

# Hormigón liviano de alto desempeño - una comparación entre pérdidas de pretensado reales y estimadas por los códigos de diseño

## High performance lightweight concrete - a comparison between actual prestress losses and design code estimates

Mauricio López\* y Lawrence F. Kahn\*\*

\* Pontificia Universidad Católica de Chile, CHILE

\*\* Georgia Institute of Technology, EE.UU.  
mlopez@ing.puc.cl

Fecha de recepción: 20/ 08/ 2006  
Fecha de aceptación: 20/ 12/ 2006  
PAG. 59 - 69

### Resumen

Dos mezclas de hormigón liviano de alto desempeño (HLAD) con resistencias a compresión de 55 MPa y 69 MPa fueron desarrolladas. El peso unitario de los hormigones fue 1855 y 1890 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente. Creep, retracción y pérdidas de pretensado fueron investigadas en 36 probetas cilíndricas y en cuatro vigas pretensadas AASHTO tipo II. Las pérdidas de pretensado medidas en las vigas AASHTO tipo II fabricadas con HLAD fueron menores que las estimadas con los métodos descritos en los códigos AASHTO, PCI y ACI-209, lo que significa que los códigos de diseño dan estimaciones conservadoras de las pérdidas de pretensado en este nuevo hormigón. Basados en los datos experimentales, las pérdidas finales de pretensado fueron estimadas como un 14.3 y 9.6 % de la carga inicial aplicada para las vigas hechas con HLAD de 55 y 69 MPa, respectivamente.

**Palabras Clave:** Pérdidas de pretensado, creep, retracción, hormigón liviano, hormigón de alto desempeño, hormigón de alta resistencia, hormigón pretensado, estimación de códigos

### Abstract

Two different high performance lightweight concretes (HPLC) with strengths of 55 and 69 MPa were developed. They had an air-dry unit weight of 1855 and 1890 kg/m<sup>3</sup>, respectively. Creep, shrinkage and prestress losses were investigated on 36 cylinder specimens and on four AASHTO Type II girders. Prestress losses measured on the AASHTO Type II girders made with HPLC were less than those predicted using AASHTO, PCI and ACI-209 methods which means that the design codes give conservative estimates of the actual prestress losses of this new concrete. Based on experimental data, final, total prestress losses were estimated to be 14.3 and 9.6 % of the initial prestressing force for the 55-MPa and 69-MPa HPLC, respectively.

**Keywords:** Prestress losses, creep, shrinkage, lightweight concrete, high-performance concrete, high-strength concrete, prestressed concrete, code estimates

## 1. Introducción

El propósito de esta investigación fue la determinación del comportamiento a largo plazo de hormigón liviano de alto desempeño fabricado con pizarra expandida y como dicho comportamiento a largo plazo afecta las pérdidas de pretensado en vigas de puentes.

El hormigón liviano de alto desempeño (HLAD) puede ser conceptualizado como una mezcla entre hormigón de alto desempeño (HAD) y hormigón liviano estructural (HLE). De acuerdo con Meyer y Kahn (2002), el uso de HLAD con resistencias entre 55 y 69 MPa haría más fácil y económico el transporte de vigas pretensadas de grandes luces. El menor valor de peso propio del hormigón permitiría la fabricación de vigas de hasta 47 m de largo sin sobrepasar un peso de 48 toneladas. Dicho peso es alcanzado con vigas de peso normal de

sólo 38 m. de largo. Sin embargo, para poder implementar y usar HLAD de manera segura, el comportamiento a largo plazo del hormigón, incluyendo creep y retracción en adición a las pérdidas de pretensado deben ser entendidos a cabalidad.

## 2. Revisión bibliográfica

### 2.1 Deformaciones a largo plazo en HLAD

Típicamente creep y la retracción son menores en HAD que en hormigón de resistencia y peso normal (de Larrard et al., 1994), pero son en general mayores en HLE (Pfeifer, 1968). Estos efectos contrarios hacen que las deformaciones a largo plazo en HLAD sean difíciles

de predecir. Por ejemplo, Berra y Ferrada (1990) concluyeron que el creep de HLAD es el doble que el de hormigón de peso normal de resistencia similar. Por otro lado, Rogers (1957), observó que el creep de tres diferentes HLE fue menor que el medido en hormigón de peso normal con similares propiedades mecánicas. Si bien los hormigones de Roges no pueden ser clasificados como HLAD, la resistencia a compresión a 7 días fue de 34.5 MPa, la cual es mayor que el rango de resistencias de 21 a 28 MPa usado en hormigones estructurales de aquella época.

Investigadores han llegado a conclusiones más precisas cuando se trata de la retracción de HLAD. Berra y Ferrada (1990) compararon la retracción de HAD y HLAD y concluyeron que HLAD presenta una menor tasa de retracción, pero un valor último más alto que el de HAD.

Ellos atribuyeron la menor tasa de retracción a la presencia de agua en el agregado liviano, lo cual retarda el desarrollo de la retracción por secado. Holm y Bremner (1994) también observaron que la retracción de HLAD se desarrollaba más lentamente a edades tempranas, pero que la retracción a un año es 14 % más alta en HLAD que en HAD. Rogers (1957) concluyó que después de un año la retracción de las mezclas con agregado liviano fue entre 9 y 15 % mayores que las de las mezclas de peso normal de resistencia similar.

## 2.2 Pérdidas de Pretensado en HLAD

Como consecuencia de las deformaciones elástica y a largo plazo en el hormigón, la carga de pretensado en los elementos de hormigón pretensado se reduce en el tiempo (Zia et al., 1979). El comité en pérdidas de pretensado del Instituto de Hormigón Prefabricado y Pretensado (PCI), ha identificado las principales causas de pérdidas como: Pérdidas por fricción en operaciones de post-tensionado; asentamiento de los anclajes; acortamiento elástico al momento de transferencia de la carga de pretensado; restricción de movimiento debido a otros elementos conectados con el elemento bajo pretensado, pérdidas dependientes del tiempo como la relajación de los cables de acero, creep y retracción del hormigón. La contribución relativa de cada uno de los factores a las pérdidas totales depende de el diseño estructural, las propiedades de los materiales (hormigón y acero), los métodos de pretensado, la edad del hormigón al momento de la aplicación de la carga, y del método de calculo de las pérdidas (PCI, 1998).

