

Ministerio de Educación Superior.

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.

Facultad de Construcciones.

Departamento de Ingeniería Civil.



TRABAJO DE DIPLOMA

“Determinación de las pérdidas en las traviesas de hormigón pretensado producidas en la EIFF.”

Autor: Jose Luis Llanes Araujo.

Tutores: Dr. Ing. Juan J. Hernández Santana.

Ing. Reinier Azorín Cruz.

Santa Clara, Cuba

2017

“Año 59 de la Revolución”

Agradecimientos

A mi familia, en especial a mi madre por hacerme la persona que soy.

A los profesores Juan José y Azorín por darme la oportunidad de trabajar con ellos.

Al profesor Velázquez, por tener esa fe en mí.

A mis amigos, en especial al cuatro 103 por soportarme durante cinco años.

A todo el personal de la EIIF por hacer posible este trabajo, en especial al Grillo y Esteban.

A todos muchas gracias.

Resumen

En la Empresa Industrial de Instalaciones Fijas (EIIIF) de la ciudad de Santa Clara no se conoce, ni se cuenta con una metodología para hallar las pérdidas de tensión en las armaduras de las traviesas que allí se elaboran. El presente trabajo de diploma tiene como finalidad realizar una metodología para determinar las pérdidas de tensión reales en los elementos de dicha entidad. Con este fin se procedió a realizar una exhaustiva revisión bibliográfica, encontrándose tres métodos principales para la estimación de las pérdidas en elementos pretensados, los mismos se encuentran en la NC 207: 2003, la EHE: 08 y el ACI 318: 14. Para determinar que método presenta mayor exactitud se midieron las deformaciones de un grupo de elementos con y sin armadura para comparar, mediante procedimiento estadístico, cual expresa mayor aproximación en la predicción de las mismas y consecuentemente de las pérdidas. Como resultado se obtiene una metodología completa para la estimación de las caídas de tensión en la armadura activa de los durmientes, así como el valor de las mismas.

Palabras claves: Traviesas; Pérdidas; Pretensado; Deformaciones; Retracción; Fluencia; Relajación.

Abstract

In the Industrial Company of Fixed Installations (EIFF) of the city of Santa Clara it is not known, nor does it have a methodology to find the losses of tension in the armatures of the sleepers that are elaborated there. The purpose of this diploma work is to perform a methodology to determine the actual prestressing losses in the elements of said entity. For this purpose, a thorough bibliographic review was carried out, and three main methods for estimating losses in prestressed elements are found in NC 207: 2003, EHE: 08 and ACI 318: 14. In order to determine which method is more accurate, the deformations of a group of elements with and without reinforcement were measured to compare, by statistical procedure, which expresses a greater approximation in the prediction of the same and consequently of the losses. As a result, a complete methodology is obtained for the estimation of the losses in the active reinforcement of the sleepers, as well as the value of the same.

Key words: Sleepers, Losses, Prestressed, Deformations, Retraction, Fluency, Relaxation.

Tabla de contenidos

Agradecimientos	i
Resumen	ii
Abstract	iii
Introducción	1
Situación problemática	2
Objeto de estudio	2
Campo de acción	3
Objetivo General	3
Objetivos Específicos	3
Hipótesis	3
Interrogantes científicas	3
Novedad científica	3
Aportes científicos	4
Organización del informe	4
Capítulo I. Fundamentos para la determinación de pérdidas en el hormigón pretensado.	5
1.1 Introducción:	5
1.2 Pérdidas de la fuerza de pretensado. Clasificación	5
1.2.1 Pérdidas instantáneas	6
1.2.2 Pérdidas diferidas	7
1.3 Pérdida por fricción	8
1.4 Pérdida por deslizamiento de las cuñas en los aparatos de anclaje	11
1.5 Pérdida por acortamiento elástico instantáneo del hormigón	15
1.5.1 Tendones rectos, anclados todos simultáneamente	15

1.5.2 Tendones rectos tesados y anclados en etapas sucesivas	17
1.5.3 Pérdidas por acortamiento elástico según la ACI 318: 14.....	19
1.5.3.1 Para elementos con cables adherentes:.....	19
1.5.3.2 Para elementos con cables no adherentes:	21
1.6 Pérdidas diferidas	21
1.6.1 Método de la EHE: 08	22
1.6.2 Método de la NC 207: 2003.....	27
1.6.2.1 Pérdida de tensión en el acero de pretensado por fluencia del hormigón	27
1.6.2.2 Pérdida de tensión en el acero de pretensado por retracción del hormigón....	30
1.6.2.3 Pérdida conjunta por fluencia y retracción del hormigón.....	31
1.6.2.4 Pérdida de tensión en el acero de pretensado por relajamiento del acero	31
1.6.3 Método del ACI 318: 14.....	33
1.6.3.1 Pérdida por flujo plástico del hormigón para elementos con tendones adherentes	33
1.6.3.2 Pérdida por flujo plástico del hormigón para elementos con tendones no adherentes	34
1.6.3.3 Pérdida por retracción del hormigón	34
1.6.3.4 Pérdida por relajación de esfuerzo en el acero pretensado (relajación de los cables)	35
1.7 Conclusiones parciales	37
Capítulo II. Características y condiciones de fabricación de los durmientes de la EIIF. Experimento de comparación	38
2.1 Introducción.....	38
2.2 Traviesas de hormigón pretensadas producidas en la EIIF. Características geométricas y propiedades de los materiales	38
2.2.1 Traviesa Italiana.....	39

2.2.2 Traviesa Soviética	41
2.3 Procedimientos y características tecnológicas en la producción de durmientes de hormigón pretensado en la EIFF	44
2.3.1 Línea de Producción # 1. Tecnología italiana	44
2.3.1.1 Limpieza y Engrase del Molde	44
2.3.2.2 Colocación de los dispositivos de vaciado en el molde	45
2.3.1.3 Preparación y colocación de los grupos de aceros en el molde	45
2.3.1.4 Tensado de los aceros	46
2.3.1.4.1 Determinación de la fuerza de pretensado real que se aplica a los aceros	47
2.3.1.5 Distribución y nivelación de la mezcla de hormigón en el molde	48
2.3.1.6 Vibro compactación de la mezcla de hormigón en el molde	49
2.3.1.7 Curado de las traviesas	49
2.3.1.7.1 Curado exotérmico (curado sin vapor)	50
2.3.1.7.2 Curado con Vapor	50
2.3.1.9 Destensado del Molde	51
2.3.1.10 Volteo de los durmientes	51
2.3.1.12 Terminación y marcaje	52
2.3.1.13 Almacenamiento de los durmientes	53
2.3.2 Línea de Producción # 3. Tecnología soviética	54
2.3.2.1 Limpieza y Engrase del Molde	54
2.3.2.2 Preparación y colocación de los grupos de alambre en el molde	55
2.3.2.3 Colocación de los dispositivos de vaciado en el molde	56
2.3.2.4 Tensado de los grupos de alambre y colocación de los diafragmas en el molde	56
2.3.2.5 Distribución y nivelación de la mezcla de hormigón en el molde	58

2.3.2.6 Vibro compactación de la mezcla de hormigón en el molde	58
2.3.2.7 Extracción y limpieza de los diafragmas	59
2.3.2.8 Curado de las traviesas	59
2.3.2.9 Destensado del Molde	59
2.3.2.10 Volteo de los durmientes	60
2.3.2.11 Separación de los durmientes mediante sierra de corte	61
2.3.2.12 Terminación y marcaje	61
2.3.2.13 Almacenamiento de los durmientes	62
2.4 Diseño del experimento de comparación	62
2.4.1 Elección del tamaño de la muestra.....	63
2.4.2 Fabricación de los elementos de prueba.	64
2.5 Medición, traslado y almacenamiento de elementos.	65
2.5.1 Medición de elementos en la transferencia.....	65
2.5.2 Traslado y almacenamiento de los durmientes de prueba.....	66
2.5.3 Medición de elementos a los 7 y los 28 días de edad.....	67
2.6 Conclusiones parciales.....	68
Capítulo III. Resultados del experimento comparativo. Pérdidas de pretensado en los durmientes.....	70
4.1 Introducción.....	70
4.2 Resultados de las mediciones en los elementos.....	70
4.2.1 Resultados en la transferencia.....	71
4.2.2 Resultados para los acortamientos diferidos.....	73
4.3 Resistencia a compresión del lote 067-17	75
4.4 Cálculo de las deformaciones para su comparación con las mediciones	77
3.4.1 Cálculo de las deformaciones por acortamiento elástico	78

3.4.1.1 Según la EHE: 08	78
3.4.1.2 Según la NC 207: 2003	79
3.4.1.3 Según el ACI 318: 14	80
3.4.2 Cálculo de las deformaciones por retracción	81
3.4.2.1 Según la EHE-08.....	81
3.4.2.2 Según la NC 207:2003	83
3.4.2.3 Según el ACI 318: 14	84
3.4.3 Cálculo de las deformaciones por fluencia	85
3.4.3.1 Según la EHE-08.....	87
3.4.3.2 Según la NC 207: 2003.	89
3.4.3.3 Según el ACI 318: 14.	91
4.5 Comparación de los resultados de los cálculos con las mediciones en planta.	92
3.4.4.1 Comparación para el acortamiento por retracción en la transferencia.	93
3.4.4.2 Comparación para el acortamiento elástico en la transferencia.	94
3.4.4.3 Comparación para los acortamientos diferidos	96
4.6 Cálculo de las pérdidas.....	97
3.6.1 Pérdidas en la longitud de transferencia.....	98
3.6.2 Pérdidas por acortamiento elástico.....	99
3.6.3 Pérdidas diferidas.....	100
3.6.4 Pérdidas totales	102
4.7 Conclusiones parciales	103
Conclusiones y Recomendaciones	105
Conclusiones	105
Recomendaciones	107
Bibliografía.....	108

Referencias bibliográficas109

Introducción

Los elementos de hormigón pretensado son un conjunto de cables, barras o torones de varios hilos, que se tensan en un banco de pretensado o en un molde, se mantienen tensadas mientras tienen un trazado adecuado, posteriormente se coloca el hormigón de alta resistencia para formar la pieza; cuando el hormigón adquiere suficiente resistencia se corta o cesa el tensado de los cables, así el hormigón queda comprimido y los cables tensados dando al elemento la resistencia requerida para su propósito. La fuerza de tensión de los cables es transmitida al hormigón por adherencia. Estos elementos se elaboran con hormigón de alta resistencia, donde la mínima es de 300 kg/cm² y acero de baja relajación grado 250ksi con resistencia última de 1760 MPa, o grado 270ksi con resistencia última de 1860 MPa; estas características de los materiales permiten obtener buenos resultados en las secciones y reducir pérdidas. (Alemán, 2016)

A nivel mundial el hormigón pretensado es el material predominante que se utiliza en los puentes de vigas, en puentes construidos "in situ" de largos tramos entre pilas o los construidos por métodos especiales como voladizos, empuje, etc., se emplea en la construcción de los pilares y núcleos resistentes de edificios preparados para resistir un alto grado de terremoto y protección contra explosiones, también resulta frecuente su uso en pisos de rascacielos, en cámaras de reactores nucleares, etc.

Uno de los usos más difundidos en la actualidad del hormigón pretensado en nuestro país es en la creación traviesas de hormigón, que sustituyen a las de antaño de madera para economizar y disminuir ampliamente el impacto ambiental.

En vías férreas, las traviesas o durmientes son los elementos transversales al eje de la vía que sirven para mantener unidos y a la vez a una distancia fija (galga o trocha) a los dos carriles (rieles) que conforman la vía, así como mantenerlos unidos al balasto, transmitiendo el peso del material rodante al balasto y, por intermedio de éste, al suelo. También cumplen

la función de dar peso al conjunto, de manera que la geometría inicial del trazado se mantenga en la mayor medida posible.(Blay, 2014)

Según (Blay, 2014) las principales funciones que debe desempeñar una traviesa son las siguientes: (Caneiro and Santana, 2016)

- Soporte de los raíles, fijando y asegurando su posición en lo referente a cota, separación e inclinación.
- Recibir las cargas verticales y horizontales transmitidas por los raíles y repartirlas sobre el balasto mediante su superficie de apoyo.
- Conseguir y mantener la estabilidad de la vía en el plano horizontal y en el vertical frente a los esfuerzos estáticos procedentes del peso propio y las variaciones de temperatura y a los esfuerzos dinámicos debidos al peso de los trenes.
- Mantener, siempre que sea posible, por sí mismo y sin ayuda de elementos específicos incorporados a la sujeción, el aislamiento eléctrico entre los dos hilos de raíles cuando la línea esté dotada de circuitos de señalización o por corrientes parásitas.

En nuestro país se utilizaron generalmente las traviesas de madera, colocándose las primeras de hormigón armado durante los primeros años de la década del 60, continuándose su colocación en años posteriores hasta la introducción de las traviesas pretensadas en las décadas del 70 y 80, con la Reparación Capital de la Vía Central en la década del 80, se hizo necesaria la construcción de la Empresa Industrial de Instalaciones Fijas (EIIF) que fue ubicada en la Ciudad de Santa Clara. (Bouzas Consuegra, 2015)

Situación problemática

En la Empresa Industrial de Instalaciones Fijas (EIIF) no se conoce, ni se cuenta con una metodología para hallar las pérdidas que se producen durante las etapas de trabajo de las traviesas elaboradas en dicha entidad, lo cual atenta contra el comportamiento estructural correcto de los durmientes.

Objeto de estudio

Las pérdidas de tensión en las armaduras pretensadas de los durmientes producidos en la EIIF.

Campo de acción

Producción y explotación de los durmientes de la EIIF.

Objetivo General

Realizar una metodología para determinar las pérdidas de tensión reales que experimentan las traviesas monobloque de hormigón pretensado producidas en la EIIF de Santa Clara.

Objetivos Específicos

1. Profundizar en los métodos empleados para el cálculo de tensiones y pérdidas de pretensado de las traviesas.
2. Describir el procedimiento constructivo utilizado en la fabricación de durmientes pretensados en la Empresa Industrial de Instalaciones Fijas.
3. Elaborar una metodología para determinar las pérdidas de tensiones en las traviesas de la EIIF.
4. Determinar las pérdidas reales que experimentan las traviesas en cuestión.

Hipótesis

Una metodología completa para hallar las pérdidas reales de las traviesas pretensadas producidas en la EIIF de Santa Clara, pueden brindarle a dicha empresa una herramienta importante para el diseño y revisión de los durmientes, supliendo de esta forma, incertidumbres en el proceso de fabricación y explotación.

Interrogantes científicas

- ¿Cuál es el estado actual del conocimiento acerca de los métodos empleados en la determinación de las tensiones y pérdidas en las traviesas pretensadas?
- ¿Qué procedimiento constructivo se utiliza en la Empresa Industrial de Instalaciones Fijas (EIIF) en la elaboración de las traviesas pretensadas?
- ¿Cuáles son las propiedades principales de los materiales que se emplean en la construcción de las traviesas?
- ¿Qué pérdidas experimentan las traviesas en diferentes edades?

Novedad científica

La elaboración de una metodología que permita determinar las pérdidas de las traviesas producidas en la EIIF de Santa Clara y por ende las tensiones que actúan en las mismas.

Aportes científicos

El principal aporte científico de este estudio es contribuir con dicha metodología a caracterizar el comportamiento de las traviesas analizadas en sus etapas de trabajo; así como recopilar información para la creación de herramientas de cálculo automatizadas que prevean el fallo de los durmientes ante posibles variaciones en la calidad o tipo de materiales, como pudiera ser el cambio en la resistencia del hormigón o el tipo de acero empleado.

Organización del informe

El presente informe posee la siguiente estructura:

- Portada
- Resumen
- Introducción
- Capítulo I: Fundamentos para la determinación de pérdidas en el hormigón pretensado.
- Capítulo II: Características y condiciones de fabricación de los durmientes de la EIIF. Experimento de comparación
- Capítulo III: Resultados del experimento comparativo. Pérdidas de pretensado en los durmientes
- Conclusiones y recomendaciones
- Referencias bibliográficas

Capítulo I. Fundamentos para la determinación de pérdidas en el hormigón pretensado

1.1 Introducción:

Sea cualquiera la técnica de pretensado que se emplee en el proceso constructivo y en particular con independencia de que se empleen armaduras pretensas o postesas, es inevitable que se produzcan pérdidas apreciables en la tensión de las armaduras y por tanto en la fuerza de pretensado. Ello conduce en definitiva a una evolución decreciente del pretensado en el tiempo, que debe ser considerada en los cálculos. (Calavera, 2005)

Es por esto que en el presente capítulo se establece el marco teórico conceptual en torno a la determinación de pérdidas en elementos pretensados, sirviendo como base para calcular las mismas, de la forma más exacta posible, en las traviesas producidas en la EIIF.

1.2 Pérdidas de la fuerza de pretensado. Clasificación

La magnitud de la fuerza aplicada a la armadura de pretensado mediante los equipos de tesado, llamada fuerza de gateo se modifica a lo largo del elemento durante y después del estiramiento, lo mismo que de una a otra sección. En realidad se trata de una variable cuya magnitud depende del tiempo en que se quiera evaluar. Se distinguen básicamente dos tipos de variación de la fuerza; la primera debida a las deformaciones que experimenta el acero bajo la acción de las cargas exteriores, y la segunda de las posibles variaciones se conoce como pérdida de la fuerza de pretensado.

Las pérdidas se deben a la disminución de la tensión que sufre el acero pretensado producto del propio proceso de tesado, la fricción entre el acero y el conducto por el que este viaja en el caso del postesado, así como por las deformaciones reológicas que tienen lugar tanto en

Capítulo I: Fundamentos para la determinación de pérdidas en el hormigón pretensado

el acero, como en el hormigón. Estas pérdidas pueden llegar a ser significativas y justifican la necesidad de aceros con un alto límite elástico, de manera que se pueda lograr el pretensado permanente deseado una vez que se desarrollen tales pérdidas de tensión. Su evaluación es uno de los ejercicios de mayor interés y complejidad durante el proyecto de piezas pretensadas.

Las pérdidas de pretensado se pueden clasificar en instantáneas y diferidas. Se deben estudiar con el fin de evaluarlas de modo que para cualquier etapa de la vida del elemento, pueda determinarse la fuerza de pretensado (o la tensión) que está actuando sobre la sección de hormigón en ese instante. Se puede entonces evaluar el esquema de tensión a que estará sometido el acero de preesfuerzo y el propio hormigón en ese instante, y compararlo con los valores límites definidos por los Reglamentos para cada material y estado de carga que se analice.

Las pérdidas suelen expresarse lo mismo en términos de tensión que de fuerza, llegando a estas últimas con solo multiplicar las tensiones por el área de la sección del refuerzo. En realidad se manifiestan de forma diferente y con características propias para cada uno de los tipos de técnicas que se emplee: postesado o pretesado.

1.2.1 Pérdidas instantáneas

Ocurren durante el proceso de estiramiento de la armadura activa e inmediatamente después de la transferencia de la fuerza de pretensado a la pieza de hormigón. Son de muy diverso origen y dependen en lo fundamental del tipo de pretensado que se considere: pretesado o postesado.

Para el primero de estos dos casos, las características del proceso tecnológico que se siga en la Planta, definen el tipo de pérdida que debe ser cuantificada, mientras que para el postesado las más frecuentes tienen lugar debido a las siguientes razones:

- a) Pérdidas por rozamiento o fricción a lo largo de los conductos, o de las sillas de apoyo si se tratase de un pretensado no adherente.
- b) Pérdidas por asentamiento o penetración de anclajes.
- c) Pérdidas por acortamiento elástico instantáneo del hormigón.

Capítulo I: Fundamentos para la determinación de pérdidas en el hormigón pretensado

Estas dos últimas también tienen lugar en el caso de pretensado.

1.2.2 Pérdidas diferidas

Las pérdidas diferidas tienen lugar con el tiempo (cronológicas) y se evalúan en el espacio de tiempo transcurrido entre los instantes t_1 y t_2 de inicio y fin, respectivamente, del período que se esté considerando. Son más intensa en los primeros momentos transcurridos luego de la transferencia, y van convergiendo a un valor hasta que llegan prácticamente a disiparse. Algunos autores consideran que son más intensa en los 2 ó 3 primeros meses que transcurren a partir de la transferencia de la fuerza de pretensado a la pieza.

Las pérdidas diferidas que tienen lugar son, en esencia, las siguientes:

- d) Pérdida por fluencia del hormigón.
- e) Pérdida por retracción del hormigón luego del anclaje.
- f) Pérdida por relajación del acero luego de su anclaje.

Durante el cálculo se desprecia la influencia de la caída de tensión o de la sobretensión que tienen lugar por la deformación que experimenta el acero al actuar las cargas exteriores, y sólo se considera la variación que experimenta la tensión producto de las pérdidas.

Reconocida la existencia de las Pérdidas, si al estirar el acero se aplica la fuerza de gateo P_j , una vez que se desarrollen todas las pérdidas iniciales (ΔP_{inic}), esta fuerza cae al valor P_0 llamada fuerza inicial de pretensado, que no es igual en todas las secciones porque depende de la pérdida por fricción (en el caso de elementos postesados). Si luego se desarrollan las pérdidas diferidas totales (ΔP_{dif}), entonces la fuerza en el acero se estabiliza en la magnitud P_e , llamada fuerza efectiva, que es definitivamente la que se desea exista de manera permanente en cada sección que se considere. (Hernández Caneiro and Hernández Santana, 2016)

Capítulo I: Fundamentos para la determinación de pérdidas en el hormigón pretensado

1.3 Pérdida por fricción

Las pérdidas teóricas debidas al rozamiento entre las armaduras que se estiran y las vainas o conductos por las que ellas viajan (caso del postesado), dependen de la variación angular total α_{px} que presente el trazado del tendón entre la sección considerada y el anclaje activo que condiciona la tensión en dicha sección; de la distancia L_{px} entre esas dos secciones y de los coeficientes μ_p y K de rozamiento en curva y en recta (rozamiento parásito), respectivamente. Estas pérdidas se estiman a partir de la fuerza de tesado P_j que aplica el gato.

En el caso del postesado es evidente que al estirar por uno o ambos extremos, el acero entrará en contacto con el conducto por donde viaje, originándose una fuerza de fricción de sentido contrario a la que aplica el gato, y en consecuencia produciéndose una disminución (pérdida) de dicha fuerza. (Hernández Caneiro and Hernández Santana, 2016) Para el hormigón pretensado esta pérdida no ocurre pues la armadura se tensa inicialmente, antes del vertido de la mezcla, y si se diera el caso de que los moldes sean de grandes dimensiones y posean una longitud de contacto con los aceros considerable estas pérdidas aún se pueden corregir con anterioridad al vertido del hormigón.

La pérdida total por fricción (ΔP_{FR}) según la ACI 318: 14 y la EHE: 08 se determina de la siguiente manera:

$$\Delta P_{FR} = P_j [1 - e^{\mu_p \alpha_{px} + K l_{px}}]$$

Donde:

l_{px} : Distancia desde el extremo del gato de tesado hasta el punto bajo consideración en el que se desea evaluar la pérdida por fricción en postesado (m).

K : Coeficiente de fricción por desviación accidental del acero postesado (m^{-1}).

α_{px} : Cambio angular total de la trayectoria del tendón desde el extremo del gato hasta cualquier punto bajo consideración (rad).

