

PROBLEMA 38

TEMA: VISCOELASTICIDAD. Relajación del acero en armaduras activas según la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE)

En un Anexo al problema se reproduce el apartado 38.9 (páginas 121 y 122) de la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE), que trata de la relajación del acero pretensado empleado en el hormigón armado (armaduras activas). Se pide:

1º) Determinar el modelo analógico más simple ajustable al comportamiento del acero que se deduce de la Instrucción

2º) Hallar los parámetros del modelo para la siguiente aplicación (se emplea la notación de la Instrucción):

Tipo de armadura: Barra

Módulo elástico del acero: $200.000MPa$

Resistencia del acero: $f_{máx}=1.000MPa$

Tensión inicial de pretensado: $\sigma_{pi}=0,8 f_{máx}=800MPa$

SOLUCIÓN

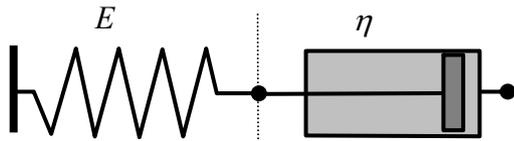
1º) Modelo analógico más simple ajustable al comportamiento del acero según la Instrucción

La Instrucción asume un comportamiento viscoelástico del acero, luego el modelo analógico del mismo ya no puede ser un resorte único, debiendo figurar algún elemento amortiguador.

En el pretensado de la armadura se practica un alargamiento en muy poco tiempo, manteniéndose a continuación la longitud constante. El efecto es, pues, equivalente a un ensayo de relajación. En el modelo analógico equivalente no podrá haber un amortiguador en paralelo, ya que éste imposibilita los alargamientos instantáneos.

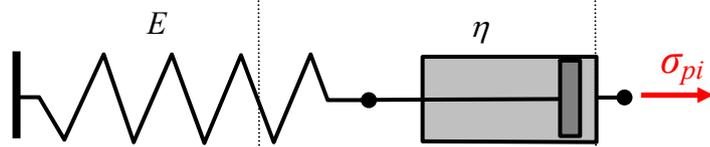
El modelo de líquido viscoso sometido a un ensayo de relajación pierde totalmente la tensión inicial para un tiempo suficientemente largo, tal como se indica en la Figura 38.1., en la que, para mayor claridad, se ha supuesto el extremo izquierdo fijo. Lo mismo ocurre con el modelo de Burgers o con cualquier otro que tenga un amortiguador en serie.

La Instrucción establece una pérdida de tensión para la vida total de la obra, o, en caso de que se desconozca, para el millón de horas (unos 114 años). Tomando este tiempo como el de equilibrio del modelo, es decir, el tiempo a partir del cual la tensión no varía, el modelo analógico más simple correspondiente será el del sólido de 3 parámetros. En la Figura 38.2 se ilustra el comportamiento del modelo según la Instrucción.



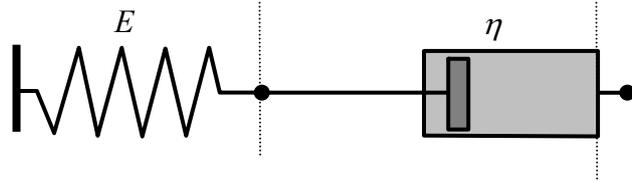
Modelo de LIQUIDO VISCOSO

Estado previo al pretensado



Estado inmediatamente después del pretensado

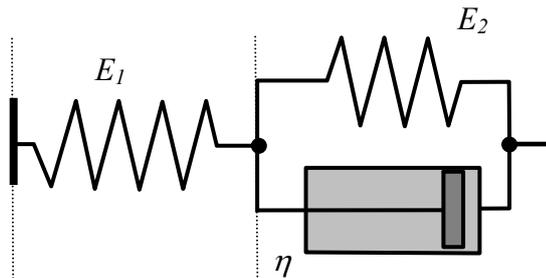
$$\sigma_E = \sigma_\eta = \sigma_{pi} \quad ; \quad \varepsilon = \varepsilon_E + \varepsilon_\eta = \frac{\sigma_{pi}}{E} + 0$$