Como referencia, Podolny (1969) dio valores de pérdidas de pretensado, debidas a creep y retracción en hormigones de peso y resistencia normales. Para hormigones pretensados a un 60 % de su resistencia a la compresión, dichos valores se encontraron entre 15.5 y 17.5 % de la

carga inicial aplicada. Roller et al. (1993) y Roller et al. (1995), midieron las pérdidas de pretensado en vigas pretensadas hechas con HAD. Después de 18 meses de mediciones ellos concluyeron que las pérdidas de pretensado debidas a creep y retracción fueron de sólo 2.5 %. Si esas pérdidas se proyectan a 40 años (tomado como condición final), las pérdidas debidas a creep y retracción serian de 7.4 % del la tensión inicial. Roller et al. (1993) y Roller et al. (1995), reportaron pérdidas de pretensado debido a acortamiento elástico de 8.9 % cuando los cables de acero son tensionados a 75 % de sus resistencia última.

Hansen (1964), en su investigación de pérdidas de pretensado en concretos de peso normal y livianos, concluyó que HLE de alta calidad puede ser usado en elementos pretensados ya que las pérdidas no son mayores a las que se obtendrían en un hormigón de peso normal de resistencia similar. Hansen (1964), midió pérdidas de pretensado causadas por creep y retracción del hormigón y concluyó que éstas fueron del 24 y 22 % de la tensión inicial para los hormigones livianos y de peso normal, respectivamente.

El comité de pérdidas de pretensado de PCI (1975) concluyó que la determinación de las pérdidas de retracción es un problema extremadamente complejo, ya que el efecto de un factor determinado es continuamente influenciado por la disminución en la tensión debido a otros factores. Por lo tanto, las pérdidas causadas por cada factor no ocurren independientemente sino que están constantemente afectadas por las pérdidas producidas por otros factores. Podolny (1969) sostuvo que en la estructura real varias de las pérdidas están ocurriendo simultáneamente y se afectan mutuamente de una manera interdependiente. Tadros et al. (1975) concluyeron que en elementos reales se produce una pronunciada reducción en las pérdidas debido a la continua reducción en la tensión en el hormigón. Esta conclusión sugeriría que los resultados de creep medidos en probetas en el laboratorio sobreestiman las pérdidas de pretensado debidas a creep en la estructura. Esta conclusión es claramente vista en los resultados de Shing et al. (2000) los cuales obtuvieron pérdidas totales en vigas pretensadas de 21.3 % de la tensión inicial mientras que las pérdidas estimadas usando sólo los valores de creep medidas en probetas fueron 33.8 %.

Hansen (1964), quien estudio el efecto de las temperaturas de curado en las pérdidas de pretensado, concluyó que un curado acelerado puede reducir las pérdidas de pretensado entre 24 y 19 % para elementos hechos con HLE y en 15 % para hormigones de peso normal. Por otro lado, Huang (1982) investigó la potencial pérdida de pretensado debida a expansiones térmicas

diferenciales entre hormigón y acero durante el curado acelerado. Los resultados de Huang (1982) en elementos pretensados indicaron que virtualmente se recupera el total de la tensión una vez que el elemento retorna a temperatura ambiente.

### 3. Programa experimental y propiedades a corto plazo

#### 3.1 Programa experimental

Esta investigación en pérdidas de pretensado y estudio del comportamiento a largo plazo en HLAD fue parte de un estudio general para el desarrollo de mezclas de HLAD con resistencia a compresión a los 56 días entre 55 y 69 MPa y densidad menor que 1920 kg/m<sup>3</sup>. Después de haber desarrollado las mezclas que cumplían estas especificaciones, el siguiente objetivo de la investigación fue el estudio de la resistencia a la flexión y al corte en conjunto con la longitud de transferencia y de desarrollo en vigas pretensadas para puentes hechas con HLAD. El desempeño de las mezclas desarrolladas en el laboratorio fue verificado en terreno con la fabricación de seis vigas pretensadas AASHTO tipo II en una planta local de

elementos prefabricados. Más información de las mezclas puede ser encontrada en Meyer et al. (2003) y López et al. (2005). Las dosificaciones usadas para las mezclas HLAD de 55 y 69 MPa son presentadas en la Tabla 1. La Tabla 1 además presenta alguna de las propiedades del hormigón fresco y sus propiedades mecánicas.

Tres vigas pretensadas AASHTO tipo II fueron fabricadas con cada una de las mezclas HLAD, dos de ellas con una luz de 11.9 m y la tercera con una luz de 13.1 m (Meyer et al., 2002). Cada viga fue reforzada con diez cables de 15 mm de diámetro y una resistencia última de 1860 MPa. Cada cable estaba a su vez compuesto de 7 alambres de baja relajación. Ocho cables fueron situados en el ala inferior y los restantes en el ala superior de las vigas. La tensión en el centro de gravedad de los cables fue alrededor de 18 % de la resistencia inicial ( $f_{c,24h}$ ). Esta tensión es menor que la tensión usualmente aplicada en vigas pretensadas con mayor cantidad de cables cables. Los cables fueron tensados hasta un 75 % de su resistencia ultima (1400 MPa). Los estribos usados fueron de 13 mm de diámetro y con una resistencia a la fluencia de 428 MPa. Se utilizaron cinco amasadas para fabricar las dos vigas de 11.9 m de largo y tres para la viga de 13.1 m de largo.

Tabla 1. Dosificaciones y propiedades de las mezclas HLAD de 55 y 69 MPa

Material	HLAD de 55 MPa	HLAD de 69 MPa
Cemento portland, ASTM tipo III, kg/m <sup>3</sup>	465	439
Ceniza volante ASTM tipo F, kg/m <sup>3</sup>	84	89
Microsilica, kg/m <sup>3</sup>	11	59
Arena silicea de peso normal, kg/m <sup>3</sup>	606	611
Pizarra expandida (12.5 mm tamaño máximo), kg/m <sup>3</sup>	562	567
Agua, kg/m <sup>3</sup>	159	135
Incorporador de Aire, l/m <sup>3</sup>	0.4	0.4
Plastificante, l/m <sup>3</sup>	2.2	2.2
Plastificante de alto rango, l/m <sup>3</sup>	2.2	5.1
Razón agua-materiales cementicios	0.28	0.23
Asentamiento de cono, mm	165±38	127±19
$f_{c,24h}$ a 24 horas curado acelerado, MPa	51.5	58.2
$f_{c,56d}$ a 56 días curado ASTM, MPa	64.2	73.0
Módulo de Elasticidad a 56 días, GPa	27.0	28.1
Módulo de Ruptura a 56 días, MPa	7.0	6.5
Permeabilidad a 56 días (coulombs) / clasificación ASTM C 1202	725 /muy baja	210 /muy baja
Densidad fresca, kg/m <sup>3</sup>	1875	1905
Densidad seca al aire, kg/m <sup>3</sup>	1855	1890