μ_p : Coeficiente de fricción por curvatura en postesado

Capítulo I: Fundamentos para la determinación de pérdidas en el hormigón pretensado

P_j : Fuerza de gateo. Es la fuerza que aplica el gato durante el tesado.

$$P_j = f_{pj} A_p$$

Siendo:

f_{pj} : Tensión de gateo.

A_p : Área del acero pretensado.

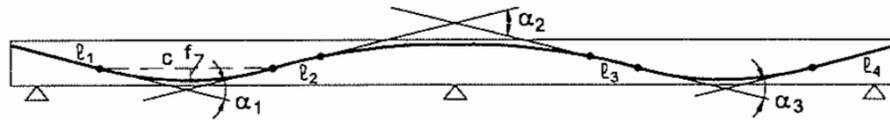


Figura 1.1 Caso general del trazado de un tendón. Fuente:(Calavera, 2005)

En la figura 1.1 se indica un caso general de trazado de un tendón con tramos rectos y curvos. En la misma se puede apreciar como determinar los α_i .

De manera más simple si la relación de flecha a cuerda es inferior a 0.045, se puede considerar $\alpha = \frac{8f}{c}$. (Calavera, 2005)

Según (Caneiro and Santana, 2016) cuando se cumpla que $\mu_p \alpha_{px} + Kl_{px} \leq 0.3$, ΔP_{FR} puede calcularse mediante la expresión simplificada:

$$\Delta P_{FR} = P_j (\mu_p \alpha_{px} + Kl_{px}) / (1 + \mu_p \alpha_{px} + Kl_{px})$$

La NC 207: 2003 refleja una fórmula análoga a la de la ACI y la EHE, solo que en función de tensiones

$$\sigma_1 = \sigma_{poi} \left[1 - e^{-(\mu\alpha + KX)} \right]$$

Donde:

σ_1 Pérdida de tensión instantánea por rozamiento

σ_{poi} Tensión de gateo.

μ Coeficiente de rozamiento aparente de la armadura de pretensado contra su vaina

Capítulo I: Fundamentos para la determinación de pérdidas en el hormigón pretensado

α Suma de los valores absolutos de las desviaciones sucesivas, en radianes, de la armadura de pretensado en la distancia X (cualesquiera que sean las direcciones).

K Coeficiente de pérdida de tensión por unidad longitud (coeficiente de pérdida lineal).

A continuación, en la tabla 1.1 se muestran los valores de μ_p más utilizados en Cuba:

Tabla 1.1 Valores de μ_p más utilizados en Cuba. Fuente: NC 207: 2003

Tipo de conducto	Tipo de armadura	Estado de la superficie de las armaduras	
		limpiar sin lubricar	lubricada ligeramente (aceite soluble)
vaina de plástico	Alambre o torón aislado	0,27	0,23
	Cables	0,30	0,26
vaina de acero	Alambre o torón aislado	0,19	0,15
	Cables	0,22	0,18
conducto preformado	Alambre o torón aislado	0,34	0,30
	Cables	0,37	0,33

Los efectos parásitos que se evalúan mediante el coeficiente K , tanto en las partes rectas como en las partes curvas, dependen de la rigidez de las vainas, de la distancia y de la forma de fijación de sus apoyos, de la rigidez de las armaduras de pretensado, del cuidado puesto para la colocación de éstas y de las precauciones tomadas al hormigonar. El parámetro más importante que caracteriza la rigidez de las vainas es su diámetro. Por consiguiente pueden tomarse en consideración, en primera aproximación, los valores de los efectos parásitos expuestos en la tabla 1.2.

Capítulo I: Fundamentos para la determinación de pérdidas en el hormigón pretensado

Tabla 1.2 Valores de los efectos parásitos. Fuente: NC 207:2003

Diámetro interior de la vaina mm	< 30	40	50	60	70
$\Delta\alpha = \frac{K}{\mu}$	0,016	0,012	0,009	0,007	0,006

1.4 Pérdida por deslizamiento de las cuñas en los aparatos de anclaje

Esta pérdida se presenta en los elementos postesados cuando la fuerza de pretensado es transferida desde el gato al dispositivo de anclaje, y tiene lugar producto del asentamiento que experimenta la parte móvil del aparato de anclaje, basado generalmente en el efecto de cuña. No obstante, en los elementos pretesados, al cortar los tendones se produce también un acortamiento instantáneo que reduce su longitud, originando cambios en su tensión en aquellas secciones muy próximas a los extremos.

En el caso de esta pérdida se deben distinguir dos situaciones diferentes: si el tesado se realiza por ambos extremos (ambos anclajes son activos), o sólo por un extremo (un anclaje es activo y el otro pasivo). Si la situación es la primera, en ambos anclajes se produce asentamiento y como tal debe ser considerado, sin embargo, cuando uno de los anclajes es pasivo, es cierto que mientras se estira el tendón, las cuñas de este anclaje experimentan también un asentamiento, pero que no se traduce en pérdida porque es simultáneo con el proceso de estiramiento de la armadura. En definitiva, para los fines de cálculo se debe considerar sólo el asentamiento de los anclajes activos, que son los que producen la pérdida en tensión producto del acortamiento sufrido por el tendón.

Al concluir el proceso de tesado y anclar el tendón, el deslizamiento inevitable del anclaje hace que el acero se recoja, invirtiendo su sentido de recorrido si se la comparara con el que siguió mientras se estiraba. Para este nuevo recorrido volverán a aparecer fuerzas de fricción, pero ahora de sentido opuesto a las que aparecieron antes, dando lugar a

Capítulo I: Fundamentos para la determinación de pérdidas en el hormigón pretensado

una nueva pérdida de tensión en la armadura, que será más intensa en la misma sección de anclaje porque ella acumula toda la fuerza de fricción que se originó al asentarse el anclaje, y que irá disminuyendo en secciones hacia el interior del elemento, las cuales acumulan menos longitud de fricción y por ende de pérdida.

El valor de la pérdida por la penetración de las cuñas en los extremos de los elementos se puede determinar mediante la siguiente expresión.

$$\Delta P_{PA} = P_j \left(1 - e^{-2\mu_p X_c \left[\left(\frac{\alpha}{l} \right) + K \right]} \right)$$

Si se define X_c a la distancia a partir de la cual se disipa la pérdida producto del asentamiento del anclaje, pueden acontecer tres situaciones diferentes:

$$X_c < l/2$$

$$l/2 < X_c < l$$

$$X_c > l$$

Donde l es la longitud del elemento.

La variación de las tensiones producto de esta pérdida no es constante en todas las secciones, ocurre solo en la longitud X_c , que en algún caso especial pudiera llegar a la sección crítica o incluso, rebasarla. Por tal razón se hace necesario determinar dicha longitud con el interés de considerar o no dicha pérdida de tensión en la sección crítica. La longitud X_c se puede determinar mediante la siguiente expresión:

$$X_c = \sqrt{\frac{\Delta_a A_p E_p}{\mu_p P_j \left[\left(\frac{\alpha}{l} \right) + K \right]}}$$

Para determinar la longitud X_c dentro de la cual se produce esta pérdida, es necesario reconocer que la penetración del anclaje Δ_a coincide con la diferencia de alargamiento del tendón. (Caneiro and Santana, 2016)

La EHE: 08 propone como simplificación de lo expuesto en tendones rectos postesos de corta longitud, la pérdida de fuerza por penetración de cuñas, ΔP_2 , puede deducirse mediante la expresión:

Capítulo I: Fundamentos para la determinación de pérdidas en el hormigón pretensado

$$\Delta P_2 = \frac{a}{l} E_p A_p$$

Donde:

a Penetración de la cuña.

l Longitud total del tendón recto.

E_p Módulo de deformación longitudinal de la armadura activa.

A_p Sección de la armadura activa.

En el caso de las armaduras pretensas donde no existen elementos de anclaje el efecto Poisson es el mecanismo más importante para que se produzca el anclaje a lo largo de una determinada longitud sin que exista ningún elemento mecánico adicional (la corruga). Esto es debido a que la armadura bajo tensión experimenta una reducción de su sección transversal. Cuando el alambre o cordón de pretensado se corta la tensión en los extremos se anula lo que implica un aumento de su sección transversal, que ayuda a mejorar el anclaje (ver figura 1.2).



Fig. 1.2. Longitud de transición. Fuente:(Hernández and Gil, 2008)

En el proceso de destesado, descrito en el párrafo anterior, el alambre o cordón pasa de una tensión 0, en el extremo del elemento, a la tensión inicial de pretensado P_j/A_p , a una determinada distancia del extremo. La longitud necesaria para alcanzar el valor P_j se conoce como longitud de transferencia.(Hernández and Gil, 2008) Según el método del ACI 318: 14 la longitud de transferencia se puede suponer que es 50 veces el diámetro nominal para torones ó 100 diámetros para alambres. O bien se puede determinar por diferentes métodos,

Capítulo I: Fundamentos para la determinación de pérdidas en el hormigón pretensado

según plantean (Caneiro and Santana, 2016) uno de los más completos es el que sugiere el MODEL CODE CEB-FIP, que la define de la manera siguiente:

$$l_{tr} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \frac{f_{pj}}{f_{pu}} (l_{pd})$$

Siendo:

- α_1 :
 - 1,00 para transferencia lenta del pretensado
 - 1,25 para transferencia brusca (corte de la armadura)
- α_2 :
 - 1.00 para el cálculo a esfuerzo cortante
 - 0.5 para el cálculo de la armadura transversal en la zona de anclaje
- α_3 :
 - 0,7 para alambres
 - 0,5 para torones
- f_{pj} tensión de pretensado inicial suministrada por el gato.
- $l_{pd} = \frac{a_p}{p} \left(\frac{1.5}{n_1 n_2} \right) \frac{f_{py}}{f'_{cj}}$
- l_{pd} : Longitud básica de anclaje del alambre
- a_p : Área del alambre de mayor diámetro que se emplee en el elemento
- p : Perímetro adherente del alambre de mayor diámetro que se emplee en el elemento
- f'_{cj} : Resistencia a compresión del hormigón en el momento del destense.
- n_1 :
 - 1,4 para alambres
 - 1,2 para torones
- n_2 :
 - 1,0 para alambres situados a menos de 250mm del fondo de la pieza o a más de 300mm por debajo de la cara superior de hormigonado
 - 0,7 para las demás posiciones

1.5 Pérdida por acortamiento elástico instantáneo del hormigón

La pérdida por acortamiento elástico instantáneo del hormigón se debe a que al transferirse la fuerza de pretensado a la sección, los cables experimentan un acortamiento producto de la deformación instantánea que sufre el hormigón. Se presenta lo mismo en los elementos pretesados que postesados. En este último caso el proceso de estiramiento de los cables generalmente es en sucesión, es decir, no simultáneo, y esto hace que el acortamiento sea acumulativo, de modo que los primeros cables estirados se acortan más que los últimos. No obstante, a continuación se ilustrarán los siguientes casos:

- Tendones rectos, anclados todos simultáneamente.
- Tendones rectos tesados y anclados en etapas sucesivas.

1.5.1 Tendones rectos, anclados todos simultáneamente

Cuando todos los tendones son tesados y anclados al unísono, a nivel del centroide de la armadura (c.g.s) se produce un acortamiento que se traduce en una pérdida de tensión. Teóricamente este acortamiento se puede suponer igual al del hormigón en la fibra que se halla al mismo nivel del c.g.s, o sea, para $y = e_0$

En realidad esta compatibilización de deformaciones no se alcanza tan perfectamente a nivel de sección porque como los conductos aún no se han inyectado, la adherencia es imperfecta. Mucho menos se alcanzará en el caso de armadura no adherente cuando en ocasiones los tendones se engrasan antes de ser enhebrados.}JJ Siendo totalmente diferente en el caso del pretesado, cuando en el momento del destense ya se ha logrado la adherencia y se tendrá una correcta compatibilización de deformaciones.

La compatibilidad entre las deformaciones del acero a nivel de su c.g.s, y del hormigón que le rodea, permite escribir la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_{p(da)} = \varepsilon'_{c(da)} \Rightarrow \varepsilon_{p(at)} - \varepsilon_{p(dt)} = \varepsilon'_{c(da)}$$

Siendo:

Capítulo I: Fundamentos para la determinación de pérdidas en el hormigón pretensado

$\varepsilon_{p(da)}$ Deformación de la armadura después del anclaje, o sea, actuando P_{j3}

$\varepsilon'_{c(da)}$ Deformación en el hormigón a nivel del c.g.s después del anclaje, o sea, actuando P_{j3} .

$\varepsilon_{p(at)}$ Deformación de la armadura antes de la transferencia, o sea, actuando P_{j2} .

$\varepsilon_{p(dt)}$ Deformación de la armadura después de la transferencia, o sea, actuando P_{j3} .

$$P_{j2} = P_j - \Delta P_{FR} - \Delta P_{PA}$$

Es evidente la condición:

$$\frac{\sigma_{p(at)}}{E_p} - \frac{\sigma_{p(dt)}}{E_p} = \frac{\sigma'_{c(da)}}{E_{cj}}$$

$$\therefore \frac{P_{j2}}{A_p E_p} - \frac{P_{j3}}{A_p E_p} = \frac{P_{j3}}{A_c E_{cj}} \left[1 + \left(\frac{e_0}{r} \right)^2 \right]$$

Considerando $\rho_p = A_p/A_c$ y $n_p = E_p/E_{cj}$

Sustituyendo y despejando P_{j3} se obtiene:

$$P_{j3} = \frac{P_{j2}}{1 + n_p \rho_p \left[1 + \left(\frac{e_0}{r} \right)^2 \right]}$$

Finalmente la pérdida que se procure es $\Delta P_{ES} = P_{j2} - P_{j3}$, se llega a demostrar que

$$\Delta P_{ES} = P_{j2} \left(\frac{n_p \rho_p \left[1 + \left(\frac{e_0}{r} \right)^2 \right]}{1 + n_p \rho_p \left[1 + \left(\frac{e_0}{r} \right)^2 \right]} \right)$$

Como la fuerza de pretensado se transfiere a la sección neta de hormigón los términos A_c , e_0 y r deben evaluarse considerando la sección neta de hormigón. (Caneiro and Santana, 2016)

En la NC 207: 2003 se plantea que para armaduras pretensadas, la pérdida de tensión por deformación instantánea del hormigón, al ser liberadas las armaduras de sus anclajes (transferencia de la fuerza de tesado), se evaluará para el centro de gravedad de estas armaduras, según la fórmula:

Capítulo I: Fundamentos para la determinación de pérdidas en el hormigón pretensado

$$\sigma_3 = \sigma'_{bp} \frac{E_p}{E'_{bj}}$$

Donde:

E'_{bj} Módulo de elasticidad instantáneo del hormigón para la edad j , correspondiente al momento de la puesta en carga de las armaduras.

$E'_{bj} = 4700 \sqrt{f'_{cj}}$, siendo f'_{cj} la resistencia característica del hormigón en la transferencia.

σ'_{bp} Tensión de compresión a nivel del centro de gravedad de las armaduras, producida por la fuerza de tracción inicial, disminuida por la pérdida de rozamiento y penetración del anclaje.

$$\sigma'_{bp} = \frac{P_{j2}}{A_c} + \left(\frac{e_0}{r}\right)^2$$

1.5.2 Tendones rectos tesados y anclados en etapas sucesivas

Cuando no es posible realizar al unísono el tesado de todos los tendones, al estirar y anclar el tendón n , los $n-1$ que ya estaban anclados experimentan una ligera caída de tensión debido al nuevo acortamiento que les ocasiona el acortamiento del hormigón que los rodea, cuando se transfiere la fuerza del tendón n .

Se considera que los n tendones poseen en el instante anterior a su anclaje la misma tensión una vez estirados, o sea, $\sigma_{p(at)}$ debido a la fuerza P_{j2} (sólo han tenido lugar las pérdidas por rozamiento y asentamiento de anclajes, la transferencia es inmediata), aunque posean diferentes excentricidades.

Entonces el tendón j ya anclado y con su excentricidad e_j , experimenta una caída de tensión al anclar después el tendón k con su excentricidad e_k , debido al acortamiento que se registra en el hormigón a la profundidad del tendón j .

Esta caída de tensión puede considerarse uniformemente repartida entre los n tendones ya tesados. Si se deseara conocer la caída en tensión que se experimenta en un tendón ya anclado al anclar sucesivamente los siguientes, se procedería de la manera siguiente:

Capítulo I: Fundamentos para la determinación de pérdidas en el hormigón pretensado

$$\Delta P_{ES} = \left(\frac{n_p}{n^2}\right) \rho_p P_{j2} \sum_{j=1}^n \left[(n-j) + \frac{e_j}{r^2} [e_{(j+1)} + e_{(j+2)} + e_{(j+3)} + \dots + e_n] \right]$$

Si se trata de tendones que poseen todos la misma excentricidad, la expresión anterior se simplifica, dado que para este caso se tiene $e_{(j+1)} = e_{(j+2)} = e_{(j+3)} = e_n = e_0$. Entonces:

$$\Delta P_{ES} = n_p \rho_p P_{j2} \left[1 + \left(\frac{e_0}{r}\right)^2 \right] \left(\frac{n-1}{n}\right)$$

En la NC 207:2003 se presenta una simplificación para cuando las tensiones de compresión al nivel del baricentro de la armadura en fase de tesado sean apreciables, el valor de esta pérdida, se podrá calcular por la siguiente expresión:

$$\sigma_3 = \sigma'_{bp} \frac{n-1}{2n} \frac{E_p}{E'_{bj}}$$

Donde:

n Número de etapas de tesado

La EHE: 08 de forma paralela expresa que cuando las tensiones de compresión al nivel del baricentro de la armadura activa en fase de tesado sean apreciables, el valor de estas pérdidas, ΔP_3 , se podrá calcular, si los tendones se tesan sucesivamente en una sola operación, admitiendo que todos los tendones experimentan un acortamiento uniforme, función del número n de los mismos que se tesan sucesivamente, mediante la expresión:

$$\Delta P_3 = \sigma_{cp} \frac{n-1}{2n} \frac{A_p E_p}{E_{cj}}$$

Donde:

$$\Delta P_3 = \sigma_{cp} \frac{A_p E_p}{E_{cj}}$$

A_p Sección total de la armadura activa.

σ_{cp} Tensión de compresión, a nivel del centro de gravedad de las armaduras activas, producida por la fuerza $P_j - \Delta P_1 - \Delta P_2$ y los esfuerzos debidos a las acciones actuantes en el momento del tesado.

Capítulo I: Fundamentos para la determinación de pérdidas en el hormigón pretensado

E_p Módulo de deformación longitudinal de las armaduras activas.

E_{cj} Módulo de deformación longitudinal del hormigón para la edad j correspondiente al momento de la puesta en carga de las armaduras activas.

$$E_{cj} = \beta_E E_i$$

Siendo:

$$E_j = 8500 \sqrt[3]{f'_{cm,j}} \quad (f'_{cm,j}, \text{ resistencia media a compresión del hormigón, en MPa})$$

Módulo de deformación longitudinal secante a los j días, siempre que la tensión en servicio no sobrepase de $0,4f'_{c,j}$).

$$\beta_E = 1,30 - f'_{cm,j}/400 \geq 1,175 \quad (f'_{cm,j} \text{ en MPa}).$$

Nótese que tanto las expresiones como el campo de aplicación que se expresa en la NC 207: 2003 y en la EHE: 08 son homólogos, solo que en la EHE se trabaja en términos de fuerza y en la NC de tensiones; la principal diferencia radica en los módulos de deformación que ofrecen las dos normas.

1.5.3 Pérdidas por acortamiento elástico según la ACI 318: 14

Este método simplifica favorablemente el cálculo de esta pérdida y propone una formulación que depende del tipo de pretensado que se tenga, ya sea adherente o no adherente. A continuación se ofrecen estos criterios:

1.5.3.1 Para elementos con cables adherentes:

$$ES = K_{es} E_s \frac{f_{cir}}{E_{ci}}$$

$$\Delta P_{ES} = ES * A_p$$

Donde:

E_{ci} Módulo de deformación del hormigón para la transferencia.

$$E_{ci} = 57000 \sqrt{f'_{ci}}, \quad (f'_{ci} \text{ en libras por pulgada cuadrada}).$$

Capítulo I: Fundamentos para la determinación de pérdidas en el hormigón pretensado

Al realizar una conversión de libras por pulgadas cuadradas a MPa se puede tomar aproximadamente como:

$$E_{ci} = 4700\sqrt{f'_{ci}}, (f'_{ci} \text{ en MPa})$$

Se puede apreciar que este módulo de deformación es igual que el planteado por la NC 207: 2003, lo que sucede es que la NC toma el módulo de deformación del hormigón haciendo referencia al ACI.

$K_{es} = 1,0$ Para elementos pretesados

$K_{es} = 0,5$ Para elementos postesados en los cuales los cables se tesan en orden secuencial hasta una misma tensión.

Para otros procedimientos de postesado el valor de K_{es} puede variar entre 0 y 0,5.

f_{cir} Tensión de compresión media en el hormigón, a lo largo de la longitud del elemento en coincidencia con el baricentro del acero de pretensado, inmediatamente después de aplicar el pretensado al hormigón.

$$f_{cir} = k_{cir}f_{cpi} - f_g$$

$k_{cir} = 1,0$ Para elementos postesados.

$k_{cir} = 0,9$ Para elementos pretesados

f_{cpi} Tensión en el hormigón, en coincidencia con el baricentro del acero de pretensado, debida a la fuerza de pretensado en los cables en la ubicación crítica del tramo luego de efectuar las reducciones debidas a las pérdidas por fricción y en los dispositivos de anclaje, pero antes de efectuar las reducciones debidas a las pérdidas diferidas (P_{pi} según el ACI).

$$P_{pi} = P_j - \Delta P_{FR} - \Delta P_{PA}$$

$$f_{cpi} = \left(\frac{P_{pi}}{A_c}\right) + \left(\frac{P_{pi}}{I}\right)(e_0)^2$$

f_g Tensión en el hormigón, en coincidencia con el baricentro del acero de pretensado, debida al peso de la estructura en el momento en que se aplica el pretensado.

Capítulo I: Fundamentos para la determinación de pérdidas en el hormigón pretensado

$$f_g = \left(\frac{M_0}{I}\right) e_0$$

1.5.3.2 Para elementos con cables no adherentes:

$$ES = K_{es} E_s \frac{f_{cpa}}{E_{ci}}$$

$$\Delta P_{ES} = ES * A_p$$

Donde:

f_{cpa} Tensión de compresión media en el hormigón a nivel del centroide del acero pretensado, a lo largo de la longitud del elemento, e inmediatamente después de transferir el pretensado.

1.6 Pérdidas diferidas

Seguidamente del anclaje de los tendones, y del acortamiento elástico instantáneo del hormigón, la retracción de este y su fluencia bajo la acción del pretensado y de las otras acciones aplicadas producen acortamientos en la pieza, que a su vez originan pérdidas de alargamiento en el tendón y por tanto una reducción de la fuerza de pretensado.

Para tendones adheridos, las pérdidas debidas a retracción y fluencia deben calcularse a partir de las deformaciones de la fibra de la sección de hormigón a nivel del centroide del refuerzo activo.

