

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS DE PRETENSADO EN MÓDULOS DE CAÑERÍA CON ARMADURA PRETESA LONGITUDINAL Y TRANSVERSAL – ATUCHA I

Campastri, Marcelo; Ingrassia, Franco; Zabala, Marcelo.

Ingenieros Civiles.

Nucleoeléctrica Argentina S.A.

mcampastri@na-sa.com.ar; fingrassia@na-sa.com.ar; mzabala@na-sa.com.ar

RESUMEN

Se realizó un análisis exhaustivo de las pérdidas de tesado de las armaduras activas que disponen los módulos de una cañería de refrigeración de 700mm de diámetro. La particular tecnología con la que éstos fueron construidos en el año 1993 en Alemania permitió que los módulos dispongan de armaduras pretensadas adherentes tanto longitudinal como transversalmente. El cálculo de pérdidas de pretensado se realizó con la finalidad de garantizar su estanqueidad por un período de vida adicional de 30 años.

El análisis de pérdidas de pretensado se realizó acorde las normativas CIRSOC 201 y ACI 318-05.

Para el cálculo de las pérdidas de pretensado se consideraron las mismas en el orden cronológico de su ocurrencia y con los parámetros resistentes de los materiales asociados a cada pérdida en particular. Para ello se consideró la pérdida total de tesado a tiempo infinito como la suma de las pérdidas instantáneas (acortamiento elástico del hormigón) y de las pérdidas diferidas (retracción y fluencia lenta del hormigón, relajación del acero). Debido a que la relajación del acero y la retracción del hormigón ocurren en forma simultánea y se afectan mutuamente se recurrió a un cálculo iterativo para determinar con precisión la pérdida final.

ABSTRACT

An exhaustive analysis of the tightening losses of the active reinforcements of the 700mm diameter cooling pipe modules was carried out. The particular technology with which they were built in 1993 in Germany allowed the modules to have prestressed reinforcements adherent both longitudinally and transversely. The calculation of prestressing losses was carried out in order to guarantee its tightness for an additional life period of 30 years.

The analysis of prestressing losses was carried out in accordance with CIRSOC 201 and ACI 318-05 regulations.

For the calculation of the prestressing losses, the losses were considered in the chronological order of their occurrence and with the resistant parameters of the materials associated with each particular loss. To this end, the total tensioning loss at
Organiza:

infinite time was considered as the sum of the instantaneous losses (elastic shortening of the concrete) and the deferred losses (shrinkage and creep of the concrete, relaxation of the steel). Since steel relaxation and concrete shrinkage occur simultaneously and affect each other, an iterative calculation was used to accurately determine the final loss.

INTRODUCCIÓN

Emplazamiento

En cuanto al sitio de emplazamiento de la cañería en análisis, la misma se encuentra en el predio de la Central Nuclear Atucha a la margen derecha del Río Paraná de las Palmas.

En cuanto a su recorrido, la cañería analizada parte de la sala de bombas posicionada a la margen derecha del Río Paraná de las Palmas, pasa por debajo del canal de descarga de la Central Nuclear Atucha I (CNA I), recorre la barranca y llega a la pileta de efecto sifón de la CNA I donde cambia de materialidad (hormigón pretensado a acero) para continuar su recorrido dentro de la Central.

Se trata de una cañería de impulsión de agua de río. El ducto está formado por módulos mono-capa pre-tesos denominados comercialmente DYWIDAG-Sentab pipe.



Figura 1: "Trazado de la cañería".

Organiza:

DISEÑO ORIGINAL DE LOS DUCTOS

Normativa, regulaciones y códigos aplicables

El diseño geométrico del módulo de cañería pretensado y la tecnología constructiva estuvo a cargo de la empresa DYWIDAG y el cálculo de la cañería lo realizó KYWA bajo la consideración de las siguientes normativas:

- CUR 122 - Pipes in the ground design of plain and reinforced concrete pipes.
- ATV 127 - Guía para el cálculo estático de canales y tuberías de drenaje.
- American concrete pipe association – Concrete pipe design manual.
- DIN EN 642 – Prestressed concrete pipes -Tuberías de hormigón pretensado.
- DIN 4227 - Hormigón pretensado, componentes de hormigón normal con pretensado limitado o total.
- DIN – Laying concrete pipes.
- NEN 3880 – Regulaciones para el hormigón.
- NEN 2868 – Acero pretensado.
- BRL-K 717/2 – Acero pretensado para cañerías.

Elemento estructural

Se trata de elementos modulares de cañerías de hormigón pretensado de 600cm de longitud y 70cm de diámetro con armadura activa transversal y longitudinal. Los módulos son de sección constante, variando de sección en forma local únicamente en los extremos para permitir su correcto encastre mediante una unión tipo espiga-campana que permite movimientos relativos entre los módulos sin que se pierda su condición de estanqueidad. Los módulos presentan armadura activa tanto longitudinalmente como circunferencialmente y no presentan armadura pasiva.

Parámetros geométricos de la sección transversal de Hormigón:

• Diámetro interno ($\emptyset i$):	70 cm.
• Diámetro externo ($\emptyset e$):	83 cm.
• Espesor de pared (eh):	6,50 cm.
• Área sección transversal Hormigón (Aht):	1562 cm ² .
• Inercia de la secc. Long. de hormigón por metro (Ih):	2289 cm ⁴ .
• Dist de la fibra ext. al pto. de aplicación de la carga ($Y1vn$):	2,10 cm.
• Dist. de la fibra int. al pto. de aplicación de la carga ($Y2vn$):	4,40 cm.
• Mód. Resist. respecto a la fibra ext. ($W1vn$):	1090 cm ³ .
• Mód. Resist. respecto a la fibra int. ($W2vn$):	520 cm ³ .
• Excentricidad de aplicación de la carga:	1,15 cm.

Organiza:

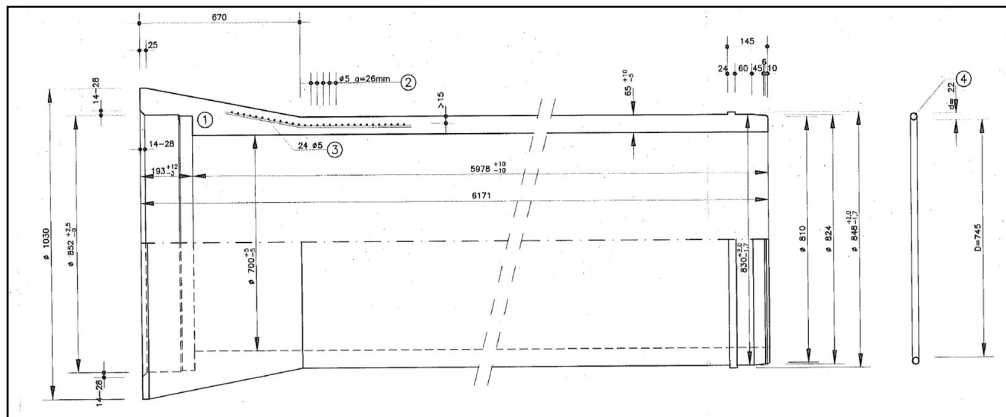


Figura 2: "Configuración geométrica del cañero pretensado".