Después de colocado el hormigón, la superficie fue platachada y texturizada para mejorar la adherencia de la losa que sería colocada posteriormente. Las vigas fueron posteriormente cubiertas con mantas para conservar la humedad y prevenir pérdidas térmicas. No se aplicó ningún tipo de curado acelerado posterior a la colocación, el aumento en la temperatura registrado en las vigas fue debido al calor de hidratación de los materiales cementicios utilizados. Dos meses más tarde se colocó sobre las vigas una losa de hormigón de peso normal y una resistencia a compresión de 37 MPa a los 28 días.

Insertos para un sistema externo de medición de deformaciones (DEMEC) y un deformómetro de cuerda vibrante fueron embebidos en las vigas (Meyer et al., 2002). Los dos sistemas fueron utilizados para medir deformaciones en las vigas. El deformómetro de cuerda vibrante fue colocado al nivel del centro de gravedad de los cables para medir el efecto del pretensado en las deformaciones del hormigón. La Figura 1 muestra detalles de la instrumentación y de las vigas utilizadas en la investigación.

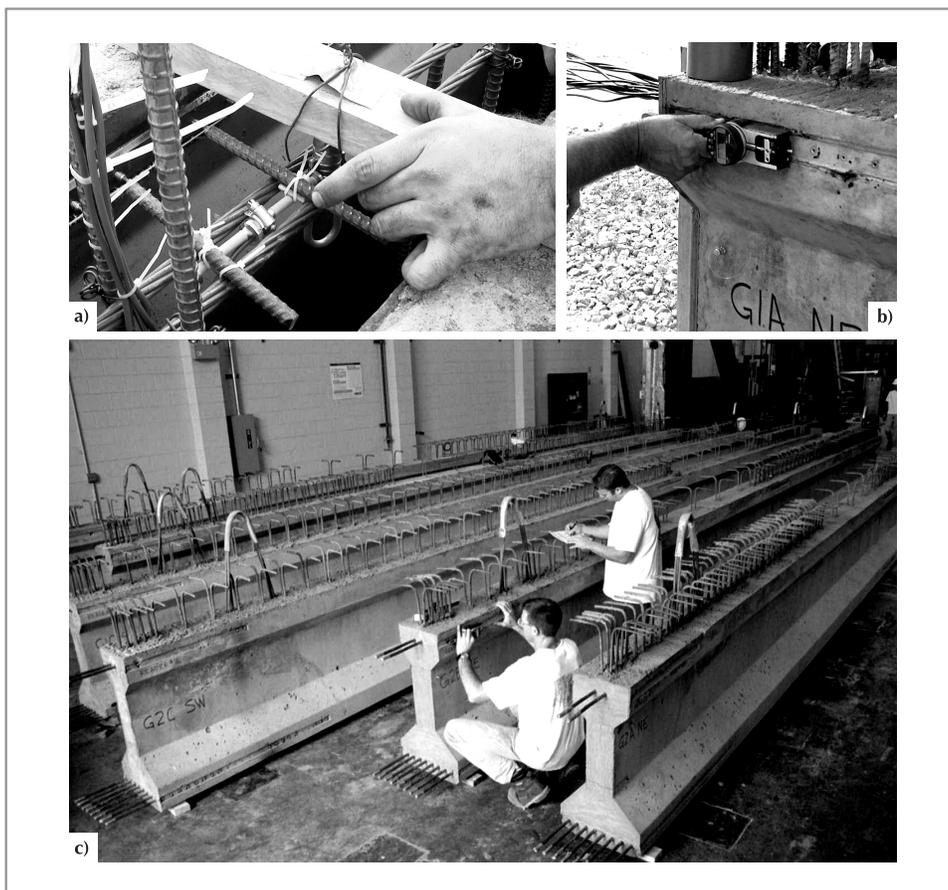


Figura 1. (a) Deformómetro de cuerda vibrante embebido en las vigas pretensadas; (b) deformómetro DEMEC e insertos; (c) medición de deformaciones en vigas pretensadas

Los siguientes ensayos fueron realizados: (a) resistencia a la compresión de cilindros de hormigón de acuerdo a ASTM C39; (b) Modulo de elasticidad en compresión de acuerdo a ASTM C469; (c) resistencia a la flexión en viguetas de 100x100x355 mm de acuerdo a ASTM C78; (d) permeabilidad de acuerdo a ASTM C1202; (e) creep y retracción de acuerdo a ASTM C512; (f) coeficiente de expansión térmica de acuerdo a Army

Corps of Engineers CRD-C39.

Ocho insertos fueron embebidos en lados diametralmente opuestos en los cilindros para medir de cambios de longitud y así obtener las deformaciones debidas a creep y retracción. Los insertos estaban distanciados a 254 mm y permitieron obtener cuatro mediciones DEMEC por cada probeta. La deformación de la probeta se obtuvo del promedio de las cuatro

mediciones. Con el objetivo de representar de mejor forma lo que sucede en un elemento pretensado, durante la medición de creep se hizo cuatro modificaciones respecto a la norma ASTM C512: (1) La carga fue aplicada a las probetas a la edad de 16 horas y 24 horas después de mezclado en lugar de los 28 días de edad como recomienda ASTM; (2) La carga aplicada a las probetas fue de un 60% de la resistencia en lugar del 40%; (3) las probetas fueron sometidas a un curado acelerado; y (4) las probetas usadas fueron cilindros de 100 mm de diámetro y 380 mm de largo ya que la capacidad de carga de los marcos de creep no era suficiente para mantener una carga adecuada para un cilindro estándar (150 x 300 mm) al 60% de la resistencia. El tamaño máximo del agregado fue de 12.7 mm por lo que la reducción en diámetro de las probetas de creep y retracción no constituyó un problema. El mismo tipo de probetas y deformómetro descritos anteriormente fueron utilizados en la determinación del coeficiente de expansión térmica (CET). Tres probetas de cada mezcla HLAD fueron utilizadas en la medición de CET a la edad de 56 días.