Además de lo anterior se tiene que considerar la pérdida de tensión y por tanto de pretensado, producida por la relajación de la armadura. (Calavera, 2005)

Se puede recurrir a varios modelos para evaluar cada una de estas pérdidas, unos más refinados que otros. Los Reglamentos tienden a dar expresiones más simples aunque con determinadas limitaciones de cara a su generalización. Se exponen a continuación las expresiones que propone el ACI 318: 14, la EHE: 08 y la NC 207:2003 para la evaluación de las pérdidas de tensión que tienen lugar a partir del instante en que se transfiere la fuerza de pretensado a la pieza.

Capítulo I: Fundamentos para la determinación de pérdidas en el hormigón pretensado

1.6.1 Método de la EHE: 08

La fluencia del hormigón y la relajación del acero están influenciadas por las propias pérdidas y, por lo tanto, resulta imprescindible considerar este efecto interactivo.

Esta norma expresa que siempre que no se realice un estudio más detallado de la interacción de estos fenómenos, las pérdidas diferidas pueden evaluarse de forma aproximada de acuerdo con la expresión siguiente:

$$\Delta P_{dif} = \frac{n\varphi(t, t_0)\sigma_{cp} + E_p \varepsilon_{cs}(t, t_0) + 0,80\Delta\sigma_{pr}}{1 + n \frac{A_p}{A_c} \left(1 + \frac{A_c y_p^2}{I_c}\right)} * A_p$$

Donde:

- y_p Distancia del centro de gravedad de las armaduras activas al centro de gravedad de la sección.
- σ_{cp} Tensión en el hormigón en la fibra correspondiente al centro de gravedad de las armaduras activas debida a la acción del pretensado, el peso propio y la carga muerta.
- A_c Área de la sección de hormigón.
- I_c Inercia de la sección de hormigón.
- χ Coeficiente de envejecimiento. Simplificadamente, y para evaluaciones a tiempo infinito, podrá adoptarse $\chi = 0.80$.
- n Coeficiente de equivalencia. $n = E_p/E_c$
 $E_c = 8500 \sqrt[3]{f'_{cm}}$
- $\varphi(t, t_0)$ Coeficiente de fluencia para una edad de puesta en carga igual a la edad del hormigón en el momento del tesado (t_0)

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \cdot \beta_c(t, t_0)$$

Siendo:

- $\beta_c(t, t_0)$ Coeficiente de desarrollo de la fluencia en el tiempo

Capítulo I: Fundamentos para la determinación de pérdidas en el hormigón pretensado

$$\beta_c(t, t_0) = \left[\frac{(t - t_0)}{\beta_H + (t - t_0)} \right]^{0,3}$$

- t Tiempo en días en que se desea medir las pérdidas diferidas
- t_0 Tiempo en días en que se produjo la transferencia del pretensado a partir del momento del hormigonado del elemento. Si la temperatura ambiente en este período es diferente de 20°C se hará necesario realizar correcciones en t_0 , las mismas se harán mediante la expresión:

$$t_0 = t_r \left[1 + \frac{9}{2 + (t_r)^{1,2}} \right]^\alpha \geq 0,5 \text{ días}$$

Donde:

- α 1 para cementos de alta resistencia y endurecimiento rápido.
0 para cementos de endurecimiento normal o rápido.
-1 para cementos endurecimiento lento.

$$t_r = \sum_{i=1}^{i=n} (\Delta t_i) \cdot e^{-\left[\frac{4000}{273 + T_{(\Delta t_i)}} - 13,65 \right]}$$

En la que:

t_r Edad corregida.

Δt_i Tiempo durante el cual actúa la temperatura $T_{(\Delta t_i)}$

$T_{(\Delta t_i)}$ Temperatura en cada período Δt_i

$$\beta_H = 1,5e_f[1 + (0,012HR)^{18}] + 250 \leq 1500$$

Donde:

HR Humedad relativa (%).

e_f Espesor ficticio.

$$e_f = \frac{2A_c}{p_c}$$

Capítulo I: Fundamentos para la determinación de pérdidas en el hormigón pretensado

A_c Área bruta de la sección.

p_c Perímetro de la sección.

Si durante el período de aplicación de la carga la temperatura es distinta de 20°C, pero constante se tendrá que sustituir el coeficiente β_H por β_{HT} en la expresión para calcular $\beta_c(t, t_0)$, siendo:

$$\beta_{HT} = \beta_H \cdot \beta_T$$

$$\beta_T = e^{\left(\frac{1500}{273+T} - 5,12\right)}$$

T Temperatura durante el tiempo de aplicación de la carga (°C)

- φ_0 Coeficiente para la deformación por fluencia base.

$$\varphi_0 = \varphi_{HR} \cdot \beta_{(f'_{cm})} \cdot \beta_{(t_0)}$$

Donde:

$$\beta_{(t_0)} = \frac{1}{0,1 + (t_0)^{0,2}}$$

$$\beta_{(f'_{cm})} = \frac{16,8}{\sqrt{f'_{cm}}}$$

$$\varphi_{HR} = 1 + \frac{100 - HR}{9,9^3 \sqrt{e_f}}$$

Si durante el período de aplicación de la carga la temperatura es distinta de 20°C, pero constante se tendrá que sustituir el coeficiente φ_{HR} por $\varphi_{HR,T}$ en la expresión para calcular φ_0 , siendo:

$$\varphi_{HR,T} = e^{0,015(T-20)} + (\varphi_{HR} - 1)e^{0,015^5 \sqrt{(T-20)^6}}$$

- ε_{cs} Deformación de retracción que se desarrolla tras la operación de tesado

$$\varepsilon_{cs}(t, t_r) = \varepsilon_{cs0} \cdot \beta_s(t - t_r)$$

Donde:

- ε_{cs0} Coeficiente base de retracción.

Capítulo I: Fundamentos para la determinación de pérdidas en el hormigón pretensado

$$\varepsilon_{cs0} = \beta_{HR} [160 + \beta_{sc}(90 - f'_{cm(28)})] 10^{-6}$$

Siendo:

$$\beta_{HR} : \begin{cases} -1,55 \left[1 - \left(\frac{HR}{100} \right)^3 \right] & \text{para } 40\% < HR < 99\% \\ 0,25 & \text{para } HR \geq 99\% \end{cases}$$

$$\beta_{sc} : \begin{cases} 4 & \text{para cementos de endurecimiento lento} \\ 5 & \text{para cementos de endurecimiento normal o rápido} \\ 8 & \text{para cementos de alta resistencia y endurecimiento rápido} \end{cases}$$

Si la temperatura durante el desarrollo de la retracción es distinta a 20°C:

$$\varepsilon_{cs0} = (\beta_{rT}) \cdot \beta_{HR} [160 + \beta_{sc}(90 - f'_{cm(28)})] 10^{-6}$$

Siendo:

$$\beta_{rT} = 1 + \left(\frac{8}{103 - HR} \right) \left(\frac{T - 20}{40} \right)$$

- $\beta_s(t - t_r)$ Término que permite determinar el desarrollo de la retracción en el tiempo y viene dado por:

$$\beta_s(t - t_r) = \sqrt{\frac{(t - t_r)}{0,035e_f^2 + (t - t_r)}}$$

Siendo:

t Edad del hormigón en el momento en que se desea evaluar la retracción. No necesita corrección.

t_r Edad a la que comienza a manifestarse el fenómeno de la retracción que, para los curados habituales y a temperatura ambiente, se puede estimar en 1 día. No es necesario corregirlo.

Si la temperatura durante el desarrollo de la retracción es distinta a 20°C:

Capítulo I: Fundamentos para la determinación de pérdidas en el hormigón pretensado

$$\beta_s(t - t_r) = \sqrt{\frac{(t - t_r)}{\alpha_{rt} + (t - t_r)}}$$

Siendo:

$\alpha_{rt} = (0,035e_f^2)e^{-0,06(T-20)}$, el espesor ficticio en milímetros y la temperatura en grados Celsius.

- $\Delta\sigma_{pr}$ Pérdida por relajación a longitud constante. Puede evaluarse utilizando la siguiente expresión:

$$\Delta\sigma_{pr} = \rho_f \frac{P_{ki}}{A_p}$$

Siendo:

A_p El área total de las armaduras activas.

P_{ki} Es el valor característico de la fuerza inicial de pretensado, descontadas las pérdidas instantáneas.

ρ_f El valor de la relajación a longitud constante a tiempo infinito

$$\log \rho = \log \left(\frac{\Delta\sigma_p}{\sigma_{pi}} \right) = K_1 + K_2 \log t$$

Para determinar La relajación ρ del acero a longitud constante el fabricante del acero suministrará los valores de la relajación a 120 h y a 1000 h, para tensiones iniciales de 0,6, 0,7 y 0,8 de $f_{m\acute{a}x}$ a temperatura de $20 \pm 1^\circ\text{C}$ (figura 1.3) y garantizará el valor a 1000 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 1000000 de horas a falta de este dato.

Capítulo I: Fundamentos para la determinación de pérdidas en el hormigón pretensado

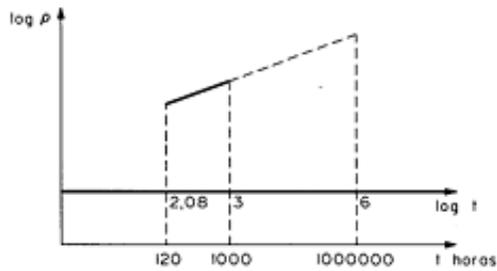


Figura 1.3 Relajación del acero en armaduras activas. Fuente:(EHE, 2008)

1.6.2 Método de la NC 207: 2003

1.6.2.1 Pérdida de tensión en el acero de pretensado por fluencia del hormigón

$$\sigma_4 = \varepsilon'_{fb,t} * E_p$$

Donde:

E_p Módulo de elasticidad del acero de pretensado en MPa.

$\varepsilon'_{fb,t}$ Deformación unitaria de fluencia en el hormigón a nivel del eje de la armadura de pretensado en el instante considerado, para tensiones no mayores a $0,4 R'_{bk}$

$$\varepsilon'_{fb,t} = \varepsilon'_b * \varphi * \varphi_t$$

Donde:

- ε'_b Deformación instantánea del hormigón a compresión

$$\varepsilon'_b = \sigma'_{bp} / E'_b$$

$$E'_b = 4700 \sqrt{R'_{bk}}$$

Siendo R'_{bk} la resistencia característica a compresión del hormigón a los 28 días de edad. Esta fórmula se puede utilizar desde un esfuerzo igual a cero hasta un esfuerzo a la compresión de $0.45R'_{bk}$.

Capítulo I: Fundamentos para la determinación de pérdidas en el hormigón pretensado

- φ_t Coeficiente reductor que permite calcular el valor de la fluencia del hormigón para un tiempo t . Para $t = \infty$, $\varphi_t = 1$

$$\varphi_t = 1 - \frac{1}{10^{\sqrt{m/16}}}$$

Donde:

m Número de meses transcurridos a partir de la aplicación de la carga

- φ Coeficiente de fluencia del hormigón (para $t = \infty$), dado por la expresión:

$$\varphi = (3.6 - 2.4\rho^2) \left[\frac{0.5 + 0.3e}{0.4 + e} \right] \frac{A}{500} \left[1 + 3 \frac{A}{c} \right] \left[1.72 - \log \sqrt{t_o} \right]$$

Donde:

ρ Humedad relativa, (en fracción de uno)

A Contenido de agua en la mezcla de hormigón, (kg/m^3)

c Contenido de cemento en la mezcla de hormigón, (kg/m^3)

t_o Tiempo transcurrido hasta la aplicación de las cargas, (en días)

e Espesor ficticio, (m).

Para los casos donde no se requiera una gran precisión en la determinación del coeficiente final de fluencia de un hormigón sometido a una tensión no mayor que $0,4 R'_{bkj}$, a la edad j de la puesta en carga, podrán considerarse como representativos los valores medios de la tabla 1.2.

Capítulo I: Fundamentos para la determinación de pérdidas en el hormigón pretensado

Tabla 1.2 Valores aproximados del coeficiente final de fluencia y retracción. Fuente:(NC-207, 2003)

Parámetros de fluencia y retracción	e(m)	
	≤0,2	≥0,6
Coeficiente de fluencia $\varphi \cdot \varphi_t$ – tiempo t_0 en días transcurridos hasta la puesta en carga:		
3 a 7	2,7	2,1
7 a 60	2,2	1,9
> 60	1,4	1,7
Deformación unitaria de retracción (ϵ'_{rb}) – edad del hormigón en días a partir de la cual se tiene en cuenta la influencia de la retracción:		
1 a 7	0,00026	0,00021
7 a 60	0,00023	0,00021
> 60	0,00016	0,00020
Para valores intermedios entre e = 0,2 m y e = 0,6 m, interpolar linealmente.		

Si una pieza está sometida a un sistema de cargas P_i aplicadas en intervalos de tiempo t_i , los coeficientes correspondientes a un tiempo t y a cada carga, al efecto de la deformación debida a la fluencia, vendrán dados por la fórmula:

$$\epsilon'_{fb,t} = \epsilon'_{bi} [\varphi_0 \varphi_t(t) + \varphi_1 \varphi_t(t-t_1) + \varphi_2 \varphi_t(t-t_2) + \dots]$$

Capítulo I: Fundamentos para la determinación de pérdidas en el hormigón pretensado

En la cual ε'_{bi} representa las deformaciones instantáneas debidas a cada carga y teniendo en cuenta el valor del módulo de deformación en ese tiempo considerado.

1.6.2.2 Pérdida de tensión en el acero de pretensado por retracción del hormigón

$$\sigma_5 = \varepsilon'_{rb} * E_p$$

Donde:

ε'_{rb} Deformación unitaria por retracción del hormigón que se produce a partir del anclaje de las armaduras hasta el instante considerado.

La deformación unitaria final ($t = \infty$), debido a la retracción (ε'_{rb}), puede calcularse por la fórmula siguiente:

$$\varepsilon'_{rb} = 0.001(1 - \rho) \left[\frac{0.5 + 0.3e}{0.4 + e} \right] \frac{A}{500} \left[1 + 3 \frac{A}{c} \right]$$

Donde:

ρ Humedad relativa, en fracción de uno

e Espesor ficticio, (m)

A Contenido de agua en la mezcla, (kg/m^3)

c Contenido de cemento en la mezcla, (kg/m^3).

Para conocer la deformación de retracción, para un tiempo t dado, se usará la fórmula siguiente:

$$\varepsilon'_{rb,t} = \varepsilon'_{rb} \frac{(1.5 + t)t}{(t^2 + 4t + 1)}$$

Donde t se expresará en meses.

Para los casos donde no se requiera una gran precisión en la determinación de la retracción final ($t = \infty$), podrán considerarse como representativos los valores medios de la tabla 1.2.

Capítulo I: Fundamentos para la determinación de pérdidas en el hormigón pretensado

1.6.2.3 Pérdida conjunta por fluencia y retracción del hormigón

Al considerar la suma de la pérdida por fluencia y retracción del hormigón, el valor resultante se tomará como los 2/3 de la pérdida conjunta, o sea:

$$\sigma_{4,5} = \frac{2}{3} * (\sigma_4 + \sigma_5)$$

1.6.2.4 Pérdida de tensión en el acero de pretensado por relajamiento del acero

Debido a la interdependencia de los efectos del relajamiento del acero y los de la retracción, la fluencia del hormigón y de las variaciones de la temperatura normal de servicio, "el relajamiento aparente" del acero en las obras es inferior a su "relajamiento puro".

Puede admitirse, en los casos corrientes, como valor del relajamiento aparente del acero, el que resulta de la expresión empírica siguiente:

$$\sigma_6 = \Delta\sigma_{p\infty} \left(1 - 3 \frac{\sigma_{4,5}}{\sigma_{poi}} \right)$$

Donde:

σ_{poi} Tensión inicial del acero, (MPa).

$\sigma_{4,5}$ Pérdida de tensión del acero debido al acortamiento diferido del hormigón por retracción y fluencia, (MPa).

$\Delta\sigma_{p\infty}$ Relajamiento puro del acero calculado, en Mpa.

El relajamiento puro del acero se evalúa a partir de los resultados experimentales dados por el fabricante para una temperatura de 20 °C y un valor de la tensión inicial, expresado en función de la resistencia característica de rotura de 0,8 R_{pk} .

Se admite:

a) Que el relajamiento evoluciona con el tiempo según una ley lineal en coordenadas doblemente logarítmicas, del tipo:

Capítulo I: Fundamentos para la determinación de pérdidas en el hormigón pretensado

$$\log \frac{\Delta \sigma_{p,t}}{\sigma_{poi}} = k_1 + k_2 \log t$$

Donde:

$\Delta \sigma_{p,t}$ Pérdida por relajamiento en el tiempo t (MPa)

σ_{poi} Tensión inicial (MPa)

Los valores de los coeficientes k_1 y k_2 dependen del tipo de acero de pretensado (Véase figura 1.4).

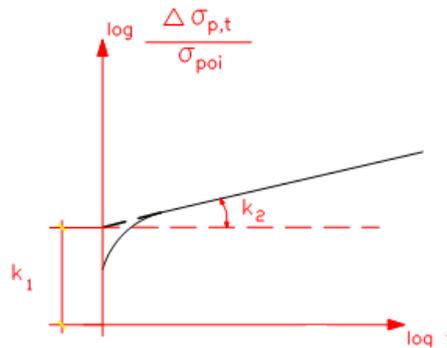


Fig. 1.4. Variación de relajamiento con el tiempo. Fuente:(NC-207, 2003)

b) Que el relajamiento varía con la tensión inicial según una ley parabólica.

Los valores de relajamiento se dan corrientemente para $t_1 = 120$ h y $t_2 = 1\ 000$ h. Generalmente puede admitirse un valor llamado "final" del relajamiento, doble del valor adquirido en el tiempo t_2 .

Para los aceros que hayan experimentado un tratamiento de "estabilización" (aceros de bajo relajamiento), que puede tener una acción más importante sobre la primera fase del fenómeno (término K_1) que sobre su fase posterior (término K_2), se aconseja tener en cuenta esta posibilidad mediante una fórmula del tipo:

$$\Delta \alpha_{p,\infty} = \Delta \alpha_{p,t} + K_3 \left[\Delta \alpha_{p,t} - \Delta \alpha_{p,120h} \right]$$

Con t tan grande como se pueda y en todo caso superior a 1 000 h.

Capítulo I: Fundamentos para la determinación de pérdidas en el hormigón pretensado

En ausencia de ensayos prolongados, se aconseja no tener valores inferiores a los que se indican en la tabla 1.3, y que corresponden a valores de la tensión inicial igual a $0,6 R_{pk}$; $0,7 R_{pk}$ y $0,8 R_{pk}$ y que se dan en porcentaje de esta tensión. O sea, $\Delta\sigma_{p,\infty} = \alpha * \sigma_{poi}$

Tabla 1.3. Valores de relajamiento α . Fuente:(NC-207, 2003)

$\frac{\sigma_{poi}}{R_{pk}}$	0,6	0,7	0,8
Aceros de relajamiento normal	0,045	0,08	0,12
Aceros de bajo relajamiento	0,01	0,025	0,045

1.6.3 Método del ACI 318: 14

1.6.3.1 Pérdida por flujo plástico del hormigón para elementos con tendones adherentes

$$CR = K_{cr} \frac{E_s}{E_c} (f_{cir} - f_{cds})$$

$$\Delta P_{CR} = CR * A_p$$

Donde:

$K_{cr} = 2,0$ Para elementos pretensados

$K_{cr} = 1,6$ Para elementos postesados

Para los elementos construidos de hormigón de agregados livianos y arena los anteriores valores de K_{cr} se deben reducir en 20 por ciento.

f_{cds} Tensión normal en el hormigón evaluada para la sección bruta y a nivel del centroide de la armadura pretensada, debida a todas las cargas permanentes sobrepuestas que se aplican al elemento una vez que se ha transferido el pretensado, y que originan después de que se produce el momento M_0 .

Capítulo I: Fundamentos para la determinación de pérdidas en el hormigón pretensado

$$f_{cds} = \frac{M_{2a} - M_0}{I} e_0$$

1.6.3.2 Pérdida por flujo plástico del hormigón para elementos con tendones no adherentes

$$CR = K_{cr} \frac{E_s}{E_c} f_{cpa}$$

1.6.3.3 Pérdida por retracción del hormigón

$$SH = 8.2 * 10^{-6} K_{sh} E_s \left(1 - 2.36 * 10^{-3} \frac{V}{S}\right) (100 - RH)$$

$$\Delta P_{SH} = SH * A_p$$

Donde:

$K_{sh} = 1.0$ Para elementos pretesados

K_{sh} Se toma de la tabla 1.4 para elementos postesados

Tabla 1.4 – Valores de K_{sh} para elementos postesados. Fuente:(ACI-318, 2014)

Tiempo, días*	1	3	5	7	10	20	30	60
K_{sh}	0,92	0,85	0,8	0,77	0,73	0,64	0,58	0,45
*Tiempo entre el final del curado húmedo y la aplicación del pretensado								

RH Humedad relativa ambiente media alrededor del elemento de hormigón (%)

V/S Relación volumen-superficie; generalmente se toma como el área bruta de la sección transversal del elemento de hormigón dividida por su perímetro. (mm)

Si se trabaja la humedad relativa en % y la relación volumen-superficie en mm el resultado de la expresión para determinar la pérdida por retracción del hormigón (SH) se obtendrá en la unidad de presión que se introduzca E_s .

Capítulo I: Fundamentos para la determinación de pérdidas en el hormigón pretensado

1.6.3.4 Pérdida por relajación de esfuerzo en el acero pretensado (relajación de los cables)

$$RE = [K_{re} - J(SH + CR + ES)]C$$

Donde los valores de K_{re} , J y C se toman de las tablas 1.5 y 1.6

Tabla 1.5 Valores de K_{re} y J . Fuente:(ACI-318, 2014).

Tipo de cable	K_{re} (psi)	J
Cordón o alambre aliviado de tensiones Grado 270	20.000	0,15
Cordón o alambre aliviado de tensiones Grado 250	18.500	0,14
Alambre aliviado de tensiones Grado 240 ó 235	17.600	0,13
Cordón de baja relajación Grado 270	5000	0,040
Alambre de baja relajación Grado 250	4630	0,037
Alambre de baja relajación Grado 240 ó 235	4400	0,035
Barra aliviada de tensiones Grado 145 ó 160	6000	0,05

Tabla 1.6 Valores de C . Fuente:(ACI-318, 2014)

f_{pj} / f_{pu}	Cordón o alambre aliviado de tensiones	Barra aliviada de tensiones, o cordón o cable de baja relajación
0,80		1,28
0,79		1,22
0,78		1,16

**Capítulo I: Fundamentos para la determinación de pérdidas en el
hormigón pretensado**

0,77		1,11
0,76		1,05
0,75	1,45	1,00
0,74	1,36	0,95
0,73	1,27	0,90
0,72	1,18	0,85
0,71	1,09	0,80
0,70	1,00	0,75
0,69	0,94	0,70
0,68	0,89	0,66
0,67	0,83	0,61
0,66	0,78	0,57
0,65	0,73	0,53
0,64	0,68	0,49
0,63	0,63	0,45
0,62	0,58	0,41
0,61	0,53	0,37
0,60	0,49	0,33

1.7 Conclusiones parciales

1. La revisión bibliográfica realizada arroja como resultado la existencia de tres métodos principales para la determinación de la pérdidas en elementos pretensados: La EHE: 08, La NC 207: 2003 y el ACI 318: 14.
2. Las pérdidas que ocurren en los elementos pretensados, como lo son las traviesas producidas por la EIIF, son la caída de tensión en la longitud de transferencia y el acortamiento elástico de manera instantánea, mientras que de forma diferida actúan la retracción y fluencia del hormigón, así como por la relajación del acero, trayendo consigo una caída de tensión en la armadura activa dependiente del tiempo.
3. En cuanto a las pérdidas instantáneas las mayores discrepancias entre las normas analizadas resultan ser la determinación del módulo de deformación del hormigón para el acortamiento elástico y las expresiones para estimar la longitud de transferencia.
4. Para las pérdidas diferidas cada método expone un tratamiento diferente mediante el uso de expresiones y coeficientes, basándose en diferentes parámetros como las propiedades de los materiales, la tensión en el hormigón al nivel del centroide de la armadura activa, la tensión de pretensado, la humedad relativa del ambiente o la técnica de pretensado que se utilice.