Estado final después de un tiempo suficientemente largo

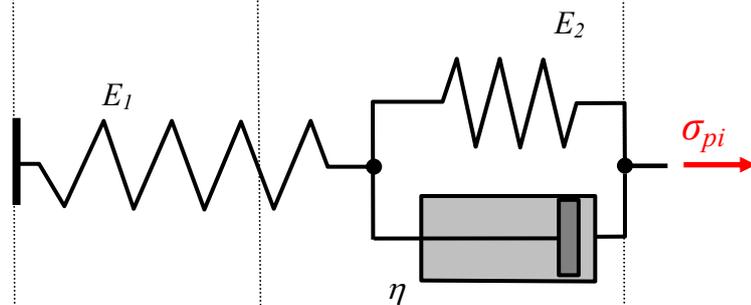
$$\sigma_E = \sigma_\eta = 0 \quad ; \quad \varepsilon = \varepsilon_E + \varepsilon_\eta = 0 + \frac{\sigma_{pi}}{E}$$

Fig. 38.1



Modelo de SOLIDO DE 3 PARAMETROS

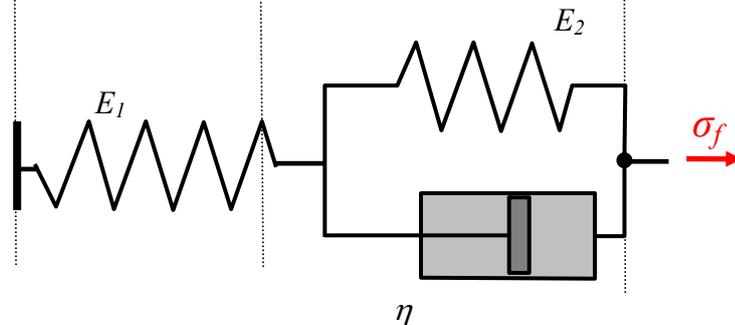
Estado previo al pretensado



Estado inmediatamente después del pretensado

$$\sigma_{E_1} = \sigma_{pi} \quad ; \quad \sigma_{E_2} = 0 \quad ; \quad \sigma_\eta = \sigma_{pi}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{E_1} + \varepsilon_{E_2} = \frac{\sigma_{pi}}{E_1} + 0$$



Estado final para un tiempo de un millón de horas

$$\sigma_{E_1} = \sigma_f \quad ; \quad \sigma_{E_2} = \sigma_f \quad ; \quad \sigma_\eta = 0$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{E_1} + \varepsilon_{E_2} = \frac{\sigma_f}{E_1} + \frac{\sigma_f}{E_2} = \sigma_f \frac{E_1 + E_2}{E_1 E_2}$$

Fig. 38.2

La deformación inicial se mantiene, por tanto, puede escribirse:

$$\frac{\sigma_{pi}}{E_1} = \sigma_f \frac{E_1 + E_2}{E_1 E_2} = k \sigma_{pi} \frac{E_1 + E_2}{E_1 E_2}$$

Obteniéndose la relación entre las rigideces de los resortes: $k = \frac{E_2}{E_1 + E_2}$

2º) Determinación de los parámetros del modelo para un caso concreto

El módulo elástico del acero es el correspondiente a tiempos cortos. Por tanto, en el modelo analógico podemos tomar: $E_1 = 200.000 MPa$

Para la aplicación numérica considerada, la Instrucción establece una pérdida de tensión inicial del 20,4% al final de la vida de la obra, luego:

$$\sigma_f = k \sigma_{pi} = (1 - 20,4/100) \sigma_{pi} = 0,796 \cdot 800 MPa = 636,8 MPa$$

De donde se obtiene el módulo del segundo resorte del modelo:

$$E_2 = \frac{k}{1-k} E_1 = \frac{0,796}{1-0,796} 200000 MPa = 780392,2 MPa$$

La función de relajación del sólido de 3 parámetros es:

$$R(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0} = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} \left(1 + \frac{E_1}{E_2} \exp\left(-\frac{E_1 + E_2}{\eta} t\right) \right)$$

Y, para la aplicación, el escalón de deformación es:

$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma_{pi}}{E_1} = \frac{800 MPa}{200000 MPa} = 0,004$$

A falta de datos del proveedor de barra de acero, la Instrucción establece las siguientes pérdidas temporales de tensión:

Para $t=1000$ horas un 7%, luego: $\sigma(1000h) = (1-7/100) \sigma_{pi} = 0,93 \sigma_{pi}$

Para $t=1$ hora un 25% del 7% = 1,75%, luego: $\sigma(1h) = (1-1,75/100) \sigma_{pi} = 0,9825 \sigma_{pi}$

Para $t=5$ horas un 45% del 7% = 3,15%, luego: $\sigma(5h) = (1-3,15/100) \sigma_{pi} = 0,9685 \sigma_{pi}$

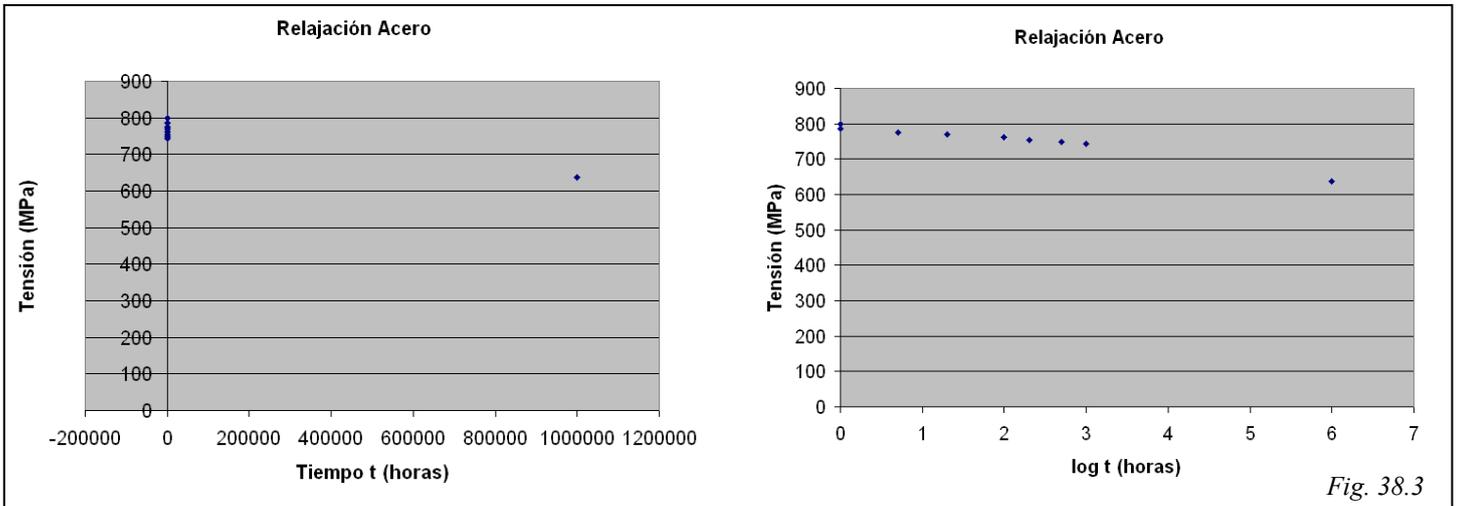
Para $t=20$ horas un 55% del 7% = 3,85%, luego: $\sigma(20h) = (1-3,85/100) \sigma_{pi} = 0,9615 \sigma_{pi}$

Para $t=100$ horas un 70% del 7% = 4,9%, luego: $\sigma(100h) = (1-4,9/100) \sigma_{pi} = 0,951 \sigma_{pi}$

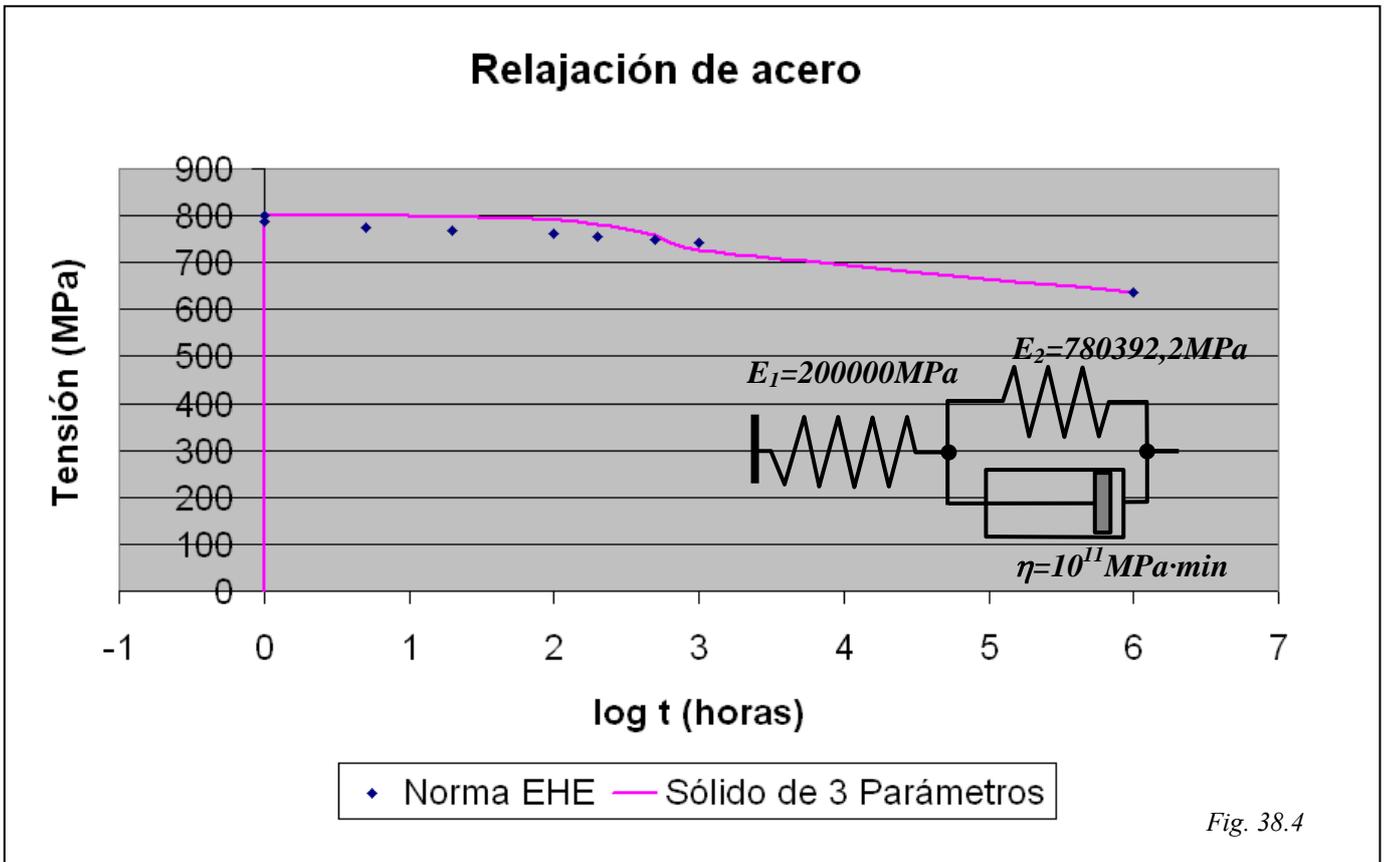
Para $t=200$ horas un 80% del 7% = 5,6%, luego: $\sigma(200h) = (1-5,6/100) \sigma_{pi} = 0,944 \sigma_{pi}$

Para $t=500$ horas un 90% del 7% = 6,3%, luego: $\sigma(500h) = (1-6,3/100) \sigma_{pi} = 0,937 \sigma_{pi}$

Llevando estos valores a una hoja de cálculo, y teniendo en cuenta que la tensión inicial de pretensado es $\sigma_{pi}=0,8 f_{m\acute{a}x}=800MPa$, se obtiene la siguiente gráfica (a la izquierda con el tiempo en escala natural y a la derecha en escala logarítmica de base 10):



Introduciendo en la hoja de cálculo la expresión de la función de relajación del Sólido de 3 Parámetros, sustituyendo los valores hallados de ε_0 , E_1 , E_2 , y procediendo por tanteo, se obtiene un valor de $\eta=10^{11}MPa \cdot min$ que, tal como se indica en la gráfica siguiente, ajusta razonablemente el comportamiento de la barra activa según la Instrucción.