### 3.2 Propiedades a corto plazo de HLAD

Como se muestra en la Tabla 1, la mezcla HLAD de 55 MPa presentó una densidad promedio de 1856 kg/m<sup>3</sup> mientras que la mezcla HLAD de 69 MPa una de 1888 kg/m<sup>3</sup>. Estos valores representan 78 y 79 % de la densidad de un hormigón de resistencia similar pero de de peso normal, respectivamente.

Las probetas utilizadas para medir las propiedades mecánicas fueron curadas de dos maneras diferentes: (1)

de acuerdo con ASTM C33 y C192, ellas permanecieron en los moldes por 24 horas y después de ser desmoldadas fueron mantenidas en una cámara húmeda a 23°C hasta el día de ensayo y (2) curado acelerado durante las primeras 24 horas, seguido de cámara húmeda a 23°C hasta el día de ensayo. El curado acelerado simula las condiciones internas de un elemento estructural donde la temperatura es elevada por sobre la temperatura ambiente debido al calor de hidratación. Las probetas sometidas a curado acelerado fueron colocadas en una caja aislada térmicamente. Dicho sistema fue capaz de representar adecuadamente la evolución de la temperatura en el tiempo de las vigas de hormigón pretensado.

Las mezclas fueron desarrolladas y ensayadas en el laboratorio y después fueron mezcladas en una planta de elementos de hormigón pretensado y utilizadas en la fabricación de las vigas. Si bien este artículo se concentra en las mezclas HLAD fabricadas en el terreno, la comparación entre las mezclas de terreno y laboratorio mostró que no hubo diferencias estadísticamente significativas en las propiedades mecánicas. La resistencia a compresión fue medida en cilindros de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura a las edades de 1, 7, 28, 56 y más de 100 días. El módulo de elasticidad fue medido a la edad de 1 y 56 días para las probetas bajo curado acelerado y a la edad de 56 días para las probetas bajo curado normal. La resistencia a compresión y el módulo de elasticidad en el tiempo se muestra en la Tabla 2. Cada valor representa el promedio aritmético de un mínimo de tres cilindros por edad (López et al., 2004). El coeficiente de expansión térmica a la edad de 56 días también es mostrado en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades mecánicas de las mezclas HLAD de 55 y 69 MPa.

	Edad (días)	HLAD de 55 MPa		HLAD de 69 MPa	
		Curado ASTM*	Curado Acelerado	Curado ASTM*	Curado Acelerado
Resistencia a la compresión, MPa	1	39.6	51.5	50.4	58.2
	7	50.5	53.9	55.7	63.1
	28	60.9	60.1	67.6	64.4
	56	64.5	62.6	73.0	71.4
	103	70.5	65.0		
	144			75.0	72.1
	365	74.7		83.7	
Modulo de elasticidad, GPa	1		24.6		24.5
	56	27.0	26.6	28.1	27.1
CET, $\mu\epsilon/^\circ\text{C}$	56		9.2		9.6

\*Curado de acuerdo a ASTM C192

## 4. Resultados de creep y retracción

Las deformaciones de creep fue medido en 26 probetas a una humedad relativa de 50% y temperatura de 23°C por un periodo de 920 días. Doce probetas cilíndricas de 100 x 380 mm fueron fabricados de HLAD de 55 MPa y 14 probetas de HLAD de 69 MPa. Todas las probetas siguieron el método de curado acelerado, la mitad de las probetas se mantuvieron bajo una carga de 40% de la resistencia inicial (al momento de aplicación de la carga) y la otra mitad a 60% de la resistencia inicial. En cada grupo hubo especímenes en los cuales el ensayo comenzó 16 horas después de fabricados y otros 24 horas después de fabricados. La retracción fue medida en ocho probetas las cuales comenzaron el secado luego de 16 ó 24 horas después de fabricadas. Al momento de comenzar las mediciones de creep y retracción en la cámara climatizada, las probetas se encontraban a una temperatura cerca de 28°C, luego de tres horas se alcanzó el equilibrio térmico con la temperatura ambiente a 23°C. Las lecturas tomadas a temperatura superior a la estándar fueron ajustadas usando la temperatura del espécimen y el coeficiente de expansión térmica de la mezcla.

La Figura 2 muestra la retracción promedio medida en las probetas para cada una de las mezclas HLAD cuando el secado comenzó 24 horas después de fabricadas. La Figura 3 presenta el creep de HLAD de 55 y 69 MPa ensayados a la edad de 24 horas. Los valores de creep fueron expresados como coeficiente de creep, que corresponde a la deformación de creep dividida por la deformación inicial elástica. Los resultados de creep fueron obtenidos sustrayendo el valor de retracción de la medición conjunta de creep y retracción obtenida en las probetas de creep.

La retracción después de 920 días de secado fue de  $860 \text{ mm/mm} \times 10^{-6}$  para HLAD de 55 MPa y de  $650 \text{ mm/mm} \times 10^{-6}$  para HLAD de 69 MPa. Por otro lado, el coeficiente de creep después de 920 días fue de 1.62 y 1.30 para HLAD de 55 y 69 MPa, respectivamente. El 90% de los valores de creep y retracción a 920 días fue alcanzado luego de 250 días de secado independientemente de la carga o el tipo de HLAD (López et al., 2003).

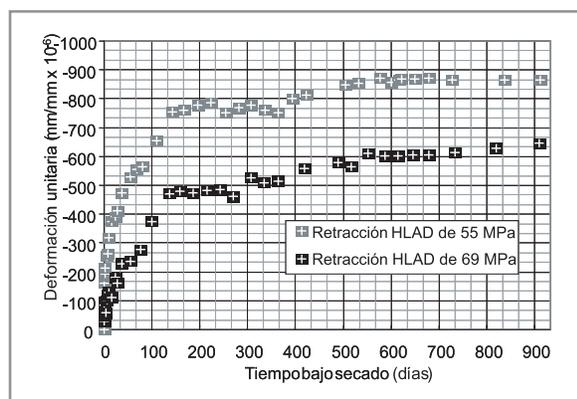


Figura 2. retracción promedio medida en HLAD de 55 MPa y 69 MPa

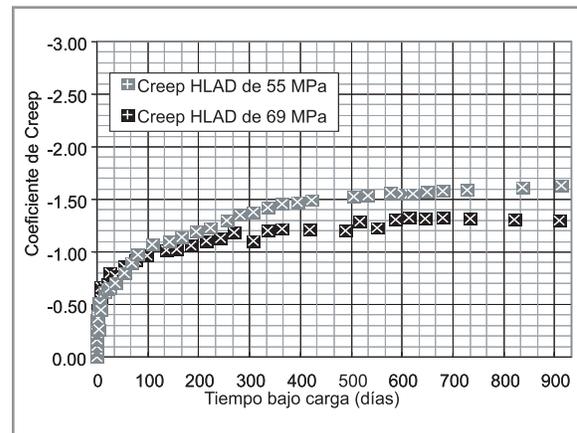


Figura 3. Coeficiente de creep promedio medido en HLAD de 55 MPa y 69 MPa

## 5. Resultados de pérdidas de pretensado

Mediciones de deformación axial obtenida usando los deformómetros de cuerda vibrante embebidos en las vigas fueron usadas para calcular las pérdidas de pretensado. La Figura 4 presenta las mediciones de deformación unitaria en las dos vigas de 11.2 m de longitud fabricadas con HLAD de 55 MPa y las dos vigas fabricadas con HLAD de 69 MPa. Las mediciones empezaron antes de la transferencia de la carga de pretensado y terminó después de 100 días de edad cuando las vigas fueron ensayadas para determinar la resistencia a flexión y al corte. La temperatura de las vigas varió desde 33.2°C antes de la transferencia de la carga de pretensado hasta 20°C 110 días después. Las mediciones de los deformómetros de cuerda vibrante fueron corregidas por temperatura para obtener las deformaciones netas debidas a carga. A pesar de que el CET del hormigón varía con la edad y contenido de humedad, se utilizó el valor de CET obtenido a los 56 días de edad por ser el único valor disponible para correcciones de temperatura.

El acortamiento elástico experimentado por las vigas de HLAD de 55 y 69 MPa fue de 600 y 400  $\text{mm/mm} \times 10^{-6}$ , respectivamente. Durante los días siguientes las vigas con HLAD de 55 MPa mostraron una deformación adicional de 260 y 330  $\text{mm/mm} \times 10^{-6}$ , mientras que las dos vigas con HLAD de 69 MPa tuvieron una deformación adicional de solo 130  $\text{mm/mm} \times 10^{-6}$ . En términos relativos, la tasa de incremento medida en las vigas con HLAD de 69 MPa fue más baja que las de la contraparte con HLAD de 55 MPa. Las primeras registraron un aumento en deformación de 4% entre 13 y 130 días después de la transferencia de la carga de pretensado mientras que las vigas con HLAD de 55 MPa tuvieron una deformación promedio a los 130 días 7% mayor que a los 3 días.

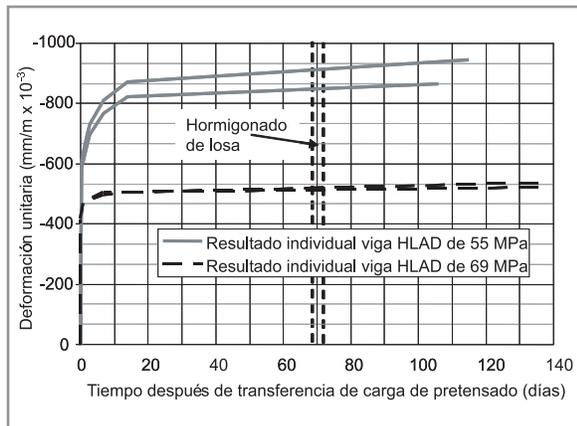


Figura 4. deformaciones unitarias experimentales medidas en las vigas con HLAD de 55 y 69 MPa de 11.9 m de largo

Los datos de deformación elástica, creep y retracción provenientes de las vigas fueron utilizados para calcular las pérdidas de pretensado. Dichos valores experimentales fueron comparados con las estimaciones de cuatro modelos de pérdidas de pretensado usados en el diseño de elementos pretensados. Los métodos AASHTO refinado y AASHTO agregado de AASHTO-LRFD (Shams y Kahn, 2000), el método propuesto por el comité 209 del ACI (Slapkus y Kahn, 2002) y el método propuesto por el PCI (PCI, 1998). Dado que el método ACI-209 es el único que permite estimar pérdidas de pretensado a cualquier edad del hormigón, las pérdidas estimadas usando ACI-209 fueron proyectadas a 40 años, lo que se asumió como el tiempo al estado final de pérdidas entregado por los otros tres métodos.

Tabla 3. Comparación entre pérdidas de pretensado experimentales y estimadas en vigas con HLAD de 55 y 69 MPa

Vigas con HLAD de 55 MPa	Experimentales proyectadas	AASHTO refinado	AASHTO agregado	PCI	ACI 209
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
Tensión después de gateo	1400	1400	1400	1400	1400
Acortamiento elástico (AE)	-117	-77	-72	-72	-83
Creep (CR)	medidas en conjunto	-113	estimadas en conjunto	-97	-102
Retracción (RET)		-45		-35	-78
CR+RET	-60*	-158		-132	-180
Relajación (RE)	-23†	-23		-26	-39
Total dependiente del tiempo	-84	-180	-167	-158	-219
Pérdidas Totales	-201	-257	-239	-231	-301
Vigas con HLAD de 69 MPa	Experimentales proyectadas	AASHTO refinado	AASHTO agregado	PCI	ACI 209
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
Tensión después de gateo	1400	1400	1400	1400	1400
Acortamiento elástico (AE)	-83	-70	-67	-62	-75
Creep (CR)	medidas en conjunto	-111	estimadas en conjunto	-90	-88
Retracción (RET)		-45		-35	-78
CR+RET	-20*	-156		-125	-165
Relajación (RE)	-30†	-23		-27	-9
Total dependiente del tiempo	-50	-179	-162	-152	-204
Pérdidas Totales	-134	-249	-229	-214	-280

\*Creep y retracción experimentales fueron proyectadas a 40 años usando una evolución exponencial en el tiempo que resulto ser la de mayor correlación con los datos experimentales.