Capítulo II. Características y condiciones de fabricación de los durmientes de la EIIF. Experimento de comparación

Capítulo II. Características y condiciones de fabricación de los durmientes de la EIIF. Experimento de comparación

2.1 Introducción

En el presente capítulo se describen las principales características geométricas y de los materiales componentes de las traviesas que se fabrican en la EIIF, la italiana y la soviética. Se describe el proceso constructivo en la fabricación de las mismas, así como su almacenaje en la planta.

Se realiza el diseño de un experimento con el fin de determinar que método para la determinación de las pérdidas de pretensado, de los expuestos en el capítulo anterior, representa de la manera más precisa lo que realmente ocurre en los durmientes de esta empresa. Se describe el seguimiento que se les dio a los elementos tomados como muestra, así como los métodos que se emplearon para medir los acortamientos que estos experimentan tanto en la transferencia como de forma diferida debido a la fluencia y la retracción del hormigón.

2.2 Traviesas de hormigón pretensadas producidas en la EIIF.

Características geométricas y propiedades de los materiales

En las instalaciones de la EIIF se elaboran traviesas de hormigón pretensado empleando tecnología de procedencia soviética (Línea de Producción # 3) e italiana (Línea de Producción # 1), ambas utilizando la técnica de prefabricación en planta. Los elementos de ambas líneas presentan sección trapezoidal variable y los aceros utilizados son rectos de alto límite elástico (ALE) y baja relajación.

Capítulo II. Características y condiciones de fabricación de los durmientes de la EIIF. Experimento de comparación

- Resistencia característica a compresión del hormigón en el momento de transferir el tesado inicial.: $f'_{ci} = 35$ MPa
- Resistencia característica del hormigón a compresión a los 7 días de edad:
 $f'_{c\ 7días} = 42,5$ MPa.
- Resistencia característica del hormigón a compresión a los 28 días de edad:
 $f'_c = 50$ MPa

Para la elaboración de las mezclas de hormigón de la línea 1 se consta con tres dosificaciones diferentes, variando las cantidades de áridos según su granulometría y cantera de que provengan, pero se mantiene constante la relación agua/cemento, siendo la misma de 0,351, para 158 litros de agua y 450 kg de cemento por m³ de hormigón; para estas mezclas se utiliza el aditivo plastificante y acelerador del fraguado Dynamon SPC 345. Durante el año 2016, para un total de 55 lotes de hormigón se obtienen las resistencias a compresión, para las diferentes edades, que se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Resistencia a compresión del hormigón, año 2016. Línea de Producción # 1. Fuente: Elaboración propia.

Edad	Transferencia	7 Días	28 Días
Resistencia media	45 MPa	55 MPa	63 MPa
Desviación estándar	6,6 MPa	7,5 MPa	5,5 MPa
Resistencia Característica	36 MPa	45 MPa	55 MPa

Se puede comprobar que para el año 2016 se cumplió con lo estipulado, según proyecto, para las resistencias del hormigón para todas las edades, sin descartar que hubo algunos lotes donde no fue así. Es de vital importancia señalar que todas las resistencias mencionadas son en base a una probeta cúbica de 10 cm de lado, tanto los datos de proyecto como los resultados de los ensayos.

Propiedades del acero ALE empleado en la fabricación de las traviesas con tecnología Italiana:

Capítulo II. Características y condiciones de fabricación de los durmientes de la EIIF. Experimento de comparación

- Barras corrugadas de 2378 ± 2 mm de longitud. Ver figura 2.2.
- Módulo de elasticidad del acero de alto límite elástico $E_p = 205 \text{ GPa}$
- Resistencia máxima a tracción del acero pretensado: $f_{pu} = 1570 \text{ MPa}$
- Resistencia especificada a la fluencia del acero pretensado: $f_{py} = 1375 \text{ MPa}$
- Diámetro de la barra de acero pretensado: $d_b = 9,5 \text{ mm}$
- Relajación del 2,5% después de las 1000 horas de aplicada la carga, para una carga del 70% la de rotura y 20°C .

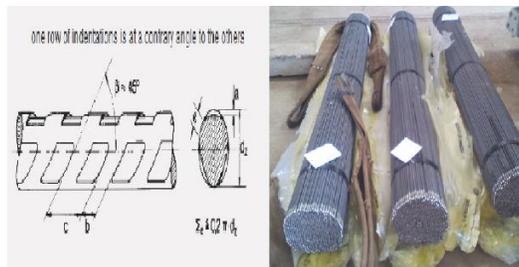


Figura 2.2 Barras corrugadas de acero empleadas en la Línea de Producción # 1. Fuente: Elaboración Propia.

2.2.2 Traviesa Soviética

Las traviesas soviéticas presentan, al igual que las italianas, una sección trapezoidal variable a lo largo de su longitud, destacándose también dos secciones fundamentales, una bajo carril y otra en la zona central, presentando mayores dimensiones la de bajo carril con respecto al centro debido a la misma razón que se explicara en la traviesa italiana, en la figura 2.3 se observa el plano de dichos elementos. (Alemán, 2016)

Capítulo II. Características y condiciones de fabricación de los durmientes de la EIIF. Experimento de comparación

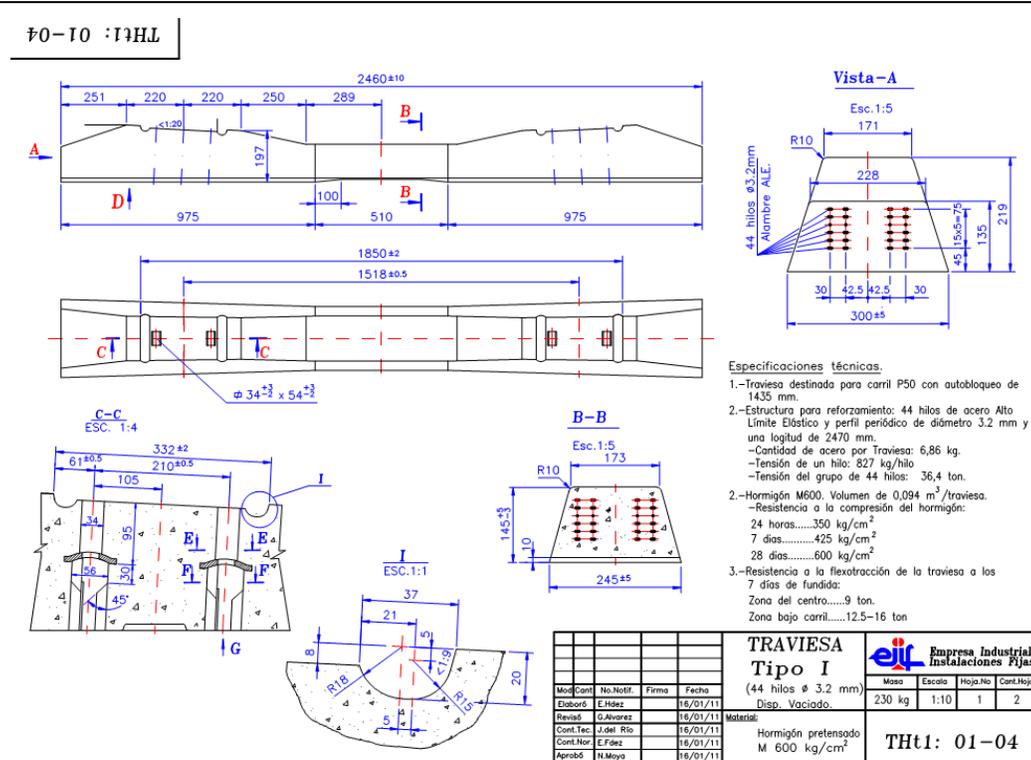


Figura 2.3 Plano de la traviesa Soviética. Fuente: EIIF.

Resistencias de proyecto del hormigón empleado en la fabricación de las traviesas con tecnología soviética:

- Resistencia característica a la compresión del hormigón en el momento de transferir el tesado inicial.: $f'_{ci} = 35 \text{ MPa}$
- Resistencia característica del hormigón a compresión a los 7 días de edad:
 $f'_c = 42,5 \text{ MPa}$
- Resistencia característica del hormigón a compresión a los 28 días de edad:
 $f'_c = 60 \text{ MPa}$

Para la elaboración de las mezclas de hormigón de la línea # 3 se consta con dos dosificaciones diferentes, variando las cantidades de áridos según su granulometría y cantera de que provengan, así como la relación agua/cemento, siendo para la primera dosificación de 0,249, para 95 litros de agua y 382 kg de cemento por m³ de hormigón y para la segunda de 0,3 para 114.5 litros de agua y 382 kg de cemento por m³ de hormigón. En la

Capítulo II. Características y condiciones de fabricación de los durmientes de la EIIF. Experimento de comparación

elaboración de las mezclas de ambas líneas de producción se utiliza cemento P-35. Durante el año 2016, para un total de 32 lotes de hormigón se obtienen las resistencias a compresión, para las diferentes edades, que se muestran en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Resistencia a compresión del hormigón, año 2016. Línea de Producción # 3. Fuente: Elaboración Propia.

Edad	Transferencia	7 Días	28 Días
Resistencia media	44 MPa	57 MPa	66 MPa
Desviación estándar	5,2 MPa	5,6 MPa	3,7 MPa
Resistencia Característica	37 MPa	49 MPa	61 MPa

Al igual que en la línea # 1 en el año 2016 se cumplió con lo estipulado para las resistencias del hormigón en todas las edades, sin descartar que hubo algunos lotes donde no fue así. Todas estas resistencias también son en base a una probeta cúbica de 10 cm de lado.

Propiedades del acero empleado en la fabricación de las traviesas con tecnología soviética:

- Módulo de elasticidad del acero de alto límite elástico $E_p = 1.97 * 10^5 MPa$
- Resistencia máxima a tracción del acero pretensado: $f_{pu} = 1597 MPa$
- Resistencia especificada a la fluencia del acero pretensado: $f_{py} = 1280 MPa$
- Diámetro del acero pretensado: $d_b = 3.2 mm$

Procedimientos y características tecnológicas en la producción de durmientes de hormigón pretensado en la EIIF.

Capítulo II. Características y condiciones de fabricación de los durmientes de la EIIF. Experimento de comparación

2.3 Procedimientos y características tecnológicas en la producción de durmientes de hormigón pretensado en la EIIF

A continuación se muestran los principales procedimientos y características técnicas en la fabricación de las traviesas de hormigón pretensado en las dos líneas de producción de la EIIF basado en las inspecciones realizadas a dicha entidad y en los documentos e instrucciones en base a los que allí se trabaja. La producción se encuentra totalmente mecanizada, garantizando una de las principales ventajas de la prefabricación: el ahorro del recurso tiempo. Los trabajos se encuentran expuestos en un orden lógico secuencial.

2.3.1 Línea de Producción # 1. Tecnología italiana

Esta línea de producción consta de una tecnología de producción completamente automatizada que se adquirió a través de la compañía italiana *OLMI Durmiente Tecnología Alfa Laval* como parte de un proceso de modernización de la producción que emprendió la EIIF tras la necesidad imperante en el país de una mayor producción de durmientes dado por la creciente demanda de los mismos en la reparación y construcción de nuevas obras. En esta línea se producen alrededor de 500 durmientes diarios. A continuación se describen los principales trabajos que allí se realizan en la producción.

2.3.1.1 Limpieza y Engrase del Molde

1- Los moldes que presentan deterioros mecánicos que afecten a la calidad de los durmientes son retirados de la producción y enviados a reparar.

2- El molde se cubre de una fina capa homogénea de emulsión desencofrante (de la Marca SIL-DH-25 o similar), la cual es rociada a presión mediante la máquina emulsionadora (figura 2.4), la misma trabaja herméticamente rociando a presión el molde y el líquido desencofrante que queda disperso es retirado mediante extractores, evitando así la acumulación de disolución en la superficie del molde, especialmente en el fondo del mismo.

Capítulo II. Características y condiciones de fabricación de los durmientes de la EIIF. Experimento de comparación



Figura 2.4 Máquina emulsionadora. Fuente: Elaboración propia.

2.3.2.2 Colocación de los dispositivos de vaciado en el molde

1- Los tornillos de sujeción se colocan en la zona del fondo del molde según disposición de los agujeros en el mismo una vez colocados los dispositivos de vaciado.

2- Los dispositivos de vaciado deben quedar bien apretados y en posición vertical, como en la figura 2.5 b.

3- No se colocan dispositivos de vaciado que presenten defectos tecnológicos o que muestren contaminación con grasas o similares.



Figura 2.5 a. Dispositivos de vaciado de la Línea de Producción # 1. b. Colocación de los dispositivos de vaciado. Fuente: Elaboración propia.

2.3.1.3 Preparación y colocación de los grupos de aceros en el molde

1- Se ubican manualmente las barras en la máquina que las traslada y coloca a su posición en el molde, figura 2.6.

Capítulo II. Características y condiciones de fabricación de los durmientes de la EIIF. Experimento de comparación

2- Se colocan las piezas de plástico (campanas) en los aceros para evitar que el hormigón pase a los tirantes del molde o la rosca de las barras.



Figura 2.6 Aceros situados correctamente para su posterior colocación en el molde.

Fuente: Elaboración propia.

3- Los aceros son trasladados por el equipo correspondiente, como se puede apreciar en la figura 2.7, y una vez en el molde, sin retirar el equipo de traslado son roscados los tirantes, se rosca totalmente un tirante y el otro queda solo fijado al acero para evitar que este último salga de su correcta alineación, solo se fijan las barras en su posición, no se les aplica tensión.



Figura 2.7 Transporte y colocación de los aceros. Fuente: Elaboración propia.

2.3.1.4 Tensado de los aceros

1- El tesado de las barras se realiza individual, roscando el tirante hasta llegar a una presión en la pizarra del equipo (figura 2.8 b) de 190 bares. El equipo de tesado (figura 2.8 a) expresa la presión para un área base de 40,64cm².

Capítulo II. Características y condiciones de fabricación de los durmientes de la EIFF. Experimento de comparación

2- Se acepta una diferencia de tensión de ± 4 bares en cada acero y no se permite una diferencia mayor de 4 bares entre aceros. De existir alguna diferencia mayor a las mencionadas la máquina autocorrije el tesado hasta que quede entre los parámetros establecidos.

3- Si se rompe algún acero o se separa del tirante por problemas en la rosca se retira el molde de la línea de producción y se traslada al área de mantenimiento.

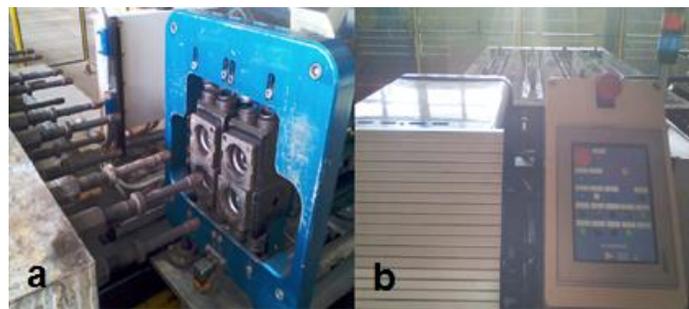


Figura 2.8 a. Equipo de tesado. b. Pizarra de dicho equipo. Fuente: Elaboración propia.

2.3.1.4.1 Determinación de la fuerza de pretensado real que se aplica a los aceros

En la línea de producción se le da a los aceros en la máquina una tensión de 190 bares, pero esta no es la tensión que se transmite directamente a la armadura, pues el equipo, como se vio con anterioridad trabaja para un área base de $40,64\text{cm}^2$, la cual no coincide con el área de los aceros, que es de solo $70,88\text{ mm}^2$. Por lo tanto se hace necesario recalcular la fuerza de pretensado inicial trabajando en base a las fórmulas que proporciona el fabricante, las mismas son:

$$\text{Presión} = \text{Tensión} * 0,981 / \text{sección} = 9100 * 0,981 / 40,64 = 219,6\text{BAR}$$

$$\text{Tensión (kg)} = \text{sección} * \text{Presión} / 0,981 = 40,64 * \text{Presión(BAR)} / 0,981$$

Ahora bien, se puede observar como para determinar la fuerza de pretensado actuante, en kilogramos, se puede utilizar la fórmula anterior, pero se desea determinar en kN por lo que el factor de conversión 0,981 no se hace necesario, lo que se necesita saber es que $1\text{bar} = 100\text{ KPa}$, por lo tanto $190\text{ bares} = 19000\text{ KPa}$. Trabajando en kPa y m^2 se obtiene:

$$T(\text{KN}) = 19000\text{KPa} * 40,64 * 10^{-4}\text{m}^2$$

Capítulo II. Características y condiciones de fabricación de los durmientes de la EIIF. Experimento de comparación

$$T(KN) = 77,216KN$$

Ahora ya se tiene la fuerza del gato para el tesado de cada acero, esto equivale a una tensión de:

$$T(KPa) = \frac{77,216KN}{70,88 * 10^{-6}m^2} = 1089390,519KPa$$

$$T(KPa) = 1089,390519MPa$$

2.3.1.5 Distribución y nivelación de la mezcla de hormigón en el molde

1- Antes de verter la mezcla en el molde se presionan las campanas contra los tirantes (ver figura 2.9) evitando así que el hormigón se adhiera a los mismos.

2- Se distribuye la mezcla de hormigón uniformemente a lo largo del molde, se realiza mediante pala plana la nivelación en los lugares que el equipo no lo realizó correctamente, como se muestra en la figura 2.10.

2- No se permite que caigan dentro del molde pedazos de hormigón endurecido, piedras u otros objetos extraños.



Figura 2.9 Máquina que presiona las campanas contra los tirantes. Fuente: Elaboración propia.

Capítulo II. Características y condiciones de fabricación de los durmientes de la EIFF. Experimento de comparación



Figura 2.10 Vertido y nivelación de la mezcla en el molde. Fuente: Elaboración propia.

2.3.1.6 Vibro compactación de la mezcla de hormigón en el molde

- 1- Se compacta la mezcla de hormigón en el primer puesto de vibrado hasta que no sale aire ocluido de la misma.
- 2- En el segundo puesto de vibrado (figura 2.11) se compacta la mezcla a una mayor frecuencia y menor amplitud de las oscilaciones.
- 3- Luego de terminada la compactación en el segundo puesto de vibrado se retiran de los moldes los tornillos que sujetan los dispositivos de vaciado. En la figura 2.11 se puede observar al fondo los obreros realizando esta labor.



Figura 2.11 Segunda mesa de vibrado. Fuente: Elaboración propia.

2.3.1.7 Curado de las traviesas

En las cámaras de curado se puede realizar este proceso mediante el método exotérmico (curado sin vapor) o mediante el método de curado con vapor; cada uno se utiliza de

Capítulo II. Características y condiciones de fabricación de los durmientes de la EIIF. Experimento de comparación

acuerdo a la cantidad de moldes disponibles para la producción de los durmientes y el factor económico considerando el ahorro de energía de acuerdo al plan de producción a realizarse. La resistencia a la compresión del hormigón después de realizado el curado a los durmientes, debe ser como mínimo de 350 kgf/cm², determinándose en base a una probeta cúbica ensayada en el laboratorio.

2.3.1.7.1 Curado exotérmico (curado sin vapor)

- 1- Una vez que se llena un cubículo se coloca la tapa del mismo en forma hermética. En la figura 2.12 se puede ver una cámara de curado con su numeración para los cubículos.
- 2- Se mantendrán 22 horas como mínimo a los moldes dentro de las cámaras, antes de pasarlos para el puesto de destense.

2.3.1.7.2 Curado con Vapor

- 1- Se sitúa la tapa en cada cámara una hora después que se colocó el último molde.
- 2- El tiempo mínimo de duración del régimen de aumento de temperatura es de tres horas, con una velocidad no mayor de 20^o C / hora, hasta llegar a la temperatura de 70 a 80^o C y humedad relativa de 95 a 100 %.
- 3- El tiempo mínimo de duración del régimen isotérmico es de tres horas, a una temperatura de 70 a 80^o C y humedad relativa de 95 al 100 %.
- 4- El tiempo mínimo de duración del régimen de disminución de temperatura es de tres horas, con una velocidad no mayor de 20^o C / hora, hasta llegar a una temperatura entre la superficie de los durmientes y la del aire en el taller que no sea superior a los 40^o C y humedad relativa de 95 a 100 %.

Capítulo II. Características y condiciones de fabricación de los durmientes de la EIIF. Experimento de comparación



Figura 2.12 Cámara de curado. Fuente: Elaboración propia.

2.3.1.9 Destensado del Molde

- 1- Se realiza el destense del molde aflojando los tirantes de forma unísona en la máquina de destese.
- 2- En caso de que algún tirante no desenrosque completamente se termina la acción manualmente. No se permite golpear los tirantes.



Figura 2.13 Máquina de destese. Fuente: Elaboración propia.

2.3.1.10 Volteo de los durmientes

- 1- Una vez realizado el destese y colocados los moldes en la posición de desencofre la máquina los sujeta por los cuatro puntos de fijación y realiza el volteo de 180°.
- 2- De no desencofrarse todos los elementos se levanta nuevamente el molde y se repite la operación de volteo. Si esto no da resultado por algún fallo técnico del molde, como pudiera ser que algún tirante quedara aún sujeto al durmiente se retira el molde al área de mantenimiento.

Capítulo II. Características y condiciones de fabricación de los durmientes de la EIIF. Experimento de comparación

3- Los moldes ya sin traviesas se encuentran listos para comenzar otro ciclo productivo, siempre y cuando presenten las condiciones técnicas necesarias.

2.3.1.12 Terminación y marcaje

1- Una vez los durmientes se encuentran en la cinta transportadora del final de la producción se marcan con el lote de hormigón y el molde con que fueron fabricados.

2- Se colocan tapones plásticos a las campanas con el fin de proteger, ante los agentes agresivos del medio, el acero que queda expuesto en el interior de las mismas.

3- Al final de la cinta transportadora, mediante un gato hidráulico que alza hasta cuatro elementos apoyados por sus extremos uno al lado del otro al unísono, se forman grupos de cuatro durmientes uno al lado del otro y hasta seis de altura por lo general.

4- Una vez agrupado el máximo de elementos permisible se traslada el grupo al carro transportador mediante una de las grúas de la nave.



Figura 2.14 Cinta transportadora al final de la producción. Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.15 Gato hidráulico para agrupar los durmientes. Fuente: Elaboración propia.