Parámetros geométricos de la armadura pretensada longitudinal:

La armadura longitudinal se forma con 24 alambres lisos de 5mm de diámetro igualmente separados entre ellos.

- Diámetro armadura longitudinal ($\varnothing a_l$): 5mm.
- Área de un alambre de armadura longitudinal (A_a): 20 mm².
- Cantidad de elementos (n): 24 u.
- Área total de armadura longitudinal (A_{al}): 471 mm².
- Cuantía longitudinal (ζ): 0,030.

Parámetros geométricos de la armadura pretensada transversal:

El refuerzo transversal se dispone mediante un único alambre pretensado enrollado en espiral dentro del cuerpo del hormigón con una separación de 2,6cm.

- Diámetro armadura transversal ($\varnothing a_t$): 5mm.
- Área de un alambre de armadura transversal (A_a): 20 mm².
- Separación entre alambres transversales: 26 mm.
- Cantidad de elementos por metro (n): 39,46 u.
- Área de armadura transversal por metro (A_{at}): 775 mm²/m.
- Cuantía transversal por metro (ζ): 0,113.

Materiales

Acero:

Organiza:

El acero St 150/170 fue el utilizado en la armadura longitudinal y transversal, este acero se clasifica como acero de alta resistencia y baja relajación.

- Tensión de fluencia (f_{py}): 1570 Mpa.
- Tensión de rotura (f_{pu}): 1770 Mpa.
- Módulo de elasticidad: 205.000 Mpa.

Hormigón:

Para la materialización de los módulos se utilizó un hormigón de alta resistencia ($f'_c = 55$ MPa). Se determinó el módulo de elasticidad del hormigón conforme al CIRSOC 201 (2005). El reglamento establece la siguiente relación para calcular el módulo de elasticidad:

$$E_c = 4700 * \sqrt{f'_c} = 4700 * \sqrt{55} = 34856 \text{ Mpa} \quad (1)$$

La resistencia a tracción del hormigón se determinó según lo prescripto en la norma ACI-318-05:

$$f_{cr} = 0,33\sqrt{f'_c} [\text{Mpa}] = 2,45 \text{ Mpa} \quad (2)$$

El hormigón es un material elasto-visco-plástico. En la Figura 10 se representa la respuesta del comportamiento del hormigón frente a un escalón de carga.

1. **Retracción ($\epsilon_{s\infty}$).** Durante el proceso de fraguado y endurecimiento, el hormigón se contrae de volumen. Este fenómeno puede explicarse por la pérdida paulatina del agua en el hormigón. Es un proceso gradual que se extiende durante toda la vida útil y depende de varios factores tales como la dosificación, la relación agua cemento, las características de los agregados, la historia del curado, la humedad relativa del ambiente, etc. Es un proceso independiente de la carga aplicada.
2. **Deformación Elástica instantánea (ϵ_{el}):** Al aplicar un escalón de carga por un período corto el material responde casi instantáneamente con una deformación elástica.
3. **Deformación por fluencia lenta elástica (ϵ_v) y plástica (ϵ_f):** Al aplicar un escalón de carga y mantenerlo por un período de tiempo surgen deformaciones elásticas y plásticas en el material que tienden a estabilizarse con el tiempo.
4. Finalmente, al retirar el escalón de carga se producirá una recuperación instantánea de la deformación elástica (ϵ_{el}) y una recuperación visco-elástica (ϵ_v) diferida en el tiempo, quedando remanente la deformación plástica (ϵ_f).

Organiza:

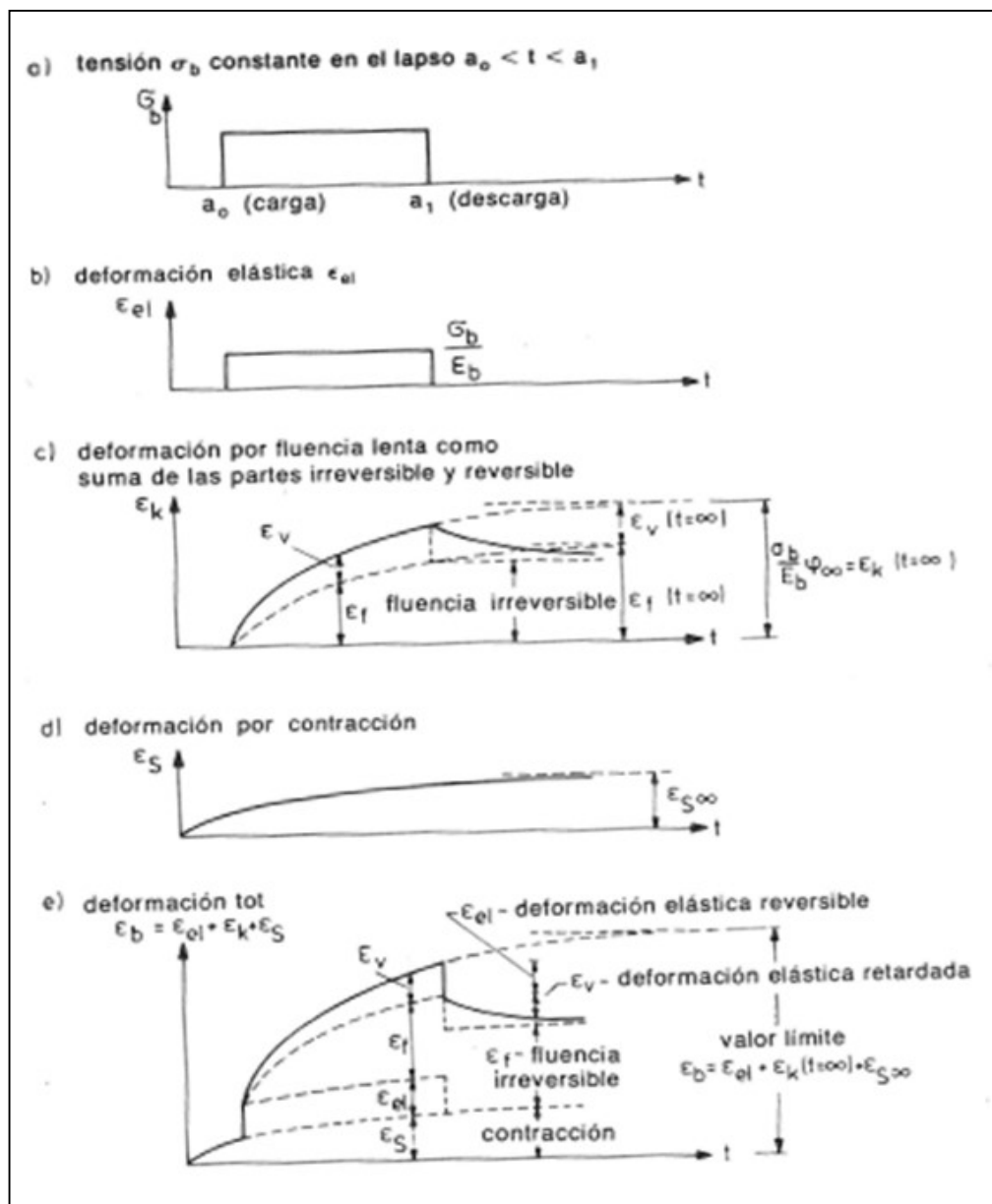


Figura 3: "Evolución temporal de las deformaciones en el hormigón y la incidencia de la aplicación de un escalón de carga en las mismas"

Proceso constructivo

El molde de los módulos Sentab está compuesto por una parte interior (el núcleo del molde) y una parte exterior (la carcasa del molde). Entre el núcleo y la carcasa se aloja la armadura de pretensado como se muestra en la figura 4.

Organiza:

La armadura circunferencial se mantiene en la posición correcta mediante el refuerzo longitudinal pretensado entre los anillos de los extremos. El vertido del hormigón se realizó con el molde en posición vertical. La carcasa del molde sirve como lecho tensor para el refuerzo longitudinal.

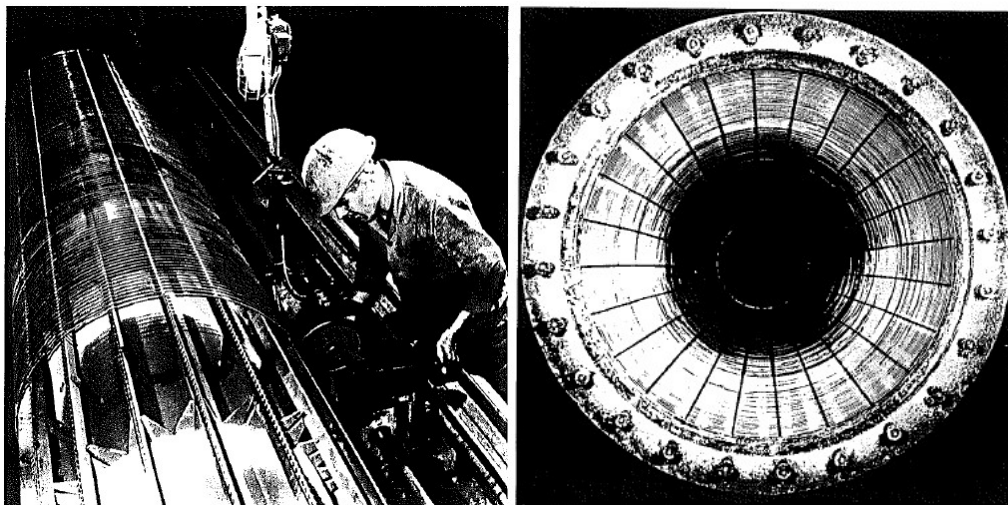


Figura 4: “Vista de los anillos extremos”.

La carcasa del molde consta de dos o más segmentos que se mantienen unidos mediante pernos de resorte que permiten el ligero movimiento radial necesario para el proceso de pretensado.

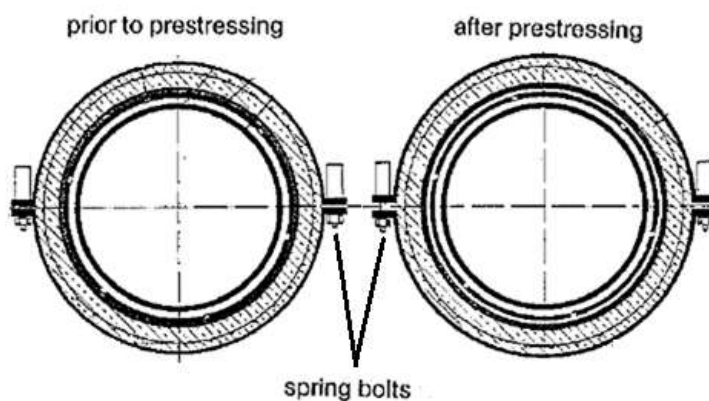


Figura 5: “Molde interior y exterior”.

Se coloca una funda de goma pesada y flexible sobre el núcleo del molde perforado para su posterior expansión al pretensar el refuerzo circunferencial. A continuación, se coloca la carcasa del molde, incluido todo el refuerzo, sobre el núcleo del molde y se fija al mismo (Figura 6).

Organiza:

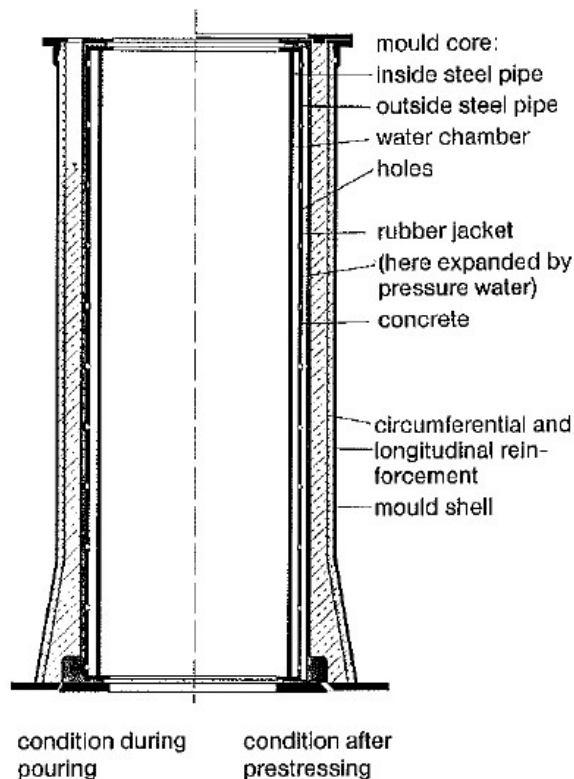


Figura 6: “Corte transversal del módulo previo al hormigonado”.