38.9. Relajación del acero para armaduras activas

La relajación ρ del acero a longitud constante, para una tensión inicial $\sigma_{\mu} = \alpha f_{\text{máx}}$ estando la fracción α comprendida entre 0,5 y 0,8 y para un tiempo t , puede estimarse con la siguiente expresión:

$$\log \rho = \log \frac{\Delta \sigma_{\rho}}{\sigma_{\mu}} = K_1 + K_2 \log t$$

donde:

$\Delta \sigma_{\rho}$ Pérdida de tensión por relajación a longitud constante al cabo del tiempo t , en horas
 K_1, K_2 Coeficientes que dependen del tipo de acero y de la tensión inicial (figura 38.9)

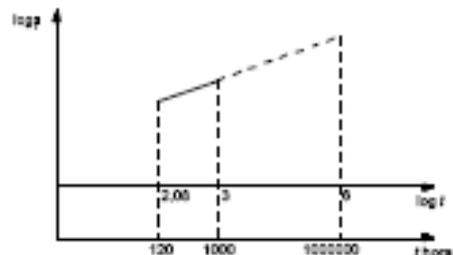


Figura 38.9

El fabricante del acero suministrará los valores de la relajación a 120 h y a 1.000 h, para tensiones iniciales de 0,6; 0,7 y 0,8 de $f_{\text{máx}}$ a temperaturas de $20^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{C}$ y garantizará el valor a 1.000 h para $\alpha = 0,7$.

Con estos valores de relajación pueden obtenerse los coeficientes K_1 y K_2 para $\alpha = 0,6$; 0,7 y 0,8.

Para obtener la relajación con otro valor de α puede interpolarse linealmente admitiendo para $\alpha = 0,5$; $\rho = 0$.

Como valor final ρ_f se tomará el que resulte para la vida estimada de la obra expresada en horas, o 1.000.000 de horas a falta de este dato.

Comentarios

A falta de datos experimentales para la evaluación de las pérdidas por relajación, con el procedimiento indicado en el Articulado, éstas pueden estimarse como se indica a continuación.

La relajación a 1.000 horas (ρ_{1000}) para tensiones iniciales iguales a 0,6, 0,7 y 0,8 de $f_{\text{máx}}$ puede obtenerse de la tabla 38.9.a. Los valores de la tabla indican el tanto por ciento de pérdida de la tensión inicial.

TABLA 38.9.a

Tipo de armadura	0,6 $f_{\text{máx}}$	0,7 $f_{\text{máx}}$	0,8 $f_{\text{máx}}$
Alambres y cordones	1,0	2,0	5,5
Barras	2,0	3,0	7,0

La variación en la relajación hasta las 1.000 horas puede estimarse a partir de los porcentajes

Indicados en la tabla 38.9.b.

TABLA 38.9.b

Tiempo en horas	1	5	20	100	200	500	1.000
Evolución en % de las pérdidas de relajación hasta 1.000 horas	25	45	55	70	80	90	100

Para estimar la relajación para tiempos superiores a 1.000 horas y hasta tiempo infinito puede utilizarse la siguiente expresión:

ρ_{100} Relajación a 100 horas

$$\rho(t) = \rho_{100} \left(\frac{t}{1.000} \right)^k$$

$$k = \log \left(\frac{\rho_{\infty}}{\rho_{100}} \right)$$

donde:

$\rho(t)$ Relajación a t horas
 ρ_{100} Relajación a 1.000 horas

La relajación final a longitud constante para distintos valores de tensión inicial puede obtenerse de la tabla 38.9.c. Los valores de la tabla indican el tanto por ciento de pérdida de la tensión inicial.

TABLA 38.9.c

Tipo de armadura	0,6 $f_{\text{máx}}$	0,7 $f_{\text{máx}}$	0,8 $f_{\text{máx}}$
Alambres y cordones	2,9	5,8	16,0
Barras	5,8	6,7	20,4

Los valores de la relajación son muy sensibles a la temperatura. Cuando se realicen procesos en los que la temperatura varíe respecto de los valores

normales (curado al vapor, etc), debe disponerse de datos experimentales a dichas temperaturas.