Capítulo II. Características y condiciones de fabricación de los durmientes de la EIFF. Experimento de comparación

2.3.1.13 Almacenamiento de los durmientes

1- Las traviesas se almacenan al fondo de las líneas de producción, al aire libre, en un terreno firme, con superficie plana, con buen escurrimiento y drenaje de las aguas pluviales, como se puede apreciar en la figura 2.16.

2- Se realiza el traslado de los durmientes desde la posición del carro transportador hacia el almacén de producción terminada, mediante una de las grúas sobre rieles del patio.

3- El almacenaje se realiza permitiendo como máximo 9 elementos uno encima del otro, aunque lo más común es que solo se llegue hasta 6. Los durmientes se separan unos de otros mediante maderos rectangulares de 3 ó 5 centímetros de lado aproximadamente colocados al inicio de la zona bajo carril, aproximadamente a 25 cm de los extremos, como se puede ver en la figura 2.17.



Figura 2.16 Zona de almacenaje. Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.17 Durmientes separados mediante maderos rectangulares. Fuente: Elaboración propia.

Capítulo II. Características y condiciones de fabricación de los durmientes de la EIFF. Experimento de comparación

2.3.2 Línea de Producción # 3. Tecnología soviética

Esta línea de producción es la más antigua de las dos, consta de la tecnología soviética original con que fue fundada la empresa. Es la única sobreviviente de las 8 líneas con esta técnica de elaboración que contaba la empresa en sus inicios. En la misma se producen los durmientes de la figura 2.3 y largueros. En el momento que se realizaron las visitas a la fábrica solo se estaban produciendo largueros, pues se presentaron roturas que se describirán más adelante que afectaban la correcta elaboración de los durmientes.

2.3.2.1 Limpieza y Engrase del Molde

1- El molde (interior, bordes y apoyos de las mordazas) y las espigas deben estar totalmente limpios de residuos de hormigón, esto se realiza mediante la ayuda de cepillos metálicos, rascadores y brochas o medios similares retirándose los mismos cuidadosamente. No se permite la limpieza mediante golpes.

2- Los moldes y espigas que presentan deterioros mecánicos que afecten a la calidad de los durmientes son retirados de la producción y enviados a reparar.

3- El molde y las espigas se cubren de una capa fina homogénea de emulsión desencofrante (de la Marca SIL-DH-25 o similar), la cual es rociada a presión mediante una mochila con pulverizador o manualmente mediante estopa. No se permite la acumulación de disolución en la superficie del molde, especialmente en las partes más bajas de este.

5- Las espigas se colocan en la zona del fondo del molde según disposición de los agujeros de los Durmientes. En la figura 2.18 se puede ver un molde luego de terminado el proceso de limpieza y engrase.



Figura 2.18 Molde luego del proceso de limpieza y engrase. Fuente: Elaboración propia.

Capítulo II. Características y condiciones de fabricación de los durmientes de la EIIF. Experimento de comparación

2.3.2.2 Preparación y colocación de los grupos de alambre en el molde

1- Se utilizan distintos tipos de grupos de alambre de acuerdo al tipo de elemento a fabricar y el diámetro del acero, sin que estos queden sueltos después de producirse el estiramiento (figura 2.19 b). Se permite la partidura de un sólo alambre y no más (esto es para todos los tipos de elementos). Para los durmientes si se utilizara acero de 3mm de diámetro se colocarán 48 aceros y si el diámetro fuera de 3,2mm se colocarán 44.

2- El alambre no puede estar contaminado de grasa, aceite ni de óxido.

3- Los grupos de alambre no se colocan en un molde cuya limpieza y engrase no corresponda a los requisitos para la calidad de los trabajos de limpieza y engrase del molde y espigas. En la figura 2.20 se observa un grupo de alambres correctamente colocados en el molde.

4- El traslado de los alambres de una hilera a otra no se puede realizar.

5- El paquete de alambre queda colocado en el molde con un estirado de forma tal que los alambres no pueden tocar el fondo del molde y con un largo proyectado de 12603 ± 5 mm.



Figura 2.19 Preparación de los grupos de alambres. a. Mordaza. b. Estiramiento.

Fuente: Elaboración propia.

Capítulo II. Características y condiciones de fabricación de los durmientes de la EIIF. Experimento de comparación



Figura 2.20 Colocación de los grupos de alambres en el molde. Fuente: Elaboración propia.

2.3.2.3 Colocación de los dispositivos de vaciado en el molde

1- Los dispositivos de vaciado (figura 2.21) deben quedar bien apretados y en posición vertical.

2- No se colocan dispositivos de vaciado que presenten defectos tecnológicos y que estén sin limpiar o que atenten contra la sujeción de los mismos.



Figura 2.21 Dispositivos de vaciado. Fuente: Elaboración propia.

2.3.2.4 Tensado de los grupos de alambre y colocación de los diafragmas en el molde

1- Los diafragmas o separadores de durmientes (figura 2.22) no deben desviar los alambres de la posición proyectada para cada Tipo de Durmiente, se colocan por molde según distribución de durmientes dentro del molde.

2- Las mordazas (figura 2.19 a) se fijan cuando se alcanza la tensión de los grupos de alambre establecida por proyecto para cada tipo de durmiente, tabla 2.3, comprobándose mediante las indicaciones del manómetro (figura 2.23 a).

Capítulo II. Características y condiciones de fabricación de los durmientes de la EIFF. Experimento de comparación

Tabla 2.3 Tensión del grupo de alambres establecida por proyecto. Fuente: EIFF.

Alambre ALE	Cantidad de alambre/durm.	Tensión por alambre mínimo	Tensión del grupo	Presión de tensado del grupo min.
Ø 3 mm	48	827 kgf	36,4 ton	150 kgf / cm ²
Ø 3,2 mm	44	867 kgf	36,4 ton	150 kgf / cm ²

3- Cuando el molde esté listo para ser entregado al puesto de trabajo siguiente, el mismo puede tener dos alambres menos del total establecido por proyecto en cada tipo de durmiente (esto es en caso de partida del alambre) por cada grupo de alambres, sino se saca del proceso de producción. Los alambres partidos se retiran del molde.



Figura 2.22 Diafragma (separador de Durmientes). Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.23 a. Manómetro. b. Gato que transfiere la tensión al grupo de alambres. Fuente: EIFF.

Capítulo II. Características y condiciones de fabricación de los durmientes de la EIFF. Experimento de comparación

2.3.2.5 Distribución y nivelación de la mezcla de hormigón en el molde

1- Se distribuye la mezcla de hormigón uniformemente a lo largo del molde, se realiza mediante pala plana la nivelación en los lugares que el equipo no lo realizó correctamente, como se muestra en la Figura 2.24.

2- No se permite que caigan dentro del molde pedazos de hormigón endurecido, piedras u otros objetos extraños.

3- Se vela que los diafragmas y aditamentos de vaciado (espigas y fundas roscadas) no se salgan de su posición de anclaje, y si ocurre se restablecen a su posición.



Figura 2.24 Obrero realizando la nivelación con pala plana. Fuente: Elaboración propia.

2.3.2.6 Vibro compactación de la mezcla de hormigón en el molde

1- Se compacta la mezcla de hormigón durante 3 minutos en el primer puesto de vibrado.

2- Se compacta la mezcla de hormigón sin sobrepeso durante 2 minutos en el segundo puesto de vibrado. Es precisamente aquí donde se presentaron roturas y mal funcionamiento técnico de los electroimanes que hacen posible la compactación correcta de los durmientes, por lo que los mismos no estaban presentando resultados satisfactorios en la prueba de carga para considerarse elementos de primera calidad y solo se fabricaron durante ese periodo largueros, los cuales requieren una menor carga para considerarse de primera.

3- Se observa que el molde quede fijado en su superficie inferior a todos los bloques vibratorios de la plataforma, en caso contrario no se realiza la compactación.

Capítulo II. Características y condiciones de fabricación de los durmientes de la EIIF. Experimento de comparación

3- Los bloques vibratorios presentan una frecuencia de 3 000 oscilaciones/minuto.

2.3.2.7 Extracción y limpieza de los diafragmas

1- Los diafragmas son retirados en posición vertical, sin sacudidas, evitando hacer movimientos bruscos que pudiesen provocar que las superficies formadas pierdan su configuración, en la figura 2.25 se puede apreciar dichas superficies.

2- Los diafragmas retirados se colocan en contenedores habilitados al efecto y se introducen en el transportador de la máquina lavadora para su limpieza.



Figura 2.25 Hormigón en los moldes luego de retirados los diafragmas.

Fuente: Elaboración propia.

2.3.2.8 Curado de las traviesas

El curado de los durmientes de la Línea de Producción # 3 presenta las mismas características y procedimientos que en la línea # 1, ya expuestos con anterioridad.

2.3.2.9 Destensado del Molde

1- Se realiza el destense del molde aflojando los tornillos de fijación de las mordazas mediante llave neumática o manual.

2- No se permite darle golpes a la rosca de los tornillos tensores.

Capítulo II. Características y condiciones de fabricación de los durmientes de la EIIF. Experimento de comparación

2.3.2.10 Volteo de los durmientes

1- Se colocan al molde las cuatro viguetas de fijación establecidas para el volteo del mismo, las cuales sujetaran los durmientes para poder realizar el volteo de 180°. En la figura 2.26 se muestra el volteo a 180°.

2- Se retiran las viguetas de fijación después que los durmientes se encuentran colocados sobre el transportador de rodillos.

5- Se realiza mediante barreta, piqueta o martillo de acero la eliminación de excedentes de hormigón que se encuentren en los extremos de los alambres y entre cada uno de los durmientes, tal como se evidencia en la figura 2.27.



Figura 2.26 Volteo de los durmientes. Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.27 Obrero eliminando el excedente de hormigón entre los durmientes.

Fuente: Elaboración propia.

Capítulo II. Características y condiciones de fabricación de los durmientes de la EIIF. Experimento de comparación

2.3.2.11 Separación de los durmientes mediante sierra de corte

- 1- Se colocan los durmientes en posición adecuada para el corte de los mismos, deben estar alineados, o sea, que coincidan las ranuras de corte entre durmientes en ambas hileras.
- 2- Se realiza el seccionamiento de las mismas mediante las sierras de corte, como se muestra en la figura 2.28.
- 3- El largo de los alambres después de cortados los extremos de los durmientes deben tener aproximadamente un máximo de 10 mm.



Figura 2.28 Separación de los durmientes mediante sierra de corte. Fuente: Elaboración propia.

2.3.2.12 Terminación y marcaje

- 1- Se realiza el izaje individual de los durmientes hasta la mesa de preparación.
- 2- Se aplica masilla a ambos extremos de los durmientes para proteger el alambre de los extremos.
- 3- Posteriormente se aplica pintura a ambos extremos de los durmientes.
- 4- Se marcan con el lote de hormigón y el molde con que fueron fabricados. En la figura 2.29 se muestra un grupo de elementos con una correctamente terminados y marcados.
- 5- Izaje y traslado de cada durmiente individual y de forma ordenada hacia el carro transportador.

Capítulo II. Características y condiciones de fabricación de los durmientes de la EIIF. Experimento de comparación



Figura 2.29 Largueros con una correcta terminación y marcaje. Fuente: Elaboración propia.

2.3.2.13 Almacenamiento de los durmientes

El almacenamiento de los durmientes de esta línea de producción, al igual que el proceso de curado, presenta las mismas características y procedimientos que en la línea # 1, ya expuestos con anterioridad.

2.4 Diseño del experimento de comparación

Hasta aquí se han descrito las propiedades geométricas y de los materiales que componen los durmientes de la EIIF, así como la tecnología y procesos en su producción. En el Capítulo I se expusieron tres métodos fundamentales en la determinación de las pérdidas de preesfuerzo. Se vio que en el preesado ocurren las pérdidas por acortamiento elástico y la caída de tensión en la longitud de transferencia de forma instantánea y de forma diferida actúa la retracción y fluencia del hormigón y la relajación del acero activo. De estas cinco pérdidas fundamentales producen acortamiento en los elementos tres de ellas, el acortamiento elástico, la retracción y la fluencia del hormigón. Para determinar cuál de los métodos expuestos presenta una mejor representación de las características de producción y almacenamiento en la EIIF se supone que el método para la determinación de las pérdidas que mejor representa las condiciones reales será aquel que mayor aproximación tenga en la predicción de los acortamientos que ocurren en los durmientes durante su producción y almacenaje. No se trabaja con el fin de probar esta hipótesis, sino que se asume como verdadera, puesto que no se consta con una forma exacta de determinar las pérdidas.

Para realizar las comparaciones con los diferentes métodos se hace ineludible determinar el acortamiento real que experimentan los durmientes producidos en la EIIF debido a la

Capítulo II. Características y condiciones de fabricación de los durmientes de la EIFF. Experimento de comparación

retracción y al efecto de la fuerza de pretensado. Para lograr lo anterior es necesario realizar mediciones en elementos producidos de manera normal (con armadura activa) y en otro grupo de elementos producidos sin armadura, para así poder determinar que deformaciones son debidas a la retracción y cuales a la acción del pretensado (acortamiento elástico en la transferencia y fluencia del hormigón).

2.4.1 Elección del tamaño de la muestra

Un aspecto importante en cualquier problema experimental es la elección del tamaño de la muestra, en otras palabras, la determinación del número de réplicas que deben hacerse.

En “Diseño y Análisis de Experimentos” (Montgomery, 2004) propone tres métodos para la determinación del tamaño de la muestra: el método por “Curvas Características de Operación”, el método de “Especificación de un incremento en la Desviación Estándar”, y el “Método de estimación por Intervalos de Confianza”. De las tres metodologías mencionadas se decide trabajar con la segunda, puesto que en las dos restantes se hace necesario una estimación de la desviación estándar y por tanto se requiere una base experimental pasada o una vasta experiencia en este tipo de mediciones.

El método de la “Especificación de un incremento en la Desviación Estándar” se basa en elegir un porcentaje P como el que no debe sobrepasar la desviación estándar de una observación (si es superior se rechaza la hipótesis de que todas las medias de tratamiento son iguales). Una vez determinado P se pasa a calcular el parámetro Φ ; para este método:

$$\Phi = \sqrt{((1 + 0,01P)^2 - 1)} * \sqrt{n}.$$

Siendo n el número de réplicas.

Para el caso que nos concierne se tomará un 25 % de incremento en la desviación estándar con una probabilidad mínima de 0,90 y $\alpha = 0,05$. Entonces:

$$\Phi = \sqrt{((1 + 0,01 * 25)^2 - 1)} * \sqrt{n}$$

$$\Phi = 0,75 * \sqrt{n}$$

Tomando $n = 12$

Capítulo II. Características y condiciones de fabricación de los durmientes de la EIFF. Experimento de comparación

$$\Phi = 2,598 \approx 2.6$$

Al utilizar las curvas características de operación para el análisis de varianza (Montgomey, 2004) con $a - 1 = 1$; siendo $a = 2$, puesto que se analizarán durmientes con armadura activa y sin armadura, por lo que $a - 1 = 2 - 1 = 1$ y $N - a = 24 - 2 = 22$; siendo N el tamaño total de la muestra, se obtiene que la probabilidad del error tipo II para este modelo $\beta \approx 0.065$, por lo que la potencia de prueba es $1 - \beta = 0,935$, lo que es un resultado satisfactorio al ser mayor que 0,9. Dados los resultados se puede concluir que con doce repeticiones se obtendrá la sensibilidad deseada. Esta cantidad de repeticiones equivale a fabricar en la planta un total de tres moldes con armadura y tres sin armadura para un total de 12 elementos de cada tipo.

2.4.2 Fabricación de los elementos de prueba.

Desafortunadamente solo se pudo fabricar durmientes de tecnología italiana, pues en la línea soviética solo se produjeron largueros durante el período de investigación y estos no forman parte de los objetivos de este trabajo. Como se vio en el apartado anterior para el experimento se han de medir 12 elementos producidos de manera normal siguiendo todos los pasos del ciclo constructivo, pero también 12 sin armadura activa, para los cuales se les dio un tratamiento especial a los moldes por temor a que estos últimos elementos no resistiesen el volteo, que se realiza de una forma brusca y donde sin lugar a dudas la armadura confiere gran resistencia ante el impacto. Para evitar trabazón con el molde los mismos se limpiaron y se eliminó la superficie de residuos de hormigón; se engrasaron manualmente con líquido desencofrante SIL-DH-25 todas las paredes y el fondo para asegurar un correcto desencofre. Para evitar que el hormigón se adhiriera a los soportes de los dispositivos de vaciado fijos en el molde se colocaron los mismos. Con el fin de que no se escapara el hormigón por los orificios del molde, por donde se introducen los tirantes normalmente, se colocaron cartulinas cubiertas con precinta en los extremos del molde, tal como se muestra en la figura 2.32. Los 24 elementos se fundieron con el mismo lote de hormigón, el 067-17, y se introdujeron en la cámara de curado donde recibieron el curado con vapor durante aproximadamente 24 horas.

Capítulo II. Características y condiciones de fabricación de los durmientes de la EIIF. Experimento de comparación



Figura 2.30 a. Cartulinas cubiertas con precinta b. Colocación de cartulinas en el molde.

Fuente: Elaboración propia.

2.5 Medición, traslado y almacenamiento de elementos.

Se ha de tener en cuenta que los fenómenos que se desean medir producen en los elementos acortamientos del orden de decenas de milímetros. Para detectar de la manera más acertada posible estos fenómenos las mediciones se realizaron con galga de espesores, figura 2.31, la cual presenta medidas desde los 0.05 mm hasta 1 mm.



Figura 2.31 Galga de espesores utilizada en las mediciones. Fuente: Elaboración propia.

2.5.1 Medición de elementos en la transferencia

Las mediciones para determinar el acortamiento elástico y la retracción al instante de la transferencia se realizaron en el propio molde, a nivel de la fibra externa de los elementos que queda expuesta, figura 2.32, antes del volteo y desencofre de las piezas. Se realizaron tres mediciones en cada sección extrema en los elementos con aceros (una en cada extremo y una en el centro de las secciones) y dos mediciones en los elementos sin aceros (una en cada extremo de las secciones). En los durmientes sin armadura se realizó solo dos mediciones pues las cartulinas cubiertas con precinta que se colocaron en los moldes para

Capítulo II. Características y condiciones de fabricación de los durmientes de la EIFF. Experimento de comparación

evitar que se vertiera la mezcla por los orificios por donde se tesan los aceros sobresalían del molde en algunos casos y esto falsea las mediciones.



Figura 2.32 Medición con galga de espesores en el molde. Fuente: Elaboración propia.

2.5.2 Traslado y almacenamiento de los durmientes de prueba

Una vez realizadas las mediciones en la transferencia los durmientes de prueba se desencofraron y pasaron a la cinta transportadora del final de la producción donde fueron marcados con el lote de hormigón y el molde de su fabricación. Una vez marcados se sacaron de la cinta y se trasladaron mediante un montacargas hacia la Línea # 4, que se encuentra deshabilitada, para poder realizar un correcto control sobre los mismos y facilitar la realización de las mediciones, pues se haría muy difícil hacerlas en elementos entongados, además que de colocarse cargas sobre las traviesas sin acero estas podrían fallar. Los elementos se colocaron en el suelo, separados del mismo mediante maderos de sección rectangular de 2.5 a 5 mm de lado aproximadamente, como se muestra en la figura 2.33.



Figura 2.33 Almacenamiento de los durmientes de prueba. Fuente: Elaboración propia.

Capítulo II. Características y condiciones de fabricación de los durmientes de la EIIF. Experimento de comparación

2.5.3 Medición de elementos a los 7 y los 28 días de edad.

Las mediciones de los acortamientos diferidos se realizaron en coincidencia con las edades a que se ensayan a compresión de las probetas del lote. Para realizar estas mediciones fuera del molde y a nivel del centroide de los aceros se ideó una herramienta, figura 2.34, que posee dos apoyos que se colocan sobre la parte superior de la zona central de las traviesas, que es la única que posee sección constante, con una longitud de 92 mm desde la cara interior de los mismos hasta el centroide de la barra lisa de 22 mm de diámetro a la que se soldaron perpendicularmente dos planchas metálicas de 4 mm de espesor a una distancia fija de 2460 mm, la longitud de las traviesas.



Figura 2.34 Dispositivo de distancia fija para medir los acortamientos diferidos.

Fuente: Elaboración propia.

Es necesario señalar que este dispositivo se proyectó para realizar mediciones en los durmientes soviéticos también, cuestión que no pudo suceder por razones ya mencionadas. El procedimiento para realizar las mediciones (ver figura 2.35) fue el siguiente:

1. Se coloca la herramienta sobre el elemento por el primer lateral del mismo.
2. Se topa contra la cara contraria que se desea medir un extremo del dispositivo.
3. Con ayuda de planchas metálicas de 6, 4 y 3 mm de espesor se realizan las mediciones con la galga de espesores chequeando que las planchas no entren en contacto con las tapas de las campanas. Se necesitan las planchas puesto que los durmientes de tecnología italiana no poseen las caras externas perpendiculares a la longitud del elemento y por tanto a nivel de centroide poseen una longitud menor a los 2460 mm fijos del equipo.

Capítulo II. Características y condiciones de fabricación de los durmientes de la EIFF. Experimento de comparación

4. Luego de realizada la primera medición en el primer extremo se topa la herramienta de distancia fija a este.
5. Se realiza la primera medición en el segundo extremo de igual manera que en el paso tres.
6. Se cambia el instrumento de distancia fija al segundo lateral del durmiente y se realizan los pasos del uno al cinco. Obteniéndose así cuatro valores de acortamiento para cada elemento.



Figura 2.35 Procedimiento realizado para medir los acortamientos diferidos.

Fuente: Elaboración propia.

2.6 Conclusiones parciales.

1. El curado de los durmientes es de aproximadamente un día y se puede realizar de dos formas diferentes, exotérmicamente y mediante el curado con vapor, en esta última la humedad relativa se mantiene entre un 90 y el 100% y la temperatura entre los 70 y 80°C.
2. El almacenamiento de las traviesas se realiza detrás de las naves de fabricación en un terreno asfaltado y al aire libre que presenta un buen drenaje; teniendo en cuenta las condiciones climatológicas de nuestro país se puede decir que la humedad relativa que impera en estas condiciones es de alrededor del 80% y la temperatura media que actúa de 25°C, apaleando a los promedios anuales.

Capítulo II. Características y condiciones de fabricación de los durmientes de la EIIF. Experimento de comparación

3. Se midieron los acortamientos en la transferencia y a los 7 y 28 días de edad a un grupo de 24 elementos producidos con la tecnología italiana (12 con armadura activa y 12 sin armadura) con el fin de comparar estos resultados con los que ofrecen los diferentes métodos en la determinación de pérdidas expuestos en el Capítulo I y así determinar a cuál se ajustan mejor las condiciones de fabricación y almacenaje de los durmientes de la EIIF.

Capítulo III. Resultados del experimento comparativo. Pérdidas de pretensado en los durmientes

3.1 Introducción

En el presente capítulo se exponen los resultados de las mediciones de los acortamientos realizadas en los durmientes de prueba, así como los métodos de cálculo de las diferentes normas para la estimación de los mismos y sus resultados. Se realiza la comparación estadística entre las mediciones y los resultados de los cálculos mencionados con el fin de determinar que método resulta representativo de lo que ocurre en la muestra analizada. Finalmente se calculan las caídas de tensión en la armadura pretesa, tanto instantáneas como diferidas, que tienen lugar para este grupo de elementos fabricados con el lote de hormigón 067-17 que se está analizando según las diferentes normas. Se propone un método de trabajo para la estimación de las pérdidas teniendo en cuenta las normas que resultan representativas en la predicción de los acortamientos de la muestra y los valores críticos de las pérdidas.