†Pérdidas por relajación del acero fueron determinadas usando la expresión AASHTO refinado y pérdidas de AE, CR y RET experimentales

Las pérdidas reales en el hormigón fueron calculadas de los datos de deformación del hormigón en las vigas pretensadas. Debido a que las pérdidas por relajación del acero no fueron medidas separadamente, se utilizó la expresión propuesta por el método AASHTO refinado con los valores experimentales de deformación en el hormigón. Esto proporcionó un valor de relajación del acero, basado en datos experimentales, de 23 y 30 MPa para las vigas con HLAD de 55 y 69 MPa, respectivamente. Las pérdidas experimentales fueron proyectadas a 40 años con el objeto de compararlas con las estimaciones de los modelos. La Tabla 3 presenta una comparación entre las pérdidas de pretensado estimadas usando los cuatro métodos mencionados anteriormente y las pérdidas experimentales.

Las pérdidas experimentales en términos de tensión fueron calculadas como las deformaciones unitarias medidas experimentalmente multiplicadas por el módulo de elasticidad de los cables de acero que fue también medido experimentalmente como un valor de 196 MPa.

Las pérdidas por creep y retracción fueron medidas conjuntamente (CR+RET) y las pérdidas por relajación del acero (RE) determinadas con el método AASHTO refinado en base a pérdidas experimentales de acortamiento elástico, creep y retracción.

Las pérdidas experimentales totales proyectadas en las vigas con HLAD de 55 MPa fueron 201 MPa mientras que las pérdidas debidas a creep y retracción del hormigón fueron 60.7 MPa para una tensión en el hormigón equivalente a un 19% de su resistencia al momento de carga. Dichas pérdidas de creep y retracción proyectadas a una tensión de 60% de la resistencia del hormigón resultaron en 173.8 MPa. Cabe recordar que en un elemento pretensado la tensión aplicada en el hormigón usualmente es de 60% de su resistencia, por lo que las pérdidas medidas en este estudio deben ser proyectadas a un nivel de tensión en el hormigón de 60%.

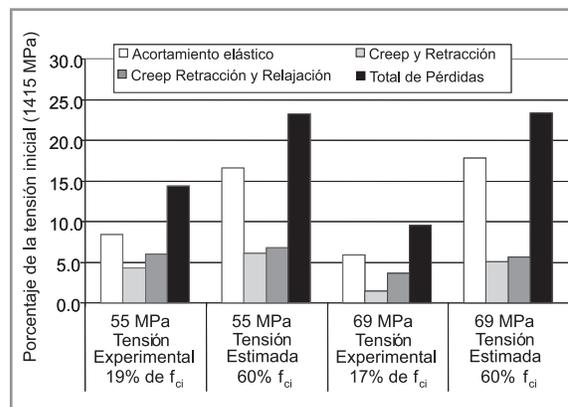
La Figura 5 muestra las pérdidas de pretensado medidas en las vigas con HLAD de 55 MPa con una tensión en el hormigón de 19% de su resistencia y las correspondientes pérdidas proyectadas a una tensión en el hormigón de 60%. Las pérdidas por retracción del hormigón no dependen de la tensión en el hormigón, por lo que sólo las pérdidas de acortamiento elástico, creep y relajación fueron afectadas con la proyección.

Las pérdidas experimentales de creep y retracción fueron realizadas en conjunto, por lo que debieron ser separadas para poder ajustar las pérdidas por creep sin modificar las de retracción. Se asumió que creep y

retracción en las vigas tuvieron la misma proporción que en las probetas cilíndricas ensayadas de acuerdo a ASTM C512 donde el creep y la retracción se miden por separado. Después de la proyección a 60%, las pérdidas de pretensado debido a creep y retracción representan el 12.4% del total de las pérdidas de pretensado. Este valor resulta menor que el 16% reportado por Podolony (1969) en vigas de hormigón con peso y resistencia normal y que las pérdidas de 15 y 19% medidas por Hansen (1964) en vigas de curado acelerado livianas y de peso normal, respectivamente.

El método AASHTO refinado y ACI-209 sobreestimaron las pérdidas de pretensado en vigas con HLAD de 55 MPa por 27 y 50 % respectivamente. El método AASHTO agregado y PCI entregaron una estimación más cercana a la experimental, con sobreestimaciones en las pérdidas totales por 12 y 15%, respectivamente.

Las pérdidas de pretensado medidas en las vigas con HLAD de 69 MPa debido a creep y retracción con una tensión en el hormigón equivalente a 17% de su resistencia fueron de 20 MPa. Estas pérdidas proyectadas a una tensión en el hormigón de un 60% de su resistencia resultan ser de 71 MPa que representaría un 5.1% de la tensión inicial aplicada a los cables de acero lo que puede ser directamente comparado con los resultados de Roller et al. (1995). La Figura 5 presenta todas las diferentes pérdidas de pretensado medidas en las vigas y proyectadas a una tensión del 60% de la resistencia del hormigón. El valor proyectado de pérdidas debido a creep y retracción de 5.1% de la tensión inicial en el acero resultó ser menor que los valores reportados por Roller et al. (1995) de 7.4% para un hormigón resistencia similar y peso normal.



Los cuatro métodos de estimación de pérdidas de pretensado sobreestimaron las pérdidas reales obtenidas en las vigas con HLAD de 69 MPa. El método AASHTO refinado y AASHTO agregado sobreestimaron las pérdidas totales por 85 y 62% respectivamente. Por otro lado, los métodos ACI-209 y PCI sobreestimaron pérdidas totales por 60 y 109%, respectivamente.

La Figura 6 presenta las pérdidas experimentales y estimadas expresadas como la razón estimado-medido. Las pérdidas en la Figura 6 están agrupadas en acortamiento elástico (AE), creep y retracción (CR+RET), pérdidas dependientes del tiempo (CR+ RET+RE) y pérdidas totales (ES+CR+ RET+RE). Sobrestimaciones son representadas por una razón estimado-medido mayor que uno mientras que las subestimaciones por una razón menor que uno.

Los cuatro métodos subestimaron las pérdidas de acortamiento elástico para ambos tipos de HLAD. El método AASHTO refinado, PCI y ACI-209 sobreestimaron las pérdidas de creep y retracción por al menos 100%. Las subestimaciones en la relajación del acero mostradas por PCI y ACI-209 (ver Tabla 3), son probablemente debido a la gran sobreestimación que estos métodos dieron de creep y retracción. Esta gran sobreestimación da como resultado un menor valor en las pérdidas de relajación, ya que éstas se calculan como último paso y en función de las pérdidas de creep y retracción.