El hormigón se vierte desde arriba y se compacta mediante vibraciones. Con una adecuada curva granulométrica del hormigón, así como la forma en que el mismo se introduce y compacta, se logra una estructura compacta de hormigón en todo el espesor de la pared de la tubería.

Inmediatamente después del vertido, es decir, en el momento en que el hormigón todavía no está completamente cohesivo y el cemento aún no ha comenzado a fraguar, se tensa la armadura circunferencial. Para lograr esto se introduce agua desde una estación compresora de alta presión en la cámara de agua formada entre los dos tubos de acero del núcleo que componen el molde interior, el agua se filtra por los orificios del tubo metálico externo (del núcleo interior) ejerciendo presión expansiva sobre la funda de goma. Esta presión radialmente expansiva de la funda de goma sobre el hormigón produce un desplazamiento del mismo al que se opone la armadura circunferencial y la carcasa exterior del molde. La deformación de la armadura de acero circunferencial producto de la deformación expansiva del hormigón produce su tesado.

Organiza:

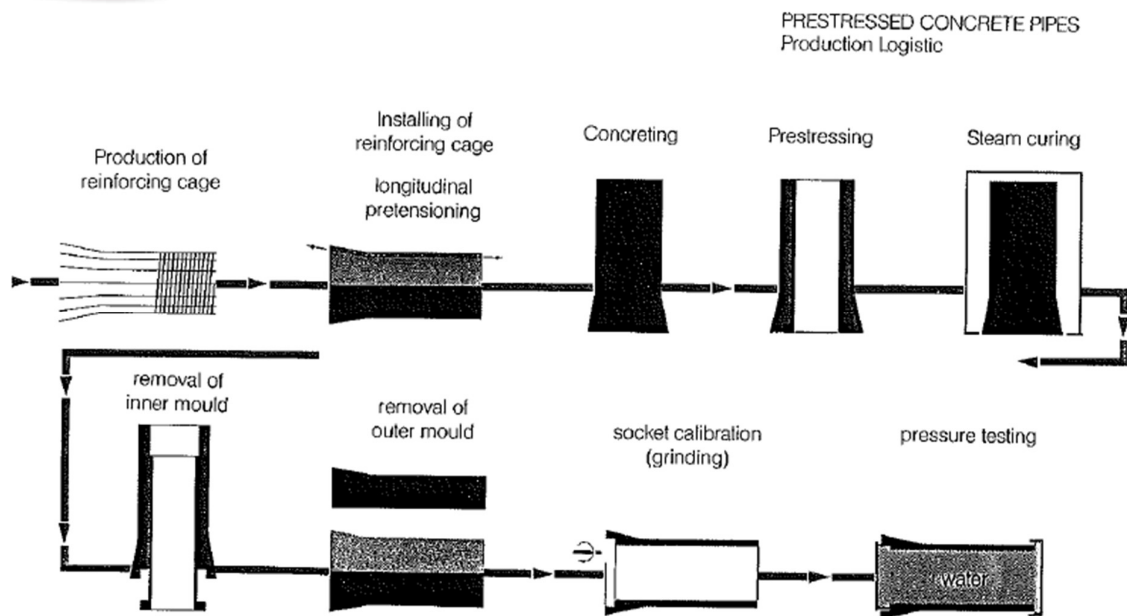


Figura 7: "Representación del proceso constructivo del tubo Sentab".

Mediante la compactación durante el vertido, los componentes del hormigón fresco, al que le quedan escasos poros, se compactan juntos. Como resultado de la compresión ejercida durante el pretensado, se produce una mayor compactación y una mayor fricción interna, así como un entrelazamiento de los componentes individuales del hormigón fresco. Esto da como resultado una formación de arco de compresión entre los alambres de pretensado como componentes que actúan en sentido contrario. La Figura 8 representa el modelo teórico del esquema para la tensión de compresión principal en el hormigón fresco durante el pretensado, así como la deformación radial Δr .

La carcasa del molde es capaz de absorber este movimiento radial gracias a los pernos elásticos que vinculan la carcasa exterior, ejerciendo una contrapresión sobre el hormigón debido a la deformación elástica de los pernos mencionados.

La presión interna del agua sobre la funda de goma se mantiene constante hasta que el hormigón alcance -a los 3 días de hormigonado- la resistencia necesaria para soportar la fuerza de pretensado.

La deformación Δr de la armadura activa sigue la ley de Hooke:

$$\Delta r = \frac{\sigma}{E} * r \quad (3)$$

- r : Deformación radial de la armadura circular.
- σ : Tensión en la armadura circular.
- E : Módulo de elasticidad de acero.

Organiza:

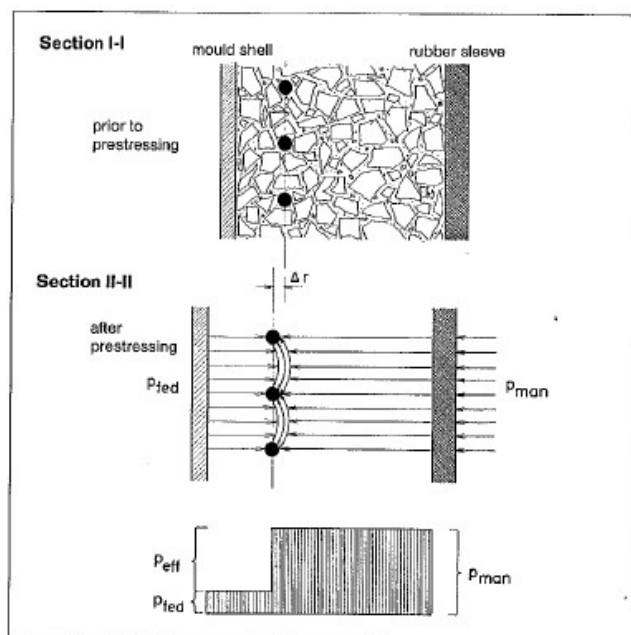


Figura 8: Representación esquemática del flujo de tensiones en el hormigón fresco durante el tesado de la armadura circunferencial.

P_{man} = Presión de agua en funda de goma.

P_{fed} = Fuerza absorbida por pernos de resorte.

P_{eff} = Pretensado de armadura circunferencial.

Luego, las barras de acero longitudinales se cortan de la carcasa del molde, pretensando el hormigón también en la dirección longitudinal de la cañería. Finalmente, se procede al desmolde del elemento.

La vibración ejercida para compactar el hormigón y la fuerte compresión del hormigón fresco durante el proceso de pretensado y endurecimiento producen la alta resistencia e impermeabilidad del módulo de la cañería de hormigón pretensado así obtenida.