3.2 Resultados de las mediciones en los elementos

A continuación se muestran los principales resultados de las mediciones descritas en el capítulo anterior. Es necesario señalar que el procedimiento que se siguió para determinar los resultados que se exponen a continuación es análogo y basado en la NC-192:2007 “Cálculo de la Resistencia Característica Real a la Compresión”, tomando como valores de una serie los resultados de las mediciones de un mismo elemento.

Capítulo III. Resultados del experimento comparativo. Pérdidas de pretensado en los durmientes

3.2.1 Resultados en la transferencia

En el instante de la transferencia en los durmientes medidos en la planta se puede determinar el acortamiento producido por la retracción pura para el periodo de curado en los elementos sin armadura y el debido a la deformación elástica más dicha retracción en los durmientes con armadura activa. Los resultados de estas mediciones, realizadas en el molde, para la transferencia se exponen en la tabla 3.1. Los principales resultados estadísticos se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.1 Resultados de las mediciones en la transferencia. Fuente: Elaboración propia.

	Molde	Borde 1	Centro	Borde 2
Con armadura activa	074	0,65	0,7	0,7
		0,75	0,75	0,8
		0,85	0,85	0,75
		0,75	0,7	0,65
	156	0,65	0,7	0,7
		0,7	0,75	0,7
		0,75	0,85	1
		0,75	0,8	0,7
	283	0,7	0,75	0,65
		0,65	0,75	0,8
		0,65	0,8	0,8
		0,7	0,65	0,65

Capítulo III. Resultados del experimento comparativo. Pérdidas de pretensado en los durmientes

Sin armadura	013	0,15		0,1
		0,25		0,15
		0,25		0,2
		0,1		0,1
	222	0,05		0,1
		0,15		0,15
		0,15		0,15
		0,2		0,1
	293	0,2		0,1
		0,3		0,15
		0,15		0,25
		0,1		0,1

Tabla 3.2. Principales resultados estadísticos de las mediciones en la transferencia.
Fuente: Elaboración propia.

	Elementos	
	Con Armadura	Sin armadura
Promedio	0,736111 mm	0,154167 mm
Varianza	0,003476 mm ²	0,002481 mm ²
Desviación Estándar	0,058961 mm	0,049810 mm

Capítulo III. Resultados del experimento comparativo. Pérdidas de pretensado en los durmientes

3.2.2 Resultados para los acortamientos diferidos

Para las deformaciones diferidas se realizaron mediciones a los 7 y los 28 días, pero para contrarrestar efectos que pueden inducir a errores como puede ser la disparidad en las caras de los elementos, que el ángulo de las mismas no sea 7° como está presente en los planos o que los bordes de un mismo elemento no posean las mismas dimensiones, todo esto producto de una fina capa de hormigón que se adhiere al molde y que no es constante en toda su superficie o a deformaciones del propio molde, se procedió a restar la medida de los 28 días a la de los 7 correspondiente a la misma cara y el mismo lateral despreciando las traviesas donde se obtuvo algún valor negativo, pues es evidente que se produjo un error en la medición. Es decir, lo que se obtendrá será el acortamiento ocurrido de los 7 a los 28 días, los resultados de este proceso se muestran en la tabla 3.3. Los principales resultados estadísticos se muestran en la tabla 3.4.

Tabla 3.3 Resultados de las mediciones para acortamientos diferidos (mm) de 7 a 28 días.

Fuente: Elaboración Propia.

	Molde	1 ^{er} Lateral		2 ^{ndo} Lateral	
		Cara 1	Cara 2	Cara 2	Cara 1
Con armadura activa	074	0,8	0,4	1,1	0,85
		1	0,7	0,6	1,4
		1,45	0,4	2,05	2,45
	156	1,7	0,9	1,2	1
		0,9	0,7	0,7	1
		0,05	0,6	0,6	0,8
		0,15	0,1	0,3	0

Capítulo III. Resultados del experimento comparativo. Pérdidas de pretensado en los durmientes

	283	1,05	1	1,05	1,1
		0,4	0,15	2,1	1,8
Sin armadura	013	1,8	2,5	1,45	1,9
		1,75	1,55	4,1	3,8
		1,8	1,3	1,6	1,65
		1,1	3,2	1,9	1,2
	222	1,35	0,9	1,25	1,1
	293	4,4	1,7	2,7	0,5
		1,4	0,7	2,2	1,5
		1,1	0,55	1	0,3
		1	0,9	2,4	0,8

Tabla 3.4 Principales resultados estadísticos de las mediciones para los acortamientos diferidos de 7 a 28 días. Fuente: Elaboración propia.

	Elementos	
	Con Armadura	Sin armadura
Promedio	0,90416667 mm	1,67638889 mm
Varianza	0,17257813 mm ²	0,39349392 mm ²
Desviación Estándar	0,41542523 mm	0,62729094 mm

Como se puede observar, los datos para los moldes sin acero son superiores sustancialmente a los obtenidos para los moldes con acero, lo que contradice toda lógica, puesto que un elemento donde solo actúa la retracción no puede experimentar un

Capítulo III. Resultados del experimento comparativo. Pérdidas de pretensado en los durmientes

acortamiento mayor que uno donde actúa la retracción, el acortamiento elástico y la fluencia debida a la fuerza de pretensado. Este error viene dado principalmente porque en el vibrado y la compactación de estos elementos detrás de la cartulina que se colocó en los moldes para evitar el derrame de mezcla se formó una fina capa de hormigón que al colocar a tope el dispositivo para realizar la medición se desprende en la mayoría de los casos, tal como se muestra en la figura 3.1, falseando el resultado. Por esta razón se decide no tomar estos resultados como representativos de la deformación diferida debida a la retracción.



Figura 3.1 Desprendimiento de la capa de hormigón detrás de las cartulinas.

Fuente: Elaboración Propia.

3.3 Resistencia a compresión del lote 067-17

A continuación, en la tabla 3.5, se muestran los resultados del ensayo a compresión en probetas cúbicas de 10cm de lado del lote 067-17 para las diferentes edades del ensayo en la planta.

Tabla 3.5 Resultados de los ensayos a compresión del lote 067-17 con probeta cúbica.

Fuente: Elaboración propia.

Transferencia (1 día)				7 días				28 días		
R_{bi}	R_{bi}	R_{bi}	R_{bs}	R_{bi}	R_{bi}	R_{bi}	R_{bs}	R_{bi}	R_{bi}	R_{bs}
53,4	54,1	58,3	55,2	57,0	57,7	58,1	57,6	70,5	71,5	71

Según los resultados del ensayo a compresión realizados y tomando los valores de desviación estándar del año 2016 para las diferentes edades y poniendo en práctica lo

Capítulo III. Resultados del experimento comparativo. Pérdidas de pretensado en los durmientes

establecido en la (NC-192, 2007) para la determinación de la resistencia característica a compresión se obtienen los resultados de la tabla 3.6 para el lote 067-17.

Tabla 3.6 Resistencia característica a compresión del lote 067-17 con probeta cúbica. Fuente: Elaboración propia.

f'_{ck} Transferencia (1 día)	f'_{ck} 7 días	f'_{ck} 28 días
46MPa	48 MPa	63 MPa

Estos son los resultados de la resistencia a compresión del lote con que se fabricaron los elementos, pero medidos en probeta cúbica y las normas analizadas presentan sus cálculos para la resistencia a compresión en base a probeta cilíndrica de 15x30cm, por lo que se hace necesario corregir estos valores. La resistencia a compresión en la probeta cilíndrica es alrededor del 85% de la que se obtiene con probeta cubica. Los resultados para probeta cilíndrica se pueden observar en la tabla 3.7. A partir de este momento todos los cálculos se realizaron en base a estas resistencias.

Tabla 3.7. Resistencia media y característica a compresión del lote 067-17 en base a probeta cilíndrica. Fuente: Elaboración propia.

	Transferencia (1 día)	7 días	28 días
f'_{cm}	47MPa	49MPa	60MPa
f'_{ck}	39MPa	41MPa	54MPa

Es importante recordar que en la elaboración de este hormigón se emplea 450Kg de cemento y 158 litros de agua por m³ de hormigón. También se ha de tener en cuenta que las traviesas tienen un período de curado de aproximadamente un día donde en la cámara se mantiene una temperatura de entre 70 y 80°C y la humedad relativa es entre el 95 y el 100%. En la etapa de almacenaje, según los valores medios en Cuba, se tiene una humedad relativa del 80% y una temperatura ambiente promedio de 25°C.

3.4 Cálculo de las deformaciones para su comparación con las mediciones

Como se explicó en el Capítulo II las traviesas de la EIFF poseen sección trapezoidal variable en su longitud, por esto se dividió la traviesa italiana en cuatro tramos para su análisis según la variación de la pendiente de sus dimensiones, los mismos se pueden ver en la figura 3.2 y los datos de sus secciones medias se encuentran en la tabla 3.8.

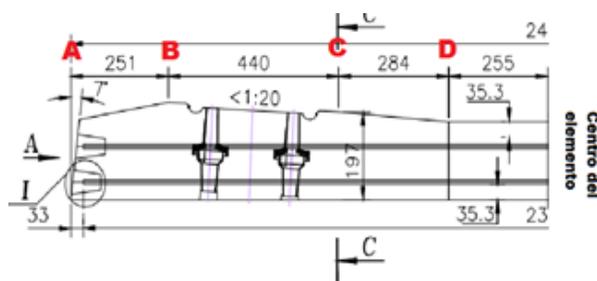


Figura 3.2 Tramos en que se dividió la traviesa italiana para su análisis.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.8 Datos de las secciones medias de los tramos de análisis. Fuente: Elaboración propia.

Tramo	Base mayor (b_1)	Base menor (b_2)	Altura (h)
AB	293,6 mm	186,3 mm	199,5 mm
BC	276 mm	169 mm	200 mm
CD	258,9 mm	166,2 mm	186 mm
Central	253 mm	173 mm	175 mm

Mediante los métodos analizados en el Capítulo I se pueden calcular las deformaciones unitarias (ϵ) debido al acortamiento elástico, la retracción y la fluencia, pero lo que se necesita para comparar con las mediciones en el molde es el acortamiento en unidades de longitud, por lo que basándose en que $\epsilon = \Delta l/l$ multiplicando la deformación unitaria de cada tramo, determinada para la sección media de cada uno, por su longitud total y la sumatoria de estos resultados será la deformación que experimenta cada elemento según la norma y el fenómeno en que se esté trabajando.

Capítulo III. Resultados del experimento comparativo. Pérdidas de pretensado en los durmientes

Los cálculos según las diferentes normas para determinar las deformaciones unitarias fueron realizados mediante hojas de cálculo programadas para este fin en el software Mathcad 14.0. Luego estos datos fueron tabulados en otra hoja de cálculo de Microsoft Excel donde se determinaron los acortamientos.

3.4.1 Cálculo de las deformaciones por acortamiento elástico

Para poder comparar las deformaciones instantáneas según las diferentes normas con las mediciones en planta se calcularon las tensiones a nivel de la fibra extrema expuesta en el molde para cada sección analizada, pues es allí donde se realizaron las mediciones en la transferencia. La deformación unitaria por acortamiento elástico en la fibra expuesta en el molde, para cada sección se determinó mediante la expresión $\varepsilon = \sigma_j / E_{ci}$, siendo σ_j la tensión a nivel de fibra extrema expuesta en el molde, trabajando con la sección neta de hormigón, que resulta ser la más crítica para la determinación de tensiones, y se despreció toda posible carga externa o peso propio al encontrarse el elemento aún en el molde y considerando que en las secciones analizadas actúa la fuerza del gato P_j , pues al ser corrugadas las barras se estima que la longitud de transferencia no sobrepase la primera sección analizada; y E_{ci} el módulo de deformación del hormigón según la norma con que se esté trabajando. Es precisamente en el módulo de deformación del hormigón, a simple vista, donde radica la principal diferencia entre las normas analizadas.

3.4.1.1 Según la EHE: 08

La Instrucción española EHE: 08 define como módulo longitudinal para el análisis bajo cargas instantáneas o rápidamente variables la expresión:

$E_{ci} = \beta_E E_i$ Módulo longitudinal inicial coincidente con la pendiente de la recta tangente al diagrama tensión-deformación en el origen.

Siendo:

$E_i = 8500 \sqrt[3]{f'_{cm,i}}$ ($f'_{cm,i}$ en MPa) Módulo de deformación longitudinal secante a los i días, siempre que la tensión en servicio no sobrepase de $0,4f'_{c,i}$.

Capítulo III. Resultados del experimento comparativo. Pérdidas de pretensado en los durmientes

$$\beta_E = 1,30 - f'_{cm,i}/400 \geq 1,175 \quad (f'_{cm,i} \text{ en MPa})$$

Los resultados de los cálculos para la fibra extrema expuesta en el molde para el acortamiento elástico utilizando la mencionada expresión para este módulo de deformación se encuentran en la tabla 3.9.

Tabla 3.9 Resultados para el acortamiento elástico para la fibra expuesta en el molde según la EHE: 08. Fuente: Elaboración propia.

Tramo	ε (10^{-4})	ΔL (mm)	ΔL acortamiento elástico total(mm)
AB	1,847	0,092719	0,5001026
BC	1,983	0,174504	
CD	2,139	0,121495	
Central	2,184	0,111384	

3.4.1.2 Según la NC 207: 2003

La NC-207:2003 proyecta el módulo de deformación en base a lo expuesto en el ACI, según la cual:

$$E_{ci} = 57000\sqrt{f'_{ci}}, \quad (f'_{ci} \text{ en libras por pulgada cuadrada}).$$

Al realizar una conversión de libras por pulgadas cuadradas a MPa se puede tomar aproximadamente como:

$$E_{ci} = 4700\sqrt{f'_{ci}}, \quad (f'_{ci} \text{ en MPa})$$

Por lo que se puede decir que la NC 207: 2003 y la ACI 318: 14 expresan el mismo módulo de deformación del hormigón. Los resultados según la NC para el acortamiento elástico a nivel de la fibra extrema expuesta en el molde se muestran en la tabla 3.10.

Capítulo III. Resultados del experimento comparativo. Pérdidas de pretensado en los durmientes

Tabla 3.10 Resultados para el acortamiento elástico para la fibra expuesta en el molde según la NC 207: 2003. Fuente: Elaboración propia.

Tramo	ε (10^{-4})	ΔL (mm)	ΔL acortamiento elástico total(mm)
AB	2,283	0,114607	
BC	2,451	0,215688	
CD	2,643	0,150122	
Central	2,699	0,137649	

3.4.1.3 Según el ACI 318: 14

Como se vio anteriormente, la NC y el ACI plantean el mismo módulo de deformación para el hormigón y a primera vista esto lleva a pensar que para estos dos métodos las deformaciones por acortamiento elástico serían las mismas, pero realizando un análisis más detallado para la determinación de pérdidas por acortamiento elástico por el ACI se encuentra con que este método presenta una serie de factores que no los incluyen los demás métodos. Para el caso de armadura adherente las pérdidas por acortamiento elástico se determinan mediante la siguiente expresión:

$$ES = K_{es} \frac{f_{cir}}{E_{ci}} E_s$$

Se puede separar la ecuación en dos partes y decir que la deformación unitaria debido al acortamiento elástico será $\varepsilon_{ES} = K_{es} \frac{f_{cir}}{E_{ci}}$ y que la pérdida debida a este fenómeno será $ES = \varepsilon_{ES} * E_s$. Ahora bien, $K_{ES} = 1$ para elementos pretesados y $f_{cir} = k_{cir} f_{cpi} - f_g$. Siendo:

$k_{cir} = 0.9$ Para elementos pretesados

f_{cpi} Tensión en el hormigón, en coincidencia con el baricentro del acero de pretensado, debida a la fuerza de pretensado en los cables luego de efectuar las reducciones debidas a las pérdidas por fricción y en los dispositivos de anclaje. Es decir lo que se llamó σ_j con anterioridad si se extrapola a la fibra extrema expuesta en el molde.

Capítulo III. Resultados del experimento comparativo. Pérdidas de pretensado en los durmientes

f_g Tensión en el hormigón, en coincidencia con el baricentro del acero de pretensado, debida al peso de la estructura en el momento en que se aplica el pretensado. Pero como se ha mencionado no se considera ninguna de las cargas debido al peso propio, pues el elemento se encuentra aún en el molde en el momento que se realizan las mediciones, por lo tanto $f_g = 0$.

De lo anterior expuesto se puede decir que la deformación unitaria por acortamiento elástico para la fibra donde se realizaron las mediciones en la transferencia siguiendo el procedimiento del ACI quedaría de la siguiente manera $\varepsilon_{ES} = \frac{0,9 \cdot \sigma_j}{E_{ci}}$, de esta manera se obtienen los resultados de la tabla 3.11.

Tabla 3.11 Resultados para el acortamiento elástico para la fibra expuesta en el molde según el ACI 318: 14. Fuente: Elaboración propia.

Tramo	ε (10^{-4})	ΔL (mm)	ΔL acortamiento elástico total(mm)
AB	2,055	0,1031459	0,5562594
BC	2,206	0,1941192	
CD	2,379	0,1351102	
Central	2,429	0,1238841	

3.4.2 Cálculo de las deformaciones por retracción

Para el cálculo de esta deformación los diferentes métodos se basan en las características y propiedades del hormigón, las dimensiones de la sección y de las condiciones del ambiente, como lo son la temperatura y la humedad relativa. A continuación se exponen las metodologías seguidas según las diferentes normas.

3.4.2.1 Según la EHE-08.

La EHE-08 plantea la siguiente expresión para determinar la deformación unitaria por retracción para un tiempo t .

$$\varepsilon_{cs}(t, t_r) = \varepsilon_{cs0} \cdot \beta_s(t - t_r)$$

Capítulo III. Resultados del experimento comparativo. Pérdidas de pretensado en los durmientes

Donde:

$\beta_s(t - t_r)$ Término que permite determinar el desarrollo de la retracción en el tiempo y al ser mayor la temperatura a 20°C en todos los casos:

$$\beta_s(t - t_r) = \sqrt{\frac{(t - t_r)}{\alpha_{rt} + (t - t_r)}}$$

Siendo:

t Edad del hormigón en el momento en que se desea evaluar la retracción.

t_r Edad a la que comienza a manifestarse el fenómeno de la retracción.

$$\alpha_{rt} = (0,035e_f^2)e^{-0,06(T-20)} \rightarrow \begin{cases} \text{espesor ficticio } e_f \rightarrow \text{mm} \\ \text{Temperatura } T \rightarrow \text{ }^\circ\text{C} \end{cases}$$

ε_{cs0} Coeficiente base de retracción. Como la temperatura es diferente de 20°C.

$$\varepsilon_{cs0} = (\beta_{rT}) \cdot \beta_{HR} [160 + \beta_{sc}(90 - f'_{cm(28)})] 10^{-6}$$

Siendo:

$f'_{cm(28)}$ Resistencia media a compresión a los 28 días de edad.

$$\beta_{HR} = -1,55 \left[1 - \left(\frac{HR}{100} \right)^3 \right] \text{ para } 40\% < \text{Humedad Relativa}(HR) < 99\%$$

$\beta_{sc} = 8$ Para cementos de alta resistencia y endurecimiento rápido.

$$\beta_{rT} = 1 + \left(\frac{8}{103 - HR} \right) \left(\frac{T - 20}{40} \right)$$

En la tabla 3.10 se muestran los acortamientos totales debido a la retracción del elemento para las diferentes edades según la EHE-08, determinando las deformaciones unitarias y acortamientos para cada sección mediante hojas de cálculo programadas para este fin. Es necesario señalar que las deformaciones para el período de almacenaje se calculan tomando como t_r un día mientras que para el curado como cero días, es decir, las

Capítulo III. Resultados del experimento comparativo. Pérdidas de pretensado en los durmientes

deformaciones por retracción en el almacenaje son aquellas que ocurren luego del curado de los elementos, no es la suma de las del periodo de curado y las de almacenaje.

Tabla 3.10 Acortamientos para las diferentes edades debido a la retracción según la EHE: 08.

Fuente: Elaboración propia.

	Tiempo (Días)	ΔL (mm)
Curado	∞	0,51660000
	1	0,13722678
Almacenaje	7	0,11566308
	28	0,23631344
	∞	0,77736000

3.4.2.2 Según la NC 207:2003

Como se vio en el Capítulo I la NC-207:2003 plantea para determinar la deformación unitaria por retracción para un tiempo t dado la siguiente expresión:

$$\varepsilon'_{rb,t} = \varepsilon'_{rb} \frac{(1.5 + t)t}{(t^2 + 4t + 1)}$$

Donde:

t Tiempo en meses.

ε'_{rb} La deformación unitaria final ($t = \infty$), debido a la retracción, se calcula por la fórmula siguiente:

$$\varepsilon'_{rb} = 0.001(1 - \rho) \left[\frac{0,5 + 0,3e}{0,4 + e} \right] \frac{A}{500} \left[1 + 3 \frac{A}{c} \right]$$

Siendo:

ρ Humedad relativa, en fracción de uno.

Capítulo III. Resultados del experimento comparativo. Pérdidas de pretensado en los durmientes

e Espesor ficticio (m), siendo igual a dos veces el área de concreto de la sección transversal dividida por su perímetro.

A Contenido de agua en la mezcla (kg/m³)

c Contenido de cemento en la mezcla (kg/m³)

En la tabla 3.10 se muestran los acortamientos totales debido a la retracción del elemento para las diferentes edades según la NC 207:2003.

Tabla 3.11 Acortamientos para las diferentes edades debido a la retracción según la NC 207:2003. Fuente: Elaboración Propia.

	Tiempo (Días)	ΔL (mm)
Curado	∞	0,1357396
	1	0,00380493
Almacenaje	7	0,06873094
	28	0,13690422
	∞	0,3379144

3.4.2.3 Según el ACI 318: 14

Desafortunadamente el ACI-318-14 en su metodología para la determinación de estas pérdidas no presenta una forma de determinar las deformaciones unitarias de carácter diferido para un tiempo *t* determinado, sino que se evalúan las pérdidas para un tiempo infinito. En este método las pérdidas por retracción para tiempo infinito están dadas por la siguiente expresión:

$$SH = 8,2 \cdot 10^{-6} K_{sh} E_s \left(1 - 2,36 * 10^{-3} \frac{V}{S} \right) (100 - RH)$$

Siendo:

K_{sh} = 1 Para elementos pretesados.

E_s Módulo de deformación del acero.

Capítulo III. Resultados del experimento comparativo. Pérdidas de pretensado en los durmientes

RH La humedad relativa ambiente en %.

V Área bruta de la sección de hormigón (mm²).

S El perímetro de dicha sección (mm).

Realizando un análisis de esta fórmula se puede decir que la multiplicación de todos los valores a excepción E_s , funciona como una deformación unitaria por retracción para tiempo infinito, es decir:

$$\varepsilon_{ret\ en\ t=\infty} = 8,2 \cdot 10^{-6} K_{sh} \left(1 - 2,36 * 10^{-3} \frac{V}{S}\right) (100 - RH)$$

Al evaluar dicha fórmula para cada una de las secciones se obtienen los resultados de la tabla 3.11.

