, p. 13–57, 1964.
- [3] E. G. Nawy, *Prestressed concrete: A fundamental approach*, 5th ed., Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2006.
- [4] F. Leonhardt, *Estructuras de Hormigón Armado - Tomo V: Hormigón Pretensado*, Buenos Aires: El Ateneo, 1980.
- [5] CIRSOC 800, "Reglamento Argentino para el Diseño de Puentes Carreteros," Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles, Buenos Aires, 2019.
- [6] AASHTO, *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications 6th Edition*, Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2012.
- [7] M. K. Tadros, N. Al-Omaishi, S. P. Seguirant and J. G. Gallt, "Prestress Losses in Pretensioned High-Strength Concrete Bridge Girders," NCHRP Report 496. Transportation Research Board, National Research Council, Washington DC, 2003.
- [8] F. S. Rostásy, K.-C. Thienel and K. Schütt, "On prediction of relaxation of colddrawn prestressing wire under constant and variable elevated temperature," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 130, p. 221–227, 1991.
- [9] fib, "fib model code for concrete structures 2010," Fédération Internationale du Béton, Berlín, 2013.
- [10] Comité Euro-Internacional du Béton, "CEB-FIP model code 1990: Design code," Thomas Telford, Londres, 1991.
- [11] Comité Européen de Normalisation, "Eurocode 2: Design of concrete structures, part 1-1 General rules and rules for buildings," BS EN 1992-1-1:2004:E, Bruselas, 2004.