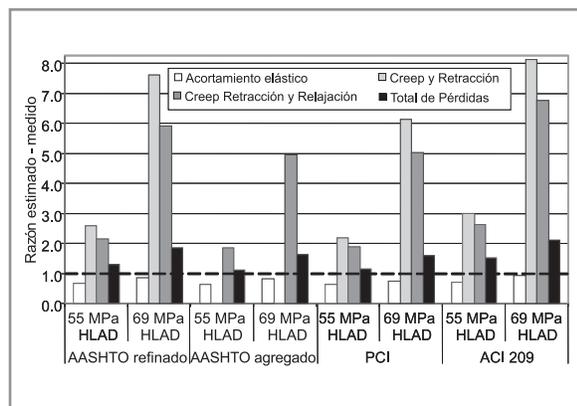


Figura 6. Comparación entre las pérdidas de pretensado medidas y estimadas usando los modelos AASHTO-LRFD, PCI y ACI-209 en vigas pretensadas AASHTO tipo II

El hecho de que las pérdidas de acortamiento elástico hayan sido subestimadas en todos los casos puede ser debido al método experimental utilizado en la medición de dichas pérdidas. Las mediciones tomadas en los deformómetros de cuerda vibrante antes y después de la transferencia de la carga de pretensado estuvieron

apartadas por una hora aproximadamente. Esto se debe a que las operaciones de cortado de los cables para realizar la transferencia de la carga de pretensado son lentas y no permiten una medición de acortamiento elástico e instantáneo. Por lo tanto, la diferencia entre las dos mediciones no sólo incluye la deformación debido a deformación elástica sino también un poco de creep y retracción. El mismo argumento puede ser usado para justificar en parte la sobreestimación que todos los métodos hicieron de las pérdidas dependientes del tiempo (CR, RET y RE).

Dentro de las pérdidas dependientes del tiempo, las mayores diferencias entre los métodos de estimación fueron en las pérdidas por retracción. Para las vigas con HLAD de 55 MPa, el método PCI estimó las pérdidas por retracción en 35 MPa que representa el 2.5 % de la tensión inicial en el cable mientras que el método ACI-209 estimó dichas pérdidas en 78 MPa que es un 5.6 % de la tensión inicial. Cabe destacar que no es posible realizar una comparación entre los resultados experimentales y estimación para creep y retracción por separado ya que en las vigas fabricadas para este estudio creep y retracción ocurrieron conjuntamente.

Todos los modelos de pérdidas de pretensado utilizados en el diseño que fueron evaluados sobreestimaron las pérdidas debidas a acortamiento elástico, creep y retracción para las vigas pretensadas AASHTO tipo II. Cabe destacar que solamente el método ACI-209 considera el uso de agregados livianos y lo hace sólo en la porción de creep. Por lo tanto, todo el resto de las pérdidas en ACI-209 y en los otros tres métodos son estimadas considerando un hormigón de peso normal.

## 6. Conclusiones y recomendaciones

En este limitado estudio se investigó las pérdidas de pretensado, y el creep y retracción en vigas AASHTO tipo II hechas con hormigón liviano de alto desempeño utilizando pizarra expandida como agregado grueso. Las mezclas de resistencia nominal de 55 y 69 MPa utilizando pizarra expandida como agregado grueso. Las mezclas de resistencia nominal de 55 y 69 MPa presentaron una resistencia a los 56 días de 64.5 y 73 MPa con un peso unitario de solo 1855 y 1890 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente. Después de un año la resistencia a compresión fue de 74.7 y 83.7 MPa para los HLAD de 55 y 69 MPa, respectivamente. Este considerable incremento en resistencia es debido a la utilización de materiales cementicios puzolánicos como las cenizas

volantes y microsilica.

El coeficiente de creep después de 920 días bajo carga de las mezclas HLAD de 55 y 69 MPa fue de 1.62 y 1.30, respectivamente cuando el ensayo comenzó a la edad de 24 horas. La retracción en cambio, alcanzó valores de 860 y 650 mm/mm  $\times 10^{-6}$  en las mezclas de 55 y 69 MPa, respectivamente después de 920 días de secado comenzado a 24 horas de edad. Los valores de creep obtenidos en este estudio fueron entre un 30 a un 40% de los valores de creep reportados por Pfeifer (1968) en mezclas de hormigón liviano de resistencia normal.

Las pérdidas de pretensado fueron estimadas usando los métodos AASHTO refinado, AASHTO agregado, PCI y ACI-209. Todos los métodos sobreestimaron las pérdidas dependientes del tiempo en vigas pretensadas fabricadas con HLAD de 69 MPa y HLAD de 55 MPa. Estos resultados significan que estos métodos son conservadores para estimar pérdidas de pretensado en vigas con hormigón livianos de alto desempeño hecho con pizarra expandida.

Basado en este estudio, los métodos AASHTO-LRFD, PCI y ACI-209 pueden ser utilizados de manera conservadora para predecir pérdidas de pretensado en vigas hechas con hormigón liviano de alto desempeño con pizarra expandida.

Se recomienda que futura investigación se centre en la medición de pérdidas de pretensado de creep y retracción por separado. Esto requiere de la fabricación de vigas con y sin acero de pretensado, de manera que la viga con pretensado presente creep y retracción y la viga sin acero de pretensado presente solo retracción. Con valores experimentales individuales de creep y retracción se podría determinar si la sobreestimación de los modelos medida en este estudio se encuentran en la porción de creep o de retracción. Este limitado estudio sólo consideró mediciones de deformación en las vigas hasta 130 días después de fabricadas, se recomienda extender mediciones al largo plazo para corroborar las proyecciones a largo plazo utilizadas en este estudio.

## 7. Agradecimientos

Esta investigación fue patrocinada por el Departamento de Transportes de Georgia (Georgia DOT) a través del proyecto 2004. Las vigas fueron fabricadas en la planta de prefabricados de la Corporación Tindall. Cementos Lafarge, Boral Material Technologies donaron el cemento y cenizas volantes, respectivamente. Productos de construcción Grace donó la microsilica y los aditivos

químicos. La compañía Stalite donó la pizarra expandida utilizada en las mezclas. El apoyo de todos estos patrocinadores es agradecido profundamente. Dr. Karl .F. Meyer, Dr. Kimberly E. Kurtis, Dr. James S. Lai, Sr. Brandon S. Buchberg, Sr. Adam Slapkus y Sr. Alen Horta asistieron este proyecto en sus diversas etapas. Todos los resultados y conclusiones mostradas en este artículo corresponden a las de los autores y no representan necesariamente las opiniones, conclusiones, especificaciones y políticas del Departamento de Transportes de Georgia (Georgia DOT) o de cualquiera de las otras instituciones patrocinadoras.

## 8. Referencias

- AASHTO (1998), AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. Washington: AASHTO.
- ACI-Committee#209 (1997), "Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures", in ACI Manual of Concrete Practice. American Concrete Institute: Farmington Hills, MI. p. 209R.1-209R.47.
- Berra M. y Ferrada G. (1990), "Normalweight and Total-Lightweight High-Strength Concretes: A Comparative Experimental Study". in High-Strength Concrete. Second International Symposium. Berkeley, California: American Concrete Institute, p. 701-733.
- de Larrard F., Acker P. y Le Roy R. (1994), "Shrinkage, Creep and Thermal Properties", in High Performance Concrete: Properties and Applications, S.P. Shah, and Ahmad, S. H., Editor. McGraw-Hill: New York. p. 65-114.
- Goodspeed C.H., Vanikar S. y Cook Raymond A. (1996), "High-Performance Concrete Definition for Highway Structures". CONCRETE INTERNATIONAL, 18(2): p. 62-67.
- Hansen J.A. (1964), "Prestress Loss as Affected by Type of Curing". PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE JOURNAL, 9(4): p. 69-94.
- Holm T.A. y Bremner T. W. (1994), "High Strength Lightweight Aggregate Concrete", in High Performance Concrete: Properties and Applications, Shah, S.P., and Ahmad, S. H., Editor. McGraw-Hill: New York, NY. p. 341-374.
- Huang T. (1982), "Study of Prestress Losses Conducted by Lehigh University". PCI JOURNAL, 27(5): p. 48-61.
- Kahn L.K., Dill J.C. y Reutlinger C.G. (2002), "Transfer and Development Length of 15-mm Strand in High

- Performance Concrete Girders". *ASCE Journal of Structural Engineering*, 128(7): p. 913-921.
- López M., Kahn L.F., Kurtis K.E. y Lai J.S. (2003), Creep, Shrinkage, and Prestress Losses of High-Performance Lightweight Concrete. School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology: Atlanta. p. 310.
- López M., Kahn L.F., y Kurtis K.E. (2004), "Creep and Shrinkage of High Performance Lightweight Concrete". *ACI MATERIAL JOURNAL*, 101(5): p. 391-399.
- López M., Kahn L.F., Kurtis K.E. y Buchberg B.S. (2005), "Long-Term Creep and Shrinkage in High-Strength Lightweight Concrete". in *SP-227 Shrinkage and Creep of Concrete*. New York: American Concrete Institute. p. 317-336.
- Meyer K.F. y Kahn L. F. (2002), "Lightweight Concrete Reduces Weight and Increases Span Length of Pretensioned Concrete Bridge Girders". *PCI JOURNAL*, 47(1): p. 68-75.
- Meyer K.F., Kahn L. F., Lai J.S. y Kurtis K.E. (2002), Transfer and Development Length of High Strength Lightweight Concrete Precast Prestressed Bridge Girders. School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology: Atlanta. p. 617.
- Meyer K.F., Buchberg B.S. y Kahn, L. F. (2003), "Development of High Strength Lightweight Concrete Mix Designs: A Practical Approach". in 49th Annual PCI Convention & Exhibition, the 3rd PCI/FHWA International Symposium on High Performance Concrete, and the National Bridge Conference. Orlando, Florida: Precast / Prestressed Concrete Institute.
- PCI Committee on Prestress, L. (1975), "Recommendations for Estimating Prestress Losses". *PCI JOURNAL*, 28(4): p. 43-75.
- PCI (1998), *PCI Design Handbook, Precast and Prestressed Concrete*. Fifth ed. Chicago: Precast / Prestressed Concrete Institute.
- Pfeifer D.W. (1968), "Sand Replacement in Structural Lightweight Concrete". *ACI JOURNAL*, 65(2): p. 131-139.
- Podolny W.J. (1969), "Understanding the Losses in Prestressing". *PCI JOURNAL*, 14(5): p. 43-53.
- Rogers G.L. (1957), "On the Creep and Shrinkage Characteristics of Solite Concretes". in *World Conference on Prestressed Concrete*. San Francisco, California: University of California in cooperation with Prestressed Concrete Institute, p. 2.1-2.5.
- Roller J.J., Martin B.T., Russell H.G. y Bruce R.N. (1993), "Performance of Prestressed High Strength Concrete Bridge Girders". *PCI JOURNAL*, 38(3): 1993. p. 35-45.
- Roller J.J., Russell H.G., Bruce R.N. y Martin B.T. (1995), "Long-Term Performance of Prestressed, Pretensioned High Strength Concrete Bridge Girders". *PCI JOURNAL*, 40(6): p. 48-59.
- Shams M.K. y Kahn L.F. (2000), Time-Dependent Behavior of High-Performance Concrete. School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology: Atlanta. p. 354.
- Shing P.B., Cooke D.E., Frangopol D.M., Leonard M.A., McMullen M.L. y Hutter, W. (2000), "Strand Development and Transfer Length Tests on High Performance Concrete Box Girders". *PCI JOURNAL*, 45(5): p. 96-109.
- Slapkus A. y Kahn L.F. (2002), Evaluation of Georgia's High Performance Concrete Bridge. School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology: Atlanta. p. 382.
- Tadros M.K., Ghali A. y Dilger W.H. (1975), "Time-dependent Prestress Loss and Deflection in Prestressed Concrete Members". *PCI JOURNAL*, 20(3): p. 86-98.
- Zia P. Preston, H. Kent Scott, Norman L., y Workman Edwin B. (1979), "Estimating Prestress Losses". *CONCRETE INTERNATIONAL*, 76(6): p. 32-38.