Tabla 3.11 Deformaciones por retracción para tiempo infinito según el ACI 318: 14. Fuente: Elaboración propia.

Tramo	tiempo	ε (10 ⁻⁴)	ΔL retracción (mm)	ΔL total retracción (mm)
AB	∞	1,433	0,0719366	0,3550654
BC	∞	1,437	0,126456	
CD	∞	1,451	0,0824168	
Central	∞	1,456	0,074256	

Estos resultados no sirven para realizar un cotejo con las mediciones en planta, pero sí para un estudio comparativo entre las diferentes normas para la retracción en tiempo infinito. Se puede apreciar que los resultados son semejantes a los de la NC-207:2003 para este fenómeno, pero ambos son muy inferiores al alcanzado según EHE-08.

3.4.3 Cálculo de las deformaciones por fluencia

Al igual que en la retracción para la al cálculo de la deformación por fluencia los diferentes métodos se basan en las características y propiedades del hormigón, así como de las condiciones del ambiente, como lo son la temperatura y la humedad relativa. Pero aquí

Capítulo III. Resultados del experimento comparativo. Pérdidas de pretensado en los durmientes

interviene otro factor que es el cambio de las condiciones de apoyo de los durmientes al pasar al área de almacenaje, lo que condiciona que aparezca un momento flector debido al peso propio de los elementos que no se había tenido en cuenta hasta el momento. Como se vio en el capítulo anterior, los apoyos en estas condiciones se colocan a aproximadamente unos 250 mm de los extremos de los elementos y de igual manera se realizó con la muestra seleccionada. Los durmientes pesan, según proyecto, unos 230 kg, por lo que distribuyendo este peso en su longitud y mediante el empleo del software MD-Solids se obtienen las solicitaciones de la figura 3.3a; por otra parte, trabajando de un modo más exacto, según los cambios de pendiente de las secciones, los resultados son los de la figura 3.3b.

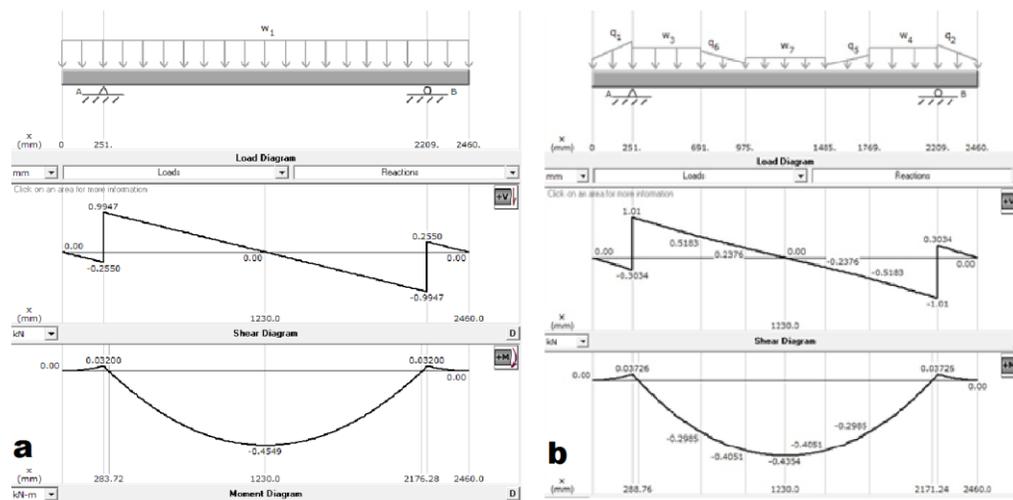


Figura 3.3 Solicitaciones en los durmientes debido al peso propio en el almacenaje. a. De forma simplificada. b. Según los cambios de pendiente en las secciones. Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que los momentos flectores son minúsculos, no llegando ni a los 0.5 kN*m para ninguna de las dos variantes de carga analizadas. Para determinar las tensiones a nivel del centroide de la armadura de refuerzo debidas al peso propio se utiliza la siguiente expresión:

$$\sigma_{pp} = (M_{pp} * e_y) / I$$

Siendo:

M_{pp} Momento flector debido a la carga permanente.

Capítulo III. Resultados del experimento comparativo. Pérdidas de pretensado en los durmientes

e_y Excentricidad del acero pretensado.

I La inercia de la sección neta de hormigón.

El máximo valor de tensión debido al peso propio ocurre en el centro del elemento donde el momento es máximo y la inercia mínima y este valor aun así no supera los $7.684 \cdot 10^{-3}$ MPa en compresión. Por lo anterior expuesto se desprecia el peso propio para el resto de los cálculos que se realizan a continuación, también se consideran despreciables las cargas permanentes para el cálculo de las pérdidas en la etapa de servicio de los elementos, puesto que los mismos se encuentran totalmente apoyados sobre el balasto de la vía férrea.

3.4.3.1 Según la EHE-08

Para determinar la deformación unitaria debido a la fluencia para un tiempo t determinado se utiliza la siguiente expresión:

$$\varepsilon_{c\sigma}(t, t_0) = \sigma_{cp}(t_0) \cdot \left(\frac{\varphi(t, t_0)}{E_{c,28}} \right)$$

Siendo:

$\sigma_{cp}(t_0)$ Tensión en el hormigón en la fibra correspondiente al centro de gravedad de la armadura activa debida a la acción del pretensado, el peso propio y la carga muerta, pero como se mencionó con anterioridad estas últimas dos acciones no son consideradas.

$E_{c,28}$ Módulo de deformación del hormigón a los 28 días de edad, según lo expuesto en el apartado 3.4.1.1.

$\varphi(t, t_0)$ Coeficiente de fluencia para una edad de puesta en carga igual a la edad del hormigón en el momento del tesado (t_0). Se determina mediante la siguiente expresión:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \cdot \beta_c(t, t_0)$$

Donde:

- $\beta_c(t, t_0)$ Coeficiente de desarrollo de la fluencia en el tiempo. Al ser diferente la temperatura a 20°C en todas las etapas por que transita el elemento se calcula:

Capítulo III. Resultados del experimento comparativo. Pérdidas de pretensado en los durmientes

$$\beta_c(t, t_o) = \left[\frac{(t - t_o)}{\beta_{HT} + (t - t_o)} \right]^{0,3}$$

Siendo:

- $\beta_{HT} = \beta_H \cdot \beta_T$

Donde:

$$\beta_T = e^{\left(\frac{1\,500}{273+T} - 5,12\right)}$$

$$\beta_H = 1,5e_f [1 + (0,012HR)^{18}] + 250 \leq 1\,500$$

- t Tiempo en días en que se desea medir las pérdidas diferidas
- t_o Tiempo en días en que se produjo la transferencia del pretensado a partir del momento del hormigonado del elemento. Como temperatura ambiente en el período de curado es diferente de 20°C se hace necesario realizar correcciones en t_o mediante la expresión:

$$t_o = t_r \left[1 + \frac{9}{2+(t_r)^{1,2}} \right]^\alpha \geq 0,5 \text{ días}$$

Donde:

$\alpha=1$ para cementos de alta resistencia y endurecimiento rápido

$$t_r = \sum_{i=1}^{i=n} (\Delta t_i) \cdot e^{-\left[\frac{4\,000}{273+T(\Delta t_i)} - 13,65\right]}$$

En la que:

t_r Edad corregida.

Δt_i Tiempo durante el cual actúa la temperatura $T(\Delta t_i)$

$T(\Delta t_i)$ Temperatura en cada período Δt_i .

Capítulo III. Resultados del experimento comparativo. Pérdidas de pretensado en los durmientes

- φ_o Coeficiente para la deformación por fluencia base. Al ser diferente la temperatura a 20°C durante el período de aplicación de la carga está determinado por la expresión:

$$\varphi_o = \varphi_{HRT} \cdot \beta(f'_{cm}) \cdot \beta(t_o)$$

Donde:

$$\beta(t_o) = \frac{1}{0,1 + (t_o)^{0,2}}$$

$$\beta(f'_{cm}) = \frac{16,8}{\sqrt{f'_{cm}}}$$

$$\varphi_{HR,T} = e^{0,015(T-20)} + (\varphi_{HR} - 1)e^{0,015\sqrt{(T-20)^6}}$$

Siendo:

$$\varphi_{HR} = 1 + \frac{100 - HR}{9,9\sqrt[3]{e_f}}$$

En la tabla 3.12 se muestran los resultados para el acortamiento por fluencia para las diferentes edades en que se realizaron las mediciones.

Tabla 3.12 Resultados de los acortamientos a nivel del centroide de la armadura activa debido a la fluencia según la EHE: 08. Fuente: Elaboración propia.

Tiempo (días)	ΔL total por fluencia (mm)	Observaciones
Transferencia	0,5006884	Acortamiento elástico
7	0,4356876	Fluencia
28	0,6675662	Fluencia
∞	1,460451	Fluencia

3.4.3.2 Según la NC 207: 2003.

Para determinar la deformación unitaria por fluencia para un tiempo t determinado la NC plantea:

Capítulo III. Resultados del experimento comparativo. Pérdidas de pretensado en los durmientes

$$\varepsilon'_{fb,t} = \varepsilon'_b * \varphi * \varphi_t$$

Donde:

- ε'_b Deformación instantánea del hormigón a compresión

$$\varepsilon'_b = \frac{\sigma'_{bp}}{E'_{c,28}}$$

Siendo:

$E'_{c,28}$ Módulo de deformación del hormigón a los 28 días de edad.

σ'_{bp} Tensión de compresión a nivel del centro de gravedad de las armaduras, producida por la fuerza de tracción inicial.

- φ Coeficiente de fluencia del hormigón para tiempo infinito, dado por la expresión:

$$\varphi = (3.6 - 2.4\rho^2) \left[\frac{0.5 + 0.3e}{0.4 + e} \right] \frac{A}{500} \left[1 + 3 \frac{A}{c} \right] [1.72 - \log \sqrt{t_o}]$$

t_o Tiempo en días transcurrido hasta la aplicación del pretensado.

- Coeficiente que permite calcular el valor de la fluencia del hormigón para un tiempo t .

$$\varphi_t = 1 - \frac{1}{10\sqrt{m/16}}$$

m Número de meses transcurridos a partir de la aplicación del pretensado.

Los resultados de los acortamientos para este método se muestran en la tabla 3.13 para las diferentes edades del hormigón.

Capítulo III. Resultados del experimento comparativo. Pérdidas de pretensado en los durmientes

Tabla 3.13 Resultados de los acortamientos a nivel del centroide de la armadura activa debido a la fluencia según la NC 207: 2003. Fuente: Elaboración propia.

Tiempo (días)	ΔL total por fluencia (mm)	Observaciones
Transferencia	0,6188396	Acortamiento elástico
7	0,3163822	Fluencia
28	0,572478	Fluencia
∞	1,283945	Fluencia

3.4.3.3 Según el ACI 318: 14.

Al igual que para la retracción esta norma no presenta una forma de determinar las deformaciones unitarias por retracción para un tiempo t determinado, sino que se evalúan las pérdidas para un tiempo infinito. En este método las pérdidas por fluencia para tiempo infinito están dadas por la siguiente expresión:

$$CR = K_{cr} \frac{E_s}{E_c} (f_{cir} - f_{cds})$$

Donde:

$K_{cr} = 2.0$ Para elementos pretesados

E_c Módulo de deformación del hormigón para la resistencia característica a los 28 días de edad.

f_{cds} Es la tensión normal en el hormigón evaluada para la sección bruta y a nivel del centroide de la armadura pretensada, debida a todas las cargas permanentes sobrepuestas que se aplican al elemento una vez que se ha transferido el pretensado, pero como se desprecian las cargas permanentes, $f_{cds} = 0$.

Como se vio anteriormente $f_{cir} = 0.9 * f_{cpi}$

Realizando el mismo análisis para este método que en la retracción según el ACI se puede decir que la multiplicación de todos los valores a excepción E_s , funciona como un módulo de deformación unitario por fluencia para tiempo infinito, es decir:

Capítulo III. Resultados del experimento comparativo. Pérdidas de pretensado en los durmientes

$$\varepsilon_{ftu \text{ en } t=\infty} = \frac{K_{cr} * 0.9 * f_{cpi}}{E_c} = \frac{2 * 0.9 * f_{cpi}}{E_c} = \frac{1.8 * f_{cpi}}{E_c}$$

Al evaluar dicha fórmula para cada una de las secciones se obtienen los resultados de la tabla 3.14.

Tabla 3.14 Deformación por fluencia para tiempo infinito a nivel del centroide de la armadura activa según el ACI 318: 14. Fuente: Elaboración propia.

Tramo	Tiempo (días)	ε (10^{-4})	ΔL fluencia (mm)	ΔL total por fluencia (mm)
AB	∞	3,388	0,1700776	0,7782506
BC	∞	3,645	0,182979	
CD	∞	4,102	0,2059204	
Central	∞	4,368	0,2192736	

Al igual que para la retracción, estos resultados no sirven para realizar un cotejo con las mediciones en planta, pero sí para un estudio comparativo entre las diferentes normas para la fluencia en tiempo infinito. Se puede apreciar que los resultados son inferiores a los obtenidos según la EHE: 08 y la NC 207: 2003.

3.5 Comparación de los resultados de los cálculos con las mediciones en planta.

Hasta aquí se han obtenidos los resultados de los acortamientos instantáneos y diferidos según las diferentes normas y por otro lado se tienen las mediciones en planta. Para determinar que método de cálculo describe mejor las condiciones de fabricación y almacenaje de la EIIF se hace necesario ver cuál se acerca con mayor precisión a las mediciones realizadas; para esto se realizó el procedimiento de comparación de una media con un valor específico descrito por (Montgomery, 2004) en su libro “Diseño y Análisis de

Capítulo III. Resultados del experimento comparativo. Pérdidas de pretensado en los durmientes

Experimentos” Parte I. El mismo se basa en la estadística de prueba t_0 , la cual se determina mediante la siguiente expresión:

$$t_0 = \frac{y - \mu_0}{\sqrt{\left(\frac{S^2}{n}\right)}}$$

Donde:

y Media muestral, o sea, de las mediciones realizadas.

μ_0 Valor que se desea saber si es representativo o no de la muestra, o sea, el resultado de los cálculos.

S^2 Varianza muestral.

n Tamaño de la muestra.

La hipótesis de que el valor es representativo de la muestra se rechaza si $|t_0| > t_{\frac{\alpha}{2}, n-1}$, donde $t_{\frac{\alpha}{2}, n-1}$ es el porcentual superior $\alpha/2$ de distribución t con $n - 1$ grados de libertad. Los cálculos de realizaron tomando $\alpha=0,05$. (Montgomey, 2004)

3.5.4.1 Comparación para el acortamiento por retracción en la transferencia

Anteriormente en las tablas 3.10 y 3.11 se muestran los resultados de los acortamientos debidos para la retracción a un día de fraguado según los cálculos de la EHE: 08 y la NC 207:2003 respectivamente. A estos valores se les realiza el proceso de comparación con las mediciones en la transferencia en elementos sin acero, cuyos resultados se exponen en la tabla 3.2, que son los que muestran la retracción pura al no estar sometidos al esfuerzo del pretensado. Los resultados del método comparativo se muestran en la tabla 3.15.

Tabla 3.15 Resultados del proceso comparativo para la retracción en la transferencia. Fuente:

Elaboración Propia.

	EHE-08	NC-207:2003
t_0	1,178	10,457
$t_{0,025,11}$	2,201	

Capítulo III. Resultados del experimento comparativo. Pérdidas de pretensado en los durmientes

Como se puede observar en la tabla 3.15 y procediendo como se explicó con anterioridad, las mediciones realizadas no concuerdan con lo expresado en la NC-207:2003, puesto que el módulo de su t_0 es mayor que $t_{0,025,11}$, mientras que se acercan con gran precisión a las expresiones de la EHE-08 para la cual el módulo de t_0 es menor que $t_{0,025,11}$. Por lo que se puede concluir que para el caso que nos acomete resulta de mejor juicio trabajar con las expresiones de la EHE-08 para determinar las pérdidas por retracción del hormigón, pues además de que se acerca con gran precisión a las mediciones realizadas presenta una mayor deformación para tiempo infinito que la NC-207:2003 y el ACI 318: 14, resultando más crítica en este aspecto.

3.5.4.2 Comparación para el acortamiento elástico en la transferencia.

Para realizar el análisis estadístico comparativo entre las mediciones y los cálculos se ha de tener en cuenta que en los durmientes con armadura no se midió directamente el acortamiento elástico, sino que en estos se encuentra implícito también la deformación por retracción, ahora bien, para determinar el acortamiento instantáneo se restó a la media de las mediciones en los elementos con armadura, donde se manifiestan los fenómenos de acortamiento elástico y retracción, la media de las mediciones en los elementos sin pretensado, en los cuales se manifiesta solamente la retracción. Pero para poder realizar el procedimiento estadístico de comparación de una media con un valor se hace necesario calcular la varianza de este último proceso, la misma se determinó mediante la propiedad de la varianza que plantea que si a una muestra X (traviesas con armadura) se le resta una muestra Y (traviesas sin armadura) la varianza será:

$$Var(X - Y) = VarX + VarY - 2Cov(X, Y)$$

Siendo $Cov(X, Y)$ la covarianza de las muestras X y Y .

El resultado de este procedimiento fue un acortamiento elástico medio de 0,581944 mm y una varianza de 0,002574 mm². Los valores del acortamiento elástico para la transferencia para la EHE: 08, la NC 207: 2003 y el ACI 318: 14 se encuentran en las tablas 3.12, 3.13 y 3.14 respectivamente. Los resultados de t_0 para la comparación de la media mencionada con anterioridad con los cálculos realizados se muestran a continuación en la tabla 3.16.

Capítulo III. Resultados del experimento comparativo. Pérdidas de pretensado en los durmientes

Tabla 3.16 Resultados del proceso comparativo para el acortamiento elástico.

Fuente: Elaboración propia.

Norma	EHE: 08	NC 207: 2003	ACI 318: 14
t_0	5,588	-2,466	1,754
$t_{0,025,11}$	2,201		

Como se puede apreciar, para el acortamiento elástico se obtiene una mayor precisión cuando se utiliza en los cálculos el módulo de deformación del hormigón que plantea el ACI 318: 14, pero es la forma conjunta de este módulo de deformación junto con el tratamiento que se le da a las tensiones en esta norma, mediante los distintos coeficientes, la que ofrece un valor representativo de las mediciones realizadas, pues es la única en que $|t_0| < t_{\frac{\alpha}{2}, n-1}$. El ACI trabaja con un módulo de deformación más crítico, pues para este lote de hormigón en transferencia según la EHE: 08 $E_{ci}=3627$ MPa, mientras que para el ACI $E_{ci}=29351.5$ MPa, y no solo para este lote, la EHE presenta mayores módulos de deformación que el ACI para cualquier resistencia a compresión del hormigón menor de 70 MPa, como se puede apreciar en la figura 3.3. Por estas razones se considera que para determinar las pérdidas por acortamiento elástico en estos elementos se ha de proceder mediante lo expuesto en el ACI 3018: 14 para las mismas.

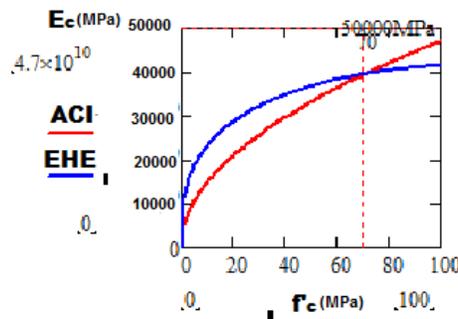


Figura 3.3 Gráficos de resistencia a compresión del hormigón Vs Módulo de deformación.

Fuente: Elaboración propia.

Capítulo III. Resultados del experimento comparativo. Pérdidas de pretensado en los durmientes

3.5.4.3 Comparación para los acortamientos diferidos

Como se vio con anterioridad, los datos de las mediciones con que se cuenta para los acortamientos diferidos son de los 7 a los 28 días para los elementos con acero y los cálculos están realizados para los 7 y los 28 días para la retracción y la fluencia, por lo tanto para determinar el acortamiento diferido de los 7 a los 28 días para las diferentes normas basta con restar el resultado de los 28 días al de los 7 y así se cuenta con un valor con el que se pueden comparar las mediciones, los resultados de este proceso se encuentran en la tabla 3.17. Es necesario recordar que el ACI 318: 14 no muestra resultados para un tiempo t determinado en las pérdidas diferidas.

Tabla 3.17 Acortamientos diferidos por cálculo de los 7 a los 28 días. Fuente: Elaboración propia.

	EHE: 08	NC 207: 2003
Retracción	0,1206504 mm	0,0681733 mm
Fluencia del hormigón	0,2318786 mm	0,2560958 mm
Total	0.3525290 mm	0,3242691 mm

Realizando el procedimiento estadístico de comparación de las mediciones con los cálculos para los acortamientos diferidos totales se obtienen los resultados de la tabla 3.18.

Tabla 3.18 Resultados del proceso comparativo para los acortamientos diferidos.

Fuente. Elaboración Propia.

	NC-207:2003	EHE-08
t_0	4,836	4,6
$t_{0.025,8}$	2,306	

Como se puede apreciar ninguno de los dos métodos analizados resulta representativo de las mediciones realizadas. Resultaría incorrecto plantear que ambas normas se equivocan, más que esto, lo que sucede es que las mediciones de los acortamientos diferidos presentan

Capítulo III. Resultados del experimento comparativo. Pérdidas de pretensado en los durmientes

una gran desviación, pues en la realización de las mismas no se logró la precisión alcanzada en las de la transferencia, ejecutadas en el molde. Como ya se explicó, las mediciones con el dispositivo de distancia fija se realizaron con la ayuda de planchas metálicas que introducen un factor de incertidumbre; además los apoyos de esta herramienta se colocan sobre el tramo central del durmiente, como ya se dijo, por lo que existe una gran distancia en voladizo hasta el extremo de los elementos, lo que trae variaciones de una medición a otra al no poder controlar exactamente a que profundidad de la sección transversal se realizaron las mediciones. Todos estos factores traen consigo errores en las mediciones que no las hacen confiables ni representativas de lo que realmente ocurre en estos elementos. Es necesario señalar que estos errores en la medición ocurren principalmente por no contar con las herramientas de medición de gran precisión necesarias para este tipo de fenómenos; (Guyon, 1965) en su libro “Hormigón Pretensado” expone que:

“El profesor Mr. Evans realiza una serie de ensayos en los Laboratorios de Civil Engineering de la Universidad de Leeds en vigas pretensadas por medio de alambres adherentes de diversos tipos y diferentes diámetros.

En estos ensayos se miden con una precisión muy grande, con ayuda de un microscopio móvil en el que puede leerse 1/4000 de mm, los acortamientos del hormigón entre unas referencias fijadas en las vigas”.

Es decir, se realizó el mismo ensayo que en este trabajo pero se constaba con una precisión que no se puede lograr con las herramientas con que se realizó este estudio.

Haciendo un análisis comparativo de la fluencia para tiempo infinito entre las diferentes normas se puede ver en las tablas 3.12, 3.13 y 3.14 que la que mayor deformación presenta por este fenómeno es la EHE: 08, seguida por la NC y luego por el ACI; por lo que al igual que para la retracción, si se desea ser conservadores, la mejor opción sería la EHE.

3.6 Cálculo de las pérdidas

Hasta aquí se han visto los resultados de las mediciones y los cálculos en la determinación de los acortamientos debidos a los diferentes fenómenos, así como el cotejo de dichos cálculos con las medidas obtenidas y una leve comparación entre ellos, obteniendo hasta

Capítulo III. Resultados del experimento comparativo. Pérdidas de pretensado en los durmientes

ahora los resultados más destacables el ACI 318: 14 para el acortamiento elástico y la EHE: 08 para la retracción y la fluencia. Pero en la determinación de las pérdidas de pretensado se les da un tratamiento diferente a las deformaciones unitarias al que se utiliza para determinar los acortamientos. Por lo tanto, se hace necesario determinar las pérdidas tanto instantáneas como diferidas por los diferentes métodos y así realizar un análisis más detallado de las mismas.

3.6.1 Pérdidas en la longitud de transferencia

Como ya se dijo en el Capítulo I para elementos pretensados, donde no ocurren las pérdidas por fricción, la fuerza de pretensado varía desde cero en el extremo del elemento hasta la fuerza de gateo en la longitud de transferencia. Determinando la longitud de transferencia (l_{tr}) mediante la metodología del MODEL CODE CEB-FIP, descrita en el Capítulo I, se tiene que:

$\alpha_1 = 1$ Para transferencia lenta del pretensado, pues no se realiza mediante corte de barras, sino mediante el desenrosque de los tirantes.

$\alpha_2 = 1$ Para el cálculo a esfuerzo cortante o $\alpha_2 = 0,5$ para el cálculo de la armadura transversal en la zona de anclaje. Realizando una consideración desfavorable $\alpha_2 = 1$.

$\alpha_3 = 0.7$ Para alambres.

$$f_{pj} = 1089,4 \text{ MPa}$$

$$a_p = \frac{\pi * d_b^2}{4} = \frac{\pi * 9,5^2}{4} = 70,88 \text{ mm}^2$$

$$p = \pi * d_b = \pi * 9,5 \text{ mm} = 29.85 \text{ mm}$$

$$f'_{ci} = 39 \text{ MPa}$$

$n_1 = 1,4$ Para alambres

$n_2 = 0,7$

$$l_{tr} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \frac{f_{pj}}{f_{pu}} \left[\frac{a_p}{p} \left(\frac{1,5}{n_1 n_2} \right) \frac{f_{py}}{f'_{ci}} \right] = 1 * 1 * 0,7 * \frac{1089,4}{1570} * \left[\frac{70,88}{29,85} * \left(\frac{1,5}{1,4 * 0,7} \right) * \frac{1370}{39} \right]$$

Capítulo III. Resultados del experimento comparativo. Pérdidas de pretensado en los durmientes

$l_{tr} = 62 \text{ mm}$

Por otra parte, el ACI 318: 14 plantea que la longitud de transferencia es $50d_b$ si se trata de torones o $100d_b$ si se trata de alambres, para este caso 475 mm y 950 mm respectivamente, lo cual parece ser algo exagerado puesto que las barras son corrugadas; pero precisamente ninguno de estos dos métodos para determinar esta longitud plantea en sus enunciados el caso de las barras corrugadas de acero ALE, pues este es un producto relativamente poco utilizado en las técnicas de pretensado, por lo que se considera que sea cual fuere la longitud de transferencia será menor que la planteada por estos métodos, aunque se toma como aproximado para los cálculos siguientes el obtenido por el MODEL CODE CEB-FIP.

3.6.2 Pérdidas por acortamiento elástico

A continuación en la figura 3.4 se muestran los resultados según las diferentes normas para la pérdida por acortamiento elástico en los durmientes italianos producidos con el lote de hormigón 067-17.

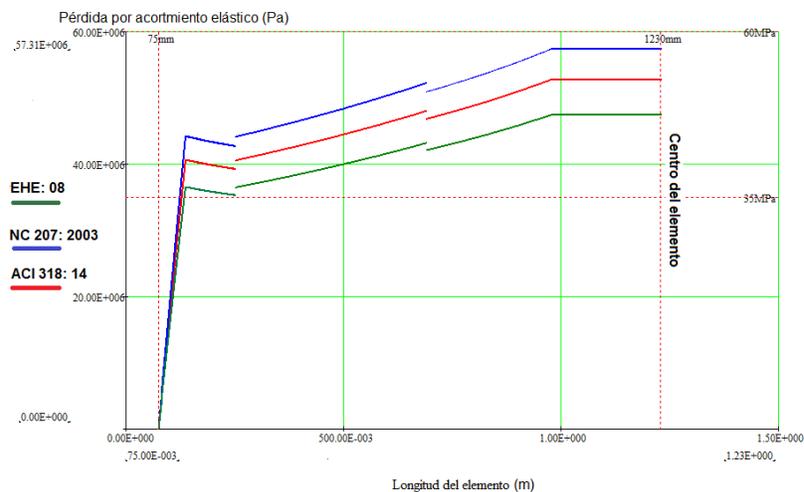


Figura 3.4 Pérdidas por acortamiento elástico. Fuente: elaboración propia.

Se puede ver como las pérdidas aumentan conforme lo hace la tensión en el hormigón, se puede ver en la longitud de transferencia y de manera semejante al disminuir las dimensiones del elemento hacia su centro. También es apreciable, tal como era de esperarse, que al igual que con los acortamientos instantáneos tiene gran influencia el

Capítulo III. Resultados del experimento comparativo. Pérdidas de pretensado en los durmientes

módulo de deformación del hormigón para la transferencia. Por lo visto anteriormente en la comparación de los valores de acortamiento elástico en la transferencia, lo referente al módulo de deformación y ahora en la determinación de las pérdidas se puede plantear que el método más representativo de lo que ocurre en esta etapa en los elementos de la Línea de Producción # 1 de la EIIF es el del ACI 318: 14.

En la tabla 3.18 se muestran los resultados para las secciones medias de los diferentes tramos en que se dividió el elemento para su análisis según las diferentes normas.

Tabla 3.18 Pérdidas por acortamiento elástico para las secciones medias de los tramos.

Fuente: Elaboración propia.

Pérdida por acortamiento elástico.	AB	BC	CD	Central
EHE: 08	36,02 MPa	39,51 MPa	44,48 MPa	47,36 MPa
NC 207: 2003	43,59 MPa	47,81 MPa	53,83 MPa	57,32 MPa
ACI 318: 14	40,07 MPa	43,95 MPa	49,48 MPa	52,68 MPa

3.6.3 Pérdidas diferidas

Como se vio con anterioridad, cada norma ofrece un procedimiento diferente para la determinación de las deformaciones unitarias por retracción y fluencia; además ofrecen diferentes tratamientos para las mismas mediante el uso de coeficientes y expresiones. Por otra parte, no se ha evaluado la influencia de la relajación del acero, por esto se hace necesaria la evaluación de las pérdidas diferidas para tiempo infinito, las cuales se pueden observar en la figura 3.5.

Capítulo III. Resultados del experimento comparativo. Pérdidas de pretensado en los durmientes

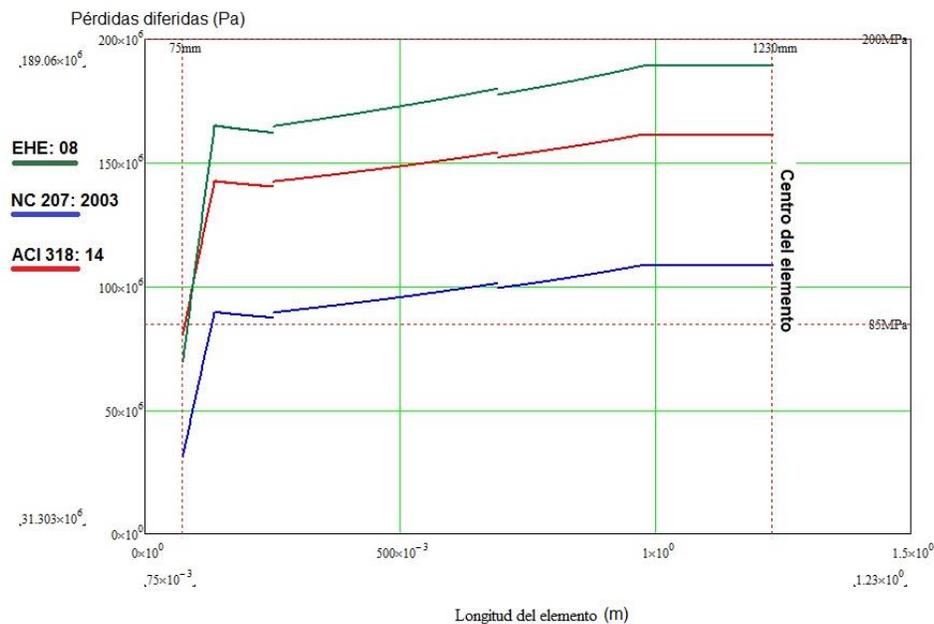


Figura 3.5 Pérdidas diferidas. Fuente: Elaboración propia.

Al igual que con las pérdidas por acortamiento elástico las diferidas aumentan conforme lo hace la tensión en el hormigón. Se puede apreciar a simple vista que la EHE: 08 es la que mayores pérdidas diferidas expresa en su metodología, cuestión esta de esperarse dado que era la que mayores deformaciones enuncia respecto a la retracción y la fluencia. Por lo expuesto anteriormente para la determinación de la retracción en la transferencia, y trabajando conservadoramente se hace favorable trabajar con la EHE: 08 en la determinación de las pérdidas diferidas para tiempo infinito.

En la tabla 3.19 se muestran las pérdidas diferidas para las secciones medias de los diferentes tramos en que se dividió el elemento para su análisis según las diferentes normas.

Capítulo III. Resultados del experimento comparativo. Pérdidas de pretensado en los durmientes

Tabla 3.19 Pérdidas diferidas para las secciones medias los tramos. Fuente: Elaboración propia.

Pérdidas diferidas	AB	BC	CD	Central
EHE: 08	147,51 MPa	171,70 MPa	182,80 MPa	189,10 MPa
NC 207: 2003	78,92 MPa	94,74 MPa	103,50 MPa	108,50 MPa
ACI 318: 14	131,15 MPa	147,68 MPa	156,30 MPa	161,30 MPa

3.6.4 Pérdidas totales

A continuación en la figura 3.6 se muestran las pérdidas totales para las diferentes normas y tomando las pérdidas por acortamiento elástico según ACI 318: 14 y las diferidas de la EHE: 08, con las siglas $ES + \Delta P_{dif}$.

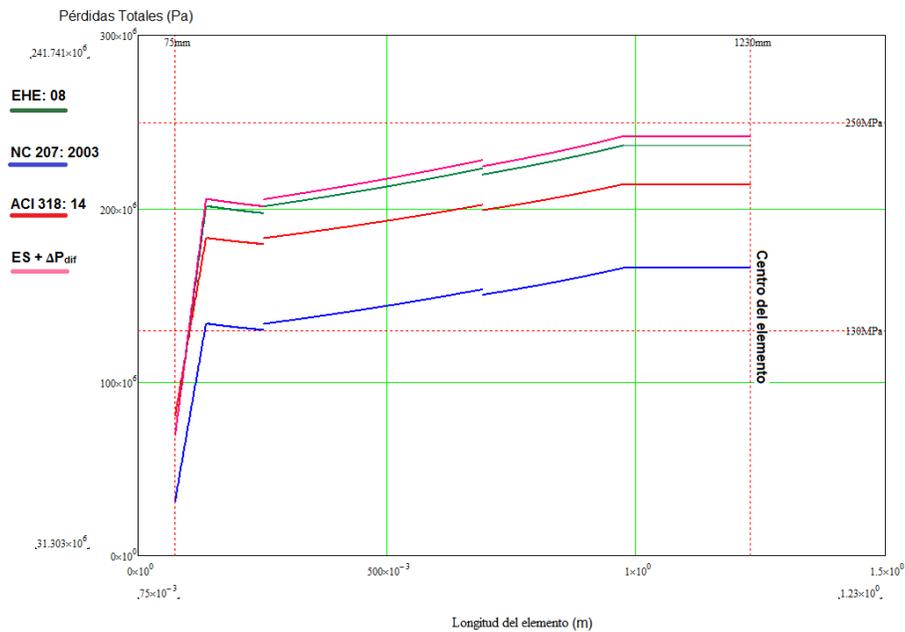


Figura 3.6 Pérdidas totales. Fuente: Elaboración propia.

Capítulo III. Resultados del experimento comparativo. Pérdidas de pretensado en los durmientes

Para las pérdidas totales la EHE: 08 continúa siendo la más crítica, al igual que para las diferidas, y al sumar las debidas al acortamiento elástico del ACI 318: 14 con las diferidas de la EHE: 08 se obtienen resultados más críticos aún.

En la tabla 3.20 se muestran las pérdidas diferidas para las secciones medias de los diferentes tramos en que se dividió el elemento para su análisis.

Tabla 3.20 Pérdidas totales para las secciones medias de los tramos. Fuente: Elaboración propia.

Pérdidas Totales	AB	BC	CD	Central
EHE: 08	183,53 MPa	211,21 MPa	227,28 MPa	236,46 MPa
NC 207: 2003	122,51 MPa	142,55 MPa	157,33 MPa	165,82 MPa
ACI 318: 14	171,22 MPa	191,63 MPa	205,78 MPa	213,98 MPa
ES + ΔP_{dif}	187,58 MPa	215,65 MPa	232,28 MPa	241,78 MPa

3.7 Conclusiones parciales

1. Las mediciones de los acortamientos diferidos realizados con el instrumento de distancia fija no resultan representativas de lo que ocurre en la realidad, pues con esta herramienta no se logró la precisión que se necesita para este tipo de fenómenos.
2. De los métodos analizados para la determinación del acortamiento elástico el que resulta representativo de las mediciones realizadas es el ACI 318: 14, teniendo gran influencia la forma de determinar el módulo de deformación del hormigón y el tratamiento mediante los diferentes coeficientes que se le da a la tensión en el hormigón.
3. Para el acortamiento por retracción en el instante de la transferencia resulta como representativo de las mediciones el método de la EHE: 08 en la predicción del mismo, además de ser el método que mejor describe el proceso constructivo y de almacenaje mediante la inclusión de factores y expresiones que tienen en cuenta

Capítulo III. Resultados del experimento comparativo. Pérdidas de pretensado en los durmientes

parámetros como la temperatura, la resistencia del hormigón, la velocidad del fraguado y la humedad relativa.

4. El método que mayor deformación unitaria expresa para los efectos de la retracción y la fluencia del hormigón para tiempo infinito es la EHE: 08 y así se refleja en la determinación de las pérdidas diferidas para este método, siendo el que mayores resultados ofrece.
5. Se aprecia como las pérdidas aumentan conforme lo hace la tensión en el hormigón, ya sea mientras aumenta la tensión de los aceros en la longitud de transferencia o mientras disminuyen las dimensiones de la sección transversal hacia el interior del elemento.
6. Se decide tomar el método del ACI 318: 14 para determinar las pérdidas por acortamiento elástico y siendo conservadores y teniendo en cuenta que el valor que ofrece para la estimación de la retracción en la transferencia resulta representativo de las mediciones realizadas se decide trabajar con las pérdidas diferidas según la EHE: 08; lo que da como resultado una caída de tensión total para tiempo infinito de 215,65 MPa para la sección bajo carril y de 241.78 MPa.

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

1. Las pérdidas que ocurren en los elementos pretesados, como lo son las traviesas producidas por la EIIF, son la caída de tensión en la longitud de transferencia y el acortamiento elástico de manera instantánea, mientras que de forma diferida actúan la retracción y fluencia del hormigón, así como por la relajación del acero, trayendo consigo una caída de tensión en la armadura activa dependiente del tiempo.
2. Se midieron los acortamientos en la transferencia a los 7 y 28 días de edad a un grupo de 24 elementos producidos con la tecnología italiana (12 con armadura activa y 12 sin armadura), con el fin de comparar estos resultados con los que ofrecen los diferentes métodos en la determinación de pérdidas y así determinar a cuál se ajustan mejor las condiciones de fabricación y almacenaje de los durmientes de la EIIF.
3. El método propuesto por la ACI 318: 14 resulta ser el que más se asemeja a las mediciones realizadas para el acortamiento elástico, teniendo gran influencia la forma de determinar el módulo de deformación del hormigón y el tratamiento mediante los diferentes coeficientes que se le da a la tensión en el hormigón.
4. Para el acortamiento por retracción en el instante de la transferencia la EHE: 08 se acercó más a los resultados obtenidos; además, es el método que mejor describe el proceso constructivo y de almacenaje mediante la inclusión de factores y expresiones que tienen en cuenta parámetros como la temperatura, la resistencia del hormigón, la velocidad del fraguado y la humedad relativa.
5. El método que mayor deformación unitaria expresa para los efectos de la retracción y la fluencia del hormigón para tiempo infinito es la EHE: 08 y así se refleja en la determinación de las pérdidas diferidas para este método, siendo el que mayores resultados ofrece.

Conclusiones y Recomendaciones

6. El método utilizado para hallar las pérdidas diferidas es el EHE: 08, ya que el valor que ofrece para la estimación de la retracción en la transferencia resulta representativo de las mediciones realizadas, siendo también el que mayores valores para estas pérdidas ofrece.
7. Atendiendo a los resultados obtenidos se elabora una metodología para la determinación de las pérdidas instantáneas y diferidas, definiéndose el cálculo de las primeras por el ACI 318: 14 por ser la que ofrece resultados representativos de la muestra. Las diferidas de forma general no ofrecen similitudes los resultados de ninguna norma con las mediciones, siendo la EHE: 08 la que más se acerca.

Recomendaciones

Estudiar detalladamente la determinación de la longitud de transferencia en elementos pretesados con armadura activa compuesta de barras corrugadas de acero ALE.

Realizar un estudio estadístico de los factores que influyen en la deformación de las traviesas monobloque de hormigón pretensado producidas en la EIIF para dar solución de la no representatividad de las mediciones de los acortamientos diferidos.

Implementar los resultados obtenidos a hojas de cálculo y software de modelación para describir el comportamiento de los durmientes en sus diferentes etapas de trabajo.

Bibliografía

Introducción al hormigón pretensado.

2002. Capítulo 24: Hormigón Pretensado –Flexión ACI 318-02.

ACI-318 2014. Requisitos para Hormigón Estructural.

ALEMÁN, E. V. 2016a. *Aplicación del bioproducto CBQ-VTC en las traviesas de hormigón pretensado.*

ALEMÁN, G. S. 2016b. *Chequeo del agotamiento en las traviesas de hormigón pretensado de producción nacional.*, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.

BLAY CARRAZANA, V. 2014. Revisión estructural de la traviesa monobloque de hormigón pretensado CUBA71. Chequeo tensional para la etapa de servicio.

BOUZAS CONSUEGRA, J. C. 2015. Cálculo de las cargas y las solicitaciones actuantes en las traviesas.

CALAVERA, J. 2005. Pérdidas de la Fuerza de Pretensado. Fuerza Final de Pretensado. *Proyecto y Cálculo de Estructuras de Hormigón. Tomo I.*

CANEIRO, J. A. H. & SANTANA, J. J. H. 2016. Hormigón Pretensado. *In: VARELA, E. U. F. (ed.) Hormigón Estructural. Tomo II. Parte 2.* La Habana.

EHE 2008. Instrucción de hormigón Estructural.

GMBH, D. K. 2016.

GUYON, Y. 1965. *Hormigón Pretensado.*

HERNÁNDEZ-GIL.

HERNÁNDEZ CANEIRO, J. A. & HERNÁNDEZ SANTANA, J. J. *Hormigón Estructural Diseño por Estados Límites. Tomo II.*

HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ, K. 2013. Automatización del Diseño Geométrico y Estructural de las Vías Férreas en Cuba.

LIMA MENÉNDEZ, J. 2011. *Diseño, construcción y conservación de vías férreas.* UCLV.

LIN, T. Y. & BURNS, N. H. 1981. *Desing of Presstressed Concrete Structures.*

LÓPEZ, A. 2006. *Infraestructuras ferroviarias.*, España.

MONTGOMERY, D. C. 2004. *Diseño y Análisis de Experimentos. Parte I.*

MONTGOMEY, D. C. 2004. *Diseño y Análisis de Experimentos. Parte II.*

- MONTOYA, P. J., MESEGUER, A. G. & CABRÉ, F. M. 2000. *Hormigón Armado*, Barcelona.
- NAWY, E. G. 2003. *Prestressed Concrete a Fundamental Approach*.
- NC-192 2007. Cálculo de la Resistencia Característica real a la compresión. *In: 192 (ed.) NC 192*.
- NC-207 2003. Requisitos Generales para el Diseño y Construcción de Estructuras de Hormigón.
- NILSON, A. H. 2001. *Diseño de estructuras de concreto*, Bogotá, Mc GRAW-HILL.
- PCI 2004. PCI Desing Handbook. *In: PCI (ed.)*.
- RÜSH, E. H. H. & JUNGWIRT, D. 1982. Consideraciones de la Fluencia y de la Retracción Plástica y de la Retracción de Fraguado Sobre el Comportamiento de las Estructuras Sometidas a Esfuerzos. *Hormigón Armado y Hormigón Pretensado*.
- VALVERDE PERALTA, D. J. & ULLAGUARI GUAMAN, K. R. 2015. "ANÁLISIS Y DISEÑO TRIDIMENSIONAL DE ELEMENTOS PRETENSADOS".

Referencias bibliográficas

- ACI-318 2014. Requisitos para Hormigón Estructural.
- ALEMÁN, G. S. 2016. *Chequeo del agotamiento en las traviesas de hormigón pretensado de producción nacional.*, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- BLAY, V. C. 2014. *Revisión estructural de la traviesa monobloque de hormigón pretensado CUBA71. Chequeo tensional para la etapa de servicio*.
- BOUZAS CONSUEGRA, J. C. 2015. Cálculo de las cargas y las solicitaciones actuantes en las traviesas.
- CALAVERA, J. 2005. Pérdidas de la Fuerza de Pretensado. Fuerza Final de Pretensado. *Proyecto y Cálculo de Estructuras de Hormigón. Tomo I*.
- CANEIRO, J. A. H. & SANTANA, J. J. H. 2016. Hormigón Pretensado. *In: VARELA, E. U. F. (ed.) Hormigón Estructural. Tomo II. Parte 2*. La Habana.
- EHE 2008. Instrucción de hormigón Estructural.

GUYON, Y. 1965. *Hormigón Pretensado*.

HERNÁNDEZ & GIL 2008. *Hormigón Estructural*.

HERNÁNDEZ CANEIRO, J. A. & HERNÁNDEZ SANTANA, J. J. 2016. Hormigón Pretensado. *Hormigón Estructural. Tomo II. Parte II*. La Habana: Félix Varela.

MONTGOMERY, D. C. 2004. *Diseño y Análisis de Experimentos. Parte I*.

MONTGOMEY, D. C. 2004. *Diseño y Análisis de Experimentos. Parte II*.

NC-192 2007. Cálculo de la Resistencia Característica real a la compresión. *In: 192 (ed.) NC 192*.

NC-207 2003. Requisitos Generales para el Diseño y Construcción de Estructuras de Hormigón.