RESOLUCIÓN ESTRUCTURAL

Análisis Estructural

Apoyos puntuales

Se construyeron puntos fijos en todos los lugares donde la cañería cambia su dirección y/o sección. Los mismos fueron calculados para tomar principalmente los esfuerzos introducidos por cambio de dirección y cambios de sección. Las fuerzas horizontales en éstos fueron tomadas por rozamiento.

Organiza:

Junta Elástica

La junta normal para tuberías Sentab es una junta de tipo campana y espiga con junta de goma tipo rodillo (Figura 9). El material utilizado para la junta elástica fue caucho de alta calidad, con elasticidad permanente y resistencia al envejecimiento.

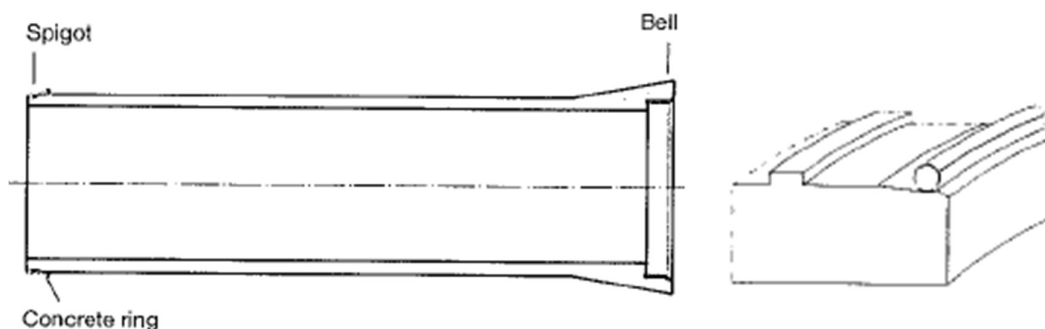


Figura 9: “Unión tipo Espiga-Campana con junta elástica tipo roll-type”.

El módulo cuenta -en su extremo macho- con un anillo de hormigón que le da contención al O-Ring de goma y cierra la cámara de aire entre elementos (Figura 10). Esta configuración de la unión permite transmitir las fuerzas de corte de un módulo al otro (evitando así la sobrecarga de la junta de goma).

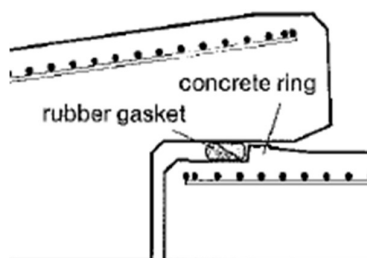


Figura 10: “Detalle de unión entre elementos”.

El efecto de sellado de la junta de goma resulta de la presión del anillo de goma deformado elásticamente. La Figura 11 muestra las tensiones actuantes y la relación tensión-deformación para dicho anillo en las juntas de tuberías Sentab. La presión de sellado lograda por la compresión elástica de los módulos sobre el O-Ring aumenta aún más por la fuerza adicional resultante de la presión interna del agua que confina el O-Ring contra el anillo de hormigón.

La unión del módulo con la junta de goma permite giros relativos entre módulos, ello significa que la misma puede realizar acomodamientos horizontales y verticales, producto de los movimientos del suelo y asentamientos diferenciales, sin sufrir daños.

Organiza:

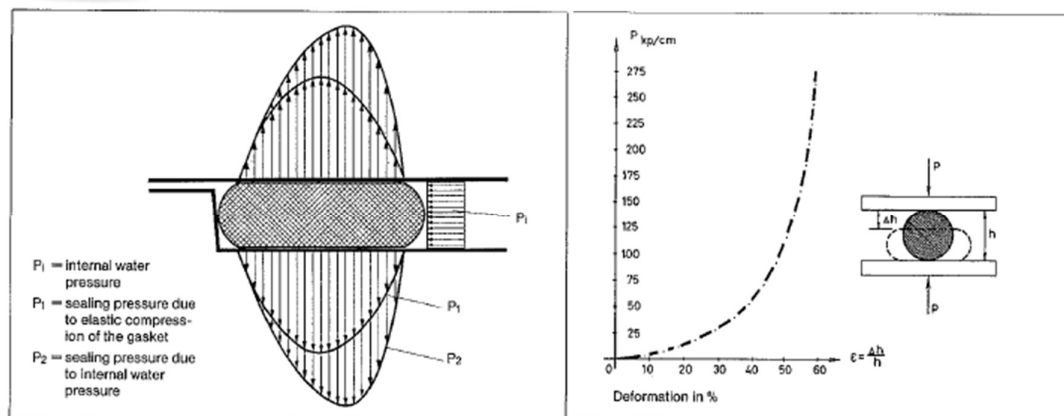


Figura 11 “Tensiones actuantes y Relación Tensión-Deformación en el O-Ring de goma”.

Por lo tanto, debido a los puntos fijos así dispuestos y a las juntas elásticas así materializadas, se puede considerar a la cañería desde el punto de vista estructural como una cadena abierta de chapas articuladas entre sí, apoyadas en forma continua sobre el suelo en toda su extensión. Además, en correspondencia con los puntos fijos, aparecerán esfuerzos puntuales que no son aplicados a la totalidad de las chapas.

Cualquiera sea la sucesión de secciones transversales de análisis de la cañería tomadas en sentido longitudinal, la misma no presenta variaciones geométricas ni de solicitaciones debido a la continuidad de las cargas externas e internas. Puede afirmarse así que la elección arbitraria de una sección transversal cualquiera será representativa para el análisis de la totalidad de la cañería.

Análisis de cargas

Cargas independientes de la acción de la armadura activa:

Los estados de carga fueron determinados de acuerdo con el reporte 122 (CUR).

- Cargas que generan tensiones en el módulo dependientes de la respuesta del lecho base:
 1. Carga debido a la tapada y al empuje del suelo.
 2. Cargas uniformemente distribuidas.
 3. Cargas de tráfico.
 4. Peso propio de la cañería (módulo).
 5. Cargas internas debido al peso del fluido.
 6. Cargas debido al transporte de cargas pesadas.
- Cargas independientes de la respuesta del lecho base:
 1. Cargas debido la presión del fluido transportado.
 2. Diferencia de temperatura a lo largo del espesor de la pared.
- Combinaciones de Carga.

Organiza:

Se resume a continuación las diferentes combinaciones de estados de carga básico considerados en el proyecto original.

Loads	A F	NB 1				NB 2				NB 3				AB 3				IV	PF
Selfweight	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Waterweight	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Soilweight max	x	x	x	x		x	x	x	x		x	x	x		x	x	x	x	x
Soilweight min					x	x				x	x	x	x						x
SLW 60 max						x	x	x	x						x	x	x		
SLW 60 min										x	x	x	x					x	x
Heavy transport max										x	x	x	x					x	x
Heavy:p transport min													x	x	x	x			
Project pressure	x	x																	
Working pressure max			x	x		x	x			x	x				x	x			
Working pressure min				x	x		x	x			x	x			x	x		x	x
Test pressure																			x
Working temp. max			x	x		x	x			x	x								
Working temp. min			x	x		x	x			x	x								
Project temp max	x									x	x								
Project temp. min		x																	
Instationary. temp min															x	x		x	
Instationary. temp max																x	x		

In cases NB 1 – NB 2 and IV, strain is not allowed
In cases NB 3 – AB 3 and PF, strain of 2.5 N/mm² is permitted.

Tabla 12: "Detalle de combinación de estados de carga básicos".

Cargas asociadas a la acción de la armadura activa:

Se consideró la posición real de la armadura principal transversal para los cálculos tensionales y una posición baricéntrica para la armadura secundaria longitudinal, generando un estado tensional uniforme en toda la sección del hormigón en ambos sentidos.

- Transversal:

La armadura transversal se tensa al 75% de la resistencia a tracción del acero.

 - Tensión de tesado inicial (f_{p0}): 1177,5 N/mm².
 - Carga de tesado por alambre: 23120 N.
 - Carga de tesado por metro: 912357 N.
 - Pre-compresión en el H° (f_{ht1}): 14,04 N/mm²
- Longitudinal:
 - Carga inicial de tesado: 458 kN.
 - Tensión inicial de tesado en alambres: 971,91 N/mm².
 - Pre-compresión en el H° (f_{hl1}): 2,94 N/mm².

Organiza:

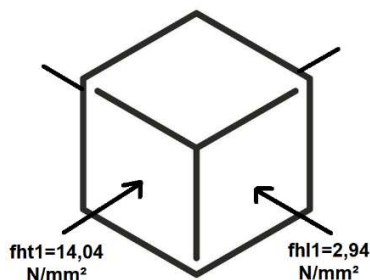


Figura13: "Tensiones en un cubo elemental de hormigón debido al pretensado de ambas armaduras".

Estado tensional producto de las cargas externas

Se resumen a continuación los estados tensionales en el sentido transversal del módulo en el hormigón debido a cargas permanentes y sobrecargas. Para ello se detallan las tensiones actuantes en la fibra interior, fibra en correspondencia con la armadura transversal y fibra exterior del módulo.

Se expresan en forma separada las tensiones originadas por cargas permanentes en la fibra en correspondencia con la armadura activa por un lado y las tensiones originadas por sobrecargas en las fibras extremas por otro, ello debido a que la tensión en el hormigón que se encuentra en correspondencia con la armadura activa debido a cargas permanentes es la que se debe utilizar para el cálculo de las pérdidas de tesado de la armadura activa y las tensiones extremas de la sección de hormigón debido a las sobrecargas y a las cargas de larga duración son las que deberán ser verificadas conforme a lo establecido en el reglamento CIRSOC 201. El cálculo se realizó para dos valores de tapada H.

	Carga Perm. [N/mm²]		Sobrecarga [N/mm²]			
	Fibra A°Act.		Fibra interna		Fibra externa	
	H=2,4m	H=6,00m	H=2,4m	H=6,00m	H=2,4m	H=6,00m
AF	-0,13	-0,32	3,36	3,41	4,24	4,18
AF II	-0,13	-0,32	3,67	3,66	3,93	3,94
NB 1	-0,13	-0,32	3,25	3,31	4,13	4,07
NB 1 II	-0,13	-0,32	3,56	3,55	3,82	3,83
NB 1 III	-0,13	-0,32	-0,95	-0,89	-0,07	-0,13
NB 1 IV	-0,13	-0,32	-0,64	-0,65	-0,38	-0,37
NB2 I	-0,13	-0,32	1,59	2,78	5,68	4,57
NB2 II	-0,13	-0,32	1,90	3,02	5,37	4,33
NB2 III	-0,13	-0,32	-2,61	-1,42	1,48	0,37
NB2 IV	-0,13	-0,32	-2,30	-1,18	-2,30	-1,18
NB3 I	-0,13	-0,32	1,39	2,17	5,82	5,12
NB3 II	-0,13	-0,32	1,71	2,41	5,51	4,88
NB3 III	-0,13	-0,32	-2,81	-2,03	1,62	0,92
NB3 IV	-0,13	-0,32	-2,49	-1,79	1,31	0,68
IV	-0,13	-0,32	-0,17	-0,17	0,23	0,23
PF	-0,13	-0,32	5,48	5,48	5,88	5,88

Tabla 14: "Estado tensional en sentido transversal al eje del módulo".

Organiza:

CALCULO DE PÉRDIDAS DE TESADO

La pérdida de pretensado en elementos de hormigón, es la disminución de la tensión de tracción en el acero con el transcurso del tiempo. Esta pérdida se produce desde el instante inicial de la aplicación de la carga de pretensado en el hormigón hasta tiempo infinito. Las pérdidas de tesado a tiempo infinito responden a diferentes mecanismos físicos y se producen en diferentes momentos de la vida útil del elemento estructural. Es muy importante determinar la magnitud de esta pérdida de tesado con suficiente precisión para conocer la fuerza que efectivamente ejercerá el refuerzo al final de la vida útil del elemento.

Pérdidas Instantáneas

Pérdida de tesado debido al acortamiento elástico del hormigón.

Tal y como se desarrolló en el apartado de caracterización del hormigón, al aplicar un escalón de carga, se produce una deformación elástica de éste. Al transferir la carga de pre-tesado mediante el corte de los extremos de la armadura longitudinal activa en correspondencia con los anillos tensores extremos y al liberar la presión expansiva interna ejercida por la funda de goma, se produce un fenómeno de transferencia de esfuerzos desde los mecanismos de tesado al hormigón, producto de dicha transferencia el hormigón sufre una deformación elástica. Debido a la compatibilidad de las deformaciones entre el hormigón y la armadura activa, el acortamiento elástico del hormigón será el mismo que el de la armadura activa, la cual producto de su acortamiento sufrirá una pérdida de su estado tensional.

- Transversal:

La tensión en el refuerzo transversal y en la sección transversal del hormigón luego de la pérdida por acortamiento elástico del hormigón será:

$$f_{pt2} = 1095 \frac{N}{mm^2} ; f_{ht2} = 13,05 \frac{N}{mm^2} \quad (4)$$

- Longitudinal

La tensión en el refuerzo transversal y en la sección transversal del hormigón luego de la pérdida por acortamiento elástico del hormigón será:

$$f_{pt2} = 955 \frac{N}{mm^2} ; f_{ht2} = 2,88 \frac{N}{mm^2} \quad (5)$$

Pérdidas Diferidas

Esta tipología de pérdida ocurre diferida en el tiempo luego de que ocurrieron las pérdidas instantáneas y tiende a estabilizarse en un valor a tiempo infinito.

Organiza:

Pérdida diferida por relajación del acero:

La relajación es la pérdida de tensión en las barras de pretensado en el tiempo, manteniendo constante la longitud y la temperatura. Es un proceso de adaptación del material que se estabiliza con el tiempo. A mayor tensión inicial, mayor es la pérdida por relajación, siendo despreciable para tensiones iniciales menores al 50% de la tensión de rotura.

En la práctica se trabaja con materiales normalizados, en nuestro caso tomamos los valores de relajación del acero de pretensado de la norma CEB-FIP 78 que se muestran a continuación.

σ_{po}/f_{ptk}	0,6	0,7	0,8	
Grupo 1	6	12	25	%
Grupo 2 Aceros Estabiliz.	3	6	10	%

VALORES MEDIOS PARA ACERO AISLADO
A TIEMPO INFINITO ($t > 1000$ hs) y 20° C

Tabla 15: "Valores de relajación en armaduras de pretensado según norma CEB-FIP 78".

De la memoria de cálculo del diseño original emerge que se trata de aceros de baja relajación (Grupo 2)

- Tensión de rotura (f_{pu}): 1770 MN/m².
- Tensión en armadura activa transversal (f_{pt2}): 1095 MN/m².
- Tensión en armadura activa longitudinal (f_{pl2}): 955 MN/m².

El grado de relajación de cada una de las armaduras activas estará dado en función de la proximidad del estado de tensión en la misma y la tensión de rotura:

- Relación entre estados tensionales transversales: 0,619
- Relación entre estados tensionales longitudinales: 0,539

Producto de la interpolación lineal de las relaciones tensionales calculadas y los parámetros de relajación dados por la bibliografía obtenemos:

- Parámetro de relajación transversal total (r_t): 0,036
- Parámetro de relajación longitudinal total (r_l): 0,012

La relajación aparente la estimamos como una parte de la relajación total:

$$\Delta f_{p3} = 5 / 6 \Delta f_{0p3} \quad (6)$$

Luego las pérdidas tensionales por relajación serán:

- Pérdida tensional por relajación aparente transversal (Δf_{pt3}): 32,47 MN/m²
- Pérdida tensional por relajación aparente longitudinal (Δf_{pl3}): 9,39 MN/m²

Organiza:

La retracción o contracción del hormigón:

Se produce por la evaporación del agua libre, es decir la que no se utiliza en el proceso químico de hidratación del cemento. Es un proceso gradual que se extiende durante toda la vida útil y depende de varios factores tales como la dosificación, la relación agua cemento, las características de los agregados, la historia del curado, la humedad relativa del ambiente, etc.

La pérdida de tensión en el acero de pretensado debido a la retracción del hormigón es:

$$\Delta f(t)_{p5} = E_a \varepsilon(t = \infty) r \quad (7)$$

Donde $\varepsilon(t=\infty)$ es la deformación final del hormigón por contracción a **tiempo infinito**. Los módulos Sentab trabajan como cañería de impulsión de agua de río por períodos intermitentes, por lo que se la puede clasificar en relación con su ubicación, como correspondiente a un ambiente húmedo, además, la relación entre el área y el perímetro es reducida por lo que resultará aplicable la curva 1 de la Tabla 16.

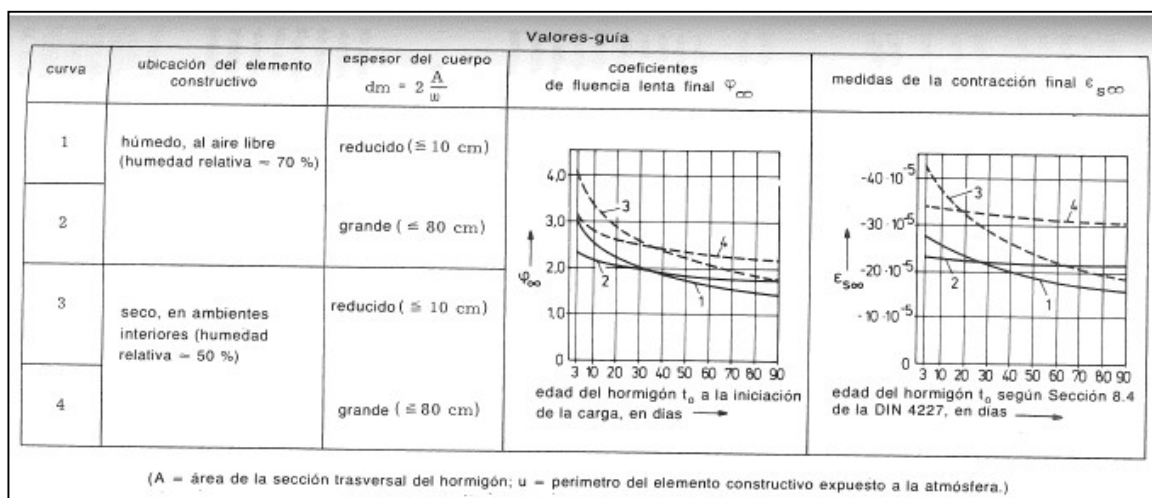


Tabla 16: "Parámetros de fluencia lenta y contracción (Fritz Leonhardt / CIRSOC 201 - 1985)".

La transferencia de la carga de tesado al hormigón se realiza a los 3 días y la evaluación de estado a tiempo infinito, por lo que resulta:

$$\varepsilon_r = 0,0003 ; \phi_{\infty} = 3. \quad (8)$$

Pérdida de tensión en el hormigón por fluencia lenta (creep):

Tal como se caracterizó en el apartado Materiales, la fluencia lenta del hormigón depende del tiempo de duración e intensidad de la carga, humedad relativa, tipo de agregado, etc. Se puede expresar como:

Organiza:

$$\Delta f(t)_{p4} = n \phi^{\infty} (fp2) \quad (9)$$

Donde:

- La relación de módulos es $n = \frac{E_a}{E_c} = 5,88$.
- ϕ^{∞} es el coeficiente de fluencia lenta final a **tiempo infinito**.
- (fp2) es el estado tensional del hormigón luego de ocurridas las pérdidas instantáneas.

Teniendo presente que las pérdidas por contracción y fluencia lenta en el hormigón ocurren en forma simultánea, corresponde calcularlas en forma conjunta:

$$\Delta fp5 = E_p \varepsilon_r - n \phi (fp2) \quad (10)$$

La pérdida de pretensado por retracción es independiente de la carga, pero es un fenómeno que produce cambios volumétricos en el hormigón y por lo tanto variaciones tensionales en las armaduras activas. Estas variaciones tensionales afectan las pérdidas originadas por la fluencia lenta del hormigón y las pérdidas originadas por el relajamiento del acero, ambas dependientes de la carga aplicada. Finalmente, para conocer el valor de esta pérdida, se debe realizar un proceso iterativo, ya que se necesita conocer la tensión del hormigón, la cual depende de la tensión en la armadura activa, que a su vez depende de esta pérdida.

Para el cálculo de pérdidas diferidas se debe considerar el estado tensional debido a cargas permanentes del hormigón en la fibra en correspondencia con la armadura activa. En este caso el trazado de la armadura dista en 2,1 cm de la fibra externa.

- Transversal

Los resultados de la iteración final resultan exhibidos en la Tabla 17:

N°	CAUSA	M [MNm]	N [MN]	Fibra Interior		Fibra Exterior	
				Parcial	Acumul.	Parcial	Acumul.
1	Pretensado f_{p2}	-0,010	-0,848	-13,05		-13,05	
				18,76	5,71	-8,95	-22,00
2	Carga Permanente	0,005	-0,021	-0,32		-0,32	
				-9,73	-4,34	4,64	-17,68
3	Pérdidas Diferidas	0,002	0,180	2,77		2,77	
				-3,98	-5,55	1,90	-13,02

Tabla 17: "Tensión transversal en correspondencia con la armadura activa (N/mm²)"

La pérdida de estado tensional en la armadura activa diferida en el tiempo es:

$$\Delta f(t)_{p4} + \Delta f(t)_{p5} = 232,05 \text{ N/mm}^2 \quad (11)$$

Organiza:

- Longitudinal

Los resultados de la iteración final resultan exhibidos en la Tabla 18:

N°	CAUSA	Eje Neutro.	
		Parcial	Acumul.
1	Pretensado f_{p2}	-2,88	-2,88
2	Carga Permanente	0,00	-2,88
3	Pérdidas Diferidas	0,14	-2,74

Tabla 18: "Tensión longitudinal en correspondencia con la armadura activa (N/mm^2)"

La pérdida de estado tensional diferida en el tiempo en la armadura activa es:

$$\Delta f(t)_{p4} + \Delta f(t)_{p5} = 68,11 \text{ MN/mm}^2 \quad (12)$$

Estado tensional final del Hormigón

El Reglamento CIRSOC 201 establece que todos los elementos pretensados que presenten tracción debido a las cargas actuantes en la fibra pre-comprimida (f_t), inferior al valor correspondiente a la relación de la fórmula 13, pueden clasificarse como pretensado total (Clase U):

$$f_t < 0,7\sqrt{f'_c} = 5,19 \text{ MPa} \Rightarrow \text{Pretensado Clase U.} \quad (13)$$

- Transversal:

Se expresa a continuación los estados tensionales transversales más desfavorables para diferentes combinaciones de estados de carga básicos, a fin de ser verificados bajo la normativa CIRSOC 201.

N°	CAUSA	M [MNm]	N [MN]	Fibra Interior		Fibra Exterior	
				Parcial	Acumul.	Parcial	Acumul.
1	Pretensado f_{p2}	-0,010	-0,848	-13,05		-13,05	
				18,76	5,71	-8,95	-22,00
2	Carga Permanente	0,005	-0,021	-0,32		-0,32	
				-9,73	-4,34	4,64	-17,68
3	Pérdidas Diferidas	0,002	0,180	2,77		2,77	
				-3,98	-5,55	1,90	-13,02
4-A	Sobrecarga (NB3 III-Min)	0,002	-0,038	-0,59		-0,59	
				-3,00	-9,14	1,43	-12,17
4-B	Sobrecarga (PF-Max)	0,000	0,369	5,68		5,68	
				-0,27	-0,14	0,13	-7,21

Tabla 19: Tensión transversal en correspondencia con las fibras extremas del hormigón para combinaciones de carga límites (N/mm^2)"

Organiza:

- Longitudinal:

Debido a que el tipo de unión espiga-campana permite la libre dilatación térmica entre los módulos y que las cargas por cambios de dirección o sección son tomadas por los apoyos puntuales es que, la única carga actuante en sentido longitudinal será la de pretensado.

Restricciones reglamentarias

Los elementos pretensados deben cumplir con los siguientes requisitos de resistencia establecidos en el reglamento CIRSOC 201:

- Límite de tensión en la fibra comprimida extrema debido al pretensado más la carga de larga duración:

$$\sigma_{max} = 0,45 \cdot f'c = -27,75 \text{ Mpa} > -13,02 \text{ Mpa.} \rightarrow \checkmark \quad (14)$$

- Límite de tensión en la fibra comprimida extrema superior debida al pretensado más la carga total:

$$\sigma_{max} = 0,6 \cdot f'c = -33 \text{ Mpa} > -12,17 \text{ Mpa} \rightarrow \checkmark \quad (15)$$

- Límite de tensión en la fibra traccionada extrema:

$$\sigma_{max} = 0,7 \cdot \sqrt{f'ci} = 5,19 > -0,14 \text{ Mpa (No hay tracción en el módulo)} \rightarrow \checkmark \quad (16)$$

El módulo presenta un pretensado total (clase U) según la reglamentación vigente en la República Argentina al encontrarse la sección de hormigón plenamente comprimida tanto en sentido longitudinal como transversal.

CONCLUSIÓN

Se concluye producto del análisis teórico efectuado que la cañería trabajará en Estado I, es decir sin fisuración en el hormigón, a lo largo del período de vida analizado. Esto resulta óptimo a los efectos de impedir el acceso de agentes degradantes a la armadura activa atendiendo que se trata de un ducto de impulsión de agua de río.

Sin perjuicio de lo antes expresado, restará entonces respaldar los resultados teóricos obtenidos mediante inspecciones visuales de los elementos estructurales, observando tanto que no existan fisuras en el hormigón, como que no haya pérdida de sección de armadura activa (mediante ensayos de tomografía del hormigón) y que tampoco se encuentren activos otros mecanismos de degradación del hormigón (como ser la carbonatación en el hormigón), todo ello para afirmar que el elemento analizado será estructuralmente apto para atender al período de vida adicional analizado.

Organiza: