



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

*E.T.S. DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS*

*DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN  
Y DE PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL*

*INSTITUTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DEL HORMIGÓN*

TESIS DOCTORAL

**COMPORTAMIENTO ADHERENTE DIFERIDO  
DE ARMADURAS PRETESAS EN HORMIGÓN**

AUTOR:

LIBARDO ANDRES CARO FORERO

DIRECTORES:

Dr. JOSÉ ROCÍO MARTÍ VARGAS

Dr. PEDRO SERNA ROS

VALENCIA, JULIO DE 2012

---

Libardo Andres Caro Forero  
ICITECH, Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil  
Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n, 46071 Valencia, España  
Tel.: +34 963877000 ext. 75619; fax: +34 963877568  
E-mail: [licafo@upvnet.upv.es](mailto:licafo@upvnet.upv.es)

---

*A mis padres:  
Islena Forero y Libardo Caro*

*A mis hermanas  
Diana y Magda*

*A mi familia*

---

(Esta página se ha dejado intencionadamente en blanco)

---

# AGRADECIMIENTOS

A mis Directores de Tesis, D. José Rocío Martí Vargas y D. Pedro Serna Ros, por su orientación, enseñanzas, ayuda y paciencia para desarrollar esta Tesis Doctoral.

A los profesores y personal administrativo del Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil de la Universidad Politécnica de Valencia, así como del Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón ICITECH.

Al personal técnico del Laboratorio de Hormigón del Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil de la UPV, en especial a D. Francisco José Martorell por su colaboración y ayuda a lo largo de la fase experimental.

Al Ministerio de Educación y Ciencia por el apoyo recibido a través de proyecto “Estudio teórico-experimental de la influencia de los fenómenos diferidos en el comportamiento adherente de las armaduras pretensas en elementos prefabricados de hormigón (BIA2006-05521)”.

A las empresas Asland, Basf, Graveras Castellana, Isocron, y Prevalesa por suministrar los materiales que han hecho posible la realización de esta Tesis Doctoral.

Finalmente, quiero dar un agradecimiento muy especial a Andrea, Diego Martínez, Elkin, Erich, Lucho, Mary, Paulo, Samu, Yezid Alvarado, y tantas otras personas quienes considero más que amigos, ya que en este largo trayecto han sido familia y apoyo incondicional, a todos ellos mil gracias.



(Esta página se ha dejado intencionadamente en blanco)

---

# RESUMEN

El comportamiento de los elementos estructurales de hormigón depende considerablemente de la adherencia armadura-hormigón. En elementos de hormigón pretensado mediante armaduras pretensas, el hormigonado se realiza alrededor de las armaduras tesadas. Al destesar, la fuerza de pretensado es transmitida por adherencia al hormigón a lo largo de la longitud de transmisión.

La longitud de transmisión constituye un importante parámetro de diseño. Ahora bien, las simplificaciones introducidas en las normativas conducen a expresiones de cálculo que arrojan valores muy heterogéneos, y no consideran la evolución de la longitud de transmisión con el tiempo.

La hipótesis de partida en la que se sustenta esta Tesis Doctoral parte de que los elementos de hormigón pretensado ven modificada su estado tenso-deformacional con el tiempo a causa de los fenómenos de retracción y fluencia del hormigón y relajación de la armadura, con las consecuentes pérdidas de pretensado. Se pretende, por tanto, analizar la influencia de estos fenómenos en el comportamiento adherente de las armaduras pretensas.

Se ha realizado una revisión de la literatura científica sobre parámetros que influyen en la adherencia, sobre técnicas de ensayo para determinar la longitud de transmisión y las pérdidas de pretensado, y sobre expresiones que cuantifican esta longitud y los modelos para predecir dichas pérdidas.

Se ha desarrollado un programa experimental. Se ha concebido un método de ensayo (ECADA+) consistente en una versión revisada y mejorada del método ECADA, con el fin de medir la longitud de transmisión inicial y diferida a partir del control de la fuerza soportada por la armadura. También se han medido deslizamientos de armaduras y se han obtenido deformaciones longitudinales del hormigón. Se ha realizado un análisis comparativo de las longitudes obtenidas mediante las tres técnicas, y se ha propuesto la inclusión de un factor en las expresiones de cálculo para obtener la longitud de transmisión diferida.

Asimismo, se ha comparado la fuerza de pretensado medida con el ensayo ECADA+ con la obtenida a partir de deformaciones del hormigón, observándose una sobrevaloración de la fuerza de pretensado con el método ECADA+. Por ello, se ha determinado un coeficiente de subestimación de pérdidas de pretensado que depende de la sección transversal de la probeta, tanto para la respuesta inicial como para la diferida. Por último, se han estimado las pérdidas de pretensado a partir de los parámetros medidos usando diferentes métodos de cálculo, y se han comparado dichas pérdidas con los resultados experimentales.



(Esta página se ha dejado intencionadamente en blanco)



---

# RESUM

El comportament dels elements estructurals de formigó depèn considerablement de l'adherència armadura-formigó. En elements de formigó pretesat per mitjà d'armadures preteses, el formigonat es realitza al voltant de les armadures tesades. Al destesar, la força de pretesat és transmesa per adherència al formigó al llarg de la longitud de transmissió.

La longitud de transmissió constitueix un paràmetre important de disseny. Ara bé, les simplificacions introduïdes en les normatives condueixen a expressions de càlcul que presenten valors molt heterogenis, i no consideren l'evolució de la longitud de transmissió amb el temps.

La hipòtesi de partida en què es sustenta aquesta Tesi Doctoral part que els elements de formigó pretesat veuen modificat el seu estat tenso-deformacional amb el temps a causa dels fenòmens de retracció i fluència del formigó i relaxació de l'armadura, amb les conseqüents pèrdues de pretesat. Es pretén, per tant, analitzar la influència d'aquests fenòmens en el comportament adherent de les armadures preteses.

S'ha realitzat una revisió de la literatura científica sobre paràmetres que influeixen en l'adherència, sobre tècniques d'assaig per a determinar la longitud de transmissió i les pèrdues de pretesat, i sobre expressions que quantifiquen aquesta longitud i els models per a predir les nomenades pèrdues.

S'ha desenrotllat un programa experimental. S'ha concebut un mètode d'assaig (ECADA+) consistent en una versió revisada i millorada del mètode ECADA, a fi de mesurar la longitud de transmissió inicial i diferida a partir del control de la força suportada per l'armadura. També s'han mesurat lliscaments d'armadures i s'han obtingut deformacions longitudinals del formigó. S'ha realitzat una anàlisi comparatiu de les longituds obtingudes per mitjà de les tres tècniques, i s'ha proposat un factor a incloure a les expressions de càlcul per a obtindre la longitud de transmissió diferida.

Així mateix, s'ha comparat la força de pretesat mesurada amb l'assaig ECADA+ amb l'obtinguda a partir de deformacions del formigó, observant-se una sobrevaloració de la força de pretesat amb el mètode ECADA+. Per això, s'ha determinat un coeficient de subestimació de pèrdues de pretesat que depèn de la secció transversal de la proveta, tant per a la resposta inicial com per a la diferida. Finalment, s'han estimat les pèrdues de pretesat a partir dels paràmetres mesurats usant diferents mètodes de càlcul, i s'han comparat les dites pèrdues amb els resultats experimentals.



(Esta página se ha dejado intencionadamente en blanco)

---

# S U M M A R Y

The behavior of structural concrete members strongly depends on the bond between reinforcement and surrounding concrete. In pretensioned prestressed concrete members, concreting is done around the prestressing reinforcement. At release, the prestressing force is transferred by bond to the concrete along the transfer length.

Transfer length is an important design parameter. However, the assumptions included at the standards lead to expressions of calculation yield values very heterogeneous and do not consider the increases of the transfer length through time.

The hypothesis that is supported in this thesis assumes that the prestressed concrete member modifies its stress-strain state with time because of the phenomena of shrinkage and creep of concrete and relaxation of strand, what produces unavoidable prestress losses. The aim, therefore, is to analyze the influence of these phenomena in the bond behavior of prestressing reinforcement.

It has performed a review of the literature about parameters that influence bond, testing techniques to determine the transfer length and prestress losses, and expressions that quantify this length and models for predicting such losses.

An experimental program has been developed and a test method (ECADA+) conceived which consists of a revised and improved version of the method ECADA, in order to measure both the initial and long-term transfer length from the control force supported by the strand. Slips strands have been also measured and longitudinal strains of concrete obtained. A comparative analysis of the long-term transfer lengths obtained from the three techniques has been performed, and an additional factor in expressions for long-term transfer length calculation has been proposed.

Additionally, the prestressing force measured by the test ECADA+ and the obtained from strain of concrete were compared and an overestimation of the prestressing force to the method ECADA+ was observed. Therefore, it has been determined an underestimation coefficient of prestress losses which depends on the prestressing of the cross section of the specimen, both for the initial response and as deferred. Finally, prestress losses from the measured parameters using different calculation methods have been estimated, and such losses have been compared with experimental results.



(Esta página se ha dejado intencionadamente en blanco)

# ÍNDICE

## ÍNDICE DE FIGURAS Y FOTOGRAFÍAS

## ÍNDICE DE TABLAS

	<i>pág.</i>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1.1</b>
1.1 Antecedentes.....	1.1
1.2 Objetivos.....	1.2
1.3 Contenido del documento.....	1.3
<b>2. ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>2.1</b>
2.1 Descripción del fenómeno adherente.....	2.1
2.2 Mecanismos adherentes.....	2.2
2.3 Parámetros que afectan a la adherencia.....	2.5
2.3.1 Parámetros asociados al hormigón.....	2.5
2.3.2 Parámetros asociados a la armadura.....	2.8
2.3.3 Parámetros asociados al diseño.....	2.10
2.3.4 Parámetros asociados al procedimiento de fabricación.....	2.11
2.3.5 Parámetros asociados a la variación del comportamiento adherente con el tiempo.....	2.12
2.4. Métodos experimentales para determinar la longitud de transmisión....	2.22
2.4.1 Simulación de la zona de transmisión.....	2.22
2.4.2 Medición de las deformaciones en la superficie del hormigón....	2.23
2.4.3 Medición del deslizamiento de la armadura pretensada.....	2.25
2.4.4 Medición de la fuerza de pretensado.....	2.26
2.5. Expresiones para calcular las longitudes de transmisión.....	2.28
2.5.1 Cálculo de la longitud de transmisión.....	2.28
2.5.2 Cálculo de la longitud de transmisión a partir de la penetración de la armadura.....	2.33

2.6. Pérdidas de pretensado.....	2.36
2.6.1 Introducción.....	2.36
2.6.2 Estudios previos de la pérdida de fuerza de pretensado.....	2.37
2.6.3 Técnicas experimentales para determinar las pérdidas de pretensado.....	2.51
2.6.4 Métodos de cálculo de las pérdidas de pretensado.....	2.53
<b>3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>3.1</b>
3.1 Variables analizadas.....	3.1
3.2 Parámetros fijos del ensayo de adherencia.....	3.2
3.3 Materiales empleados.....	3.3
3.3.1 Componentes del hormigón.....	3.3
3.3.2 Armaduras.....	3.4
3.4 Dosificaciones de los hormigones.....	3.5
3.4.1 Dosificación del hormigón tradicional.....	3.5
3.4.2 Dosificación del hormigón Autocompactante.....	3.6
3.4.3 Dosificación del hormigón con fibras.....	3.7
3.4.4 Dosificación del hormigón reciclado.....	3.7
3.5 Ensayos de caracterización del hormigón y sus constituyentes.....	3.8
3.5.1 Ensayos de caracterización de los componentes del hormigón...	3.8
3.5.2 Ensayos de caracterización del hormigón en estado fresco.....	3.8
3.5.3 Ensayos de caracterización del hormigón en estado endurecido	3.9
3.6 Caracterización de las propiedades adherentes iniciales.....	3.10
3.7 Determinación del comportamiento adherente diferido.....	3.11
3.8 Programa de ensayos.....	3.12
<b>4. METODOLOGÍA DE ENSAYO (ECADA+).....</b>	<b>4.1</b>
4.1 Fundamentos del método de ensayo.....	4.2
4.2 Descripción del dispositivo de ensayo ECADA+.....	4.3
4.3 Instrumentación adicional.....	4.7

4.4	Procedimiento operativo.....	4.9
4.4.1	Etapa de preparación.....	4.10
4.4.2	Etapa ensayo inicial.....	4.12
4.4.3	Etapa ensayo diferido.....	4.14
4.5	Comprobación del sistema AMA.....	4.15
4.6	Requerimientos del sistema AMA.....	4.18
4.7	Criterio de interpretación de los resultados.....	4.20
4.7.1	Criterio para determinar la longitud de transmisión inicial.....	4.20
4.7.2	Criterio para determinar la longitud de transmisión diferida.....	4.21
4.7.3	Criterio para determinar los valores medios de la deformación del hormigón a lo largo de la longitud de la probeta.....	4.22
<b>5.</b>	<b>PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>5.1</b>
5.1	Resultados de ensayos de caracterización de los hormigones.....	5.1
5.1.1	Caracterización en estado fresco .....	5.1
5.1.2	Caracterización en estado endurecido.....	5.1
5.2	Resultados de caracterización de las propiedades adherentes iniciales..	5.5
5.2.1	Resultados de longitud de transmisión inicial (ECADA+).....	5.5
5.2.1.1	<i>Pérdida de fuerza</i> .....	5.5
5.2.1.2	<i>Fuerza transmitida</i> .....	5.6
5.2.2	Resultados de la longitud de transmisión inicial con el método de deslizamientos.....	5.7
5.2.2.1	<i>Deslizamiento en el extremo libre</i> .....	5.7
5.2.2.2	<i>Deslizamiento en el extremo de arrancamiento</i> .....	5.8
5.2.3	Resultados de longitud de transmisión inicial con el método de deformaciones longitudinales del hormigón (DEMEC).....	5.9
5.2.4	Resultados de la longitud de anclaje.....	5.11
5.2.5	Resumen de resultados.....	5.12
5.3	Resultados del comportamiento adherente diferido.....	5.15
5.3.1	Resultados de la longitud de transmisión diferida (ECADA+).....	5.15
5.3.1.1	<i>Pérdida de fuerza</i> .....	5.16
5.3.1.2	<i>Fuerza transmitida</i> .....	5.17
5.3.2	Resultados de longitud de transmisión diferida método de deslizamientos.....	5.18
5.3.2.1	<i>Deslizamientos en el extremo libre</i> .....	5.19

5.3.3	Resultados de la longitud de transmisión diferida con el método de deformaciones longitudinales del hormigón (DEMEC).....	5.20
5.3.4	Resumen de resultados.....	5.21
5.3.5	Resultados de retracción del hormigón.....	5.23
5.3.6	Resultados pérdida de fuerza de pretensado.....	5.24
5.3.6.1	<i>Pérdida de fuerza de pretensado con el método ECADA+.....</i>	5.24
5.3.6.2	<i>Pérdida de fuerza de pretensado a partir de las deformaciones del hormigón (DEMEC).....</i>	5.25
5.3.7	Resumen de resultados.....	5.27
<b>6.</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>6.1</b>
6.1	Análisis de la longitud de transmisión diferida con el método ensayo ECADA+.....	6.1
6.2	Análisis de la longitud de transmisión diferida a partir de los deslizamientos en el extremo libre.....	6.8
6.2.1	Análisis de los resultados obtenidos por el método ECADA+ y por el criterio de deslizamientos en el extremo libre de la probeta.....	6.9
6.2.2	Comparación de los resultados obtenidos por el método ECADA+ y los resultados obtenidos con por la expresión de Guyon.....	6.11
6.3	Análisis de la longitud de transmisión diferida con el método de deformaciones longitudinales de la probeta de hormigón (DEMEC).....	6.20
6.3.1	Análisis paramétrico de la longitud de transmisión diferida con el método del 95% AMS.....	6.23
6.3.1.1	<i>Edad de destesado.....</i>	6.24
6.3.1.2	<i>Resistencia a compresión del hormigón.....</i>	6.27
6.3.1.3	<i>Sección transversal de la probeta.....</i>	6.29
6.3.1.4	<i>Tipo de destesado.....</i>	6.30
6.3.1.5	<i>Hormigones especiales.....</i>	6.31
6.3.1.6	<i>Resumen.....</i>	6.34
6.3.2	Comparativas de las deformaciones diferidas en el tramo de meseta.....	6.35
6.3.2.1	<i>Edad de destesado.....</i>	6.35
6.3.2.2	<i>Resistencia del hormigón.....</i>	6.37
6.3.2.3	<i>Sección transversal.....</i>	6.38
6.3.2.4	<i>Hormigones especiales.....</i>	6.38



---

6.3.3 Comparación de la longitud de transmisión diferida con el método de ensayo ECADA+ y el método de deformaciones longitudinales de la probeta de hormigón (DEMEC).....	6.41
6.4 Propuesta de un factor adicional para la ecuación de la longitud de transmisión diferida.....	6.42
6.5 Análisis de la fuerza de pretensado medida con el método ECADA+.....	6.43
6.5.1 Edad de destesado.....	6.45
6.5.2 Resistencia a compresión del hormigón.....	6.45
6.5.3 Sección transversal de la probeta.....	6.47
6.5.4 Tipo de destesado.....	6.48
6.5.5 Hormigones especiales.....	6.49
6.6 Análisis de la fuerza de pretensado a partir de las deformaciones del hormigón en el tramo de meseta (DEMEC).....	6.51
6.6.1 Edad de destesado.....	6.53
6.6.2 Resistencia del hormigón.....	6.55
6.6.3 Sección transversal de la probeta.....	6.56
6.6.4 Tipo de destesado.....	6.56
6.6.5 Hormigones especiales.....	6.58
6.7 Comparación de la fuerza de pretensado experimental obtenida con el método ECADA+ y a partir de las deformaciones en el tramo de meseta de la probeta de hormigón.....	6.59
6.8 Pérdidas experimentales instantáneas y diferidas de pretensado.....	6.64
6.9 Estimación del módulo de deformación del hormigón a partir de las deformaciones medias del hormigón.....	6.66
6.10 Métodos de cálculo de las pérdidas de pretensado.....	6.72
6.10.1 PCI Design Handbook (2010).....	6.72
6.10.2 PCI Committee on prestress losses (1975).....	6.75
6.10.3 AASHTO Standard (2003).....	6.78
6.10.4 AASHTO LRFD (métodos Aproximado y Refinado) (2012).....	6.80
6.10.5 Código Modelo (2010), Eurocódigo 2 (2010), Instrucción de Hormigón Estructural EHE (2008).....	6.84
6.11 Comparación entre las pérdidas de pretensado experimentales y las estimadas mediante métodos de cálculo.....	6.90

<b>7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS</b>	<b>7.1</b>
7.1 Conclusiones.....	7.1
7.1.1 Sobre la metodología de ensayo.....	7.1
7.1.2 Sobre el comportamiento diferido de la longitud de transmisión	7.2
7.1.3 Sobre el comportamiento de la evolución de las pérdidas de pretensado.....	7.3
7.2 Recomendaciones para trabajos futuros.....	7.5

## REFERENCIAS

### ANEJOS

- ANEJO A. Longitud de transmisión inicial. Método de fuerzas (ECADA+)
- ANEJO B. Longitud de transmisión inicial. Método deslizamientos
- ANEJO C. Longitud de transmisión inicial. Método de deformaciones longitudinales en el hormigón (95% AMS)
- ANEJO D. Longitud de anclaje
- ANEJO E. Pérdida de pretensado (Probetas)
- ANEJO F. Pérdida de pretensado (Series)
- ANEJO G. Longitud de transmisión diferida. Método de fuerzas (ECADA+)
- ANEJO H. Evolución de deslizamientos en el extremo libre con el tiempo
- ANEJO I. Longitud de transmisión diferida. Método deslizamientos
- ANEJO J. Longitud de transmisión diferida. Método de deformaciones longitudinales en el hormigón (95% AMS)
- ANEJO K. Retracción del hormigón
- ANEJO L. Evolución de deformaciones longitudinales del hormigón en el tramo de meseta con el tiempo
- ANEJO M. Pérdidas de pretensado en el tramos de meseta
- ANEJO N. Comparación de las pérdidas de pretensado y las pérdidas en el tramo de meseta
- ANEJO O. Cálculo de las pérdidas de pretensado según modelos teóricos

## ÍNDICE DE FIGURAS Y FOTOGRAFÍAS

- Figura 2.2.1. Equilibrio de fuerzas alrededor de una barra corrugada
- Figura 2.2.2. Fallos de la adherencia: (a) por hendimiento; (b) por arrancamiento de la barra
- Figura 2.2.3. Efecto Hoyer producido por la transmisión de la fuerza de pretensado
- Figura 2.2.4. Idealización de la distribución de tensiones a lo largo de un elemento de hormigón pretensado después de la transmisión del pretensado
- Figura 2.4.1.1. Principios de la técnica de push-in test (basado en Keuning et al. según CEB (1981))
- Figura 2.4.2.1. Ejemplo de determinación de la longitud de transmisión (Russell y Burns (1996))
- Figura 2.4.2.2. Esquema de ensayo realizado (Vandewalle y Mortelmans (1994))
- Figura 2.4.3.1. Variación de deformaciones a lo largo de la longitud de transmisión. (a) Distribución constante de tensión adherente. (b) Distribución lineal de la tensión adherente
- Figura 2.4.4.1. Esquema del equipo de ensayo (Martí (2002))
- Figura 3.3.1.1. Granulometría cemento, áridos y finos
- Figura 4.1. Idealización de secciones de probeta para reproducir el método de ensayo ECADA
- Figura 4.1.1. Idealización de la variación de tensión de la armadura pretesa tras el destesado (a) sin variación de  $L_t$  y (b) variando  $L_t$  con el tiempo
- Figura 4.2.1. Esquema general del equipo utilizado
- Figura 4.2.2. Esquema del sistema AMA
- Figura 4.4.1. Esquema en planta de las fases del ensayo ECADA
- Figura 4.5.1. Idealización de las pérdidas de pretensado tras el destesado
- Figura 4.6.1. Idealización de la longitud de transmisión inicial (a) y diferida (b) con el método de ensayo ECADA+
- Figura 4.7.1.1. Determinación de la longitud de transmisión a partir de la fuerza transmitida, mediante el ensayo ECADA. Perfil de fuerzas tras el destesado
- Figura 4.7.2.1. Determinación de la longitud de transmisión diferida, sin variación de la longitud de transmisión
- Figura 4.7.2.2. Determinación de la longitud de transmisión diferida, variando de la longitud de transmisión
- Figura 4.7.3.1. Determinación de la deformación media del hormigón de los puntos medios de las bases de medida

- Figura 5.2.1.1.1. Determinación de la longitud de transmisión inicial por el método de la pérdida de fuerza. Pérdida de fuerza vs. Longitud adherente. Serie HT-B-100-48
- Figura 5.2.1.2.1. Determinación de la longitud de transmisión inicial por el método de la fuerza transmitida. Fuerza transmitida vs. Longitud adherente. Serie HT-B-100-48
- Figura 5.2.2.1.1. Determinación de la longitud de transmisión inicial por el método de deslizamientos en el extremo de transmisión. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Probetas HT-B-100-48
- Figura 5.2.2.2.1. Determinación de la longitud de transmisión inicial por el método de deslizamientos en el extremo de arrancamiento. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HT-B-100-48
- Figura 5.2.3.1. Determinación de la longitud de transmisión inicial por el método del 95% AMS. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-A-80-24-LS
- Figura 5.2.4.1. Determinación de la longitud de anclaje. Fuerza de arrancamiento vs. Longitud adherente. Series HT-B-100-48
- Figura 5.3.1.1. Fuerza de pretensado vs. Tiempo. Serie de probetas HT-C-80-48
- Figura 5.3.1.1.1. Longitud de transmisión diferida por el método de la pérdida de fuerza. Pérdida de fuerza vs. Longitud adherente. Series HT-B-100-24
- Figura 5.3.1.2.1. Longitud de transmisión diferida por el método de fuerza transmitida. Fuerza transmitida vs. Longitud adherente. Serie HT-B-100-24
- Figura 5.3.2.1. Deslizamiento en el extremo libre vs. Tiempo. Serie HT-C-80-48
- Figura 5.3.2.1.1. Longitud de transmisión diferida por el método de deslizamientos en el extremo libre. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HT-B-100-24
- Figura 5.3.3.1. Longitud de transmisión por el método del 95% de la media de las deformaciones máximas. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-B-100-24-LS
- Figura 5.3.5.1. Retracción media del hormigón tipo A. Deformación longitudinal del hormigón vs. Tiempo
- Figura 5.3.6.1.1. Pérdida de fuerza y porcentaje diferido en el sistema AMA. Probeta HT-A-100-24-LS
- Figura 5.3.6.2.1. Deformación media en el tramo de meseta respecto al tiempo. Probeta HT-A-100-24-LS
- Figura 5.3.6.2.2. Pérdida de fuerza y porcentaje diferido en el tramo de meseta. Probeta A-100-24-GA
- Figura 5.3.6.2.3. Deformación media en el tramo de meseta, fluencia y retracción de la probeta HT-A-100-24-LS en el tiempo

- Figura 6.1.1. Fuerza transmitida a lo largo del tiempo para la serie de probetas HT-A-100-24
- Figura 6.1.2. Fuerza transmitida a lo largo del tiempo para la serie de probetas HT-A-80-24
- Figura 6.1.3. Longitud de transmisión sin variación en el tiempo por el método ECADA. Fuerza vs. Longitud adherente. Serie HT-A-100-24
- Figura 6.1.4. Longitud de transmisión diferida con variación en el tiempo por el método ECADA. Fuerza vs. Longitud adherente. Serie HT-A-80-24
- Figura 6.1.5. Porcentaje de incremento de la longitud de transmisión vs. Nivel de tensiones en el hormigón
- Figura 6.2.1. Deslizamiento diferido para la serie de probetas HT-A-80-24
- Figura 6.2.2. Longitud de transmisión diferida por el método del deslizamiento en el extremo libre. Serie de probetas HT-A-80-24
- Figura 6.2.1.1. Longitud de transmisión diferida por el criterio de pérdida de fuerza y deslizamientos en el extremo libre. Serie de probetas HT-A-100-24
- Figura 6.2.1.2. Comparación de la longitud de transmisión inicial y diferida según el criterio de pérdida de fuerza y deslizamientos en el extremo libre para las diferentes series
- Figura 6.2.2.1. Comparativa de los resultados según el criterio de deslizamientos y ECADA+. Serie HT-A-80-24
- Figura 6.2.2.2. Comparativa de los resultados según el criterio de deslizamientos y ECADA+. Serie HT-A-100-12
- Figura 6.2.2.3. Comparativa de los resultados según el criterio de deslizamientos y ECADA+. Serie HT-A-100-24
- Figura 6.2.2.4. Comparativa de los resultados según el criterio de deslizamientos y ECADA+. Serie HT-B-80-24
- Figura 6.2.2.5. Comparativa de los resultados según el criterio de deslizamientos y ECADA+. Serie HT-B-80-48
- Figura 6.2.2.6. Comparativa de los resultados según el criterio de deslizamientos y ECADA+. Serie HT-B-100-24
- Figura 6.2.2.7. Comparativa de los resultados según el criterio de deslizamientos y ECADA+. Serie HT-B-100-48
- Figura 6.2.2.8. Comparativa de los resultados según el criterio de deslizamientos y ECADA+. Serie HT-C-80-48
- Figura 6.2.2.9. Comparativa de los resultados según el criterio de deslizamientos y ECADA+. Serie HT-C-100-24
- Figura 6.2.2.10. Comparativa de los resultados según el criterio de deslizamientos y ECADA+. Serie HT-C-100-48

- Figura 6.2.2.11. Coeficiente  $\alpha$  según los resultados experimentales para las diferentes series dependiendo el tipo de hormigón
- Figura 6.3.1. Longitud de transmisión por el método de la media de las deformaciones máximas (DEMEC). Deformación Vs. Longitud de probeta. Probeta HT-A-100-24-LS
- Figura 6.3.2. Longitud de transmisión por el método de la media de las deformaciones máximas (DEMEC). Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-A-100-12-LS
- Figura 6.3.1.1.1. Variación de la longitud de transmisión diferida destesado 6, 12 y 24 horas. Sección 100x100 mm<sup>2</sup>. Hormigón tipo A
- Figura 6.3.1.1.2. Variación de la longitud de transmisión diferida destesado 24 y 48 horas. Sección 100x100 mm<sup>2</sup>. Hormigón tipo B y C
- Figura 6.3.1.1.3. Variación de la longitud de transmisión diferida destesado 12 y 24 horas. Sección 80x80 mm<sup>2</sup>. Hormigón tipo A
- Figura 6.3.1.1.4. Variación de la longitud de transmisión diferida destesado 24 y 48 horas. Sección 80x80 mm<sup>2</sup>. Hormigón tipo B
- Figura 6.3.1.1.5. Variación de la longitud de transmisión diferida destesado 24 y 48 horas. Sección 60x60 mm<sup>2</sup>. Hormigón tipo A
- Figura 6.3.1.2.1. Variación de la longitud de transmisión diferida hormigones tipo A, B y C. Sección 100x100 mm<sup>2</sup>. Destesado 24 horas
- Figura 6.3.1.2.2. Variación de la longitud de transmisión diferida hormigones tipo A, B y C. Sección 100x100 mm<sup>2</sup>, 80x80 mm<sup>2</sup> y 60x60 mm<sup>2</sup>. Destesado 48 horas
- Figura 6.3.1.3.1. Variación de la longitud de transmisión diferida secciones 100x100 mm<sup>2</sup>, 80x80 mm<sup>2</sup> y 60x60 mm<sup>2</sup>. Hormigones tipo A, y B. Destesado 24 horas
- Figura 6.3.1.3.2. Variación de la longitud de transmisión diferida secciones 100x100 mm<sup>2</sup>, 80x80 mm<sup>2</sup> y 60x60 mm<sup>2</sup>. Hormigones tipo B, y C. Destesado 48 horas
- Figura 6.3.1.4.1. Variación de la longitud de transmisión diferida. Destesado súbito y gradual. Destesado 12 y 24 horas. Sección 100x100 mm<sup>2</sup> y 80x80 mm<sup>2</sup>. Hormigón tipo A
- Figura 6.3.1.5.1. Variación de la longitud de transmisión diferida hormigones tipo B y HR. Sección 100x100 mm<sup>2</sup>. Destesado 48 horas
- Figura 6.3.1.5.2. Variación de la longitud de transmisión diferida hormigones tipo A y FA. Sección 60x60 mm<sup>2</sup>. Destesado 24 horas
- Figura 6.3.1.5.3. Variación de la longitud de transmisión diferida hormigones HAC. Sección 100x100 mm<sup>2</sup>. Destesado 48 horas
- Figura 6.3.3. Variación de la pendiente en el tramo discontinuo en función del nivel de tensiones

- Figura 6.3.2.1.1. Influencia de la edad de destesado en la deformación longitudinal en el tramo de meseta para (a) hormigón A y sección 100x100 mm<sup>2</sup>, (b) hormigón A y sección 80x80 mm<sup>2</sup>, (c) hormigón A y sección 60x60 mm<sup>2</sup>, (d) hormigón B y sección 100x100 mm<sup>2</sup>, (e) hormigón B y sección 80x80 mm<sup>2</sup>, (f) hormigón C y sección 100x100 mm<sup>2</sup>
- Figura 6.3.2.2.1. Influencia de la resistencia del hormigón en la deformación longitudinal en el tramo de meseta para (a) HT-A-60-48-LS/ HT-B-60-48-LS, (b) HT-A-80-24-LS/HT-B-80-24-LS, (c) HT-B-80-48-LS/ HT-C-80-48-LS, (d) HT-A-100-24-LS/ HT-B-100-24-LS/ HT-C-100-24-LS
- Figura 6.3.2.3.1. Influencia de la sección transversal en la deformación longitudinal en el tramo de meseta para (a) hormigón A y destesado a 24 horas, (b) hormigón A y destesado a 12 horas, (c) hormigón B y destesado a 48 horas, (d) hormigón B y destesado a 24 horas, (e) hormigón C y destesado a 48 horas
- Figura 6.3.2.4.1. Influencia del tipo de hormigón en la deformación longitudinal en el tramo de meseta para (a) HR-100-48-LS/HT-B-100-48-LS, (b) FA-60-24-LS/HT-A-60-24-LS y (c) HAC-100-48-LS
- Figura 6.3.3.1. Comparación de la longitud de transmisión inicial y diferida según los criterios de fuerzas y 95% AMS
- Figura 6.3.3.2. Relación de la longitud de transmisión inicial y diferida según los criterios de fuerzas y 95% AMS
- Figura 6.5.1. Fuerza de pretensado y porcentaje de pérdidas con el tiempo. Probeta HT-A-100-24-LS
- Figura 6.5.1.1. Influencia de la edad de destesado en la pérdida de fuerza en el sistema AMA para (a) HT-A-100-6-LS/HT-A-100-12-LS/HT-A-100-24-LS, (b) HT-B-100-24-LS/HT-B-100-48-LS, HT-C-100-24-LS/HT-C-100-48-LS, (c) HT-A-80-12-LS/HT-A-80-24-LS, (d) HT-B-80-24-LS/ HT-B-80-48-LS y (e) HT-A-60-24-LS/HT-A-60-48-LS
- Figura 6.5.2.1. Influencia de la resistencia del hormigón en la pérdida de fuerza en el sistema AMA para (a) HT-A-60-48-LS/HT-B-60-48-LS, (b) HT-A-80-24-LS/HT-B-80-24-LS, (c) HT-B-80-48-LS/HT-C-80-48-LS y (d) HT-A-100-24-LS/HT-B-100-24-LS/HT-C-100-24-LS
- Figura 6.5.3.1. Influencia de la sección transversal en la pérdida de fuerza en el sistema AMA para (a) HT-A-100-24-LS/HT-A-80-24-LS/HT-A-60-24-LS, HT-B-100-24-LS/HT-B-80-24-LS (b) HT-B-100-48-LS/ HT-B-80-48-LS/HT-B-60-48-LS, HT-C-100-48-LS/HT-C-80-48-LS y (c) HT-A-100-12-LS/HT-A-80-12-LS
- Figura 6.5.4.1. Influencia del tipo de destesado en la pérdida de fuerza en el sistema AMA para HT-A-100-24-LS/HT-A-100-24-LS-FA, HT-A-

- 100-12-LS/HT-A-100-12-LS-FA, HT-A-80-24-LS/HT-A-80-24-LS-FA
- Figura 6.5.5.1. Influencia del tipo de hormigón en la pérdida de fuerza en el sistema AMA para (a) HR-100-48-LS/HT-B-100-48-LS, (b) FA-60-24-LS/HT-A-60-24-LS y (c) HAC-100-48-LS
- Figura 6.6.1. Perfil bilineal de las deformaciones longitudinales del hormigón
- Figura 6.6.2. Fuerza de pretensado y % de pérdidas en el tramo de meseta. Probeta HT-A-100-24-LS
- Figura 6.6.1.1. Influencia de la edad de destesado en la pérdida de fuerza en el sistema AMA para (a) HT-A-100-6-LS/HT-A-100-12-LS/HT-A-100-24-LS, (b) HT-B-100-24-LS/HT-B-100-48-LS, HT-C-100-24-LS/HT-C-100-48-LS, (c) HT-A-80-12-LS/HT-A-80-24-LS, (d) HT-B-80-24-LS/HT-B-80-48-LS y (e) HT-A-60-24-LS/HT-A-60-48-LS
- Figura 6.6.2.1. Influencia de la resistencia del hormigón en la pérdida de fuerza en el sistema AMA para (a) HT-A-100-24-LS/HT-B-100-24-LS/HT-C-100-24-LS, (b) HT-A-80-24-LS/HT-B-80-24-LS, (c) HT-B-80-48-LS/HT-C-80-48-LS y (d) HT-A-60-48-LS/HT-B-60-48-LS
- Figura 6.6.3.1. Influencia de la sección transversal en la pérdida de fuerza en el sistema AMA para (a) HT-A-100-24-LS/HT-A-80-24-LS/HT-A-60-24-LS, HT-B-100-24-LS/HT-B-80-24-LS (b) HT-B-100-48-LS/HT-B-80-48-LS/HT-B-60-48-LS, HT-C-100-48-LS/HT-C-80-48-LS y (c) HT-A-100-12-LS/HT-A-80-12-LS
- Figura 6.6.4.1. Influencia del tipo de destesado en la pérdida de fuerza en el sistema AMA para HT-A-100-24-LS/HT-A-100-24-LS-FA, HT-A-100-12-LS/HT-A-100-12-LS-FA, HT-A-80-24-LS/HT-A-80-24-LS-FA
- Figura 6.6.5.1. Influencia del tipo de hormigón en la pérdida de fuerza en el sistema AMA para (a) HR-100-48-LS/HT-B-100-48-LS, (b) FA-60-24-LS/HT-A-60-24-LS y (c) HAC-100-48-LS
- Figura 6.7.1. Coeficiente basado en la sección transversal de la probeta para calcular las pérdidas de pretensado (a) instantáneo y (b) diferido
- Figura 6.7.2. Resultados de la pérdida de pretensado instantánea con las predicciones de la ecuación 6.7.1
- Figura 6.7.3. Resultados de la pérdida de pretensado diferida con las predicciones de la ecuación 6.7.1
- Figura 6.8.1. Deformación media en el tramo de meseta, deformación por retracción y fluencia vs. Tiempo. Probeta HT-A-100-24-LS
- Figura 6.8.2. Pérdidas de pretensado y porcentaje de pérdidas medidas experimentalmente
- Figura 6.9.1. Módulos de elasticidad a partir de las deformaciones medias del hormigón



- Figura 6.9.2. Coeficiente corrector del efecto del tamaño de la sección transversal
- Figura 6.9.3. Comparación del módulo de deformación a 28 días experimental y de acuerdo al CM2010
- Figura 6.11.1. Comparación de las pérdidas de pretensado medidas experimentalmente entre las pérdidas determinadas por modelos teóricos
- Figura 6.11.2. Relación de las pérdidas de pretensado calculadas por modelos teóricos y medidas experimentalmente
- Figura 6.11.3. Relación de efectividad de la tensión medida experimentalmente y determinada por medio de modelos teóricos
- Fotografía 4.2.1. Vista general de los bastidores del ensayo
- Fotografía 4.2.2. Dispositivo mecánico de aproximación. (a) Rosca-tuerca. (b) Gato hidráulico
- Fotografía 4.2.3. Dispositivos de anclaje
- Fotografía 4.2.4. (a) Molde, (b) apoyo desplazable y (c) elementos para vibración
- Fotografía 4.2.5. Gato hidráulico para operación de arrancamiento. (a) Gato hidráulico. (b) Placa de empuje. (c) Varilla de tracción. (d) Elementos de apoyo. (e) Soporte desplazable
- Fotografía 4.2.6. Equipo de presión. (a) Equipo de presión. (b) Sistema de control.
- Fotografía 4.3.7. Captadores de desplazamiento. (a) En extremo de transmisión. (b) En extremo de arrancamiento
- Fotografía 4.3.8. (a) Discos de extensometría mecánica. (b) Equipo de medición DEMEC
- Fotografía 4.3.9. (a) Amplificador de frecuencia. (b) Micrómetro
- Fotografía 4.4.1.1. Hormigonado de la probeta
- Fotografía 4.4.1.2. Traslado de probetas
- Fotografía 4.4.1.3. Almacenamiento de probetas ensayo diferido

## ÍNDICE DE TABLAS

- Tabla 2.3.5.1. Aportaciones cronológicas de diferentes autores relativa a la longitud de transmisión diferida
- Tabla 2.5.1.1. Ecuaciones propuestas para la longitud de transmisión de la literatura
- Tabla 2.5.1.2. Predicción de los valores de límite inferior y límite superior de longitud de transmisión
- Tabla 2.5.2.1. Valores propuesto del coeficiente de forma  $\alpha$  a partir de la fórmula de Guyon

Tabla 2.5.2.2.	Ecuaciones propuestas para la longitud de transmisión a partir de los deslizamientos en la armadura en el extremo libre
Tabla 2.6.2.1.	Aportaciones cronológicas de diferentes autores relativa a las pérdidas de pretensado
Tabla 3.1.1.	VARIABLES contempladas en el programa experimental
Tabla 3.2.1.	Parámetros fijos en el estudio experimental
Tabla 3.3.1.1.	Características principales de los aditivos utilizados en las diferentes dosificaciones
Tabla 3.3.2.1.	Características del cordón de pretensar utilizado
Tabla 3.4.1.1.	Dosificación hormigón tradicional
Tabla 3.4.2.1.	Dosificación Hormigón Autocompactante
Tabla 3.4.3.1.	Dosificación hormigón con fibras
Tabla 3.4.4.1.	Dosificación hormigón reciclado
Tabla 3.5.3.1.	Cronograma de ensayos de caracterización en estado endurecido.
Tabla 3.6.1.	Tipo de probeta y ensayos de caracterización de las propiedades adherentes.
Tabla 3.7.1.	Ensayos comportamiento adherente diferido
Tabla 3.8.1.	Longitudes adherentes por tipo de probeta y tipo de ensayo
Tabla 5.1.1.1.	Ensayos de caracterización en estado fresco
Tabla 5.1.2.1.	Ensayos de caracterización en estado endurecido. Resistencia a Compresión Cúbica
Tabla 5.1.2.2.	Ensayos de caracterización en estado endurecido. Resistencia a Compresión Cilíndrica
Tabla 5.1.2.3.	Ensayos de caracterización en estado endurecido. Resistencia a Tracción
Tabla 5.1.2.4.	Ensayos de caracterización en estado endurecido. Módulo de deformación
Tabla 5.2.5.1.	Resultados iniciales de longitud de transmisión con el criterio de fuerzas y deslizamientos y resultados de la longitud de anclaje con deslizamiento y sin deslizamiento
Tabla 5.2.5.2.	Resultados iniciales de longitud de transmisión con el criterio de observación y el 95% AMS
Tabla 5.3.4.1.	Resultados por serie de la longitud de transmisión diferida con el método ECADA+ y el método de deslizamientos
Tabla 5.3.4.2.	Resultados por probeta de la longitud de transmisión diferida con el método de las deformaciones longitudinales del hormigón
Tabla 5.3.7.1.	Resultados de la pérdida de pretensado medidas con el ensayo ECADA+
Tabla 5.3.7.2.	Resultados de la pérdida de pretensado medidas a partir de las deformaciones del hormigón en el tramo de meseta

---

Tabla 6.1.1.	Resumen de la variación de la longitud de transmisión diferida para las diferentes series
Tabla 6.3.1.	Resumen de la variación de la longitud de transmisión diferida con el método de deformaciones para las diferentes probetas, según el criterio del 95% AMS y de observación
Tabla 6.7.1.	Comparación de las pérdidas de pretensado medidas en el sistema AMA y calculadas en la probeta de hormigón
Tabla 6.9.1.	Resultados del módulo de deformación del hormigón experimentales y de acuerdo con el MC2010.
Tabla 6.10.1.1.	Pérdidas de pretensado determinadas a partir del modelo teórico PCI DH (2010)
Tabla 6.10.2.1.	Factor de fluencia para la relación volumen superficie
Tabla 6.10.2.2.	Variación de la fluencia con el tiempo después del destesado
Tabla 6.10.2.3.	Factor de retracción para la relación volumen superficie
Tabla 6.10.2.4.	Coefficiente de retracción para varias edades de curado
Tabla 6.10.2.5.	Pérdidas de pretensado determinadas a partir del modelo teórico PCI CPL (1975)
Tabla 6.10.3.1.	Pérdidas de pretensado determinadas a partir del modelo teórico AASHTO Standard (2003)
Tabla 6.10.4.1.	Pérdidas de pretensado determinadas a partir del modelo teórico AASHTO LRFD Aproximado (2012)
Tabla 6.10.4.2.	Pérdidas de pretensado determinadas a partir del modelo teórico AASHTO LRFD Refinado (2012)
Tabla 6.10.5.1.	Valores del coeficiente $K_e$
Tabla 6.10.5.2.	Velocidad de endurecimiento, coeficiente $\alpha_{ds1}$ y $\alpha_{ds2}$
Tabla 6.10.5.3.	Pérdidas de pretensado determinadas a partir del modelo teórico CM (2010), EC-2 (2010) y EHE (2008)

(Esta página se ha dejado intencionalmente en blanco)

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Antecedentes

El comportamiento adherente de las armaduras pretesas debe ser estudiado en dos fases fundamentales de la vida de los elementos prefabricados de hormigón: transmisión del pretensado de la armadura al hormigón y anclaje de la armadura. Como consecuencia, este comportamiento adherente se caracteriza mediante dos longitudes: longitud de transmisión y longitud de anclaje. La correcta determinación de estas longitudes es un aspecto básico y fundamental en el diseño de elementos prefabricados de hormigón pretensado.

El estudio de la adherencia de las armaduras pretesas en hormigón constituye una línea de investigación que se está desarrollando en el ICITECH (Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón) y que cuenta ya con dos Tesis Doctorales presentadas: una en 2002, realizada por J. R. Martí Vargas, en la que se propone un nuevo método de ensayo denominado ECADA, para la determinación de las características adherentes de armaduras activas en el hormigón, y otra en 2006, realizada por C. A. Arbeláez Jaramillo, centrada en la influencia de la dosificación del hormigón y sus propiedades relacionadas con el comportamiento adherente de armaduras pretesas.

La experimentación realizada hasta la fecha con el método de ensayo ECADA ha puesto de manifiesto que las longitudes de transmisión y anclaje de cordones de 7 alambres en algunos tipos de hormigón de alta resistencia son espectacularmente cortas en comparación con las longitudes que se obtienen a partir de la formulación de la Instrucción EHE y otros códigos internacionales. En las expresiones propuestas por diferentes investigadores y normativas para la determinación de las longitudes de transmisión y de anclaje generalmente se considera que la longitud de transmisión no varía con el tiempo, y que la longitud de transmisión no varía con las pérdidas de pretensado.

Parece lógico pensar que con el tiempo los fenómenos adherentes se verán modificados, y que el exceso de seguridad que parece derivarse de los ensayos a corto plazo se verá reducido al introducir los efectos diferidos. Cuantificar la influencia de estos fenómenos resulta necesario para poder trabajar con conocimiento de causa.

## 1.2 Objetivos

El objetivo general de esta Tesis Doctoral es estudiar el comportamiento adherente diferido del hormigón pretensado con cordones pretesos realizando un estudio paramétrico de las diferentes variables que intervienen. Para lograr este objetivo general se plantean los siguientes objetivos específicos:

Estudio del estado del arte sobre la adherencia de armaduras pretesas en el hormigón y los mecanismos de adherencia del hormigón pretensado. Se analizarán los parámetros más importantes que influyen en el fenómeno adherente, principalmente los aspectos relativos a la variación con el tiempo de la longitud de transmisión y la pérdida de fuerza de la armadura pretesa. Se estudiarán las diferentes técnicas experimentales para la determinación de las longitudes de transmisión y anclaje, y se abordaran distintos métodos de cálculo de las pérdidas de pretensado.

Planteamiento y desarrollo de un programa experimental seleccionando los parámetros y variables a estudiar, analizando diferentes materiales y dosificaciones de hormigón. Se propondrán las condiciones de ensayo y metodologías de análisis para verificar la validez de los parámetros controlados.

Desarrollo y adaptación de la metodología de ensayo ECADA+ para la caracterización del comportamiento adherente diferido, describiendo los dispositivos, el procedimiento operativo, así como los diferentes criterios de interpretación de resultados para determinar la longitud de transmisión, la longitud de anclaje y la pérdida de fuerza de pretensado analizando su evolución con el tiempo.

Presentación y análisis de los resultados de los ensayos de caracterización, de los resultados de ensayos a corto plazo de las longitudes de transmisión y anclaje con los diferentes criterios de interpretación, de los ensayos a largo plazo de la longitud de transmisión, y de las pérdidas de pretensado con el método de ensayo ECADA+ y por medio del método de medida de la deformación longitudinal de hormigón (DEMEC).

Comparación de los resultados obtenidos con predicciones teóricas, basadas en métodos y modelos propuestos por códigos y diversos autores.

### 1.3 Contenido del documento

La presente Tesis Doctoral está estructura de la siguiente manera:

- Capítulo 1. Introducción.
- Capítulo 2. Estado del arte.
- Capítulo 3. Programa experimental.
- Capítulo 4. Metodología de ensayo (ECADA+).
- Capítulo 5. Presentación de resultados.
- Capítulo 6. Análisis de resultados.
- Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones para investigaciones futuras.
- Referencias.
- Anejos.

En el Capítulo 1 se presenta una breve introducción, en la que se exponen los antecedentes de esta Tesis Doctoral, se define el objetivo general, los objetivos específicos y se expone la estructura del documento con la explicación resumida que comprende cada Capítulo.

El Capítulo 2 está dedicado a la exposición del estado del arte. Se incluye un resumen del estado actual del conocimiento en relación con la adherencia de armaduras pretensas al hormigón. En primer lugar se presenta una descripción de la técnica de presentado y los mecanismos adherentes, continuando con una breve descripción de los conceptos más importantes. Se abordan los parámetros que afectan a la adherencia, los métodos experimentales para determinar la longitud de transmisión, así como las técnicas experimentales y los métodos de cálculo para estimar las pérdidas de pretensado.

En el Capítulo 3 se presenta el programa experimental a desarrollar indicando las variables analizadas, los parámetros fijos del ensayo, los componentes del hormigón y principales características de la armadura, las dosificaciones y ensayos de caracterización de los hormigones analizados, los parámetros que caracterizan el comportamiento adherente instantáneo y diferido, y finalmente el plan de ensayos realizado para el estudio del comportamiento adherido diferido.

En el Capítulo 4 se realiza una breve descripción de la metodología de ensayo ECADA+ y del equipo de ensayo utilizado. Se explican las etapas y adaptación del ensayo, las fases operativas que componen el procedimiento de ensayo y se exponen los criterios de interpretación de los resultados obtenidos para la determinación de la longitud de transmisión instantánea (método ECADA) y diferida (método ECADA+).

En el Capítulo 5 se procede a la presentación de los resultados obtenidos en los ensayos realizados en el marco del programa de ensayos descritos en el capítulo 3. Se presentan los resultados de las características propias de cada uno de los hormigones como son consistencia y resistencia a compresión a diferentes edades, se presentan los resultados de los ensayos instantáneos para la determinación de la longitud de transmisión y los resultados de los ensayos diferidos de retracción, longitud de transmisión y pérdida de fuerza de pretensado.

En el Capítulo 6 se analiza los resultados obtenidos del programa experimental a corto y largo plazo. En una primera parte se realiza un análisis de la influencia de los parámetros considerados en las propiedades adherentes instantáneas y una segunda parte donde se analiza y compara el comportamiento diferido de la longitud de transmisión y las pérdidas de pretensado con diferentes métodos.

El Capítulo 7 corresponde a la exposición de las conclusiones y recomendaciones para la realización de futuros trabajos de investigación.

Finalmente se presenta el apartado correspondiente a las referencias utilizadas en el presente trabajo y los anejos que recogen la presentación ordenada y detallada de los resultados experimentales.



## 2. ESTADO DEL ARTE

Este capítulo presenta un resumen del estado actual del conocimiento de la adherencia de armaduras activas al hormigón y se profundiza en los parámetros asociados a la variación con el tiempo de la longitud de transmisión y la pérdida de pretensado. En primer lugar se presenta una descripción de la técnica de pretensado y los mecanismos adherentes, continuando con una breve descripción de los conceptos más importantes, los parámetros que afectan el fenómeno adherente, las técnicas experimentales para estimar las longitudes de transmisión, las pérdidas de pretensado, y los modelos teóricos para calcular las longitudes de transmisión y las pérdidas de pretensado.

### 2.1 Descripción del fenómeno adherente

El pretensado es una de las técnicas de mayor empleo en la fabricación de elementos de hormigón prefabricados en la edificación y la ingeniería civil. Esta técnica se basa en la idea fundamental de someter a compresión al hormigón antes de cargarlo, en aquellas partes en las que las cargas a aplicar vayan a producir tracciones. De esta forma, hasta que estas compresiones no son anuladas, no aparecen de hecho tracciones en el hormigón. Así el hormigón pretensado resiste la flexión hasta un cierto límite, sin que aparezcan tracciones reales, ya que la zona de tracción está sometida a unas compresiones previas.

Existen dos formas de introducir el pretensado en una estructura, si bien las técnicas de armadura postesa y armadura pretesa son las que prevalecen en la actualidad. En la primera el anclaje del pretensado se consigue mediante dispositivos mecánicos actuando sobre el hormigón endurecido, mientras que en la segunda se realiza la transmisión de fuerzas mediante la adherencia entre el hormigón y la armadura activa previamente tesada.

La adherencia en hormigón pretensado con armadura pretesa tiene dos funciones. Primero, garantizar la transmisión de la fuerza de pretensado, y por otra parte, es la responsable de asegurar la capacidad resistente del elemento durante el periodo de servicio.

## 2.2 Mecanismos adherentes

El comportamiento adherente, según los estudios de Janney (1954), depende de la combinación de la resistencia debido a la adhesión, la acción mecánica y la fricción. La **adhesión** esta relacionada con la resistencia a corte en la interfase acero-hormigón, y resulta de la unión físico-química entre las partículas de pasta de cemento y la rugosidad microscópica de la superficie de contacto de la armadura. La **acción mecánica** depende de los resaltos geométricos o forma de la armadura, ya sea alambres lisos o cordones de varios alambres. En el caso de este último según el FIB (2000) la acción mecánica está compuesta por el rozamiento de los alambres externos del cordón contra los nervios formados en el hormigón a través de los cuales el cordón se desplaza, y por el equilibrio entre el momento torsional en la armadura desarrollado por la variación longitudinal de la tensión en el acero que provoca el cambio de *pitch* y las tensiones de contacto a lo largo del perímetro. La **fricción** es la resistencia al desplazamiento paralelo entre dos superficies que se mantienen en contacto por una fuerza de compresión perpendicular a los planos de contacto.

Además, en las piezas de hormigón pretensado, la adherencia es favorecida por el efecto Poisson, ya que al realizarse el destesado, la armadura aumenta su diámetro mejorando la adherencia. Sin embargo, al aumentar el diámetro de la armadura, se genera un anillo de tensión radial en el recubrimiento del hormigón, pudiendo ser desventajoso para la adherencia. A medida que la armadura penetra en el hormigón durante el destesado, la armadura se apoya sobre el hormigón según un mecanismo de fuerzas propuesto por Tepfers (1973), como se puede observar en la Figura 2.2.1. La fuerza de empuje de la armadura sobre el hormigón se descompone en una componente perpendicular a la armadura, tensión radial que se sumaría a la tensión que provoca el aumento de diámetro por efecto Poisson, y otra paralela a la armadura, llamada tensión tangencial o de adherencia, ambas relacionadas por medio de un ángulo  $\alpha$  (Figura 2.2.1).

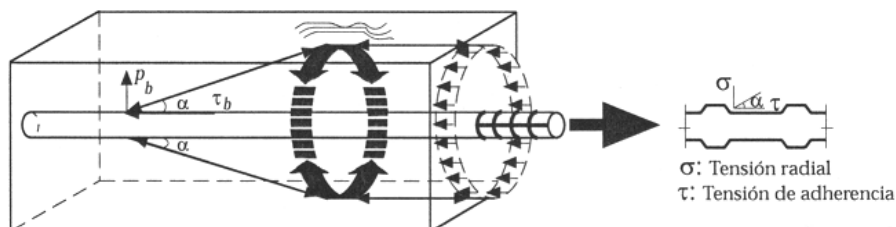
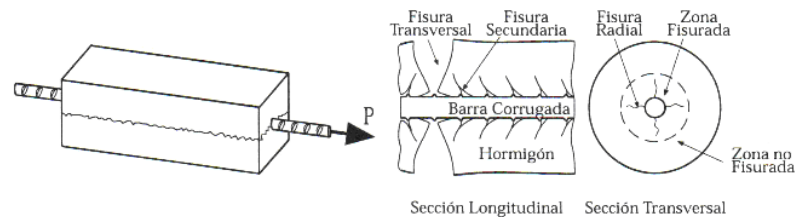
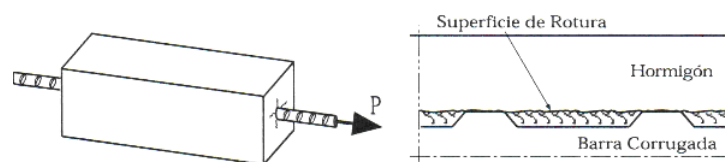


Figura 2.2.1. Equilibrio de fuerzas alrededor de la armadura.

Si el anillo de tracciones alcanza la resistencia a tracción del hormigón, se producirá una fisuración paralela a la dirección de las armaduras. Esta fisuración disminuye el confinamiento del alambre y deteriora la adherencia, ya que la armadura puede penetrar con más facilidad en la masa del hormigón, disminuyendo la tensión tangencial. Este fallo, llamado por hendimiento o agrietamiento longitudinal, es característico de elementos con poco recubrimiento, siendo usual la aparición de grietas radiales, como se muestra en la Figura 2.2.2(a). Evidentemente, este tipo de fallo juega un papel fundamental en la componente radial de la tensión de compresión generada en el hormigón por el apoyo de los resaltos. Este proceso afecta fundamentalmente a los extremos de los elementos prefabricados, debido a la forma de embudo que adquiere las armaduras activas, por el aumento de diámetro del acero durante la transmisión. Este fenómeno se conoce como efecto Hoyer. En la Figura 2.2.3 se muestra de manera grafica el efecto Hoyer, donde  $d_0$  y  $d_1$  son, respectivamente, los diámetros de la armadura en el extremo libre y en el interior de la pieza tras el destesado.



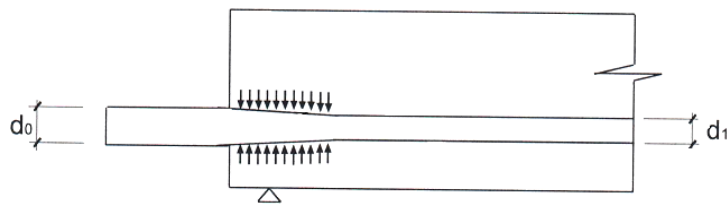
(a) Agrietamiento por fisuración longitudinal o por hendimiento



(b) Arrancamiento de la barra

**Figura 2.2.2.** Fallos de la adherencia: (a) por hendimiento;  
(b) por arrancamiento de la barra.

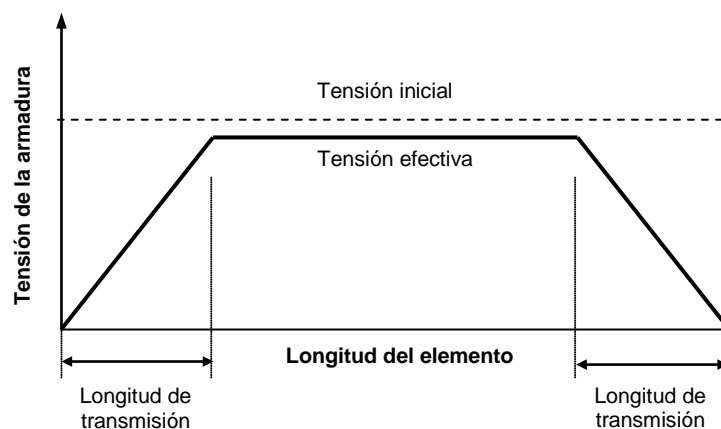
Si el hormigón se encuentra bien confinado y el recubrimiento de la armadura es capaz de resistir las tracciones del anillo, el fallo de la adherencia se produce por arrancamiento, Figura 2.2.2(b). En este tipo de fallo de la adherencia, juega un papel muy importante la componente tangencial, también llamada tensión de adherencia, ya que al alcanzar un determinado valor se produce el deterioro de la intercara, y el consiguiente arrancamiento de la barra.



**Figura 2.2.3.** Efecto Hoyer producido por la transmisión de la fuerza de pretensado

### Longitud de transmisión ( $L_t$ )

Se define longitud de transmisión en el Código Modelo 90 (2010), como “*la longitud necesaria para transmitir al hormigón por adherencia la fuerza de pretensado introducida en una armadura*”. Esta longitud abarca la distancia existente entre el extremo libre de un elemento pretensado, en el que la tensión es nula, y finaliza en la sección a partir de la cual la tensión en la armadura permanece constante. Esta tensión se mantiene hasta la zona de transmisión del extremo opuesto del elemento (Figura 2.2.4). Después de realizar el destesado, y teniendo en cuenta las pérdidas de pretensado, la fuerza de pretensado transmitida se denomina pretensado efectivo.



**Figura 2.2.4** Idealización de la distribución de tensiones a lo largo de un elemento de hormigón pretensado después de la transmisión del pretensado.

## Longitud de anclaje ( $L_A$ )

El Código Modelo 90 (2010) define la longitud de anclaje como “*la longitud necesaria para que la armadura alcance su tensión última*”.

Según los estudios de Arbeláez (2006) se puede distinguir:

A. Longitud de anclaje con deslizamiento ( $L_{As}$ ): Se define como la longitud adherente necesaria para que la armadura alcance la fuerza de referencia a anclar ( $P_R$ ) admitiendo deslizamientos de la armadura en el extremo libre de la probeta durante la fase de arrancamiento.

B. Longitud de anclaje sin deslizamiento ( $L_{Aw}$ ): Se define como la longitud necesaria para que la armadura alcance la fuerza  $P_R$  sin que se registren deslizamientos en el extremo libre de la probeta durante la fase de arrancamiento.

### 2.3 Parámetros que afectan a la adherencia

Un análisis más detallado de estos parámetros puede encontrarse en Tork (1999), Vázquez (2000), Martí (2002), Benítez (2006), Arbeláez (2006) y Eiras (2009).

#### 2.3.1 Parámetros asociados al hormigón

##### ***Resistencia a compresión***

Habitualmente, la propiedad del hormigón que más profundamente se ha estudiado ha sido la resistencia a compresión. Normalmente, tanto el módulo de deformación como la resistencia a tracción se suelen expresar como una función de la resistencia a compresión (CEB-FIP (2010)).

En 1954 Janney y Krishnamurthy en 1970 concluyeron que la influencia de la resistencia del hormigón sobre la adherencia viene determinada por la capacidad de sostener la presión radial.

Hanson y Kaar (1959) observaron que la resistencia a compresión tiene más influencia en la resistencia última a flexión de la sección que en la resistencia adherente. Opinión contraria tienen Salmons y McCreate (1977), Scriber y

Kobayashi (1984) al afirmar que la resistencia no tiene efecto aparente en las características adherentes de cordones.

Martí (2002) realizó ensayos para determinar la longitud de transmisión y anclaje en elementos de pretensado con cordones en hormigones de altas prestaciones iniciales, observando que un aumento de la resistencia a compresión provoca una disminución de la longitud de transmisión.

Marshall y Krishnamurthy (1969), Olesniewicz (1975), Zia y Moustafa (1975), Cousins (1986), Balazs (1992), Mitchell *et al.* (1993), Lane (1998) citada en Shahawy (2001), Barnes *et al.* (2003), Arbeláez (2006) proponen ecuaciones en función de la resistencia a compresión para predecir las longitudes de transmisión y anclaje.

Al utilizar cordones de polímeros reforzado con fibra de aramida (AFRP) y cordones de acero, no se ven afectados significativamente por la resistencia del hormigón según Nanni *et al.* (1992) y Zou P.X. (2003). Lo contrario sucede al utilizar cordones de fibra reforzado con polímeros de carbono (CFRP), que se ven altamente afectados según Soudki *et al.* (1997), Mahmoud *et al.* (1999) y Zou P.X. (2003).

El efecto del incremento de la resistencia a compresión al destesar y en el tiempo (28 días) no muestra una tendencia definida en la disminución de la longitud de transmisión para hormigones autocompactantes y hormigones convencionales (Staton B.W. (2009)).

### ***Resistencia a tracción***

Tanto Goto (1971), Tepfers (1973), Weerasekera (1991) y Den Uijl (1995), ponen de manifiesto la importancia de este parámetro en la adherencia entre acero y hormigón, y por consiguiente en la longitud de transmisión. Sin embargo, Burnett y Marefat (1992) consideran que la adherencia no es necesariamente dependiente de la resistencia a tracción.

Naturalmente, si es posible la rotura por hendimiento del recubrimiento, porque el anillo de tracciones en el recubrimiento alcanza la resistencia a tracción del hormigón, a medida que ésta sea mayor, menor será la posibilidad de rotura y por consiguiente se podrá desarrollar una mayor adherencia.

### **Contenido de cemento**

Este parámetro ha sido poco estudiado dentro de la literatura. Armstrong (1949), Lorrain y Khélafi (1988) y Osunade y Babaloba (1991) afirman que a mayor contenido de cemento se obtendrá una mayor tensión adherente y por lo tanto una mayor fuerza última. Por el contrario Tulin y Al-Chabali (1969) y Krol y Szerafín (1992), concluyeron que el incremento en el contenido de cemento produce una caída en la resistencia adherente.

### **Relación agua/cemento (A/C)**

Este parámetro junto con el contenido de cemento son los que más afectan al comportamiento del hormigón, tanto en estado fresco como endurecido.

Armstrong (1949) y Arbeláez (2006) observaron un aumento en la penetración de la armadura cuando se aumentaba el contenido de agua. En términos generales, una relación agua/cemento más alta conduce a hormigones de propiedades mecánicas inferiores, por lo que cabe esperar que la adherencia acero-hormigón también disminuya.

### **Módulo de elasticidad**

Scribner y Kobayashi (1984) consideran que un hormigón con mayor módulo de elasticidad produce mayores tensiones normales al cordón como resultado de los esfuerzos laterales. En general, este parámetro no se ha cuantificado, ya que depende de otros como la dosificación del hormigón, el tipo de árido y la resistencia del hormigón.

### **Compactación**

Varios autores entre ellos Marshall (1949), Anderson (1976), Jonsson (1992) y Petrou *et al.* (2000), coinciden que lo importante es garantizar un grado de compactación adecuado y uniformidad de los áridos dentro del hormigón para que así mejoren las condiciones de adherencia entre los elementos de pretensado, evitando así pérdidas de fuerza de pretensado y deslizamientos excesivos de los cordones.

### ***Retracción***

Es uno de los parámetros poco estudiados aunque Vandewalle y Mortelmans (1994), apuntan que la retracción del hormigón colabora con la generación de tensiones de compresión perpendiculares a la superficie del cordón que crean los mecanismos de adherencia de adhesión y fricción.

### ***Introducción de fibras***

Los trabajos mas destacados con respecto a la incorporación de fibras corresponden a Balaguru (1995) según Dummet y Pinheiro (2002) en el que pone de manifiesto la mejora de la resistencia al hendimiento, a causa de la mayor ductilidad del hormigón. Estas conclusiones son ratificadas por Harajli (2007) y adicionalmente dice que mejora sustancialmente la absorción de energía y la capacidad de disipación bajo carga cíclica.

## **2.3.2 Parámetros asociados a la armadura**

### ***Diámetro de la armadura***

Abrisahmi y Mitchell (1992) pusieron de manifiesto que una disminución del diámetro de la armadura conlleva una mejora de la capacidad adherente.

Russell y Burns (1997) desplegaron un plan de trabajo experimental para medir longitudes de transmisión en probetas de hormigón pretensado con cordones de siete alambres. Estos ensayos fueron motivados, principalmente, por la necesidad de comprobar que los cordones de 15.2 mm eran capaces de transmitir la fuerza de pretensado en una longitud aceptable, ya que una moratoria de la Administración Federal de Autopistas (FHWA) prohibía la utilización de cordones de diámetro igual o mayor a 14.3 mm por sus elevadas longitudes de transmisión. Como resultado obtuvieron que la longitud de transmisión media para cordones de 12.7 mm era de 854 mm, mientras que para cordones de 15.2 mm resultó ser de 1008 mm, lo que les llevó a concluir que la longitud de transmisión aumenta con el diámetro del cordón.

Estudios más recientes indican que la utilización de cordones de 15.2 mm de diámetro incrementan un 25% la longitud de transmisión (Oh y Kim (2000)) y es más



efectivo que los cordones de 12,7 mm ya que se incrementa la luz máxima con un aumento de la resistencia del hormigón (Kahn y Saber (2000)).

### ***Rugosidad de la superficie del acero e indentación de la armadura***

Varios autores, entre ellos Janney (1954) y recientemente Barnes et al. (2003), han concluido en sus investigaciones que la armadura oxidada mejora las propiedades adherentes, llegando incluso a disminuir la longitud de transmisión.

Gustavson (2004) estudió la influencia de rugosidad de la superficie de un cordón analizando el efecto de la aplicación de un chorro de arena sobre la armadura, o su tratamiento superficial con aceite o una película de material plástico o rociado con teflón, concluyendo que la adhesión y la fricción se incrementan al aumentar la microrugosidad del cordón, pero que esto no implica un aumento de la tensión normal al cordón, por lo que no conlleva riesgo alguno de rotura por hendimiento. En cuanto a la capacidad adherente, concluye que sólo es dependiente de la indentación en el cordón, pero estas indentaciones sí que provocan un aumento en la tensión normal al cordón, por lo que un aumento de la adherencia provoca un mayor riesgo de rotura por hendimiento.

La importancia de las indentaciones fue puesta de manifiesto por Rots (1989), ya que la transferencia se logra mediante el apoyo de los resaltos en el hormigón circundante, mientras que la adherencia de las barras lisas se debe fundamentalmente a la adhesión y a la fricción.

En el caso de hormigones pretensados, aparte del apoyo de las grafilas, la adherencia se ve favorecida por el aumento de diámetro del acero al destesar, debido al efecto Poisson, que provoca un incremento del rozamiento entre los dos materiales.

### ***Condición superficial de la armadura***

Aunque la mayoría de las normas prohíben la utilización de tratamientos superficiales no metálicos por la disminución de la adherencia, a partir de 1973 se ha extendido la utilización de recubrimientos de resina epoxy, para evitar un problema de corrosión. En 1984 Dorsten et al. publican resumen de las características físicas y mecánicas para este tipo de armaduras. Al perder la fricción, la adherencia se confía a la fuerza perpendicular a la cara de la corruga (Hamad (1995)).

Las armaduras recubiertas con teflón tienen una capacidad adherente inicial más baja y los tratados con chorro de arena tienen mejor capacidad adherente (Gustavson R. (2004))

### **2.3.3 Parámetros asociados al diseño**

#### ***Recubrimiento de hormigón***

Al aumentar el recubrimiento se hace mayor el camino que tiene que recorrer la fisura antes del agrietamiento total del hormigón por hendimiento. Abrishami y Mitchell (1992) comprobaron que al aumentar el recubrimiento del hormigón aumenta la tensión adherente. Consecuentemente, el recubrimiento también es responsable del modo de fallo de la adherencia. Den Uijl y Bigaj (1996) Tork (1999) demostraron experimentalmente que, en elementos de hormigón pretensado, cuanto menor es el recubrimiento, mayor es el riesgo de producirse una fisuración longitudinal.

Varios autores han establecido que la relación entre el recubrimiento y el diámetro de la armadura tiene un valor que diferencia el modo de fallo de la adherencia (Thorsen (1954), Mahmoud *et al.* (1999), Martí (2002) y Kommer (2004)). Así, para relaciones recubrimiento/diámetros mayores que 4, el fallo se produciría por arrancamiento, siendo el agrietamiento longitudinal el mecanismo de fallo para relaciones inferiores a 2.5.

#### ***Separación entre armaduras***

Se ha comprobado (McCabe y Darwin (1992)) que el agrietamiento longitudinal del hormigón entre barras está influido por la cantidad de energía que es capaz de absorber el hormigón. Así, cuanto mayor sea el espaciamiento entre barras, mayor será la energía de fractura disipada y por consiguiente la resistencia a un fallo de la adherencia.

Cousins *et al.* (1992) realizaron ensayos para ver la influencia de la separación entre armaduras, concluyendo que conforme se aumenta el espaciado entre armaduras, la longitud de transmisión, disminuye.

Varios autores, entre ellos Shahawy (1992), Cousins *et al.* (1994), Deatherage *et al.* (1994) y Russell (1994), indican que la separación necesaria para prevenir la fisuración está entre 3 y  $3.5\Phi$ .

### ***Fuerza de pretensado***

La variación del nivel de tesado conlleva una variación del efecto de Hoyer y Poisson influenciando claramente los deslizamientos de la armadura al transmitir la fuerza (Tulin y Al-Chabali (1969), Martí (2002)). Además, varios autores han observado que aumentar la fuerza de pretensado conlleva un incremento de la longitud de transmisión (Ratz *et al.* (1958), Kaar *et al.* (1975), Martí (2002)). Zou P.X. (2003) afirma que cuando se compara el efecto del nivel de pretensado, la resistencia del hormigón al transferir es factor que afecta de una manera más significativa a la longitud de transmisión.

### **2.3.4 Parámetros asociados al procedimiento de fabricación**

#### ***Curado del Hormigón***

Armstrong en 1950 encontró diferentes valores de la resistencia al fallo de la adherencia dependiendo del tipo de curado empleado. Más recientemente, Karlsson (1986) corroboró la influencia de estas variaciones en la resistencia al fallo de la adherencia, debido al proceso de curado y vibrado.

Un buen control del curado es decisivo para una buena estimación de las pérdidas de pretensado ya que éstas también dependen de las propiedades de fluencia del hormigón (Shing *et al.* (2000)).

#### ***Edad del hormigón al destesar***

Swamy R.N. (1975) concluyen que al aumentar la edad de destesado se reduce la longitud de transmisión entre un 10 y 20%.

Martí (2002) observó en su estudio, que para hormigones de altas prestaciones, las longitudes de transmisión de cordones con destesado realizados a 12 y 24 horas eran del mismo orden, mientras que para destesados realizados a 6 horas las longitudes de transmisión eran mayores.

### ***Método de destesado***

El comportamiento adherente de las armaduras se ve afectado según el método de destesado empleado (mediante corte con soplete o sierra, o de manera súbita).

En general, varios autores entre ellos Swamy R.N. (1975), Oh y Sung (2000), Martí (2002) y Larson K et al. (2007), han demostrado que un destesado súbito, presenta un aumento de la longitud de transmisión, en comparación a un destesado de manera gradual.

### **2.3.5 Parámetros asociados a la variación del comportamiento adherente con el tiempo**

La tensión en un cordón de pretensado disminuye con el tiempo. Esta disminución en la tensión se debe principalmente a la fluencia y retracción de hormigón y a la relajación del cordón. A primera vista, se podría pensar que debido a estas pérdidas y un aumento de la resistencia del hormigón con el tiempo, la longitud de transmisión se acortaría. Ahora bien, se ha demostrado que la longitud de transmisión en elementos pretensados aumenta con el tiempo (Evans y Robinson (1955)).

Sin embargo, algunos estudios experimentales sobre el efecto diferido de la longitud de transmisión muestran resultados contradictorios (Weerassekera (1991), FIB (2010)).

Seguidamente se presentan algunas investigaciones de la variación de la longitud de transmisión con el tiempo y la pérdida de fuerza de pretensado.

#### ***Longitud de transmisión***

Marshall G. (1949) reportó un incremento de la longitud de transmisión en un 50% en un periodo de un año después de haber realizado la transmisión del pretensado en alambres de 2 y 5 mm de diámetro.

Evans R. H. (1951) muestra un incremento en un periodo de 2.5 años del 115% en la longitud de transmisión para alambres de 2 mm de diámetro.

Evans y Robinson (1955) por medio de una técnica de fotografías de rayos X, miden la distribución de las deformaciones en el acero y el hormigón, los deslizamientos y la tensión adherente, y determinan que la longitud de transmisión no se ve afectada

hasta un mes después de la transmisión del pretensado, aumentando hasta un 25% después de 4 meses, al igual que los deslizamientos.

Base G. (1957) refutó los resultados de otros autores que sí observan cambios importantes de la longitud de transmisión en el tiempo, ya que él no encuentra variaciones significativas en la longitud de transmisión pasados 6 meses, basándose en los perfiles de deformación y los deslizamientos relativos acero-hormigón.

Kaar et al. (1963) investigaron la influencia de la resistencia del hormigón sobre la longitud de transmisión a lo largo del tiempo y observaron que esta variable es independiente, pero sí encontraron que al utilizar diferentes tipos de armaduras se alcanza un incremento en una media del 6% la longitud de transmisión en un periodo de un año.

Holmberg A. y Lindgren S. (1970) observaron la gran influencia del tiempo en la magnitud de la deformación y lo poco que influye esta variable en la longitud de transmisión.

Krishnamurthy (1970) concluye que la influencia del tiempo sobre la longitud de transmisión en alambres grafilados de 5 mm de diámetro es despreciable, debido a que el deslizamiento inicial de los alambres prácticamente no continúa con el tiempo.

Mayfield B. et al. (1970) manifiesta un incremento de 5 al 44% en la longitud de transmisión durante 10 meses en armaduras estándar y armaduras Dyform.

Swamy R.N. y Anand K.L. (1975) obtuvieron un incremento hasta un 32% de la longitud de transmisión en un periodo entre 180 a 426 días después de haber realizado la transmisión del pretensado. El promedio del incremento para vigas con cables fue del 11.5% y del 16% para vigas con armadura, este incremento no fue de manera ordenada.

Dorsten V. et al. (1984) efectúan estudios en cordones con y sin recubrimiento epoxi durante 14 meses, aumentado la longitud de transmisión un 20% para cordones sin recubrimiento, mientras que para cordones con recubrimiento epoxi prácticamente no incrementó la longitud.

Cousins et al. (1990) realizan ensayos en cordones con y sin recubrimiento epoxi y detectan un aumento no muy importante de la longitud de transmisión a un año (12% y 6%, respectivamente); el incremento más significativo se produce antes de los 90 días y es algo mayor en cordones recubiertos con resina epoxi.

Weerasekera (1991) indica que el efecto del tiempo afecta las deformaciones en el hormigón pero no influye demasiado en la longitud de transmisión.

Cousins et al. (1992) estudian la influencia del tipo de tipo de cordón (con y sin resina epoxi), la separación entre armaduras y el recubrimiento del hormigón y hallan un incremento en la longitud de transmisión, desde la transmisión del pretensado hasta 28 días, del 6% aproximadamente.

Nanni et al. (1992) efectúan ensayos en vigas con armaduras de AFRP y de acero; en los dos casos la longitud de transmisión no se ve afectada por el tiempo (28 días), mientras que el promedio de las deformaciones en la meseta de transmisión se ve fundamentalmente incrementada como resultado de la retracción y fluencia del hormigón.

Lane (1992) y Lane (1998) observó un aumento de la longitud de transmisión en promedio del 30% desde el momento de la transmisión del pretensado hasta pasados 28 días. Adicionalmente se tomaron mediciones hasta los 6 meses y su incremento fue del 7%.

Issa M.A. et al. (1993) concluyen que la longitud de transmisión incrementa con el tiempo (600 días) para tendones de acero y de fibra de vidrio (20 y 40% respectivamente), pero la tasa de incremento es casi el doble para cordones de fibra de vidrio comparada con los de acero.

Mitchell D. et al. (1993) notaron un promedio del 22% en el aumento de la longitud de transmisión en 21 días para cordones de acero de 12,7mm.

Logan (1997) realiza estudios en vigas con armaduras de diferentes fabricantes y concluye que las armaduras con una alta calidad adherente superficial se comportan mucho mejor que la predicción dada por la ecuación de la ACI, tanto para la longitud de transmisión como para la longitud de anclaje, y en las armaduras con menor calidad adherente experimentan un sustancial incremento en la longitud de transmisión en solo 21 días (30 al 67%) después de la transmisión de la fuerza de pretensado.

Soudki et al. (1997) no encontraron variaciones en la longitud de transmisión después de 200 días en vigas con armaduras de fibra de carbono.

Mahmoud Z.I. et al. (1999) la longitud de transmisión de barras leadline (barra lisa) incrementan un 22% después de un año. Sin embargo, no se observó ningún

cambio en la longitud de transmisión de armaduras reforzadas con fibra de carbono y armaduras de acero (armaduras con forma espiral).

Lu et al. (2000) encontraron pequeñas variaciones (2%) en la longitud de transmisión en un periodo de 28 a 90 días para los diferentes tipos de armaduras ensayadas.

Shing et al. (2000) observaron un ligero incremento en la longitud de transmisión a 28 días del 6% en vigas de hormigón de alta prestaciones (HPC).

Oh y Kim (2000) aseguran que la deformación en el hormigón aumenta en el tiempo debido a la fluencia y la retracción, y la longitud de transmisión aumenta un 2 a 3% aproximadamente en los primeros 7 días y un 5% a los 90 días desde que se realizó el destesado.

Grace N.F. (2000) determinó que el efecto a largo plazo en la longitud de transmisión en tendones CFRP y de acero es aproximadamente un 7% en un periodo de un año.

Vázquez H. (2000) realiza ensayos en probetas de hormigón ligero y hormigón convencional, manifestando un incremento de la longitud de transmisión a lo largo del tiempo (365 días) del 8% en probetas de hormigón convencional, mientras que las probetas de hormigón ligero fallaron por hendimiento.

Kahn L.F. et al. (2002) encontraron un incremento medio a 7 días de la longitud de transmisión del 11% y un incremento máximo del 16% en vigas de HPC.

Zou P.X. (2003) realiza ensayos con cordones de FRP y cordones de acero y no observa ninguna variación con el tiempo en la longitud de transmisión durante 390 días. Además, no observaron una influencia significativa de la resistencia del hormigón en la longitud de transmisión con AFRP.

Barnes et al. (2003) encontró un incremento en la longitud de transmisión aproximadamente del 10 al 20% en 111 días, aunque el mayor incremento se produce en el primer mes.

Kose M.M. y Burkett W.R. (2005) realizan ensayos durante 6 semanas, teniendo variaciones de la longitud de transmisión entre el 5 y 15%.

Girgis A. y Tuan C. (2005) trabajaron en vigas de hormigón autocompactante y hormigón convencional y no encontraron variaciones de la longitud de transmisión con el tiempo (28 días).

Swords (2005) no encontró un crecimiento significativo en la longitud de transmisión en el tiempo (48 días) para probetas de hormigón convencional, mientras que para probetas con hormigón autocompactante observó un crecimiento entre el 10 y 27% en un periodo de 28 y 41 días.

Peterman R.J. (2007) observa un incremento del deslizamiento en el extremo libre de la probeta, lo que implica un incremento de la longitud de transmisión en 21 días posterior a la transmisión del pretensado del 36.3% para vigas de hormigón autocompactante y armadura ubicada en la parte inferior, y un incremento del 18.8% para vigas con armadura ubicada en la parte superior.

Larson et al. (2007) evalúan la longitud de transmisión en el tiempo (21 días) por medio del deslizamiento en vigas de hormigón autocompactante encontrando un aumento entre el 10 y el 20% para vigas con armadura ubicada en la parte inferior y vigas T, y un aumento del 40 al 45% para vigas con armadura ubicada en la parte superior.

Trent (2007) realizó ensayos en vigas con hormigón convencional y hormigón autocompactante teniendo un aumento de la longitud de transmisión a 28 días de 13 y 56% respectivamente.

Staton B.W. et al. (2009) realizan una comparación de la longitud de transmisión en el tiempo (28 días) en vigas de hormigón convencional y hormigón autocompactante, obteniendo en promedio un aumento del 6% y un incremento máximo del 31% para hormigones autocompactantes, en tanto que para hormigones convencionales se obtuvo un incremento promedio del 11.6% y un incremento máximo del 24%.

Pozolo A. y Andrawes B. (2011) estiman que la longitud de transmisión varía con el tiempo (28 días) hasta un 13% para vigas de hormigón autocompactante.

De lo anterior y del resumen que se presentan en la Tabla 2.3.5.1 se extraen las siguientes observaciones.

- Se ha encontrado diversidad de resultados y parámetros para determinar la longitud de transmisión diferida; en algunos casos se encontró una disminución de la longitud de transmisión, en otros casos no se observa ningún cambio y algunos autores declaran que el incremento de la longitud de transmisión no suele suceder de una forma ordenada o siguiendo algún patrón, al igual que diferentes resultados se pueden encontrar en los extremos de una misma elemento.



- La mayor parte de los autores aplican usualmente técnicas experimentales basadas en el análisis del perfil de deformaciones longitudinales en la superficie del hormigón (Russell y Burns (1996)) para determinar la longitud de transmisión y su evolución con el tiempo. Y en otros casos, con la medición del deslizamiento de la armadura basados en la teoría de Guyon (Guyon (1953)).
- Se ha encontrado resultados del incremento de la longitud de transmisión entre 0 hasta 115%, para los valores medios entre 7 y 912 días el incremento de la longitud de transmisión es del 22%.
- El mayor incremento en la longitud de transmisión a lo largo del tiempo se produce en los primeros días según Lane (1992), Barnes et al. (2003) y Oh y Kim (2000). Adicionalmente se observa que la mayor parte de las investigaciones mencionadas anteriormente enfocan sus estudios entre 7 y 28 días.
- Diferentes tipos de armadura pretensada (Alambres, barras, cordones, Dyform), de diferente material (acero, FRP), diferentes acabados y diámetros (2 a 18 mm) se encontraron en las investigaciones.
- En cuanto a la comparación que se tiene entre hormigones autocompactantes y hormigones tradicionales, se observa una contrariedad de resultados, debido a que algunos autores afirman que se produce mayor incremento en la longitud de transmisión para hormigones autocompactantes (Swords (2005), Trent (2007)), mientras que Staton et al. (2009) afirman lo contrario y Girgis y Tuan (2005) no observan ningún cambio.
- Para hormigones de altas prestaciones (HPC) se tiene un incremento medio en la longitud de transmisión del 7% (Shing et al. (2000), Grace N.F. (2000), Kahn L.F. (2002)).
- Algunos autores coinciden en que no se produce un incremento importante en la longitud de transmisión en el tiempo (Base (1957), Holmberg A. y Lindgren (1970), Krishnamurthy (1970), Nanni et al. (1992), Soudki et al. (1997), Mahmoud et al. (1999), Lu et al. (2000), Zou P.X. (2003), Girgis y Tuan (2005), Swords (2005)).
- Las deformaciones en el hormigón se incrementan a lo largo del tiempo debido a la combinación del efecto de la fluencia y la retracción del hormigón

(Nanni et al. (1992), Soudki et al. (1997), Oh y Kim (2000) y Zou P.X. (2003)), pero no influyen demasiado en la longitud de transmisión.

- Base (1957) y Krishnamurthy (1970) consideran que el deslizamiento inicial de la armadura prácticamente no continua en el tiempo, por consiguiente, la influencia del tiempo sobre la longitud de transmisión puede considerarse despreciable.
- Swords (2005) concluye que hay muy poca fiabilidad entre la proporcionalidad que existe entre el deslizamiento y longitud de transmisión, contrario a lo afirmado por Logan (1997), Oh y Kim (2000), Larson et al. (2007).

2. ESTADO DEL ARTE

Autores	Incremento Lt (%)	Tiempo (días)	Diámetro Armadura (mm)	Tipo de armadura	Tipo de hormigón	Incremento Deformación	Incremento Deslizamiento
Marshall	50	365	2 y 5	Alambre de acero	HAC	+	+
Evans	115	912	2				
Evans y Robinson	25	120	2, 5, 7	Alambre de acero liso y corrugado		+	+
Base	No incrementa	180	5	Alambre de acero liso		+	+/-
Kaar et al.	6 (incremento medio) 19 (máx. incremento)	365	6, 9.5, 13, 15	Cordones de 7 alambres	+		
Holmberg y Lindgren	No incrementa	17	9.5, 11, 13			+	
Krishnamurthy	No incrementa	-	5	Alambre grafilado			+/-
Mayfield et al.	5 a 44	300	9.5, 13, 15, 18	Estándar- Dyform			
Swamy y Anand	32 (máx. incremento) 11.5 (incremento medio alambres) 16 (incremento medio cordón)	180 a 426	7, 13	Estándar- Dyform	HCA		
Dorsten et al.	20 (cordones sin recubrimiento)	420	9.5, 13, 15	Cordones de 7 alambres con y sin recubrimiento			
Weerasekera	No incrementa	-	-	-		+	
Cousins et al.	12 (cordones con recubrimiento) 6 (cordones sin recubrimiento)	365	9.5, 13, 15	Cordones de 7 alambres con y sin recubrimiento			+
Nanni et al.	No incrementa	28	12	Cordones AFRP y de acero		+	
Lane	30 (los primeros 28 días) 7 (los días restantes)	180	9.5, 13, 15	Cordón de acero			
Issa	20 (cordón de acero) 40 (cordón de fibra de vidrio)	600	9.5, 13	Cordón de fibra de vidrio y acero			
Mitchell et al.	22	21	13		+	+	

COMPORTAMIENTO ADHERENTE DIFERIDO DE ARMADURAS PRETESAS EN HORMIGÓN

Autores	Incremento Lt (%)	Tiempo (días)	Diámetro Armadura (mm)	Tipo de armadura	Tipo de hormigón	Incremento Deformación	Incremento Deslizamiento
Logan	30 a 67	21	13				+
Soudki et al.	No incrementa	200	8	CFCC		+	
Mahmoud et al.	22 (Barras leadline) No incrementa (armadura de acero y fibra de carbono (CFCC))	365	13 8 10.5, 13, 15	Acero CFRP: Leadline CFCC		+	
Lu et al.	2 (tendones de FRP y Technora)	28 y 90	8	Acero, FRP, CFRP: Leadline, AFRP: Technora			
Shing et al.	6 (incremento medio) 17 (máx. incremento)	28	15	Cordón de acero	HPC		
Oh y Kim	2 a 3 (los primeros 7 días) 5 (a los 90 días)	90	13 y 15	Cordón de 7 alambres de acero	NC	+	+
Grace	7	391	10.5 y 12.5	CFRP, CFCC y acero	HPC	+	
Vázquez	8 (extremo activo-prisma de NC) 100 (hendidamiento-prisma de HL) 24-27 (vigas de HL)	365	15	Cordón de 7 alambres de acero	HL y NC	+	+
Kahn et al.	7 (incremento medio) 16 (máx. incremento)	7	15	Cordón de acero	HPC	+/-	
Zou	No incrementa	238 y 390	8 y 9	Cordones FRP y de acero	NC	+	
Barnes et al.	10-20 (incremento medio) 50 (máx. incremento)	111	15	Cordón de 7 alambres de acero		+	
Kose y Burkett	5 a 15	42	15	Cordón de 7 alambres de acero	NC	+	
Girgis y Tuan	No incrementa	28	15	Cordón de acero	HAC y NC	+	
Swords	10-27 para SCC No incrementa para NC	41-48	13	Cordón de 7 alambres de acero	HAC y NC	+	+/-

Autores	Incremento Lt (%)	Tiempo (días)	Diámetro Armadura (mm)	Tipo de armadura	Tipo de hormigón	Incremento Deformación	Incremento Deslizamiento
Peterman	36.6 (armadura parte inferior) 18.8 (armadura parte superior)	21	13	Cordón de 7 alambres de acero	HAC		
Larson et al.	10-20 (armadura parte inferior) 40-45 (armadura parte superior)	21	13	Cordón de 7 alambres de acero	HAC		+
Ramirez y Russell	190 (incremento máximo) 62 (promedio)	240	13	Cordón de 7 alambres de acero	HPC	+	
Trent	56 para SCC 13 para NC	28	14	Cordón de acero	HAC y NC		
Staton et al.	6 (incremento medio SCC) 31 (incremento máx. SCC) 11.6 (incremento medio NC) 24 (incremento máx. NC)	28	15	Cordón de 7 alambres de acero	HAC y NC	+/-	
Pozolo y Andrawes	13	28	13	Cordón de acero	HAC	+/-	

**Tabla 2.3.5.1.** Aportaciones cronológicas de diferentes autores relativa a la longitud de transmisión diferida

NC: hormigón convencional; HL: hormigón ligero; HCA: hormigón con cemento aluminoso; HPC: hormigón de alto rendimiento; HAC: hormigón autocompactante

(+/-): si aumenta o disminuye

## **2.4. Métodos experimentales para determinar la longitud de transmisión**

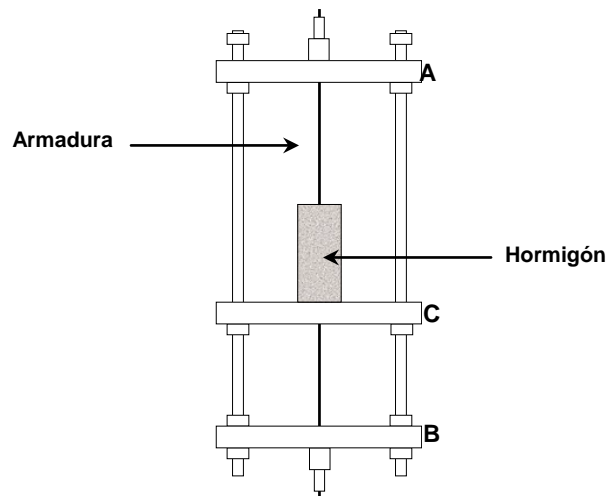
Para poder determinar la longitud de transmisión es necesario que el elemento tenga una longitud suficientemente grande para permitir el desarrollo de los esfuerzos. La determinación de la longitud de transmisión sería inmediata si se conociera la curva de variación longitudinal de tensión en la armadura desde el extremo libre de un elemento pretensado (tensión nula) hasta el final de la longitud de transmisión (tensión efectiva de pretensado).

La aplicación de sofisticados procedimientos de medida que no distorsionan el fenómeno adherente, como la técnica radiográfica (Evans y Robinson (1955)), la fotoelasticidad (Linger y Bhonsle (1963)), la resistividad por contacto eléctrico (Fu y Chung (1995)) o ultrasonidos (Chen y Wissawapaisal 2001)), no han sido suficientemente desarrolladas. Por ello, resulta necesario recurrir a métodos indirectos de determinación de la longitud de transmisión.

En este apartado se exponen las técnicas experimentales usualmente más utilizadas para determinar la longitud de transmisión, las cuales se basan en la medición de las deformaciones longitudinales en la superficie de hormigón, en la medición del deslizamiento de la armadura que se registra en el extremo libre de un elemento pretensado durante la transmisión de la fuerza de pretensado, y en la medición de la tensión (o fuerza) de la armadura pretensada.

### **2.4.1 Simulación de la zona de transmisión**

La transmisión del pretensado se puede simular mediante la técnica *push-in test*. A partir del esquema de la Figura 2.4.1.1, el procedimiento de ensayo comprende las siguientes fases: la armadura es tesada entre las placas A y B; la probeta de hormigón se fabrica alrededor de la armadura tesada, y apoya en la placa C; la fuerza de pretensado es introducida desde A, originando un movimiento de la armadura hacia B que genera unas tensiones de adherencia dado que el hormigón es soportado por la placa de reacción C.

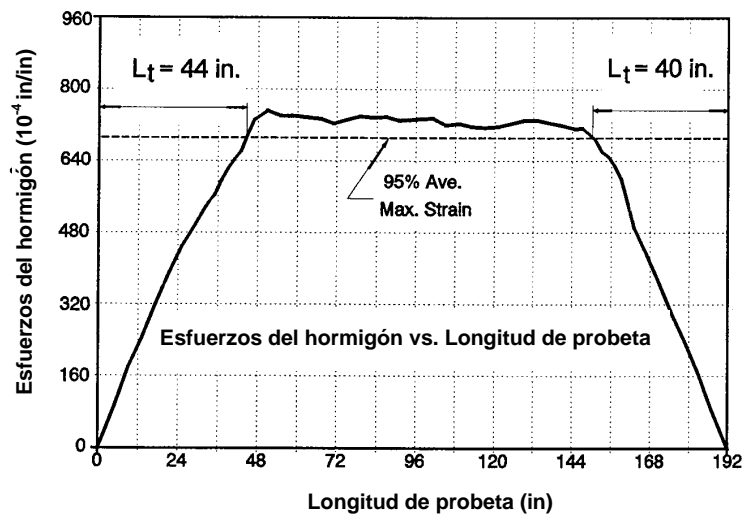


**Figura 2.4.1.1.** Principios de la técnica de push-in test (basado en Keuning et al. según CEB (1981)).

Esta técnica ha sido aplicada por varios investigadores (den Uijl (1992), Abrishami y Mitchell (1993), Yu (1993), Vandewalle y Mortelmans (1994), Rose y Russell (1997), Tork (1999), Vázquez (2000)).

#### **2.4.2 Medición de las deformaciones en la superficie del hormigón**

En la medición de las deformaciones longitudinales del hormigón suelen emplearse galgas eléctricas o puntos de extensometría mecánica, que se disponen en serie a varias distancias desde el extremo libre en los paramentos de los elementos pretensados antes de iniciar la transmisión del pretensado. Cuando se transfiere la fuerza de pretensado, el hormigón se comprime. La longitud de transmisión se puede determinar directamente sobre la curva de deformaciones del hormigón respecto a la distancia al extremo libre del elemento, por el método de intercepción de pendiente "*Slope-Intercept Method*" (Deatherage *et al.* (1994)), o aplicando el método del 95% de la media de las deformaciones máximas "*95% Average Maximum Strain Method (AMS 95%)*" (Russell y Burns (1996)) (Figura 2.4.2.1).



**Figura 2.4.2.1.** Ejemplo de determinación de la longitud de transmisión (Russell y Burns (1996)).

Varios investigadores aplican una técnica de suavizado de esta curva (Lu *et al.* (2000), Lopes y do Carmo (2002)), mientras que otros optan por tomar el 100% de la media de las máximas deformaciones (Mahmoud *et al.* (1999)). En este último caso, lo que se determina es la longitud de desarrollo, definida como la distancia desde el extremo del elemento hasta la sección en la que las deformaciones longitudinales en el hormigón comienzan a ser constantes. La longitud de desarrollo es ligeramente mayor que la longitud de transmisión.

Este método permite reproducir a escala real la longitud de transmisión (longitud de desarrollo) del pretensado. Para su realización requiere un bastidor de pretensado y en la práctica pueden fabricarse vigas y analizar la zona de transmisión por los dos extremos.

Vandewalle y Mortelmans (1994) presentaron una configuración de ensayo para reproducir el fenómeno de la transmisión del pretensado en uno de los extremos. El esquema del ensayo se presenta en la Figura 2.4.2.2. Se trata de un ensayo sobre la probeta de hormigón con una única zona de transmisión.



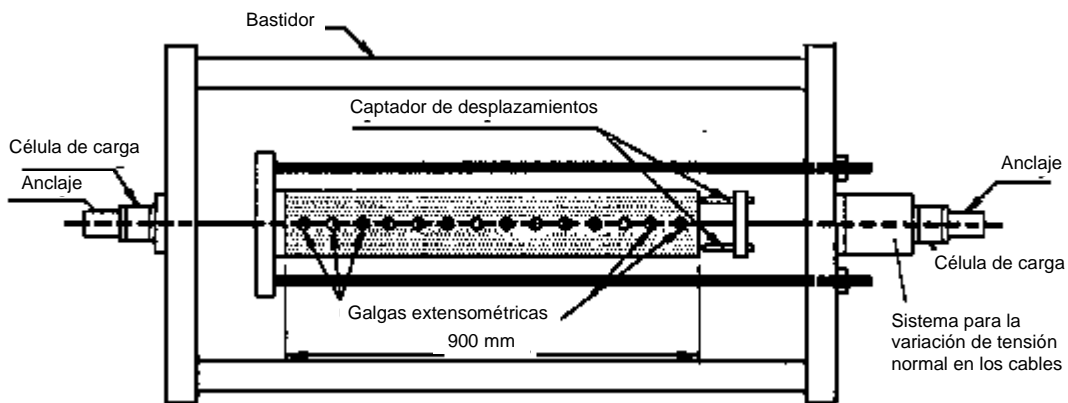


Figura 2.4.2.2. Esquema de ensayo realizado (Vandewalle y Mortelmans (1994)).

### 2.4.3 Medición del deslizamiento de la armadura pretensada

La variación longitudinal de tensión a lo largo de la longitud de transmisión de una armadura implica el acortamiento de la misma desde la situación de tesado, por lo que se registran deslizamientos entre la armadura y el hormigón circundante. Los deslizamientos a lo largo de la longitud de transmisión se acumulan en el extremo libre del elemento, dando lugar al deslizamiento (*draw-in*, FIB (2000)) de la armadura en el hormigón.

Para la medición del deslizamiento de la armadura se dispone un transductor de desplazamientos antes de proceder al destesado, que se sujeta a la propia armadura y contacta con el paramento del extremo libre del elemento.

La relación entre la penetración de la armadura y la longitud de transmisión fue obtenida por Guyon (1953), quien propuso la siguiente ecuación 2.4.3.1:

$$L_t = \alpha \frac{\delta}{\varepsilon_{pi}} \quad \text{Ec. 2.4.3.1}$$

donde:

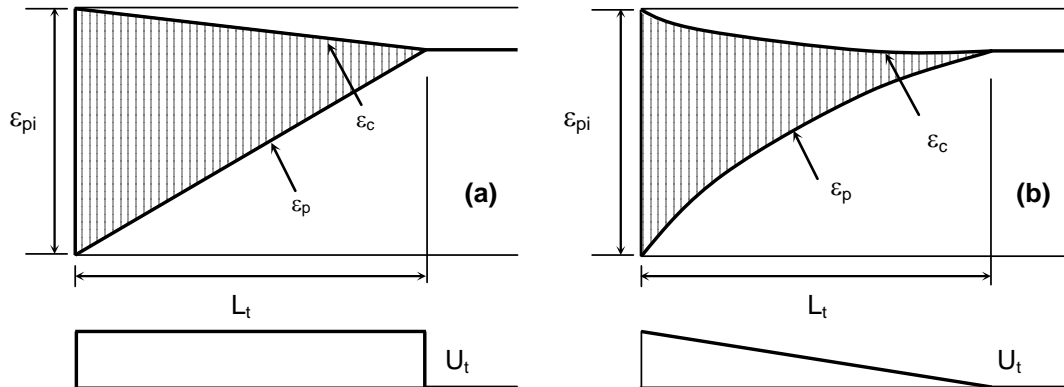
$L_t$  = longitud de transmisión.

$\delta$  = deslizamiento de la armadura.

$\varepsilon_{pi}$  = deformación inicial de la armadura.

$\alpha$  = 2 para la distribución uniforme de la tensión adherente (variación lineal de la tensión en el cordón. Figura 2.4.3.1 (a)) y  $\alpha = 3$  para la distribución lineal de la

tensión adherente (variación parabólica de la tensión en el cordón. Figura 2.4.3.1 (b)).



**Figura 2.4.3.1.** Variación de deformaciones a lo largo de la longitud de transmisión. (a) Distribución constante de tensión adherente. (b) Distribución lineal de la tensión adherente.

La aplicación de esta técnica es sencilla, y ha sido propuesta como procedimiento no destructivo de control de calidad en plantas de prefabricación de elementos de hormigón pretensado, pero la medida de la penetración puede verse afectada por pérdidas locales de adherencia en los extremos de los elementos. La ecuación 2.4.3.1 no es aplicable a elementos con deficiente calidad adherente (Brooks *et al.* (1988)), pues en estos casos se registran grandes penetraciones que conducen a una incorrecta estimación de la longitud de transmisión de acuerdo con la ecuación 2.4.3.1.

Otras desventajas de esta técnica son: elevada dispersión de resultados experimentales (Balogh (1992)), dificultad de medir pequeños deslizamientos (Jonsson (1992)), rotura de transductores cuando se aplican procedimientos súbitos o bruscos de destesado (Kahn *et al.* (2002)), y excesiva penetración en elementos pretensados con compactación defectuosa alrededor de la armadura (Anderson y Anderson (1976)).

#### 2.4.4 Medición de la fuerza de pretensado

Este método se basa en la determinación del perfil de tensiones (o fuerzas) en la armadura del hormigón, fijando galgas eléctricas a lo largo de la superficie de la armadura pretensada para conocer el perfil de tensiones de la medición de

deformación mediante la aplicación del módulo de elasticidad de la armadura pretensada. Este es un procedimiento generalizado, pero implica una distorsión no deseada del fenómeno adherente armadura-hormigón.

Como una alternativa para evitar esta distorsión para determinar la longitud de transmisión, una técnica de ensayo basada tanto en la medición directa y el análisis de la fuerza que soporta la armadura en series de probetas con diferentes longitudes adherentes ha sido concebido: el método de ensayo ECADA (Martí (2002) y Martí-Vargas *et al.* (2006)). La viabilidad y la fiabilidad de este método han sido verificados para un análisis instantáneo (Martí-Vargas *et al.* (2007) y Martí-Vargas *et al.* (2012)). El equipo de ensayo incluye un dispositivo de arrancamiento en el extremo opuesto al que se realiza la transmisión (Figura 2.4.4.1). Este dispositivo y el diseño de la probeta eliminan los efectos de confinamiento producidos por la placa de apoyo de la probeta y equilibran la rigidez entre la placa del bastidor y el elemento ensayado. Asimismo, se puede actuar sobre la armadura en este mismo dispositivo procediendo al arrancamiento después de realizar la transmisión del pretensado.

Con el método ECADA se pueden determinar tanto la longitud de transmisión como la longitud de anclaje de una armadura tras la transmisión del esfuerzo de pretensado.

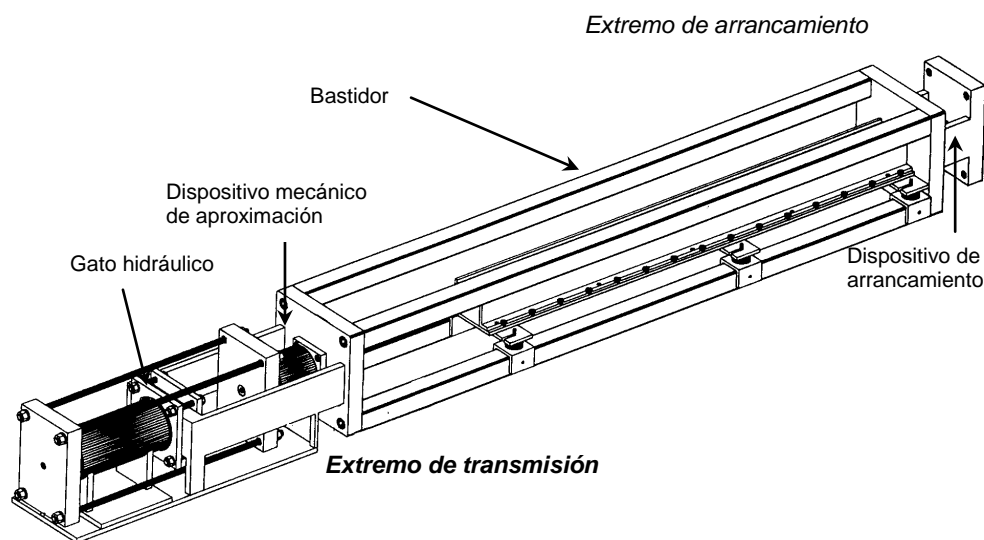


Figura 2.4.4.1. Esquema del equipo de ensayo (Martí (2002)).

## 2.5. Expresiones para calcular las longitudes de transmisión

Se presentan diferentes expresiones para calcular la longitud de transmisión. Se incluyen expresiones obtenidas de forma teórica o a partir de resultados experimentales. Todas las expresiones se presentan de acuerdo con el sistema internacional de unidades.

### 2.5.1 Cálculo de la longitud de transmisión

La longitud de transmisión es un parámetro crítico en el diseño de estructuras para la determinación de las capacidades a cortante y flexión de elementos de hormigón pretensado y para verificar la tensión transversal cerca de los extremos del elemento (Russell and Burns (1996), Barnes et al. (2003)). Algunas ecuaciones para determinar la longitud de transmisión han sido propuestas por varios códigos e investigadores a partir de resultados experimentales y estudios teóricos. Varias de ellas consideran el efecto de la resistencia a compresión del hormigón a la edad de destesado  $f_{ci}$  para predecir la longitud de transmisión, así como también se han propuesto variantes de las prescripciones del Código ACI – 318. La Tabla 2.5.1.1 presenta algunas de estas ecuaciones para cordones de acero de pretensar. Las ecuaciones aparecen en su forma original y de forma paramétrica de acuerdo con la estructura de la ecuación 2.5.1.1.

$$L_t = \lambda \cdot \left[ \chi \cdot \left( \frac{f_{sx}^n A_p}{(k_1 \pi d_b) U_t} + k_2 \right) \right]$$

Ec. 2.5.1.1

donde:

$\lambda$  = factor para obtener los valores límite superior y límite inferior de la longitud de transmisión

$\chi$  = factor que tiene en cuenta el tipo de destesado

$f_{sx}$  = tensión en la armadura pretensada

$n$  = exponente

$A_p$  = área transversal de la armadura

$k_1$  = factor del perímetro de la armadura ( $k_1 = 4/3$  para cordón de 7 alambres,  $k_1 = 1$  para cordones de sección transversal circular)

$d_b$  = diámetro nominal de la armadura pretensada

$U_t$  = tensión adherente media a lo largo de la longitud de transmisión

$k_2$  = constante de ajuste

La notación adicional que aparece en la Tabla 2.5.1.1 es:

- $f_{cci}$  = resistencia del hormigón en probeta cúbica en el momento de la transmisión del pretensado.
- $f_{ctdi}$  = resistencia de diseño a tracción a la edad de la transmisión del pretensado.
- $d_w$  = diámetro nominal de uno de los alambres exteriores del cordón de pretensado.

En el código ACI-318 (ACI 2011)  $f_{sx}$  es la tensión efectiva  $f_{se}$  para la armadura pretensada después de descontar todas las pérdidas. Para calcular  $U_t$  como una función de la resistencia del hormigón, los valores de  $A_p = 0.779\pi d_b^2/4$  y  $k_1 = 4/3$  para las armaduras utilizadas hoy en día han sido consideradas cuando no se ha especificado en las ecuaciones (Tabatabai y Dickson (1993), Russell y Burns (1996)). Además, se ha considerado  $U_t = 2.76$  MPa para las predicciones del Código ACI-318 (ACI 2011) y sus variantes, y se ha adoptado  $U_t = 1.84$  MPa para la ecuación 2.5.1.14 aplicando una relación proporcional entre la ecuación 2.5.1.2 y la ecuación 2.5.1.14.

Como se puede observar en la Tabla 2.5.1.1, las ecuaciones 2.5.1.17 (CEB-FIP (2010)) y 2.5.1.18 (CEN (2004)) coinciden en su resultado final, aunque no presentan la misma forma. El valor  $\lambda_g = 0.75$  no está explícitamente indicado en el MC2010, pero se ha introducido a partir de  $\lambda_g = 0.5$  y  $\lambda_g = 1$ , establecidos en MC2010 para los valores límite inferior y límite superior de la longitud de transmisión, respectivamente.

Los valores de diseño de la longitud de transmisión dependen de la situación de diseño. Una corta longitud de transmisión debe ser usada para la verificación de las tensiones locales en la transmisión del pretensado, mientras que un valor alto de la longitud de transmisión debe ser usado para la verificación de estados límites últimos. Las longitudes de transmisión obtenidas por medio de las ecuaciones incluidas en la Tabla 2.5.1.1 corresponde a un valor medio, excepto en aplicaciones de diseño como un límite razonable para valores altos de longitud de transmisión (Russell y Burns (1996)). La Tabla 2.5.1.2 incluye los casos en los que se aporta, además de la estimación del valor medio de longitud de transmisión, la predicción de valores límite inferior y superior de la longitud de transmisión.

COMPORTAMIENTO ADHERENTE DIFERIDO DE ARMADURAS PRETESAS EN HORMIGÓN

Referencia	Ecuación número	Ecuación	$L_t = \frac{f_{px}^n A_p}{(k_1 \pi \phi) U_t} + k_2$ (en MPa y mm)				
			$f_{px}$	n	$U_t$	$k_1$	$k_2$
ACI (2011)	2.5.1.2	$L_t = \frac{f_{px} d_b}{21}$	$f_{px}$	1	2.76	4/3	--
Olesniewicz (1975)	2.5.1.3	$L_t = \Psi d_b \sqrt{\frac{f_{pi}}{f_{cci}}}$ $\Psi = 10$ para el valor medio	$f_{pi}$	0.5	$0.015 f_{cci}^{0.5}$	4/3	--
Zia y Mostafa (1977) (destesado súbito)	2.5.1.4	$L_t = 1.5 \frac{f_{pi} \phi}{f_{ci}} + 117$	$f_{pi}$	1	$0.097 f_{ci}$	4/3	117
Zia and Mostafa (1977) (gradual release)	2.5.1.5	$L_t = 1.3 \frac{f_{pi} \phi}{f_{ci}} + 58$	$f_{pi}$	1	$0.112 f_{ci}$	4/3	58
Nijhawam (1978)	2.5.1.6	$L_t = 0.69 \frac{f_{pi} \phi}{f_{ci}} + 262$	$f_{pi}$	1	$0.212 f_{ci}$	4/3	262
Cousins <i>et al.</i> (1990)	2.5.1.7	$L_t = \frac{f_{px} A_p}{\pi d_b U_t \sqrt{f_{ci}}} + 0.5 \frac{U_t \sqrt{f_{ci}}}{B}$ $A_p / \pi \phi = \phi / 4$ Para cordones no recubiertos $U_t = 0.556$ y $B = 0.0815$ MPa/mm	$f_{px}$	1	$0.556 f_{ci}^{0.5}$	1	$3.4 f_{ci}^{0.5}$
EC-2 (2010)	2.5.1.8	$L_t = \beta_b \phi$ $\beta_b = 75 - (f_{ci} - 25)$ (en Mpa)	--	--	--	--	--

Referencia	Ecuación número	Ecuación	$L_t = \frac{f_{px}^n A_p}{(k_1 \pi \phi) U_t} + k_2$ (en MPa y mm)				
			$f_{px}$	n	$U_t$	$k_1$	$k_2$
Bruggeling y Huyghe (1991)	2.5.1.9	$L_t = \frac{7}{12} d_w \frac{f_{pi}}{0.13 f_{cci}}$ $d_w = 0.33\phi$ para 12.7 mm cordón de 7 alambres	$f_{pi}$	1	$0.099 f_{cci}$	4/3	--
Balazs (1992)	2.5.1.10	$L_t = 3.15 \phi^5 \sqrt[5]{\frac{f_{p\infty}^3}{f_{ci}^2}}$	$f_{p\infty}$	0.6	$0.046 f_{ci}^{0.4}$	4/3	--
Shahawy <i>et al.</i> (1992a) Deatherage <i>et al.</i> (1994) Buckner (1995)	2.5.1.11	$L_t = \frac{f_{pi} \phi}{21}$	$f_{pi}$	1	2.76	4/3	--
Mitchell <i>et al.</i> (1993)	2.5.1.12	$L_t = \frac{f_{pi} \phi}{21} \sqrt{\frac{20.7}{f_{ci}}}$	$f_{pi}$	1	$0.674 f_{ci}^{0.5}$	4/3	--
Tadros y Baishya (1996)	2.5.1.13	$L_t = \frac{(f_{p\alpha} / 0.8) \phi}{21}$	$\frac{f_{p\infty}}{0.8}$	1	2.76	4/3	--
Russell y Burns (1996)	2.5.1.14	$L_t = \frac{f_{p\infty} d_b}{14}$	$f_{p\infty}$	1	1.84	4/3	--
Mahmoud <i>et al.</i> (1999)	2.5.1.15	$L_t = \frac{f_{pi} d_b}{\alpha_t f_{ci}^{0.67}}$ $\alpha_t = 2.4$ para cordones de acero	$f_{pi}$	1	$0.350 f_{ci}^{0.67}$	4/3	--

Referencia	Ecuación número	Ecuación	$L_t = \frac{f_{px}^n A_p}{(k_1 \pi \phi) U_t} + k_2$ (en MPa y mm)				
			$f_{px}$	n	$U_t$	$k_1$	$k_2$
Martí et al. (2007a)	2.5.1.16	$L_t = \lambda \frac{4.7 f_{pi}}{f_{ci}^{0.67}}$	$f_{pi}$	1	$0.4 f_{ci}^{0.67}$	4/3	--
CEB-FIB 2010/ EHE (2008)	2.5.1.17	$L_t = \chi_8 \chi_9 \chi_{10} \frac{A_p}{\pi \phi} \frac{f_{pi}}{\eta_{p1} \eta_{p2} f_{ctdi}}$ <p>Para cordones de 7 alambres <math>A_p/\pi\phi = 7\phi/36</math>  <math>\chi_8, \chi_9</math> y <math>\chi_{10}</math> destesado gradual o súbito, condiciones de tensión y de superficie.  <math>\eta_{p1}</math> y <math>\eta_{p2}</math> tipo de cordón y la posición del cordón durante el hormigonado.</p>	$f_{pi}$	1	$\left( \frac{\eta_{p1} \eta_{p2}}{\chi_8 \chi_9 \chi_{10}} \right) f_{ctdi}$ <p>para <math>\chi_8 = 1</math>  <math>\chi_9 = 0.75, \chi_{10} = 0.5, \eta_{p1} = 1.2,</math> y <math>\eta_{p2} = 1</math>  <math>3.2 f_{ctdi}</math>                      Si destesado súbito (<math>\chi_8 = 1.25</math>)  <math>2.56 f_{ctdi}</math></p>	1	--
EC-2 (2010)	2.5.1.18	$L_t = \chi_1 \chi_2 \phi \frac{f_{pi}}{\eta_{p1} \eta_1 f_{ctdi}}$ <p><math>\chi_1</math> para destesado gradual o súbito  <math>\chi_2</math> es un factor de área del cordón (para cordones de 7 alambres <math>\chi_2 \phi = 7\phi/36</math>)  <math>\eta_{p1}</math> y <math>\eta_1</math> según tipo de cordón y condiciones adherentes.</p>	$f_{pi}$	1	$\left( \frac{\eta_{p1} \eta_1}{\chi_1} \right) f_{ctdi}$ <p>para <math>\chi_1 = 1</math> (destesado grad.), <math>\eta_{p1} = 3.2,</math> y <math>\eta_1 = 1</math>  <math>3.2 f_{ctdi}</math>                      si dest. súb. (<math>\chi_1 = 1.25</math>)  <math>2.56 f_{ctdi}</math></p>	1	--

Tabla 2.5.1.1. Ecuaciones propuestas para la longitud de transmisión de la literatura.



Referencia	Ecuación número	Límite inferior	Valor medio	Límite superior	Relación límites Superior/ Inferior
Olesniewicz (1975)	2.5.1.3	$\psi = 7$	$\psi = 10$	$\psi = 13$	1.9
EC-2 (2010)	2.5.1.8	$0.8L_t$	$L_t$	$1.2L_t$	1.5
Balazs (1992)	2.5.1.10	$0.79L_t$	$L_t$	$1.41L_t$	1.8
Martí et al (2007a)	2.5.1.16	$\lambda = 0.5$	$\lambda = 1$	$\lambda = 1.5$	3
CEB-FIB (2010) / EHE (2008)	2.5.1.17	$\alpha_g = 0.5$	$\alpha_g = 0.75$	$\alpha_g = 1$	2
EC-2 (2010)	2.5.1.18	$0.8L_t$	$L_t$	$1.2L_t$	1.5

**Tabla 2.5.1.2.** Predicción de los valores de límite inferior y límite superior de longitud de transmisión.

## 2.5.2 Cálculo de la longitud de transmisión a partir de la penetración de la armadura

Varias líneas de investigación han propuesto diferentes valores del coeficiente  $\alpha$  (véase Ecuación 2.4.3.1) para la distribución de las tensiones a lo largo de la longitud de transmisión a partir de resultados experimentales y estudios teóricos según la expresión de Guyon (1953) (ver 2.4.3). La Tabla 2.5.2.1 presenta los diferentes valores asignados al coeficiente  $\alpha$ .

Referencia	Coefficiente $\alpha$	Origen de los valores
FIP (1982)	4	Valor indicado cuando la tensión en la armadura es incrementada rápidamente.
Guyon (1953)	3	Por hipótesis
FIP (1982)*		Valor adoptado
Olesniewicz (1975)	2.86	Experimental
FIP (1978)		
Martí (2007b)		
RILEM (1979)	2.8	Valor adoptado
IRANOR (1982)		
LCPC (1999)		
Balazs (1993)	$2/(1-b)^\dagger$ 2.67	Por estudios teóricos
Den Uijl (1998)	2.3 a 2.6	Valores experimentales y estudios teóricos.
Jonsson (1992)	2.5	Valor asumido
Guyon (1958)	2	Por hipótesis
Brooks <i>et al.</i> (1988)		
Balogh (1992)		
Russell y Burns (1996)		
Logan (1997)		
Steinberg <i>et al.</i> (2001)		
Oh y Kim (2000)		
Wan <i>et al.</i> (2002)		
CEB-FIP (2010)*		
den Uijl (1998)		
FIB (2000)	1.5	Valor indicado para distribución de tensión adherente ascendente.
Lopes y do Carmo (2002)		

**Tabla 2.5.2.1.** Valores propuesto del coeficiente de forma  $\alpha$  a partir de la fórmula de Guyon.

\* Sustituyendo  $f_{po}$  por la tensión efectiva de la armadura inmediatamente después de destesado.

† b es una constante experimental que debe ser ajustada para cada tipo de armadura de acuerdo con sus características adherentes (para cordón de 7 alambres de 12.9 mm, b = 0.25, y  $\alpha = 2.67$ ).

La Tabla 2.5.2.2 presenta otras expresiones que relacionan la longitud de transmisión con el deslizamiento ( $\delta$ ) de la armadura en el extremo libre de un elemento de hormigón pretensado.

Referencia	Ecuación número	Ecuación
Marshall y Krishnamurthy (1969)	2.5.2.1	$L_t = \sqrt{\frac{\delta}{K}}$ <p>(<math>K = 0.00035 \text{ mm}^{-1}</math> para armaduras de 7 alambres de 12.7 mm)</p>
Balazs (1992)	2.5.2.2	$L_t = 105\phi \sqrt[4]{\frac{\delta^{3/2}}{f_{ci}}}$
Balazs (1993)	2.5.2.3	$L_t = \frac{111\delta^{0.625}}{f_{ci}^{0.15} \left(\frac{f_{p0}}{E_p}\right)^{0.4}}$
Balazs (1993)	2.5.2.4	$L_t = 3.47 \frac{f_{p0}}{\sqrt{f_{ci}} \sqrt{\delta}}$
Rose y Russell (1997)	2.5.2.5	$L_t = 2\delta \frac{E_p}{f_{p0}} + 137.16$

**Tabla 2.5.2.2.** Ecuaciones propuestas para la longitud de transmisión a partir de los deslizamientos en la armadura en el extremo libre.

Algunos investigadores realizaron estudios experimentales para obtener la longitud de transmisión a partir de los deslizamientos de la armadura en el extremo libre en placas alveolares (Brooks *et al.* (1988), Balogh (1992), Jonsson (1992)), en vigas (Russell y Burns (1996), Rose y Russell (1997), Oh y Kim (2000), Lopes y do Carmo (2001), Steinberg *et al.* (2001), Kahn *et al.* (2002)) y en pilas (Petrou *et al.* (2000), Wan *et al.* (2002)).

Algunos investigadores (Anderson y Anderson (1976), Brooks *et al.* (1988), Wan *et al.* (2002)) establecieron el máximo deslizamiento permisible en el extremo ( $\bar{\delta}_{per}$ ) compatible con las predicciones del Código ACI - 318 para la longitud de transmisión (ACI (2011)). Despejando el deslizamiento ( $\delta$ ) en la ecuación 2.4.3.1 (donde  $\varepsilon_{pi} = f_{p0}/E_p$ ) tras sustituir el valor de la longitud de transmisión ( $L_t$ ) según la ecuación 2.5.1.2, se obtiene el deslizamiento ( $\delta_{per}$ ) buscado mediante la ecuación 2.5.2.6. Mediante las ecuaciones 2.5.2.7 y 2.5.2.8 se obtiene el deslizamiento permisible para  $\alpha = 2$  y  $\alpha = 3$ , respectivamente.

$$\delta_{per} = \frac{f_{p0} f_{p\infty} \phi}{21\alpha E_p} \quad \text{Ec. 2.5.2.6}$$

$$\delta_{per2} = 0.024 \frac{f_{p0}}{E_p} f_{p\infty} \phi \quad \text{Ec. 2.4.2.7}$$

$$\delta_{per3} = 0.016 \frac{f_{p0}}{E_p} f_{p\infty} \phi \quad \text{Ec. 2.4.2.8}$$

## 2.6. Pérdidas de pretensado

### 2.6.1 Introducción

Las pérdidas se pueden clasificar en pérdidas instantáneas y pérdidas diferidas (EC-2010). Cuando la fuerza de pretensado se transmite al elemento, existirá un acortamiento elástico instantáneo en el hormigón a medida que se comprime. Las pérdidas diferidas son atribuibles a la fluencia, la retracción del hormigón y la relajación del acero.

Las pérdidas de pretensado son afectadas por las variaciones en las propiedades de los materiales, el diseño estructural, los métodos de pretensado, la edad del hormigón en el momento de la aplicación de la carga, el método de cálculo de las pérdidas y otros factores medioambientales (PCI-1998).

La pérdida total de pretensado ( $TPL_t$ ) se define como la diferencia de la tensión de la armadura desde el momento justo antes de la transmisión del pretensado y la tensión de la armadura a un tiempo  $t$ . Usualmente la  $TPL_t$  es cuantificado como un porcentaje de la tensión inicial de pretensado.

Según Calavera (1999), las  $TPL_t$  varían entre 20 a un 30%. La aportación de cada pérdida de pretensado a las  $TPL_t$  depende del diseño de la estructura, del proceso de fabricación, de las propiedades de los materiales, de las condiciones medioambientales durante la vida de servicio y del tiempo transcurrido.

La tensión de tracción disponible para su aplicación al hormigón por la armadura pretensada es  $f_{p0}$ , la cual se reduce a  $f_{pi}$  inmediatamente después del destesado y a  $f_{pe}$  después de que todas las pérdidas han sucedido. La relación de efectividad (R)

se define para cualquier tiempo  $t$  y particularmente para efectos diferidos (Nilson A.H. (1987)) como:

$$R_{0t} = \frac{f_{pt}}{f_{p0}} \quad \text{Ec. 2.6.1.1}$$

$$R = \frac{f_{pe}}{f_{pi}} \quad \text{Ec. 2.6.1.2}$$

$$R_{0t} = \frac{f_{pt}}{f_{pi}} \quad \text{Ec. 2.6.1.3}$$

## 2.6.2 Estudios previos de la pérdida de fuerza de pretensado

Podolny W. (1969) evalúa las pérdidas que suceden en el hormigón pretensado por medio de un nuevo método teórico en hormigones convencionales y diferente resistencia del hormigón, estas pérdidas las valoran entre un 25 y 27% del pretensado inicial aplicado.

Tadros M.K. et al. (1975) desarrollan un método analítico para calcular las pérdidas instantáneas y diferidas en elementos de hormigón pretensado, comparando los resultados del método propuesto y resultados experimentales de diferentes autores, obteniendo un buen ajuste de las pérdidas de pretensado (30 - 56%).

Swamy R.N. y Anand K.L. (1975) concluyeron que la pérdida de pretensado total en un periodo de 520 - 625 días aumentó entre un 30 y 37% para vigas de HAC y un 45% para vigas de hormigón convencional a 360 días.

Rabbat B.G. (1984) realizaron ensayos en vigas de hormigón pretensado, removidas de un puente con 25 años de servicio, con el fin de determinar las pérdidas de pretensado, estando estas alrededor del 50% de los valores estimados usando la normativa de la AASHTO y el PCI (1975).

Shenoy C. V. y Frantz G. C. (1991) realizaron ensayos sobre dos vigas cajón las cuales fueron extraídas de un puente deteriorado de 27 años. Determinando las

pérdidas de pretensado según el ensayo de reabertura de fisura en un 10%, siendo mucho menores que las pérdidas pronosticadas por el método del PCI (1975) cuando usan las propiedades reales del material (21%).

Naaman A.E. y Hamza A.M. (1993) realizan un estudio paramétrico sobre las pérdidas de pretensado en vigas pretensas con hormigones de altas prestaciones (HPC), por medio del método analítico "*time-step*". Afirman que al aumentar la resistencia del hormigón decrecen las pérdidas diferidas, al variar el tipo de sección transversal del elemento las pérdidas diferidas se ven influenciadas y las pérdidas debido al acortamiento elástico disminuyen al disminuir el nivel de tesado.

Roller et al. (1993; 1995) determinan las pérdidas del pretensado a largo plazo en vigas de hormigón de alta resistencia y diferente régimen de curado. Las pérdidas medidas (22%) fueron significativamente menores (aproximadamente un 50% menos) que las pérdidas de pretensado estimadas por la AASHTO (1992) a 18 meses. Además observan que las medidas de las deformaciones por fluencia y retracción son menores que lo establecido por las normativas, estando de acuerdo con la menor pérdida de pretensado.

Steinberg E.P. (1995) evalúa las pérdidas de pretensado analizando una serie de variables, por medio de un software que incorpora un programa de simulación probabilística proyectando una media de las pérdidas entre 36 y el 41% para los diferentes elementos analizados. Comparándolas con las pérdidas calculadas con el método PCI (1975), siendo estas pérdidas inferiores a las calculadas por el software (16-22%).

Ahlborn T.H. et al. (1995) investigan las pérdidas de pretensado en dos vigas de hormigón de alta resistencia, dando como resultado a 200 días valores consistentes entre los resultados experimentales y los calculados por medio del método de PCI (1975), AASHTO (1993) y Naaman A.E. (1992).

Azizinamini A. et al. (1996) manifiestan que las pérdidas de pretensado después de 25 años de servicio en una viga puente fueron del 20,7%, mientras que las pérdidas calculadas por el método de la AASHTO (1989) son mayores (25.7%) y con el método PCI Design Handbook (1992) el rango de pérdida se encuentra entre 14 y 29%.

Halsey J.T. y Miller R. (1996) utilizaron tres métodos experimentales para calcular las pérdidas de pretensado, obteniendo pérdidas entre el 20 y 34% en vigas de 40 años. El método de la AASTHO (1989) se utilizó para contrastar los datos

experimentales, obteniendo una pérdida del 27%, la cual es suficientemente acertada con los datos experimentales alcanzados.

Pessiki et al. (1996) evaluaron las pérdidas de pretensado en dos vigas puente que se mantuvieron en servicio durante 28 años, obteniendo una pérdida total de pretensado del 18%. Adicionalmente compararon dichas pérdidas con tres normativas (AASHTO (1992), Modified Bureau of Public Roads (BPR), Lehigh) las cuales sobrevaloran las pérdidas en casi un 40%.

Ehsani M.R. et al. (1997) realizaron estudios comparando probetas con armaduras reforzadas con materiales sintéticos con fibra de polímero (FRP) y armaduras de acero, concluyendo que en las primeras etapas de pretensado (90 días), todas las armaduras con FRP muestran mayores pérdidas que las armaduras de acero.

Labia Y et al. (1997) miden las pérdidas de pretensado en vigas cajón de 20 años, por medio de cuatro métodos experimentales obteniendo una media de pérdida de 33%, siendo esta pérdida mayor que las pérdidas de diseño (19%) y las pérdidas obtenidas por cuatro métodos teóricos (ACI (1989), AASHTO (1992), PCI (1975) y Naaman A.E. (1992)).

Mahmoud Z.I. et al. (1999) midieron la pérdida de fuerza en tres diferentes clases de armadura: barras leadline, armaduras reforzadas con fibra de carbono (CFRP) y armaduras de acero. Las pérdidas medidas durante un año son de 21%, 16% y 20%, respectivamente.

Gross S.P. y Burns, N.H. (1999; 2000) realizan una campaña experimental en dos puentes con HPC, calculando las pérdidas de pretensado por medio del método de la AASHTO LRFD (1994) y PCI Design Handbook (1992), siendo estas pérdidas drásticamente mayores que las pérdidas medidas experimentalmente (16-27%), debido a la sobrevaloración del acortamiento elástico y la fluencia.

Huo X. y Tadros M.K. (1999) Realizan un análisis probabilístico en elementos compuestos para estimar las pérdidas de pretensado en varios estados de construcción y servicio del elemento, en los cuales varían el diámetro de la armadura (13-15 mm) y la resistencia del hormigón (34 y 90 MPa). Las pérdidas de pretensado varían entre un 15 y 24.7%. Adicionalmente compara las pérdidas probabilísticas con el método AASHTO (1992), siendo estas similares en HPC.

Shing et al. (2000) midieron las pérdidas del pretensado a 90 días de forma experimental (21%) y por medio del método de la AASHTO (1992), empleando los resultados de la deformación por fluencia medidos experimentalmente y aplicado

una ecuación empírica propuesta por Nilson (1987), obteniendo pérdidas de pretensado del 25 y 34%, respectivamente. Los ensayos se realizaron en vigas cajón con HPC.

Greuel A. et al. (2000) determinaron pérdidas de pretensado alrededor del 18% a 9 meses en vigas cajón con HPC, y comparan estas pérdidas obtenidas experimentalmente con dos normativas (PCI Design Handbook (1999) y AASHTO (1998)), las cuales predicen las pérdidas de pretensado a tiempo infinito entre un 18 y 20%, respectivamente.

Vázquez H. (2000) realizaron estudios en vigas de hormigón convencional y hormigón ligero encontrando que las pérdidas de pretenasado estimadas a los tres meses son del 28% y 30%, respectivamente.

Tadros M.K. et al. (2003); Al-Omaishi et al. (2009) desarrollan un programa experimental y teórico para calcular las pérdidas de pretensado en vigas puente de HPC obteniendo un total de pérdidas del 18.4% de la tensión inicial. Comparan estos resultados experimentales con dos métodos de la AASHTO LRFD (2005) (2007) y el método del PCI Design Manual (1997), siendo el de la AASHTO LRFD (2005) muy conservador, debido a la sobrestimación de la fluencia en HPC. Mientras que la AASHTO LRFD (2007) y el PCI obtienen resultados que se ajustan con los datos experimentales.

Onyemelukwe O.U. et al. (2003) estudian el comportamiento de las deformaciones longitudinales para determinar la variación y distribución de las pérdidas de pretensado en vigas de hormigón pretensado. En todos los casos analizados, la pérdida medida fue inferior a la pérdida calculada por los códigos ACI (1992), PCI Design Handbook (1992) y AASHTO LRFD (1994). Además, la variación de las pérdidas de pretensado no se presenta uniformemente en la sección transversal de la viga, presentándose mayores pérdidas en la parte inferior de la sección, donde la concentración de la armadura es mayor.

Stallings J.M. et al. (2003) estimaron la pérdida total de la tensión inicial en un periodo de 10 meses, estas pérdidas fueron del 22% para vigas de HPC y comparan estos resultados con 2 métodos (AASHTO LRFD (1998) y AASHTO (1996)), estando sobrevalorados estos métodos en un 50%, debido a la sobrestimación de la fluencia y retracción en HPC.

Yang Y. y Myers J.J. (2005) obtienen las pérdidas de pretensado (21%) durante la construcción y los dos primeros años de servicio de un puente de hormigón. Los resultados de esta investigación se comparan con ocho modelos para estimar el total



de las pérdidas de pretensado, entre ellos los modelos de la AASHTO LRFD (1994), el PCI Design Handbook (1999), Gross S.P. (1999) y el NCHRP Report 496 (Tadros M.K. (2003)).

López y Kahn (2007) realizaron ensayos en vigas con hormigón ligero de alta resistencia (55 y 69 Mpa), presentándose pérdidas de pretensado del 14.3 y 9.6%. Estas pérdidas las comparan con 3 normativas (AASHTO LRFD (1998), ACI-209 (1997) y PCI Design Handbook (1998)), encontrando que todas ellas son muy conservadoras y sobreestiman las pérdidas en el tiempo, principalmente las pérdidas por fluencia y retracción por lo menos un 100%.

Hale W.M. y Russell B.W. (2006) determinan las pérdidas de pretensado experimentalmente entre 25.2 y 35.6% y lo comparan con tres métodos (AASHTO LRFD (2004), PCI Design Handbook (1999) y el NCHRP Report 496 (Tadros M.K. (2003)), los cuales difieren en sus resultados pero siempre sobrestimando el total de las pérdidas.

Idriss R.L. y Liang Z. (2006) utilizan un sistema de monitorización por fibra óptica en vigas HPC y calculan las pérdidas de pretensado en el tiempo, comparándolas con tres métodos diferentes (PCI (1975), ACI-ASCE (1979) y AASHTO LRFD (2004)), estando estos métodos sobrestimando las pérdidas entre un 34 y 46% con respecto al método experimental determinado a partir de las deformaciones obtenidas del sistema de sensores. Esta diferencia es atribuible a las bajas propiedades de fluencia de los HPC.

Larson K. et al. (2007) realizan ensayos en vigas de hormigón autocompactante observando pérdidas de pretensado del 20% de la tensión inicial a 144 días y a 2 años del 24%, estos resultados experimentales lo comparan con 4 normativas (AASHTO LRFD (2004), KDTO (2003), PCI Design Handbook (1999) y ACI (2002)), siendo ligeramente menor las pérdidas experimentales. Esencialmente la mayor parte de las pérdidas se deben a la fluencia y el acortamiento elástico.

Youakim S.A. y Karbhari V.M. (2007) presentan un método para estimar las pérdidas de pretensado diferidas en vigas de hormigón con armaduras de FRP, concluyendo que las pérdidas en vigas con armaduras FRP son menores que cuando se utiliza armaduras de acero, debido al bajo módulo de elasticidad de FRP.

Trent J.D. (2007) indica que se experimentan mayores pérdidas de pretensado a largo plazo para hormigones convencionales que en hormigones autocompactantes, esto debido a una posible menor pérdida en retracción y fluencia para HAC que para NC. Además compara estas pérdidas con tres modelos teóricos (PCI Design

Handbook (2004), PCI (1975) y AASHTO LRFD (2006)), presentándose menores pérdidas (10-15%) con respecto a los resultados experimentales.

Dwairi H. M. et al. (2010) obtuvieron pérdidas de pretensado debido al acortamiento elástico, fluencia y retracción del hormigón entre el 13 y 19% de la tensión inicial. En su mayoría las pérdidas de pretensado se deben al acortamiento elástico y la fluencia, siendo la retracción medida muy inferior a la esperada.

Roller J.J. et al. (2011) desarrollan un programa de investigación con el fin de monitorizar cuatro vigas fabricadas con hormigón de alta resistencia y medir las pérdidas de pretensado, comparándolo con los valores determinados empleando la normativa de la AASHTO LRFD (2008). Obtienen una diferencia en las pérdidas alrededor del 40% entre los valores de diseño y los datos experimentales aplicando los métodos refinado y aproximado de esta norma.

De lo anterior y de la Tabla 2.6.2.1 se extraen las siguientes observaciones.

- Se obtuvieron incrementos de pérdida de fuerza que varían desde el 5% a 28 días, al 45% a 360 días.
- El promedio de las pérdidas de pretensado de la bibliografía encontrada fue del 19,5%, aunque existe gran variabilidad en los parámetros utilizados en las experimentaciones como el tiempo de ensayo, la geometría del elemento, rango de resistencias, propiedades del elemento, propiedades de la armadura pretesa, etc.
- Aproximadamente la mitad de las investigaciones anteriormente mencionadas realizan sus experimentaciones tan solo a 3 meses.
- La mayor parte de los autores observan una sobrestimación de las normativas a la hora de valorar las pérdidas de pretensado, excepto Ahlborn T.M. et al (1995), Halsey J.T. y Miller R (1996), Greuel A. et al. (2000), Larson K. (2007) y Trent J.D. (2007) que encuentra resultados similares e incluso entre un 10 y 15% menos con respecto a los resultados experimentales.
- Todos los métodos utilizados en las normativas sobrestiman las pérdidas de pretensado por fluencia y retracción según Tadros M.K. et al. (2003), Idriss R.L. y Liang Z. (2006), López y Kahn (2007) y Al-Omaishi N. et al. (2009).

- Según Gross S.P y Burns, N.H. (1999-200), Kahn y López (2005), Larson K. et al. (2007) y Dwairi H. M. et al. (2010) el acortamiento elástico y la fluencia son la mayor contribución al total de las pérdidas de pretensado.
- El hormigón tradicional (NC) experimenta mayores pérdidas de pretensado que los HAC, esta tendencia puede indicar menor pérdida de fluencia y retracción para HAC que para el NC (Trent J.D. (2007)).
- Los HPC tienden a mostrar menor fluencia y retracción que los hormigones NC (Roller et al. (1995), Gross S.P. (2000), Hou X., Tadros M.K. (2000), Stallings J.M. et al. (2003) e Idriss R.L. y Liang Z. (2006)), reduciéndose así las pérdidas de pretensado. Esto confirma lo dicho por Naaman A.E. y Hamza A.M. (1993), al argumentar que al aumentar la resistencia del hormigón disminuye las pérdidas diferidas.
- Las armaduras con FRP muestran mayores pérdidas que las armaduras de acero Ehsani M.R. et al. (1997), contrario a lo afirmado por Mahmoud Z.I. et al. (1999) y Youakim S.A. y Karbhari V.M. (2007), quienes indican que las pérdidas de pretensado con FRP son menores.

COMPORTAMIENTO ADHERENTE DIFERIDO DE ARMADURAS PRETESAS EN HORMIGÓN

Autores	Pérdida (%)	Tiempo (días)	Diámetro Armadura (mm)	Tipo de armadura	Tipo de hormigón	Normativas	% de pérdida normativas	Observaciones
Podolny W.	25-27	14600 (40 años)	13	Cordón de acero	NC	-	-	- Modelo teórico - Parámetros: Propiedades del elemento, propiedades de la armadura pretesa y la carga en el elemento.
Tadros et al.	30-56	180 693	-	-	NC	-	-	- Modelo teórico - Vigas - Compara resultados experimentales y resultados del procedimiento numérico, mostrando un buen ajuste
Swamy y Anand	30-37 (HAC) 45 (NC)	520-625 360	7 y 13	Cables Brindon y Armaduras Dyform	HCA NC	-	-	- Probetas cuadradas de 100x100mm <sup>2</sup> - Deformaciones medidas con extensometría mecánica (Demec).
Rabbat B.G.	-	9125 (25 años)	-	-	NC	AASTHO PCI	-	- Viga - Ensayo de abertura de grieta - Para medir la abertura se utilizó bandas extensométricas. - La pérdida de fuerza experimental es un 50% de la estimada por las normativas.
Shenoy C.V.	10	9855 (27 años)	11	Cordón de acero	NC	PCI	21	- Viga cajón - Ensayo de abertura de grieta - Para el instante de la abertura de fisura se realizó de manera visual - Pérdidas obtenidas de las propiedades del material.

2. ESTADO DEL ARTE

Autores	Pérdida (%)	Tiempo (días)	Diámetro Armadura (mm)	Tipo de armadura	Tipo de hormigón	Normativas	% de pérdida normativas	Observaciones
Naaman A.E. y Hamza A.M.	14-24 (Viga rectangular) 15-25 (Viga I) 12-20 (Viga cajón) 24-36 (Viga doble T) 24-30(Placa alveolar)	14600 (40 años)	-	Barras Cables Cordones	HPC	-	-	- Modelo teórico - Parámetros: Geometría del elemento, rango de resistencias 41 a 69 Mpa, relación parcial de pretensado de 0.2 a 1, tipo de acero pretensado y resistencia, condiciones medioambientales - Las pérdidas se obtienen en base a datos de referencia.
Roller et al.	22	540	13	Cordón de acero	HPC	AASHTO	26	- Viga T - Ensayos de carga estática más carga de la losa - Deformaciones medidas con Carlson Meters (embebido en el hormigón) y bandas extensométricas.
Steinberg E.P.	36-41	14600 (40 años)	13	Cordón de acero	NC	PCI	16-22	- Modelo teórico - Parámetros: Geometría y propiedades del elemento, propiedades de la armadura pretesa y la carga en el elemento.
Ahlborn et al.	16.8-21.5	200	15	Cordón de acero	HPC	AASHTO PCI Naaman	31 – 31,9 25.4 – 26.3 20.3 – 21.3	- Vigas - Ensayo carga estática - Deformaciones medidas con galgas embebidas en el hormigón VWSG.
Azizinamini et al.	21	9125 (25 años)	11	Cordón de acero	NC	AASHTO PCI	26 14 – 29	- Vigas - Ensayo de abertura de grieta - Para medir la abertura se utilizó: bandas extensométricas, observación y ultrasonido.

COMPORTAMIENTO ADHERENTE DIFERIDO DE ARMADURAS PRETESAS EN HORMIGÓN

Autores	Pérdida (%)	Tiempo (días)	Diámetro Armadura (mm)	Tipo de armadura	Tipo de hormigón	Normativas	% de pérdida normativas	Observaciones
Halsey J.T. y Miller R.	21-27 (1) 20-23 (2) 34 (3)	14600 (40 años)	-	-	NC	AASHTO	27	- Viga T invertida - Ensayo de abertura de grieta (1) - Ensayo de re-abertura de grieta (2) - Ensayo corte de armadura (3) - Para medir la abertura se utilizó: clip banda extensométrica.
Pessiki et al.	18	10220 (28 años)	11	-	-	AASHTO Lehigh BPR	33 32 29	- Vigas - Ensayo de abertura de grieta - Para medir la abertura se utilizó: bandas extensométricas, observación y transductores de desplazamiento LVDTs.
Ehsani et al.	Acero: 4,9 FRP: 12.2 13.8 14.4 17.5 8.4	28 (Acero) 90 (FRP)	9.5 10 10.5 7 8 8.5 9.5	Acero Aramide FRP: Arapree Fibra Technora Carbono FRP: Leadline CFCC	NC	-	-	- Probetas - Ensayo carga estática - Deformaciones medidas con extensometría mecánica (Sistema Whittemore).
Labia Y. et al.	Experimental: 33 Diseño: 19	7300 (20 años)	13	Cordón de acero	NC	ACI AASHTO PCI Naaman	28 25 23 29	- Viga cajón - Ensayo de re-abertura de grieta - Ensayo corte de armadura - Ensayo de peso - Ensayo variación de la deformación de la armadura - Para medir la abertura se utilizó: bandas extensométricas, acelerómetros y transductores de desplazamiento LVDTs.

2. ESTADO DEL ARTE

Autores	Pérdida (%)	Tiempo (días)	Diámetro Armadura (mm)	Tipo de armadura	Tipo de hormigón	Normativas	% de pérdida normativas	Observaciones
Mahmoud et al.	21 16 20	365	8 15 13	CFRP: Leadline CFCC  Acero	NC	-	-	- Vigas - Ensayos de carga estática - Deformaciones medidas con bandas extensométricas y extensometría mecánica (Demec). -Penetración de armadura
Gross y Burns	19 (1) 27 (2) 19 (3)	309-1221	15	Cordón de acero	HPC NC	AASHTO LRFD: Experimental Diseño PCI: Experimental Diseño	(1)-(2)-(3) 29-43-22 34-51-26  19-32-15 26-40-19	- (1) viga U-HPC, (2) viga I-HPC, (3) viga I-NC - Ensayos de carga estática - Deformaciones medidas con galgas embebidas en el hormigón VWSG.
Huo X. y Tadros M.K.	25 (caso1) 15 (caso2) 21 (caso3)	α	13 15	Cordón de acero	NC HPC	AAHSTO	25 (caso1)	-Viga T - Modelo teórico - Caso1: NC, φ:13 Caso2: HPC, φ:13 Caso3: HPC, φ:15
Shing et al.	21	90	15	Cordón de acero	HPC	AAHSTO: - Experimental -Ecuación empírica	34 25	- Viga cajón - Ensayo de carga estática - Deformaciones medidas con extensometría mecánica (Sistema Whittemore).
Greuel et al.	18	180-270	15	Cordón de acero	HPC	AASHTO PCI	20 18	- Viga cajón - Ensayo de abertura de grieta - Para medir la abertura se utilizó clip bandas extensométricas.

COMPORTAMIENTO ADHERENTE DIFERIDO DE ARMADURAS PRETESAS EN HORMIGÓN

Autores	Pérdida (%)	Tiempo (días)	Diámetro Armadura (mm)	Tipo de armadura	Tipo de hormigón	Normativas	% de pérdida normativas	Observaciones
Vázquez H.	18 (NC) 16-20 (HL)	90	15	Cordón de acero	NC HL	-	-	- Vigas - Ensayo de carga estática - Deformaciones medidas con bandas extensométricas y extensometría mecánica (Demec).
Tadros et al. Al-Omaishi N. et al.	18	385-490	13 15	Cordón de acero	HPC	AASHTO LRFD AASHTO LRFD PCI	29 19 20	- Vigas - Ensayos de carga estática más carga de la losa - Deformaciones medidas con galgas embebidas en el hormigón VWSG.
Onyemelukwe et al.	9-13	150	13	Cordón de acero	HPC	ACI-PCI AASHTO LRFD	22,6 23,1	- Vigas - Ensayo carga estática - Deformaciones medidas con galgas embebidas en el hormigón VWSG.
Stallings et al.	22	300	15	Cordón de acero	HPC	AASHTO LRFD AASHTO	40 41	- Vigas - Ensayo de carga estática - Deformaciones medidas con galgas embebidas en el hormigón VWSG.
Yang Y. y Myers J.J.	21 (medido) 31 (diseño)	730	15	Cordón de de acero	HPC	AASHTO LRFD: Time step Diseño Experimental PCI: Diseño Experimental TIME STEP GROSS NCHRP	26 34 32 27 22 23 23 23	- Ensayo en 4 vigas - Monitoreo desde la construcción hasta 2 años después de la puesta en servicio - Deformaciones medidas con galgas embebidas en el hormigón VWSG.



Autores	Pérdida (%)	Tiempo (días)	Diámetro Armadura (mm)	Tipo de armadura	Tipo de hormigón	Normativas	% de pérdida normativas	Observaciones
Kahn y Lopez	14 (55Mpa) 10 (69Mpa)	110 130	15	Cordón de de acero	HPLC	AASHTO LRFD PCI ACI-209	(55Mpa) (69Mpa) 18 17 16 16 21 20	- Vigas - Ensayos de carga estática más carga de la losa - Deformaciones medidas con galgas embebidas en el hormigón VWSG y extensometría mecánica (Demec).
Hale y Russell	25 – 36	365	15	Cordón de acero	HPC	AASHTO LRFD Zia - PCI NCHRP	33 – 40 32 – 41 25 – 35	- Vigas I - Ensayos de carga estática - Deformaciones medidas con extensometría mecánica (Demec).
Idriss y Liang	-	365	-	-	HPC	AASHTO LRFD PCI ACI-ASCE	-	- Viga cajón - Ensayo carga estática más carga de losa y carga viva - Deformaciones medidas con sensores de fibra óptica. -Las normativas sobrestiman las pérdidas entre un 34 y 46%.
Larson et al.	20 24	144 730	-	Cordón de acero	HAC	AASHTO LRFD ACI-PCI KDOT	27 30 27	- Vigas T invertida - Ensayo carga estática - Deformaciones medidas con galgas embebidas en el hormigón VWSG.
Youakim y Karbhari	19 20 13	$\alpha$	-	Acero AFRP CFRP	-	-	-	- Modelo teórico - Vigas - Parámetros: Geometría y propiedades del elemento, propiedades de la armadura pretesa.

COMPORTAMIENTO ADHERENTE DIFERIDO DE ARMADURAS PRETESAS EN HORMIGÓN

Autores	Pérdida (%)	Tiempo (días)	Diámetro Armadura (mm)	Tipo de armadura	Tipo de hormigón	Normativas	% de pérdida normativas	Observaciones
Trent J.D.	(1): 26 (NC) 20 (SCC) (2): 14 (NC) 8 (SCC)	28- 56(NC) 20-65 (SCC)	14	Cordón de acero	NC HAC	PCI PCI AASHTO LRFD	14 9 13	- Vigas - Ensayo de abertura de grieta (1) - Ensayo de re-abertura de grieta (2) - Para medir la abertura se utilizó: bandas extensométricas y observación.
Dwairi et al.	13-19	-	15	Cordón de acero	HPC	-	-	- Vigas - Ensayo carga estática más carga de losa y carga viva - Deformaciones medidas con galgas embebidas en el hormigón VWSG.
Roller J.J. et al.	15	800	15	Cordón de acero	HPC	AASHTO LRFD APROXIMADO: Experimental Diseño AASHTO LRFD REFINADO: Experimental Diseño	16 20 15 20	-Vigas -Ensayo carga estática más carga de losa - Deformaciones medidas con galgas embebidas en el hormigón VWSG.

**Tabla 2.6.2.1.** Aportaciones cronológicas de diferentes autores relativa a las pérdidas de pretensado

NC: hormigón convencional; HCA: hormigón con cemento aluminoso; HPC: hormigón de alto rendimiento; HL: hormigón ligero; HPLC: hormigón ligero de alto rendimiento; HAC: hormigón autocompactante; VWSG: Vibrating-wire strain gauge

### 2.6.3 Técnicas experimentales para determinar las pérdidas de pretensado

Las técnicas experimentales encontradas en la literatura para determinar las pérdidas de pretensado incluyen algunas tipologías (Azizinamini A. et al. (1996), Labia Y. et al. (1997), Baran E. et al. (2005) y Wu C.H. (2011)) que se basan principalmente en:

a) Monitorización de las deformaciones con el tiempo. Esta técnica basada en la medición de las deformaciones en el hormigón o en la armadura, suelen medirse por medio de bandas extensométricas, extensometría mecánica y sensores de fibra óptica (Idriss R.L. y Liang Z. (2006)). Para determinar la tensión en la armadura ( $\sigma$ ) se utiliza la ley de Hooke.

$$\sigma = E \varepsilon$$

Ec. 2.6.3.1

donde:

$E$  = módulo de elasticidad del material (MPa)

$\varepsilon$  = valor de la medida de la deformación (mm).

Las bandas extensométricas pueden ser usadas para medir las deformaciones en el hormigón o en la armadura. Estos son algunos de los autores que trabajan esta técnica: Labia Y. et al. (1997), Mahmoud Z.I. et al. (1999), Gross S.P y Burns, N.H. (1999-2000), Vázquez H. (2000), Tadros M.K. et al. (2003), Stallings J.M. et al. (2003), Larson K. et al. (2007), López y Kahn (2007) y Al-Omaishi et al. (2009).

La extensometría mecánica permite obtener las deformaciones sobre la superficie del hormigón en el mismo nivel del centro de gravedad de la armadura. Swamy R.N. (1975), Ehsani M.R. et al. (1997), Mahmoud Z.I. et al. (1999), Shing P.B. et al. (2000), Vázquez H. (2000), Hale W.M. y Russell B.W. (2006), López y Kahn (2007).

b) Ensayos de carga para determinar el inicio de fisura y/o re-abertura de fisura. La viga es sujeta a una carga suficiente para desarrollar una fisura a flexión. La viga es descargada y como resultado la fisura se cierra nuevamente. Se vuelve a cargar la viga y la carga correspondiente al inicio de la abertura de la fisura a flexión es detectada y el momento en la sección en donde se encuentra la fisura se calcula. Al

inicio de la abertura de fisura, la tensión normal a flexión a la fisura en el extremo de la fibra en el ala inferior es cero. Una vez que la carga correspondiente al inicio de la abertura de fisura es determinada, la tensión a flexión disponible y consecuentemente la fuerza efectiva de pretensado puede ser calculada.

Para detectar la abertura de fisura y la correspondiente carga, se utilizan esto cuatro métodos. El primero es por medio de las lecturas obtenidas de las galgas de deformación instaladas cerca a la grieta, el segundo por medio de la técnica de ultrasonido, el tercero utilizando un transductor de desplazamiento, y por último por medio visual. (Rabbat B.G. (1984), Shenoy C.V. y Frantz G.C. (1991), Azizinamini A. et al. (1996), Pessiki et al. (1996), Halsey J.T. y Miller R. (1996), Labia Y. et al. (1997), Greuel A. et al. (2000) y Trent J.D. (2007)).

c) Corte de la armadura pretensada. Posterior al ensayo de carga última una sección de la armadura es expuesta e instrumentada con una o más galgas de deformación, con el fin de medir el cambio de las deformaciones antes y después de realizar un corte en la armadura (el tramo expuesto requiere una determinación precisa de la longitud para los cálculos y debe disponerse más allá de la longitud de transmisión predicha, de manera que la fuerza de pretensado en esta zona sea la fuerza efectiva de pretensado). Una vez se tiene el promedio de las deformaciones, se utiliza la ecuación 2.6.3.1 con el fin de determinar la tensión efectiva de pretensado. Las pérdidas totales de pretensado que ocurren entre la fabricación del elemento y el momento del corte de la armadura se obtiene como la diferencia entre la tensión inicial de tesado y la tensión efectiva de pretensado en base a el ensayo de corte de la armadura. Esta técnica es usada por Halsey J.T. y Miller R. (1996), y Labia Y. et al. (1997).

d) Ensayo de peso. Antes de realizar el ensayo de corte de la armadura es posible conocer las pérdidas de pretensado relacionando la tensión en la armadura de pretensado con la flecha registrada, debido a cargas conocidas, suspendidas de la armadura en la longitud expuesta (Labia Y. et al. (1997)).

e) Presión lateral. El método se basada en un estudio del estado de tensiones en un orificio de un elemento de hormigón pretensado. En este método, un agujero cilíndrico es perforado en el ala inferior de la viga pretensada (asumiendo que está bajo compresión). El resumen de los pasos que hay que seguir para el desarrollo de esta técnica son:

- Perforar el orificio en la parte inferior del ala de la viga pretensada.
- Realizar una pre-fisura en el agujero, con el fin de que la grieta inicie en la posición deseada y transcurra paralela a luz de la viga.

- Incrementar la presión lateral  $Q$ , sobre un limitado ancho  $W$ .
- Determinar la presión lateral  $Q$ , en el momento justo que la fisura esta completamente cerrada.
- Usando un apropiado factor  $K$ , obtenido del análisis y la presión lateral  $Q$ , correspondiendo al cierre de grieta. La ecuación 2.6.3.2 nos proporciona el valor de  $S$ , correspondiente a la tensión disponible en el extremo de la fibra del ala inferior de la viga pretensada.

$$S = KQ = \gamma Q / \beta$$

Ec. 2.6.3.2

donde:

$S$  = tensión disponible en el extremo de la fibra del ala inferior de la viga pretensada  
 $Q$  = Presión lateral (puede ser conocida aplicando presión sobre un ancho  $W$  y altura  $H$ )  
 $\gamma$  = Factor de concentración asociado con la presión lateral aplicada  
 $\beta$  = factor de concentración de tensión asociado con la tensión disponible a lo largo del ala en las coordenadas específicas

Todas estas técnicas requieren cálculos a partir de los datos de ensayo. El método (a) requiere la instrumentación del elemento durante el hormigonado y este puede ser usado para determinar las pérdidas de pretensado con el tiempo. Los métodos (b) y (c) son ensayos destructivos y solo proporcionan información sobre la tensión de la armadura existente en el momento del ensayo (las pérdidas de pretensado se obtienen frecuentemente a partir de una estimación teórica y no de una medida inicial de la tensión de la armadura pretensada). El método (d) es un ensayo semi-destructivo y requiere una determinación precisa de la longitud expuesta para los cálculos. El método (e) es una técnica no destructiva la cual involucra un apropiado factor para el procedimiento numérico.

#### 2.6.4 Métodos de cálculo de las pérdidas de pretensado

Las pérdidas de pretensado se pueden determinar analíticamente. Sin embargo es limitada la experiencia en determinar las pérdidas de pretensado en hormigones de altas prestaciones. Los métodos de estimación de las pérdidas de pretensado se pueden dividir en tres categorías principalmente, que se enumeran en orden ascendente de complejidad y exactitud (Naaman A.E. (1993) y Tadros et al. (2003)):

- 1) El método aproximado o "*lump-sum*" estima las TPL para el uso de hormigones convencionales, armaduras de baja relajación, niveles de tensión normales y condiciones generales de exposición medioambientales. Las pérdidas de pretensado incluyen las pérdidas por acortamiento elástico del hormigón y las pérdidas diferidas debido a la retracción, fluencia del hormigón y relajación de la armadura.
- 2) El método detallado o refinado determina separadamente cada causa de las pérdidas de pretensado. Estas pérdidas se deducen de ecuaciones que una información básica sobre las propiedades de los materiales y las condiciones medioambientales, pero son razonablemente fáciles de implementar.
- 3) El método "*time-step*" es la técnica más acertada para determinar las pérdidas de diferidas debidas a la relajación de la armadura, fluencia y retracción del hormigón. Sin embargo, esto requiere información precisa las propiedades diferidas de los materiales tal como la deformación por fluencia y retracción. Con el fin de comprender plenamente el método "*time-step*", es esencial darse cuenta de que las pérdidas diferidas también son interdependientes.

Seguidamente se exponen distintos métodos de cálculo de pérdidas de pretensado:

### **PCI Design Handbook (2010)**

La estimación de las pérdidas de pretensado del PCI Design handbook (PCI DH) se basan en las recomendaciones establecidas por Zia et al. Este modelo ofrece ecuaciones para calcular de manera practica y por separado las pérdidas de pretensado (acortamiento elástico, fluencia, retracción y relajación) a termino indefinido. El método sugiere el uso de ecuaciones de las pérdidas de pretensado para aplicaciones prácticas de diseño. El PCI DH recomienda la utilización de otros modelos de pérdidas para el diseño de estructuras especiales.

### **PCI Committee on Prestressed Losses (1975)**

El modelo general del PCI Committee on Prestress Losses (PCI CPL) utiliza un método de cálculo *time-step*. Las pérdidas son divididas en pérdidas instantáneas y pérdidas diferidas.

### **AASHTO Standard (2003)**

Este modelo se basa en las especificaciones de la AASHTO LRFD (2004), permitiendo determinar de modo sencillo y por separado las pérdidas debido al acortamiento elástico del hormigón, retracción, fluencia y relajación de la armadura después del destesado.

### **AASHTO LRFD Specifications (2012)**

Las pérdidas de pretensado se definen de acuerdo a el método AASHTO LRFD Specifications (AASHTO 2012) en pérdidas iniciales debidas al acortamiento elástico y las pérdidas diferidas debido a la fluencia, retracción del hormigón y la relajación de la armadura.

Este modelo incluye dos métodos en el año 2007 para determinar las pérdidas de pretensado. El primero, es un método aproximado el cual se aplica a elementos de hormigón prefabricado que se someten a cargas normales y están expuestas a condiciones ambientales normales. Este método esta restringido a elementos de hormigón de peso normal, de curado húmedo o vapor y fabricado con armaduras de acero de baja o normal relajación. El segundo método depende del tiempo, donde las pérdidas de pretensado son evaluadas con el criterio “*time-step*” para determinar la fuerza efectiva de pretensado en el elemento a cualquier edad.

### **Instrucción de Hormigón Estructural EHE (2008), Código Modelo (2010) y Eurocódigo 2 (2010)**

Los modelos de la EHE (2008), el CM (2010) y el EC-2 (2010) calculan las pérdidas de pretensado de manera similar. Estos modelos tienen en cuenta las pérdidas instantáneas desde el momento de tesar hasta la transferencia de la fuerza de tesado al hormigón y las pérdidas posteriores a la transferencia, denominadas pérdidas diferidas, que se deben esencialmente a la deformación del hormigón por retracción y fluencia, y a la relajación de la armadura. La fluencia del hormigón se calcula en base al coeficiente de fluencia, siendo éste función del tiempo al igual que la deformación por retracción del hormigón. 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. Las pérdidas diferidas de

pretensado se determinan teniendo en cuenta un coeficiente de envejecimiento y se calcula por medio de un método simplificado.



## 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

El desarrollo de este trabajo experimental para el estudio de la influencia de las diferentes variables en el comportamiento adherente diferido del hormigón pretensado se ha diseñado teniendo en cuenta los siguientes condicionantes: a) el capital disponible de la financiación para este proyecto, y b) el espacio disponible en el laboratorio.

Como consecuencia de lo anterior se dispone 6 bastidores de ensayo y de 36 elementos adicionales desmontables (ver Capítulo 4).

Además, los ensayos diferidos se realizarán partiendo de unos parámetros fijados a partir de los resultados de los ensayos instantáneos.

### 3.1 Variables analizadas

Para el desarrollo de este programa experimental se seleccionaron las siguientes variables a estudiar (Tabla 3.1.1):

- El tipo de hormigón, variando sus componentes, la estructura granular y la resistencia.
- La variación de la sección transversal de la probeta y, en consecuencia, la tensión de pretensado aplicada a la probeta.
- La edad a la que se produce la transmisión de la fuerza de pretensado.
- El tipo de destesado.

Estas variables y su previsión de variación para los ensayos se presentan en la Tabla 3.1.1.

Variables	Previsión de variación
Tipo de hormigón	Hormigón tradicional (HT) Hormigón autocompactante (HAC) Hormigón reciclado (HR) Hormigón con fibras (HF)
Sección transversal de probeta	60; 80; 100 mm de lado (sección cuadrada con cordón centrado)
Edad de destesado	6; 12; 24; 48 horas
Velocidad en destesado	Gradual; Súbito

**Tabla 3.1.1** Variables contempladas en el programa experimental

### 3.2 Parámetros fijos del ensayo de adherencia

Para este programa experimental se fijaron los parámetros relativos al tipo y características de la armadura activa y las condiciones de fabricación de las probetas (Tabla 3.2.1).

Parámetros	Valor
Cordón de pretensado	UNE 36094:97 Y 1860 S7 13.0
Condición de superficie del cordón	Limpia (sin óxido)
Fuerza de tesado	$0.75f_{pmáxk}$
Método de compactación	Proporcionada por equipos vibratorios externos VEM 150 (3000 RPM) durante 60 s
Consistencia (para HT, HR y HF)	Blanda – Fluida

**Tabla 3.2.1** Parámetros fijos en el estudio experimental.

La resistencia a compresión del hormigón ( $f_c$ ), se mantuvo fija para cada tipo de hormigón, ya que condicionaba el tiempo para el cual se debía realizar el destesado de la armadura.

La exigencia de una consistencia similar a todos los hormigones y unas condiciones de compactación constante garantizan que se alcanzó una puesta en obra similar y adecuada en todos los hormigones. Únicamente se eliminó la vibración, evidentemente, en los hormigones HAC.

### 3.3 Materiales empleados

A continuación se presentan los diferentes materiales que componen el hormigón y el tipo de armadura utilizada en los ensayos, describiendo sus principales características.

#### 3.3.1 Componentes del hormigón

Para la elaboración de los hormigones correspondientes a este estudio se han utilizado los siguientes materiales:

*Cemento:* CEM I 52.5R – (ASLAND LAFARGE Sagunto).

*Áridos:* Grava 7/12 caliza machacada – (SOINVAL).

Grava 12/20 caliza machacada – (SOINVAL).

Grava 7/12 reciclada – (Planta Tec-Rec. Producto del procesamiento de residuos de hormigón de edificación y de autovías).

Arena 0/4 caliza rodada lavada – (Graveras castellanas).

*Finos adicionales:* Filler calizo – (SOINVAL)  
(*Sólo para los hormigones autocompactantes*).

En la Figura 3.3.1.1 se muestra la granulometría de los componentes del hormigón

*Aditivos:* Superplastificante. Reductor de agua a base de éteres policarboxílicos de última generación (GLENIUM C355).

En la Tabla 3.3.1.1 se encuentran los aditivos utilizados y sus características principales.

*Fibras de acero:* Dramix® RC-80/35-BN (ganchos en los extremos, longitud 35 mm, diámetro 0.45 mm).

En la Figura 3.3.1.1 se presenta la granulometría del cemento, áridos y finos empleados.

Aditivo	Tipo	Función principal	Función secundaria	% de residuo sólido
Glenium C355	Eter policarboxílico	Superplastificante	Acelerador de endurecimiento	20.33
Glenium ACE 32	Eter policarboxílico	Superplastificante	Acelerador de endurecimiento	20.21

Tabla 3.3.1.1 Características principales de los aditivos utilizados en las diferentes dosificaciones.

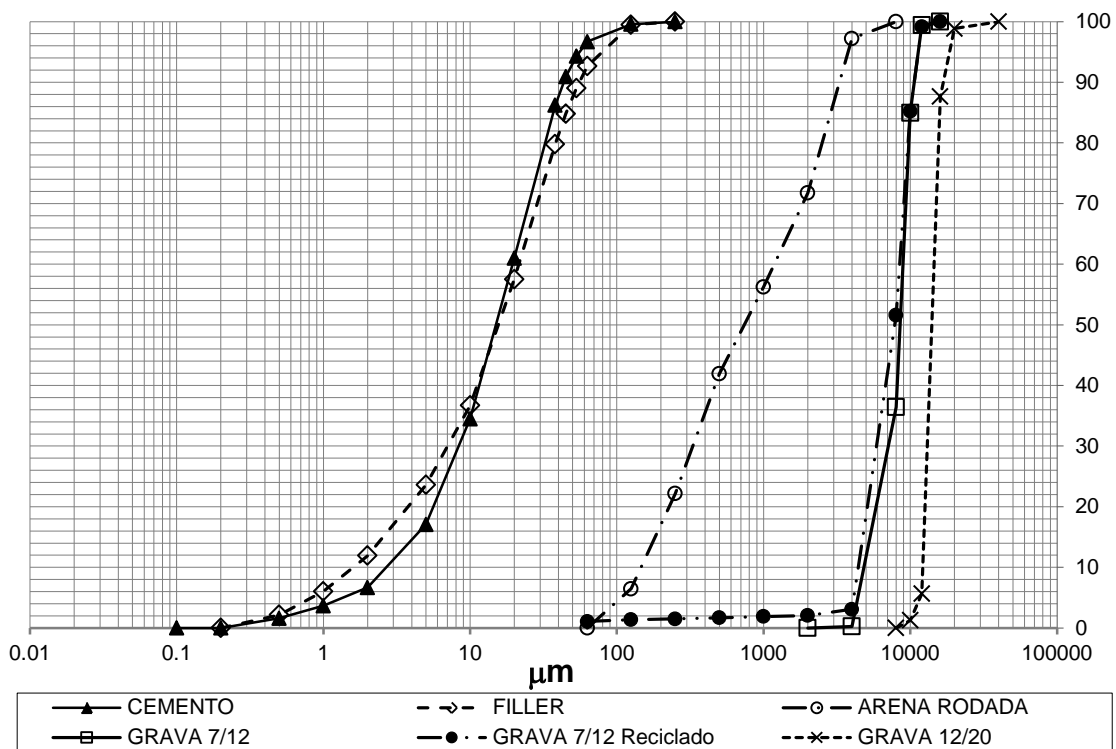


Figura 3.3.1.1 Granulometría cemento, áridos y finos

### 3.3.2 Armaduras

Se han empleado cordones de acero de pretensar UNE 36094:97 Y 1860 S7 13.0 (AENOR 1997), fabricados por Ossen (Maanshan) Steel Wire & Cable Co., LTD. el cordón ensayado corresponde a la colada 0640005947, rollo 80611167007-10, suministradas por el Grupo Prevalesa. Las principales características se han recogido del certificado de calidad del fabricante y se muestra en la Tabla 3.3.2.1.

Sección	100 mm <sup>2</sup>
Peso específico	7.83 g/cm <sup>3</sup>
Carga de rotura	200.3 kN
Límite elástico a 0.2%	189.9 kN
Módulo de elasticidad	203.35 kN/mm <sup>2</sup>
Alargamiento bajo carga máxima	4.70%

**Tabla 3.3.2.1** Características del cordón de pretensar utilizado.

### 3.4 Dosificaciones de los hormigones

Se ha trabajado con cuatro tipos diferentes de hormigones tradicionales, otros cuatro de hormigón autocompactante, dos tipos de hormigón con fibras y finalmente un hormigón reciclado. Sus dosificaciones se presentarán a continuación.

#### 3.4.1 Dosificación del hormigón tradicional

Las dosificaciones fueron escogidas tomando altas resistencias a edades cortas, ya que, como se ha planteado esta investigación, en el ámbito de la industria de la prefabricación de elementos constructivos de hormigón pretensado con armaduras pretensas, es fundamental que alcancen las resistencias necesarias para el destesado lo más rápidamente posible.

Dentro de los hormigones tradicionales se fabricaron tres tipos de hormigón denominados con letras A, B y C.

El hormigón tipo A es un hormigón de altas resistencias, especialmente a corto plazo. Para ello se utilizó una dosificación corroborada en trabajos previos de investigación en ICITECH.

El hormigón tipo B se planteó como un hormigón considerado de alta resistencia, diseñado para que fuese un hormigón más tradicional y se lograra conseguir las resistencias con una menor cantidad de cemento y un aditivo que tuviera una eficiencia de carácter estándar.

El hormigón tipo C es un hormigón con el cual se quería ampliar el campo de hormigones normalmente empleados para pretensado de modo que sus características de dosificación permitieran observar la influencia de una cantidad de aditivo media y relación A/C alta.

Las dosificaciones seleccionadas para el hormigón tradicional se encuentran en la Tabla 3.4.1.1.

Variables\Tipo de Hormigón	HT-A	HT-B	HT-C
Cemento (52,5R) (kg/m <sup>3</sup> )	500	370	400
Agua efectiva (kg/m <sup>3</sup> )	150	165	200
Relación agua/cemento	0.3	0.45	0.5
Aditivo Glenium C355 (%)	-	1.4	0.1
Aditivo Glenium ACE32 (%)	1.7	-	-
Grava (7/12) (kg/m <sup>3</sup> )	993	971	976
Arena rodada (kg/m <sup>3</sup> )	871	859	856

**Tabla 3.4.1.1.** Dosificación hormigón tradicional.

### 3.4.2 Dosificación del hormigón Autocompactante

Se analizaron HAC en los que se realizaron, además de las variaciones en la cantidad de aditivo, modificaciones en su estructura granulométrica, adicionando filler calizo buscando un comportamiento reológico coherente con lo que se pide a un HAC. Se planteo además un HAC sin adición de finos.

La denominación utilizada para estos hormigones es HAC-NF para hormigones autocompactantes sin contenido adicional de filler, y entre los HAC con filler cabe distinguir HAC-LF para un hormigón con bajo contenido en filler (LF), con una cantidad media de filler (MF) y con una cantidad alta de filler (HF).

El contenido de cemento y agua se modificaron para conseguir la resistencia necesaria a la hora de realizar la transmisión del pretensado.

En la Tabla 3.4.2.1 se presentan las dosificaciones elegidas.

Variables\Tipo de Hormigón	HAC-NF	HAC-LF	HAC-MF	HAC-HF
Cemento (52,5R) (kg/m <sup>3</sup> )	370	385	410	425
Agua efectiva (kg/m <sup>3</sup> )	165	165	175	180
Relación agua/cemento	0,45	0.43	0.43	0.42
Aditivo Glenium C355 (%)	1.5	2.88	3	3.5
Grava (7/12) (kg/m <sup>3</sup> )	500	826	488	827
Grava (12/20) (kg/m <sup>3</sup> )	470	-	459	-
Arena rodada (kg/m <sup>3</sup> )	860	876	683	725
Filler (kg/m <sup>3</sup> )	-	85	160	200

**Tabla 3.4.2.1.** Dosificación Hormigón Autocompactante

### 3.4.3 Dosificación del hormigón con fibras

Se ha trabajado un hormigón con adición de fibras, con una dosificación fija de 50 kg/m<sup>3</sup>. La dosificación se ha desarrollado a partir de la dosificación del hormigón tradicional A, obteniendo el valor óptimo para la relación grava-arena a la cantidad de fibras solicitada. La cantidad de aditivo se modificó en función de las exigencias impuestas por el hormigón, para obtener un hormigón de consistencia blando-fluida, evaluada con el ensayo de la consistencia del hormigón (UNE-EN 12350-2).

La dosificación utilizada para el hormigón con fibras de acero (FA para el hormigón procedente del HT tipo A) se encuentra en la Tabla 3.4.3.1.

Variables\Tipo de Hormigón	FA
Cemento (52,5R) (kg/m <sup>3</sup> )	500
Agua efectiva (kg/m <sup>3</sup> )	150
Relación agua/cemento	0.3
Aditivo Glenium ACE32 (%)	2
Grava (7/12) (kg/m <sup>3</sup> )	966
Arena rodada (kg/m <sup>3</sup> )	848
Fibras (kg/m <sup>3</sup> )	50

Tabla 3.4.3.1. Dosificación hormigón con fibras

### 3.4.4 Dosificación del hormigón reciclado

Para esta dosificación se tomó como referencia el hormigón tradicional tipo B y se ajustó sustituyendo el 50% de grava natural por árido reciclado 7/12. Adicionalmente se modificó la cantidad de aditivo hasta conseguir una trabajabilidad óptima por medio del ensayo del cono de Abrams. Dado que se mantiene fija la dosificación de agua total, la cantidad de agua efectiva varió al ser mayor la absorción del árido reciclado.

En la Tabla 3.4.4.1 se encuentra la dosificación para el hormigón reciclado.

Variables\Tipo de Hormigón	HR
Cemento (52,5R) (kg/m <sup>3</sup> )	370
Agua efectiva (kg/m <sup>3</sup> )	138
Relación agua/cemento	0,4
Aditivo Glenium C355 (%)	1.2
Grava (7/12) (kg/m <sup>3</sup> )	485
Grava Reciclada (7/12) (kg/m <sup>3</sup> )	485
Arena rodada (kg/m <sup>3</sup> )	859

**Tabla 3.4.4.1.** Dosificación hormigón reciclado

### 3.5 Ensayos de caracterización del hormigón y sus constituyentes

#### 3.5.1 Ensayos de caracterización de los componentes del hormigón

Para la caracterización de los materiales que componen el hormigón se realizaron los siguientes ensayos.

- Resistencia mecánica de cementos (UNE-EN-196-1)
- Determinación del extracto seco convencional de los aditivos (UNE-EN 480-8)
- Determinación del contenido de agua (h) de los áridos (UNE 83-133-90)
- Determinación de la granulometría de los áridos (UNE-EN 933-1)
- Determinación de la densidad, coeficiente de absorción y contenido en finos arenas y gravas (UNE 83-134/90)

#### 3.5.2 Ensayos de caracterización del hormigón en estado fresco

Los hormigones tradicionales utilizados en este estudio se caracterizaron en su estado fresco mediante el ensayo de determinación de la consistencia del hormigón (UNE-EN 12350-2).

Dado que los HAC en estado fresco poseen propiedades distintas a las de un hormigón tradicional, estas características requieren métodos de ensayos distintos a los tradicionales. Los ensayos normalizados para caracterizar el HAC en este estudio son:

- Ensayo del escurrimiento (UNE 83361:2007)
- Embudo en V (UNE 83364:2007)



### 3.5.3 Ensayos de caracterización del hormigón en estado endurecido

Para este estudio se han realizado una serie de ensayos para caracterizar las propiedades mecánicas del hormigón en estado endurecido:

- Resistencia a compresión en probetas cúbicas y cilíndricas (UNE-EN 12390-3:2003).
- Módulo de deformación (UNE-EN 1352:1997).
- Ensayo de tracción indirecta (UNE-EN 12390-6:2001).

A lo largo de este estudio se han fabricado básicamente dos tipos de probetas, a saber:

- Cilíndricas 150x300 mm
- Cúbicas 100x100x100 mm

Después de la fabricación, unas probetas se conservaron a temperatura ambiente en la nave del laboratorio en la que se conservaron las probetas para ensayos de adherencia, y otras se introdujeron en cámara húmeda a temperatura de conservación de 20° C y humedad relativa del 90% hasta la fecha de rotura.

Una vez alcanzada la consistencia adecuada de las probetas se realizaban los diferentes ensayos al hormigón endurecido, para ello se fabricaron como mínimo dos probetas por tipo de ensayo y modo de conservación, ensayándose en el momento del destesado, a los 28 días y al año (ver tabla 3.5.3.1).

Ensayo	Tipo Probeta	Destesado		28días		1año	
		Cámara Húmeda	Nave	Cámara Húmeda	Almacén	Cámara Húmeda	Almacén
Compresión	Cúbica	2	2	2	2	2	2
	Cilíndrica	-	2	2	2	-	2
Tracción	Cilíndrica	-	2	2	2	-	2
Módulo	Cilíndrica	-	2	2	2	-	2

**Tabla 3.5.3.1.** Cronograma de ensayos de caracterización en estado endurecido.

Ya que la resistencia es el parámetro que nos fija el momento en el que se debe realizar el destesado, para todos los hormigones en cada tanda de ensayo se fabricaban 4 probetas cúbicas, con el fin de conocer la resistencia establecida para cada hormigón y realizar el destesado de la armadura. Adicionalmente para los

demás hormigones, especialmente los hormigones tradicionales A, B, C y los HAC, se realizaron ensayos para caracterizar su comportamiento en estado endurecido.

### 3.6 Caracterización de las propiedades adherentes iniciales

El análisis del comportamiento adherente diferido se realiza partiendo de los parámetros que caracterizan el comportamiento adherente inicial, principalmente la longitud de transmisión ( $L_t$ ), y por ello es imprescindible realizar estudios previos de caracterización a corto plazo. En estos ensayos se ha incluido la determinación de la longitud de anclaje con deslizamiento ( $L_{AS}$ ) y la longitud de anclaje sin deslizamiento ( $L_{AW}$ ) para algunos de los hormigones.

En la Tabla 3.6.1 se indica para cada uno de los tipos de hormigón las variables estudiadas. Se presentan con una X los hormigones en los que se realizaron ensayos de caracterización de las propiedades adherentes iniciales.

Tipo de hormigón	Variables		Caracterización		
	Sección (mm)	Edad de destesado (horas)	$L_t$	$L_{AS}$	$L_{AW}$
HT-A	60	24	x		
	80	24	x		
	100	12	x		
		24	x		
HT-B	60	48	x		
	80	24	x		
		48	x		
	100	24	x	x	x
48		x	x	x	
HT-C	80	48	x		
	100	24	x		
		48	x		
HR	100	48	x	x	x
FA	60	24	x		
HAC-NF	100	48	x	x	x
HAC-LF	100	48	x	x	x
HAC-MF	100	48	x	x	x
HAC-HF	100	48	x	x	x

Tabla 3.6.1. Tipo de probeta y ensayos de caracterización de las propiedades adherentes.

### 3.7 Determinación del comportamiento adherente diferido

El objetivo principal de esta Tesis Doctoral es el estudio del comportamiento adherente diferido de la armadura pretesa en el hormigón. Para ello se estudió la evolución de la longitud de transmisión con el tiempo, por medio del ensayo ECADA+ en series de probetas de diferente longitud adherente, midiendo la evolución de la fuerza soportada por la armadura durante el proceso de ensayo (ver Capítulo 4). Cada serie de probetas se complementa con una probeta de longitud muy superior a la longitud de transmisión para todos los casos (1350 mm) la cual es instrumentada adicionalmente con extensometría mecánica para la medición de la deformación longitudinal del hormigón para su estudio conjunto al de la pérdida de fuerza de la armadura.

En la Tabla 3.7.1 se presentan para los diferentes tipos de hormigón los ensayos que se realizaron para el análisis del comportamiento adherente diferido. Se marca con una X los casos en los que se realizaron ensayos diferidos de la longitud de transmisión ( $L_{td}$ ), los casos en los que se estudió la pérdida de fuerza de la armadura pretesa en el tiempo y los casos en los que se analizó el comportamiento de los perfiles de las deformaciones diferidas.

En el caso del hormigón con fibras (FA) se fabricó con el fin de analizar la influencia de las fibras de acero en el control de la fisuración por hendimiento producida durante la transmisión del pretensado y con el tiempo.

Tipo de hormigón	Variables			Análisis diferido		
	Sección (mm)	Edad de destesado (horas)	Tipo de destesado	$L_{td}$	Pérdida de pretensado	Deformación del hormigón
HT-A	60	24	Gradual		x	x
		48	Gradual		x	x
	80	12	Gradual		x	x
		24	Gradual	x	x	x
	Súbito			x	x	
	100	6	Gradual		x	x
		12	Gradual	x	x	x
			Súbito		x	x
		24	Gradual	x	x	x
	Súbito			x	x	
HT-B	60	48	Gradual		x	x
	80	24	Gradual	x	x	x
		48	Gradual	x	x	x
	100	24	Gradual	x	x	x
		48	Gradual	x	x	x
HT-C	80	48	Gradual	x	x	x
	100	24	Gradual	x	x	x
		48	Gradual	x	x	x
HR	100	48	Gradual		x	x
FA	60	24	Gradual		x	x
HAC-NF	100	48	Gradual		x	x
HAC-LF	100	48	Gradual		x	x
HAC-MF	100	48	Gradual		x	x
HAC-HF	100	48	Gradual		x	x

Tabla 3.7.1 Ensayos comportamiento adherente diferido

### 3.8 Programa de ensayos

En una primera fase de ensayos se buscó caracterizar las propiedades adherentes iniciales. Las longitudes ensayadas eran planificadas en función de los resultados, por lo que el programa de ensayos iba actualizándose de forma continua.

La experimentación de los ensayos iniciales se ha organizado en tandas, cada tanda está compuesta como máximo por seis probetas dispuestas en los bastidores, formando series por tipo y variables del hormigón. En algunos casos con la intención de verificar la repetitividad del ensayo y según los resultados obtenidos durante el ensayo, se realizaron varias tandas para una misma dosificación.

En la segunda fase de ensayos se determinó el comportamiento adherente diferido en donde al igual que en la primera fase se realizaron series por tipo y variables del

hormigón. Dado que se conocían las longitudes de transmisión para los diferentes hormigones, a partir de los resultados de la fase anterior o de estudios previos (Arbeláez (2006)), se realizan tandas de ensayo buscando probetas con longitud adherente 50 mm menor que la longitud de transmisión, probetas de longitud adherente igual y superior a la longitud de transmisión, hasta un máximo de 1350 mm. De este modo, para la primera tanda se parte de unos valores iniciales de las variables de estudio contempladas, fijando posteriormente los valores de las variables a estudiar para cada tipo de hormigón.

Las probetas de mayor longitud 1350 mm y prismas de 100 x 100 x 620 mm<sup>3</sup> que se fabricaron con y sin armadura, especialmente fabricados para medir la retracción del hormigón, fueron instrumentadas con extensometría mecánica para la medición diferida de las deformaciones longitudinales del hormigón.

El desarrollo del programa experimental se ha llevado a cabo en 72 tandas para un total de 295 probetas. Para ello se realizaron 120 amasadas de 55 litros, realizándose una o dos amasadas como mínimo por tanda dependiendo de las necesidades de hormigón para obtener probetas destinadas a ensayos de caracterización.

El tipo de probeta ensayada, las longitudes adherentes de las probetas para las diferentes fases en la que se desarrollaron los ensayos y el número de serie, están expresadas en la Tabla 3.8.1.

La designación utilizada para cada probeta o serie es: T-D-P-I, donde:

T es el tipo de hormigón

D es el lado de la sección transversal de la probeta (60, 80 ó 100 mm)

P es la edad en horas de la transferencia del pretensado (6, 12, 24 ó 48 horas)

I es un identificador para las probetas

I = LS para probetas largas (1350 mm)

I = LS-FA para probetas largas con destesado súbito

I = Longitud de probeta en mm, para probetas cortas (menores que 1350 mm)

A modo de ejemplo para una serie HT-A-100-24: Hormigón tradicional A, sección transversal de 100 mm lado y edad de destesado a 24 horas.

A modo de ejemplo para una probeta corta HT-A-100-24-600: Hormigón tradicional A, sección transversal de 100 mm lado, edad de destesado a 24 horas y longitud adherente de 600 mm.

A modo de ejemplo para una probeta larga HT-A-100-24-LS: Hormigón tradicional A, sección transversal de 100 mm lado, edad de destesado a 24 horas y probeta larga con longitud adherente de 1350 mm.

Tipo de probeta	Longitud adherente (mm)		Serie
	Ensayos instantáneo	Ensayos diferido	
HT-A-60-24	300 / 450 / 600 / 950	1350	1
HT-A-60-48	300 / 500 / 550	1350	2
HT-A-80-12-LS		1350	3
HT-A-80-24	50 / 100 / 150 / 200 / 250 / 300 / 350 / 400 / 450 / 600 / 600	500 / 550 / 600 / 650 / 700 / 750 / 1350	4
HT-A-80-24-LS-FA		1350	5
HT-A-100-6-LS		1350	6
HT-A-100-12	300 / 400 / 500 / 500 / 550 / 600 / 600 / 750 / 750 / 750 / 750 / 750 / 750	650 / 700 / 750 / 1350	7
HT-A-100-12-LS-FA		1350	8
HT-A-100-24	50 / 100 / 100 / 150 / 150 / 200 / 200 / 250 / 250 / 300 / 300 / 300 / 350 / 400 / 550 / 550 / 600 / 600	450 / 500 / 550 / 600 / 650 / 700 / 1350	9
HT-A-100-24-LS-FA		1350	10
HT-B-60-48	300 / 300 / 350 / 400 / 450 / 500 / 500 / 500 / 550 / 550 / 550 / 600 / 600 / 650 / 950 / 1000 / 1350 / 1350	1350	1
HT-B-80-24	500 / 650	550 / 600 / 650 / 700 / 750 / 800 / 1350	2
HT-B-80-48	300 / 500 / 550 / 600 / 950 / 1000	450 / 500 / 550 / 600 / 650 / 700 / 1350	3
HT-B-100-24	300 / 550 / 600 / 650 / 700 / 750 / 800 / 850 / 900 / 600 / 650 / 750 / 800	600 / 650 / 700 / 750 / 1350	4
HT-B-100-48	300 / 400 / 450 / 500 / 550 / 550 / 550 / 550 / 600 / 600 / 600 / 600 / 650 / 650 / 700 / 750 / 750 / 750 / 800	650 / 700 / 750 / 800 / 1350	5
HT-C-80-48	550 / 600 / 650 / 800 / 850 / 850 / 900 / 950 / 950	800 / 900 / 1350	1
HT-C-100-24	600 / 600 / 600 / 650 / 650 / 650 / 700 / 700 / 700 / 700 / 750 / 750 / 750 / 750 / 800 / 800 / 800 / 800 / 1350 / 1350 / 1350	600 / 650 / 1350	2
HT-C-100-48	550	600 / 650 / 700 / 750 / 1350	3

Tipo de probeta	Longitud adherente probeta (mm)		Serie
	Ensayos instantáneo	Ensayos diferido	
HR-100-48	500 / 500 / 550 / 550 / 600 / 600 / 650 / 650 / 700 / 700 / 750	1350	1
FA-60-24	300 / 450 / 600	1350	1
HAC-NF-100-48	550 / 600 / 600 / 600 / 600 / 650 / 650 / 650 / 650 / 700 / 700 / 700 / 700 / 750 / 750 / 750 / 750 / 800 / 800 / 800 / 800 / 850 / 850	1350	1
HAC-LF-100-48	550 / 600 / 650 / 650 / 700 / 700 / 750 / 800 / 800 / 850 / 900 / 950	1350	1
HAC-MF-100-48	550 / 600 / 600 / 600 / 650 / 650 / 650 / 700 / 700 / 750 / 800 / 800 / 850 / 900 / 900 / 950 / 1000 / 1050	1350	1
HAC-HF-100-48	500 / 550 / 600 / 600 / 650 / 650 / 650 / 700 / 700 / 700 / 750 / 750 / 750 / 800 / 850 / 850 / 900 / 900	1350	1

**Tabla 3.8.1.** Longitudes adherentes por tipo de probeta y tipo de ensayo.

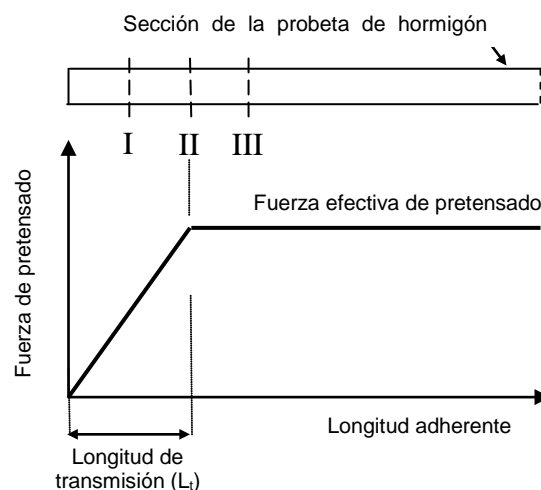
(Esta página se ha dejado intencionalmente en blanco)



## 4. METODOLOGÍA DE ENSAYO (ECADA+)

Teniendo en cuenta que la definición de la longitud de transmisión se basa en la tensión (o fuerza) que transmite la armadura al hormigón (ACI-318 (2011) y Código Modelo (2010)), algunas metodologías mencionadas en el Capítulo 2 (medición de las deformaciones en la superficie del hormigón y medición del deslizamiento de la armadura) consisten en una determinación indirecta de la longitud de transmisión ( $L_t$ ).

Por ello, como se ilustra en la Figura 4.1, se ha propuesto la medición directa de la fuerza de pretensado en diferentes secciones de un elemento de hormigón, siendo esta la base del procedimiento de ensayo para determinar la  $L_t$  de acuerdo con el método de ensayo ECADA (Martí (2002)). Así, el ensayo propone reproducir la situación de transmisión del pretensado en uno de los extremos de la probeta, sustituyendo para ello parte de la probeta por un sistema de Anclaje – Medida – Acceso (AMA). Los resultados después de la transmisión del pretensado dependen de la longitud adherente de la probeta, como se muestra a continuación (ver Figura 4.1): el caso I corresponde a una longitud adherente de probeta menor que la  $L_t$ , el caso II corresponde a una longitud adherente de probeta igual que la  $L_t$ , y el caso III corresponde a una longitud adherente de probeta mayor que la  $L_t$ .



**Figura 4.1.** Idealización de secciones de probeta para reproducir el método de ensayo ECADA

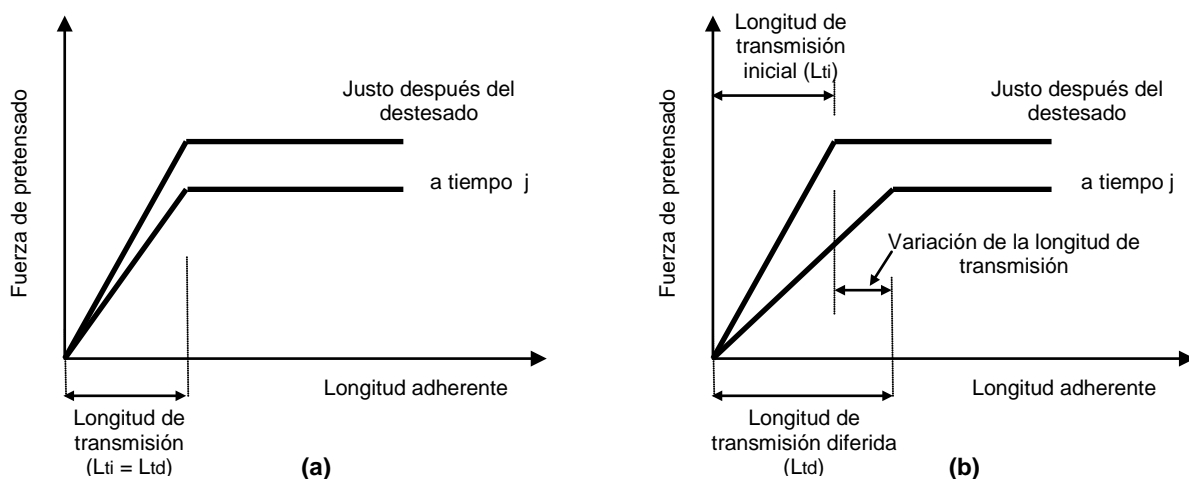
En esta Tesis, el método de ensayo ECADA+ se ha desarrollado como una versión revisada y mejorada del método de ensayo original ECADA, ya que nos permite medir la longitud de transmisión a largo plazo en elementos de hormigón pretensado.

A continuación se presenta los fundamentos del método de ensayo, una breve descripción del equipo de ensayo y la instrumentación utilizada, exponiendo las etapas del procedimiento operativo, los requerimientos y la comprobación del sistema AMA y finalmente los criterios de interpretación de los resultados.

#### 4.1 Fundamentos del método de ensayo

Uno de los objetivos de esta Tesis Doctoral es adecuar la configuración del ensayo garantizando la aplicación de la fuerza de pretensado durante un largo periodo de tiempo en uno de los extremos de la probeta, permitiendo la variación de la tensión de la armadura y de la deformación longitudinal del hormigón, para su posterior medición en el tiempo.

La Figura 4.1.1 ilustra la idealización de las variaciones esperadas de tensión de la armadura pretesa tras el destesado, presentándose dos posibilidades: a) la longitud de transmisión del elemento pretensado no sufre cambios con el tiempo y b) la longitud de transmisión varía con el tiempo.



**Figura 4.1.1.** Idealización de la variación de tensión de la armadura pretesa tras el destesado (a) sin variación de  $L_t$  y (b) variando  $L_t$  con el tiempo.

Con esta idea, el propósito de este método se basa en fabricar series de probetas de diferente longitud adherente y analizar a lo largo del tiempo los perfiles de tensión en la zona en la que la tensión de la armadura es constante (meseta), en un extremo de la probeta de hormigón pretensado.

La precisión para determinar la longitud de transmisión, dependerá de la secuencia de longitudes adherentes de las probetas pretensadas ensayadas.

## 4.2 Descripción del dispositivo de ensayo ECADA+

Para la realización del ensayo se necesitó un equipo compuesto por los elementos ilustrados en la Figura 4.2.1. Posteriormente se procede a la descripción de los diferentes elementos del equipamiento.

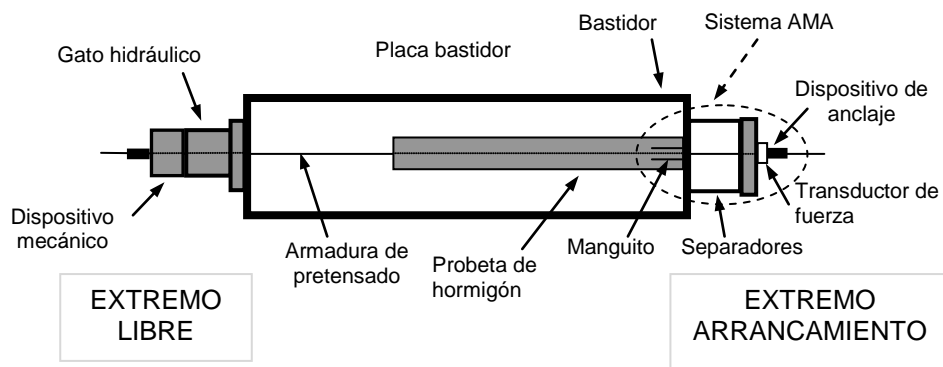


Figura 4.2.1. Esquema general del equipo utilizado.

- Bastidor

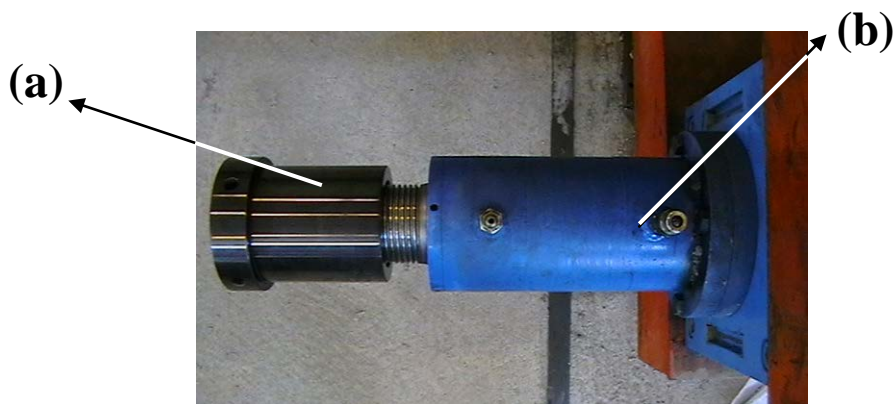
Su principal función es servir de bancada de pretensado; está formado por cuatro largueros de perfil tubular y unidos en cada extremo por placas (Fotografía 4.2.1), en las cuales se acopla el sistema hidráulico, y alojan en su centro un orificio pasante para el enfilar de la armadura.



**Fotografía 4.2.1.** Vista general de los bastidores del ensayo

- Actuador para tesado-destesado

Compuesto por un conjunto rosca-tuerca de accionamiento manual y un gato hidráulico para operación de tesado y destesado (Fotografía 4.2.2). Se ubica junto a la placa de bastidor situado en el extremo por el que se realiza la transmisión de la fuerza de pretensado (extremo de transmisión).

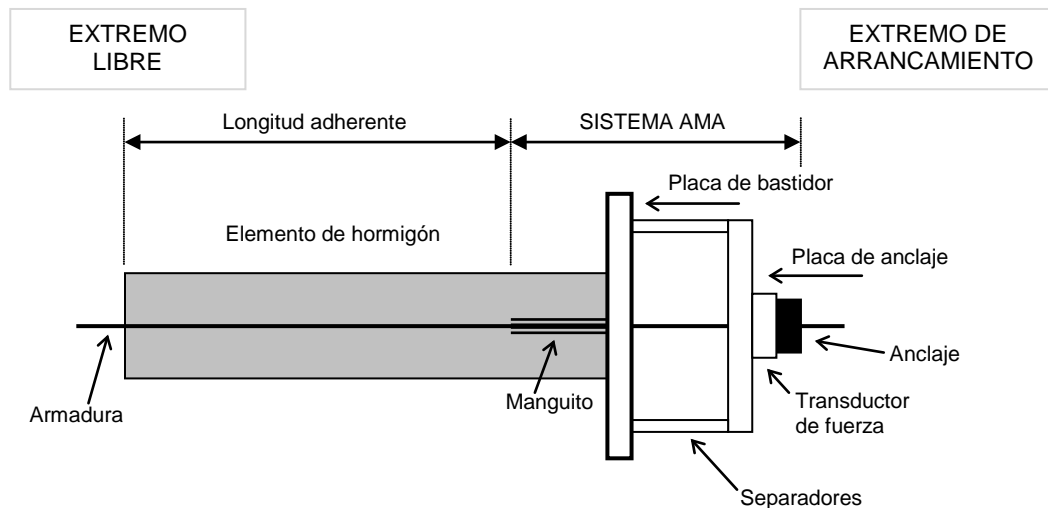


**Fotografía 4.2.2.** Dispositivo mecánico de aproximación. **(a)** Rosca-tuerca. **(b)** Gato hidráulico.

- Sistema AMA

El sistema AMA (Anclaje – Medida – Acceso) es el que permite realizar la operación de almacenamiento y medida de las probetas para ensayos diferidos, y por otro lado permite realizar la operación de arrancamiento de la armadura. El sistema AMA tiene una rigidez ligeramente superior a la rigidez seccional del elemento a ensayar. Se encuentra formado por un tramo no adherido (120 mm) en la parte extrema de la probeta (manguito), la placa de bastidor y una placa de anclaje con dos separadores

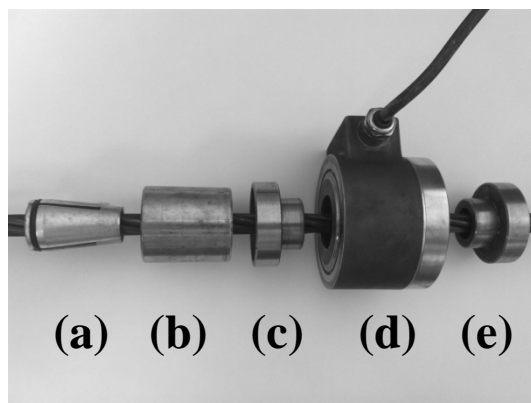
que se apoyan en la placa de bastidor por medio de dos ranuras verticales en el extremo de arrancamiento (Figura 4.2.2). Incluye un dispositivo de anclaje que incorpora un transductor de fuerza. Cabe recordar que de estas placas y transductores de fuerza se tienen un total de 42 piezas de las cuales 36 de ellas serán utilizadas para los ensayos diferidos.



**Figura 4.2.2.** Esquema del sistema AMA.

- Dispositivos de anclaje

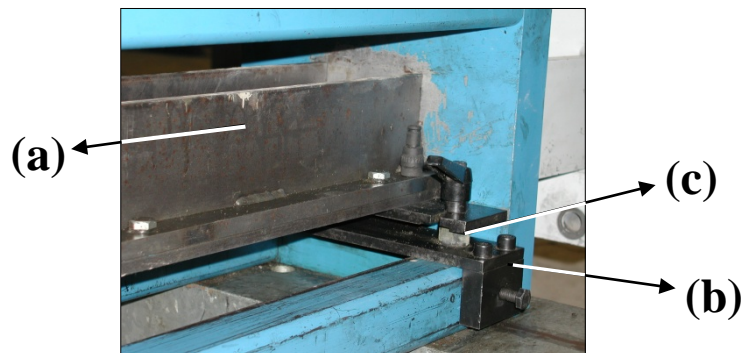
Su función es el centrado y anclaje de la armadura. Estos procedimientos de la armadura se garantizan mediante la disposición secuencial de los siguientes elementos: (a) cuña, (b) casquillo, (c) elemento de centrado, (d) transductor de fuerza anular y (e) un suplemento para apoyo de transductor (Fotografía 4.2.3).



**Fotografía 4.2.3.** Dispositivos de anclaje

- Molde y apoyos desplazables

El molde para la fabricación de las probetas está compuesto por una base, dos laterales y un tope de cierre con orificio central para el paso de la armadura. Se apoya sobre bases desplazables que incorporan dispositivos de fijación al bastidor y elementos que permiten su vibración (Fotografía 4.2.4). Se dispone de moldes para probetas con sección 100x100 mm<sup>2</sup>, 80x80 mm<sup>2</sup> y 60x60 mm<sup>2</sup>.



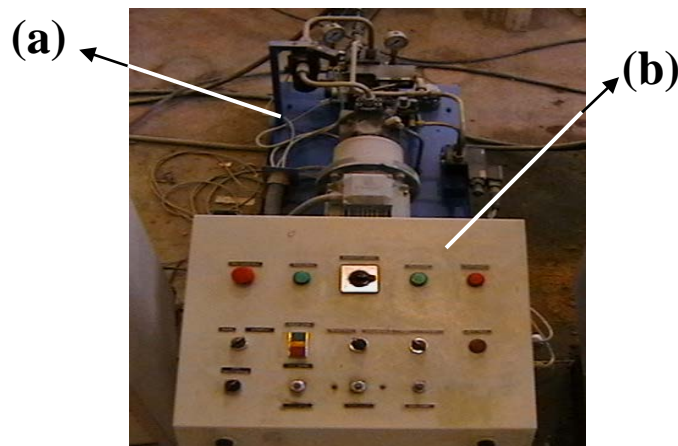
**Fotografía 4.2.4.** (a) Molde, (b) apoyo desplazable y (c) elementos para vibración.

- Actuador para arrancamiento

Se trata de un *actuador hidráulico* montado sobre un soporte desplazable (Figura 4.2.5). Se acopla al bastidor en el extremo de arrancamiento. Se dispone de un *equipo de presión* compuesto por una válvula de presión proporcional, una bomba y una válvula de caudal constante (Fotografía 4.2.6). Un *sistema de control* eléctrico sirve como interfase con la tarjeta de adquisición de datos.



**Fotografía 4.2.5.** Gato hidráulico para operación de arrancamiento. (a) Gato hidráulico. (b) Placa de empuje. (c) Varilla de tracción. (d) Elementos de apoyo. (e) Soporte desplazable.



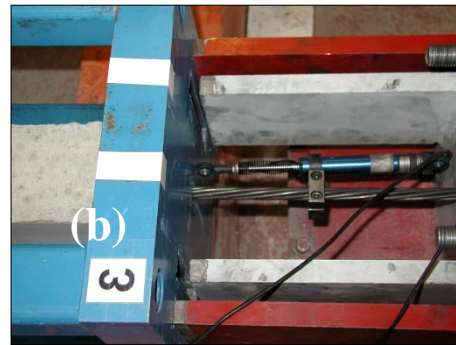
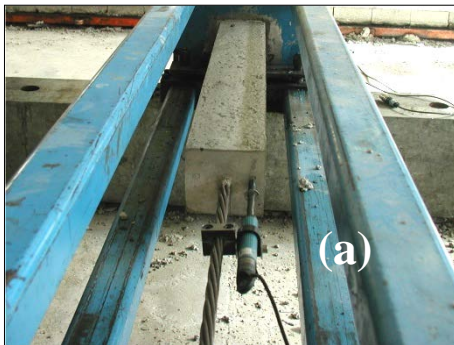
**Fotografía 4.2.6.** Equipo de presión  
**(a)** Equipo de presión. **(b)** Sistema de control.

### 4.3 Instrumentación adicional

Conjuntamente con los elementos anteriormente dichos, necesarios para la realización del ensayo, se incluyen varios dispositivos que facilitan ampliar la información durante el ensayo y son necesarios para la adquisición de los datos. Estos dispositivos al ser externos no alteran el fenómeno de adherencia y son los siguientes:

- *Sistema informático.* Para la toma automática de mediciones en tiempo real se ha configurado un sistema de adquisición de datos compuesto por un PC y una tarjeta de adquisición de datos de 16 canales, implementando con el software CEAD elaborado por Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH) de la Universidad Politécnica de Valencia.
- *Captadores de desplazamiento.* Para medir el deslizamiento relativo de la armadura respecto al hormigón. Estos captadores se pueden ubicar tanto en el extremo de transmisión o extremo libre de la probeta como en el extremo de arrancamiento (Fotografía 4.3.7). Son transductores potenciométricos de desplazamiento lineal Modelo SLS190/50/2K/L50/01 marca PENNY & GILES.
- *Células de carga.* Se emplearon transductores de fuerza tipo C6A marca HBM para medir la fuerza en el sistema AMA.
- *Medición de presión.* Para la medición de presión en el sistema hidráulico se empleó un captador de presión de tipo Druck PDCR 4000.

- *Equipos de compactación.* Para la compactación del hormigón se utilizaron equipos tipo Enarco VEM60, los cuales se acoplaban en la cara inferior de los moldes.
- *Discos de extensometría mecánica.* Discos pegados a la superficie del hormigón (caras laterales) con una distancia entre si de 50 mm, para medir el acortamiento longitudinal del hormigón (Fotografía 4.3.8 (a)).
- *Demec (Mechanical Strain Gauge).* Equipo de medición de la deformación longitudinal del hormigón con precisión de una micra. Modelo ID-C112MB marca Mitutoyo Corporation (Fotografía 4.3.8 (b)).
- *Micrómetros.* Instrumento de medición lineal ubicado en la zona de transmisión y en algunos casos en la zona de arrancamiento para los ensayos diferidos. Indicador de carátula marca Mitutoyo modelo 2118S-10 (Fotografía 4.3.9 (b)).
- *Amplificador de frecuencia.* Equipo de medición móvil para conectar a los transductores de fuerza. Marca HBM modelo MVD2555 (Fotografía 4.3.9 (a)).



**Fotografía 4.3.7.** Captadores de desplazamiento. **(a)** En extremo de transmisión. **(b)** En extremo de arrancamiento.



**Fotografía 4.3.8.** **(a)** Discos de extensometría mecánica. **(b)** Equipo de medición DEMEC.

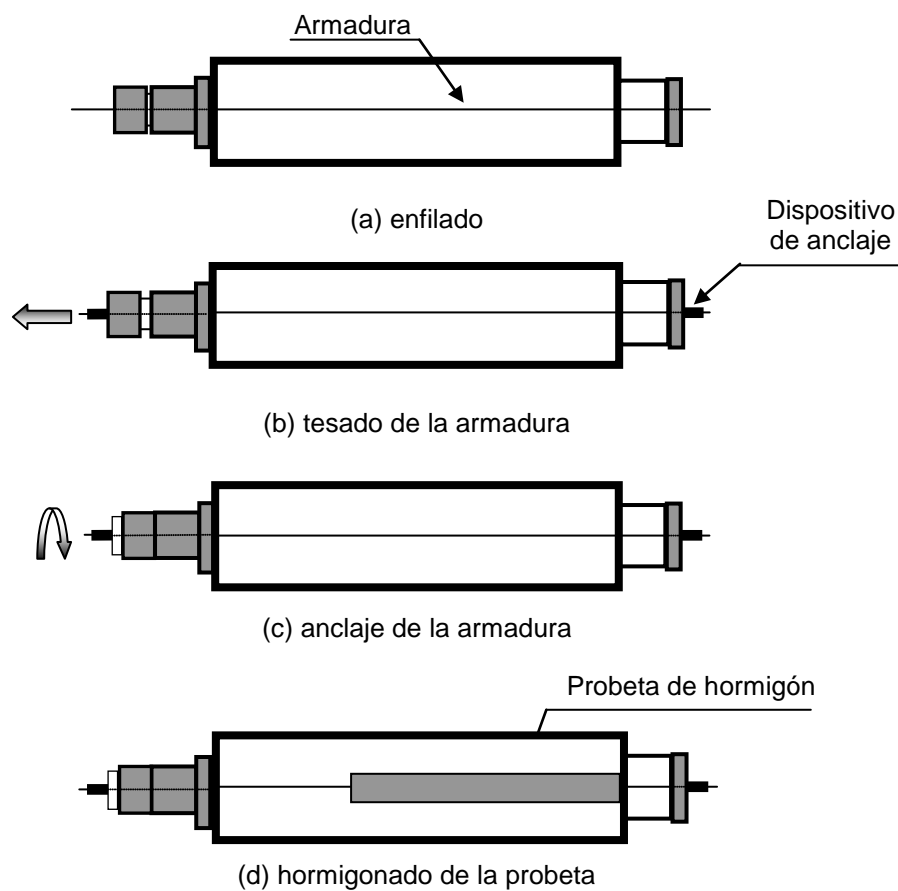




Fotografía 4.3.9. (a) Amplificador de frecuencia. (b) Micrómetro.

#### 4.4 Procedimiento operativo

Con el equipamiento montado como se muestra en la Fotografía 4.2.1, las diferentes fases del procedimiento operativo del ensayo se describen a continuación (Figura 4.4.1):



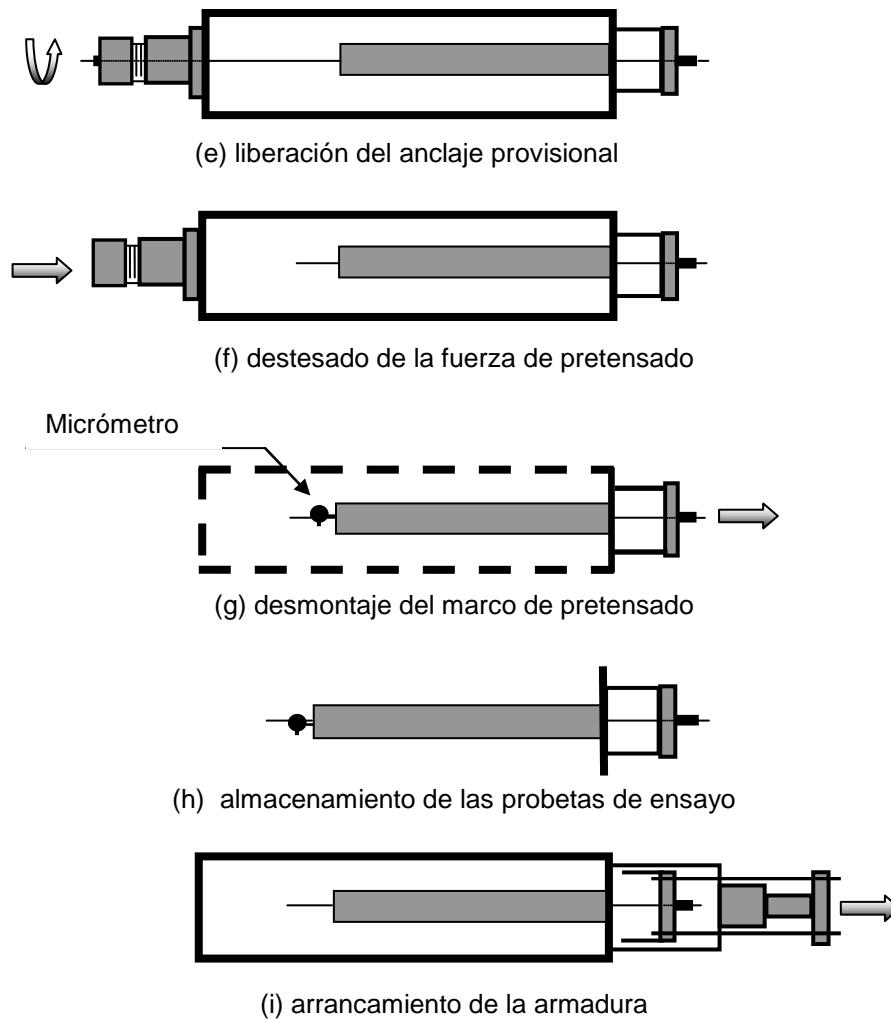


Figura 4.4.1. Esquema en planta de las fases del ensayo ECADA

#### 4.4.1 Etapa de preparación

- Ajuste de la calibración de células de carga

Las 42 células utilizadas en sistema AMA se calibraron para obtener mayor precisión y fiabilidad en los resultados a la hora de realizar los ensayos. La calibración consistió en aplicar presión de manera gradual por medio de una prensa hidráulica a la célula de carga y una célula patrón de mayor precisión, estando estas dos totalmente alineadas. Una vez terminado este proceso se observaba si había alguna desviación de la célula de carga con respecto a la célula patrón. Si había, se ajustaban los valores de calibración de fábrica y se volvía a cargar hasta que

estuviera totalmente calibrada, y si no, se dejaba con los valores de calibración de fábrica.

- Fase de enfilado, tesado y anclaje provisional

Se comienza enfilando la armadura a través de los orificios pasantes del dispositivo mecánico, las placas del bastidor y la placa de anclaje (Figura 4.4.1 (a)). A continuación se colocan los dispositivos de anclaje en los extremos de la armadura y luego se ajusta la longitud de la probeta que se quiera ensayar colocando el tope metálico en el molde. Se procede a conectar los dispositivos de medición a la tarjeta de adquisición de datos.

Por medio del software CEAD se ordena al sistema hidráulico aumentar la tensión en la armadura hasta una fuerza un 10% superior a la fuerza de tesado, manteniéndose durante 2 minutos e inmediatamente se lleva al nivel de tesado ( $P_H$ ) (Figura 4.4.1 (b)). Esto se realiza con el fin de disminuir las pérdidas por relajación de la armadura. Posteriormente se acciona manualmente el dispositivo mecánico de aproximación hasta que se junte con el gato hidráulico en el extremo de transmisión, para luego ajustar los dispositivos de anclaje y realizar la descarga del sistema hidráulico (Figura 4.4.1 (c)).

Una vez se ha finalizado el tesado se toma medida de la célula de carga con el amplificador de frecuencia y se coloca en la zona de arrancamiento el manguito junto a la placa del bastidor para evitar la adherencia entre el hormigón y la armadura, completando así el sistema AMA. Por último se ajusta el sistema de vibración para compactar el hormigón.

- Fase de hormigonado

Para la fabricación del hormigón se realiza primero la medición de la humedad de los áridos para ajustar las dosificaciones de los materiales que componen el hormigón. Se procede a fabricar el hormigón siguiendo esta secuencia:

Minuto 0	Se introduce la arena y la grava.
Minuto 2	Se añade el cemento.
Minuto 4	Vertido del agua durante 1 minuto.
Minuto 6	Se agrega el aditivo durante 1 minuto.
Minuto 15	Fin de amasado y determinación de la consistencia mediante el cono de Abrams.

Una vez amasado el hormigón se procede al vertido de este mismo en el molde preparado en el bastidor (Figura 4.4.1 (d), Fotografía 4.4.1.1) garantizando su compactación por medio del equipo de vibración. Posteriormente el elemento de hormigón es curado y se mantiene en condiciones previstas de conservación hasta alcanzar la resistencia deseada. Se fabricaron simultáneamente las probetas de control.

Una vez ha transcurrido el tiempo fijado para la realización del ensayo se desmoldea tanto las probetas de caracterización como las probetas del ensayo. Para las probetas instrumentadas con discos de extensometría se toman una lectura inicial, siendo ésta la base para la medida de deformación longitudinal del hormigón.



Fotografía 4.4.1.1. Hormigonado de la probeta.

#### 4.4.2 Etapa ensayo inicial

- Liberación del anclaje provisional

Una vez conectados los dispositivos adicionales de medición, los cuales van conectados a la tarjeta de adquisición de datos para la toma de lecturas, se toma medida de la célula de carga con el amplificador de frecuencia y se procede en el extremo de transmisión a la aplicación de presión del sistema hidráulico hasta una fuerza ligeramente inferior a la fuerza actual de la armadura ( $P_0$ ) para liberar la fuerza soportada por el dispositivo mecánico recogiendo la tuerca del mismo (Figura 4.4.1 (e)).

- Fase de destesado

A continuación, se descarga la fuerza a una velocidad controlada (gradual o súbita), efectuando así la transmisión del pretensado al hormigón (Figura 4.4.1 (f)), durante este proceso la fuerza transmitida es registrada mediante el transductor de fuerza ubicado en el extremo del sistema AMA. La fuerza de pretensado inicial alcanzada ( $P_i$ ) en el sistema AMA se mide inmediatamente con el amplificador. A continuación se retira el sistema de anclaje de la armadura en el extremo de transmisión permitiendo de esta manera cortar una parte del cordón de la zona de transmisión para poder realizar la fase de desmontaje y tener un movimiento libre del cordón durante el proceso de arrancamiento, si es el caso.

Las probetas instrumentadas con extensometría mecánica son objeto de una segunda medición inmediatamente cuando se finaliza esta fase.

- Fase de estabilización y medida de la fuerza de pretensado

Esta fase comprende desde el momento final del destesado hasta el comienzo del arrancamiento para ensayos instantáneos. En el caso de los ensayos diferidos comprende desde el instante final del destesado hasta el inicio del desmontaje de las probetas como se explica más adelante. Esta fase se realiza con la intención de esperar un tiempo para que se produzcan los deslizamientos y deformaciones consideradas instantáneas, y será de un periodo aproximado de 2 horas. Para una probeta con una longitud adherente mayor o igual que la longitud de transmisión el valor de la fuerza transmitida ( $P_i$ ) será la fuerza efectiva de pretensado ( $P_{IE}$ ).

- Fase de Arrancamiento

Como se mencionó anteriormente esta fase se realizó para los ensayos instantáneos y su proceso es el siguiente: con el gato hidráulico acoplado al extremo de arrancamiento del bastidor, se procede a aumentar la fuerza en la armadura tirando de la placa de anclaje del sistema AMA, hasta producir el deslizamiento ( $>0,1$  mm) de la armadura en el extremo de transmisión, su rotura o el fallo del hormigón por hendimiento (Figura 4.4.1 (i)). Esta fase se aplicó al final del ensayo diferido.

#### 4.4.3 Etapa ensayo diferido

- Fase de desmontaje del marco de pretensado

La armadura de pretensado se corta en la zona de transmisión quedando el extremo libre, para posteriormente poder instalar los dispositivos de medida de desplazamiento (micrómetros) apoyados uno sobre la testa de la probeta y otro en el extremo de arrancamiento apoyado en la placa del bastidor. Una vez se tiene instrumentada la probeta, se realiza el desmontaje de la misma junto al sistema AMA, desatornillando la placa de anclaje sujeta a los cuatro largueros del bastidor que se encuentran descargados (Figura 4.4.1 (g)), quedando la probeta apoyada sobre la placa del bastidor y permaneciendo la fuerza de pretensado en el tiempo.

- Almacenamiento de las probetas de ensayo

Todo el sistema se traslada al lugar dispuesto para su almacenamiento donde estarán bajo condiciones de conservación controladas ( $T=20^{\circ}\text{C}$  y  $\text{HR}=60\%$ ) (Fotografía 4.4.1.2). Las probetas de mayor longitud (1350 mm) se dejarán sobre mesas con el fin de que a la hora de realizar la medición de las deformaciones sea mucho más cómodo y accesible. Las probetas más cortas se acopiarán de manera que formen series por tipo de hormigón y variables (Figura 4.4.1 (h)).



Fotografía 4.4.1.2. Traslado de probetas.

- Medidas ensayo diferido

Una vez almacenadas las probetas (Fotografía 4.4.1.3) la fuerza de pretensado ( $P_j$ ) en el sistema AMA se midió periódicamente con el amplificador de frecuencia a edades de 1, 2, 3, 7, 14, 21, 28 días y posteriormente mes a mes. El mismo periodo de medición se aplicó a las probetas instrumentadas con extensometría mecánica

para medir la deformación longitudinal del hormigón y para tomar lectura del desplazamiento con los micrómetros. Para una probeta pretensada con una longitud mayor o igual que la longitud de transmisión, el valor de  $P_j$  es la fuerza efectiva de pretensado a un tiempo  $j$  ( $P_{jE}$ ).

La fuerza de la armadura pretensada disminuye de forma secuencial para este procedimiento operativo de la siguiente manera (ver Figura 4.5.1):

- $P_H$ : fuerza inicial de la armadura de pretensado introducida por medio del sistema hidráulico al realizar el tesado, siendo mayor que
- $P_0$ : fuerza de la armadura pretesa justo antes de realizar la transmisión del pretensado, resultado de descontar las pérdidas por relajación de la armadura, siendo mayor que
- $P_{IE}$ : fuerza efectiva de la armadura pretesa tras la transmisión del pretensado, resultado de descontar las pérdidas por acortamiento elástico instantáneo del hormigón, siendo mayor que
- $P_{jE}$ : fuerza efectiva de la armadura después de un tiempo  $j$ , resultado de descontar las pérdidas diferidas.



Fotografía 4.4.1.3. Almacenamiento de probetas ensayo diferido.

#### 4.5 Comprobación del sistema AMA

Una vez se ha realizado la transmisión del pretensado por adherencia, la probeta de hormigón pretensado tiene un valor inicial de la fuerza efectiva de pretensado. Esta fuerza efectiva alcanzada a partir de la fuerza de tesado justo antes del destesado depende de la rigidez de la probeta de hormigón pretensado. Así mismo, la fuerza efectiva de pretensado disminuye con el tiempo debido a las deformaciones

reológicas del hormigón y del acero, por la rigidez de la probeta y otros factores como variaciones inherentes al material, además de efectos ambientales como la humedad relativa y la temperatura.

La fuerza que soporta la armadura es medida en el extremo donde se encuentra el sistema AMA el cual se encuentra pretensado, ya que como se mencionó anteriormente sustituye una parte de la probeta de hormigón pretensado. Se ha diseñado para tener una rigidez igual o superior a la parte sustituida, para que la tensión de la armadura sea igual a la tensión en la zona de meseta de la probeta. Ahora bien, para que la medida de la fuerza efectiva de pretensado en la probeta de hormigón pretensado sea fiable, el sistema AMA debe ser diseñado teniendo en cuenta las mismas pérdidas de pretensado que la parte sustituida del elemento de hormigón pretensado.

La fuerza inicial efectiva de pretensado ( $P_{IE}$ ) en el sistema AMA se debe al acortamiento del sistema una vez se ha realizado la transmisión del pretensado, que a su vez debería ser equivalente a las pérdidas instantáneas por acortamiento elástico del hormigón.

La Figura 4.5.1 muestra gráficamente la idealización de las pérdidas de pretensado, primero para la fase de destesado en la que tensión del acero pasa de ( $P_0$ ) a ( $P_{IE}$ ) (fuerza considerando pérdidas instantáneas o por acortamiento elástico) y de la fase de ensayo diferido hasta un tiempo  $j$  ( $P_{JE}$ ) (fuerza considerando pérdidas diferidas), tomando la hipótesis de que la longitud de transmisión no varía con el tiempo.

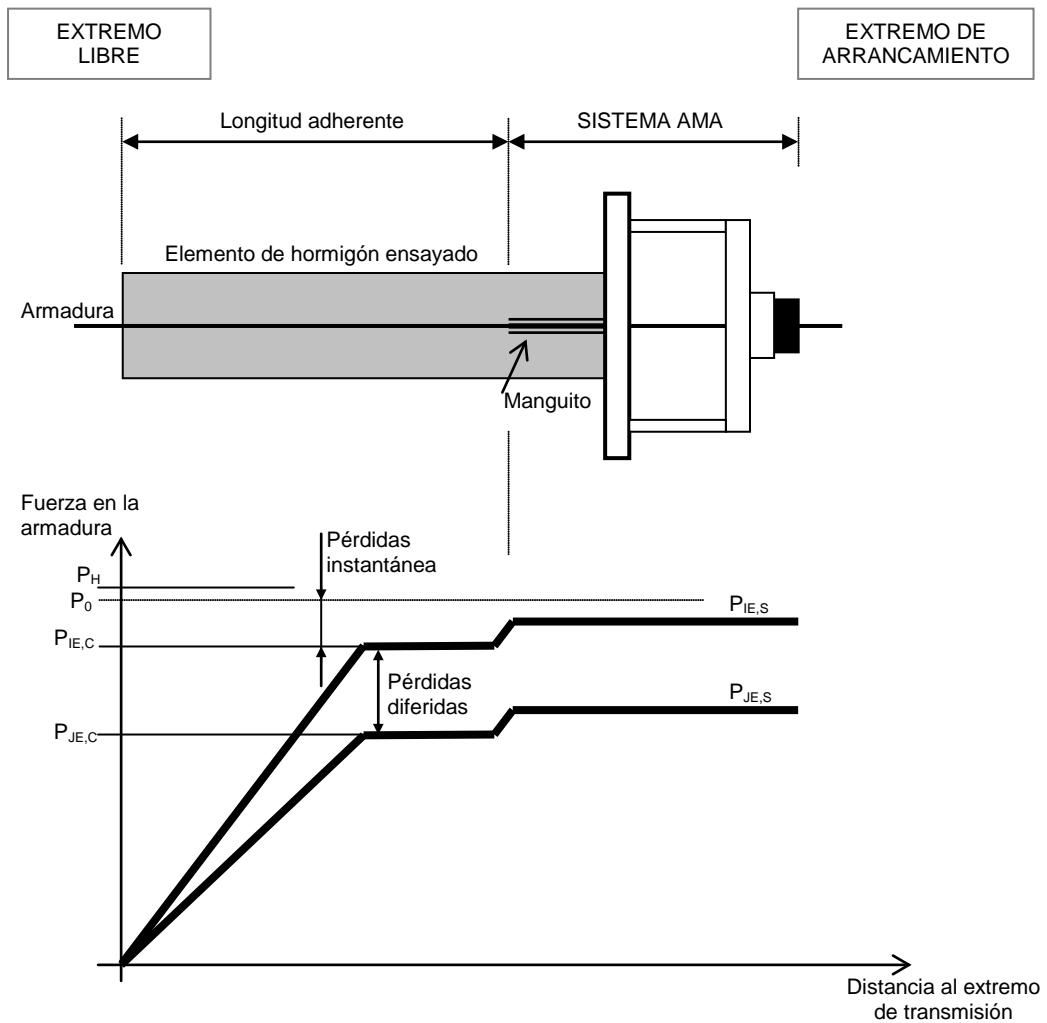
El valor de  $P_{IE}$  inicial dependiente de las características de la probeta de hormigón pretensado ( $P_{IE,C}$ ) se puede obtener de acuerdo con la Ecuación (4.5.1.1).

$$P_{IE,C} = \frac{P_0}{\left(1 + \frac{A_p E_p}{A_c E_c}\right)} \quad \text{Ec. (4.5.1.1)}$$

donde:

- $P_0$  fuerza de la armadura de pretensado justo antes del destesado
- $A_p$  área de la armadura de pretensado
- $E_p$  módulo de elasticidad de la armadura de pretensado
- $A_c$  área de la sección transversal de la probeta de hormigón
- $E_c$  módulo de deformación del hormigón a la hora del ensayo





**Figura 4.5.1.** Idealización de las pérdidas de pretensado tras el destesado

El valor de  $P_{IE}$  para el sistema AMA ( $P_{IE,S}$ ) puede obtenerse de la Ecuación (4.5.1.2), donde  $\Delta\varepsilon_P$  es la deformación por acortamiento de la armadura de pretensado en el sistema AMA como resultado de la transmisión del pretensado

$$P_{IE,S} = P_0 - A_P E_P \Delta\varepsilon_P \quad \text{Ec. (4.5.1.2)}$$

Considerando la respuesta de los componentes del sistema AMA cuando se produce el destesado, el término  $\Delta\varepsilon_P$  se puede obtener de la Ecuación (4.5.1.3), dependiendo de la geometría y de las características de los materiales del sistema AMA.

$$\Delta\varepsilon_P = \frac{1}{L_{AMA}} [\Delta L_m + \delta_C - \Delta L_{CB} - \delta_B] \quad \text{Ec. (4.5.1.3)}$$

donde:

$L_{AMA}$	longitud total del sistema AMA.
$\Delta L_m$	variación de la longitud del tramo con manguito.
$\delta_C$	flecha de la placa del bastidor desde el tesado, hasta la fase de destesado.
$\Delta L_{CB}$	variación de longitud entre la placa del bastidor y la placa de anclaje.
$\delta_B$	flecha de la placa de anclaje desde el tesado, hasta la fase de destesado.

Para la fuerza efectiva de pretensado en un cierto tiempo ( $P_{JE}$ ), el acortamiento del sistema AMA debería ser equivalente a las pérdidas de pretensado permitidas hasta un cierto tiempo  $j$ . El valor de  $P_{JE}$  dependiente de las características de la probeta de hormigón pretensado ( $P_{JE,C}$ ) se pueden obtener de acuerdo las Ecuación (4.5.1.4).

$$P_{JE,C} = P_{IE,C} - \Delta P_{retracción} - \Delta P_{fluencia} - \Delta P_{relajación} \quad \text{Ec. (4.5.1.4)}$$

donde:

$\Delta P_{retracción}$	pérdida de la fuerza de pretensado debido a la retracción del hormigón
$\Delta P_{fluencia}$	pérdida de la fuerza de pretensado debido a la fluencia del hormigón
$\Delta P_{relajación}$	pérdida de la fuerza de pretensado debido a la relajación de la armadura

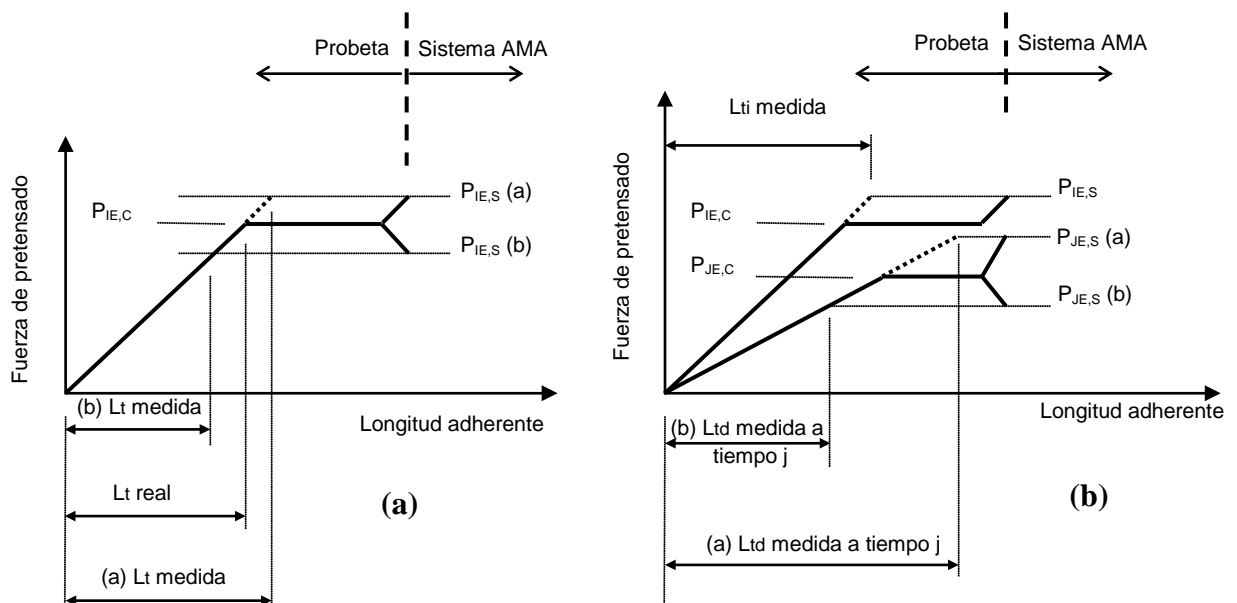
El valor de  $P_{JE}$  para los componentes del sistema AMA ( $P_{JE,S}$ ), puede ser obtenido de acuerdo con la Ecuación (4.5.1.2), considerando  $\Delta \epsilon_P$  como se define en la Ecuación (4.5.1.3) para la deformación por acortamiento de la armadura de pretensado en el sistema AMA a tiempo  $j$ .

#### 4.6 Requerimientos del sistema AMA

Hay varios factores que afectan a la rigidez de la parte sustituida de la probeta de hormigón pretensado como lo podrían ser el tipo de hormigón y sus propiedades características a la hora del ensayo, la sección transversal de la probeta, entre otros. Dado que no es factible diseñar diferentes sistemas AMA para cada una de las condiciones específicas de ensayo, dos requerimientos deben ser establecidos:

- A) Para determinar la longitud de transmisión inicial, debe cumplirse que la fuerza efectiva de pretensado en el sistema AMA sea mayor o igual que la fuerza efectiva de pretensado dependiente de las características de la probeta de hormigón ( $P_{IE,S} \geq P_{IE,C}$ ). Si no, la longitud de transmisión real es subestimada siendo  $P_{IE,C} < P_{IE,S}$  (ver Figura 4.6.1 (a), caso (b)).
- B) Para determinar la longitud de transmisión a lo largo del tiempo, debe cumplirse que  $[(P_{IE,S} - P_{JE,S}) / (P_{IE,C} - P_{JE,C})] \leq 1$ , o garantizar que durante los ensayos diferidos  $P_{JE,S} \geq P_{JE,C}$ . Ahora bien, si esto no se cumple y se da la situación de que la fuerza efectiva de pretensado en el sistema AMA sea menor que la fuerza de pretensado dependiente de las características de la probeta de hormigón ( $P_{JE,S} < P_{JE,C}$ ), puede dar lugar a una valoración de la longitud de transmisión en el tiempo  $j$  menor (ver Figura 4.6.1 (b), caso (b)).

Por estos motivos, a pesar de que el sistema AMA ideal debería tener la misma rigidez que la parte de hormigón sustituida para una medición fiable de la fuerza efectiva de pretensado, una sección de discontinuidad (segundo destesado) aparece al final de la longitud adherente de la probeta como consecuencia de los requisitos establecidos anteriormente. Este segundo destesado da lugar a una sobrevaloración de la fuerza efectiva de pretensado y de la longitud de transmisión real (Figura 4.6.1 (a) y (b), caso (a)). Estas sobrevaloraciones serán menos importantes cuanto mejor sea el ajuste entre el sistema AMA y la rigidez de la probeta de hormigón pretensado.



**Figura 4.6.1.** Idealización de la longitud de transmisión inicial (a) y diferida (b) con el método de ensayo ECADA+

## 4.7 Criterio de interpretación de los resultados

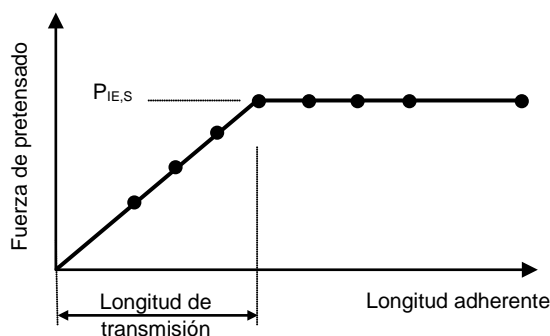
A continuación se definen los criterios para interpretar los resultados de los ensayos de las probetas de hormigón pretensado para determinar la longitud de transmisión inicial, diferida y los valores medios de la deformación del hormigón a lo largo de la longitud de la probeta. Los criterios para determinar las longitudes de anclaje se pueden encontrar en Arbeláez (2006).

### 4.7.1 Criterio para determinar la longitud de transmisión inicial

La longitud de transmisión se determina a partir de la fuerza transmitida en la armadura en el extremo del sistema AMA. Una vez se ha realizado la transmisión del pretensado para una serie de probetas la fuerza de pretensado inicial alcanzada es medida ( $P_I$ ) y los siguientes resultados se pueden presentar:

- A)  $P_I \ll P_{IE}$ : la fuerza efectiva de pretensado no es alcanzada, es decir, la probeta de hormigón pretensado ensayada tiene una longitud adherente menor que la longitud de transmisión.
  
- B)  $P_I \approx P_{IE}$ : la fuerza efectiva de pretensado es alcanzada, el valor medido de  $P_I$  se observa durante un periodo de estabilización, garantizando así su medida. Al finalizar este periodo puede ocurrir los dos siguientes casos :
  - B.1) Si  $P_I < P_{IE}$ : la probeta de hormigón pretensado ensayada tiene una longitud adherente menor que la longitud de transmisión, tras el periodo de estabilización.
  
  - B.2) Si  $P_I \approx P_{IE}$ : la probeta de hormigón pretensado ensayada tiene una longitud adherente igual o mayor que la longitud de transmisión, garantizando así la transmisión completa del pretensado.

La Figura 4.7.1.1 representa gráficamente una serie de probetas ordenadas en función de la longitud adherente y el valor de la fuerza transmitida, donde la longitud de transmisión se determina como la menor longitud adherente para la cual se alcanza el valor máximo de fuerza efectiva de pretensado (inicio de la meseta).



**Figura 4.7.1.1.** Determinación de la longitud de transmisión a partir de la fuerza transmitida, mediante el ensayo ECADA. Perfil de fuerzas tras el destesado.

#### 4.7.2 Criterio para determinar la longitud de transmisión diferida

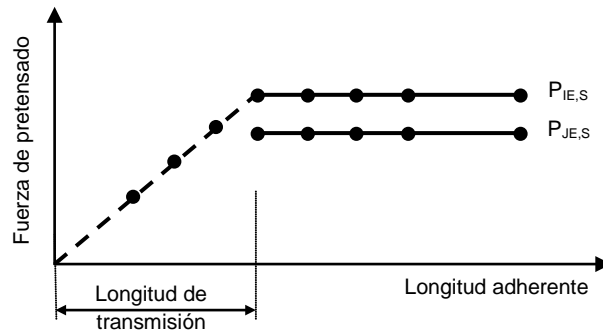
Para determinar la longitud de transmisión diferida con el método ECADA+, las probetas ensayadas con longitud adherente menor que la longitud de transmisión no son utilizadas (caso A o B.1 del criterio anterior,  $P_1 < P_{IE}$ ), si bien en algunos casos se utilizan para completar el perfil de fuerzas. Así, las probetas con longitud adherente igual o mayor que la longitud de transmisión (criterio B.2,  $P_1 \approx P_{IE}$ ), serán las probetas que se utilizarán para analizar el comportamiento de la longitud de transmisión diferida. Para ello, las probetas pretensadas junto con el sistema AMA acoplado, se desmontarán de los bastidores y se almacenarán en condiciones de humedad y temperatura controladas.

Cuando se almacenan las probetas, todas ellas presentan fuerzas de pretensado  $P_1 = P_J \approx P_{IE} = P_{IJ}$ . Con el tiempo, la fuerza de pretensado disminuye con motivo de las pérdidas por fluencia y retracción del hormigón y por relajación de la armadura.

La fuerza de pretensado para un determinado tiempo ( $P_J$ ) se mide periódicamente.

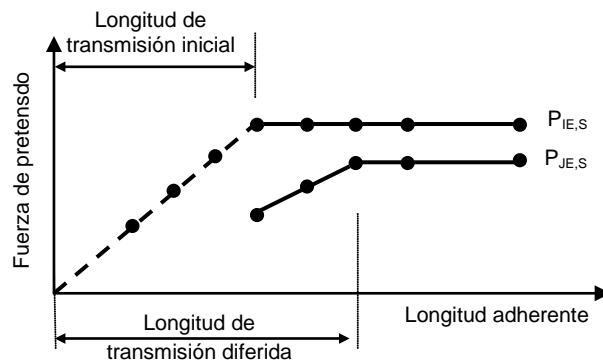
Para cada tiempo  $j$ , las lecturas  $P_J$  se organizan de acuerdo con la longitud adherente de las probetas, y dos posibles casos se pueden presentar:

- A) Todas las probetas ensayadas tienen un valor de  $P_J$  similar. La fuerza efectiva de pretensado a tiempo  $j$  es alcanzada por todas las probetas ( $P_J = P_{JE}$ ), por lo que la longitud de transmisión no ha variado con el tiempo (Figura 4.7.2.1).



**Figura 4.7.2.1.** Determinación de la longitud de transmisión diferida, sin variación de la longitud de transmisión.

B) El valor de  $P_J$  es menor para algunas de las probetas ensayadas de menor longitud adherente y un valor de  $P_{JE}$  similar es medido en las probetas restantes de la meseta. Por lo tanto, la longitud de transmisión ha aumentado debido a una pérdida de fuerza en el tiempo  $j$  de la probeta de menor longitud de la meseta ( $P_J < P_{JE}$ ), correspondiendo ahora la longitud de transmisión a la probeta de menor longitud adherente con  $P_J = P_{JE}$  (Figura 4.7.2.2).



**Figura 4.7.2.2.** Determinación de la longitud de transmisión diferida, variando de la longitud de transmisión.

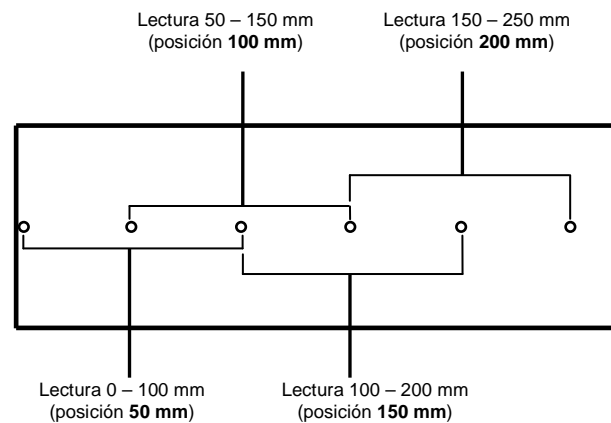
### 4.7.3 Criterio para determinar los valores medios de la deformación del hormigón a lo largo de la longitud de la probeta

Como se indicó en el Capítulo 3, algunas probetas fueron instrumentadas con extensometría mecánica para la medición de las deformaciones longitudinales del hormigón. Se empleó un micrómetro digital Demec de 100 mm de base de medida, y se dispusieron discos de medidas en las caras laterales de las probetas, a la altura del centro de gravedad de la armadura, con una separación media de 50 mm.

La Figura 4.7.3.1 representa cómo se obtuvo la deformación media del hormigón de los puntos medios de las bases de medida, de acuerdo con el siguiente procedimiento.

- Para cada base de medida se obtiene, en el instante considerado, la variación de longitud con respecto a la existente al inicio del ensayo;
- Se corrige la variación de la longitud teniendo en cuenta la temperatura existente al inicio del ensayo y la existente en el instante considerado;
- Se calcula la deformación media en la base de medida dividiendo el valor anterior por la longitud inicial de la base de medida;
- Se calcula la deformación media de sendas bases de medida situadas en las dos caras laterales instrumentadas en la misma posición respecto del extremo libre de la probeta.

En los Anejos C y J se encuentra la representación gráfica de las diferentes probetas instrumentadas con extensometría mecánica.



**Figura 4.7.3.1.** Determinación de la deformación media del hormigón de los puntos medios de las bases de medida

(Esta página se ha dejado intencionalmente en blanco)



## 5. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de los ensayos descritos en el marco del programa experimental expuesto en el Capítulo 3.

Se describen los resultados de los ensayos de caracterización de los hormigones, los resultados de los ensayos de caracterización de las propiedades adherentes iniciales según los diferentes métodos experimentales y los resultados de la longitud de transmisión diferida y la pérdida de fuerza de pretensado.

### 5.1 Resultados de ensayos de caracterización de los hormigones

#### 5.1.1 Caracterización en estado fresco

Para los diferentes hormigones tradicionales, hormigones con fibras y el hormigón reciclado la caracterización en estado fresco se determinó mediante el ensayo de consistencia del hormigón (UNE-EN 12350-2), con el fin de obtener una consistencia blanda-fluida. En los hormigones autocompactantes en estado fresco se determinó la fluidez y homogeneidad. Por medio de los ensayos de escurrimiento o “*Slump flow*” (UNE 83361:2007) y de Embudo en V (UNE 83364:2007), con el fin de proporcionar una idea de si el hormigón tiende o no a la segregación, evaluar la fluidez del hormigón fresco bajo su propio peso y verificar la capacidad del hormigón para pasar por sitios estrechos.

La Tabla 5.1.1.1 presenta los resultados obtenidos de consistencia para los diferentes hormigones tradicionales, con fibras y reciclado. En cuanto a los hormigones autocompactantes se presentan los ensayos de escurrimiento y embudo en V.

#### 5.1.2 Caracterización en estado endurecido

Los ensayos mecánicos de acompañamiento y caracterización aplicados a los distintos hormigones fueron: resistencia a compresión en probeta cúbica ( $f_{cc}$ ) (este ensayo se realizó en todos los hormigones para verificar la resistencia inicial y poder realizar la transmisión del pretensado al hormigón), resistencia a compresión en probeta cilíndrica ( $f_c$ ), resistencia a tracción ( $f_{ct}$ ) y módulo de deformación ( $E_c$ ). Estos

ensayos se realizaron en diferentes etapas del estudio. Para edades iniciales las probetas se almacenaron en la nave donde se efectuaron los ensayos de adherencia estando bajo las mismas condiciones de curado, en cámara húmeda y en el lugar dispuesto para el acopio de las probetas (almacén) en condiciones de temperatura y humedad controladas.

Las Tablas 5.1.2.1, 5.1.2.2, 5.1.2.3 y 5.1.2.4 presentan los ensayos de resistencia a compresión cúbica en probeta cúbica y en probeta cilíndrica), resistencia a tracción y módulo de elasticidad, respectivamente.

5. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Ensayo	HT-A	HT-B	HT-C	HT-DG	HT-DP	HT-DR	HT-DBV-1	HR	FA	FB	HAC-NF	HAC-LF	HAC-MF	HAC-HF
Consistencia (cm)	20	14	13	12	12	10	12	9	16	12	-	-	-	-
Slump flow T50 (seg) – Diámetro (mm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4 - 650	3 - 700	3 - 740	4 - 750
Embudo V T(seg)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9	12	14	15

**Tabla 5.1.1.1.** Ensayos de caracterización en estado fresco.

Ensayo	Tiempo	Ubicación	HT-A	HT-B	HT-C	HT-DG	HT-DP	HT-DR	HT-DBV-1	HR	FA	FB	HAC-NF	HAC-LF	HAC-MF	HAC-HF	
Resistencia a Compresión Cúbica ( $f_{cc}$ ) (MPa)	6 horas	Nave	18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	12 horas	Nave	45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	24 horas	Nave	65	37	28	35	30	30	-	-	74	37	32	-	-	-	
	48 horas	Nave	75	45	34	45	45	44	40	46	-	48	47	45	44	44	
	28 días	Cámara Húmeda	101	58	50	62	62	-	-	-	-	-	68	69	71	73	75
		Almacén	98	56	49	-	-	-	-	-	-	-	66	-	67	72	73
	1 año	Almacén	111	66	53	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

**Tabla 5.1.2.1.** Ensayos de caracterización en estado endurecido. Resistencia a Compresión (Probeta cúbica).

Ensayo	Tiempo	Ubicación	HT-A	HT-B	HT-C	HT-DG	HT-DP	HT-DR	HT-DBV-1	HR	FA	FB	HAC-NF	HAC-LF	HAC-MF	HAC-HF	
Resistencia a Compresión Cilíndrica ( $f_c$ ) (MPa)	6 horas	Nave	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	12 horas	Nave	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	24 horas	Nave	52	32	24	-	-	-	-	-	66	-	-	-	-	-	
	48 horas	Nave	58	36	29	-	-	33	-	38	-	-	38	42	43	42	
	28 días	Cámara Húmeda	85	50	43	53	51	-	-	-	-	-	58	58	63	62	60
		Almacén	84	47	42	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	90 días	Cámara Húmeda	89	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Almacén	84	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1 año	Almacén	86	53	46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

**Tabla 5.1.2.2.** Ensayos de caracterización en estado endurecido. Resistencia a Compresión (Probeta cilíndrica).

Ensayo	Tiempo	Ubicación	HT-A	HT-B	HT-C	HT-DG	HT-DP	HT-DR	HT-DBV-1	HR	FA	FB	HAC-NF	HAC-LF	HAC-MF	HAC-HF	
Resistencia a Tracción ( $f_{ct}$ ) (MPa)	12 horas	Nave	3,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	24 horas	Nave	4,44	3,19	2,56	-	-	-	-	-	6,56	-	-	-	-	-	
	48 horas	Nave	-	3,47	2,91	-	-	3,1	-	-	-	-	3,75	3,95	3,3	2,7	
	28 días	Cámara Húmeda	4,58	3,81	3,6	-	4,44	-	-	-	-	-	4,99	4,38	4,25	4,54	4,16
		Almacén	4,86	3,71	3,54	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	90 días	Cámara Húmeda	6,24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Almacén	5,38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1 año	Almacén	6,3	4,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

**Tabla 5.1.2.3.** Ensayos de caracterización en estado endurecido. Resistencia a Tracción.

Ensayo	Tiempo	Ubicación	HT-A	HT-B	HT-C	HT-DG	HT-DP	HT-DR	HT-DBV-1	HR	FA	FB	HAC-NF	HAC-LF	HAC-MF	HAC-HF	
Módulo de Deformación ( $E_c$ ) (MPa)	6 horas	Nave	24000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	12 horas	Nave	28000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	24 horas	Nave	32000	27000	22500	-	-	-	-	-	33500	-	-	-	-	-	
	48 horas	Nave	32000	29000	24500	-	-	30000	-	-	-	-	27000	26000	27500	25500	
	28 días	Cámara Húmeda	35000	32000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Almacén	35000	31000	31000	30000	31000	-	-	-	-	-	-	31000	32000	31000	32500
	90 días	Cámara Húmeda	37000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Almacén	35500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1 año	Almacén	39500	33000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

**Tabla 5.1.2.4.** Ensayos de caracterización en estado endurecido. Módulo de Elasticidad.

## 5.2 Resultados de caracterización de las propiedades adherentes iniciales

Los resultados de los ensayos de adherencia con el método de ensayo ECADA+ se han obtenido a partir de las lecturas de fuerza y deslizamiento registradas por la instrumentación durante el ensayo. Las lecturas de fuerza se obtienen del transductor de fuerza ubicado en el sistema AMA y los registros de deslizamiento se obtienen de los captadores de desplazamiento ubicados en los extremos de la probeta. Este deslizamiento se obtiene restando a las lecturas del captador de desplazamiento el acortamiento elástico de la armadura correspondiente a la base de medida. Los resultados con el criterio del 95% AMS se han obtenido de las probetas “largas”, instrumentadas con extensometría mecánica DEMEC.

A continuación se presenta un ejemplo de los resultados de la longitud de transmisión según los criterios de pérdida de fuerza, fuerza transmitida y deslizamiento en los dos extremos de la probeta. Adicionalmente se presentan los resultados de la longitud de transmisión a partir del perfil de deformación longitudinal del hormigón y los resultados de la longitud de anclaje.

### 5.2.1 Resultados de longitud de transmisión inicial (ECADA+)

#### 5.2.1.1 *Pérdida de fuerza*

La Figura 5.2.1.1.1 representa la pérdida de fuerza de una serie de probetas al finalizar el proceso de destesado, indicando la pérdida de fuerza en la armadura en el extremo del sistema AMA, en el instante de la finalización de la transmisión ( $\Delta P_{I, \text{destesado}}$ ) y tras el período de estabilización de la probeta ( $\Delta P_{I, \text{estabilización}}$ ).

En la figura 5.2.1.1.1 se observan dos tramos para cada curva, un tramo descendente y un tramo horizontal. En el tramo descendente se aprecia cómo, a medida que aumenta la longitud adherente de la probeta, disminuye la pérdida de fuerza hasta alcanzar el tramo horizontal o meseta donde la pérdida de fuerza se mantiene constante aunque aumente la longitud de probeta.

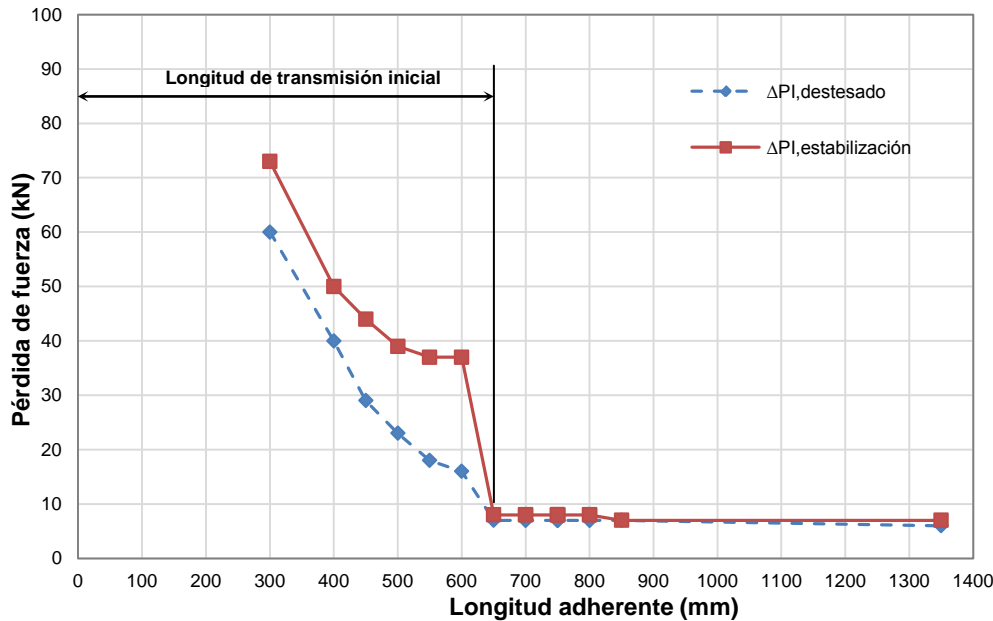


Figura 5.2.1.1.1. Determinación de la longitud de transmisión inicial por el método de la pérdida de fuerza. Pérdida de fuerza vs. Longitud adherente. Serie HT-B-100-48.

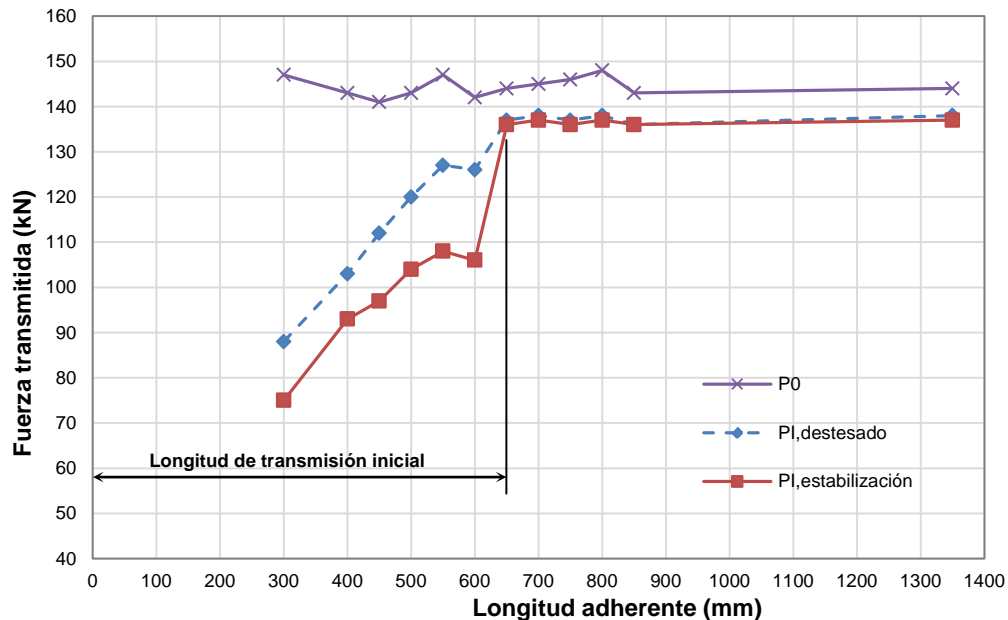
Con este método la longitud de transmisión corresponde a la longitud de probeta que marca el inicio del tramo horizontal. En el ejemplo mostrado en la Figura 5.2.1.1.1 la longitud de transmisión para la serie de probetas HT-B-100-48 es de 650 mm tanto en el instante de finalización de la transmisión (línea discontinua), como en el período de estabilización de la probeta (línea continua). En esta Tesis Doctoral, la longitud de transmisión inicial corresponde al valor determinado tras el periodo de estabilización.

### 5.2.1.2 Fuerza transmitida

La Figura 5.2.1.2.1 ilustra tres curvas diferentes representadas por la fuerza soportada por la armadura en el extremo del sistema AMA en el momento antes de realizar la transmisión del pretensado ( $P_0$ ), justo al finalizar el destesado ( $P_{I,destesado}$ ) y la fuerza soportada tras el periodo de estabilización ( $P_{I,estabilización}$ ).

Se observa cómo la fuerza transmitida es mayor a medida que la longitud adherente va aumentando hasta llegar a un punto en el cual la fuerza de pretensado tiende a ser constante. La diferencia en el tramo ascendente entre la curva de destesado ( $P_{I,destesado}$ ) y la curva de estabilización ( $P_{I,estabilización}$ ) tiende a ser nulo una vez se alcanza la rama horizontal. Al igual que en el caso del criterio de pérdida de fuerza,

la longitud de transmisión corresponde a la longitud adherente de la probeta que marca el inicio del tramo horizontal.



**Figura 5.2.1.2.1.** Determinación de la longitud de transmisión inicial por el método de la fuerza transmitida. Fuerza transmitida vs. Longitud adherente. Serie HT-B-100-48.

La linealidad de la fuerza transmitida tanto en la meseta como el tramo ascendente puede verse alterada debido a las variaciones de la fuerza de pretensado al inicio del ensayo ( $P_0$ ) en cada una de las probetas.

La representación gráfica de los resultados de longitud de transmisión inicial para las diferentes series, según los criterios de fuerzas (ECADA+), se presentan en el Anejo A.

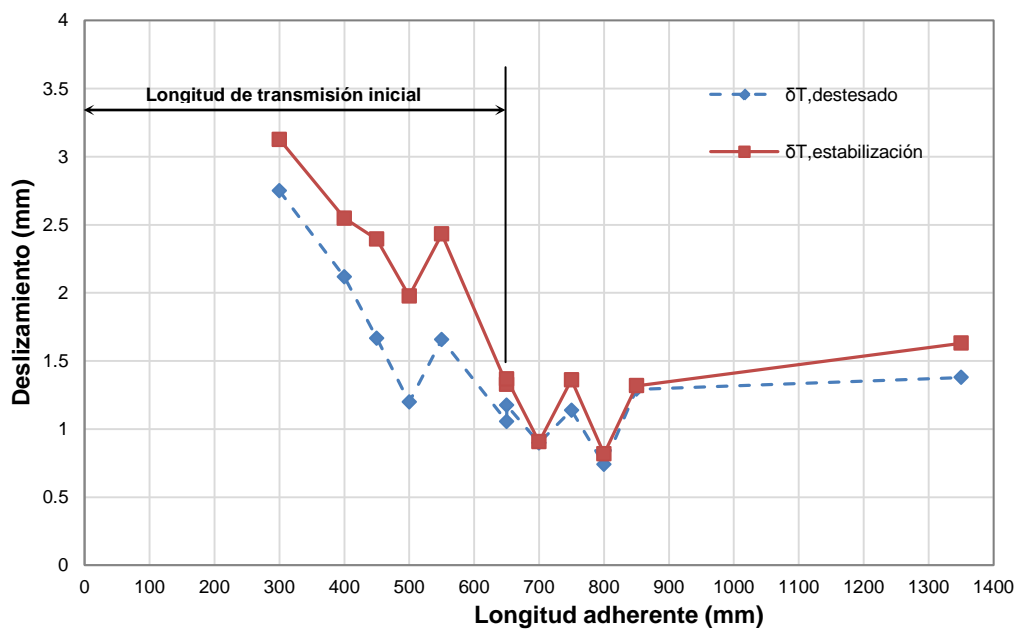
## 5.2.2 Resultados de la longitud de transmisión inicial con el método de deslizamientos

### 5.2.2.1 Deslizamiento en el extremo libre

Un ejemplo de los resultados del método para determinar la longitud de transmisión inicial por medio de los deslizamientos en el extremo libre se presenta en la Figura 5.2.2.1.1. En la figura se aprecian dos curvas, una curva dibujada con trazo continuo y una curva dibujada con trazo discontinuo que representan los deslizamientos justo

después de realizar el destesado ( $\delta_{T,destesado}$ ) y tras un periodo de estabilización ( $\delta_{T,estabilización}$ ), para la serie HT-B-100-48.

En la Figura 5.2.2.1.1 se observa cómo a medida que aumenta la longitud adherente los deslizamientos en el extremo libre van disminuyendo hasta alcanzar el tramo horizontal donde los deslizamientos tienden a ser constantes. La longitud de transmisión será la correspondiente a la probeta que determina el inicio del tramo horizontal. Para este caso (serie de probetas HT-B-100-48) la longitud de transmisión es de 650 mm.



**Figura 5.2.2.1.1.** Determinación de la longitud de transmisión inicial por el método de deslizamientos en el extremo de transmisión. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Probetas HT-B-100-48.

La diferencia presentada entre las dos curvas durante el periodo de estabilización es variable en todas las longitudes adherentes, pero tiende a ser menor en las probetas correspondientes al tramo horizontal una vez se ha alcanzado la transmisión del pretensado.

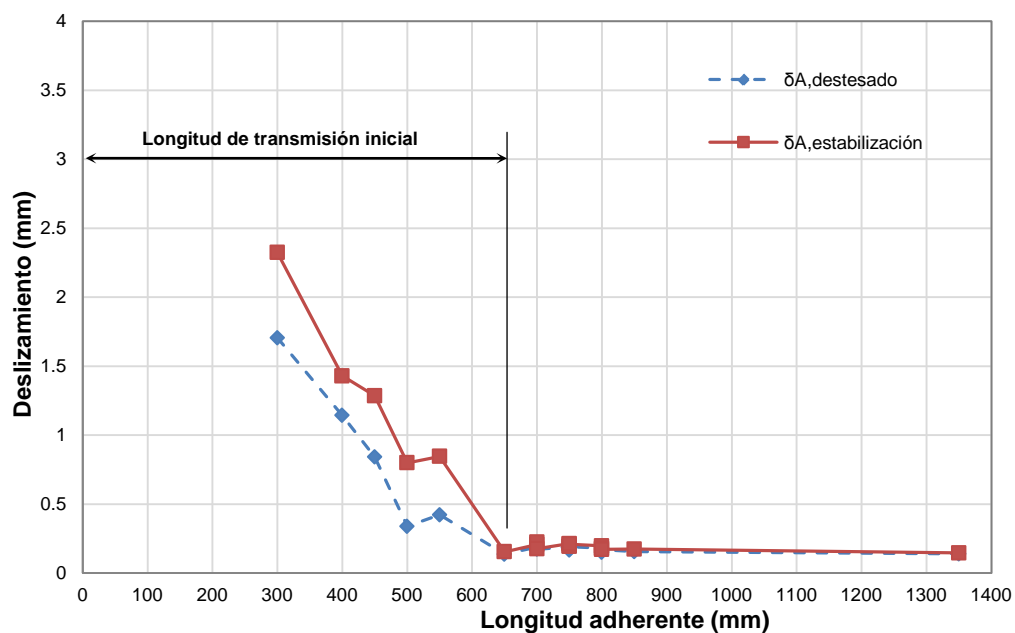
### 5.2.2.2 Deslizamiento en el extremo de arrancamiento

La Figura 5.2.2.2.1 presenta los deslizamientos en el extremo de arrancamiento para cada longitud adherente de la serie de probetas HT-B-100-48, en el instante justo



después de realizar el destesado ( $\delta_{A,destesado}$ ) y tras el periodo de estabilización ( $\delta_{A,estabilización}$ ).

Al igual que en el caso del criterio de fuerzas y de deslizamiento en el extremo de transmisión, la longitud de transmisión estará determinada por la probeta que marca el inicio del tramo horizontal (650 mm). En la Figura 5.2.2.2.1 se observa cómo al aumentar la longitud adherente disminuyen los deslizamientos en el tramo descendente hasta llegar al tramo horizontal donde estos deslizamientos tienden a ser constantes.



**Figura 5.2.2.2.1.** Determinación de la longitud de transmisión inicial por el método de deslizamientos en el extremo de arrancamiento. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HT-B-100-48.

La representación gráfica de los resultados de la longitud de transmisión inicial para los diferentes hormigones según los criterios de deslizamientos se presentan en el Anejo B.

### 5.2.3 Resultados de longitud de transmisión inicial con el método de deformaciones longitudinales del hormigón (DEMEC)

Las probetas instrumentadas con extensometría mecánica DEMEC para la medición de las deformaciones longitudinales del hormigón se han utilizado para determinar la longitud de transmisión sobre el perfil de deformaciones mediante observación

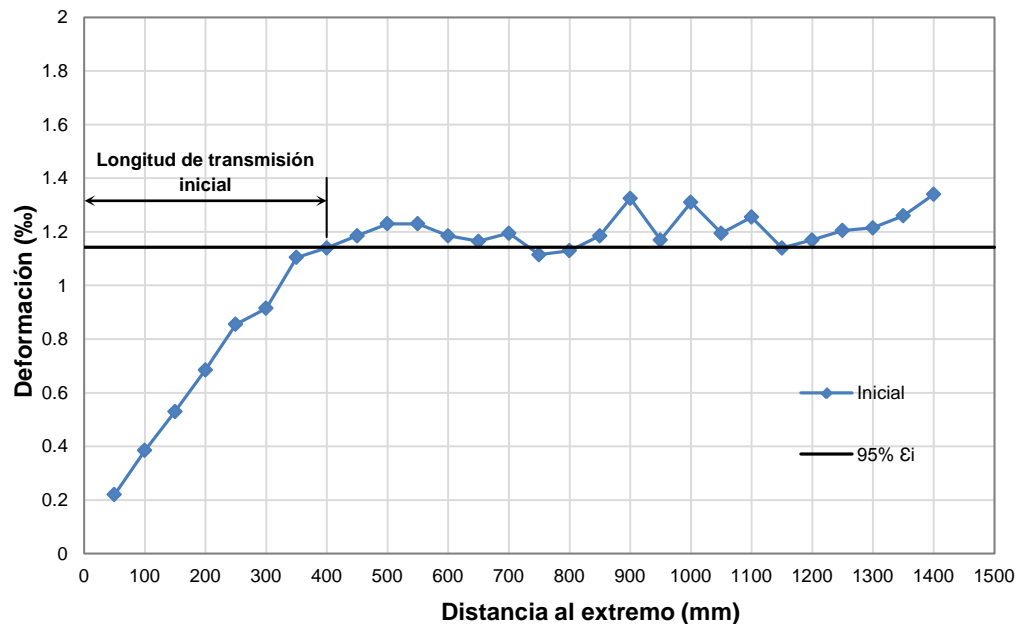
directa y mediante el criterio del 95% de la media de las deformaciones máximas “95% Average Maximun Strain Method (95% AMS)” (Russell y Burns (1996)).

La Figura 5.2.3.1 representa el perfil de deformaciones justo después de realizar el destesado de la probeta, mostrando un primer tramo que inicia desde el extremo libre de la probeta, en el cual a medida que aumenta la longitud de la probeta se incrementan las deformaciones, hasta alcanzar un segundo tramo horizontal o meseta donde las deformaciones tienden a ser constantes y por último un tercer tramo ascendente (segundo destesado), producido por un efecto de discontinuidad entre la rigidez del sistema AMA en comparación con la de la probeta de hormigón.

Para determinar la media de las deformaciones máximas (AMS), esto es, la media de las deformaciones en el tramo de meseta, se debe determinar de manera visual el tramo de inicio de la meseta, que para el caso de la Figura 5.2.3.1 se encontraría entre 350 y 500 mm. Según el criterio del 95% AMS, la longitud de transmisión será la distancia desde el extremo libre de la probeta hasta el punto de intersección entre la línea horizontal (95% AMS) y el perfil de deformaciones, siendo aproximadamente de 402 mm para la probeta HT-B-100-48-LS.

Alrededor de los 1300 mm comienza la zona de discontinuidad (tercer tramo), comprendida entre el punto 1300 mm y el punto 1400 mm (últimos 100 mm de los puntos medios de deformación de las bases de medida). Cabe recordar que la zona del manguito se encuentra desde el punto 1350 mm, correspondiente a la lectura 1300 – 1400 mm, por lo que la discontinuidad afectaría para este caso solamente a la zona del manguito.

La representación gráfica de los resultados de la longitud de transmisión inicial basada en el método de las deformaciones longitudinales del hormigón se muestra en el Anejo C.



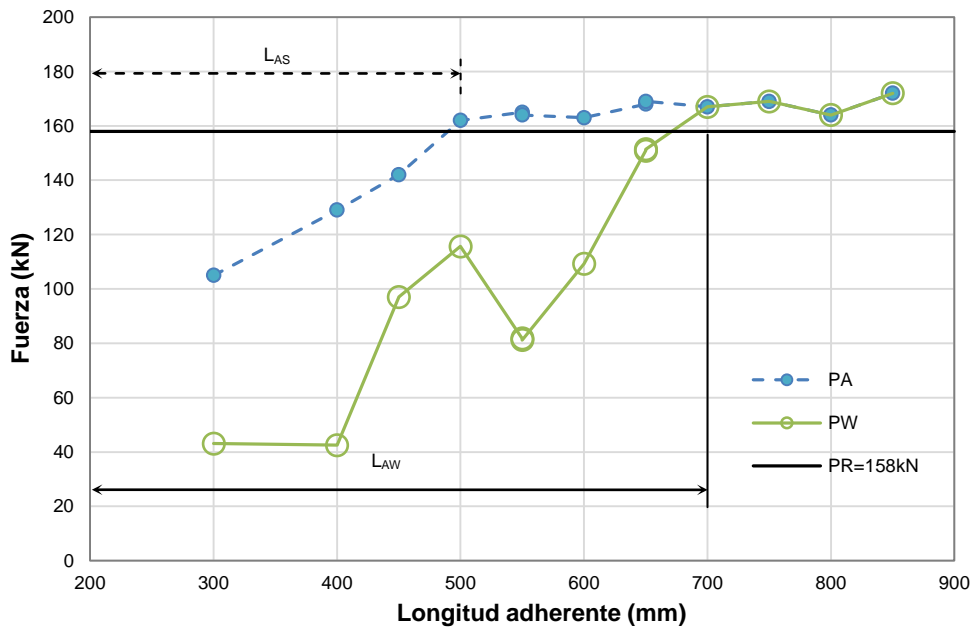
**Figura 5.2.3.1.** Determinación de la longitud de transmisión inicial por el método del 95% AMS. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-A-80-24-LS.

#### 5.2.4 Resultados de la longitud de anclaje

Según Arbeláez (2006) se ha considerado una fuerza de referencia a anclar  $P_R$  de 158 kN, correspondiente al valor del límite elástico característico para una deformación remanente del 0,1% (85% de la carga unitaria máxima a tracción) para cordones de acero de pretensar UNE 36094:97 Y 1860 S7 13 (UNE 36094 (1997)).

Debido a que en ocasiones es difícil detectar el instante exacto en el que se produce el deslizamiento, se ha tomado como referencia el instante en que el deslizamiento alcanza un valor de 0,1 mm.

En la Figura 5.2.4.1 se ilustra la determinación de la longitud de anclaje según los dos criterios descritos en Arbeláez (2006): la línea discontinua representa la evolución de la fuerza máxima  $P_A$  alcanzada en el proceso de arrancamiento, y la longitud de anclaje con deslizamiento ( $L_{AS}$ ) se determina como la menor longitud adherente con la que se alcanza el valor de la fuerza  $P_R$ ; la línea continua representa la evolución de la fuerza de arrancamiento ( $P_W$ ) justo antes del inicio del deslizamiento en el extremo libre de la probeta, y la longitud de anclaje sin deslizamiento ( $L_{AW}$ ) se determina como la menor longitud adherente para la cual se alcanza el valor de la fuerza  $P_R$ .



**Figura 5.2.4.1.** Determinación de la longitud de anclaje. Fuerza de arranque vs. Longitud adherente. Series HT-B-100-48.

El conjunto de los resultados gráficos de la longitud de anclaje para los diferentes hormigones se presentan en el Anexo D.

### 5.2.5 Resumen de resultados

Los resultados de longitud de transmisión y anclaje obtenidos de las series con el método de ensayo ECADA+ mediante los criterios de fuerza transmitida ( $P_I$ ) y de pérdida de fuerza ( $\Delta P_I$ ), los valores iniciales de la longitud de transmisión con el método de deslizamientos para los criterios de deslizamiento en el extremo libre ( $\delta_{T,l}$ ) y en el extremo de arranque ( $\delta_{T,r}$ ), y los resultados de longitud de anclaje con deslizamiento ( $L_{AS}$ ) y longitud de anclaje sin deslizamiento ( $L_{AW}$ ) para los diferentes tipos de hormigones se presentan en la Tabla 5.2.5.1. Adicionalmente, los resultados de longitud de transmisión obtenidos en las probetas largas con el método de las deformaciones longitudinales del hormigón con el criterio de la media de las deformaciones máximas (95% AMS) y con el criterio de observación se presentan en la Tabla 5.2.5.2.

Serie	Longitud de transmisión inicial (mm)				Longitud de anclaje (mm)	
	ECADA+		Deslizamientos			
	$P_I$	$\Delta P_I$	$\delta_{T,I}$	$\delta_{A,I}$	$L_{AS}$	$L_{AW}$
HT-A-60-24	600	600	600	600	-	-
HT-A-80-24	500	500	500	500	-	-
HT-A-100-12	650	650	650	650	-	-
HT-A-100-24	450	450	450	450	-	-
HT-B-60-48	500	500	500	500	-	-
HT-B-80-24	600	600	600	600	-	-
HT-B-80-48	550	550	550	550	-	-
HT-B-100-24	650	650	650	650	600	750
HT-B-100-48	650	650	650	650	500	700
HT-C-80-48	800	800	800	800	-	-
HT-C-100-24	800	800	800	800	-	-
HT-C-100-48	650	650	650	650	-	-
HR-100-48	550	550	550	550	550	650
FA-60-24	600	600	600	600	-	-
HAC-NF-100-48	700	700	700	700	600	850
HAC-LF-100-48	700	700	700	700	650	850
HAC-MF-100-48	750	750	750	750	600	850
HAC-HF-100-48	650	650	650	650	650	900

**Tabla 5.2.5.1.** Resultados iniciales de longitud de transmisión con el criterio de fuerzas y deslizamientos y resultados de la longitud de anclaje con deslizamiento y sin deslizamiento.

Probeta	Longitud de transmisión inicial (mm)	
	Observación	95% AMS
HT-A-60-24-LS	700	691
HT-A-60-48-LS	250-300	237
HT-A-80-12-LS	400-450	435
HT-A-80-24-LS	350-500	402
HT-A-80-24-LS-FA	350-400	352
HT-A-100-6-LS	850	879
HT-A-100-12-LS	450-600	508
HT-A-100-12-LS-FA	600	576
HT-A-100-24-LS	400-600	399
HT-A-100-24-LS-FA	350-500	366
HT-B-60-48-LS	350	341
HT-B-80-24-LS	600-700	602
HT-B-80-48-LS	500	490
HT-B-100-24-LS	550	528
HT-B-100-48-LS	600	575
HT-C-80-48-LS	850	838
HT-C-100-24-LS	950	933
HT-C-100-48-LS	800	757
HR-100-48-LS	450	396
FA-60-24-LS	300	282
HAC-NF-100-48-LS	550-650	500
HAC-LF-100-48-LS	550-650	426
HAC-MF-100-48-LS	450-600	442
HAC-HF-100-48-LS	500-650	447

**Tabla 5.2.5.2.** Resultados iniciales de longitud de transmisión con el criterio de observación y el 95% AMS.

### 5.3 Resultados del comportamiento adherente diferido

A continuación se presenta un resumen de los resultados de los ensayos diferidos de la longitud de transmisión con el método de ensayo ECADA+, el método de deslizamientos y el método de las deformaciones longitudinales del hormigón (DEMEC), así como los resultados de retracción y pérdida de fuerza de pretensado con el método ECADA+ y por medio de las deformaciones longitudinales del hormigón (DEMEC).

#### 5.3.1 Resultados de la longitud de transmisión diferida (ECADA+)

Los resultados de las lecturas obtenidas de la fuerza de pretensado en el sistema AMA en cada serie de probetas para determinar la longitud de transmisión diferida se han organizado a lo largo del tiempo como se muestra a modo de ejemplo en la Figura 5.3.1.1 para la serie HT-C-80-48.

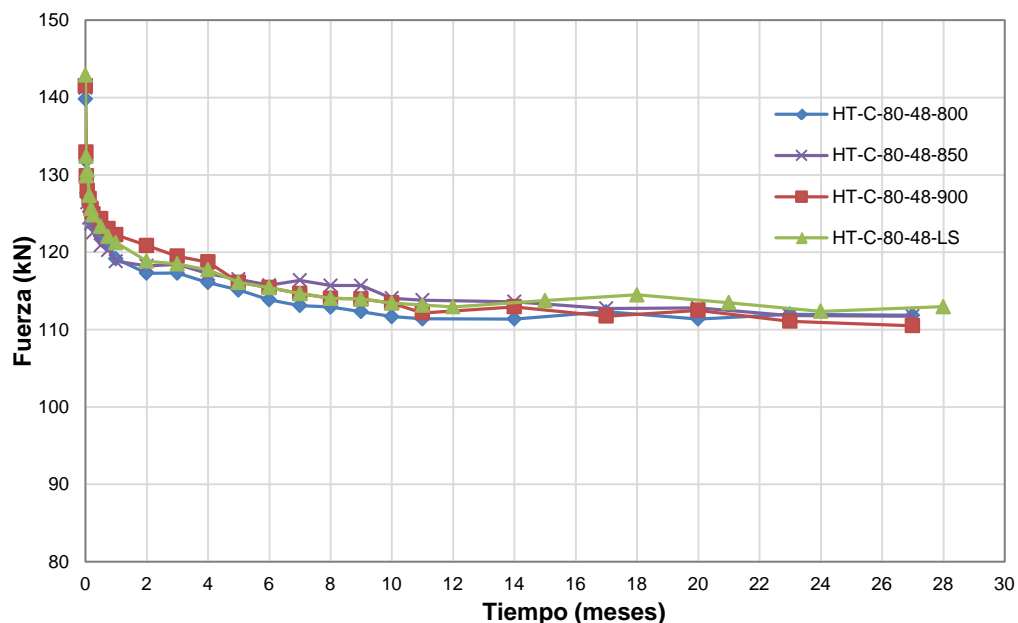


Figura 5.3.1.1. Fuerza de pretensado vs. Tiempo. Serie de probetas HT-C-80-48.

La representación gráfica de la fuerza de pretensado en el sistema AMA con el tiempo para cada probeta y por series se presenta en los Anejos E y F, respectivamente.

Estos resultados se organizan en función de las longitudes adherentes para determinar la longitud de transmisión en cada serie de probetas, bien sea a partir de la pérdidas de fuerza, bien se a partir de la fuerza transmitida.

### 5.3.1.1 Pérdida de fuerza

La Figura 5.3.1.1.1 muestra, para una serie de probetas con diferente longitud adherente, la pérdida de fuerza después de realizar la transmisión del pretensado ( $\Delta P_I$ ) y después de un tiempo  $j$  de mediciones ( $\Delta P_J$ ).

Para cada curva se observan dos tramos. Un tramo descendente, en el cual al aumentar la longitud adherente va disminuyendo la pérdida de fuerza hasta llegar al tramo horizontal donde la pérdida de fuerza se mantiene constante aunque aumente la longitud adherente de las probetas.

La longitud de transmisión será la de la probeta que determine el inicio del tramo horizontal (650 mm en la Figura 5.3.1.1.1). Tras un tiempo  $j$  de lecturas, la pérdida de fuerza ha aumentado de manera proporcional en el tramo horizontal para todas las probetas, observándose una mayor pérdida de fuerza en la probeta del tramo descendente. Siguiendo el criterio para determinar la longitud de transmisión, continuaría siendo la probeta con longitud adherente de 650 mm a tiempo  $j$  (12 meses) de lecturas la longitud de transmisión diferida.

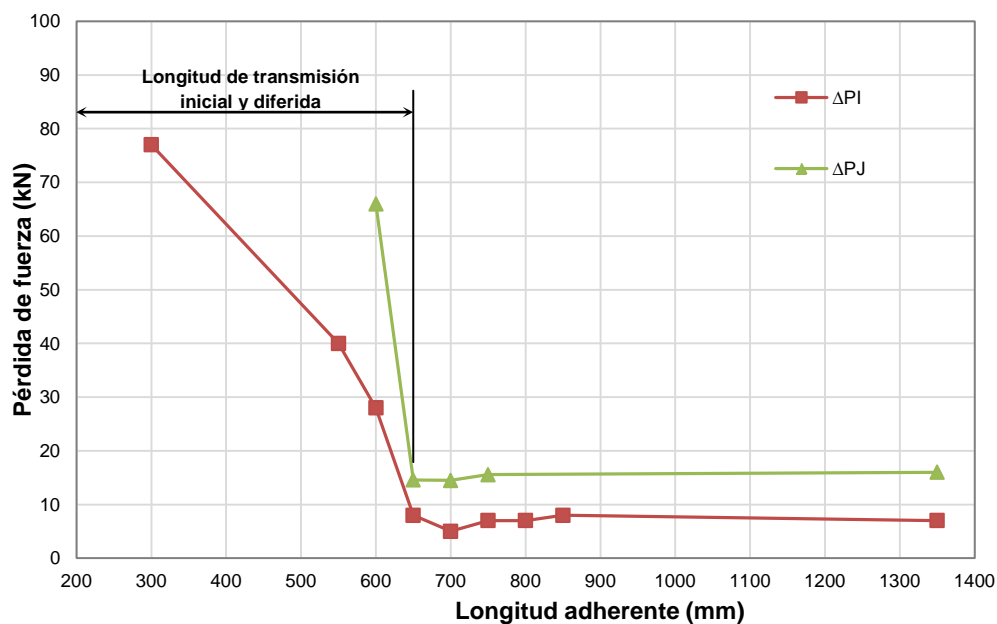


Figura 5.3.1.1.1. Longitud de transmisión diferida por el método de la pérdida de fuerza. Pérdida de fuerza vs. Longitud adherente. Series HT-B-100-24.



En el caso de que la pérdida de fuerza aumentara durante el tiempo  $j$  para la probeta que inicialmente determino la longitud de transmisión, se tomará como longitud de transmisión la de la probeta que marque el inicio del tramo horizontal de la curva  $\Delta P_j$ .

### 5.3.1.2 Fuerza transmitida

Los resultados se presentan en dos curvas como se muestra en la Figura 5.3.1.2.1 para la serie HT-B-100-24. Se representa la fuerza de la armadura antes de realizar la transmisión del pretensado ( $P_0$ ). También una curva corresponde a la fuerza de la armadura después del destesado ( $P_i$ ) y la otra a la fuerza soportada por la serie de probetas almacenadas durante un tiempo  $j$  ( $P_j$ ).

Las curvas ( $P_i$ ) y ( $P_j$ ) presentan dos tramos, un tramo ascendente donde a medida que aumenta la longitud adherente de las probetas aumenta la fuerza transmitida y un tramo horizontal donde se mantiene constante la fuerza para las diferentes probetas. La longitud de transmisión será la de la probeta que determina el inicio del tramo horizontal, que para esta serie de probetas después del periodo de estabilización y después de un tiempo  $j$  (12 meses) se encuentra en 650 mm.

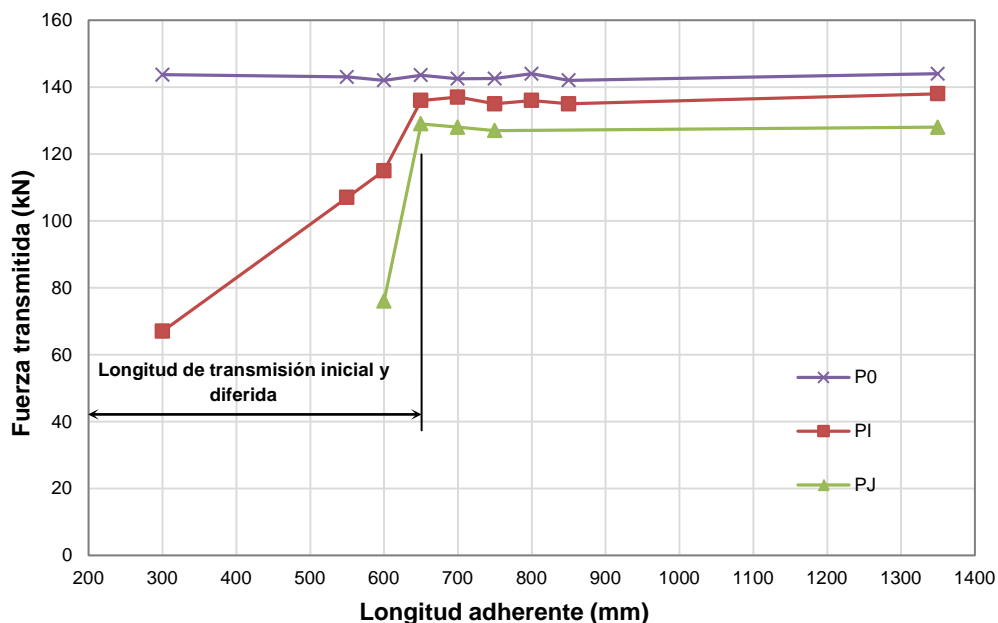


Figura 5.3.1.2.1. Longitud de transmisión diferida por el método de fuerza transmitida. Fuerza transmitida vs. Longitud adherente. Serie HT-B-100-24.

En la curva ( $P_j$ ) se observa cómo la probeta en la cual no se cumplió la transmisión completa del pretensado, muestra una mayor disminución de fuerza transmitida a lo largo del tiempo en comparación con las probetas que se encuentran en el tramo horizontal, donde sí se efectuó la transmisión completa del pretensado.

El conjunto de los resultados gráficos de la longitud de transmisión diferida para las diferentes series según el criterio de fuerzas (ECADA+) se presentan en el Anexo G.

### 5.3.2 Resultados de longitud de transmisión diferida método de deslizamientos

Para cada probeta de hormigón pretensado de las series almacenadas, se midió el deslizamiento en el extremo libre durante un periodo de tiempo  $j$  como se ilustra en la Figura 5.3.2.1.

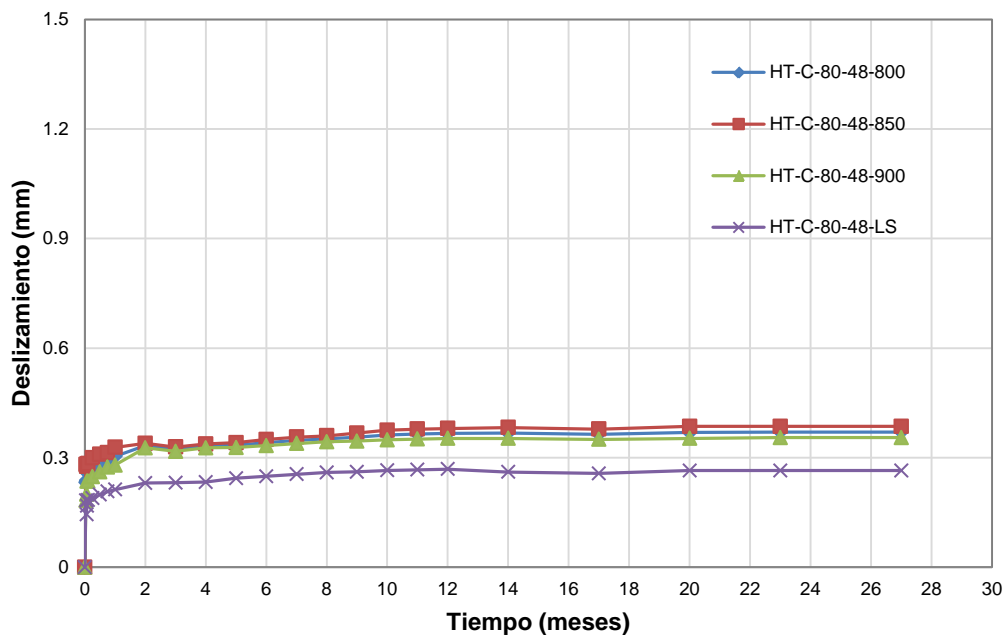


Figura 5.3.2.1. Deslizamiento en el extremo libre vs. Tiempo. Serie HT-C-80-48.

La representación gráfica de las lecturas de los deslizamientos con el tiempo en el extremo libre de la probeta por series se presenta en el Anejo H.

### 5.3.2.1 Deslizamientos en el extremo libre

La representación gráfica de los resultados para determinar la longitud de transmisión diferida por medio de los deslizamientos en el extremo libre para cada una de las probetas de la serie HT-B-100-24 se presenta en la Figura 5.3.2.1.1.

Cada punto de las curvas representa el deslizamiento de cada probeta de la serie, una vez se ha finalizado la transmisión del pretensado ( $\delta_{T,I}$ ) y tras un tiempo  $j$  de lecturas ( $\delta_{T,J}$ ).

Al igual que con los criterios anteriores cada curva presenta dos tramos. Un tramo descendente en el que el deslizamiento es menor a medida que aumenta la longitud adherente y un tramo horizontal donde los deslizamientos tienden a ser constantes. A diferencia de lo que acontece en el tramo descendente, las probetas del tramo horizontal no se muestran mayor separación de la curva  $\delta_{T,J}$  en relación a la curva  $\delta_{T,I}$ . Por lo tanto, la longitud de transmisión no varía con el tiempo y se mantiene en la probeta que marca el inicio del tramo horizontal (650 mm para la serie de probetas HT-B-100-24).

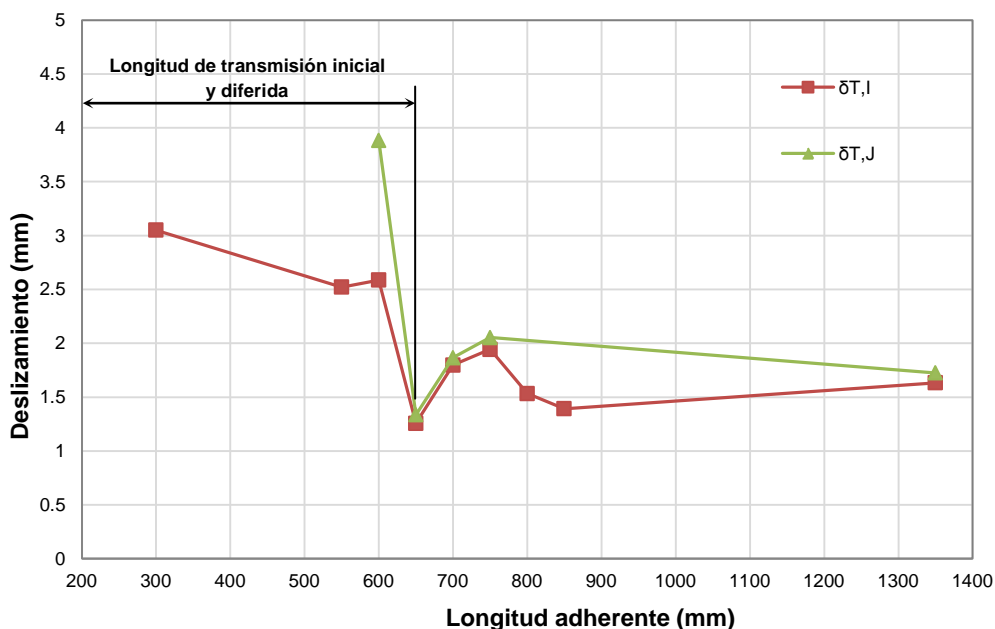


Figura 5.3.2.1.1. Longitud de transmisión diferida por el método de deslizamientos en el extremo libre. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HT-B-100-24.

El conjunto de los resultados gráficos de la longitud de transmisión diferida para los diferentes hormigones según el criterio de deslizamientos en el extremo libre se exhiben en el Anexo I.

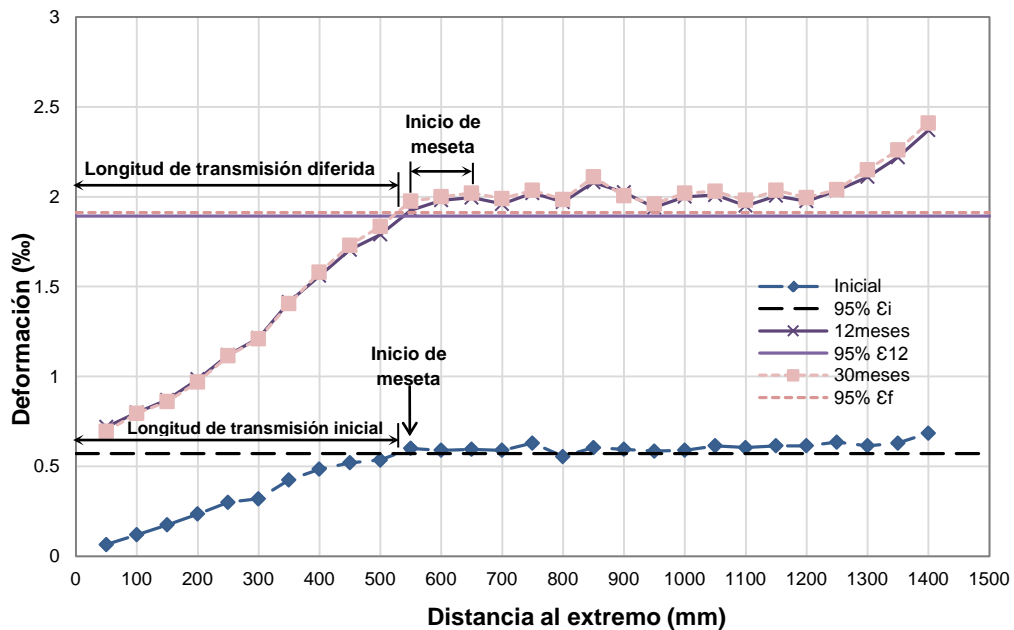
### **5.3.3 Resultados de la longitud de transmisión diferida con el método de deformaciones longitudinales del hormigón (DEMEC)**

Con esta técnica la longitud de transmisión se define como la distancia desde el extremo libre de la probeta hasta el punto en el cual las deformaciones longitudinales del hormigón comienzan a ser constantes. Con el fin de determinar la longitud de transmisión se optó por utilizar el método de observación (necesario para definir el inicio de la meseta) y el método del 95% de la media de las deformaciones máximas (95% AMS) (Russell y Burns (1996)).

La Figura 5.3.3.1 presenta la variación de la medida de las deformaciones en el hormigón, a nivel de la armadura para la probeta HT-B-100-24-LS, en el momento justo después del destesado y después de un tiempo  $j$  (12 meses) de mediciones. La longitud de transmisión inicial según la Figura 5.3.3.1 con el método de observación quedaría en 550 mm, mientras que hasta un tiempo  $j$  se encontraría entre 550 y 650mm. Aplicando el método del 95% AMS estaría aproximadamente en 530 mm, tanto para el perfil de deformaciones inicial, como para el perfil de deformaciones final.

Por otro lado, en la Figura 5.3.3.1 se observan claramente los tres tramos que presentan los perfiles de deformación, siendo el último tramo (discontinuidad) mayor para el perfil de deformaciones final debido a (como se explico en el Capítulo 4) la diferente rigidez del sistema AMA con respecto a la probeta de hormigón.

Se aprecia un aumento de las deformaciones con el tiempo debido al efecto de la fluencia y la retracción del hormigón.



**Figura 5.3.3.1.** Longitud de transmisión por el método del 95% de la media de las deformaciones máximas. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-B-100-24-LS.

El Anexo J presenta el conjunto de resultados gráficos de la evolución de las deformaciones hasta 12 meses y de la longitud de transmisión para las diferentes probetas de hormigón según el método de ensayo del 95% AMS a tiempo inicial y a tiempo final.

#### 5.3.4 Resumen de resultados

Un resumen de los resultados de la longitud de transmisión diferida para cada serie y la duración de los ensayos se ven reflejados en la Tabla 5.3.4.1, según los criterios de fuerzas y deslizamiento en extremo libre de la probeta. Igualmente, en la Tabla 5.3.4.2 se presentan los resultados obtenidos para cada probeta aplicando el método del 95% AMS y de observación directa.

Serie	Longitud de transmisión diferida (mm)			Tiempo de ensayo (meses)
	ECADA+		Deslizamiento	
	$\Delta P_J$	$P_J$		
HT-A-80-24	500	550	550	12
HT-A-100-12	650	700	650	12
HT-A-100-24	450	450	450	12
HT-B-80-24	600	700	700	29
HT-B-80-48	550	650	650	29
HT-B-100-24	650	650	650	30
HT-B-100-48	650	650	650	12
HT-C-80-48	800	800	800	27
HT-C-100-24	800	800	800	27
HT-C-100-48	650	750	750	25

**Tabla 5.3.4.1.** Resultados por serie de la longitud de transmisión diferida con el método ECADA+ y el método de deslizamientos.

Probeta	Longitud de transmisión diferida (mm)		Tiempo de ensayo (meses)
	Observación	95% AMS	
HT-A-60-24-LS	700-750	732	12
HT-A-60-48-LS	300	283	28
HT-A-80-12-LS	450	415	12
HT-A-80-24-LS	450-500	409	12
HT-A-80-24-LS-FA	400	369	12
HT-A-100-6-LS	850	844	12
HT-A-100-12-LS	450	439	12
HT-A-100-12-LS-FA	700	654	12
HT-A-100-24-LS	400-550	448	12
HT-A-100-24-LS-FA	400-500	394	12
HT-B-60-48-LS	350	350	29
HT-B-80-24-LS	700-750	617	29
HT-B-80-48-LS	500-650	552	8
HT-B-100-24-LS	550-650	528	30
HT-B-100-48-LS	600-700	585	12
HT-C-80-48-LS	1000	909	28
HT-C-100-24-LS	950	949	24
HT-C-100-48-LS	800	768	25
HR-100-48-LS	500	478	8
FA-60-24-LS	300	287	12
HAC-NF-100-48-LS	650	543	26
HAC-LF-100-48-LS	550-700	433	26
HAC-MF-100-48-LS	600	568	26
HAC-HF-100-48-LS	550-600	500	26

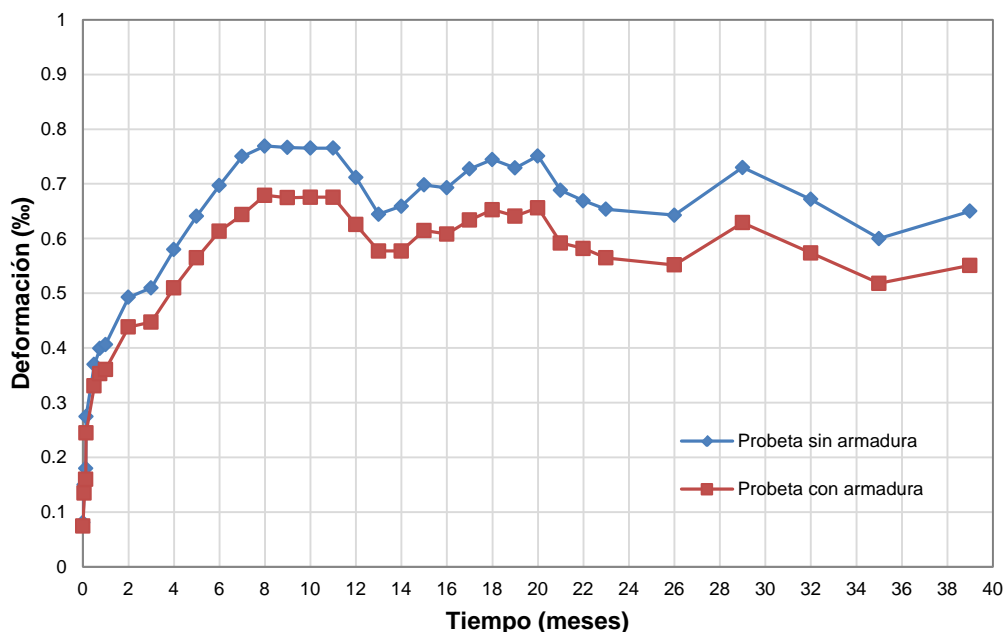
**Tabla 5.3.4.2.** Resultados por probeta de la longitud de transmisión diferida con el método de las deformaciones longitudinales del hormigón.

### 5.3.5 Resultados de retracción del hormigón

La deformación por retracción fue medida para los diferentes hormigones en probetas no pretensadas con armadura centrada y probetas sin armadura instrumentadas con extensometría mecánica (DEMEC). Las probetas se mantuvieron en las mismas condiciones ambientales que las probetas de pretensado, para posteriormente ser almacenadas al mismo tiempo en la cámara dispuesta para el acopio de todas las probetas en condiciones de temperatura y humedad controladas.

La Figura 5.3.5.1 representa la retracción promedio en el hormigón tipo A a lo largo de 39 meses. Se aprecia cómo se alcanzan menores deformaciones en la probeta con armadura. Por otro lado, se observan dos tramos para cada curva, un tramo ascendente en el que se produce la mayor parte de la deformación de retracción de la probeta y un tramo senciblemente horizontal a partir de los 8 meses en el cual tiende a mantenerse la deformación por retracción en las probetas. La diferencia entre las dos curvas en el tramo ascendente es mayor a medida que avanza el tiempo.

La totalidad de los resultados gráficos de los ensayos de retracción con el tiempo para los diferentes hormigones se presentan el Anejo K.



**Figura 5.3.5.1.** Retracción media del hormigón tipo A.  
Deformación longitudinal del hormigón vs. Tiempo

### 5.3.6 Resultados pérdida de fuerza de pretensado

Las probetas instrumentadas con extensometría mecánica, de longitud mucho mayor que la de transmisión para todos los casos (1350 mm de longitud adherente), se fabricaron con el fin de completar la serie de probetas, para la medición de la deformación longitudinal del hormigón, y para analizar las pérdidas de pretensado.

Las pérdidas de pretensado entre el tesado inicial con el gato hidráulico ( $P_H$ ) y antes de realizar la transmisión del pretensado ( $P_0$ ) serán despreciadas en el desarrollo de esta Tesis Doctoral al igual que las pérdidas por relajación de la armadura. Esta medida ha sido tomada por tres razones: siguiendo recomendaciones del fabricante, se optó por realizar una sobretensión temporal de la armadura, disminuyendo así la pérdida por relajación; de acuerdo con Calavera (1999), la mayoría de las pérdidas de pretensado por relajación son prácticamente desarrolladas antes de la transmisión del pretensado; el incremento en la pérdida por relajación desde la transferencia hasta el final del ensayo de la probeta es muy pequeño comparado con las pérdidas de fluencia y retracción del hormigón.

#### 5.3.6.1 *Pérdida de fuerza de pretensado con el método ECADA+*

Se realizaron mediciones de la fuerza de pretensado por medio de un transductor de fuerza ubicado en el sistema AMA, el cual se encuentra en contacto con el dispositivo de anclaje. Estas mediciones se realizaron desde el momento justo antes de realizar la transmisión del pretensado hasta el tiempo de ensayo estipulado para cada probeta.

La Figura 5.3.6.1.1 presenta la pérdida diferida de la armadura pretensada en el sistema AMA, al igual que los porcentajes de pérdida de fuerza. Se observa cómo la mayor parte de la pérdida de fuerza se produce en los primeros meses, tendiendo luego a ser aproximadamente constante. El porcentaje de pérdida de fuerza después de 12 meses para la probeta HT-A-100-24-LS se encuentra alrededor del 10%. Este porcentaje es con respecto a la fuerza  $P_0$  (justo antes de realizar el destesado). Casi la mitad de las pérdidas de pretensado son instantáneas.

El Anejo E presenta el total de resultados gráficos de la pérdida de fuerza diferida en el sistema AMA para las diferentes probetas de hormigón pretensado.



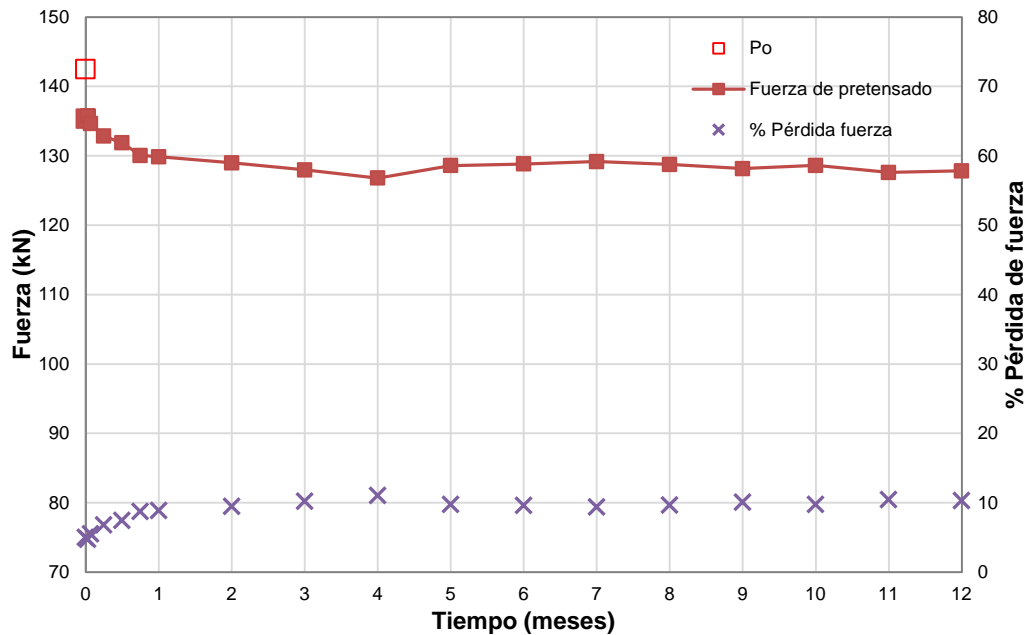


Figura 5.3.6.1.1. Pérdida de fuerza y porcentaje en el sistema AMA. Probeta HT-A-100-24-LS.

### 5.3.6.2 Pérdida de fuerza de pretensado a partir de las deformaciones del hormigón (DEMEC)

Las mediciones de deformación longitudinal del hormigón obtenidas usando extensometría mecánica (DEMEC) en el tramo de meseta fueron usadas para calcular las pérdidas de pretensado mediante la Ecuación 4.5.1.2 (ver Capítulo 4) asumiendo compatibilidad de deformaciones hormigón-armadura ( $\Delta\epsilon_c = \Delta\epsilon_p$ ).

La Figura 5.3.6.2.1 presenta un ejemplo de las mediciones de deformación media correspondiente al tramo de meseta a lo largo del tiempo para la probeta HT-A100-24-LS. Estas deformaciones reúnen las pérdidas instantáneas y diferidas.

Por otra parte, la Figura 5.3.6.2.2 muestra un ejemplo de las pérdidas de pretensado obtenidas a partir de las deformaciones del hormigón en el tramo de meseta. La figura presenta la fuerza de pretensado y el porcentaje de pérdida de fuerza total (respecto a la fuerza  $P_0$ ). Se aprecia cómo casi el 20% de la pérdida de fuerza se produce el primer mes, siendo la mitad de ésta la pérdida instantánea por acortamiento elástico del hormigón.

El conjunto de resultados de la representación gráfica fuerza de pretensado de la probeta y el porcentaje de la pérdida de fuerza para las diferentes probetas se presentan en el Anejo E.

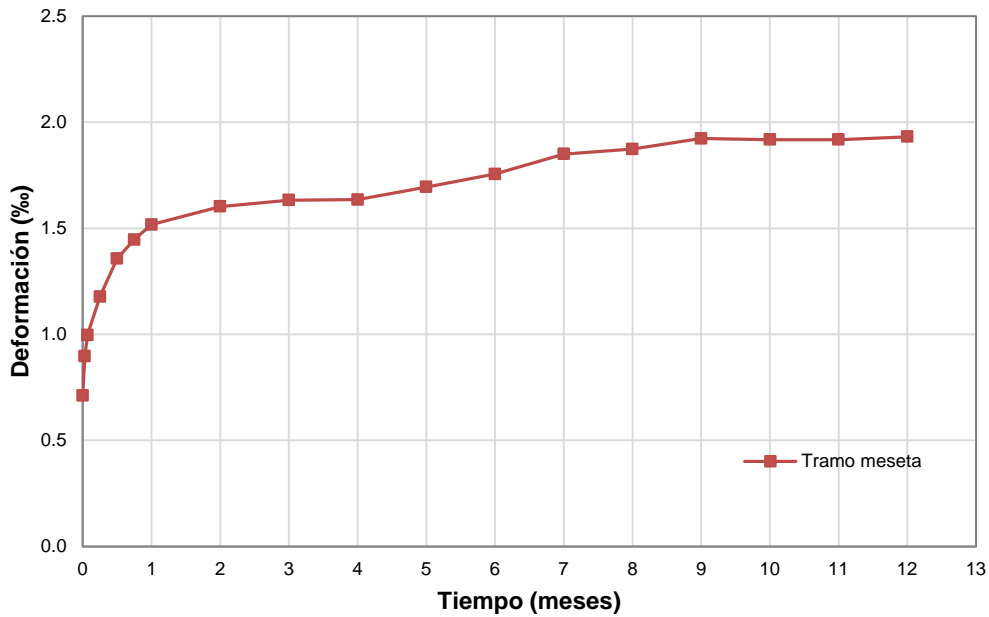


Figura 5.3.6.2.1. Deformación media en el tramo de meseta respecto al tiempo. Probeta HT-A-100-24-LS.

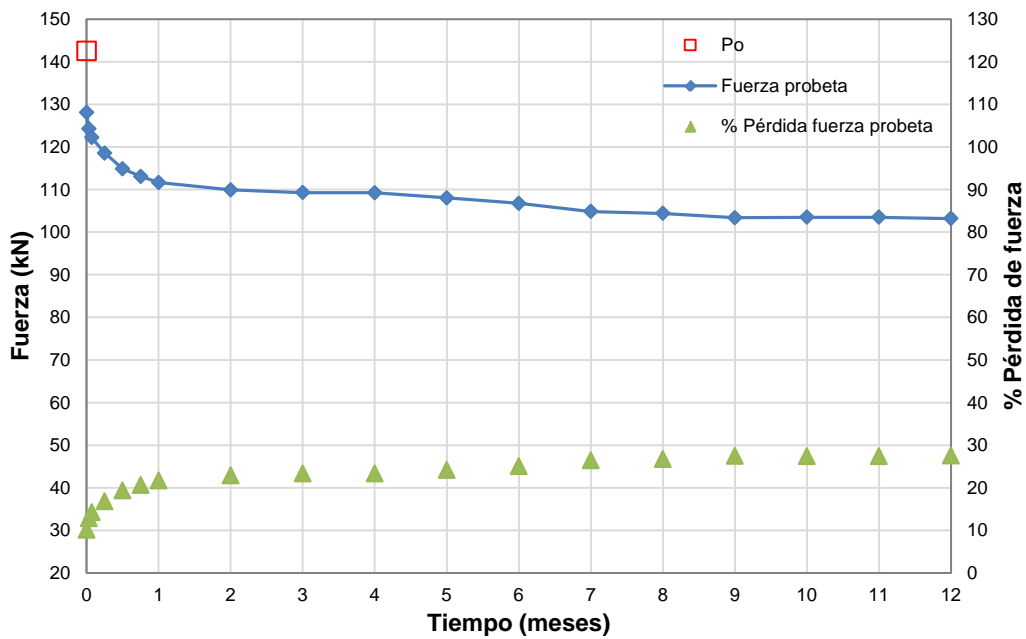


Figura 5.3.6.2.2. Pérdida de fuerza y porcentaje diferido en el tramo de meseta. Probeta A-100-24-GA

Con el fin de determinar las pérdidas de pretensado por separado, la Figura 5.3.6.2.3 presenta un ejemplo de las mediciones de deformación media correspondiente a la región de meseta a lo largo del tiempo. Adicionalmente, se ha

incorporado la curva correspondiente a la retracción del hormigón con armadura (ver apartado 5.3.5); de esta manera, la diferencia entre la deformación media del tramo de meseta y las curvas de retracción y de acortamiento elástico permite obtener la curva de deformación por fluencia del hormigón.

En el Anejo L se presenta los resultados gráficos de la deformación media en el tramo de meseta y la deformación debida a la retracción y fluencia del hormigón.

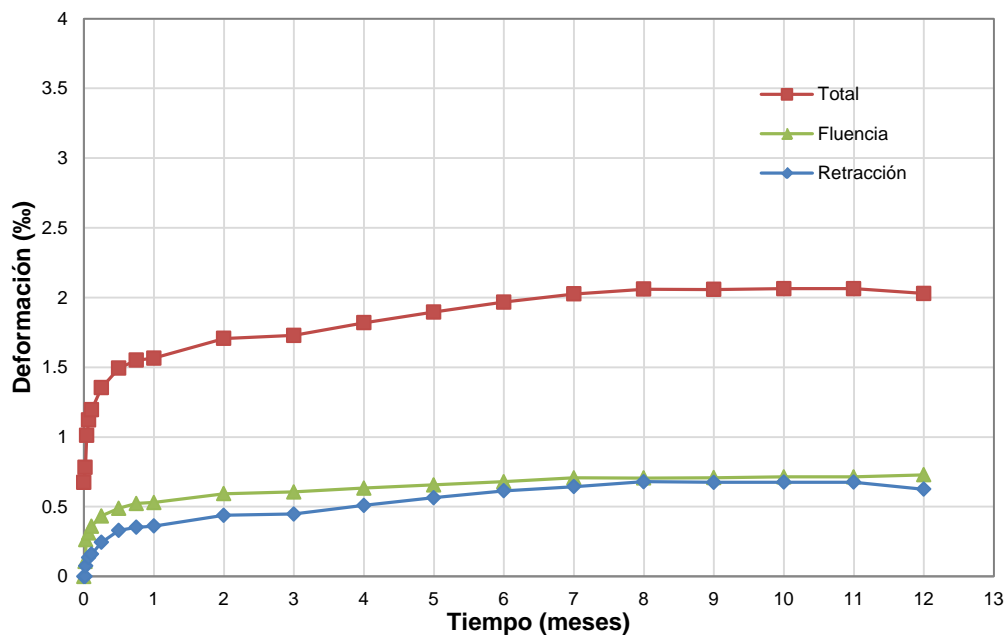


Figura 5.3.6.2.3. Deformación media en el tramo de meseta, fluencia y retracción de la probeta HT-A-100-24-LS en el tiempo

Las pérdidas de pretensado determinadas experimentalmente en términos de tensión fueron calculadas con las deformaciones longitudinales del hormigón en el tramo de meseta multiplicándolas por el módulo de elasticidad de la armadura ( $203,35 \text{ kN/mm}^2$ ).

### 5.3.7 Resumen de resultados

La Tabla 5.3.7.1 presenta los resultados de la fuerza inicial ( $P_0$ ), la fuerza efectiva de pretensado ( $P_{IE}$ ), la fuerza final ( $P_{JE}$ ), la pérdida instantánea, la pérdida total y el porcentaje de pérdida de fuerza medidos experimentalmente con el método ECADA+. Además, la Tabla 5.3.7.2 presenta los resultados de las pérdidas de pretensado debido al acortamiento elástico, fluencia y retracción del hormigón

determinadas a partir de las deformaciones en el tramo de meseta de la probeta de hormigón.

Probeta	Fuerza inicial (kN)	Fuerza efectiva (kN)	Pérdida instantánea (MPa)	Fuerza final (kN)	Pérdida total (MPa)	Pérdida de fuerza (%)
HT-A-60-24-LS	142	127	144	111	308	22
HT-A-60-48-LS	143	133	98	120	230	16
HT-A-80-12-LS	142	131	105	119	223	16
HT-A-80-24-LS	144	135	90	122	223	16
HT-A-80-24-LS-FA	141	134	70	123	180	13
HT-A-100-6-LS	142	114	286	102	400	28
HT-A-100-12-LS	143	135	83	126	171	12
HT-A-100-12-LS-FA	141	134	76	124	175	12
HT-A-100-24-LS	142	136	67	128	147	10
HT-A-100-24-LS-FA	142	135	71	127	153	11
HT-B-60-48-LS	142	130	128	107	356	25
HT-B-80-24-LS	141	132	93	114	271	19
HT-B-80-48-LS	142	132	100	121	207	15
HT-B-100-24-LS	144	137	66	127	168	12
HT-B-100-48-LS	143	137	64	129	143	10
HT-C-80-48-LS	143	132	105	112	305	21
HT-C-100-24-LS	144	137	64	121	226	16
HT-C-100-48-LS	144	138	58	125	191	13
HR-100-48-LS	144	138	64	125	189	13
FA-60-24-LS	142	132	101	117	253	18
HAC-NF-100-48-LS	143	138	51	129	143	10
HAC-LF-100-48-LS	144	138	58	129	146	10
HAC-MF-100-48-LS	144	138	57	128	163	11
HAC-HF-100-48-LS	145	138	66	127	175	12

**Tabla 5.3.7.1.** Resultados de las pérdidas de pretensado medidas con el ensayo ECADA+.

Probeta	Fuerza inicial (kN)	Acortamiento elástico (MPa)	Fuerza efectiva (kN)	Fluencia (MPa)	Retracción (MPa)	Fuerza final (kN)	Pérdida total (MPa)	Pérdida de fuerza (%)
HT-A-60-24-LS	142	421	100	235	127	63	783	55
HT-A-60-48-LS	143	378	105	218	127	71	724	50
HT-A-80-12-LS	142	318	110	196	127	77	643	45
HT-A-80-24-LS	144	244	120	181	127	89	552	38
HT-A-80-24-LS-FA	141	197	121	202	127	88	526	37
HT-A-100-6-LS	142	408	101	175	127	73	696	49
HT-A-100-12-LS	143	157	127	165	127	98	450	31
HT-A-100-12-LS-FA	141	166	125	158	127	96	452	32
HT-A-100-24-LS	142	145	128	122	127	103	393	28
HT-A-100-24-LS-FA	142	137	128	148	127	101	413	29
HT-B-60-48-LS	142	453	97	306	115	55	874	61
HT-B-80-24-LS	141	278	114	286	115	73	679	48
HT-B-80-48-LS	142	239	118	255	115	81	609	43
HT-B-100-24-LS	144	163	127	158	115	100	436	30
HT-B-100-48-LS	143	150	128	138	115	102	404	28
HT-C-80-48-LS	143	248	118	323	114	74	685	48
HT-C-100-24-LS	144	175	126	246	114	90	535	37
HT-C-100-48-LS	144	158	128	236	114	93	508	35
HR-100-48-LS	144	155	129	-	-	101	429	30
FA-60-24-LS	142	354	107	-	-	75	677	48
HAC-NF-100-48-LS	143	130	130	123	123	106	376	26
HAC-LF-100-48-LS	144	132	131	124	124	106	379	26
HAC-MF-100-48-LS	144	155	128	163	113	101	431	30
HAC-HF-100-48-LS	145	169	128	165	130	98	463	32

**Tabla 5.3.7.2.** Resultados de las pérdidas de pretensado medidas a partir de las deformaciones del hormigón en el tramo de meseta.

(Esta página se ha dejado intencionalmente en blanco)

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se realiza el análisis de los resultados obtenidos y presentados en el Capítulo 5 de esta Tesis Doctoral.

El capítulo se encuentra estructurado de la siguiente manera: en primer lugar se realiza un análisis de la longitud de transmisión diferida por los siguientes métodos: método de ensayo ECADA+, el método de deslizamientos en el extremo libre de la probeta y el método del 95% de la media de las deformaciones máximas del hormigón (AMS), posteriormente se realiza una propuesta de un factor adicional para calcular la longitud de transmisión diferida.

En segundo lugar se realiza un análisis de la fuerza de pretensado medida con el método ECADA+ y de la fuerza de pretensado obtenida a partir de las deformaciones en el tramo de meseta de la probeta de hormigón (DEMEC), para su posterior comparación y análisis.

Finalmente, se realiza un estudio de las pérdidas de pretensado experimentales, tanto de las pérdidas instantáneas debidas al acortamiento elástico del hormigón como de las pérdidas diferidas (12 meses) debidas a la fluencia y la retracción del hormigón, con las pérdidas de pretensado estimadas mediante diferentes métodos de cálculo recogidos en normativas.

### 6.1 Análisis de la longitud de transmisión diferida con el método ensayo ECADA+.

Se llevó a cabo un seguimiento de la fuerza de pretensado ( $P_j$ ) hasta un cierto tiempo  $j$  en cada una de las series de probetas de hormigón (ver Capítulo 3), con el propósito de determinar la longitud de transmisión diferida ( $L_{t_d}$ ) aplicando el criterio descrito en el apartado 4.7.2. Los resultados de las lecturas obtenidas se han organizado por probeta a lo largo del tiempo como se muestra a modo de ejemplo en la Figura 6.1.1 y Figura 6.1.2 para las series HT-A-100-24 y HT-A-80-24, respectivamente.

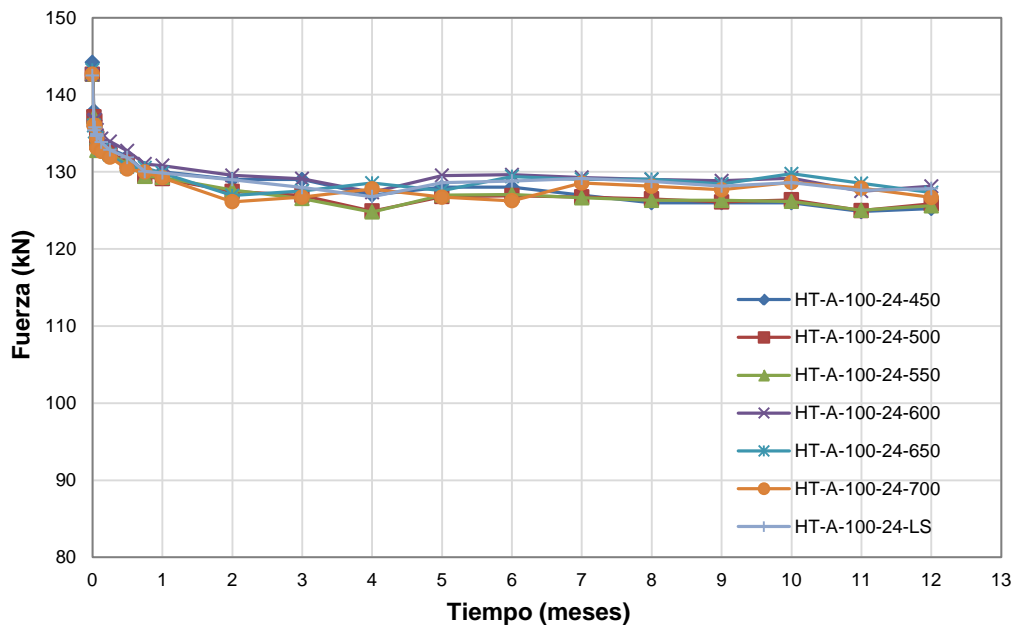


Figura 6.1.1. Fuerza transmitida a lo largo del tiempo para la serie de probetas HT-A-100-24.

Las lecturas obtenidas de la medición de la fuerza de la armadura en el sistema AMA incluyen la pérdida de fuerza debida a la deformación por fluencia y la retracción del hormigón acumulada en el tiempo en cada probeta. En la Figura 6.1.1 se aprecia cómo las mediciones de fuerza de pretensado presentan una tendencia estable y valores similares para todas las probetas, indicando que no se produce variación alguna en la  $L_{td}$  para este caso en concreto. En cambio en la Figura 6.1.2 se aprecia cómo la probeta de menor longitud adherente (HT-A-80-24-500) registra una mayor pérdida de fuerza en comparación con las demás probetas de la misma serie, teniendo éstas una disminución de la fuerza de pretensado más uniforme y de menor rango.

Esta disminución de fuerza se sigue produciendo paulatinamente hasta el final de la toma de lecturas para la probeta HT-A-80-24-500. Consecuentemente, esto constataría una variación en longitud de transmisión con el tiempo para esta serie de probetas (HT-A-80-24) a partir del segundo mes. Esta variación significaría que la longitud de transmisión pasaría a ser la correspondiente a la probeta de menor longitud adherente entre el resto de las probetas ensayadas, es decir 550 mm.



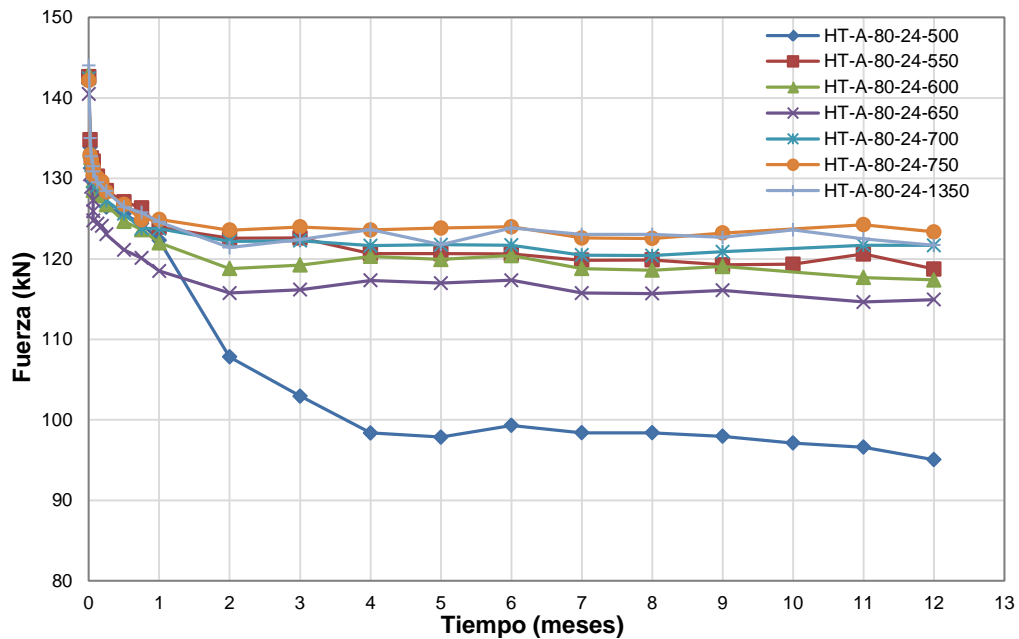


Figura 6.1.2. Fuerza transmitida a lo largo del tiempo para la serie de probetas HT-A-80-24.

De acuerdo con el método de ensayo ECADA+, para determinar la  $L_{td}$  se representan gráficamente los resultados de las series en perfiles de fuerza de la armadura de pretensado tras el destesado ( $P_i$ ) y al final del periodo analizado ( $P_j$ ). Las Figuras 6.1.3 y 6.1.4 representan los resultados de la  $L_{td}$  tras 12 meses para las series anteriormente presentadas (HT-A-100-24 y HT-A-80-24). En el primer caso (serie HT-A-100-24) no se produce variación de la longitud de transmisión con el tiempo en que se realizaron las lecturas, siendo la  $L_{ti}$  igual a la  $L_{td}$ . Mientras que en el segundo caso (serie HT-A-80-24), sí se produce la variación de la longitud de transmisión. Para este último caso la longitud de transmisión diferida a 12 meses corresponde a la menor longitud adherente de las probetas que sigue mostrando una fuerza transmitida similar. La variación de la longitud de transmisión diferida corresponde a la resolución de longitud usada en el procedimiento, y se valora en 50 mm para la serie de probetas HT-A-80-24, lo cual implica un incremento del 10% de la longitud de transmisión inicial.

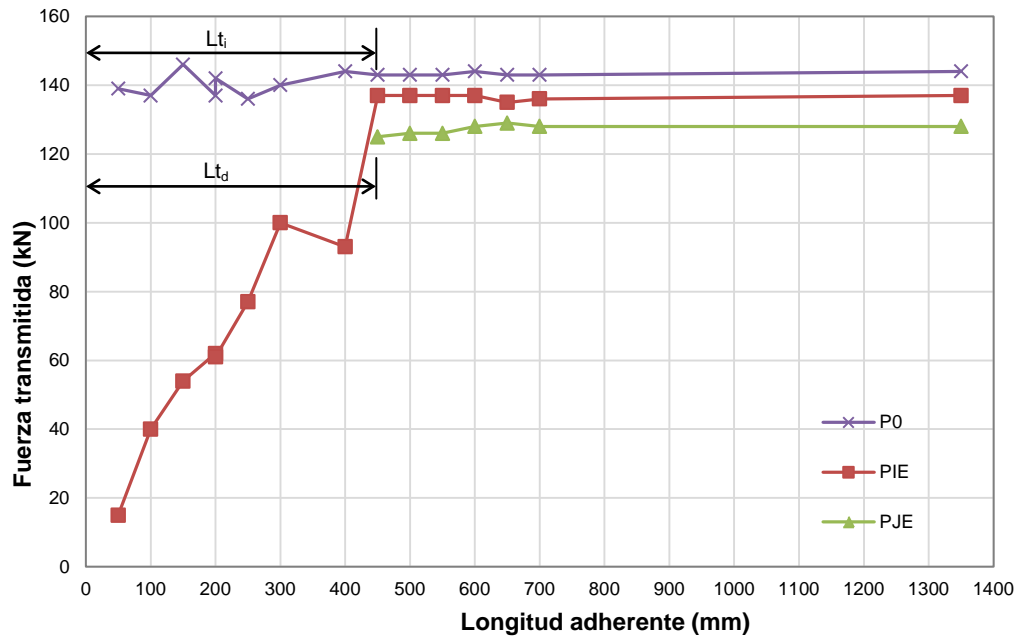


Figura 6.1.3. Longitud de transmisión sin variación en el tiempo por el método ECADA. Fuerza vs. Longitud adherente. Serie HT-A-100-24.

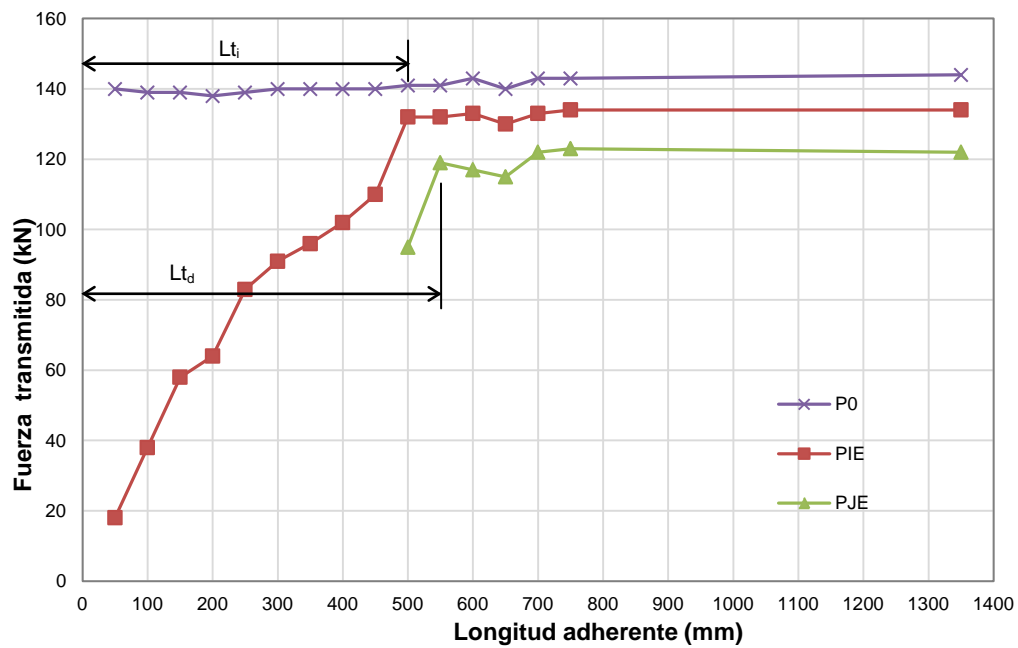


Figura 6.1.4. Longitud de transmisión diferida con variación en el tiempo por el método ECADA. Fuerza vs. Longitud adherente. Serie HT-A-80-24.

La Tabla 6.1.1 resume los resultados obtenidos de longitud de transmisión inicial y diferida para las distintas series analizadas durante un periodo de 12 meses, y los niveles de tensión obtenidos a partir de dividir la fuerza efectiva de pretensado inicial entre la sección transversal de la probeta y la resistencia a compresión del hormigón en el momento de la transmisión del pretensado.

Es evidente que mediante el método de ensayo se puede analizar la evolución de la longitud de transmisión con el tiempo en elementos de hormigón pretensado, determinando la longitud de transmisión al realizar el destesado y durante el almacenamiento de las probetas.

Serie	Longitud de transmisión ECADA+ (mm)		Variación tras 12 meses de la longitud de transmisión		Nivel de tensiones
	Inicial	Diferida	(mm)	(%)	
HT-A-80-24	500	550	50	10	0.43
HT-A-100-12	650	700	50	7.7	0.34
HT-A-100-24	450	450	-	-	0.27
HT-B-80-24	600	700	100	16.7	0.69
HT-B-80-48	550	650	100	18.2	0.62
HT-B-100-24	650	650	-	-	0.45
HT-B-100-48	650	650	-	-	0.40
HT-C-80-48	800	800	-	-	0.77
HT-C-100-24	800	800	-	-	0.60
HT-C-100-48	650	750	100	15.4	0.50

**Tabla 6.1.1.** Resumen de la variación de la longitud de transmisión diferida para las diferentes series.

\* % de incremento a 12 meses desde la transmisión del pretensado

En lo relativo a la longitud de transmisión inicial, y visto los resultados de la Tabla 6.1.1, se puede comentar:

- A mayor edad de destesado se presenta una menor longitud de transmisión inicial (HT-A-100-24 vs. HT-A-100-12, HT-B-80-48 vs. HT-B-80-24, HT-C-100-48 vs. HT-C-100-24), pero en HT-B-100-24 vs. HT-B-100-48 son iguales.
- A mayor resistencia a compresión menor longitud de transmisión inicial (HT-A-100-24/HT-B-100-24/HT-C100-24, HT-A-80-24/HT-B-80-24, HT-B-80-48/HT-C-80-48), pero en HT-B-100-48 vs. HT-C-100-48 son iguales.

- No se aprecia una influencia clara de la sección transversal de la probeta sobre la longitud de transmisión inicial.

Tomando los resultados de la Tabla 6.1.1 y observando las Figuras del anejo G, respecto a la longitud de transmisión diferida se presenta las siguientes observaciones:

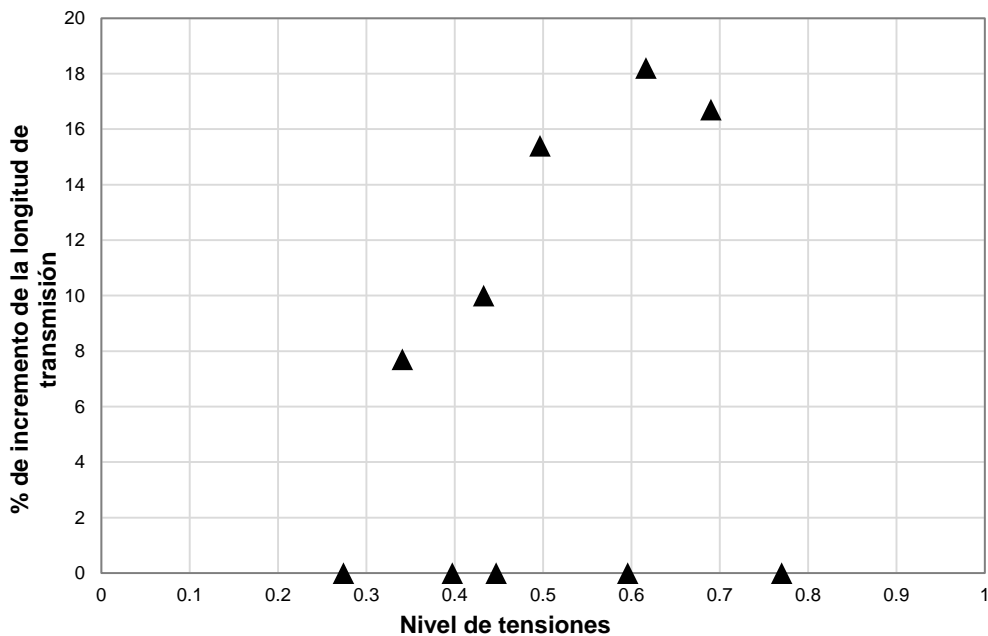
- Al igual que para la longitud de transmisión inicial, a mayor edad de destesado se presenta una menor longitud de transmisión diferida (HT-A-100-24 vs. HT-A-100-12, HT-B-80-48 vs. HT-B-80-24, HT-C-100-48 vs. HT-C-100-24), pero en HT-B-100-24 vs. HT-B-100-48 son iguales.
- Al aumentar la resistencia a compresión del hormigón se obtiene una menor longitud de transmisión diferida (HT-A-100-24/HT-B-100-24/HT-C100-24, HT-B-100-48/HT-C-100-48, HT-A-80-24/HT-B-80-24, HT-B-80-48/HT-C-80-48).
- A menor sección transversal se produce un aumento de la longitud de transmisión diferida (HT-A-80-24 vs. HT-A-100-24, HT-B-80-24 vs. HT-B-100-24, HT-C-80-48 vs. HT-C-100-48), salvo en HT-B-80-48 vs. HT-B-100-48 son iguales.

Los casos en los que se produce una variación o incremento de la longitud de transmisión según la Tabla 6.1.1 son:

- Para series de probetas con menor sección transversal (HT-A-80-24 vs. HT-A-100-24, HT-B-80-24 vs. HT-B-100-24, HT-B-80-48 vs. HT-B-100-48), excepto HT-C-80-48 vs. HT-C-100-48.
- Para series de probetas con sección transversal de  $100 \times 100 \text{ mm}^2$  al disminuir la edad de destesado (HT-A-100-12 vs. HT-A-100-24), y adicionalmente para una serie de probetas con edad de destesado mayor (HT-C-100-48).
- Los resultados con hormigón tipo C presentan un incremento de la longitud de transmisión para la serie HT-C-100-48 (edad de destesado mayor y sección transversal superior) y no presenta variación de la longitud de transmisión al disminuir la edad de destesado (HT-C-100-48 vs. HT-C-100-24), como al reducir la sección transversal (HT-C-100-48 vs. HTC-80-48). Esto puede ser atribuido a que los valores de la longitud de transmisión inicial son mayores para HT-C-100-24 y HT-C-80-48 (800 mm) y se mantienen con el tiempo, mientras que la longitud de transmisión inicial para la serie HT-C-100-48 es menor (650 mm) e incrementa 100 mm en un periodo de 5 meses.

La Figura 6.1.5 muestra la influencia de los niveles de tensión en el hormigón respecto del correspondiente porcentaje de incremento de la longitud de transmisión registrada. Como puede observarse, pueden producirse o no variaciones de la longitud de transmisión, pero los casos en los que sucede este incremento coinciden con los que presentan mayor nivel de tensiones en el hormigón. Esto quiere decir que a niveles bajos de tensión el porcentaje de incremento es menor, pero a medida que se tienen niveles de tensión altos, serán mayores los incrementos de la longitud de transmisión, en consecuencia los resultados iniciales de la longitud de transmisión serán menos estables a medida que aumente el nivel de tensión en el hormigón.

Finalmente, la variación de la  $L_{td}$  para las distintas series se produjo dentro de los primeros meses. Estos periodos de tiempo en los que ocurre la variación de la  $L_{td}$  son mayores que lo propuesto por Lane (1992), Barnes et al. (2003) y Oh y Kim (2000) al afirmar que el mayor incremento de la longitud de transmisión con el tiempo se produce en los primeros días. Adicionalmente como se señaló en el Capítulo 2, la mayor parte de las investigaciones enfocan sus estudios entre 7 y 28 días, siendo edades muy cortas para analizar el efecto del tiempo en la longitud de transmisión.



**Figura 6.1.5.** Porcentaje de incremento de la longitud de transmisión vs. Nivel de tensiones en el hormigón.

## 6.2 Análisis de la longitud de transmisión diferida a partir de los deslizamientos en el extremo libre.

Para cada probeta de hormigón pretensado almacenada, se midió el deslizamiento en el extremo libre durante un periodo de tiempo  $j$ . En la Figura 6.2.1 se representa para cada probeta la evolución del deslizamiento para las condiciones de ensayo de la serie HT-A-80-24. Como puede observarse, los deslizamientos de la armadura en el extremo libre presentan valores similares para todas las probetas con excepción de la probeta con menor longitud adherente (HT-A-100-24-500). Esta probeta muestra un comportamiento diferente a los dos meses de haberse realizado la transmisión del pretensado, registrando un mayor deslizamiento con el tiempo en comparación con los deslizamientos en el extremo libre de las demás probetas ensayadas. Por consiguiente, y de acuerdo con los resultados medidos con el criterio de fuerzas en este caso, existe variación de la longitud de transmisión. Este proceso puede ser progresivo, indicando que la longitud de transmisión cambia a la siguiente probeta de mayor longitud adherente.

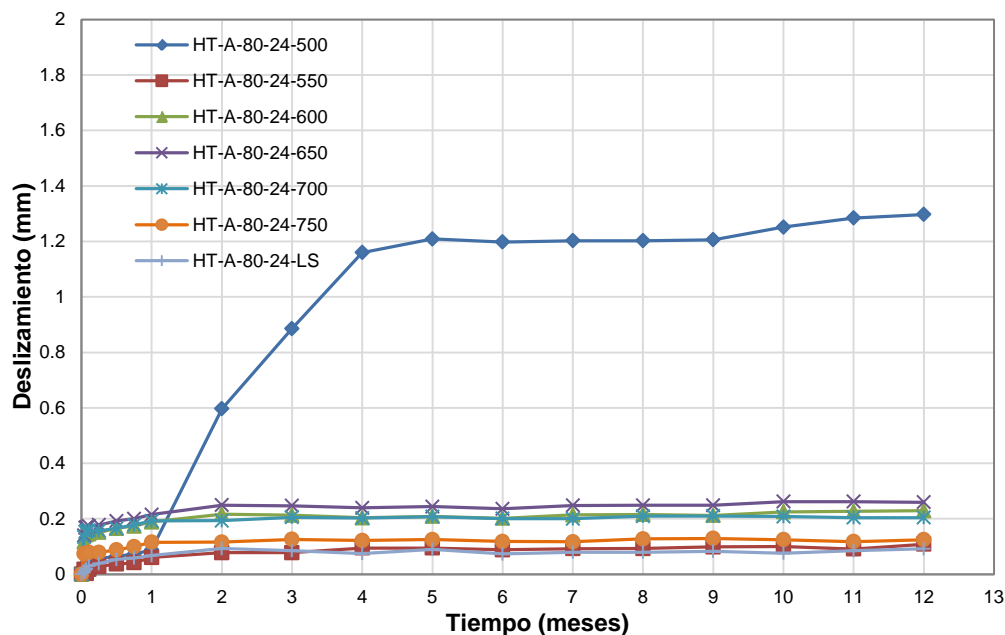
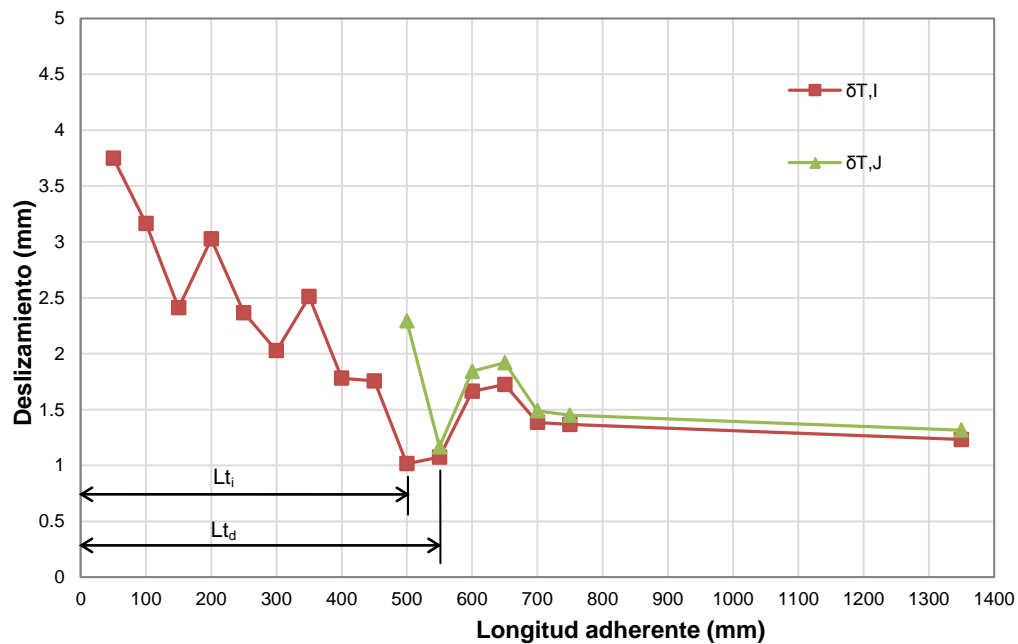


Figura 6.2.1. Deslizamiento diferido para la serie de probetas HT-A-80-24.

Los resultados de las series para representar la  $L_{td}$  se presentan en perfiles de deslizamientos en el extremo libre, para los deslizamientos inicial ( $\bar{\delta}_{T,1}$ ) y final ( $\bar{\delta}_{T,j}$ ), como se muestra en la Figura 6.2.2.



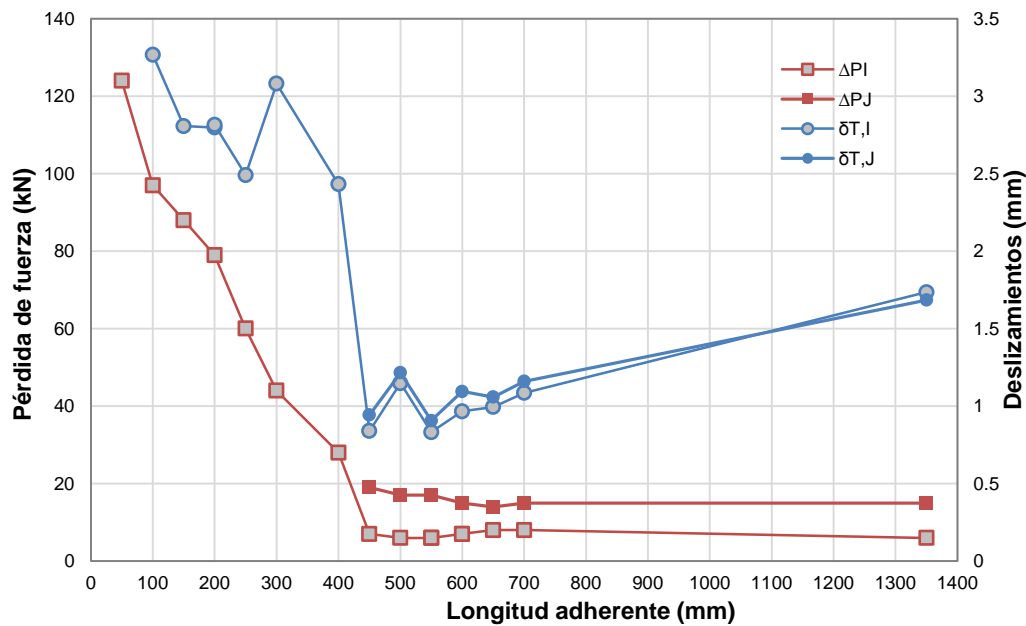
**Figura 6.2.2.** Longitud de transmisión diferida por el método del deslizamiento en el extremo libre. Serie de probetas HT-A-80-24.

Estas curvas presentan un comportamiento bilineal similares a los perfiles expuestos con el criterio de fuerzas. La curva de deslizamiento para 12 meses de mediciones ( $\delta_{T,J}$ ), presenta un cambio en la longitud adherente de 500 mm respecto de la curva  $\delta_{T,I}$ ; esto indica que se produce la variación en la longitud de transmisión. Por lo tanto se considera que la  $L_{t_d}$  a 12 meses corresponde a la siguiente longitud adherente (550 mm) donde no se ha incrementado el deslizamiento.

### 6.2.1 Análisis de los resultados obtenidos por el método ECADA+ y por el criterio de desplazamientos en el extremo libre de la probeta.

Los resultados de las series para evaluar la longitud de transmisión inicial y diferida a partir de la evolución de los desplazamientos en el extremo libre ( $\delta_{T,I}$  y  $\delta_{T,J}$ ), se presentan en curvas bilineales de forma similar a las curvas obtenidas con el criterio de pérdidas de fuerzas ( $\Delta P_I$  y  $\Delta P_J$ ) como se representa en la Figura 6.2.1.1.

Las curvas de deslizamiento muestran el inicio de una rama prácticamente horizontal en correspondencia con la obtenida por el método de pérdida de fuerzas. Por lo que cabe pensar en determinar la longitud de transmisión inicial y diferida a partir de la secuencia de desplazamientos en el extremo libre de la probeta.

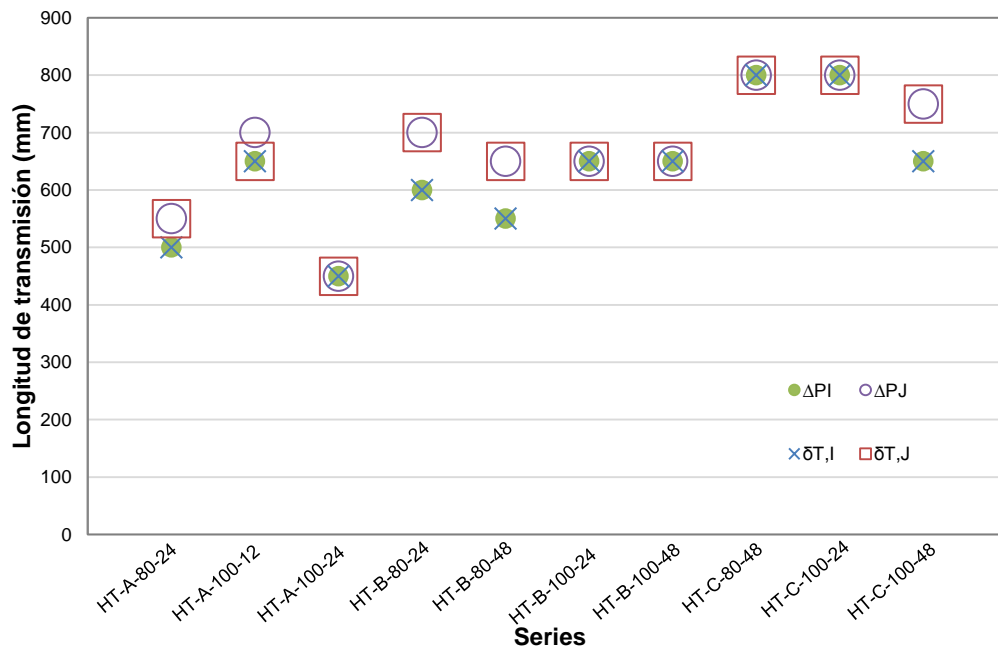


**Figura 6.2.1.1.** Longitud de transmisión diferida por el criterio de pérdida de fuerza y deslizamientos en el extremo libre. Serie de probetas HT-A-100-24.

A partir en los resultados recogidos en la Tabla 5.3.4.1 y en el Anejo G y Anejo I para los criterios de fuerzas y deslizamientos, es posible realizar una comparación entre estos dos criterios sobre la longitud de transmisión inicial y diferida, como se observa en la Figura 6.2.1.2.

Los resultados analizados de la longitud de transmisión inicial coinciden para todas las series según los dos criterios utilizados como puede observarse en la Figura 6.2.1.2. La longitud de transmisión diferida coincide en todos los casos, tanto en las series donde se presenta una variación de la longitud de transmisión, como para las series que mantienen su longitud de transmisión inicial con el tiempo. Solo la serie HT-A-100-12 difiere con el criterio de fuerzas al no variar la longitud de transmisión diferida, siendo ésta 50 mm mayor a la longitud de transmisión diferida con el criterio de deslizamientos en el extremo libre. Por esta razón, es evidente el mejor comportamiento del método de ensayo ECADA+, ya que tiene una mayor sensibilidad para detectar el incremento de la longitud de transmisión, en casos (menor edad de destesado) donde es más probable que se produzca variación de la longitud de transmisión con el tiempo.





**Figura 6.2.1.2.** Comparación de la longitud de transmisión inicial y diferida según el criterio de pérdida de fuerza y deslizamientos en el extremo libre para las diferentes series.

## 6.2.2 Comparación de los resultados obtenidos por el método ECADA+ y los resultados obtenidos con por la expresión de Guyon.

La ecuación propuesta por Guyon (Guyon Y.1953) para predecir la longitud de transmisión ( $L_t$ ) es;

$$L_t = \alpha \frac{\delta E_p}{\sigma_{p0}}$$

Ec. 6.2.2.1

donde:

$\alpha$  = coeficiente que depende de la distribución de la tensión adherente a lo largo de la longitud de transmisión ( $\alpha = 2$  distribución uniforme de la tensión adherente y  $\alpha = 3$  distribución lineal de la tensión adherente).

$\delta$  = deslizamiento en el extremo libre (mm).

$E_p$  = módulo de elasticidad de la armadura (MPa).

$\sigma_{p0}$  = tensión en la armadura antes del destesado.

Para cada serie la ecuación de Guyon ha sido aplicada a los resultados de deslizamientos obtenidos en el extremo libre una vez se ha efectuado la transmisión del pretensado y después de 12 meses, empleando los coeficientes  $\alpha = 2$  y  $\alpha = 3$ . Esto se ha aplicado a probetas con longitud adherente igual o mayor que la longitud de transmisión según el método de ensayo ECADA+. Se calculó la media de las

longitudes de transmisión inicial y diferida para cada coeficiente, excluyendo las probetas que pasaran a tener una longitud menor de la longitud de transmisión por el hecho de producirse un incremento de la longitud de transmisión.

En la Figura 6.2.2.1 se observa una gran variabilidad en la longitud de transmisión inicial y diferida de la serie HT-A-80-24 para los diferentes coeficientes ( $\alpha = 2$  y  $\alpha = 3$ ). En la mayoría de los casos la longitud de transmisión puede llegar a ser prácticamente el doble dentro de una misma combinación. Por ejemplo, los valores de la longitud de transmisión inicial para los coeficientes  $\alpha = 2$  y  $\alpha = 3$  varían entre los rangos 282 hasta 504 mm y desde 424 hasta 756 mm, respectivamente. En cuanto a los rangos obtenidos a partir de la media de los deslizamientos para calcular la longitud de transmisión inicial y diferida (los valores de deslizamientos de la probeta HT-A-80-24-500 a 12 meses han sido excluidos para obtener el promedio de la longitud de transmisión diferida), se puede apreciar cómo las longitudes de transmisión aumentan con el tiempo. Así, la longitud de transmisión muestra un incremento en 12 meses de  $422 - 381 = 41$  mm cuando  $\alpha = 2$  y  $633 - 572 = 61$  mm cuando  $\alpha = 3$ . Estos valores son de un orden de magnitud similar a los 50 mm de resolución de longitudes adherentes adoptados en el programa de ensayos.

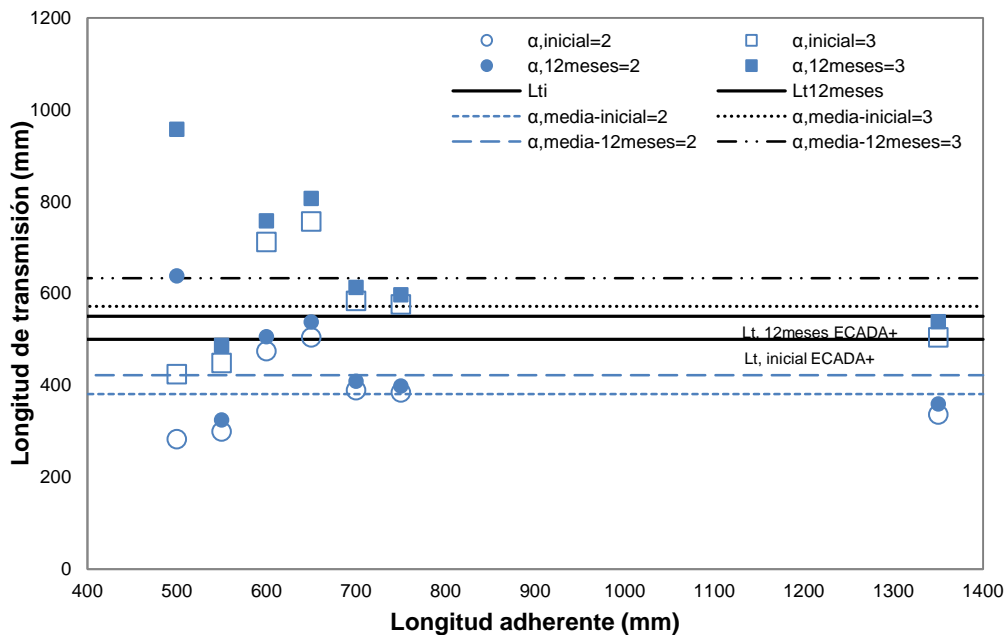
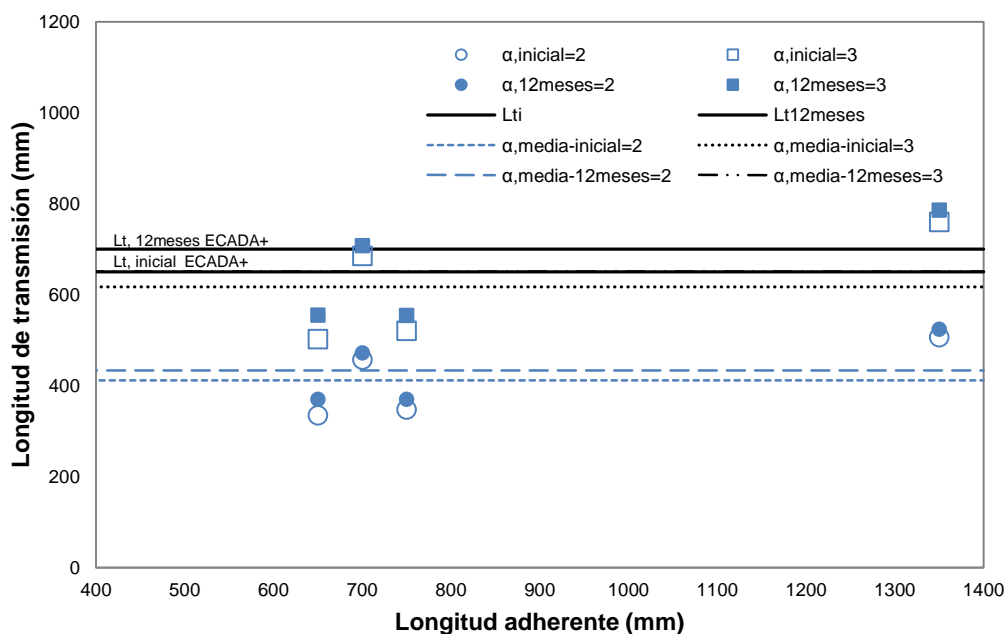


Figura 6.2.2.1. Comparativa de los resultados según el criterio de deslizamientos y ECADA+. Serie HT-A-80-24.

Por otra parte, la longitud de transmisión diferida obtenida de los deslizamientos en el extremo libre para la probeta HT-A-80-24-500, podría ser 638 mm cuando  $\alpha = 2$  y 957 mm cuando  $\alpha = 3$ . Para esta probeta la variación de la longitud de transmisión

con el tiempo sería de  $638 - 282 = 356$  mm para  $\alpha = 2$  y  $957 - 424 = 533$  mm para  $\alpha = 3$ . Este resultado sería evidentemente muy exagerado, pues no es de aplicación la expresión de Guyon, y nada coherente con los resultados en el programa de ensayo realizado.

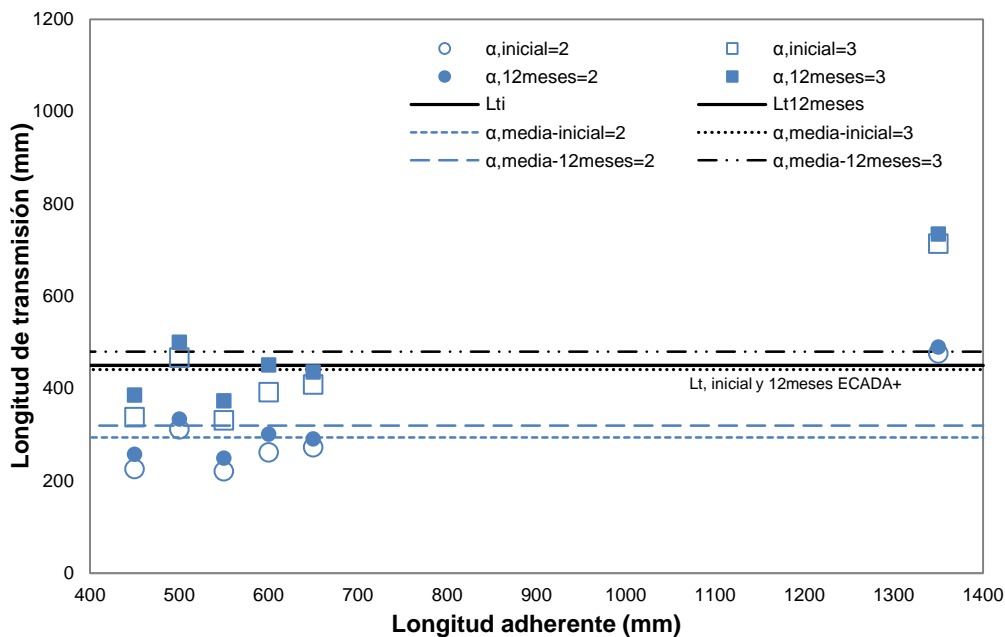
Los resultados obtenidos con el método EDACA+ y aplicando la ecuación de Guyon se presentan en la Figura 6.2.2.2 para la serie HT-A-100-12. Según el método ECADA+ la longitud de transmisión inicial es de 650 mm y la longitud de transmisión diferida es de 700 mm, resultando un incremento de la longitud de transmisión de 50 mm a 12 meses. Al igual que en la mayoría de las series se observa una gran variabilidad de los resultados. En este caso las medias de la longitud de transmisión al aplicar la ecuación de Guyon son inferiores a los resultados obtenidos por el método ECADA+. Al aplicar la ecuación de Guyon presenta una variación ( $434 - 411 = 23$  mm cuando  $\alpha = 2$  y  $651 - 617 = 34$  mm cuando  $\alpha = 3$ ) siendo menor a los 50 mm del incremento a 12 meses según la resolución de longitud adherente usada.



**Figura 6.2.2.2.** Comparativa de los resultados según el criterio de deslizamientos y ECADA+. Serie HT-A-100-12.

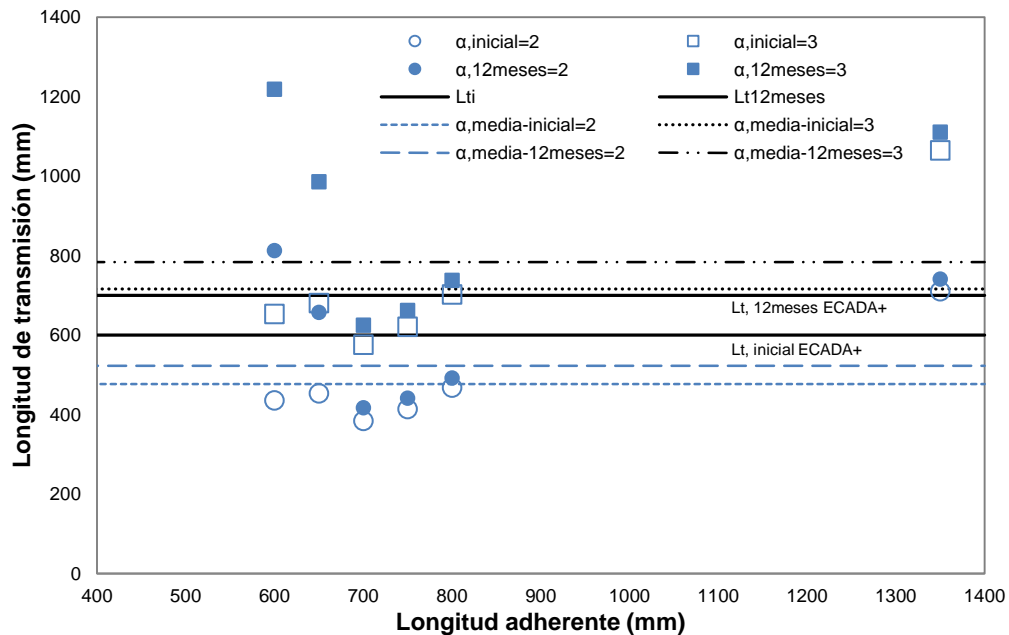
La Figura 6.2.2.3 muestra los resultados de la serie HT-A-100-24. Para esta serie según el método ECADA+ no se observó variación de la longitud de transmisión, permaneciendo en 450 mm. En cambio, al aplicar la ecuación de Guyon se aprecia una variación de los resultados sobretodo si se compara las probetas más cortas y la probeta de 1350 mm que oscilan en un rango de 249 mm para  $\alpha = 2$  y de 734 mm para  $\alpha = 3$ . Al igual que en las series anteriores, los valores de deslizamientos

aumentan con el tiempo, comprobando que se produce un incremento de la longitud de transmisión ( $320 - 294 = 26$  mm para  $\alpha = 2$  y  $480 - 441 = 39$  mm). Estos valores son inferiores a la resolución de longitud adherente usada con el método de ensayo ECADA+ (50 mm).



**Figura 6.2.2.3.** Comparativa de los resultados según el criterio de deslizamientos y ECADA+. Serie HT-A-100-24.

En la Figura 6.2.2.4 se puede observar que la amplitud de los intervalos de longitud de transmisión inicial y diferida es muy variable para las diferentes longitudes adherentes en la serie de probetas HT-B-80-24. Los resultados logrados por el método ECADA+ están localizados dentro los rangos medios de la longitud de transmisión aplicando la ecuación de Guyon. Por otro lado, la longitud de transmisión diferida obtenida de los deslizamientos para las probetas HT-B-80-24-600 y HT-B-80-24-650 es muy grande (812 y 657 mm para  $\alpha=2$ , 1218 y 986 mm para  $\alpha=3$  respectivamente), obteniendo un incremento de la longitud de transmisión de 377 mm ( $\alpha=2$ ) y 565 mm ( $\alpha=3$ ) para la probeta HT-B-80-24-600 y de 204 mm ( $\alpha=2$ ) y 306 mm ( $\alpha=3$ ) para la probeta HT-B-80-24-650, estos valores son mucho mayores a los 100 mm obtenidos con el método ECADA+. El incremento de longitud de transmisión es de 45 mm para  $\alpha=2$  y 68 mm para  $\alpha=3$ . Estos valores son menores al incremento obtenido con el método ECADA+.



**Figura 6.2.2.4.** Comparativa de los resultados según el criterio de deslizamientos y ECADA+. Serie HT-B-80-24.

Los resultados de la serie HT-B-80-48 se presentan en la Figura 6.2.2.5. En cuanto a la longitud de transmisión inicial y diferida utilizando la ecuación de Guyon se aprecia una gran variabilidad de los resultados, en comparación al método de ensayo ECADA+, que para esta serie tiene una  $L_{ti} = 550$  y  $L_{td} = 650$  mm. Ahora bien, el incremento de la longitud de transmisión obtenida a partir de los deslizamientos es de 54 mm y 81 mm para  $\alpha=2$  y  $\alpha=3$ , respectivamente. Estos valores son menores al incremento con el método de ensayo ECADA+ y el método de secuencia deslizamientos (100 mm).

Según los resultados de la Figura 6.2.2.6 la longitud de transmisión inicial y a 12 meses por el método ensayo ECADA+ (650 mm) se encuentra entre los rangos obtenidos al emplear los deslizamientos medios en la ecuación de Guyon. Aunque para el método de ECADA+ no se observa la variación de la longitud de transmisión (serie HT-B-100-24), con los valores obtenidos a partir de los deslizamientos, si existe un incremento en la longitud de transmisión 24 mm cuando  $\alpha = 2$  y 36 mm cuando  $\alpha = 3$ . Estos valores son menores a los 50 mm utilizados como resolución de longitud adherente del método ECADA+.

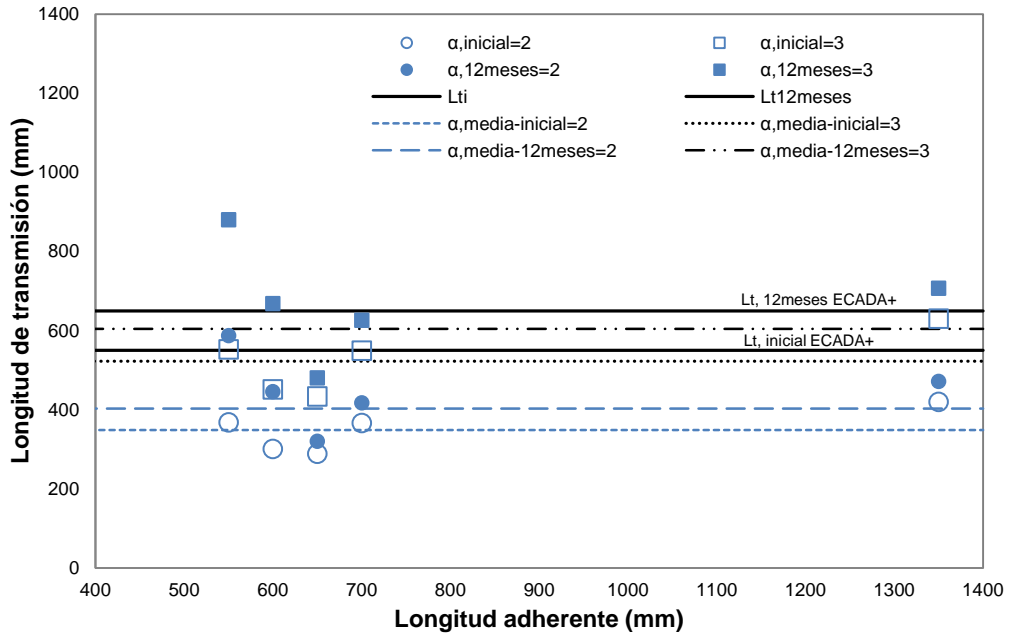


Figura 6.2.2.5. Comparativa de los resultados según el criterio de deslizamientos y ECADA+. Serie HT-B-80-48.

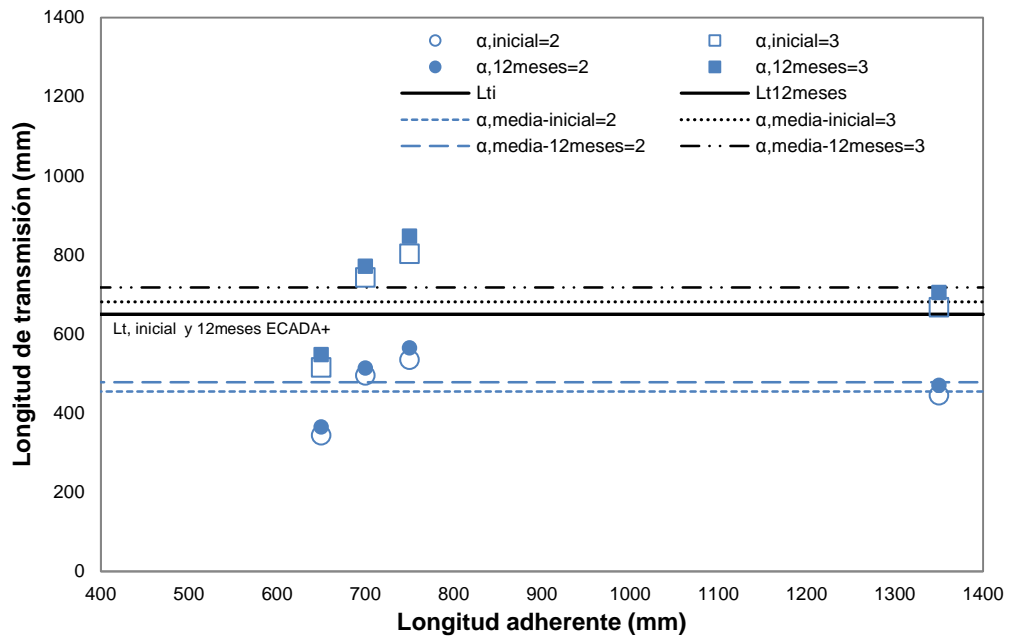
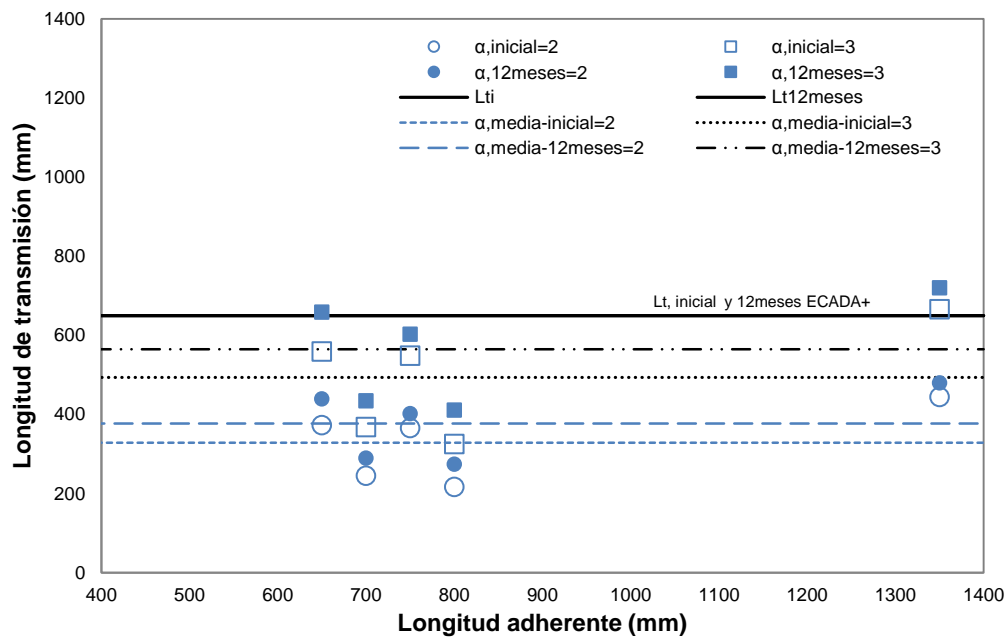


Figura 6.2.2.6. Comparativa de los resultados según el criterio de deslizamientos y ECADA+. Serie HT-B-100-24.

En la Figura 6.2.2.7 se sigue confirmando la variabilidad de los resultados al implementar la ecuación de Guyón. Para esta serie la mayor parte de los resultados están por debajo de lo deducido con el método ECADA+, obteniendo variaciones de longitud de transmisión de 48 mm para  $\alpha = 2$  y 72 mm para  $\alpha = 3$ . Aunque con el criterio de deslizamientos se aprecia la variación de la longitud de transmisión, por el método ECADA+ no se ha observado esta variación.



**Figura 6.2.2.7.** Comparativa de los resultados según el criterio de deslizamientos y ECADA+. Serie HT-B-100-48.

Las Figuras 6.2.2.8 y 6.2.2.9 presentan los resultados de las series HT-C-80-48 y HT-C-100-24. Para estas series de hormigón tipo C se presentan deslizamientos más elevados, ocasionando una gran amplitud de los intervalos de longitud de transmisión media para los diferentes coeficientes, principalmente al utilizar  $\alpha = 3$ , alcanzando longitudes de transmisión diferidas superiores a 1200 mm. En ambas series los resultados con el método ECADA+ no constatan un incremento de la longitud de transmisión con el tiempo, mientras que al aplicar la ecuación de Guyon se aprecia un incremento de entre 40 y 60 mm, según el coeficiente  $\alpha$  aplicado.

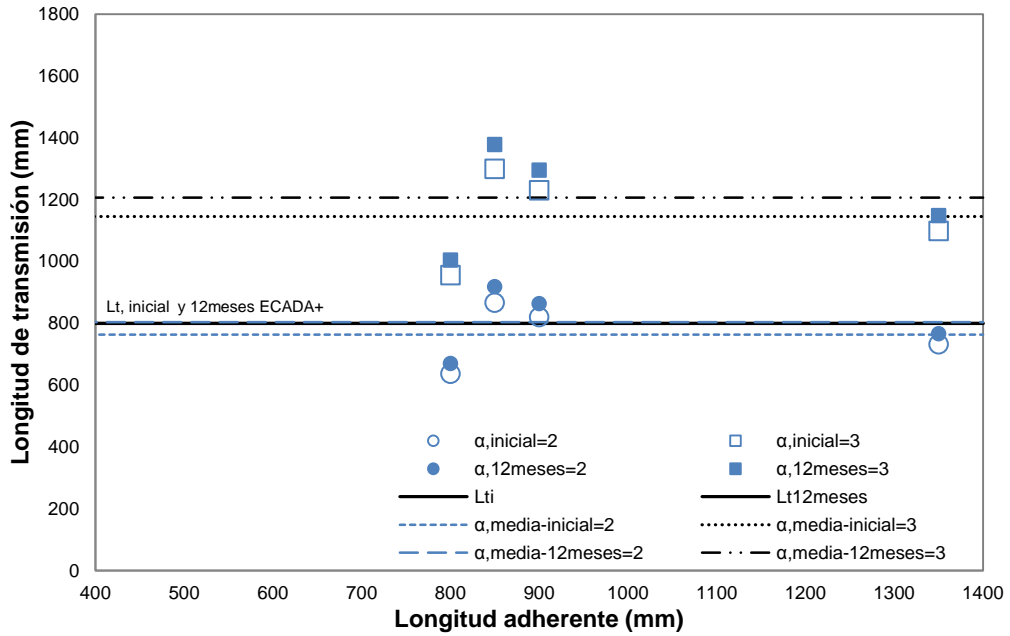


Figura 6.2.2.8. Comparativa de los resultados según el criterio de deslizamientos y ECADA+. Serie HT-C-80-48.

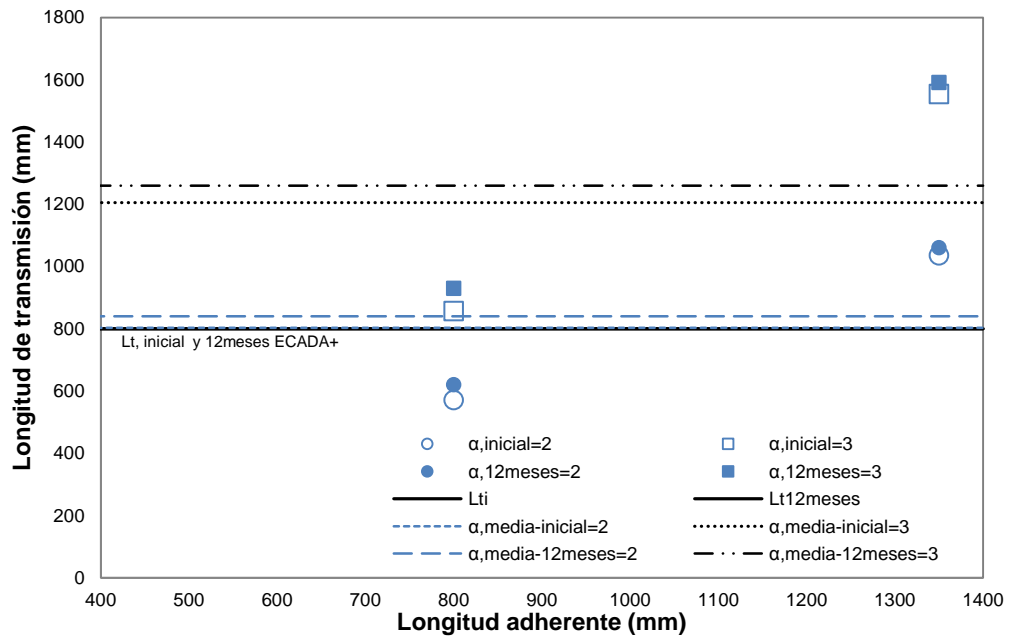
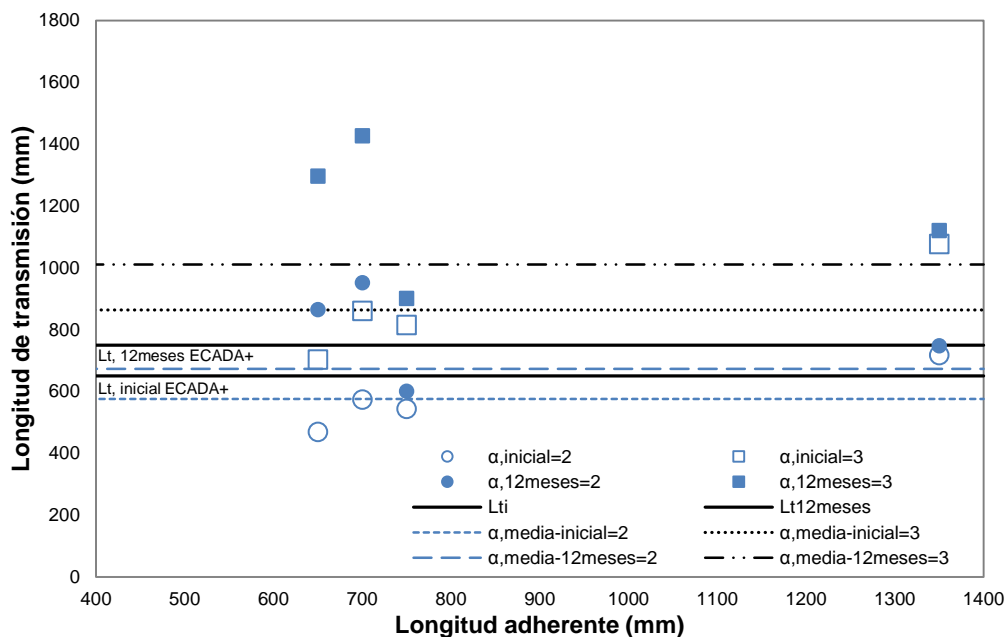


Figura 6.2.2.9. Comparativa de los resultados según el criterio de deslizamientos y ECADA+. Serie HT-C-100-24.



En la Figura 6.2.2.10 se observa una gran variabilidad de los resultados obtenidos a partir de los deslizamientos de la armadura en extremo libre para la serie HT-C-100-48, y al igual que en las series anteriores la longitud de transmisión puede llegar a ser prácticamente el doble dentro de una misma combinación. En cuanto a los rangos obtenidos a partir de la media de los deslizamientos para calcular la longitud de transmisión inicial y diferida, se puede apreciar cómo aumentan con el tiempo, incrementando a 12 meses en 98 mm para  $\alpha = 2$  (menor que 100 mm con el método ECADA+) y 147 mm para  $\alpha = 3$  (mayor que 100 mm con el método ECADA+). Adicionalmente, en las probetas HT-A-100-48-650 y HT-A-100-48-700 la longitud de transmisión diferida obtenida de los deslizamientos en el extremo libre es muy grande (864 y 951 mm cuando  $\alpha = 2$ ; 1296 y 1426 mm cuando  $\alpha = 3$ ), alcanzando incrementos en la longitud de transmisión aproximadamente para las dos probetas de 380 mm para  $\alpha = 2$  y 590 mm para  $\alpha = 3$ . Estos incrementos son superiores a los conseguidos por el método ECADA+.



**Figura 6.2.2.10.** Comparativa de los resultados según el criterio de deslizamientos y ECADA+. Serie HT-C-100-48.

La Figura 6.2.2.11 presenta los resultados de la longitud de transmisión inicial y diferida obtenidos con el método ECADA+ y el correspondiente deslizamiento en el extremo libre de las probetas con longitud adherente igual o mayor que la longitud de transmisión de cada serie organizadas por tipo de hormigón. Adicionalmente se presentan los valores extremos de la longitud de transmisión para los coeficientes  $\alpha$ , determinados a partir de la ecuación de Guyon.

Como se puede apreciar en la Figura 6.2.2.11, se presentan mayores deslizamientos iniciales y diferidos en el hormigón de menor resistencia (HT-C), mientras que en el hormigón tradicional A y B de mejor características los deslizamientos son menores. Basándonos en esta observación se ha obtenido por medio del análisis de regresión de los resultados un coeficiente  $\alpha = 2$  para el hormigón C y  $\alpha = 2.8$  para los hormigones A y B. Estos coeficientes pueden tomarse para los resultados iniciales y diferidos de la longitud de transmisión.

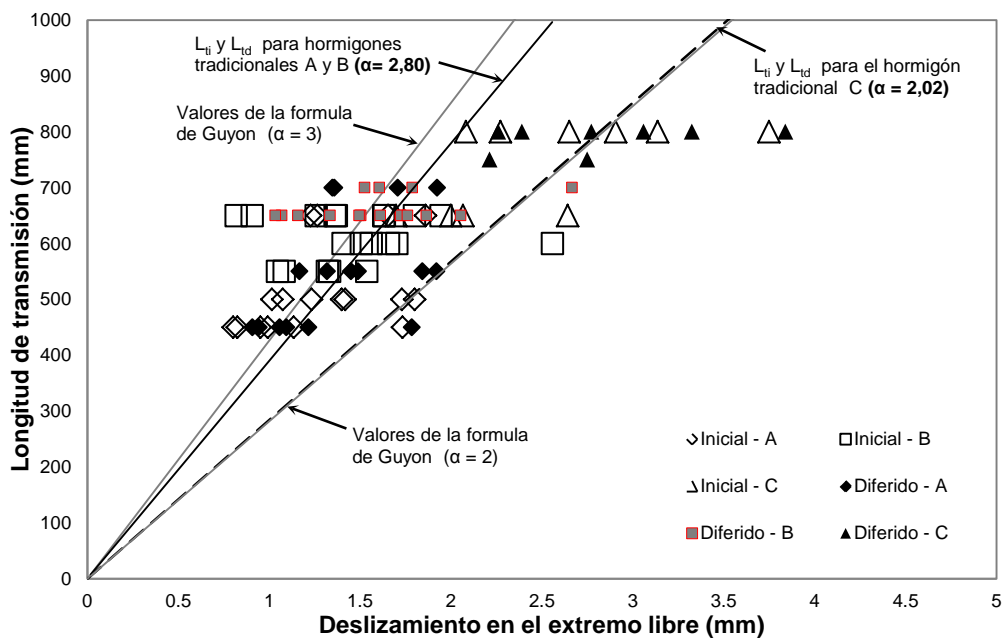


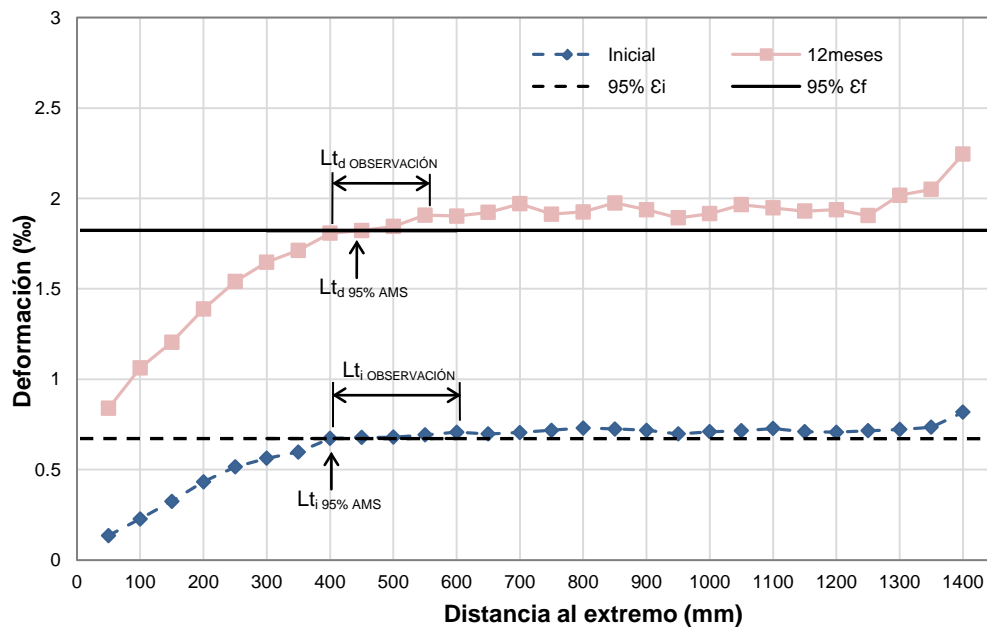
Figura 6.2.2.11. Coeficiente  $\alpha$  según los resultados experimentales para las diferentes series dependiendo el tipo de hormigón.

### 6.3 Análisis de la longitud de transmisión diferida con el método de deformaciones longitudinales de la probeta de hormigón (DEMEC)

De las probetas instrumentadas con extensometría mecánica DEMEC, se han obtenido perfiles de deformación longitudinal del hormigón a lo largo de la probeta para determinar la longitud de transmisión inicial ( $L_{ti}$ ) y la longitud de transmisión diferida ( $L_{td}$ ). Se optó por utilizar el criterio del 95% de la media de las deformaciones máximas (95% AMS) y el criterio de observación directa del inicio de la meseta.

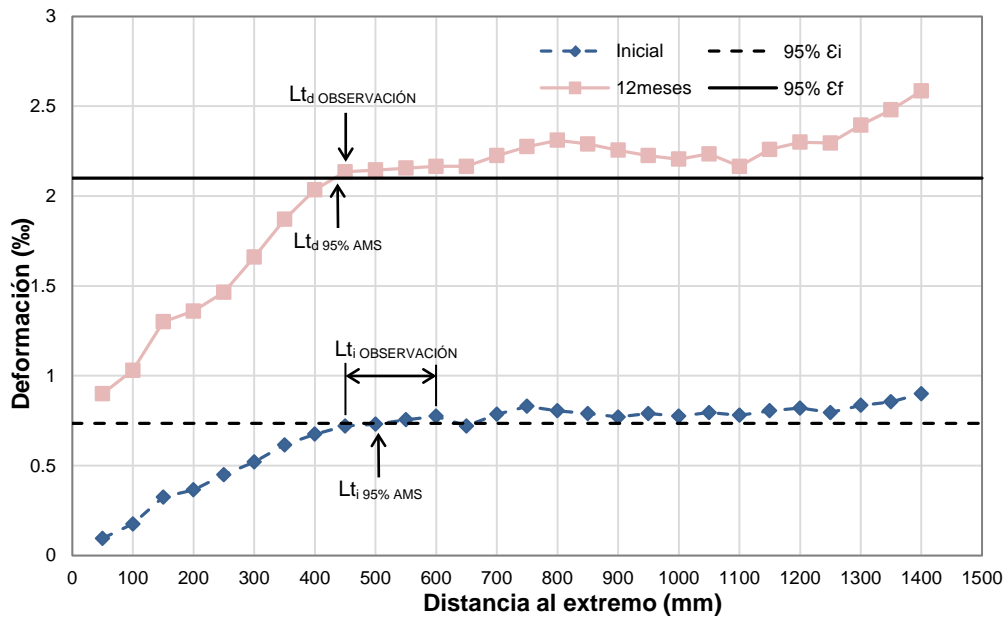
Las Figuras 6.3.1 y 6.3.2 muestran los resultados según los dos criterios tomados para determinar la longitud de transmisión para las probetas de hormigón de 1350 mm HT-A-100-24-LS y HT-A-100-12-LS, respectivamente. En la Figura 6.3.1

se puede observar que el punto de intersección entre el tramo inicial y el comienzo de la meseta para la  $L_{t_i}$  no se define claramente, oscilando entre 400 y 600 mm. Este mismo efecto se reproduce para la  $L_{t_d}$ , para la que podría interpretarse el inicio de la meseta entre 400 y 550 mm, quedando sin definir si se produce el incremento de la  $L_{t_d}$ . En cuanto al criterio del 95% AMS se observa que el inicio de la meseta se encuentra en 399 mm para la  $L_{t_i}$ , y transcurridos 12 meses se produce una variación de aproximadamente 50 mm, alcanzando la  $L_{t_d}$  448 mm.



**Figura 6.3.1.** Longitud de transmisión por el método de la media de las deformaciones máximas (DEMEC). Deformación Vs. Longitud de probeta. Probeta HT-A-100-24-LS.

Respecto de la Figura 6.3.2 se observa cómo la  $L_{t_i}$  de la probeta HT-A-100-12-LS varía según el criterio de observación entre 450 y 600 mm, y según el criterio del 95% AMS se encuentra en 508 mm. Ahora bien, según el perfil de deformaciones para 12 meses la  $L_{t_d}$  se halla claramente en 450 mm según el criterio de observación; esto indicaría que la  $L_{t_i}$  pasó de estar entre 450 y 600 mm a definirse a lo largo de 12 meses en 450 mm, aunque no se podría precisar si tuvo algún incremento de la  $L_{t_d}$ . Referente al criterio del 95% AMS, la  $L_{t_d}$  manifiesta una disminución de 69 mm, resultando una  $L_{t_d}$  de 439 mm.



**Figura 6.3.2.** Longitud de transmisión por el método de la media de las deformaciones máximas (DEMEC). Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-A-100-12-LS.

La Tabla 6.3.1 sintetiza los resultados de la  $L_{t_i}$  y la  $L_{t_d}$  para todas las probetas instrumentadas con extensometría mecánica DEMEC. Asimismo se muestra el porcentaje de variación de la longitud de transmisión diferida para 12 meses. En el criterio de observación las probetas donde no se ha identificado plenamente el inicio de la meseta se ha dejado en paréntesis el valor a descartar para tener un criterio del inicio de la meseta.

Se observa cómo para el criterio del 95% AMS en tres probetas (HT-A-100-6-LS, HT-A-80-12-LS y HT-A-100-12-LS) la  $L_{t_d}$  disminuye 4, 5 y 14% respectivamente. Mientras que las probetas restantes la  $L_{t_d}$  incrementa hasta un 26%. Respecto al criterio de observación se aprecia que 10 de las 13 probetas en las que fue posible definir exactamente el inicio de la meseta el incremento de la  $L_{t_d}$  es nulo y en las probetas en que sí se observa el incremento de la  $L_{t_d}$  varía entre un 11 y un 18%.

Probeta	Longitud de transmisión Observación directa (mm)		Variación de la longitud de transmisión		Longitud de transmisión. 95% AMS (mm)		Variación de la longitud de transmisión	
	Inicial	Diferida	(mm)	(%)	Inicial	Diferida	(mm)	(%)
HT-A-60-24-LS	700	700-(750)	-	-	691	732	41	6
HT-A-60-48-LS	(250)-300	300	-	-	237	280	43	18
HT-A-80-12-LS	(400)-450	450	-	-	435	415	-20	-5
HT-A-80-24-LS	350-(500)	(450)-500	150	43	402	409	7	2
HT-A-80-24-LS-FA	350-(400)	400	50	14	352	369	17	5
HT-A-100-6-LS	850	850	-	-	879	844	-35	-4
HT-A-100-12-LS	450-(600)	450	-	-	508	439	-69	-14
HT-A-100-12-LS-FA	600	700	100	17	576	654	78	14
HT-A-100-24-LS	400-(600)	(400)-550	150	38	399	448	49	12
HT-A-100-24-LS-FA	350-(500)	(400)-500	150	43	366	394	28	8
HT-B-60-48-LS	350	350	-	-	341	349	8	2
HT-B-80-24-LS	600-(700)	700-(750)	100	17	602	616	14	2
HT-B-80-48-LS	500	500-(650)	-	-	490	552	62	13
HT-B-100-24-LS	550	550-(650)	-	-	528	538	10	2
HT-B-100-48-LS	600	600-(700)	-	-	575	585	10	2
HT-C-80-48-LS	850	1000	150	18	838	916	78	9
HT-C-100-24-LS	950	950	-	-	933	950	17	2
HT-C-100-48-LS	800	800	-	-	757	768	11	1
HR-100-48-LS	450	500	50	11	396	478	82	21
FA-60-24-LS	300	300	-	-	282	287	5	2
HAC-NF-100-48-LS	550-(650)	650	100	18	500	538	38	8
HAC-LF-100-48-LS	550-(650)	550-(700)	-	-	426	426	0	0
HAC-MF-100-48-LS	(450)-600	600	-	-	442	558	116	26
HAC-HF-100-48-LS	500-(650)	(550)-600	100	10	447	498	51	11

**Tabla 6.3.1.** Resumen de la variación de la longitud de transmisión diferida con el método de deformaciones para las diferentes probetas, según el criterio del 95% AMS y de observación.

\* % de incremento a 12 meses desde la transmisión del pretensado

### 6.3.1 Análisis paramétrico de la longitud de transmisión diferida con el método del 95% AMS

Para analizar el comportamiento de la longitud de transmisión diferida de las diferentes probetas de hormigón pretensado, por medio del método de las deformaciones longitudinales del hormigón, se decidió realizar un análisis paramétrico de las diferentes probetas según la edad de destesado, resistencia del hormigón, la sección transversal, el tipo de destesado y el tipo de hormigón. Este análisis se realiza con los resultados del criterio del 95% AMS, debido a que como se mencionó anteriormente con el criterio de observación no es posible definir claramente en la mitad de los casos la  $L_t$  o la  $L_{td}$ .

Los resultados se presentan en gráficas con la siguiente distribución: En el eje de las abscisas se tienen las probetas con su respectiva descripción (ver Capítulo 3). En el eje de las ordenadas se representa la longitud adherente, que para cada probeta simboliza la longitud de transmisión inicial y final, y en el eje de las ordenadas secundario se presenta el porcentaje de incremento de la longitud de transmisión.

### 6.3.1.1 Edad de destesado

El propósito de este apartado es analizar la influencia de la edad de destesado en la longitud de transmisión. Para ello se han organizado grupos manteniendo constante el tipo de hormigón (A, B o C) y la sección de la probeta (100x100 mm<sup>2</sup>, 80x80 mm<sup>2</sup> o 60x60 mm<sup>2</sup>). Dentro de cada grupo se ordenan las probetas en función de la edad de destesado.

La Figura 6.3.1.1.1 presenta los resultados para el hormigón tipo A, con sección de 100x100 mm<sup>2</sup> y edad de destesado a 6, 12 y 24 horas. Se aprecia como  $L_{ti}$  disminuye a medida que aumenta la edad de destesado para las diferentes probetas. Caso contrario se tiene con  $L_{td}$ , que en algunos casos (HT-A-100-6-LS/ HT-A-100-12) se mantiene con el tiempo o disminuye.

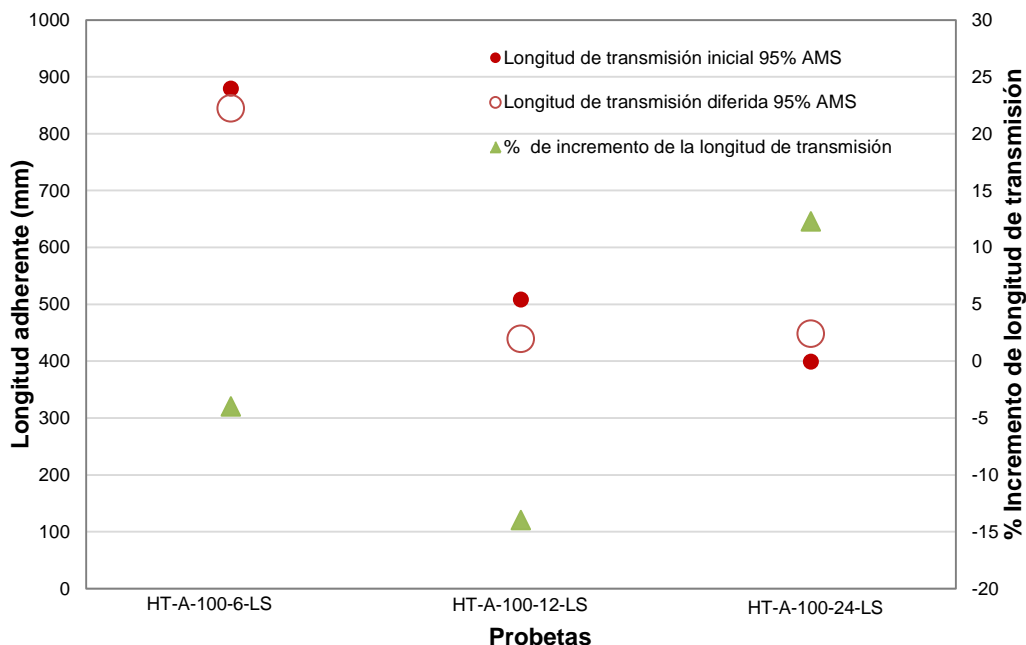
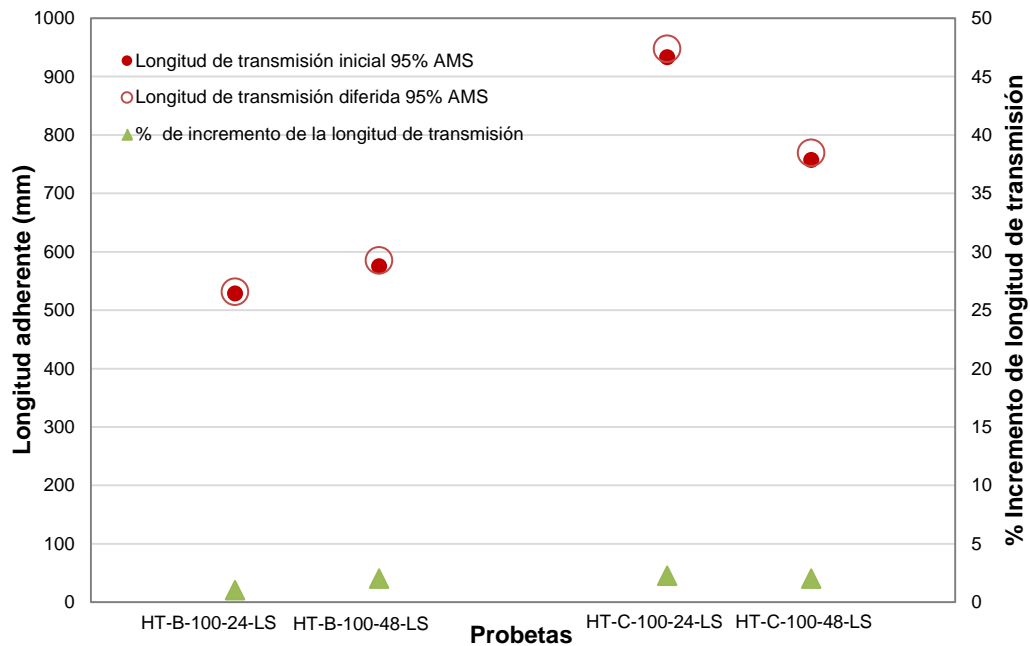


Figura 6.3.1.1.1. Variación de la longitud de transmisión diferida destesado 6, 12 y 24 horas. Sección 100x100 mm<sup>2</sup>. Hormigón tipo A.

En la Figura 6.3.1.1.2 se presentan los resultados para el hormigón tipo B y C, con sección transversal de  $100 \times 100 \text{ mm}^2$  y edad de destesado a 24 y 48 horas. Para esta serie no se observa ninguna patrón que relacione el efecto de la variación de la edad de destesado en la  $L_{ti}$  y  $L_{td}$ , si bien todas las probetas presentan un incremento de la longitud de transmisión aproximadamente del 2%.



**Figura 6.3.1.1.2.** Variación de la longitud de transmisión diferida destesado 24 y 48 horas. Sección  $100 \times 100 \text{ mm}^2$ . Hormigón tipo B y C.

Las Figuras 6.3.1.1.3, 6.3.1.1.4 y 6.3.1.1.5 presentan la misma tendencia a disminuir la longitud de transmisión inicial y diferida al aumentar la edad de destesado, excepto la probeta HT-A-80-12-LS que tiene un decrecimiento de la longitud de transmisión diferida. Esto se debe a la dificultad del método para detectar de manera correcta el inicio de la meseta de deformaciones para determinar la longitud de transmisión. En cuanto al incremento de la longitud de transmisión con el tiempo, es mayor al aumentar la edad de destesado para este grupo de probetas.

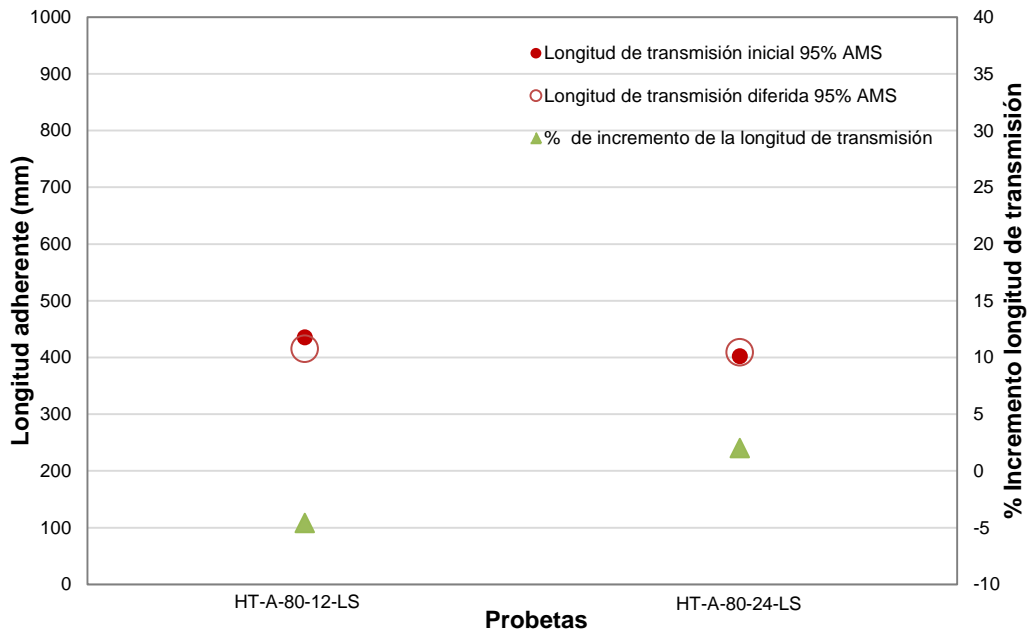


Figura 6.3.1.1.3. Variación de la longitud de transmisión diferida destesado 12 y 24 horas. Sección 80x80 mm<sup>2</sup>. Hormigón tipo A.

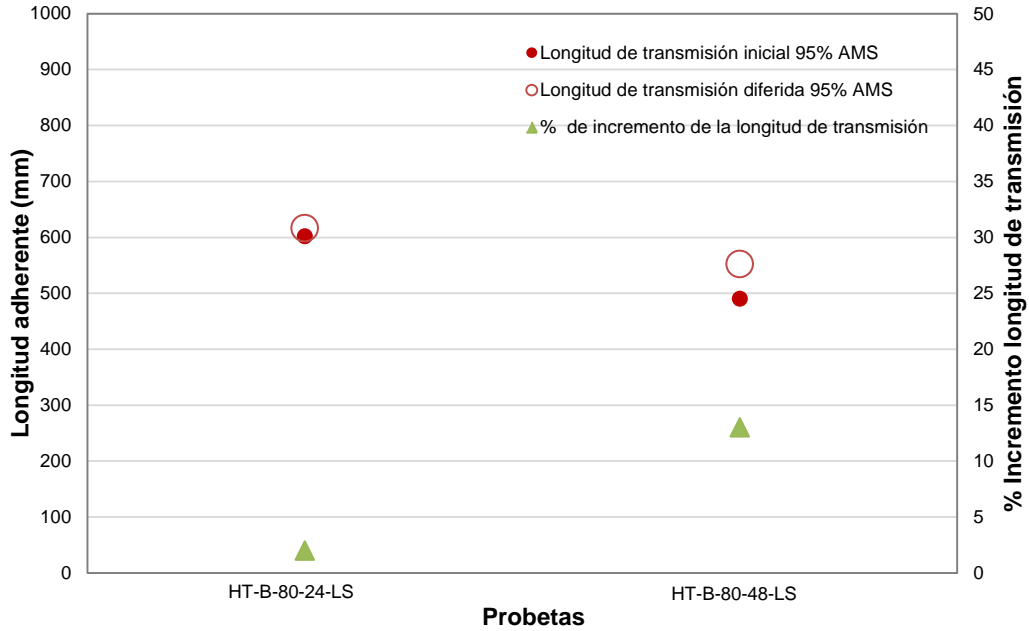
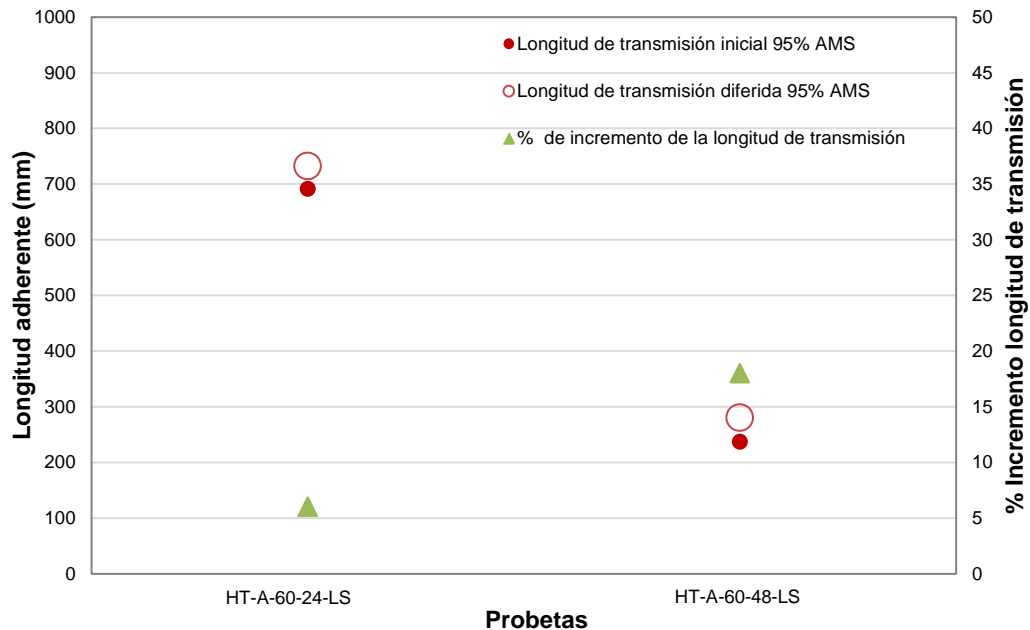


Figura 6.3.1.1.4. Variación de la longitud de transmisión diferida destesado 24 y 48 horas. Sección 80x80 mm<sup>2</sup>. Hormigón tipo B.





**Figura 6.3.1.1.5.** Variación de la longitud de transmisión diferida destesado 24 y 48 horas. Sección 60x60 mm<sup>2</sup>. Hormigón tipo A.

### 6.3.1.2 Resistencia a compresión del hormigón

Los resultados se presentan en dos gráficas, variando el tipo de hormigón y comparando probetas con igual sección transversal de probeta (100x100 mm<sup>2</sup>, 80x80 mm<sup>2</sup> y 60x60 mm<sup>2</sup>) y la edad de destesado (24 y 48 horas).

La Figura 6.3.1.2.1 compara tres hormigones tradicionales (A, B y C) de sección 100x100 mm<sup>2</sup> y destesado a 24 horas. Se aprecia cómo a mayor resistencia del hormigón se presenta menor longitud de transmisión inicial y diferida. Por otra parte, todas las probetas presentan un incremento de la longitud de transmisión, siendo el mayor porcentaje de incremento (12%) el de la probeta de mayor resistencia del hormigón (HT-A-100-24-LS).

La Figura 6.3.1.2.2 reúne tres grupos, los dos primeros grupos comparan dos hormigones B y C con sección 100x100 mm<sup>2</sup> y 80x80 mm<sup>2</sup>, y destesado a 48 horas. El tercer grupo compara dos hormigones A y B con sección 60x60 mm<sup>2</sup> y destesado a 48 horas. En todos los grupos se observa cómo al disminuir la resistencia del hormigón aumenta la longitud de transmisión inicial y diferida. Además, en todos los casos se produce un incremento de la longitud de transmisión con el tiempo siendo mayor esta variación en el hormigón de mayor resistencia.

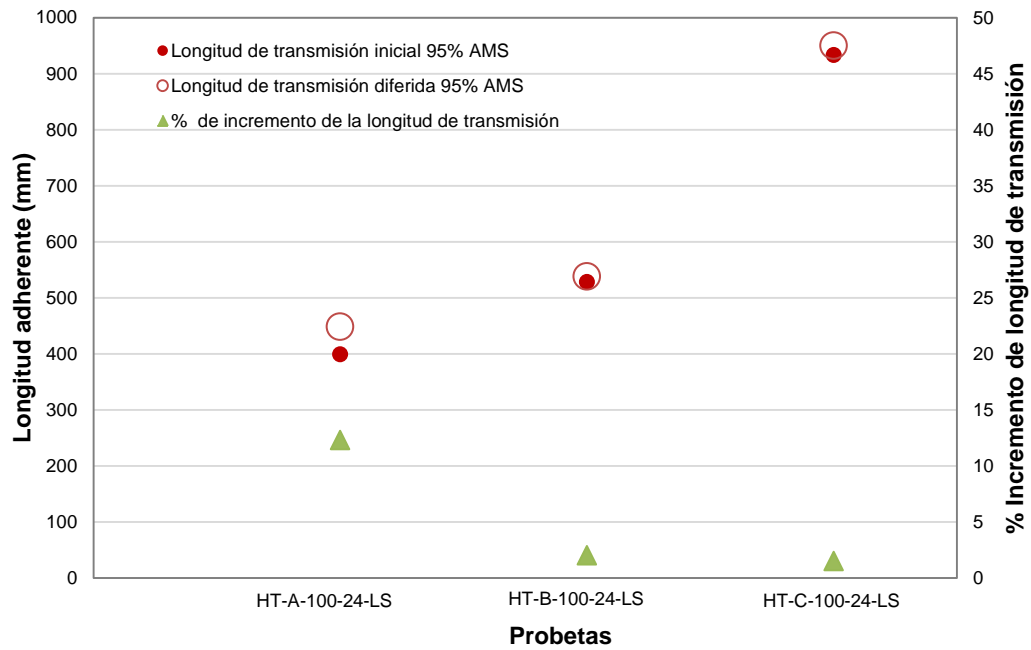


Figura 6.3.1.2.1. Variación de la longitud de transmisión diferida hormigones tipo A, B y C. Sección 100x100 mm<sup>2</sup>. Destesado 24 horas.

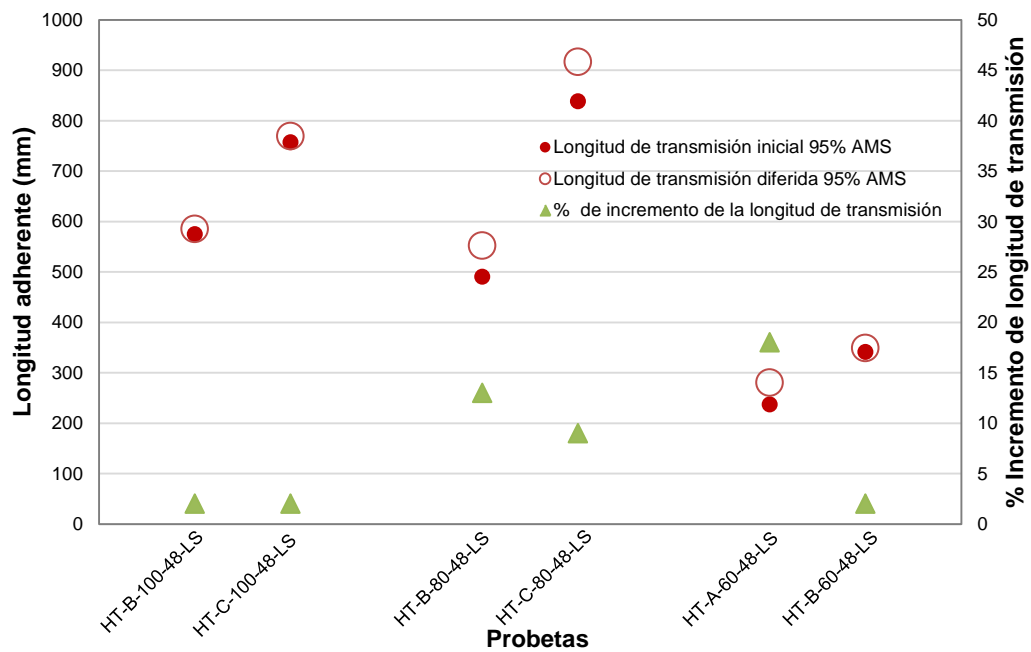
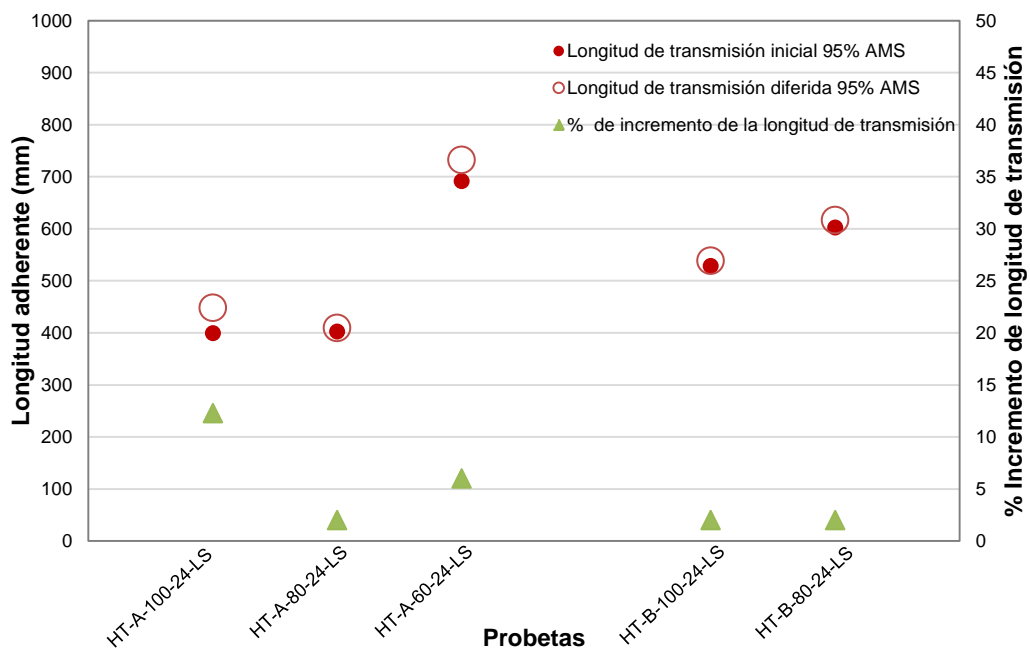


Figura 6.3.1.2.2. Variación de la longitud de transmisión diferida hormigones tipo A, B y C. Sección 100x100 mm<sup>2</sup>, 80x80 mm<sup>2</sup> y 60x60 mm<sup>2</sup>. Destesado 48 horas.

### 6.3.1.3 Sección transversal de la probeta

Los resultados se analizan en probetas de diferente sección transversal ( $100 \times 100 \text{ mm}^2$ ,  $80 \times 80 \text{ mm}^2$  y  $60 \times 60 \text{ mm}^2$ ), formando grupos con un mismo tipo de hormigón (A, B o C) y edad de destesado (24 o 48 horas).

Los dos grupos de la Figura 6.3.1.3.1 presentan una mayor longitud de transmisión inicial a medida que disminuye la sección de la probeta. Caso contrario ocurre con el primer grupo de la Figura 6.3.1.3.2 en el que al disminuir la sección de la probeta disminuye la longitud de transmisión inicial. En cuanto a la longitud de transmisión diferida, en las Figuras 6.3.1.3.1 y 6.3.1.3.2 no se observa una relación clara al variar la sección transversal de la probeta, al igual que en el caso de la longitud de transmisión inicial. No obstante, todas las probetas presentan un incremento de la longitud de transmisión con el tiempo.



**Figura 6.3.1.3.1.** Variación de la longitud de transmisión diferida secciones  $100 \times 100 \text{ mm}^2$ ,  $80 \times 80 \text{ mm}^2$  y  $60 \times 60 \text{ mm}^2$ . Hormigones tipo A, y B. Destesado 24 horas.

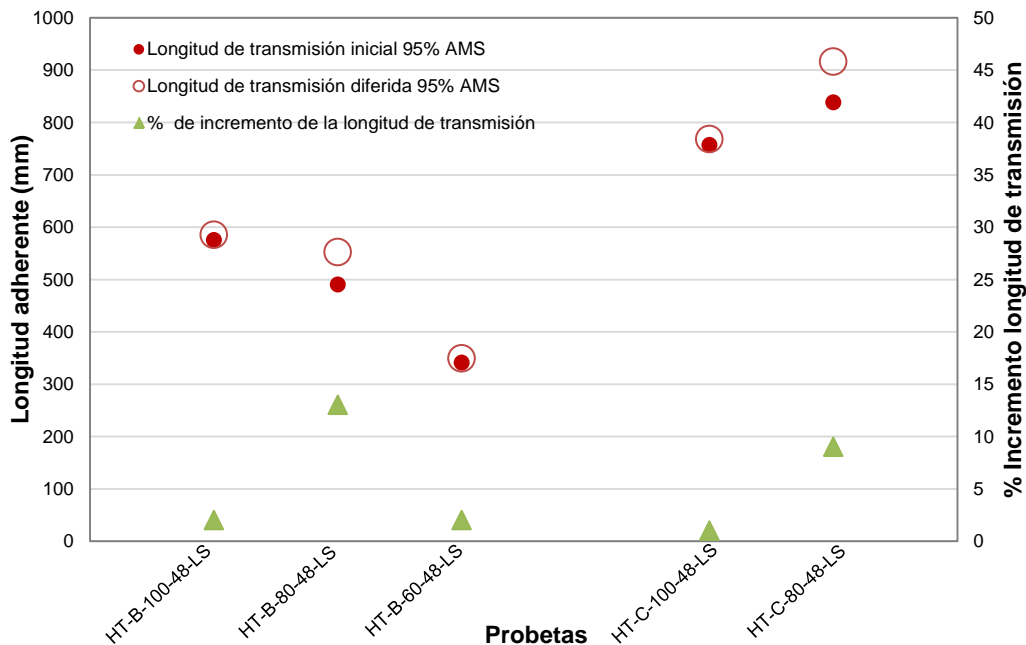
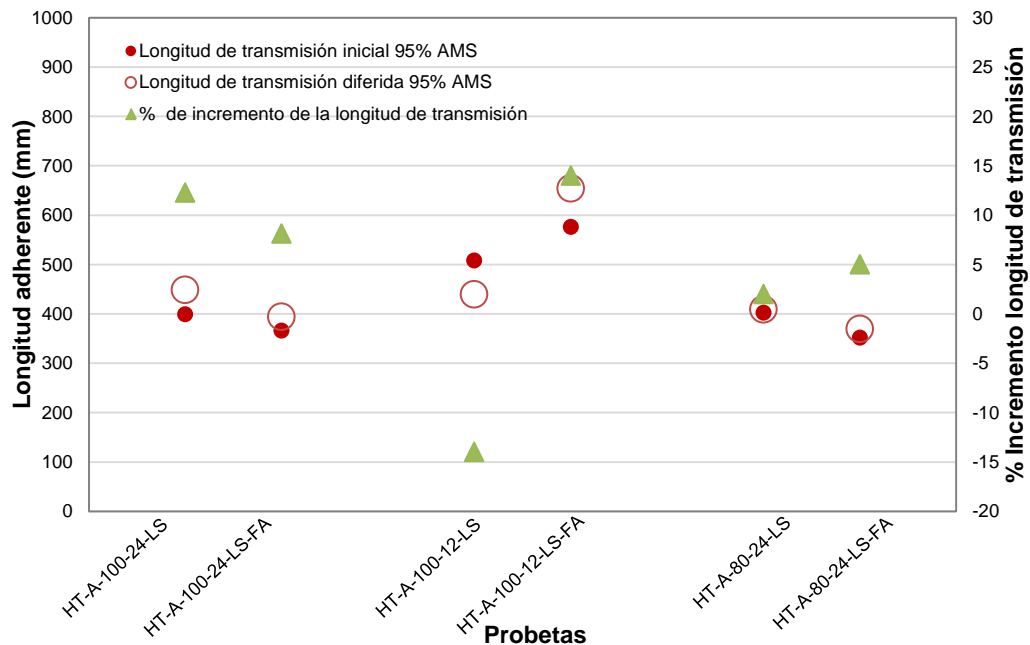


Figura 6.3.1.3.2. Variación de la longitud de transmisión diferida secciones 100x100 mm<sup>2</sup>, 80x80 mm<sup>2</sup> y 60x60 mm<sup>2</sup>. Hormigones tipo B, y C. Destesado 48 horas.

#### 6.3.1.4 Tipo de destesado

Los resultados se organizan en tres grupos con el mismo tipo de hormigón (HT-A) y para cada grupo se comparan dos probetas con diferente modo de destesado (súbito y gradual). Los dos primeros grupos poseen sección transversal de 100x100 mm<sup>2</sup> y edad de destesado a 12 y 24 horas; el tercer grupo tiene sección transversal de 80x80 mm<sup>2</sup> y edad de destesado a 24 horas.

En la Figura 6.3.1.4.1 se puede apreciar como al comparar el efecto del método de destesado no se muestra ningún patrón relacionado con respecto a la longitud de transmisión inicial y diferida para los diferentes grupos. Ahora bien, según la literatura científica (ver Capítulo 2) el método de destesado súbito genera un aumento en la longitud de transmisión. Este efecto se presenta para el grupo de probetas con edad de destesado más prematura (HT-A-100-12), para la cual se obtiene una mayor longitud de transmisión inicial. Sin embargo, no todas las probetas en las que se realizó el destesado súbito han presentado un incremento de la longitud de transmisión.



**Figura 6.3.1.4.1.** Variación de la longitud de transmisión diferida. Destesado súbito y gradual. Destesado 12 y 24 horas. Sección 100x100 mm<sup>2</sup> y 80x80 mm<sup>2</sup>. Hormigón tipo A.

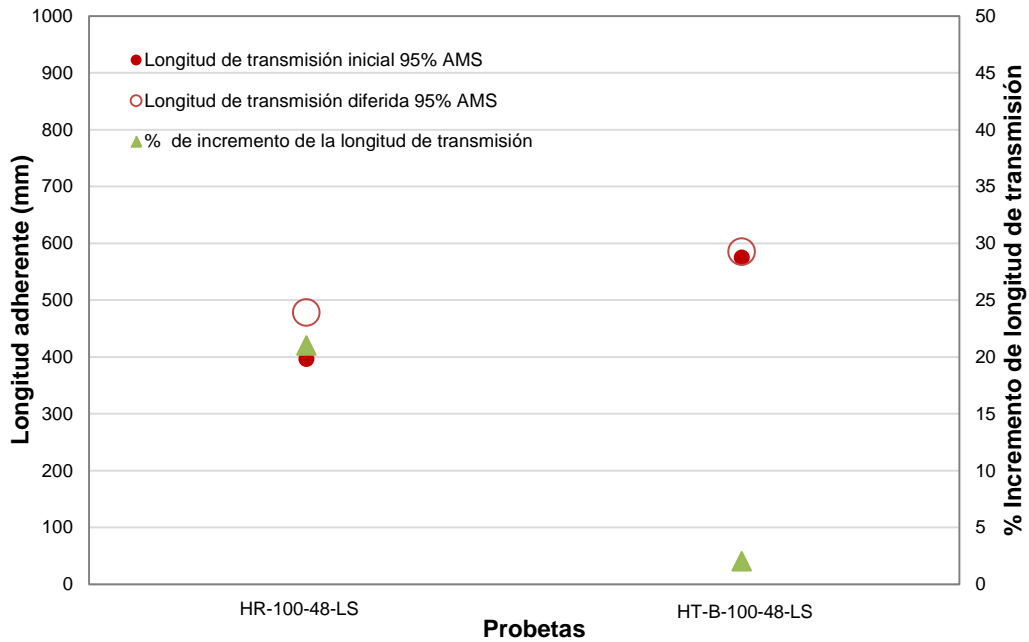
### 6.3.1.5 Hormigones especiales

Se analizan en esta serie los resultados obtenidos con diferentes tipos de hormigón. Los resultados se presentan comparando diferentes tipos de HAC y hormigones especiales (HR y FA) con hormigones tradicionales equivalentes (B y A), manteniendo constantes la sección de la probeta y la edad de destesado.

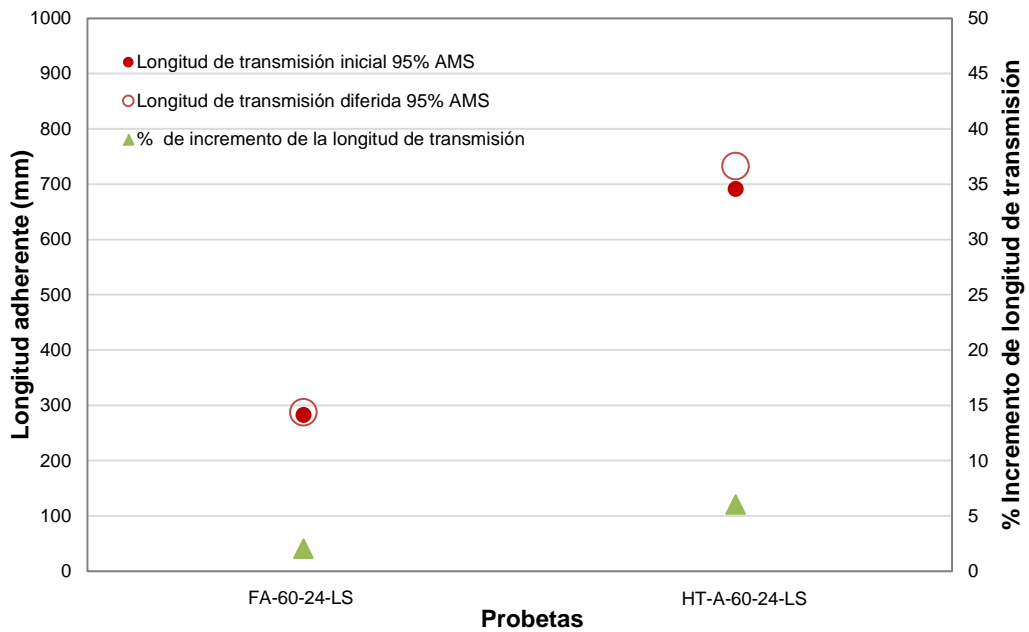
La Figura 6.3.1.5.1 compara un hormigón con árido reciclado (HR) y un hormigón tradicional equivalente (B) con la misma resistencia como se expuso en el Capítulo 3 e igual sección transversal 100x100 mm<sup>2</sup> y edad de destesado a 48 horas. Al comparar los resultados de estas probetas se observa cómo el HR presenta una menor longitud de transmisión inicial y diferida, pero con el tiempo muestra un mayor incremento de la longitud de transmisión (21%).

En relación al hormigón con fibras, la Figura 6.3.1.5.2 presenta una comparación entre una probeta de hormigón tradicional A y una probeta equivalente con fibras de acero (FA), de sección transversal 60x60 mm<sup>2</sup> y edad de destesado a 24 horas. Es evidente cómo la probeta de hormigón tradicional (HT-A-60-24-LS) al presentar fisuras por hendimiento posee una longitud de transmisión inicial y diferida mayor que la probeta equivalente con fibras de acero (FA-60-24-LS). Además, se distingue la influencia de las fibras de acero en la variación de la longitud de transmisión con el tiempo, ya que la probeta de hormigón tradicional tiene un mayor incremento de la

longitud de transmisión (6%) en comparación con la probeta con fibras de acero (2%).

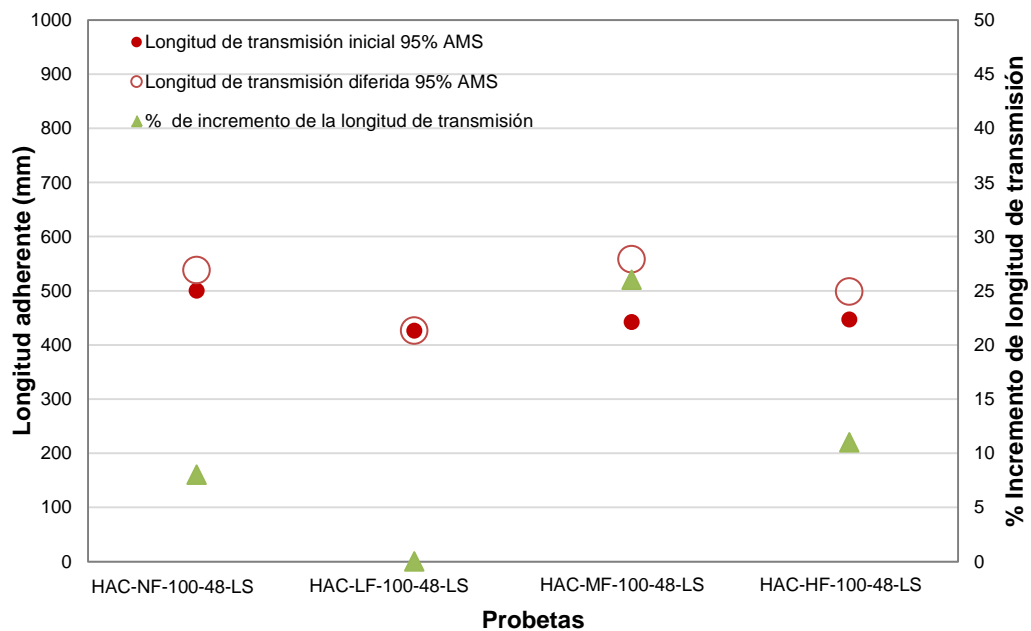


**Figura 6.3.1.5.1.** Variación de la longitud de transmisión diferida hormigones tipo B y HR. Sección 100x100 mm<sup>2</sup>. Destesado 48 horas.



**Figura 6.3.1.5.2.** Variación de la longitud de transmisión diferida hormigones tipo A y FA. Sección 60x60 mm<sup>2</sup>. Destesado 24 horas.

Respecto a los autocompactantes, la Figura 6.3.1.5.3 exhiben un hormigón autocompactante sin adición de filler (HAC-NF) y tres HAC con adición de filler (HAC-LF, HAC-MF, HAC-HF) con variaciones en su estructura granulométrica y similar resistencia (ver apartado 3.4.2). Todas las probetas son de sección transversal de  $100 \times 100 \text{ mm}^2$  y edad de destesado a 48 horas. Como se observa en la Figura todos los HAC presentan una longitud de transmisión inicial similar, a diferencia de los resultados diferidos en el que se observa cómo al aumentar la cantidad de finos se produce un aumento de la longitud de transmisión diferida (HAC-NF-100-48-LS/ HAC-MF-100-48-LS; HAC-LF-100-48-LS/ HAC-HF-100-48-LS). De igual manera, todas las probetas sufren un incremento de la longitud de transmisión con el tiempo a excepción de la probeta HAC-LF-100-48-LS.



**Figura 6.3.1.5.3.** Variación de la longitud de transmisión diferida hormigones HAC. Sección  $100 \times 100 \text{ mm}^2$ . Destesado 48 horas.

### 6.3.1.6 *Resumen*

Las principales conclusiones que se pueden extraer del análisis de la influencia de la **edad de destesado** con el método del 95% AMS es que para la longitud de transmisión inicial y diferida no se observa ningún patrón que relacione el efecto de esta variable. Debido a la dificultad del método para detectar de manera correcta el inicio de la meseta de deformaciones para determinar la longitud de transmisión.

En hormigones tradicionales al aumentar la **resistencia del hormigón** se obtiene una menor longitud de transmisión inicial y diferida.

A la vista de los resultados cabe concluir que con el método del 95% AMS no se define un patrón sobre el efecto de la **sección transversal** en la longitud de transmisión inicial y diferida. No obstante todas las probetas presentan un incremento de la longitud de transmisión.

No se observa ningún patrón que relacione el efecto del **tipo de destesado** en la longitud de transmisión inicial y diferida.

En cuanto a los **hormigones especiales** se puede concluir que: a) al comparar una probeta de hormigón reciclado con una probeta equivalente de hormigón tradicional, la probeta con hormigón reciclado presenta una menor longitud de transmisión inicial y diferida; aun así, la probeta de hormigón reciclado presenta un mayor incremento de la longitud de transmisión; b) se presenta una menor longitud de transmisión inicial y diferida para un hormigón con fibras al comparar los resultados con un hormigón tradicional equivalente; y c) los hormigones autocompactantes muestran una longitud de transmisión inicial similar, a diferencia de los resultados diferidos en el que se observa un incremento de la longitud de transmisión con el tiempo a medida que se aumenta la cantidad de finos.



### 6.3.2 Comparativas de las deformaciones diferidas en el tramo de meseta

En este apartado se analizan comparativamente los resultados obtenidos de las deformaciones longitudinales del hormigón en el tramo de meseta con el tiempo. Para ello, se ha tomado del perfil de deformaciones (ver Anejo J) la media de las deformaciones totales en el tramo de meseta y se han ordenado de manera secuencial a lo largo del tiempo como se presenta gráficamente en el Anejo L. Ahora bien, este aumento de la deformación se debe principalmente al efecto de la fluencia y la retracción del hormigón.

Mediante la comparación de probetas es posible analizar la influencia de las siguientes variables sobre las deformaciones longitudinales en el hormigón: edad de destesado, resistencia del hormigón, sección transversal de la probeta y hormigones especiales.

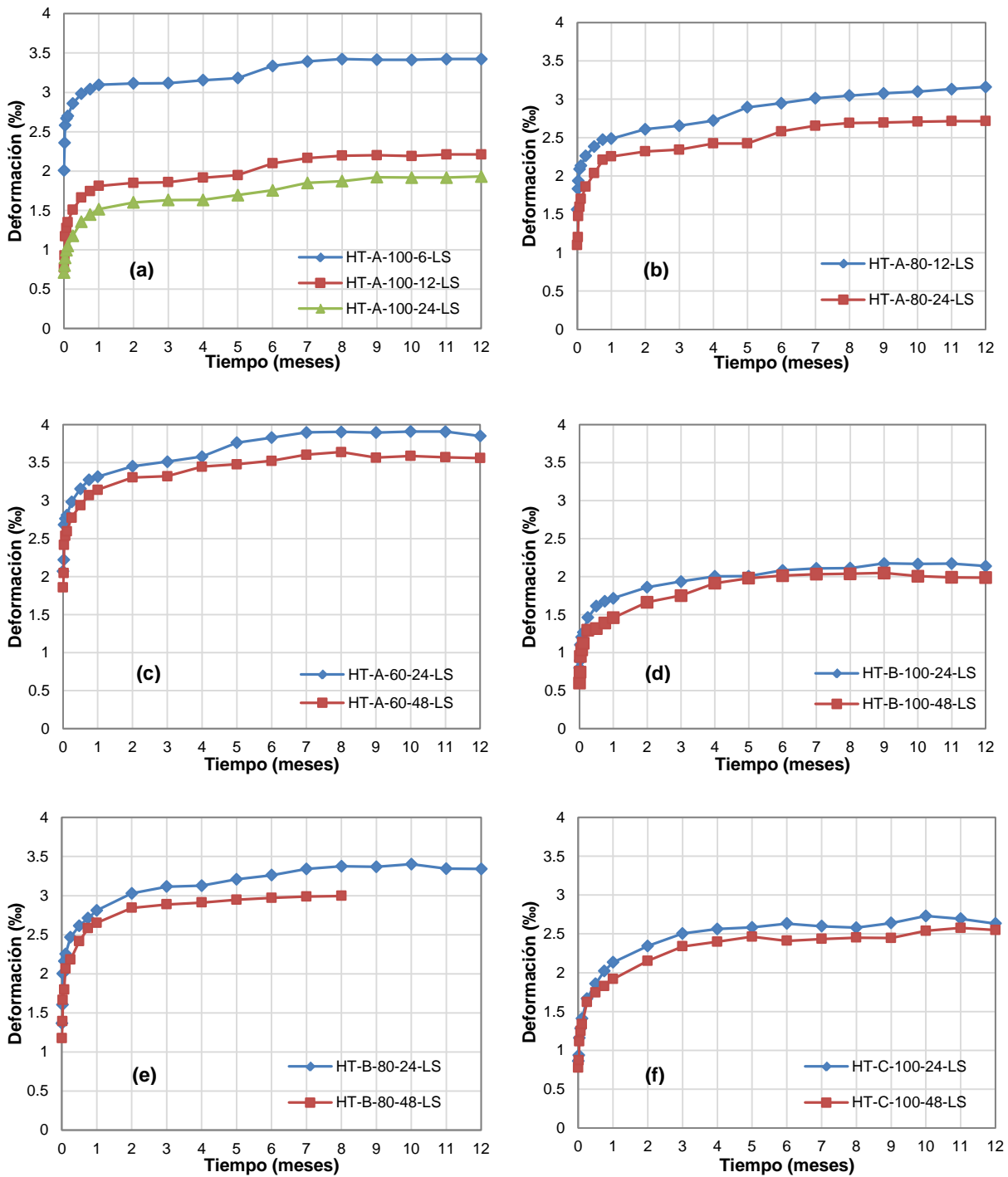
A continuación se analizan los aspectos más importantes de los gráficos comparativos de deformaciones longitudinales del hormigón de las variables anteriormente mencionadas.

#### 6.3.2.1 *Edad de destesado*

En la Figura 6.3.2.1.1 (a, b, c, d, e, f) se presentan los diferentes resultados para cada serie de probetas en función de la edad de destesado (6 a 48 horas), manteniendo constante la sección de probeta (60x60 mm<sup>2</sup>, 80x80 mm<sup>2</sup>, 100x100 mm<sup>2</sup>) y el tipo de hormigón (A, B, C).

En todos los casos se producen mayores deformaciones longitudinales a lo largo del tiempo al disminuir la edad de destesado. El aumento de las deformaciones son producidas por la menor rigidez del hormigón a menor edad. Respecto a la Figura 6.3.2.1.1 (a) la probeta HT-A-100-6-LS presenta un mayor incremento de deformación en el hormigón, como consecuencia de la mayor deformación inicial, al ser un hormigón tan joven a la hora de realizarse la transmisión del pretensado.

Las deformaciones longitudinales del hormigón a lo largo del tiempo tienden a ser constantes a partir del séptimo u octavo mes.

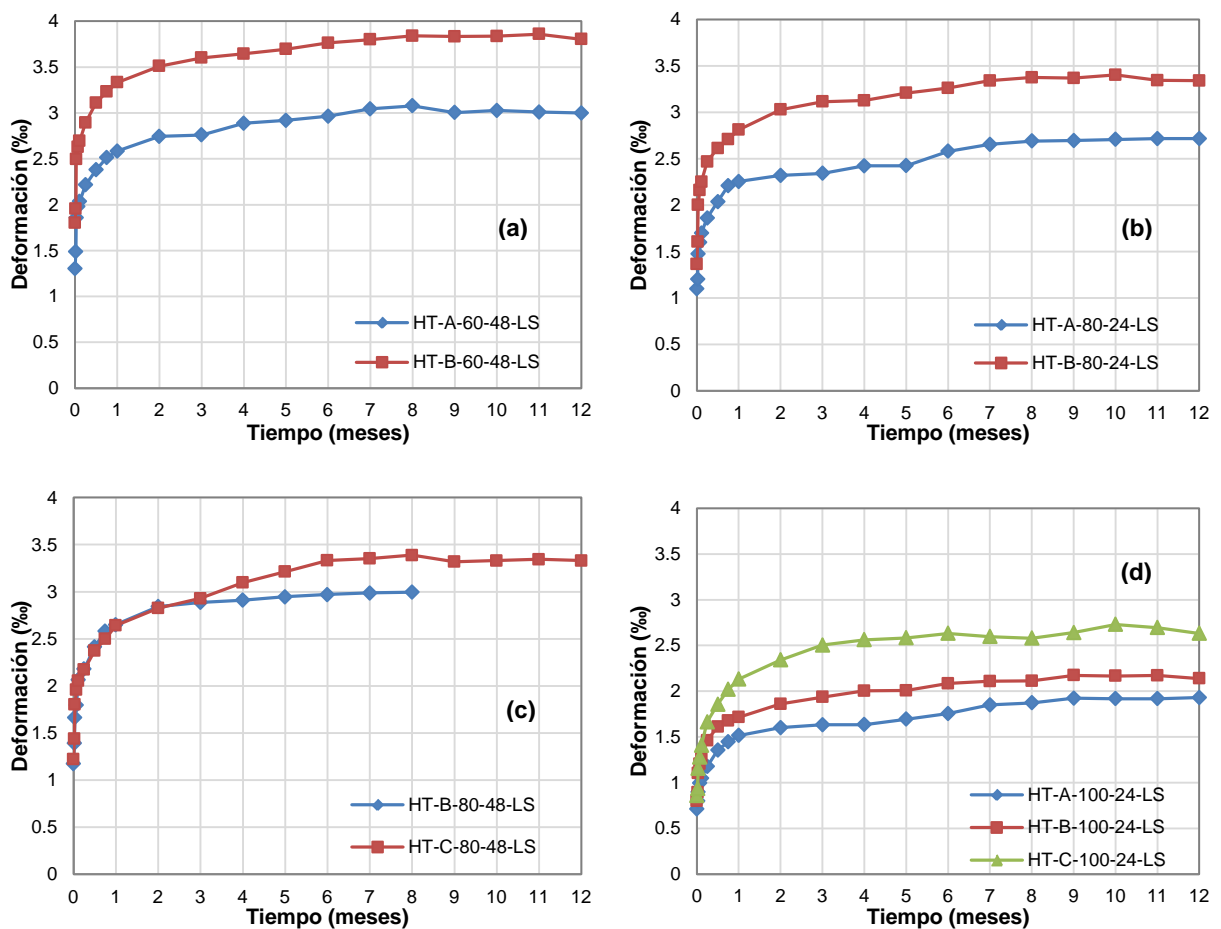


**Figura 6.3.2.1.1.** Influencia de la edad de destesado en la deformación longitudinal en el tramo de meseta para (a) hormigón A y sección 100x100 mm<sup>2</sup>, (b) hormigón A y sección 80x80 mm<sup>2</sup>, (c) hormigón A y sección 60x60 mm<sup>2</sup>, (d) hormigón B y sección 100x100 mm<sup>2</sup>, (e) hormigón B y sección 80x80 mm<sup>2</sup>, (f) hormigón C y sección 100x100 mm<sup>2</sup>.

### 6.3.2.2 Resistencia del hormigón

Se analizan en esta serie los resultados con hormigones de diferente nivel de resistencia (ver apartado 5.1). Los resultados se presentan gráficamente agrupados en función de la sección transversal (60x60 mm<sup>2</sup>, 80x80 mm<sup>2</sup>, 100x100 mm<sup>2</sup>) y la edad de destesado (24 ó 48 horas).

En la Figura 6.3.2.2.1 (a, b, c, d) se ha encontrado cómo aumentan con el tiempo las deformaciones para los diferentes hormigones tradicionales ensayados, en una mayor tasa de incremento al disminuir la resistencia del hormigón. Las Figuras a y b presentan una mayor diferencia de deformación inicial, debido principalmente a la mayor tensión introducida en el hormigón y la diferencia de rigidez entre los dos hormigones.



**Figura 6.3.2.2.1.** Influencia de la resistencia del hormigón en la deformación longitudinal en el tramo de meseta para (a) HT-A-60-48-LS/ HT-B-60-48-LS, (b) HT-A-80-24-LS/HT-B-80-24-LS, (c) HT-B-80-48-LS/ HT-C-80-48-LS, (d) HT-A-100-24-LS/ HT-B-100-24-LS/ HT-C-100-24-LS.

### **6.3.2.3      *Sección transversal***

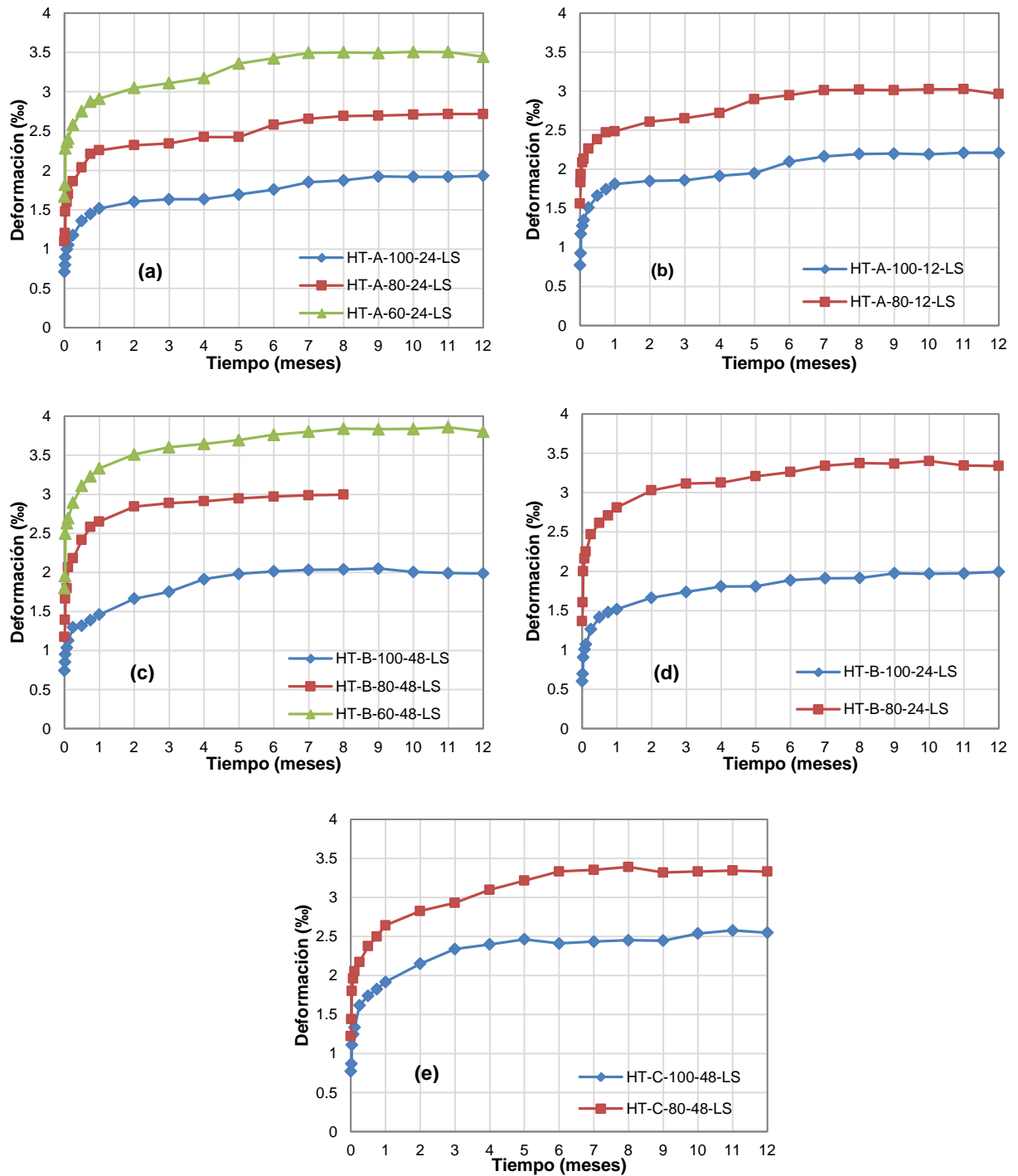
La Figura 6.3.2.3.1 (a, b, c d, e) muestra los resultados concernientes a la comparación de la respuesta de diferentes probetas variando la sección transversal ( $60 \times 60 \text{ mm}^2$ ,  $80 \times 80 \text{ mm}^2$ ,  $100 \times 100 \text{ mm}^2$ ), manteniendo constante el tipo de hormigón (A, B, C) y la edad de destesado (12, 24 ó 48 horas).

Queda claro según la Figura 6.3.2.3.1 (a, b, c d, e) que al disminuir la sección transversal de la probeta aumentan las deformaciones longitudinales del hormigón, tanto al inicio como a lo largo del tiempo, debido a las mayores tensiones introducidas en el hormigón. Estas deformaciones diferidas tienden a ser constantes a partir del séptimo u octavo mes.

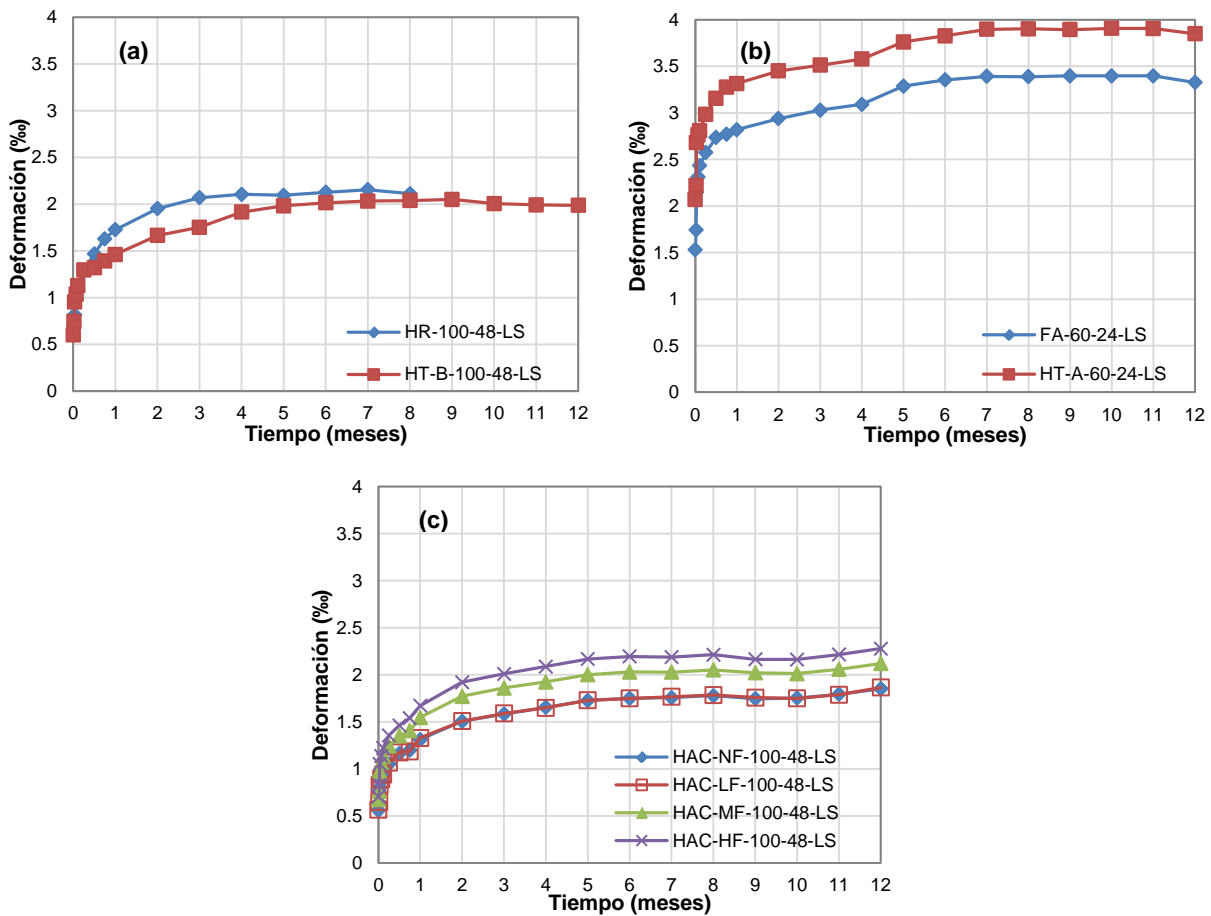
### **6.3.2.4      *Hormigones especiales***

El objetivo de este apartado es analizar la influencia de diferentes hormigones especiales (HR, FA y HAC) sobre las deformaciones longitudinales del hormigón.

La Figura 6.3.2.4.1 (a) compara un hormigón reciclado (HR) con un hormigón tradicional equivalente (B) de sección  $100 \times 100 \text{ mm}^2$  y edad destesado a 48 horas, obteniendo resultados similares en la deformación inicial, pero con el tiempo el hormigón reciclado tiende a aumentar las deformaciones, en comparación con el hormigón B. Además, la Figura 6.3.2.1.1 (b) presenta la comparación entre un hormigón tradicional (A) y un hormigón con fibras (FA) equivalente (sección  $60 \times 60 \text{ mm}^2$  y destesado a 24 horas); se observa cómo al añadir fibras de acero se logra una disminución de las deformaciones longitudinales, debido a la menor deformación inicial. Respecto al HAC, la Figura 6.3.2.4.1 (c) muestra cuatro hormigones autocompactantes con diferente cantidad de finos, presentándose mayor deformación al aumentar la cantidad de finos; esto puede ser atribuido a la mayor retracción del hormigón.



**Figura 6.3.2.3.1.** Influencia de la sección transversal en la deformación longitudinal en el tramo de meseta para (a) hormigón A y destesado a 24 horas, (b) hormigón A y destesado a 12 horas, (c) hormigón B y destesado a 48 horas, (d) hormigón B y destesado a 24 horas, (e) hormigón C y destesado a 48 horas.



**Figura 6.3.2.4.1.** Influencia del tipo de hormigón en la deformación longitudinal en el tramo de meseta para (a) HR-100-48-LS/HT-B-100-48-LS, (b) FA-60-24-LS/HT-A-60-24-LS y (c) HAC-100-48-LS.

Finalmente se puede concluir del análisis realizado en este apartado que: a) al disminuir la edad de destesado aumentan las deformaciones longitudinales del hormigón, como resultado de la menor rigidez del hormigón; b) al aumentar la resistencia del hormigón disminuyen las deformaciones longitudinales del hormigón; c) al disminuir la sección transversal de la probeta aumentan las deformaciones longitudinales del hormigón, debido a las mayores tensiones introducidas en el hormigón; d) el hormigón con fibras presenta una menor deformación en comparación con un hormigón tradicional equivalente, caso contrario al hormigón reciclado, y al aumentar cantidad de finos en el hormigón autocompactante aumenta la deformación longitudinal, lo que puede ser atribuido a la mayor retracción del hormigón.

### 6.3.3 Comparación de la longitud de transmisión diferida con el método de ensayo ECADA+ y el método deformaciones longitudinales de la probeta de hormigón (DEMEC)

Los resultados obtenidos de la longitud de transmisión inicial y diferida para las diferentes series con el método ensayo ECADA+ se han comparado con los resultados basados en el método de las deformaciones longitudinales de la probeta de hormigón (probeta larga perteneciente a la serie, instrumentada con extensometría mecánica) para el criterio del 95% AMS.

La Figura 6.3.3.1 resume los resultados de la longitud de transmisión inicial y diferida para los dos métodos a comparar durante un periodo de 12 meses. Se observa cómo la  $L_{t_i}$  y la  $L_{t_d}$  es menor en todos los casos con el criterio de ensayo del 95% AMS, excepto para las probetas con hormigón tipo C. Cuando se produce la variación de la longitud de transmisión diferida con el método de ensayo ECADA+, sucede lo mismo con el criterio del 95% AMS, siendo siempre esta variación menor con el criterio del 95% AMS y en algunos casos produciéndose una variación negativa (serie HT-A-100-12 = ECADA+: 50 mm; 95% AMS: -69 mm).

La Figura 6.3.3.2 presenta la comparación entre los resultados de la longitud de transmisión inicial y diferida obtenidos con el criterio de fuerzas y el criterio del 95% AMS. Los resultados se ajustan de una forma adecuada, sin embargo, los resultados diferidos de la longitud de transmisión presentan un mejor ajuste que los resultados iniciales.

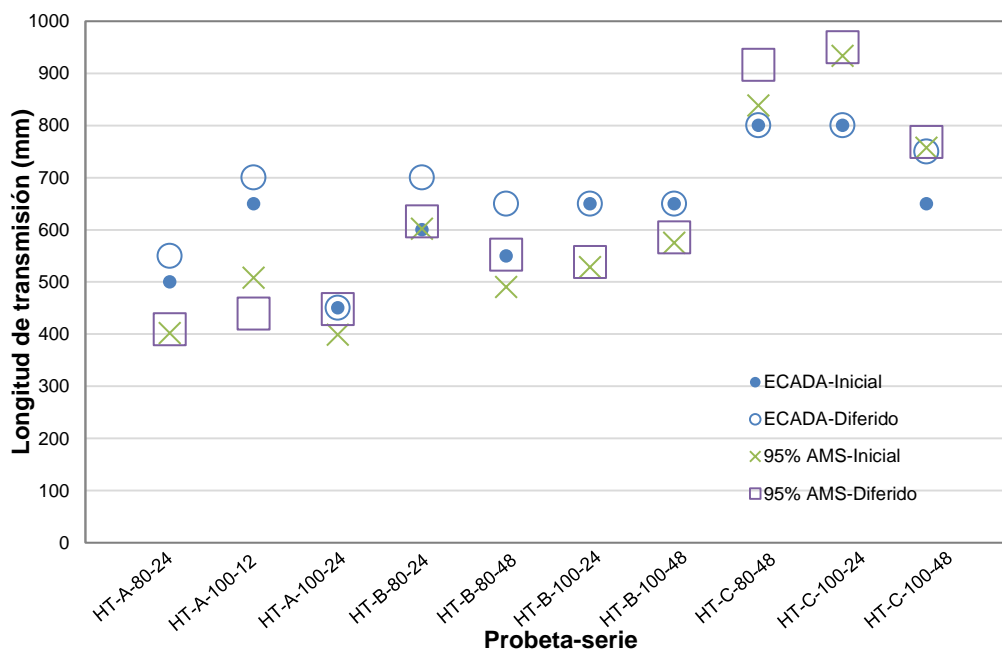


Figura 6.3.3.1. Comparación de la longitud de transmisión inicial y diferida según los criterios de fuerzas y 95% AMS.

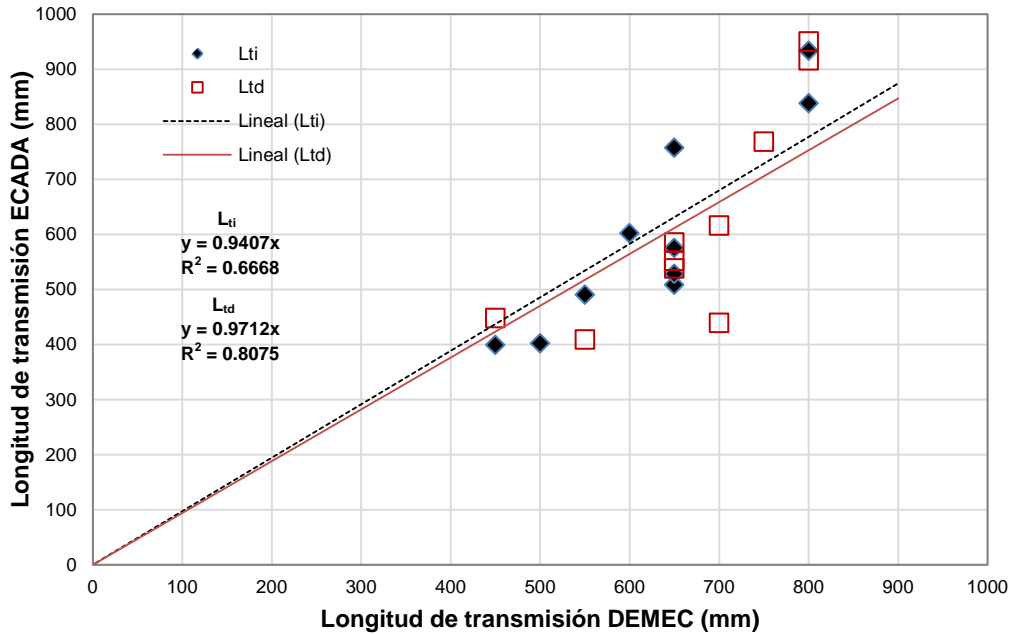


Figura 6.3.3.2. Relación de la longitud de transmisión inicial y diferida según los criterios de fuerzas y 95% AMS.

#### 6.4 Propuesta de un factor adicional para la ecuación de la longitud de transmisión diferida

De acuerdo con lo observado en el apartado 2.5 la longitud de transmisión se puede obtener según:

$$L_t = \lambda \cdot \left[ \chi \cdot \left( \frac{f_{pi}^n A_p}{(k_1 \pi d_b) U_t} + k_2 \right) \right]$$

Ec. 6.4.1

donde:

$\lambda$  = factor para obtener los valores límite superior y límite inferior de la longitud de transmisión

$\chi$  = factor que tiene en cuenta el tipo de destesado

$f_{pi}$  = tensión en la armadura pretensada

$n$  = exponente

$A_p$  = área transversal de la armadura

$k_1$  = factor del perímetro de la armadura ( $k_1 = 4/3$  para cordón de 7 alambres,  $k_1 = 1$  para cordones de sección transversal circular)

$d_b$  = diámetro nominal de la armadura pretensada

$U_t$  = tensión adherente media a lo largo de la longitud de transmisión

$k_2$  = constante de ajuste



Ahora bien, de acuerdo con los resultados obtenidos en esta Tesis Doctoral y de los resultados reportados en la literatura (ver apartado 2.3.5), se ha demostrado que la longitud de transmisión en elementos pretensados aumenta con el tiempo. Por ello, se propone un factor adicional al modelo de la longitud de transmisión (Ec. 6.4.1), en el que se incluye la evolución de la longitud de transmisión a lo largo del tiempo en elementos de hormigón pretensado. Este factor, según los resultados experimentales obtenidos, puede llegar a ser  $\beta = 1.2$ . Sin embargo, valores superiores a  $\beta = 1.6$  –promedio– ( $\beta = 2.9$  –máximo–) (ver Ramirez y Russell (2008)) pueden obtenerse como se muestra en la Tabla 2.3.5.1.

De acuerdo con lo anterior, se propone la siguiente ecuación 6.4.2 para el cálculo de la longitud de transmisión diferida:

$$L_t = \beta \cdot \lambda \cdot \left[ \chi \cdot \left( \frac{f_{pi}^n A_p}{(k_1 \pi d_b) U_t} + k_2 \right) \right]$$

Ec. 6.4.2

donde:

$\beta$  = factor que tienen en cuenta los cambios de la longitud de transmisión en el tiempo

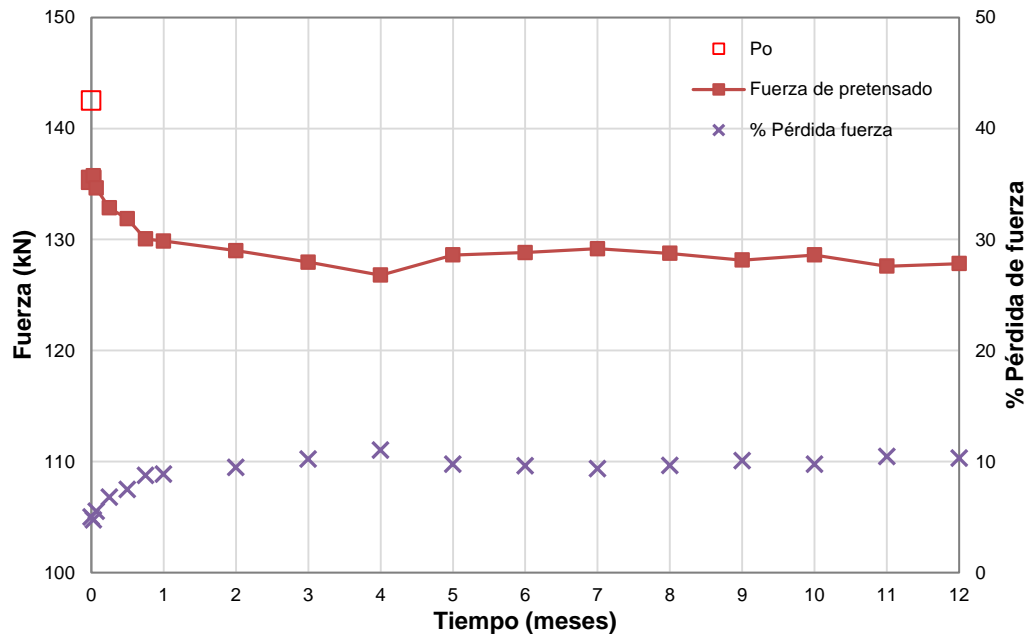
Dado que el valor del factor  $\beta$  se estableció de una muestra de ensayos no muy extensa, se debería plantear un ambicioso programa experimental para ampliar esta base de datos.

## 6.5 Análisis de la fuerza de pretensado medida con el método ECADA+

El método de ensayo ECADA+, basado en la medida y el análisis con el tiempo de la fuerza de pretensando, se ha utilizado para cuantificar la fuerza de pretensado efectiva a cualquier tiempo  $j$  por medio del transductor de fuerza instalado en el sistema AMA. Para ello se han fabricado probetas con longitud adherente mayor que la longitud de transmisión para los parámetros especificados. Esta longitud se ha definido en 1350 mm y ha sido asumida en base a la primera fase de estudio de esta Tesis. Es importante mencionar que las pérdidas de pretensado entre el tesado con el sistema hidráulico hasta la transmisión del pretensado han sido excluidas.

La Figura 6.5.1 muestra a modo de ejemplo la fuerza de pretensado medida en el sistema AMA, con la cual se obtiene la fuerza de pretensado justo antes de realizar la transmisión del pretensado ( $P_0$ ), la fuerza efectiva de pretensado inicial ( $P_i$ ) y la

fuerza de pretensado hasta un tiempo  $j$  ( $P_j$ ). Adicionalmente, la figura presenta el porcentaje (%) de la pérdida de fuerza total con el tiempo.



**Figura 6.5.1.** Fuerza de pretensado y porcentaje de pérdidas con el tiempo. Probeta HT-A-100-24-LS (ECADA+).

La fuerza efectiva de pretensado inicial  $P_1$  incluye las pérdidas debidas al acortamiento elástico del hormigón, y la fuerza efectiva de pretensado ( $P_j$ ) acumula las pérdidas de pretensado debidas a la retracción y la fluencia del hormigón (las pérdidas por relajación de la armadura se han considerado despreciables tras realizar la operación previa de sobretesado).

A partir de los resultados de la de fuerza de pretensado de las diferentes probetas de la Tabla 5.3.4.2 y los resultados gráficos del Anejo E, se decidió realizar un análisis paramétrico de las diferentes probetas ensayadas con el método de ensayo ECADA+ según la edad de destesado, resistencia del hormigón, sección transversal de la probeta, tipo de destesado y diferentes hormigones especiales.

Los resultados se presentan en gráficas con la siguiente distribución: En el eje de las abscisas se tienen las probetas con su respectiva descripción (ver Capítulo 3). En el eje de las ordenadas se representa la fuerza de pretensado, que para cada probeta simboliza la fuerza de pretensado después de realizar la transmisión del pretensado ( $P_1$ ) y hasta 12 meses de mediciones ( $P_j$ ). En el eje de ordenadas secundario se presenta el porcentaje final de la pérdida de fuerza.

### 6.5.1 Edad de destesado

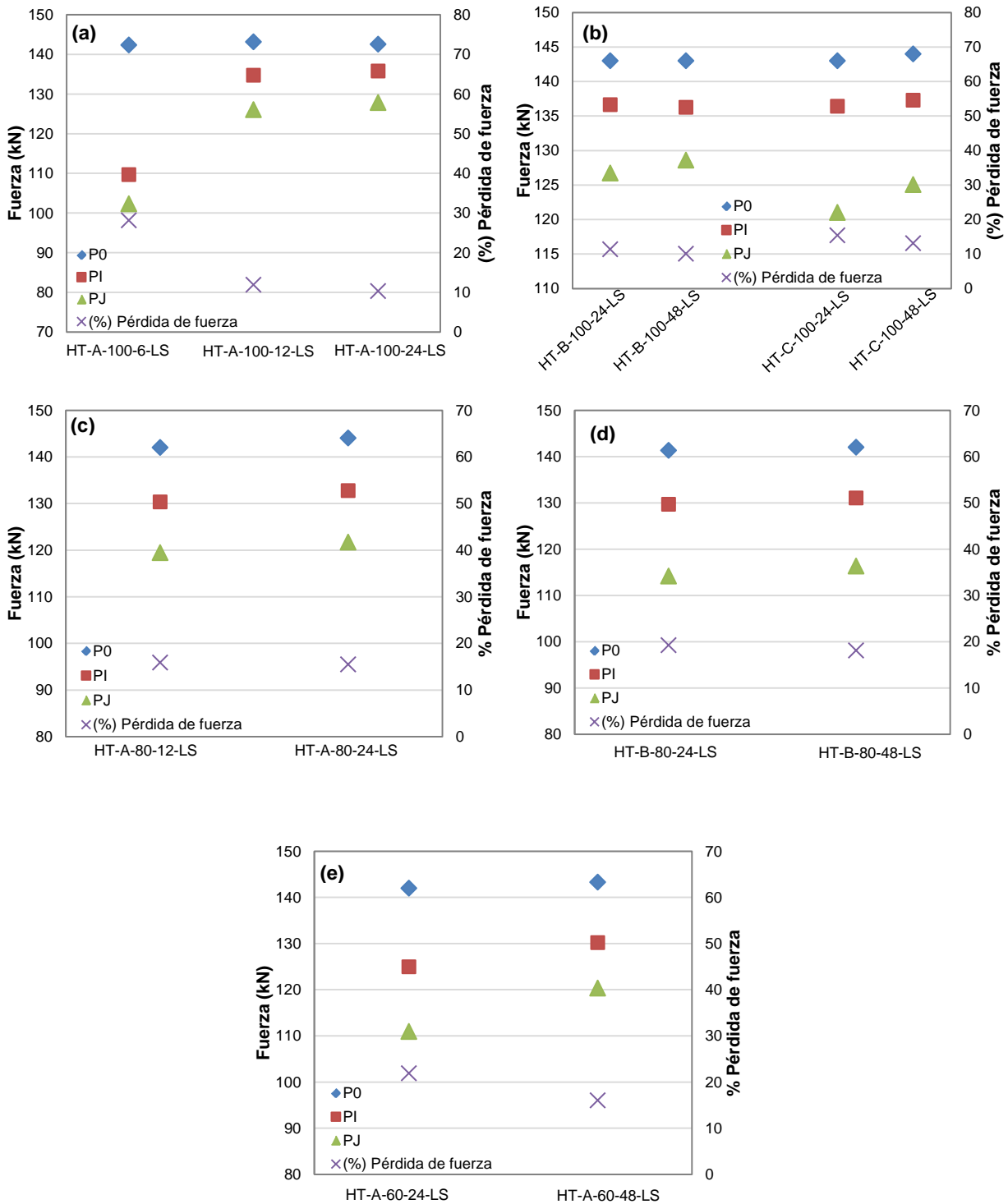
En la Figura 6.5.1.1 (a, b, c, d, e y f) se ilustra los resultados de la pérdida de fuerza para las diferentes probetas, organizadas en grupos variando la edad de destesado y manteniendo constante el tipo de hormigón y la sección de la probeta. En estas se observa que:

- Al aumentar la edad de destesado es menor la pérdida de fuerza después de realizar la transmisión del pretensado ( $P_1$ ).
- Al disminuir la edad de destesado aumenta el porcentaje de pérdida de fuerza final ( $P_f$ ).
- El aumento del porcentaje de la pérdida de fuerza depende del comportamiento de la rigidez de la probeta.

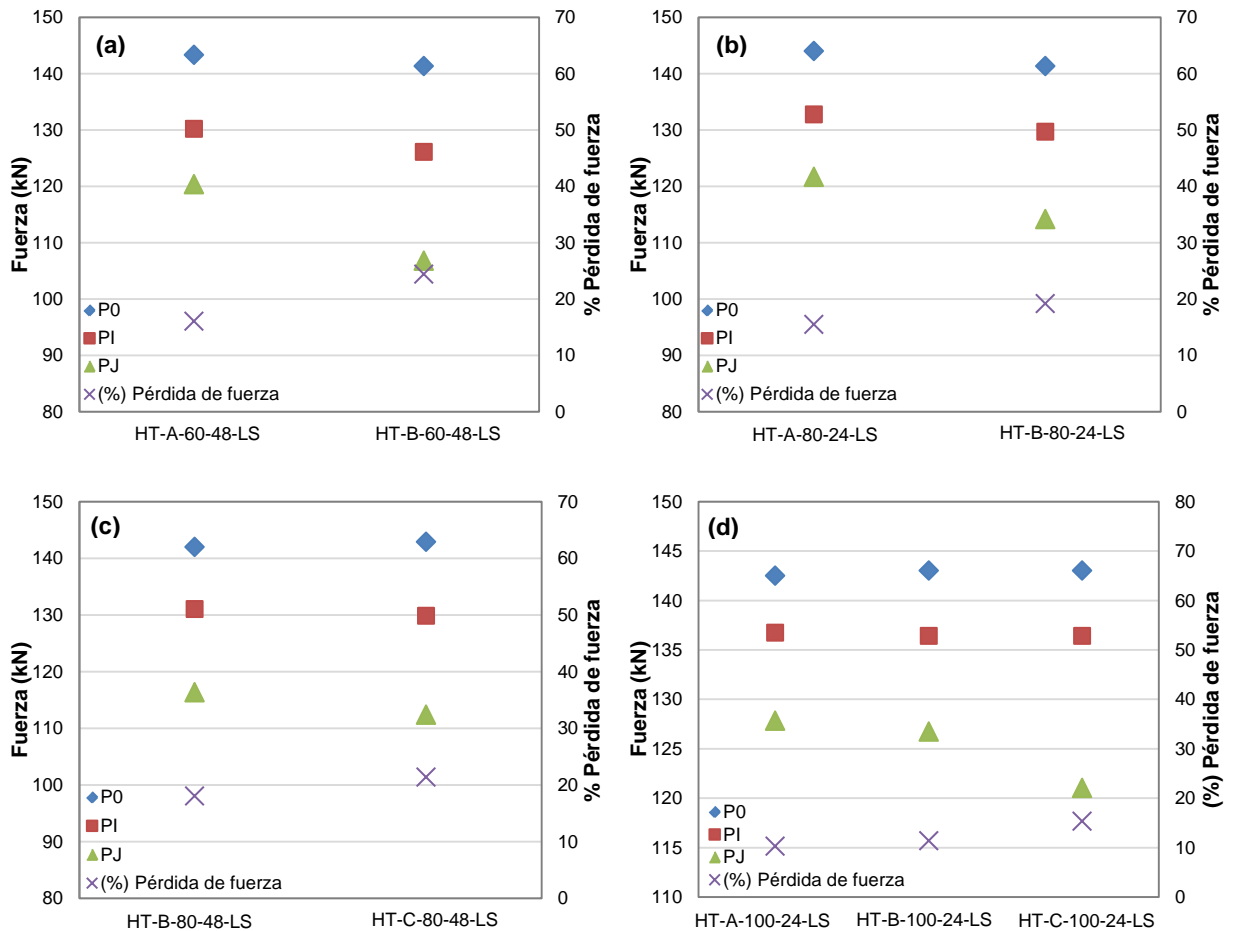
### 6.5.2 Resistencia a compresión del hormigón

En la Figura 6.5.2.1 se presentan los resultados de la pérdida de fuerza por el método de ensayo ECDA+ en función de la resistencia del hormigón. Cada gráfico compara series de probetas de diferente tipo de hormigón e idéntica sección transversal y edad de destesado. Se observa que:

- Al disminuir la resistencia del hormigón disminuye la pérdida de fuerza después de realizar la transmisión del pretensado ( $P_1$ ).
- Al disminuir la resistencia del hormigón es menor el porcentaje de pérdida de fuerza final.
- El aumento del porcentaje de pérdida de fuerza depende de la rigidez de la probeta y de los diferentes niveles de tensión.



**Figura 6.5.1.1.** Influencia de la edad de desesado en la pérdida de fuerza en el sistema AMA para (a) HT-A-100-6-LS/HT-A-100-12-LS/HT-A-100-24-LS, (b) HT-B-100-24-LS/HT-B-100-48-LS, HT-C-100-24-LS/HT-C-100-48-LS, (c) HT-A-80-12-LS/HT-A-80-24-LS, (d) HT-B-80-24-LS/HT-B-80-48-LS y (e) HT-A-60-24-LS/HT-A-60-48-LS.

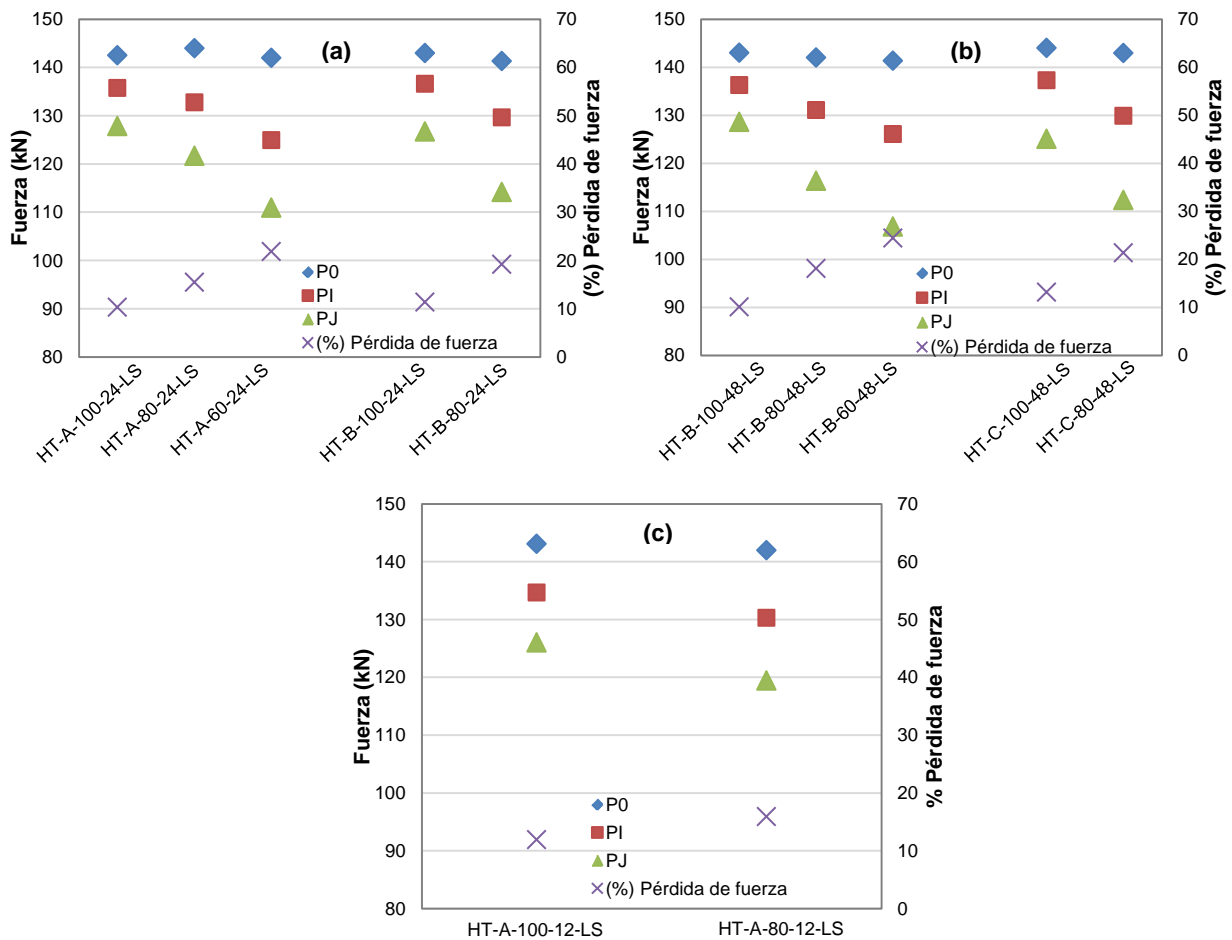


**Figura 6.5.2.1.** Influencia de la resistencia del hormigón en la pérdida de fuerza en el sistema AMA para (a) HT-A-60-48-LS/HT-B-60-48-LS, (b) HT-A-80-24-LS/HT-B-80-24-LS, (c) HT-B-80-48-LS/HT-C-80-48-LS y (d) HT-A-100-24-LS/HT-B-100-24-LS/HT-C-100-24-LS.

### 6.5.3 Sección transversal de la probeta

En la Figura 6.5.3.1 (a, b y c) se presentan los resultados de la pérdida de fuerza medida en el sistema AMA en función de la sección transversal de la probeta. Los resultados se organizan en grupos de probetas manteniendo constante el tipo de hormigón y la edad de destesado, en las que se puede observar:

- La pérdida de fuerza después de realizar la transmisión del pretensado ( $P_1$ ) es menor a medida que aumenta la sección de la probeta.
- El porcentaje de pérdida final aumenta cuando se disminuye la sección de la probeta.
- A mayores tensiones introducidas en el hormigón, mayor es la pérdida de fuerza final.



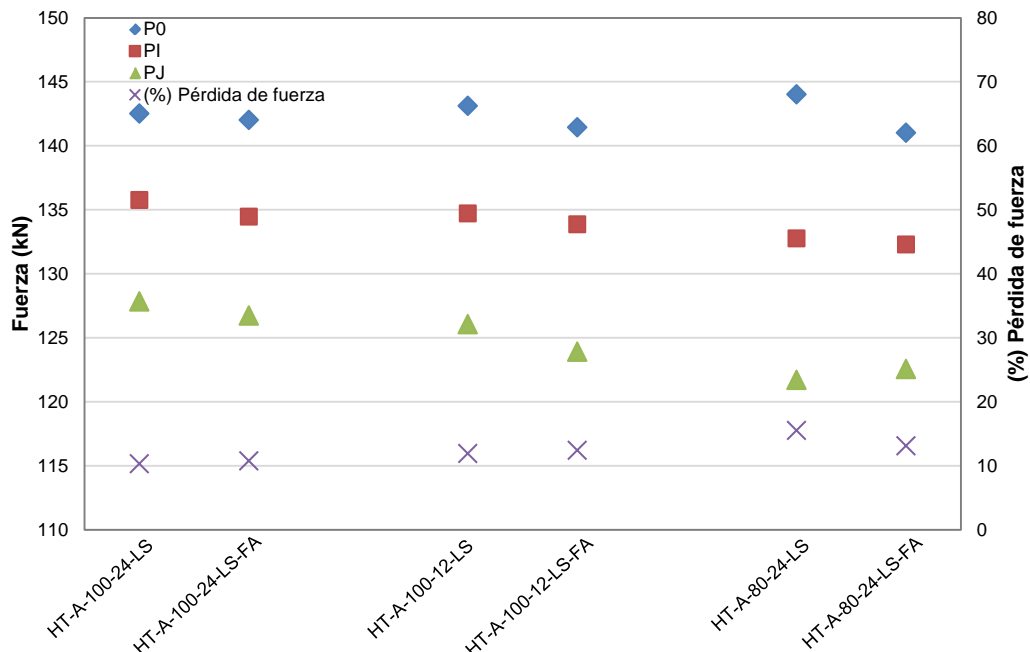
**Figura 6.5.3.1.** Influencia de la sección transversal en la pérdida de fuerza en el sistema AMA para (a) HT-A-100-24-LS/HT-A-80-24-LS/HT-A-60-24-LS, HT-B-100-24-LS/HT-B-80-24-LS (b) HT-B-100-48-LS/ HT-B-80-48-LS/HT-B-60-48-LS, HT-C-100-48-LS/HT-C-80-48-LS y (c) HT-A-100-12-LS/ HT-A-80-12-LS.

#### 6.5.4 Tipo de destesado

Los resultados de la pérdida de fuerza de pretensado en función del tipo de destesado se presentan en la Figura 6.5.4.1. Los resultados se organizan comparando parejas de probetas equivalentes con destesado gradual y destesado súbito (FA). Todas las probetas se fabricaron con hormigón tipo A y se mantiene constante la sección y la edad de destesado. Se observa que:

- No se encontró un patrón en los resultados al comprar el tipo de destesado, aunque para la series de menor edad de destesado y menor sección transversal (HT-A-100-12-LS/HT-A-100-12-LS-FA, HT-A-80-24-LS/HT-A-80-24-LS-FA) se obtienen menores pérdidas de fuerza después de realizar la transmisión del pretensado ( $P_i$ ) al realizar el destesado súbito.

- Para las series de mayor sección transversal (HT-A-100-24-LS/HT-A-100-24-LS-FA, HT-A-100-12-LS/HT-A-100-12-LS-FA) el porcentaje de pérdida final es mayor al utilizar el destesado súbito, pero al igual que con  $P_1$ , no se observa ningún patrón relativo al efecto del tipo de destesado.



**Figura 6.5.4.1.** Influencia del tipo de destesado en la pérdida de fuerza en el sistema AMA para HT-A-100-24-LS/HT-A-100-24-LS-FA, HT-A-100-12-LS/HT-A-100-12-LS-FA, HT-A-80-24-LS/HT-A-80-24-LS-FA.

### 6.5.5 Hormigones especiales

En este apartado se analiza la influencia de diferentes hormigones (HR, FA y HAC) fabricados adicionalmente para estudiar la influencia en la pérdida de fuerza.

En la Figura 6.5.5.1 (a) se muestra los resultados de un hormigón reciclado (HR) con un hormigón tradicional equivalente (HT-B) de igual sección  $100 \times 100 \text{ mm}^2$  y edad destesado a 48 horas. La Figura 6.5.5.1 (b) presenta la comparación entre un hormigón tradicional (HT-A) y un hormigón con fibras (FA) equivalente de igual sección  $60 \times 60 \text{ mm}^2$  y destesado a 24 horas. La Figura 6.5.5.1 (c) muestra cuatro hormigones autocompactantes con diferente cantidad de finos, de igual sección transversal  $100 \times 100 \text{ mm}^2$  y edad destesado a 48 horas. En la Figuras se observa que:

- Se obtienen menores pérdidas de fuerza después de realizar la transmisión del pretensado ( $P_1$ ) en la probeta de hormigón reciclado (HR-100-48-LS), que

en la probeta de hormigón tradicional equivalente (HT-B-100-48-LS), al contrario que la pérdida de fuerza final que aumenta para la probeta de hormigón reciclado.

- Para la probeta de hormigón con fibras (FA-60-24-LS) se observa un mejor comportamiento de la fuerza efectiva de pretensado ( $P_1$ ) y de la pérdida de fuerza a 12 meses, en comparación con la probeta de hormigón tradicional (HT-A-60-24-LS).
- No se observa mayor efecto de la cantidad de finos en la fuerza después de realizar la transmisión del pretensado ( $P_1$ ). En cuanto al porcentaje de pérdida de fuerza, a medida que aumenta la cantidad de finos aumenta la pérdida de fuerza.

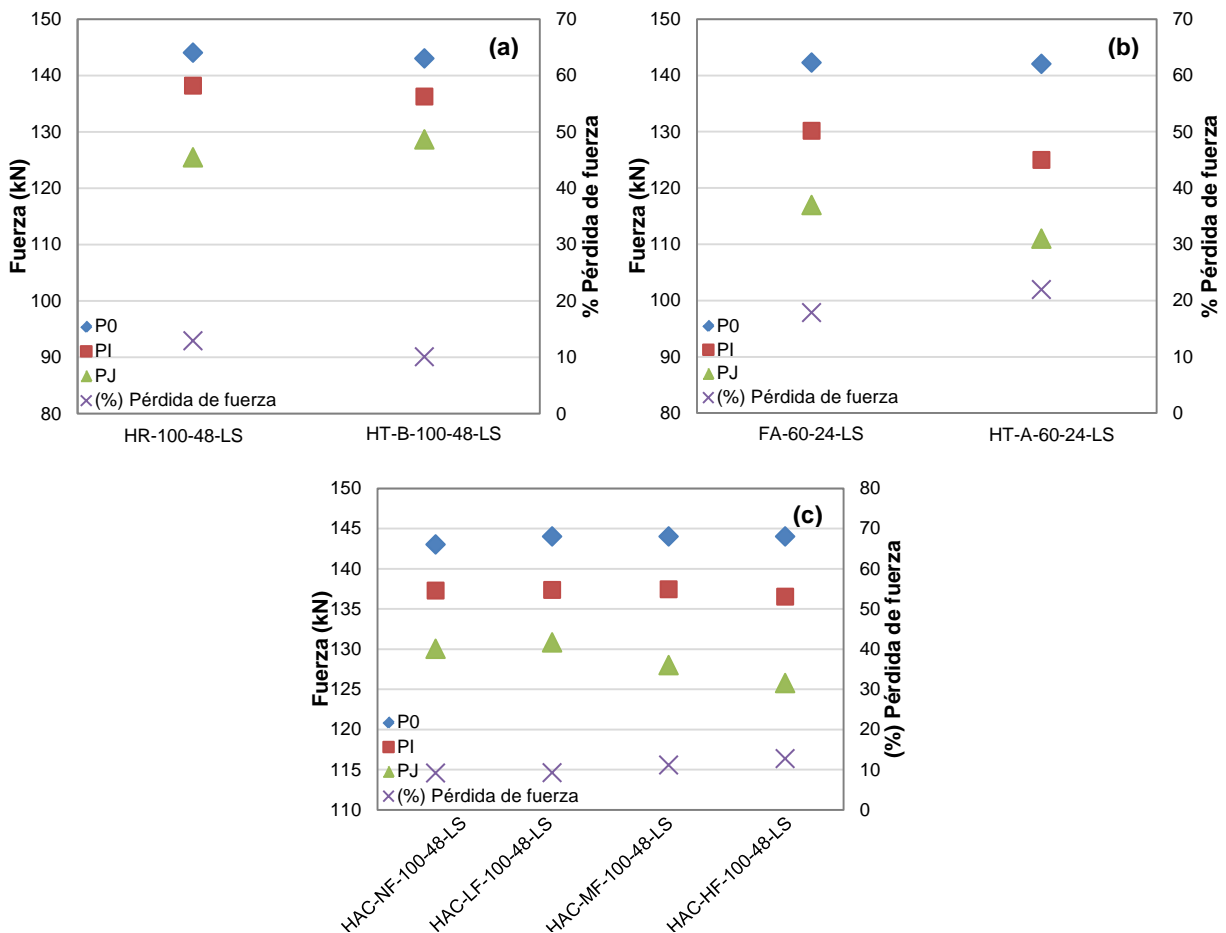


Figura 6.5.5.1. Influencia del tipo de hormigón en la pérdida de fuerza en el sistema AMA para (a) HR-100-48-LS/HT-B-100-48-LS, (b) FA-60-24-LS/HT-A-60-24-LS y (c) HAC-100-48-LS.



## 6.6 Análisis de la fuerza de pretensado a partir de las deformaciones del hormigón en el tramo de meseta (DEMEC)

Como se mencionó en el Capítulo 3, las probetas de 1350 mm de longitud adherente adicionalmente han sido instrumentadas con extensometría mecánica en las caras laterales del hormigón para determinar las deformaciones longitudinales en la superficie del hormigón (ver resultados en anejo J).

La Figura 6.6.1 muestra a modo de ejemplo un perfil bilineal de la deformación inicial y final a tiempo  $t$  del hormigón, con un tramo ascendente y una rama prácticamente horizontal, en la cual, las deformaciones del hormigón tienden a ser uniformes. El primer tramo corresponde a la longitud de transmisión y el segundo tramo horizontal (meseta) corresponde a la región de la probeta donde existe compatibilidad de deformaciones entre la armadura pretensada y el hormigón. Las pérdidas de pretensado pueden ser determinadas en esta región (meseta), quedando la longitud de transmisión como una región especial en el extremo libre de la probeta, donde se producen pérdidas de pretensado además del fenómeno de adherencia.

La fuerza efectiva de pretensado a tiempo  $t$  se obtiene de las deformaciones a compresión del hormigón en el tramo de meseta de la probeta de acuerdo con la Ecuación 6.6.1, basada en la compatibilidad de deformaciones entre el hormigón y la armadura pretensada ( $\Delta\varepsilon_c = \Delta\varepsilon_p$ ).

$$P_t = P_0 - TPL_t = P_0 - \Delta\varepsilon_p(t) \cdot E_p \cdot A_p$$

Ec. 6.6.1

donde:

$P_t$  = fuerza efectiva de pretensado a tiempo  $t$ , en base a las deformaciones

$P_0$  = fuerza de pretensado justo antes de la transmisión del pretensado

$TPL_t$  = pérdida de pretensado diferida hasta el tiempo  $t$  ( $TPL_t = \Delta\varepsilon_p(t) \cdot E_p \cdot A_p$ )

$\Delta\varepsilon_p(t)$  = variación de la deformación de la armadura pretensada en la zona de meseta, justo después de la transmisión del pretensado hasta el tiempo  $j$

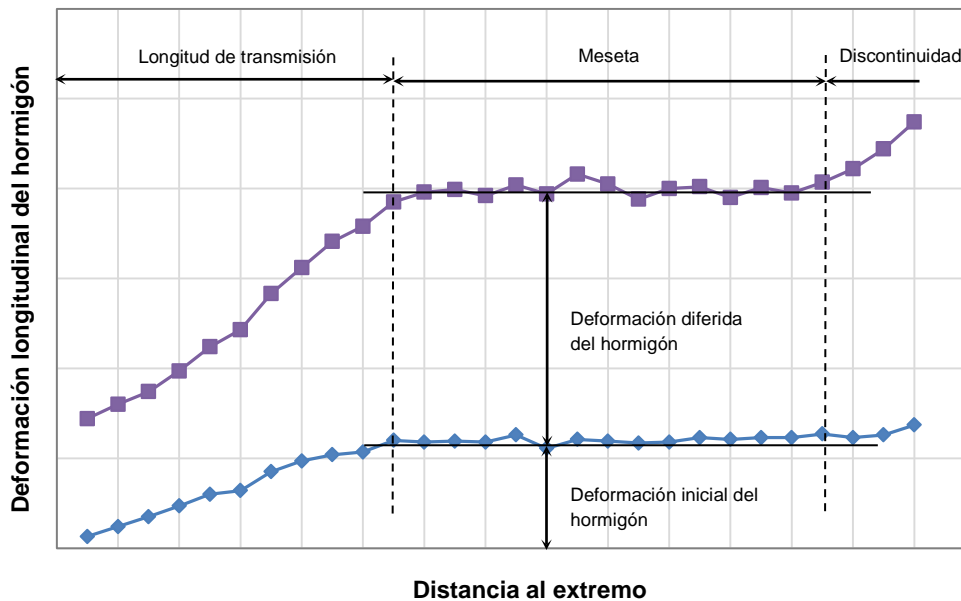
$E_p$  = módulo de elasticidad de la armadura pretensada

$A_p$  = área de la armadura pretensada

La fuerza efectiva de pretensado inicial  $P_1$  se obtiene del perfil de deformaciones longitudinales inicial del hormigón en el tramo de meseta ( $\varepsilon_i$ ), incluyendo las pérdidas debidas al acortamiento elástico del hormigón. A partir de los perfiles posteriores ( $\varepsilon_j$ ) a tiempo  $j$ , se calcula la fuerza efectiva de pretensado ( $P_t$ )

acumulando las pérdidas de pretensado debidas a la retracción y la fluencia del hormigón.

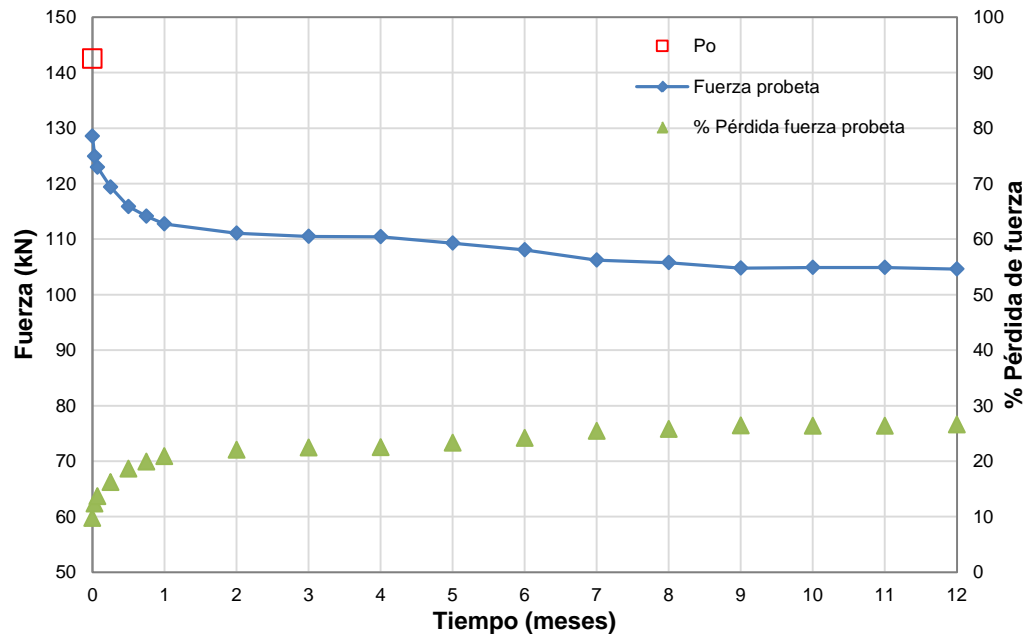
Las pérdidas de pretensado debido a la relajación de la armadura se han omitido por la sobrecarga temporal aplicada antes del anclaje de la misma, siguiendo las recomendaciones suministradas por el fabricante (ver capítulo 4).



**Figura 6.6.1.** Perfil bilineal de las deformaciones longitudinales del hormigón

La Figura 6.6.2 muestra a modo de ejemplo la fuerza de pretensado calculada a partir de las deformaciones longitudinales del hormigón en el tramo de meseta, con la cual se obtiene la fuerza de pretensado justo antes de realizar la transmisión del pretensado ( $P_0$ ), la fuerza efectiva de pretensado ( $P_1$ ) y la fuerza de pretensado hasta un tiempo  $j$  ( $P_j$ ). Adicionalmente la figura presenta el porcentaje (%) de la pérdida de fuerza total con el tiempo.

A partir de los resultados de la fuerza de pretensado en base a las deformaciones longitudinales del hormigón en el tramo de meseta de las diferentes probetas (ver Tabla 5.3.4.3 y Anejo M), se decidió realizar un análisis paramétrico según la edad de destesado, resistencia del hormigón, sección transversal de la probeta, tipo de destesado y diferentes hormigones especiales.



**Figura 6.6.2.** Fuerza de pretensado y % de pérdidas en el tramo de meseta.  
Probeta HT-A-100-24-LS (Ec. 6.6.1).

Los resultados se presentan en gráficas con la siguiente distribución: En el eje de las abscisas se tienen las probetas con su respectiva descripción (ver Capítulo 3). En el eje de las ordenadas se representa la fuerza de pretensado, que para cada probeta simboliza la fuerza de pretensado después de realizar la transmisión del pretensado ( $P_1$ ) y la fuerza diferida hasta 12 meses de mediciones ( $P_2$ ). En el eje de ordenadas secundario se presenta el porcentaje final de la pérdida de fuerza.

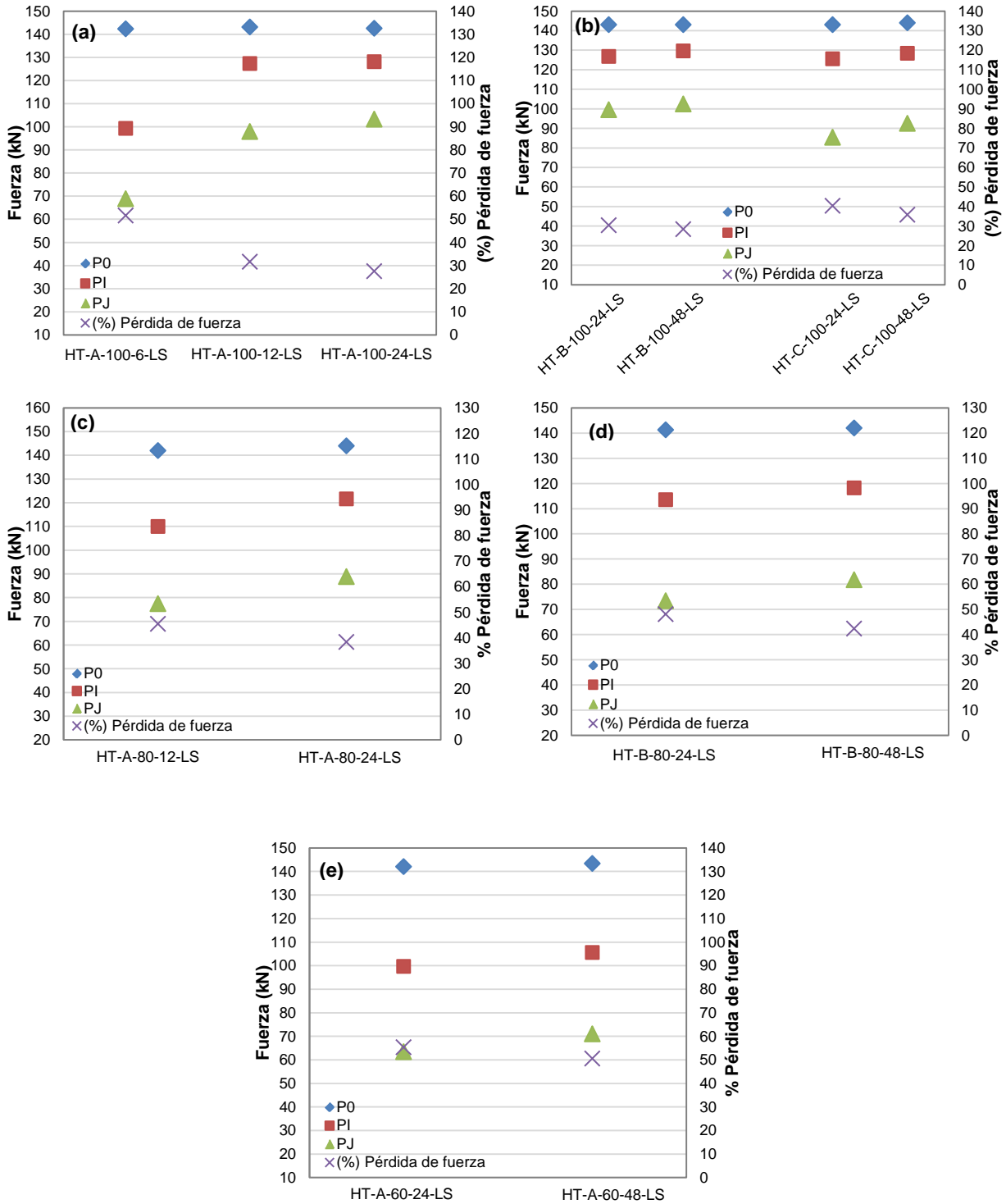
### 6.6.1 Edad de destesado

En este apartado se analiza la influencia de la edad de destesado sobre el comportamiento de la fuerza de pretensado en la probeta de hormigón. Para ello, se han realizado comparaciones de probetas manteniendo constante el tipo de hormigón y la sección transversal de la probeta.

En la Figura 6.6.1.1 (a, b, c, d, e) se puede observa que:

- Al aumentar la edad de destesado es menor la pérdida de fuerza después de realizar la transmisión del pretensado ( $P_1$ ).
- El porcentaje final de la pérdida de fuerza aumenta cuando la edad de destesado disminuye.

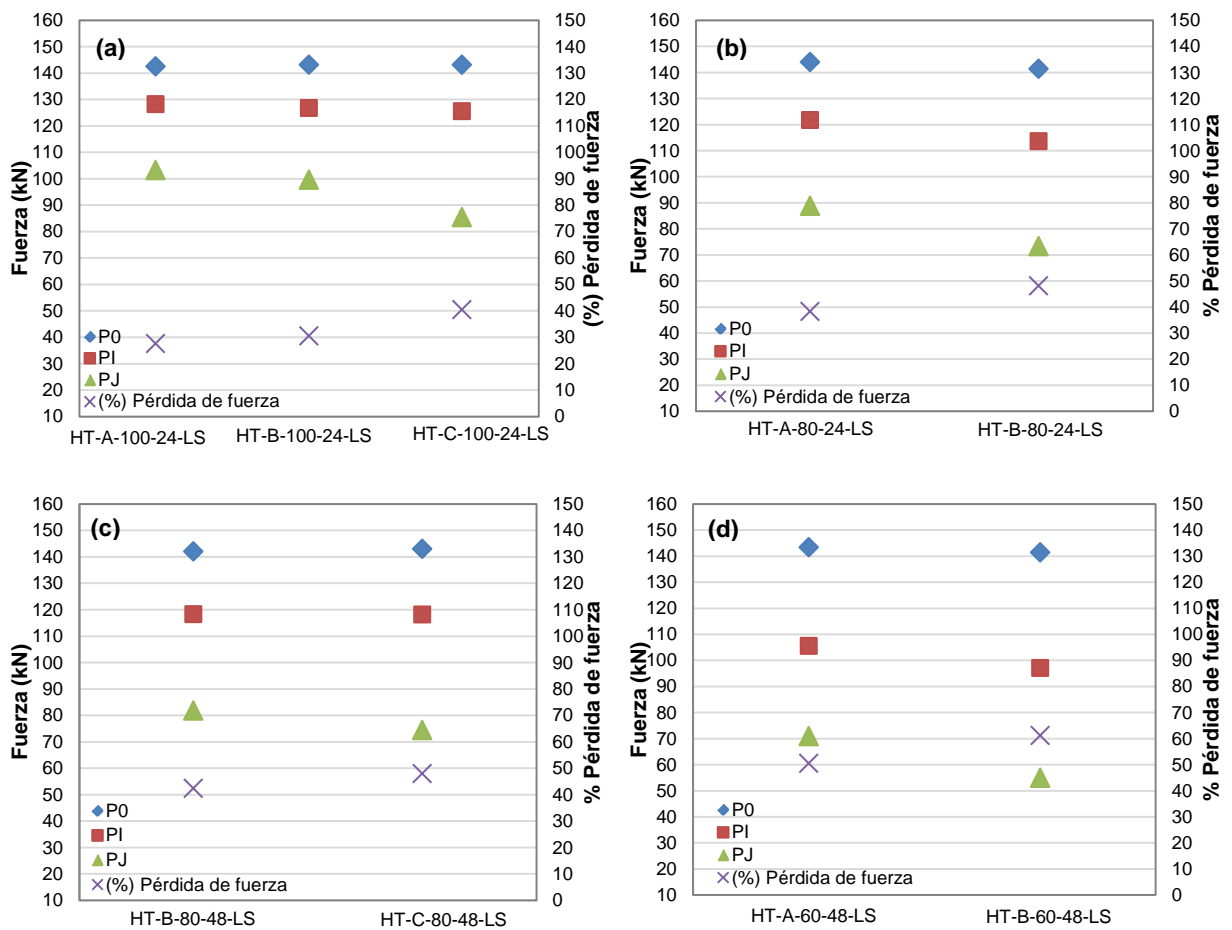
- El mayor o menor porcentaje de la pérdida de fuerza puede ser atribuido a los diferentes niveles de tensión en el hormigón y a la rigidez de la probeta dependiente de la edad.



**Figura 6.6.1.1.** Influencia de la edad de destesado en la pérdida de fuerza en el sistema AMA para (a) HT-A-100-6-LS/HT-A-100-12-LS/HT-A-100-24-LS, (b) HT-B-100-24-LS/HT-B-100-48-LS, HT-C-100-24-LS/HT-C-100-48-LS, (c) HT-A-80-12-LS/HT-A-80-24-LS, (d) HT-B-80-24-LS/HT-B-80-48-LS y (e) HT-A-60-24-LS/HT-A-60-48-LS.

### 6.6.2 Resistencia del hormigón

El objetivo de este apartado es analizar la influencia de la resistencia del hormigón sobre la fuerza de pretensado en la probeta. Con este fin, se han organizado grupos de probetas de igual sección transversal y edad de destesado, variando el tipo de hormigón.



**Figura 6.6.2.1.** Influencia de la resistencia del hormigón en la pérdida de fuerza en el sistema AMA para (a) HT-A-100-24-LS/HT-B-100-24-LS/HT-C-100-24-LS, (b) HT-A-80-24-LS/HT-B-80-24-LS, (c) HT-B-80-48-LS/HT-C-80-48-LS y (d) HT-A-60-48-LS/HT-B-60-48-LS.

En la Figura 6.6.2.1 (a, b, c, d) queda de manifiesto que:

- Al aumentar la resistencia del hormigón es menor la fuerza después de realizar la transmisión del pretensado.
- A menor resistencia del hormigón, se obtiene un mayor porcentaje de pérdida de fuerza.

- El aumento de la pérdida de fuerza es más notable al disminuir la sección de la probeta, lo que puede ser explicado debido al aumento del nivel de tensiones en el hormigón.

### **6.6.3 Sección transversal de la probeta**

Se analiza en este apartado los resultados de la fuerza de pretensado obtenidos en probetas de diferente sección transversal, presentando los resultados agrupados en función del tipo de hormigón y la edad de destesado.

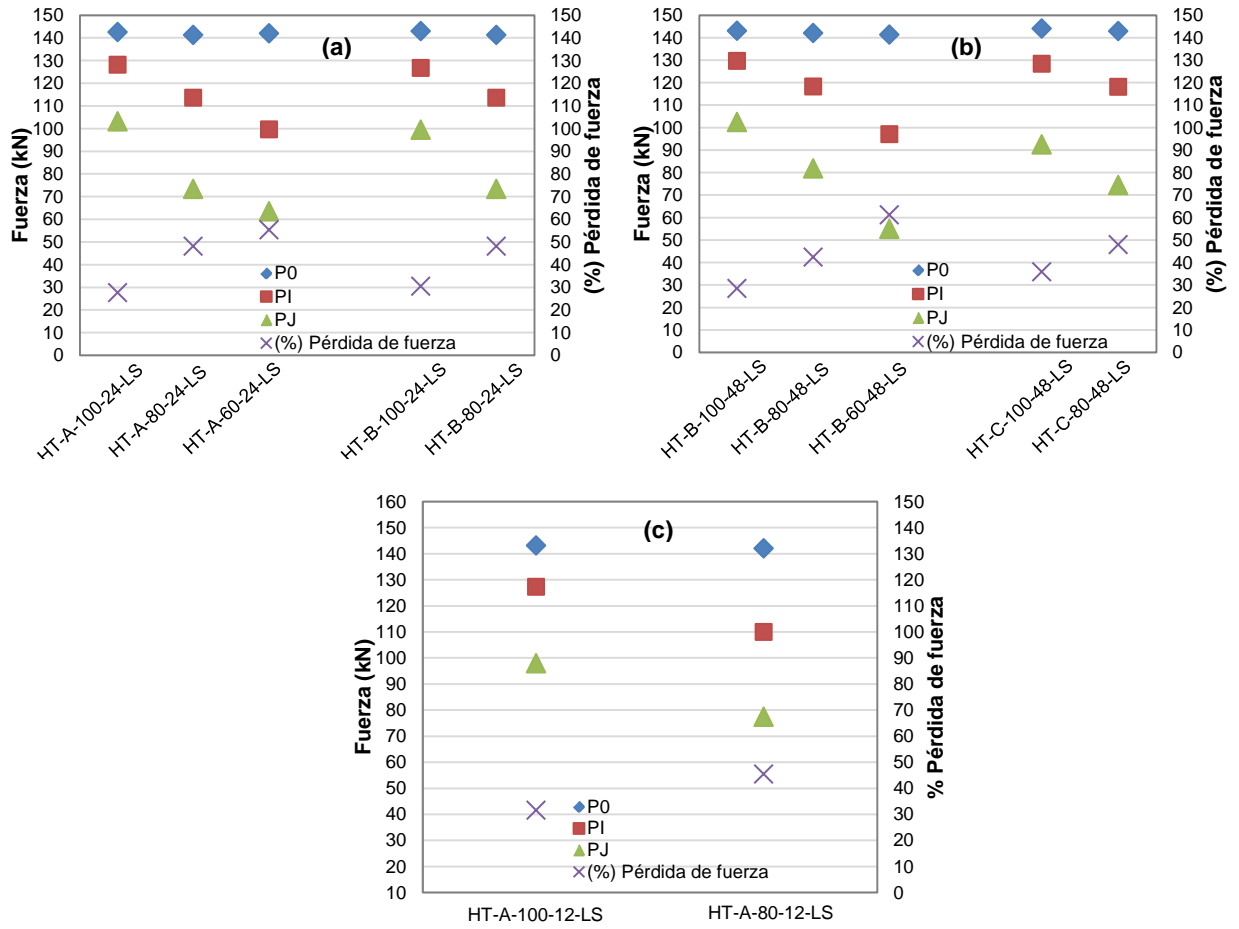
La Figura 6.6.3.1 (a, b, c) se puede observar que:

- A medida que disminuye la sección transversal de la probeta disminuye la fuerza después de realizar la transmisión del pretensado.
- El porcentaje de pérdida de fuerza aumenta cuando disminuye la sección transversal de la probeta; este incremento es resultado de las mayores tensiones introducidas en el hormigón.

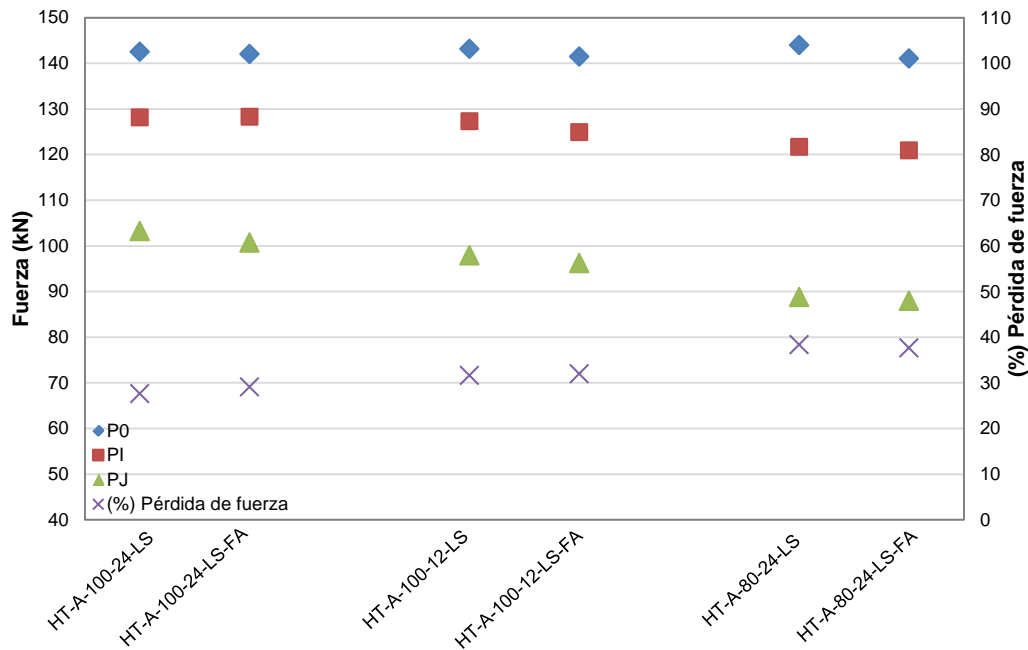
### **6.6.4 Tipo de destesado**

Este apartado se dedica al análisis de la influencia de la velocidad de destesado sobre la pérdida de fuerza de pretensado en la probeta de hormigón. Los resultados se organizan en grupos de probetas con las mismas características de tipo de hormigón, sección transversal y edad de destesado, variando la velocidad de destesado gradual o súbita (FA).

En la Figura 6.6.4.1 no se observa ningún patrón al variar la velocidad de destesado, tanto para la fuerza después de realizar la transmisión del pretensado (menor pérdida de fuerza inicial HT-A-100-24-LS-FA y HT-A-80-24-LS-FA, mayor pérdida de fuerza inicial HT-A-100-12-LS-FA), como para el porcentaje de pérdida de fuerza final (mayor porcentaje para HT-A-100-24-LS-FA y HT-A-80-24-LS-FA, menor porcentaje para HT-A-80-24-LS-FA).



**Figura 6.6.3.1.** Influencia de la sección transversal en la pérdida de fuerza en el sistema AMA para (a) HT-A-100-24-LS/HT-A-80-24-LS/HT-A-60-24-LS, HT-B-100-24-LS/HT-B-80-24-LS (b) HT-B-100-48-LS/ HT-B-80-48-LS/HT-B-60-48-LS, HT-C-100-48-LS/HT-C-80-48-LS y (c) HT-A-100-12-LS/ HT-A-80-12-LS.



**Figura 6.6.4.1.** Influencia del tipo de destesado en la pérdida de fuerza en el sistema AMA para HT-A-100-24-LS/HT-A-100-24-LS-FA, HT-A-100-12-LS/HT-A-100-12-LS-FA, HT-A-80-24-LS/HT-A-80-24-LS-FA.

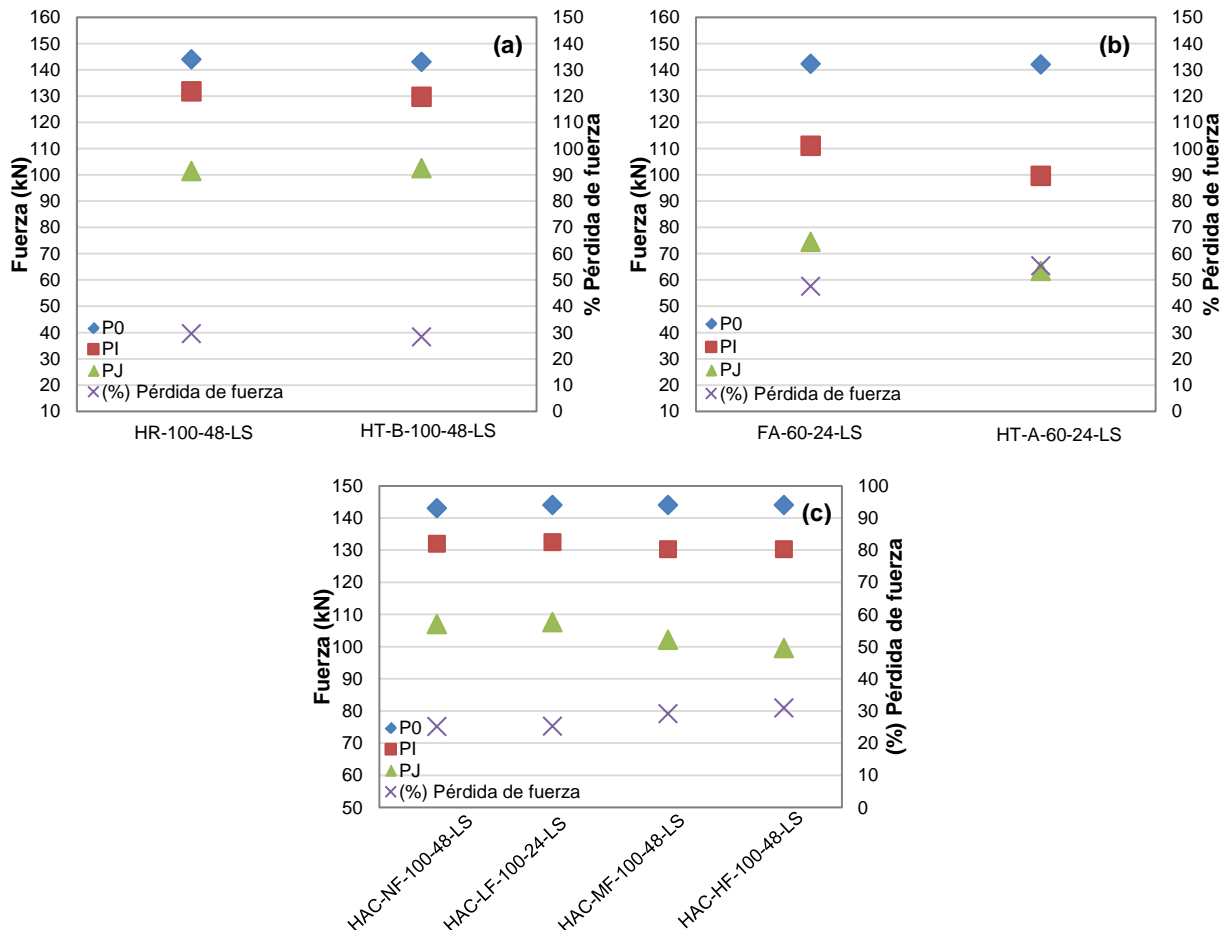
### 6.6.5 Hormigones especiales

El objetivo de este apartado es analizar la influencia de la pérdida de fuerza en diferentes hormigones (hormigón reciclado (HR), hormigón con fibras (FA) y hormigones autocompactantes (HAC)).

La Figura 6.6.5.1 (a) presenta la comparación entre un HR y un hormigón tradicional equivalente (HT-B) con igual sección transversal (100x100 mm<sup>2</sup>) e igual edad destesado (48 horas). Se aprecia cómo se alcanzan menores pérdidas de fuerza después de realizar la transmisión del pretensado en la probeta de HR-100-48-LS, en comparación a la probeta HT-B-100-48-LS, en contraposición a la pérdida de fuerza final que es mayor en la probeta de HR.

En la Figura 6.6.5.1 (b) se ilustra una comparación entre un hormigón con fibras (FA) y un hormigón tradicional (HT-A) equivalente de igual sección transversal y edad de destesado (60x60 mm<sup>2</sup> y 24 horas respectivamente). Se observa cómo la probeta FA-60-24-LS presenta un mejor comportamiento de la fuerza efectiva de pretensado y del porcentaje de pérdida de fuerza, en comparación con la probeta HT-A-60-24-LS.





**Figura 6.6.5.1.** Influencia del tipo de hormigón en la pérdida de fuerza en el sistema AMA para (a) HR-100-48-LS/HT-B-100-48-LS, (b) FA-60-24-LS/HT-A-60-24-LS y (c) HAC-100-48-LS.

La Figura 6.6.5.1 (c) muestra cuatro probetas de hormigón autocompactante (HAC) con diferente contenido de finos e igual sección transversal y edad destesado ( $100 \times 100 \text{ mm}^2$  y 48 horas respectivamente). Se aprecia cómo a mayor contenido de finos se obtiene una mayor pérdida de fuerza después de realizar la transmisión del pretensado y un mayor porcentaje de pérdida de fuerza.

## 6.7 Comparación de la fuerza de pretensado experimental obtenida con el método ECADA+ y a partir de las deformaciones en el tramo de meseta de la probeta de hormigón

A pesar de que el sistema AMA ideal debería tener la misma rigidez que la probeta de hormigón y el mismo comportamiento con el tiempo, esta rigidez depende de las propiedades del hormigón, la edad a la que se realiza el ensayo y de la sección transversal de la probeta fundamentalmente, por lo que resultaría poco operativo

diseñar el sistema para cada una de las condiciones de ensayo propuestas. Por esta razón, la rigidez del sistema diseñado es mayor que la rigidez de la probeta (no debe ser menor), de forma que la tensión en la armadura después de la transmisión del pretensado en el sistema es mayor que la fuerza de pretensado efectiva de la probeta, resultando en un efecto de discontinuidad en el tramo final de la probeta dando lugar a una sobrevaloración de la fuerza efectiva de pretensado (ver Figura 4.6.1).

A partir de los resultados de los apartados 6.5 y 6.6 se aprecia una misma tendencia de la fuerza justo después de la transmisión del pretensado y la fuerza tras 12 meses de mediciones, al analizar la influencia de las diferentes variables empleadas en esta Tesis utilizando los dos métodos de medida de la fuerza de pretensado.

La Tabla 6.7.1 resume los principales resultados de la fuerza de pretensado antes de realizar la transmisión del pretensado ( $P_0$ ), justo después de la transmisión del pretensado ( $P_I$ ) y después de 12 meses ( $P_J$ ), para la fuerza de pretensado medida con el método ECADA+ y la fuerza de pretensado efectiva calculada del promedio de las deformaciones en el tramo de meseta de acuerdo con la Ecuación 6.6.1. Las probetas están ordenadas por tipo de hormigón, de menor a mayor sección y edad de destesado.

Se ha considerado una sobrevaloración de la fuerza de pretensado medida en el sistema AMA, viéndose reflejado de manera general en los resultados de la Tabla 6.7.1 y el Anejo N. Siendo siempre las fuerzas ( $P_I$  y  $P_J$ ) medidas con el método de ensayo ECADA+ mayor que las fuerzas medidas a partir de las deformaciones longitudinales del hormigón. Esta sobrevaloración tiende a ser más acusada a medida que disminuye la sección transversal de la probeta y la edad de destesado para los diferentes hormigones, al igual que en los resultados con el tiempo.

La sobrevaloración es causada por el efecto de discontinuidad en el extremo de la probeta, por consiguiente las pérdidas de pretensado reales son subestimadas a partir de la fuerza de pretensado medida en el sistema AMA.

Probeta	P <sub>0</sub> (kN)	Sistema AMA		Probeta		Probeta/Sistema	
		P <sub>i</sub> (kN)	P <sub>J</sub> * (kN)	P <sub>i</sub> (kN)	P <sub>J</sub> * (kN)	Instantánea	Diferida
HT-A-60-24-GA	142	127	111	100	63	0,78	0,57
HT-A-60-48-GA	143	133	120	105	71	0,79	0,59
HT-A-80-12-GA	142	131	119	110	77	0,84	0,65
HT-A-80-24-GA	144	135	122	122	89	0,90	0,73
HT-A-100-12-GA	143	135	126	127	98	0,94	0,78
HT-A-100-24-GA	143	136	128	128	103	0,94	0,81
HT-B-60-48-GA	141	130	107	97	55	0,75	0,51
HT-B-80-24-GA	141	132	114	114	73	0,86	0,64
HT-B-80-48-GA	142	132	121	118	82	0,90	0,67
HT-B-100-24-GA	143	137	127	127	99	0,93	0,79
HT-B-100-48-GA	143	137	129	130	102	0,95	0,80
HT-C-80-48-GA	143	132	112	118	74	0,89	0,66
HT-C-100-24-GA	143	137	121	126	85	0,91	0,71
HT-C-100-48-GA	144	138	125	128	93	0,93	0,74
HR-100-48-GA	144	138	125	132	101	0,95	0,81
FA-60-24-GA	142	132	117	111	75	0,84	0,64
HAC-NF-100-48-GA	143	138	129	132	107	0,95	0,83
HAC-LF-100-48-GA	144	138	129	132	108	0,96	0,83
HAC-MF-100-48-GA	144	138	128	130	102	0,94	0,80
HAC-HF-100-48-GA	144	138	127	130	100	0,94	0,78

**Tabla 6.7.1.** Comparación de las pérdidas de pretensado medidas en el sistema AMA y calculadas en la probeta de hormigón.

\* Fuerza de pretensado a 12 meses.

Con el fin de determinar un coeficiente apropiado para calcular la subestimación de las pérdidas de pretensado, se han realizado algunos ajustes basados en la sección transversal de la probeta, para la respuesta inicial y diferida del sistema AMA como se muestra en la Figura 6.7.1. De acuerdo con lo anterior, se propone la ecuación 6.7.1 para el cálculo de las pérdidas de pretensado.

$$\Delta P = \kappa \cdot \Delta P_{AMA}$$

Ec. 6.7.1

donde:

$\Delta P$  = pérdidas de pretensado reales (a partir las deformaciones de la probeta)

$\kappa$  = coeficiente que tienen en cuenta efecto de la zona de discontinuidad

para la respuesta instantánea:

2.2 (para 100x100 mm<sup>2</sup> de sección transversal de probeta)

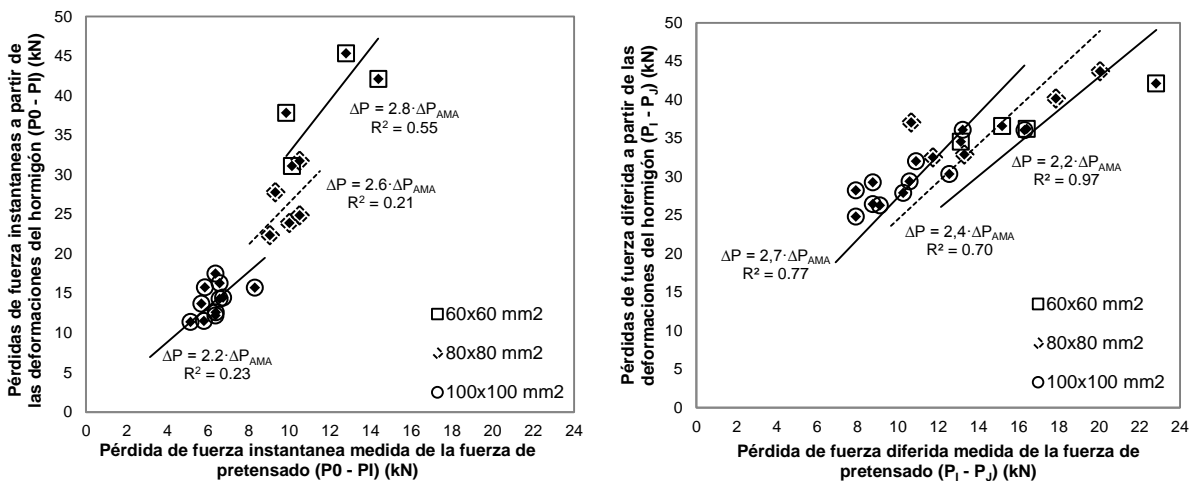
2.6 (para 80x80 mm<sup>2</sup> de sección transversal de probeta)

3.3 (para 60x60 mm<sup>2</sup> de sección transversal de probeta)

para respuesta diferida:

- 2.7 (para 100x100 mm<sup>2</sup> de sección transversal de probeta)
- 2.4 (para 80x80 mm<sup>2</sup> de sección transversal de probeta)
- 2.2 (para 60x60 mm<sup>2</sup> de sección transversal de probeta)

$\Delta P_{AMA}$  = pérdidas de pretensado medida desde la fuerza de pretensado



**Figura 6.7.1.** Coeficiente basado en la sección transversal de la probeta para calcular las pérdidas de pretensado (a) instantáneo y (b) diferido.

Las Figuras 6.7.2 y 6.7.3 presentan los resultados de las pérdidas de pretensado instantáneas (acortamiento elástico) y resultados diferidos (fluencia + retracción) respectivamente, para todas las probetas ensayadas incluyendo las pérdidas de pretensado calculadas a partir de las deformaciones del hormigón, las pérdidas de pretensado medidas desde la fuerza de pretensado registrada en el sistema AMA y los resultados de la pérdida de pretensado ajustados de acuerdo con la ecuación 6.7.1. Como se observa en las Figuras 6.7.2 y 6.7.3 las pérdidas de pretensado reales se pueden determinar desde la medida de la fuerza de pretensado aplicando el coeficiente  $\kappa$ . Una buena aproximación de los resultados según el tipo de hormigón, la sección transversal y la edad de destesado, de acuerdo con la nueva valoración, y solo pocos valores tienen una estimación parcialmente deficiente.

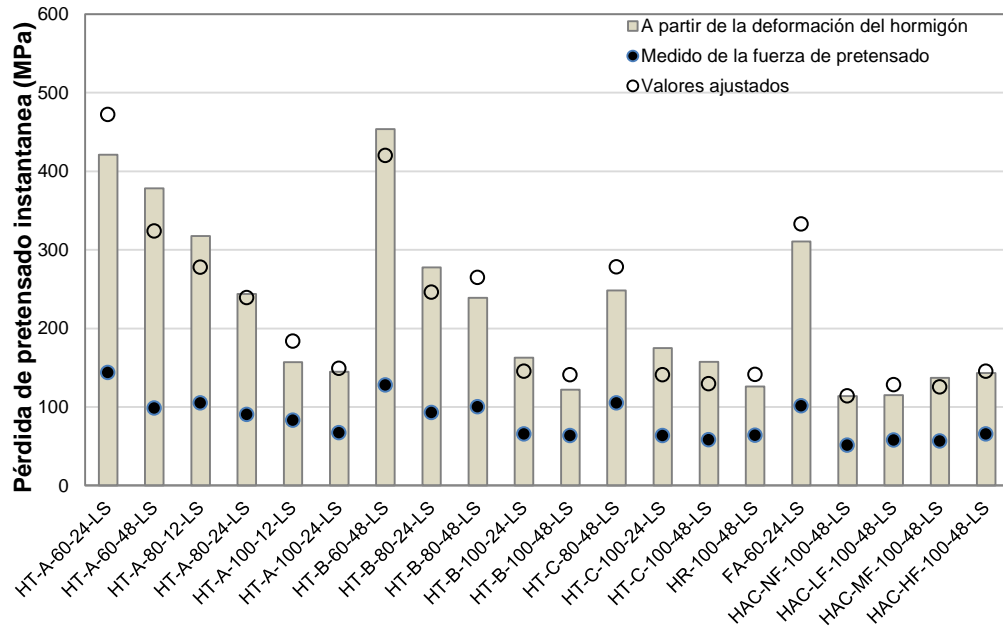


Figura 6.7.2. Resultados de la pérdida de pretensado instantánea con las predicciones de la ecuación 6.7.1.

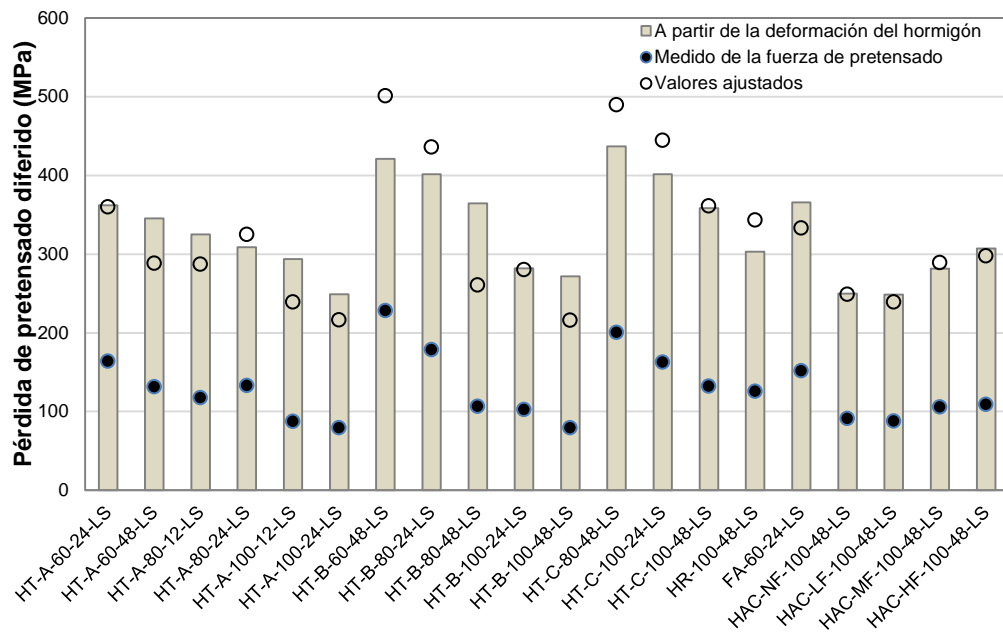
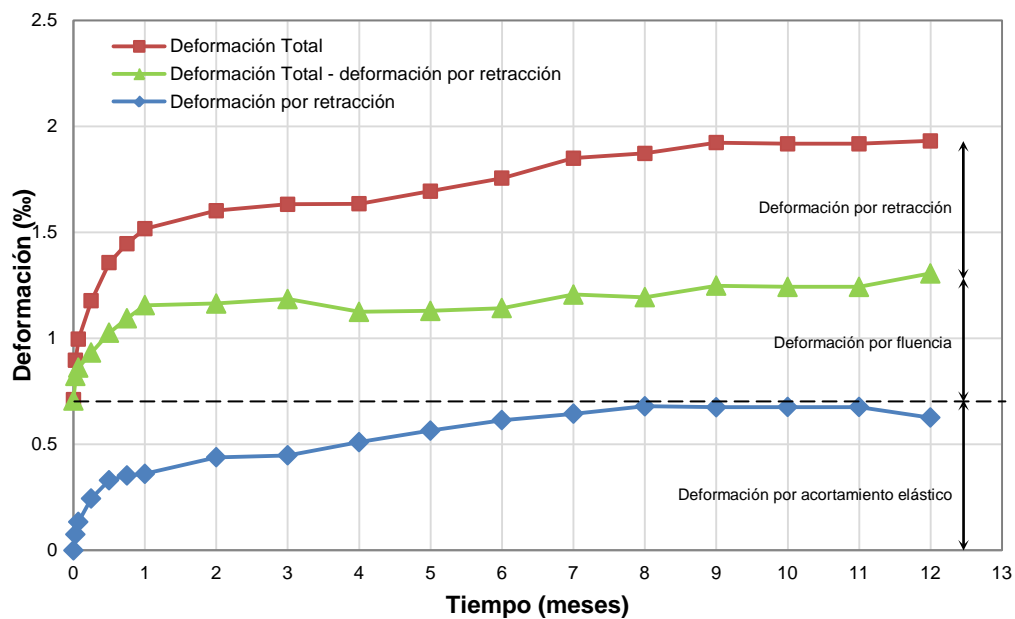


Figura 6.7.3. Resultados de la pérdida de pretensado diferida con las predicciones de la ecuación 6.7.1.

### 6.8. Pérdidas experimentales instantáneas y diferidas de pretensado

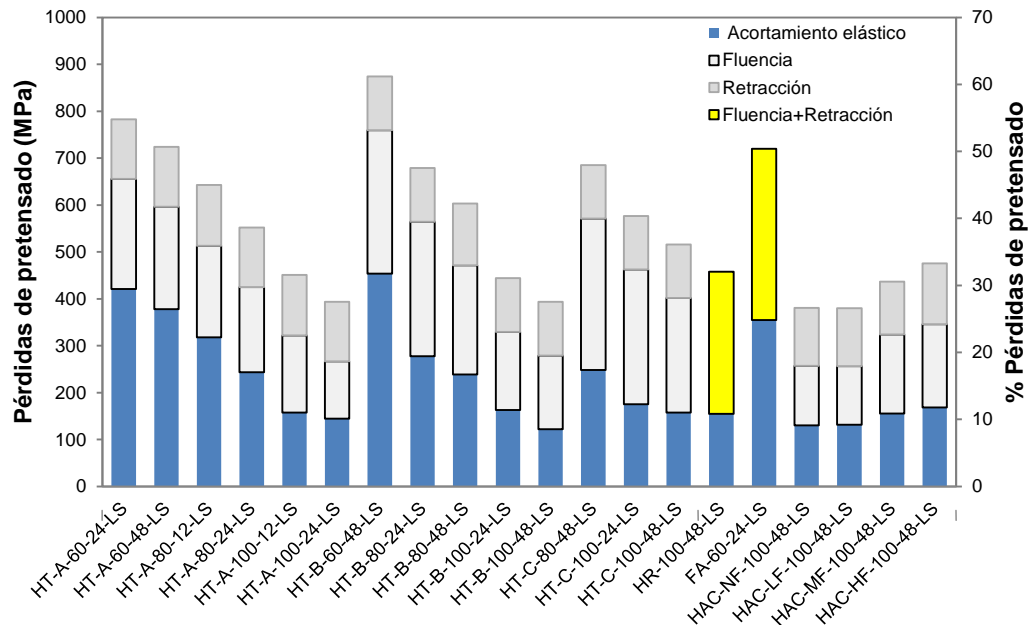
En este caso las pérdidas de pretensado fueron calculadas a partir de los datos de deformación longitudinal del hormigón. Con el fin de obtener por separado las pérdidas de pretensado por fluencia y retracción del hormigón, a modo de ejemplo la Figura 6.8.1 (ver anejo L) describe para la probeta HT-A-100-24-LS el promedio de las deformaciones longitudinales en la zona de meseta respecto al tiempo. Esta curva representa el perfil de deformaciones del hormigón para cada edad de medición y tiene en cuenta el total de las deformaciones del hormigón (deformaciones instantáneas a tiempo 0 y deformaciones diferidas a 12 meses). Adicionalmente, la Figura 6.8.1 incluye la curva de las deformaciones por retracción del hormigón, medidas en probetas de hormigón con armadura no tesada (ver Capítulo 3). Al restar ambas curvas (deformación total y deformación por retracción) y restando las deformaciones instantáneas, se obtienen las pérdidas de pretensado debido a fluencia del hormigón.



**Figura 6.8.1.** Deformación media en el tramo de meseta, deformación por retracción y fluencia vs. Tiempo. Probeta HT-A-100-24-LS.

La Figura 6.8.2 presenta las pérdidas de pretensado obtenidas para las probetas de hormigón tradicional (A, B, C) y las probetas de hormigones especiales (HR, FA, HAC), diferenciado para cada probeta las pérdidas por acortamiento elástico (instantáneas), fluencia y retracción del hormigón (diferidas). Solamente en las probetas HR-100-48-LS y FA-60-24-LS se midieron conjuntamente las pérdidas por

fluencia y retracción. Además, en el eje secundario se representa el porcentaje de las pérdidas de pretensado.



**Figura 6.8.2.** Pérdidas de pretensado y porcentaje de pérdidas medidas experimentalmente.

En la Figura 6.8.2 se puede observar que:

- Dentro de cada serie de hormigón tradicional (A, B y C) las pérdidas de pretensado disminuyen cuando la edad de destesado aumenta (HT-A-60-24-LS/HT-A-60-48-LS, HT-A-80-12-LS/HT-A-80-24-LS, HT-A-100-12-LS/HT-A-100-24-LS, HT-B-80-24-LS/HT-B-80-48-LS, HT-B-100-24-LS/HT-B-100-48-LS, HT-C-100-24-LS/HT-C-100-48-LS).
- En probetas de igual sección transversal y edad de destesado, al aumentar la resistencia del hormigón disminuyen las pérdidas de pretensado (HT-A-60-48-LS/HT-B-60-48-LS, HT-A-80-24-LS/HT-B-80-24-LS, HT-B-80-48-LS/HT-C-80-48-LS, HT-A-100-24-LS/HT-B-100-24-LS/HT-C-100-24-LS, HT-B-100-48-LS/HT-C-100-48-LS).
- Al incrementar la sección transversal de la probeta disminuyen las pérdidas de pretensado en probetas de igual tipo de hormigón e igual edad de destesado (HT-A-60-24-LS/HT-A-80-24-LS/HT-A-100-24-LS, HT-A-80-12-LS/HT-A-100-12-LS, HT-B-60-48-LS/HT-B-80-48-LS/HT-B-100-48-LS, HT-B-80-24-LS/HT-B-100-24-LS, HT-C-80-48-LS/HT-C-100-48-LS).

- Al comparar una probeta de hormigón reciclado con una probeta equivalente de hormigón tradicional (HR-100-48-LS/ HT-B-100-48-LS), se observa que las pérdidas para la probeta de HR son ligeramente mayores que para la probeta de hormigón tradicional B.
- Al utilizar fibras de acero en la probeta de hormigón pretensado se obtienen menores pérdidas al compararla con una probeta equivalente de hormigón tradicional (FA-60-48-LS/ HT-A-60-48-LS).
- En la serie de hormigones autocompactantes, al aumentar la cantidad de finos se incrementan las pérdidas de pretensado (HAC-NF-100-48-LS/HAC-LF-100-48-LS/HAC-MF-100-48-LS/HAC-HF-100-48-LS).
- La mayor diferencia de las pérdidas para las diferentes probetas corresponde a las pérdidas de pretensado debidas al acortamiento elástico del hormigón, con valores que varían en un 10% para probetas de mayor sección transversal, de 15-20% para probetas de sección transversal intermedias y de 25-30% para probetas de menor sección transversal.
- El total de las pérdidas de pretensado medidas en las probetas de hormigón varían dentro de un rango de 25-60% (25-40% para probetas de mayor sección transversal, de 40-50% para probetas de sección transversal intermedia y de 50-60% para probetas de menor sección transversal) superando los porcentajes de diseño especificados por Calavera (1999), excepto para probetas de mayor sección transversal. Este hecho puede ser atribuido a los diferentes niveles de tensión introducidos en el hormigón y al comportamiento dependiente de la rigidez relacionada con la sección transversal de la probeta de hormigón.

## **6.9 Estimación del módulo de deformación del hormigón a partir de las deformaciones medias del hormigón**

Se realizó un estudio para determinar el módulo de deformación del hormigón en edades tempranas para cada probeta (según el tipo de hormigón, la sección transversal y edad de destesado). Este se puede obtener de las pérdidas de pretensado debido al acortamiento elástico del hormigón, aplicando la compatibilidad de deformaciones entre el hormigón, la armadura de pretensado y las propiedades de la sección transformada, de acuerdo con la ecuación 6.9.1:



$$\Delta\varepsilon_{ci} = \frac{P_0}{1 + n\rho} \cdot \frac{1}{E_{ci}A_c}$$

ó

$$E_{ci} = \frac{\frac{P_0}{\Delta\varepsilon_{ci}} - E_p A_p}{A_c}$$

Ec. 6.9.1

donde:

- $\Delta\varepsilon_{ci}$  = deformación por acortamiento elástico del hormigón debido a la transmisión del pretensado
- $P_0$  = fuerza de la armadura de pretensado justo antes de la transmisión del pretensado
- $n$  = relación modular inicial ( $n = E_p/E_{ci}$ )
- $E_p$  = módulo de elasticidad de la armadura
- $E_{ci}$  = módulo de deformación del hormigón en la transmisión del pretensado
- $\rho$  = relación geométrica ( $\rho = A_p/A_c$ )
- $A_p$  = área de la armadura
- $A_c$  = sección transversal neta de la probeta

La Figura 6.9.1 representa para cada probeta el valor experimental de  $E_{ci}$  de acuerdo con la Ecuación 6.9.1. Se observan diferentes de  $E_{ci}$  según las variables analizadas, dependiendo de la edad de destesado (mayor  $E_{ci}$  cuando se incrementa la edad de destesado), de la resistencia del hormigón (mayor  $E_{ci}$  cuando se incrementa la resistencia a compresión del hormigón), de la sección transversal de la probeta (mayor  $E_{ci}$  cuando se incrementa la sección de la probeta) y de los hormigones especiales (mayor  $E_{ci}$  cuando se adicionan fibras de acero, menor  $E_{ci}$  cuando se utiliza HR y mayor  $E_{ci}$  cuando se disminuye la cantidad de finos).

No obstante, módulos de deformación del hormigón a cortas edades son comúnmente obtenidos a partir de la resistencia del hormigón a 28 días, por medio de una función que describe el desarrollo de las propiedades del hormigón con el tiempo. A partir de los resultados experimentales de  $E_{ci}$ , de las propiedades características del hormigón y del efecto del tiempo, es posible realizar un análisis de efecto del tamaño de la sección transversal de la probeta sobre los módulos de deformación del hormigón.

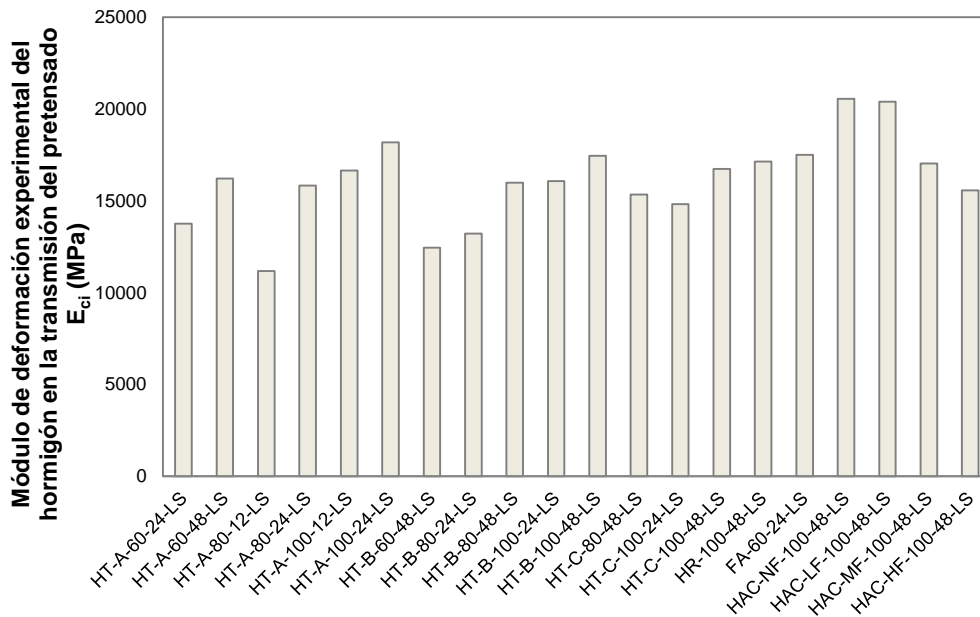


Figura 6.9.1. Módulos de deformación a partir de las deformaciones medias del hormigón.

Con este fin, se han tomado como referencias las ecuaciones proporcionadas por el Código Modelo (CM2010) para el módulo de deformación a 28 días (Ec. 6.9.2) y la consideración del efecto del tiempo (Ec. 6.9.3 y Ec. 6.9.4).

$$E_{c28} = 19400 \left( \frac{f_{cm}}{10} \right)^{1/3} \tag{Ec. 6.9.2}$$

$$E_c(t) = [\beta_{cc}(t)]^{0.5} \cdot E_{c28} \tag{Ec. 6.9.3}$$

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \cdot \left[ 1 - \left( \frac{28}{t} \right)^{0.5} \right] \right\} \tag{Ec. 6.9.4}$$

donde:

- $E_{c28}$  = módulo de deformación del hormigón a 28 días (MPa)
- $f_{cm}$  = resistencia a compresión del hormigón a 28 días (MPa)
- $E_c(t)$  = módulo de deformación del hormigón a una edad  $t$
- $\beta_{cc}(t)$  = coeficiente que describe el desarrollo con el tiempo
- $s$  = coeficiente que tiene en cuenta la clase de resistencia del hormigón ( $s = 0.2$  para clase 52.5 R)
- $t$  = edad del hormigón (días)

Con el fin de determinar un factor corrector del efecto del tamaño y teniendo en cuenta las diferentes secciones transversales de probeta, se realizaron diversos ajustes a partir de los valores experimentales de  $E_{ci}$ , de acuerdo con la Ecuación 6.9.1 y los valores calculados de  $E_c(t)$  de acuerdo con la Ecuación 6.9.3 como se muestra en la Figura 6.9.2. Por lo tanto, la siguiente ecuación es propuesta:

$$E_{ci} = \lambda \cdot E_c(t)$$

Ec. 6.9.5

donde:

$E_{ci}$  = módulo de deformación del hormigón en el momento de la transmisión del pretensado de acuerdo con la ecuación 6.9.1

$\lambda$  = coeficiente que tiene en cuenta el efecto del tamaño de la sección transversal:

0.721 (para sección transversal 100x100 mm<sup>2</sup>)

0.612 (para sección transversal 80x80 mm<sup>2</sup>)

0.523 (para sección transversal 60x60 mm<sup>2</sup>)

$E_c(t)$  = módulo de deformación del hormigón en la transmisión del pretensado de acuerdo con la ecuación 6.9.3.

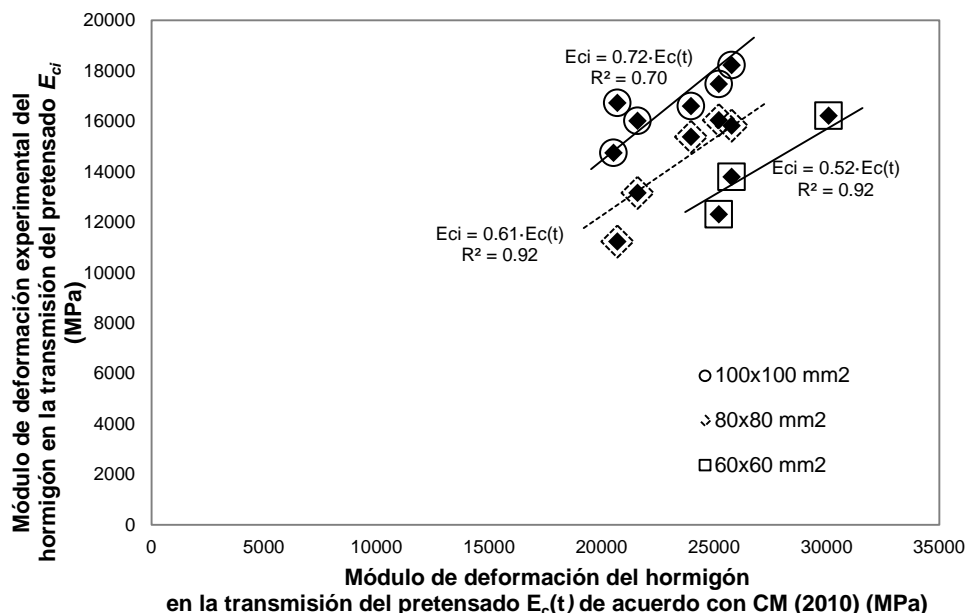
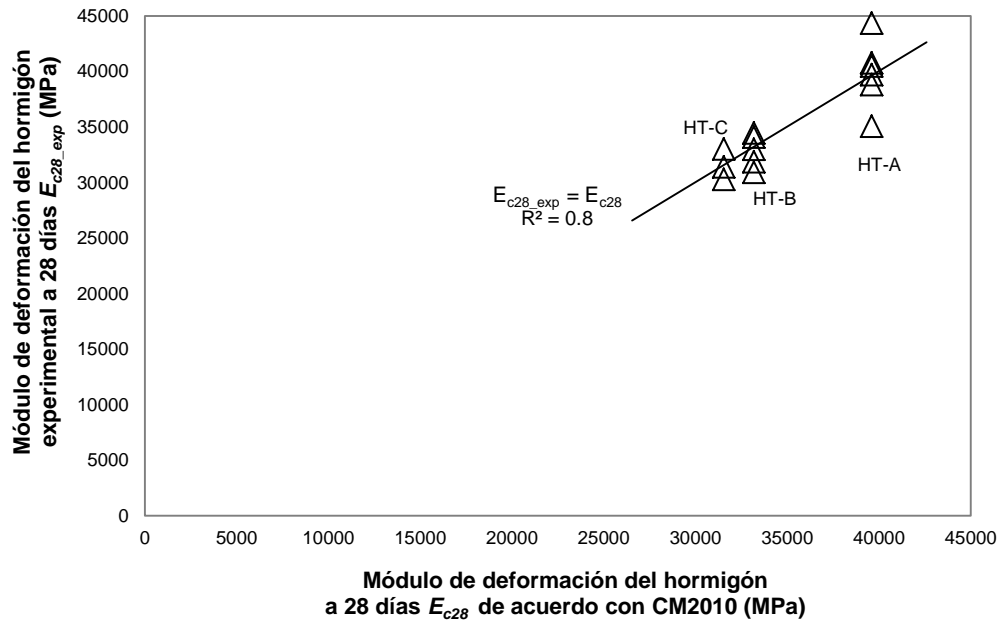


Figura 6.9.2. Coeficiente corrector del efecto del tamaño de la sección transversal.

Los módulos de deformación para cada probeta a la edad de 28 días ( $E_{c28_s}$ ) pueden ser calculados de la siguiente manera:

- a) Determinando los valores de  $E_{ci}$  de acuerdo con Ecuación 6.9.1.
- b) Calculando el módulo de deformación del hormigón a 28 días para cada probeta ( $\underline{E}_{c28_s}$ ) de acuerdo con la Ecuación 6.9.3, con  $E_c(t) = E_{ci}$  y  $\beta_{cc}(t)$  de acuerdo con la Ecuación 6.9.4.
- c) Aplicando el coeficiente corrector del efecto del tamaño de la sección transversal de la Ecuación 6.9.5, obteniendo el valor experimental del módulo de deformación a 28 días ( $E_{c28\_exp}$ ) de la siguiente forma:  $E_{c28\_exp} = \underline{E}_{c28_s} / \lambda$ . La Figura 6.9.3 compara los resultados experimentales con las predicciones teóricas del CM2010 (de acuerdo con la Ecuación 6.9.2), presentando una buena correlación para cada tipo de hormigón. Por lo tanto, se puede concluir que el coeficiente  $\lambda$ , inicialmente obtenido para el momento de la transmisión del pretensado, es también aplicable a 28 días.
- d) Los valores de  $E_{c28_s}$  puede obtenerse:
  - Aproximadamente a partir de la resistencia del hormigón a 28 días aplicando la Ecuación 6.9.2, obteniendo  $E_{c28}$ , para utilizar este resultado de acuerdo con la Ecuación 6.9.5:  $E_{c28_s} = \lambda \cdot E_{c28}$
  - Con mayor exactitud a partir del módulo de deformación en el momento del destesado de la siguiente forma:
    - i. Obteniendo un valor medio del módulo de deformación a 28 días ( $E_{c28_m}$ ) para cada tipo de hormigón de los resultados experimentales ( $E_{c28\_exp}$ )
    - ii. Aplicando posteriormente el coeficiente corrector del efecto del tamaño de la sección transversal:  $E_{c28_s} = \lambda \cdot E_{c28_m}$
- e) Un nuevo valor de  $E_{ci}$  para cada probeta puede ser calculado de acuerdo con la Ecuación 6.9.3, sustituyendo  $E_c(t)$  por  $E_{ci}$  y  $E_{c28}$  por  $E_{c28_s}$ .

Lo resultados de este proceso, para cada probeta, se presenta en la Tabla 6.9.1.



**Figura 6.9.3.** Comparación del módulo de deformación a 28 días experimental y de acuerdo al CM2010.

Probeta	Módulo de deformación del hormigón (MPa)							
	Experimental					CM-2010		
	$E_{ci}$	$E_{c28_s}$	$E_{c28_{exp}}$	$E_{c28_m}$	$E_{c28_s}$	$E_{c28}$	$E_{c28_s}$	$E_{ci}$
HT-A-60-24-LS	13790	21180	40498	39863	20848	39592	20707	13481
HT-A-60-48-LS	16205	21317	40759		20848		20707	15741
HT-A-80-12-LS	11221	21458	35062		24396		24230	12670
HT-A-80-24-LS	15820	24299	39703		24396		24230	15775
HT-A-100-12-LS	16718	31971	44342		28741		28546	14927
HT-A-100-24-LS	18219	27984	38812		28741		28546	18585
HT-B-60-48-LS	12296	16175	30927	32868	17190	33174	17350	13189
HT-B-80-24-LS	13146	20191	32992		20116		20302	13218
HT-B-80-48-LS	16037	21095	34470		20116		20302	15434
HT-B-100-24-LS	16002	24578	34088		23698		23918	15572
HT-B-100-48-LS	17465	22975	31865		23698		23918	18183
HT-C-80-48-LS	15366	20213	33027	31569	19320	31547	19307	14677
HT-C-100-24-LS	14742	22643	31405		22761		22745	14809
HT-C-100-48-LS	16594	21828	30275		22761		22745	17291
HAC-NF-100-48-LS	20544	27024	37508	37508	27024	34856	25114	19092
HAC-LF-100-48-LS	20398	26832	37240	37240	26832	35830	25816	19625
HAC-MF-100-48-LS	17018	22386	31070	31070	22386	35640	25678	19521
HAC-HF-100-48-LS	15556	20463	28402	28402	20463	35252	25399	19309

**Tabla 6.9.1.** Resultados del módulo de deformación del hormigón experimentales Y de acuerdo con el MC2010.

## **6.10 Métodos de cálculo de las pérdidas de pretensado**

De acuerdo con ACI 318 y comentario (2011), y el PCI DH (2010), estimaciones razonables de las pérdidas de pretensado pueden ser obtenidas de acuerdo con las recomendaciones hechas por Zia et al. (1979). Para condiciones de diseño inusuales y estructuras especiales, se puede considerar el modelo del PCI CPL (1975) que establece un procedimiento más detallado.

La AASHTO LRFD (2012) utiliza dos métodos (Aproximado y Refinado) para calcular las pérdidas de pretensado y se diferencia porque es un modelo aplicable en hormigones de alta resistencia. Sin embargo, el AASHTO Standard (2003) para el cálculo de las pérdidas de pretensado sigue las recomendaciones de la AASHTO LRFD (2004).

En el caso de la instrucción de hormigón estructural EHE (2008), sus estimaciones para calcular las pérdidas de pretensado tienen en cuenta el coeficiente de envejecimiento, que coincide con las especificaciones establecidas en EC-2 (2010) y el CM (2010).

Valores teóricos de las pérdidas de pretensado se han estimado a partir de los parámetros medidos usando seis métodos: PCI Design Handbook (PCI DH) (2010), PCI Committee on prestress losses (PCI CPL) (1975), AASHTO Standard (2003), AASHTO LRFD (métodos Aproximado y Refinado) (2012), Código Modelo CEB-FIB (CM) (2010), Eurocódigo 2 (EC-2) (2010) y la Instrucción de Hormigón Estructural EHE (2008).

El Anejo O presenta un ejemplo de las pérdidas de pretensado calculadas con los diferentes modelos teóricos para la probeta HT-A-100-24-LS.

### **6.10.1 PCI Design Handbook (2010)**

El PCI DH (2010) presenta un método para determinar las pérdidas de pretensado debido al acortamiento elástico, la fluencia del hormigón y la retracción del hormigón, por medio de las siguientes expresiones.

Las pérdidas por acortamiento elástico se calculan mediante la Ecuación 6.10.1.1

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

Ec. 6.10.1.1

donde:

- ES = acortamiento elástico del hormigón  
 K<sub>es</sub> = 1.0 para elementos pretensados  
 E<sub>s</sub> = módulo de elasticidad de la armadura pretesa  
 E<sub>ci</sub> = módulo de elasticidad del hormigón en el momento del destesado  
 f<sub>cir</sub> = tensión de compresión neta en el hormigón a nivel de centro de gravedad de la armadura inmediatamente después de haberse aplicado la totalidad del pretensado, dado en la Ecuación 6.10.1.2.

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

Ec.6.10.1.2

donde:

- K<sub>cir</sub> = 0.9 para elementos pretensados  
 f<sub>cpi</sub> = tensión en el hormigón a nivel de centro de gravedad de los elementos tensores producida por la fuerza de tesado consideradas solamente las pérdidas por fricción y por acuñamiento de anclajes  
 f<sub>g</sub> = tensión en el hormigón a nivel de centro de gravedad de la armadura debido al peso propio y otras cargas presentes en el momento del pretensado

Las pérdidas por fluencia del hormigón se calculan mediante la Ecuación 6.10.1.3.

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

Ec. 6.10.1.3

donde:

- CR = fluencia del hormigón  
 K<sub>cr</sub> = 2.0 para hormigón con densidad normal  
 E<sub>c</sub> = módulo de elasticidad del hormigón a 28 días  
 f<sub>cds</sub> = tensión en el hormigón a nivel del centro de gravedad de la armadura debida a todas las cargas permanentes que se agregan luego del tesado

Las pérdidas por retracción del hormigón se calculan mediante la Ecuación 6.10.1.4.

$$SH = 8.2 \times 10^{-6} K_{sh} E_s \left( 1 - 0.024 \frac{V}{S} \right) (100 - RH)$$

Ec. 6.10.1.4

donde:

- SH = retracción del hormigón
- $K_{sh}$  = 1.0 para elementos pretensados
- V/S = relación volumen superficie
- RH = humedad relativa

Los resultados teóricos se presentan en la Tabla 6.10.1.1. Las pérdidas por fluencia y retracción del hormigón fueron corregidas por un coeficiente dependiente del tiempo (12 meses), ya que este método determina las pérdidas de pretensado a tiempo infinito.

Probeta	$P_0$ (kN)	Acortamiento elástico (MPa)	$P_1$ (kN)	Fluencia (MPa)*	Retracción (MPa)**	$P_J$ (kN)	Pérdidas totales (MPa)
HT-A-60-24-LS	142	524	89	269	62	56	855
HT-A-60-48-LS	143	450	98	272	62	65	784
HT-A-80-12-LS	142	363	105	151	61	84	575
HT-A-80-24-LS	144	260	118	154	61	96	476
HT-A-100-12-LS	143	157	127	98	61	112	316
HT-A-100-24-LS	142	143	128	97	61	112	302
HT-B-60-48-LS	142	582	84	323	62	46	967
HT-B-80-24-LS	141	306	111	180	61	87	548
HT-B-80-48-LS	142	254	117	181	61	92	497
HT-B-100-24-LS	144	163	127	117	61	109	341
HT-B-100-48-LS	143	150	128	117	61	110	327
HT-C-80-48-LS	143	266	116	192	61	91	520
HT-C-100-24-LS	144	177	126	123	61	108	361
HT-C-100-48-LS	144	158	128	124	61	110	342
HAC-NF-100-48-LS	143	128	131	111	61	113	300
HAC-LF-100-48-LS	144	129	131	109	61	114	299
HAC-MF-100-48-LS	144	155	128	109	61	111	325
HAC-HF-100-48-LS	145	170	128	111	61	110	342

**Tabla 6.10.1.1.** Pérdidas de pretensado determinadas a partir del modelo teórico PCI DH (2010).

\* Corregida por factor de variación de la fluencia con el tiempo (0.74) (Tabla 6.10.2.2)

\*\* Corregida por coeficiente de retracción para la edad de curado (0.86) (Tabla 6.10.2.4)



### 6.10.2 PCI Committee on prestress losses (1975)

Las recomendaciones del PCI CPL (1975) se utilizan en este estudio para calcular las pérdidas de pretensado de manera individual y posteriormente sumarlas determinando las pérdidas totales. Estas pérdidas por acortamiento elástico, fluencia y retracción del hormigón se determinan de la siguiente manera:

Las pérdidas por acortamiento elástico (ES) del hormigón pueden ser calculadas a partir de los módulos de elasticidad del hormigón ( $E_{ci}$ ) y de acero ( $E_s$ ), en el momento que la fuerza de pretensado es aplicada, por medio de la Ecuación 6.10.2.1.

$$ES = f_{cr}(E_s/E_{ci}) \quad \text{Ec. 6.10.2.1}$$

donde:

$f_{cr}$  = tensión de compresión debida a la fuerza de pretensado que actúa inmediatamente después del destesado menos la tensión debida a la carga muerta actuante en ese momento.

Las pérdidas debido a la fluencia del hormigón (CR) se calculan de acuerdo con la Ecuación 6.10.2.2.

$$CR = (UCR)(SCF)(MCF)(PCR)(F_c) \quad \text{Ec. 6.10.2.2}$$

donde:

UCR =  $95 - 20E_c/10^6 \geq 11$  ( $E_c$  módulo de elasticidad del hormigón)

PCR =  $(AUC)_t - (AUC)_{t1}$

MCF = el factor de fluencia para curado y destesado a uno y dos días es 1.22 y 1.18 respectivamente

SCF y AUC se presentan en la Tabla 6.10.2.1 y Tabla 6.10.2.2

$f_c$  = tensión de compresión del hormigón en el centro de gravedad de la armadura pretensada

Relación volumen superficie (in)	Factor de fluencia SCF
1	1.05
2	0.96
3	0.87
4	0.77
5	0.68
>5	0.68

**Tabla 6.10.2.1.** Factor de fluencia para la relación volumen superficie.

Tiempo después del destesado (días)	AUC
1	0.08
2	0.15
5	0.18
7	0.23
10	0.24
20	0.30
30	0.35
60	0.45
90	0.51
180	0.61
365	0.74
Final de vida de servicio	1.00

**Tabla 6.10.2.2.** Variación de la fluencia con el tiempo después del destesado.

Las pérdidas debido a la retracción del hormigón (SH) se calculan de acuerdo con la Ecuación 6.10.2.3.

$$SH = (USH)(SSF)(PSH)$$

Ec. 6.10.2.3

donde:

$$USH = 27000 - 3000E_c/10^6 \geq 12000$$

$$PSH = (AUS)_t - (AUS)_{t1}$$

SSF y AUS se presentan en la Tabla 6.10.2.3 y Tabla 6.10.2.4

Relación volumen superficie (in)	Factor de retracción SSF
1	1.04
2	0.96
3	0.86
4	0.77
5	0.69
6	0.60

**Tabla 6.10.2.3.** Factor de retracción para la relación volumen superficie.

Tiempo después del final de curado (días)	AUS
1	0.08
3	0.15
5	0.20
7	0.22
10	0.27
20	0.36
30	0.42
60	0.55
90	0.62
180	0.68
365	0.86
Final de vida de servicio	1.00

**Tabla 6.10.2.4.** Coeficiente de retracción para varias edades de curado.

Los resultados de las pérdidas de pretensado según el modelo PCI CPL (1975) se muestran en la Tabla 6.10.2.5. Se presenta la fuerza inicial de pretensado ( $P_0$ ) las pérdidas debidas al acortamiento elástico justo después de la transmisión del pretensado, las pérdidas diferidas por la fluencia y la retracción del hormigón y las pérdidas totales.

Probeta	P <sub>0</sub> (kN)	Acortamiento elástico (MPa)	P <sub>1</sub> (kN)	Fluencia (MPa)	Retracción (MPa)	P <sub>J</sub> (kN)	Pérdidas totales (MPa)
HT-A-60-24-LS	142	421	100	294	74	63	789
HT-A-60-48-LS	143	378	105	312	74	67	764
HT-A-80-12-LS	142	318	110	180	74	84	572
HT-A-80-24-LS	144	244	120	196	74	93	514
HT-A-100-12-LS	143	157	127	133	74	107	364
HT-A-100-24-LS	142	145	128	134	74	107	352
HT-B-60-48-LS	142	453	97	287	77	61	818
HT-B-80-24-LS	141	278	114	186	77	87	541
HT-B-80-48-LS	142	239	118	194	77	91	510
HT-B-100-24-LS	144	163	127	133	77	106	373
HT-B-100-48-LS	143	150	128	134	77	107	362
HT-C-80-48-LS	143	248	118	194	82	90	524
HT-C-100-24-LS	144	175	126	132	82	105	389
HT-C-100-48-LS	144	158	128	134	82	107	374
HAC-NF-100-48-LS	143	130	130	136	73	109	340
HAC-LF-100-48-LS	144	132	131	137	70	110	339
HAC-MF-100-48-LS	144	155	128	134	71	108	360
HAC-HF-100-48-LS	145	169	128	133	72	107	374

**Tabla 6.10.2.5.** Pérdidas de pretensado determinadas a partir del modelo teórico PCI CPL (1975).

### 6.10.3 AASHTO Standard (2003)

El modelo de la AASHTO Standard permite calcular de una manera práctica y por partes las pérdidas debido al acortamiento elástico, retracción y fluencia del hormigón. El total de las pérdidas de pretensado se calcula sumando dichas pérdidas, según las siguientes ecuaciones:

Las pérdidas por acortamiento elástico ( $\Delta f_{pES}$ ) se calculan por medio de la siguiente ecuación:

$$\Delta f_{pES} = \frac{E_p}{E_{ci}} f_{cgp}$$

Ec. 6.10.3.1

donde:

- $E_p$  = módulo de elasticidad de la armadura  
 $E_{ci}$  = módulo de elasticidad del hormigón al destesar

$f_{cgp}$  = tensión del hormigón en el centro de gravedad de la armadura debido a la fuerza de pretensado al transmitir y el peso propio del elemento de la sección en el momento máximo.

Las pérdidas debido a la retracción ( $\Delta f_{pSR}$ ) se calculan de acuerdo a la Ecuación 6.10.3.2.

$$\Delta f_{pSR} = (17 - 0.15H)$$

Ec. 6.10.3.2

donde:

H = humedad relativa

Las pérdidas debido a la fluencia ( $\Delta f_{pCR}$ ) se calculan de acuerdo a la Ecuación 6.10.3.3.

$$\Delta f_{pCR} = 12f_{cgp} - 7\Delta f_{cdp}$$

Ec. 6.10.3.3

donde:

$\Delta f_{cdp}$  = cambio en la tensión del hormigón en el centro de gravedad de la armadura debido a la carga permanente.

En la Tabla 6.10.3.1 se presentan los resultados de las pérdidas de pretensado calculadas al aplicar el modelo AASHTO Standard (2003).

Probeta	P <sub>0</sub> (kN)	Acortamiento elástico (MPa)	P <sub>1</sub> (kN)	Fluencia (MPa)	Retracción (MPa)	P <sub>J</sub> (kN)	Pérdidas totales (MPa)
HT-A-60-24-LS	142	421	100	342	60	59	823
HT-A-60-48-LS	143	378	105	362	60	63	800
HT-A-80-12-LS	142	318	110	209	60	83	587
HT-A-80-24-LS	144	244	120	228	60	91	532
HT-A-100-12-LS	143	157	127	154	60	106	372
HT-A-100-24-LS	142	145	128	155	60	106	360
HT-B-60-48-LS	142	453	97	333	60	58	847
HT-B-80-24-LS	141	278	114	216	60	86	554
HT-B-80-48-LS	142	239	118	225	60	90	524
HT-B-100-24-LS	144	163	127	154	60	106	377
HT-B-100-48-LS	143	150	128	155	60	106	366
HT-C-80-48-LS	143	248	118	225	60	90	534
HT-C-100-24-LS	144	175	126	153	60	105	388
HT-C-100-48-LS	144	158	128	156	60	107	374
HAC-NF-100-48-LS	143	130	130	158	60	109	349
HAC-LF-100-48-LS	144	132	131	159	60	109	351
HAC-MF-100-48-LS	144	155	128	156	60	107	371
HAC-HF-100-48-LS	145	169	128	155	60	106	384

**Tabla 6.10.3.1.** Pérdidas de pretensado determinadas a partir del modelo teórico AASHTO Standard (2003).

#### 6.10.4 AASHTO LRFD (métodos Aproximado y Refinado) (2012)

Las pérdidas de pretensado se determinaron de acuerdo con el método AASHTO LRFD (2012). El artículo 5.9.5.2.3 de dicha norma se empleó para calcular las pérdidas por acortamiento elástico. Los artículos 5.9.5.3 (método Aproximado) y el artículo 5.9.5.4 (método Refinado) se emplearon para calcular las pérdidas diferidas.

El cálculo de las pérdidas por acortamiento elástico según el artículo 5.9.5.2.3, se puede realizar por medio de la Ecuación 6.10.4.1.

$$\Delta f_{pES} = \frac{A_{ps} f_{pbt} (I_g + e_{pg}^2 A_g) - e_{pg} M_g A_g}{A_{ps} (I_g + e_{pg}^2 A_g) + \frac{A_g I_g E_{ci}}{E_p}}$$

Ec. 6.10.4.1

donde:

$\Delta f_{pES}$  = pérdida por acortamiento elástico

$A_{ps}$  = área de la armadura

- $A_g$  = área de la probeta  
 $f_{pbt}$  = tensión en la armadura antes del destesado  
 $I_g$  = momento de inercia de la sección transversal de la probeta  
 $e_{pg}$  = excentricidad de la armadura con respecto al centroide de la sección transversal de la probeta  
 $M_g$  = momento debido al peso propio de la probeta  
 $E_{ci}$  = módulo de elasticidad de la probeta de hormigón al destesado  
 $E_p$  = módulo de elasticidad de la armadura

Para verificar la pérdida por acortamiento elástico se puede utilizar la Ecuación 6.10.4.2

$$\Delta f_{pES} = \frac{E_p}{E_{ci}} f_{cgp}$$

Ec. 6.10.4.2

donde:

$f_{cgp}$  = tensión en el hormigón en el centro de gravedad de la armadura debido a la fuerza de pretensado al destesado y el peso propio de la probeta en la sección de momento máximo.

Las pérdidas diferidas según el método **Aproximado** (artículo 5.9.5.3) se pueden evaluar con la Ecuación 6.10.4.3.

$$\Delta f_{pTL} = 10 \frac{f_{bpt} A_{ps}}{A_g} \gamma_h \gamma_{st} + 12 \gamma_h \gamma_{st}$$

Ec. 6.10.4.3

donde:

- $\Delta f_{pTL}$  = pérdida diferida  
 $\gamma_h$  = factor de corrección de la humedad relativa  
 =  $1.7 - 0.01H$   
 $H$  = humedad relativa  
 $\gamma_{st}$  = factor de corrección de la resistencia del hormigón en el destesado  
 =  $5 / (1 + f'_{ci})$

El cálculo de las pérdidas diferidas según el método **Refinado** (artículo 5.9.5.4) se puede realizar por medio de la Ecuación 6.10.4.4.

$$\Delta f_{pTL} = (\Delta f_{pSR} + \Delta f_{pCR})$$

Ec. 6.10.4.4

donde:

$\Delta f_{pSR}$  = pérdidas debido a la retracción

$\Delta f_{pCR}$  = pérdidas debido a la fluencia

La pérdida por retracción del hormigón se calcula por medio de la Ecuación 6.10.4.5.

$$\Delta f_{pSR} = \varepsilon_{bid} E_p K_{id}$$

Ec. 6.10.4.5

donde:

$K_{id}$  = coeficiente de la sección transformada

$$K_{id} = \frac{1}{1 + \left( \frac{E_p A_{ps}}{E_{ci} A_g} \right) \left( 1 + \frac{A_g e_{pg}^2}{I_g} \right) [1 + 0,7 \psi_b(t_f, t_i)]}$$

$$\varepsilon_{bid} = k_s k_{hs} k_f k_{td} (0.48 \times 10^{-3})$$

donde:

$$\Psi_b(t_f, t_i) = 1.9 k_s k_{hc} k_f k_{td} t_i^{-0,118}$$

$k_s$  = factor por el efecto V/S

$$= 1.45 - 0.13(V/S) \geq 1,0$$

$k_{hc}$  = factor de humedad por fluencia

$$= 1.56 - 0.008H$$

$k_f$  = factor por el efecto de resistencia del hormigón

$$= 5 / (1 + f'_{ci})$$

$K_{td}$  = factor dependiente del tiempo

$$= (t / 61 - 4f'_{ci} + t)$$

$t$  = edad del hormigón

$t_i$  = edad del hormigón en le destesado

$k_{hs}$  = factor de humedad por retracción

$$= 2 - 0.014H$$

La pérdida por fluencia del hormigón se calcula por medio de la Ecuación 6.10.4.5.

$$\Delta f_{pCR} = \frac{E_p}{E_{ci}} f_{cgp} \psi_b(t_d, t_i) K_{id}$$

Ec. 6.10.4.5



Los resultados de las pérdidas de pretensado para cada probeta analizada con el método AASHTO LRFD Aproximado y Refinado se presentan en la Tabla 6.10.4.1 y 6.10.4.2, respectivamente.

Probeta	$P_0$ (kN)	Acortamiento elástico (MPa)	$P_1$ (kN)	Fluencia (MPa)	Retracción (MPa)	$P_J$ (kN)	Pérdidas totales (MPa)
HT-A-60-24-LS	142	421	100	265	56	68	742
HT-A-60-48-LS	143	378	105	243	51	76	672
HT-A-80-12-LS	142	318	110	187	70	84	575
HT-A-80-24-LS	144	244	120	152	56	99	451
HT-A-100-12-LS	143	157	127	121	70	108	348
HT-A-100-24-LS	142	145	128	96	56	113	296
HT-B-60-48-LS	142	453	97	366	76	53	896
HT-B-80-24-LS	141	278	114	225	84	83	587
HT-B-80-48-LS	142	239	118	205	76	90	520
HT-B-100-24-LS	144	163	127	146	84	104	393
HT-B-100-48-LS	143	150	128	132	76	107	359
HT-C-80-48-LS	143	248	118	247	91	84	586
HT-C-100-24-LS	144	175	126	184	106	97	465
HT-C-100-48-LS	144	158	128	159	91	103	408
HAC-NF-100-48-LS	143	130	130	127	73	110	330
HAC-LF-100-48-LS	144	132	131	117	67	112	316
HAC-MF-100-48-LS	144	155	128	114	66	110	335
HAC-HF-100-48-LS	145	169	128	117	67	109	353

**Tabla 6.10.4.1.** Pérdidas de pretensado determinadas a partir del modelo teórico AASHTO LRFD Aproximado (2012).

Probeta	P <sub>0</sub> (kN)	Acortamiento elástico (MPa)	P <sub>1</sub> (kN)	Fluencia (MPa)	Retracción (MPa)	P <sub>J</sub> (kN)	Pérdidas totales (MPa)
HT-A-60-24-LS	142	421	100	352	47	60	820
HT-A-60-48-LS	143	378	105	341	51	66	770
HT-A-80-12-LS	142	318	110	307	55	74	680
HT-A-80-24-LS	144	244	120	265	62	87	571
HT-A-100-12-LS	143	157	127	190	69	101	416
HT-A-100-24-LS	142	145	128	178	70	103	393
HT-B-60-48-LS	142	453	97	361	45	56	860
HT-B-80-24-LS	141	278	114	285	58	79	621
HT-B-80-48-LS	142	239	118	260	62	86	561
HT-B-100-24-LS	144	163	127	196	68	101	427
HT-B-100-48-LS	143	150	128	184	69	102	404
HT-C-80-48-LS	143	248	118	268	61	85	577
HT-C-100-24-LS	144	175	126	207	67	99	449
HT-C-100-48-LS	144	158	128	191	69	102	418
HAC-NF-100-48-LS	143	130	130	185	71	105	386
HAC-LF-100-48-LS	144	132	131	174	71	106	377
HAC-MF-100-48-LS	144	155	128	194	69	102	418
HAC-HF-100-48-LS	145	169	128	211	67	100	447

**Tabla 6.10.4.2.** Pérdidas de pretensado determinadas a partir del modelo teórico AASHTO LRFD Refinado (2012).

### 6.10.5 Código Modelo (2010), Eurocódigo 2 (2010), Instrucción de Hormigón Estructural EHE (2008)

Estos modelos determinan las pérdidas de pretensado del mismo modo, y tienen en cuenta las pérdidas instantáneas de pretensado debido a las pérdidas que tienen lugar durante el proceso de transmisión del pretensado al hormigón y las pérdidas diferidas de pretensado que evalúa la variación de la tensión de la armadura activa producida por la fluencia y retracción del hormigón, por medio de un método simplificado.

Las pérdidas por acortamiento elástico del hormigón para armaduras pretesas se producen al liberarse los anclajes, y puede valorarse teniendo en cuenta la deformación instantánea que se produce en el hormigón en el centro de gravedad de las armaduras activas, mediante la Ecuación 6.10.5.1.

$$\sigma_{cp} \frac{A_p E_p}{E_c j}$$

Ec. 6.10.5.1

donde:

- $\sigma_{cp}$  = 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
- $A_p$  = área total de la armadura
- $E_p$  = 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

Las pérdidas diferidas  $\Delta P_{dif}$  pueden evaluarse de forma aproximada de acuerdo con la expresión siguiente:

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

Ec. 6.10.5.2

donde:

- $y_p$  = distancia del centro de gravedad de las armaduras activas al centro de gravedad de la sección
- $n$  = coeficiente de equivalencia =  $E_p/E_c$
- $\varphi(t, t_0)$  = coeficiente de fluencia para una edad de puesta en carga igual a la edad del hormigón en el momento del tesado ( $t_0$ ) (ver Ecuación 6.10.5.3)
- $\varepsilon_{cs}$  = deformación de retracción que se desarrolla tras la operación de tesado (ver Ecuación 6.10.5.14)
- $\sigma_{cp}$  = 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
- $\chi$  = coeficiente de envejecimiento. Simplificadamente, y para evaluaciones a tiempo infinito, podrá optarse  $\chi = 0.8$

El coeficiente de fluencia puede obtenerse mediante la siguiente formula:

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

Ec. 6.10.5.3

donde:

- $\varphi_0$  = coeficiente básico de fluencia dado por la expresión

$$\varphi_0 = \varphi_{HR} \beta(f_{cm}) \beta(t_0) \quad \text{Ec. 6.10.5.4}$$

siendo:

$\varphi_{HR}$  = coeficiente de influencia de humedad relativa (HR):

$$\varphi_{HR} = \left[ 1 + \frac{1 - HR/100}{0.1 \sqrt[3]{e}} \right] \quad \text{si } f_{cm} \leq 35 \text{ N/mm}^2 \quad \text{Ec. 6.10.5.5}$$

$$\varphi_{HR} = \left[ 1 + \frac{1 - HR/100}{0.1 \sqrt[3]{e}} \alpha_1 \right] \alpha_2 \quad \text{si } f_{cm} > 35 \text{ N/mm}^2 \quad \text{Ec. 6.10.5.6}$$

$\beta(f_{cm})$  = factor que permite tener en cuenta el efecto de la resistencia del hormigón en el coeficiente básico de fluencia:

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16.8}{\sqrt{f_{ck} + 8}} \quad \text{Ec. 6.10.5.7}$$

$f_{ck}$  = resistencia característica del proyecto en  $\text{N/mm}^2$

$\beta(t_0)$  = factor de fluencia de la edad de carga ( $t_0$ ) en el coeficiente básico de fluencia

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0.1 + (t_0)^{0.2}} \quad \text{Ec. 6.10.5.8}$$

$\beta_c(t-t_0)$  = función que describe el desarrollo de la fluencia con el tiempo

$$\beta_c(t, t_0) = \left[ \frac{(t - t_0)}{\beta_H + (t - t_0)} \right]^{0.3} \quad \text{Ec. 6.10.5.9}$$

siendo:

$$\beta_H = 1.5[1 + (0.012 HR)^{18}]e + 250 \leq 1500 \quad \text{6.10.5.10}$$

$$\beta_H = 1.5[1 + (0.012 HR)^{18}]e + 250\alpha_3 \leq 1500\alpha_3 \quad 6.10.5.11$$

y donde  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  tienen en cuenta la influencia de la resistencia del hormigón.

$$\alpha_1 = \left[\frac{35}{f_{cm}}\right]^{0.7} ; \quad \alpha_2 = \left[\frac{35}{f_{cm}}\right]^{0.2} ; \quad \alpha_3 = \left[\frac{35}{f_{cm}}\right]^{0.5} \quad 6.10.5.12$$

En las expresiones anteriores  $e$  es el espesor medio expresado en mm.

$$e = \frac{2A_c}{u} \quad 6.10.5.13$$

donde:

$A_c$  = área de la sección transversal  
 $u$  = perímetro de contacto con la atmósfera

Para la evaluación del valor de la retracción, han de tenerse en cuenta las diversas variables que influyen en el fenómeno, en especial: el grado de humedad ambiente, el espesor o menor dimensión de la pieza, la composición del hormigón y el tiempo transcurrido desde la ejecución, que marca la duración del fenómeno.

La retracción total está compuesta por la retracción autógena y la retracción de secado. La deformación de retracción autógena se desarrolla durante el endurecimiento del hormigón, mientras que la retracción por secado se desarrolla lentamente.

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca} \quad 6.10.5.14$$

Donde:

$\varepsilon_{cd}$  = deformación de retracción por secado  
 $\varepsilon_{ca}$  = deformación de retracción autógena

La componente de secado puede calcularse a lo largo del tiempo como:

$$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t - t_s)k_e\varepsilon_{cd,\infty}$$

Ec. 6.10.5.15

donde:

t = edad del hormigón en el instante de evaluación, en días

t<sub>s</sub> = edad del hormigón al comienzo de la retracción, en días

β<sub>ds</sub> = coeficiente evolución temporal que se obtiene a través de la siguiente formula:

$$\beta_{ds}(t - t_s) = \frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0.04\sqrt{e^3}}$$

Ec. 6.10.5.16

k<sub>e</sub> = coeficiente que depende del espesor medio (ver Tabla 6.10.5.1)

e (mm)	k <sub>e</sub>
100	1.00
200	0.85
300	0.75
≥500	0.70

**Tabla 6.10.5.1.** Valores del coeficiente K<sub>e</sub>

ε<sub>cd,∞</sub> = coeficiente de retracción a tiempo infinito que se obtiene como:

$$\varepsilon_{cd,\infty} = 0.85 \left[ (220 + 110\alpha_{ds1}) \exp(-\alpha_{ds2} \frac{f_{cm}}{f_{cm0}}) \right] 10^{-6} \beta_{HR}$$

Ec. 6.10.5.17

Para estructuras al aire (HR < 99%):

$$\beta_{HR} = -1.55 \left[ 1 - \left( \frac{HR}{100} \right)^3 \right]$$

Ec. 6.10.5.18

Para estructuras sumergibles (HR ≥ 99%):

$$\beta_{HR} = 0.25$$

Ec. 6.10.5.19

HR = humedad relativa en tanto por ciento

$f_{cm0} = 10 \text{ N/mm}^2$

$\alpha_{ds1}$  y  $\alpha_{ds2}$  dependen de la velocidad de endurecimiento del cemento (ver Tabla 6.10.5.2)

	Endurecimiento lento	Endurecimiento normal	Endurecimiento rápido
$\alpha_{ds1}$	3	4	6
$\alpha_{ds2}$	0.13	0.12	0.11

**Tabla 6.10.5.2.** Velocidad de endurecimiento, coeficiente  $\alpha_{ds1}$  y  $\alpha_{ds2}$

Por otra parte, la componente autógena puede calcularse como:

$$\varepsilon_{ca} = \beta_{as}(t)\varepsilon_{ca,\infty} \quad \text{Ec. 6.10.5.20}$$

donde:

$$\varepsilon_{ca,\infty} = -2.5(f_{ck} - 10)10^{-6} \quad \text{Ec. 6.10.5.21}$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0.2t^{0.5}) \quad \text{Ec. 6.10.5.22}$$

En la Tabla 6.10.5.3 se presentan los resultados de las pérdidas de pretensado estimadas con los modelos CM (2010), EC-2 (2010) y EHE (2008), incluyendo la fuerza antes de realizar la transmisión del pretensado ( $P_0$ ), la fuerza justo después del destesado ( $P_1$ ), consecuencia de la pérdida por acortamiento elástico, y la fuerza final ( $P_j$ ), debido a las pérdidas por fluencia y retracción del hormigón.

Probeta	P <sub>0</sub> (kN)	Acortamiento elástico (MPa)	P <sub>1</sub> (kN)	Fluencia (MPa)	Retracción (MPa)	P <sub>J</sub> (kN)	Pérdidas totales (MPa)
HT-A-60-24-LS	142	413	100	228	75	70	715
HT-A-60-48-LS	143	370	106	217	76	77	664
HT-A-80-12-LS	142	314	110	170	84	85	568
HT-A-80-24-LS	144	241	120	166	86	95	492
HT-A-100-12-LS	143	156	128	130	90	106	376
HT-A-100-24-LS	142	143	128	116	95	107	355
HT-B-60-48-LS	142	445	98	341	74	56	860
HT-B-80-24-LS	141	274	114	281	88	77	643
HT-B-80-48-LS	142	236	118	263	90	83	589
HT-B-100-24-LS	144	161	127	213	97	96	471
HT-B-100-48-LS	143	149	128	191	98	99	439
HT-C-80-48-LS	143	245	118	309	89	79	644
HT-C-100-24-LS	144	173	126	250	97	92	521
HT-C-100-48-LS	144	156	129	228	99	96	484
HAC-NF-100-48-LS	143	129	131	164	97	104	390
HAC-LF-100-48-LS	144	131	131	150	96	106	376
HAC-MF-100-48-LS	144	154	129	150	96	104	399
HAC-HF-100-48-LS	145	167	128	155	96	103	418

**Tabla 6.10.5.3.** Pérdidas de pretensado determinadas a partir del modelo teórico CM (2010), EC-2 (2010) y EHE (2008).

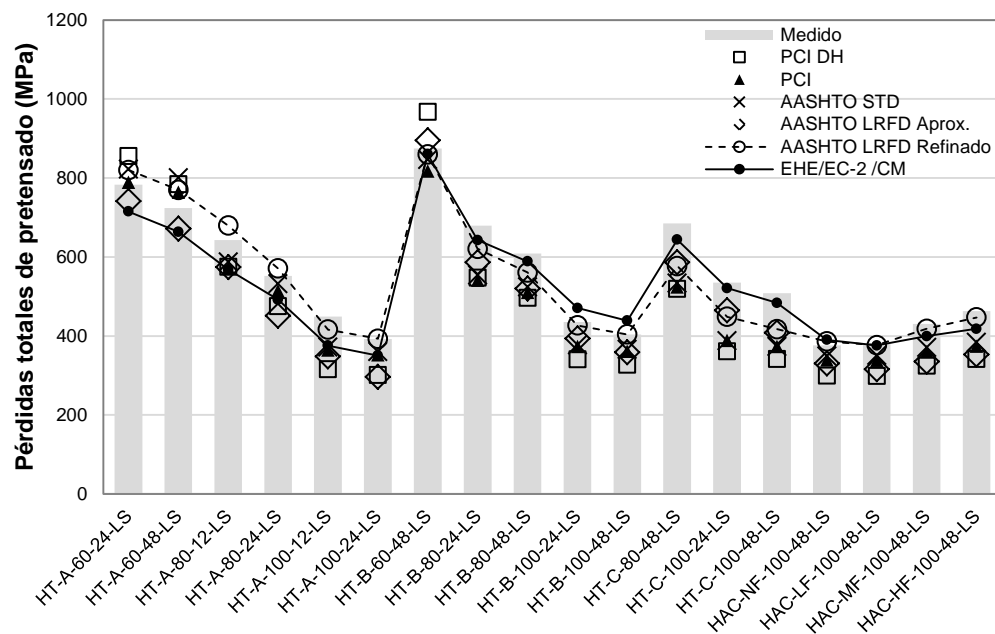
### 6.11 Comparación entre las pérdidas de pretensado experimentales y las estimadas mediante métodos de cálculo

Las Figuras 6.11.1, 6.12.2 y 6.12.3 muestran comparaciones de los resultados experimentales obtenidos en este estudio de las pérdidas de pretensado con las predicciones teóricas de los métodos expuestos en el apartado 6.10. En las figuras se describen el total de las pérdidas a 12 meses, la relación de la pérdida teórica y medida en las probetas pretensadas, y la relación de efectividad ( $R_{it}$ ) de acuerdo con la ecuación 2.6.1.3, respectivamente.

Como se observa en la Figura 6.11.1, la tendencia de las pérdidas de pretensado medidas experimentalmente de acuerdo con las variables estudiadas (edad de destesado, resistencia del hormigón, tamaño de la sección transversal y tipo de hormigón), son iguales a las tendencias de pérdidas de pretensado estimadas por los métodos teóricos, siguiendo el siguiente razonamiento: para hormigones tradicionales (A, B, C) los resultados de los modelos teóricos y los resultados medidos experimentalmente de las pérdidas totales de pretensado disminuyen dentro de un mismo un tipo de hormigón cuando incrementa la sección transversal

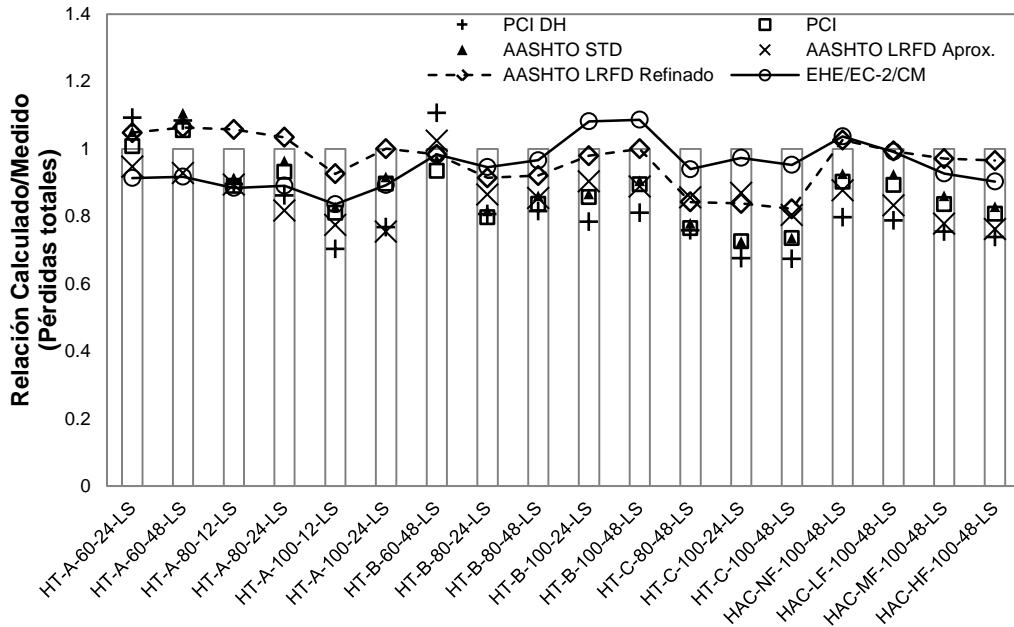


de la probeta e incrementa la edad de destesado, mientras que las pérdidas de pretensado determinadas en probetas con hormigón tradicional C son mayores que las pérdidas de pretensado en probetas fabricadas con hormigón tradicional B y, a la vez, éstas son mayores que las pérdidas de pretensado en probetas fabricadas con hormigón tradicional A. En cuanto a los hormigones autocompactantes las pérdidas de pretensado aumentan a medida que se incrementa el contenido de finos en su estructura granulométrica.



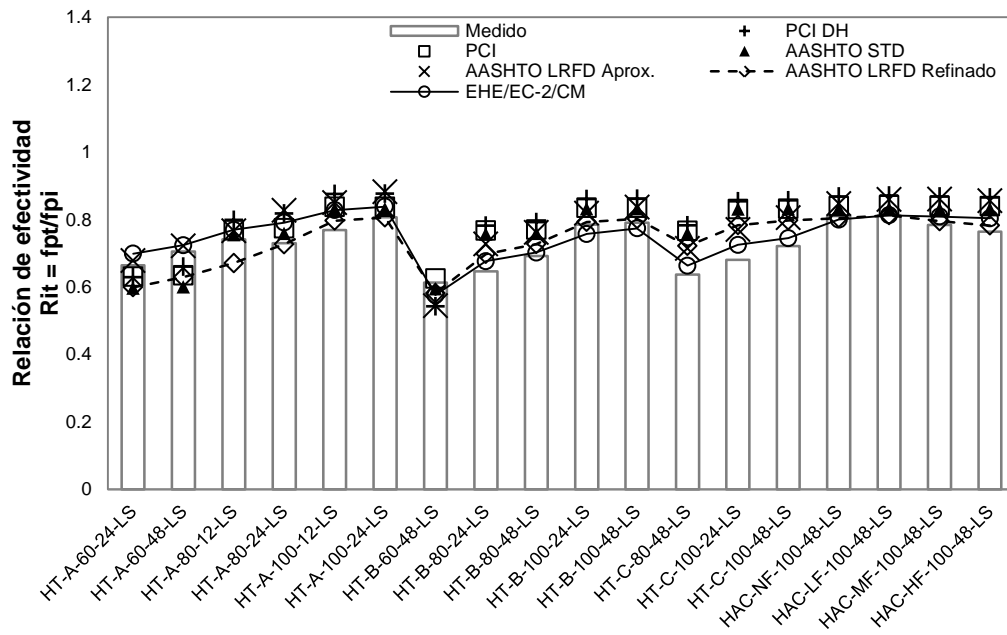
**Figura 6.11.1.** Comparación de las pérdidas de pretensado medidas experimentalmente entre las pérdidas determinadas por modelos teóricos.

Como se observa en la Figura 6.11.2 los métodos de AASHTO LRFD Refinado y el CM/EC-2/EHE muestran la mejor estimación, aunque se observa una tendencia a sobrevalorar las pérdidas de pretensado para el hormigón tipo C con el método AASHTO LRFD Refinado y una sobrevaloración de las pérdidas de pretensado para el hormigón tipo A con los métodos CM/EC-2/EHE. Los métodos PCI DH, PCI CPL y AASHTO STD dan predicciones similares, con una ligera tendencia hacia una mayor sobrevaloración de las pérdidas de pretensado cuando la resistencia a compresión del hormigón disminuye (dentro de un mismo tipo de hormigón y para diferentes hormigones manteniendo la sección de la probeta y la edad de destesado). El método AASHTO LRFD Aproximado muestra un mayor ajuste al método AASHTO LRFD Refinado cuando la resistencia del hormigón disminuye.



**Figura 6.11.2.** Relación de las pérdidas de pretensado calculadas por modelos teóricos y medidas experimentalmente.

Finalmente, la Fig. 6.11.3 muestra la relación de la efectividad de pretensado de acuerdo con la Ec. 2.6.1.3 para los valores medidos experimentalmente y para los modelos teóricos. Para las predicciones a 12 meses, la tensión de tracción en la armadura de pretensado varía en un rango de 0.55 a 0.80 veces la tensión de la armadura inmediatamente después de la transmisión del pretensado. Para las diferentes variables consideradas en este programa de ensayos, las mayores relaciones son registradas para los casos con mayor edad de destesado, mayor resistencia a compresión del hormigón y mayor tamaño de la sección transversal. En la Figura 6.11.3 las tendencias generales en función de los modelos de predicción se muestran acorde con las tendencias observadas en las Fig. 6.11.1 y Fig. 6.11.2.



**Figura 6.11.3.** Relación de efectividad de la tensión medida experimentalmente y determinada por medio de modelos teóricos.

(Esta página se ha dejado intencionalmente en blanco)

## **7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS**

En este capítulo se presentan las principales conclusiones obtenidas en esta Tesis y se establecen recomendaciones para futuras líneas de investigación.

### **7.1 Conclusiones**

#### **7.1.1 Sobre la metodología de ensayo**

- Se ha concebido una metodología experimental para estudiar la variación de la longitud de transmisión con el tiempo.
- El método propuesto se basa en el análisis instantáneo y diferido del perfil de fuerzas de la armadura pretensada en un solo extremo del elemento de hormigón pretensado.
- El equipo de ensayo presentado en esta Tesis se ha diseñado para optimizar espacio, para garantizar las condiciones de pretensado para cualquier lapso de tiempo, y para ensayar más de un probeta en un mismo bastidor de pretensado desmontando una parte del equipamiento.
- La instrumentación usada en este ensayo es sencilla y recuperable; no se ha utilizado instrumentación de medición interna en los elementos de ensayo, con el fin de no distorsionar el fenómeno adherente.
- Los resultados experimentales obtenidos mediante el uso del equipo y la metodología propuesta en esta Tesis, han permitido verificar la validez del método del ensayo para determinar la longitud de transmisión inicial y diferida en probetas de hormigón pretensado.
- La metodología propuesta permite estudiar la influencia de variables como: tipo de hormigón, tipo de armadura pretensada, sección transversal del elemento, edad de ensayo, nivel de pretensado, tipo de destesado, y otras como las condiciones de almacenamiento.

- Esta metodología de ensayo para determinar la longitud de transmisión es susceptible de ser estandarizada. El criterio de estandarización puede ser definido de dos formas: para analizar la variación de la longitud de transmisión en un determinado conjunto de condiciones (para un determinado tipo de hormigón, nivel de pretensado, etc.), o para caracterizar el comportamiento del tipo de armadura pretensada bajo condiciones estándar (materiales y dosificación de la mezcla de hormigón, edad de destesado, condiciones de almacenamiento, etc.).
- La viabilidad de aplicación de esta configuración y metodología de ensayo para determinar la variación de la longitud de transmisión han sido verificados en un programa experimental para evaluar el comportamiento diferido en probetas de hormigón pretensado. Los resultados experimentales para diferentes condiciones de ensayo han demostrado la validez de esta metodología.
- Esta metodología de ensayo propuesta ha proporcionado mayor fiabilidad que los resultados basados en la medida de la deformación longitudinal del hormigón o la medida del deslizamiento en el extremo libre de la probeta.

### **7.1.2 Sobre el comportamiento diferido de la longitud de transmisión**

- Varios estudios de investigación disponibles en la literatura científica han reportado cambios de la longitud de transmisión con el tiempo. Diferentes intervalos de tiempo se han considerado, así como diferentes tipos y diámetros de armaduras. También se han reportado resultados contradictorios sobre la variación de la longitud de transmisión con el tiempo: que se producen incrementos de la longitud de transmisión, que no se producen variaciones de la longitud de transmisión, o no se encuentra un patrón de la variación de la longitud de transmisión.
- Se ha observado que para algunos casos se produce un incremento de la longitud de transmisión con el tiempo bajo ciertas condiciones de carga, debido a una corta edad de la transmisión del pretensado y a una menor sección transversal de probeta.
- Cuando se produce la variación de la longitud de transmisión, los porcentajes de incremento relacionados con la longitud de transmisión inicial son mayores a medida que aumentan los niveles de tensión debidos a la fuerza efectiva de pretensado.

- La longitud de transmisión puede ser detectada a partir de los deslizamientos medidos en el extremo libre de la probeta. Sin embargo, la expresión de Guyon no es aplicable en los casos donde la longitud adherente es menor que la longitud de transmisión real, siendo imposible cuantificar la longitud de transmisión diferida. El método de deslizamientos en el extremo libre de la probeta no es viable para analizar la variación de la longitud de transmisión dado este hecho, al igual que la aplicación de un valor conocido para el coeficiente  $\alpha$  y la considerable variabilidad de los resultados obtenidos
- El método basado en el perfil de deformaciones longitudinales en la superficie del hormigón nos permite determinar la longitud de transmisión de manera menos precisa que el método ECADA+, debido a la dificultad de detectar el comienzo de la meseta de deformaciones.
- Se ha propuesto un factor adicional en el modelo de longitud de transmisión para incluir la evolución diferida de la longitud de transmisión.
- Todas las probetas en las que se realizó el destesado súbito han presentado un incremento de la longitud de transmisión. Sin embargo, en estos casos no se encontró un patrón que relacione la longitud de transmisión inicial y la longitud de transmisión diferida.
- La probeta de hormigón reciclado presenta un mayor incremento de la longitud de transmisión diferida en comparación a una probeta de hormigón tradicional equivalente.
- Las probetas de hormigón autocompactante presentan un incremento de la longitud de transmisión diferida a medida que aumenta la cantidad de finos en su dosificación.

### **7.1.3 Sobre el comportamiento de la evolución de las pérdidas de pretensado**

- Se ha observado una subvaloración de las pérdidas de pretensado a partir de la medición de la fuerza de pretensado. Teniendo en cuenta el tamaño de la sección transversal de la probeta, se han obtenido coeficientes apropiados para relacionar la fuerza efectiva de pretensado medida con la fuerza efectiva de pretensado obtenida a partir de la deformación del hormigón.
- Las pérdidas de pretensado disminuyen dentro de una serie con el mismo tipo de hormigón, cuando incrementa la sección transversal y aumenta la edad de la transmisión del pretensado.

- Para iguales secciones transversales de probeta e iguales edades de destesado, las pérdidas de pretensado disminuyen cuando incrementa la resistencia a compresión del hormigón.
- Las mayores diferencias de las pérdidas de pretensado entre las diferentes probetas corresponde a las pérdidas debidas al acortamiento elástico del hormigón, las cuales varían dentro de un rango de 10% para probetas con mayor sección transversal, de 15 a 20% para probetas de sección transversal intermedia y de 25 a 30% para probetas con menor sección transversal.
- El total de las pérdidas de pretensado medidas varían en un rango de valores de 25 a 60%. Para probetas con mayor sección transversal las pérdidas se encuentran en un 25 a 40%, para probetas de sección transversal intermedia en un 40 a 50% y para probetas con menor sección transversal en un 50 a 60%.
- Las pérdidas de pretensado determinadas por varios métodos siguen las tendencias de las pérdidas de pretensado medidas experimentalmente. Las pérdidas totales de pretensado disminuyen tanto para una mayor resistencia a compresión de hormigón, como para mayor sección transversal de probeta y una mayor edad de destesado.
- El método AASHTO LRFD Refinado y los métodos CM/EC-2/EHE muestran las mejores predicciones. Los métodos PCI DH, PCI CPL y AASHTO STD presentan similares predicciones, con ligera tendencia hacia una mayor sobrevaloración de las pérdidas de pretensado cuando la resistencia a compresión del hormigón disminuye. El método AASHTO LRFD Aproximado muestra un mejor ajuste al método AASHTO LRFD Refinado cuando la resistencia a compresión del hormigón disminuye.
- La relación de efectividad del pretensado varía en un rango de 0.55 a 0.8 veces la tensión de la armadura inmediatamente después de la transmisión del pretensado. Mayores relaciones se registran para los casos con mayor edad de destesado mayor resistencia a compresión del hormigón y mayor tamaño de la sección transversal.



## 7.2 Recomendaciones para trabajos futuros

A continuación se indican posibles investigaciones futuras en relación con la investigación desarrollada en esta Tesis:

- El estudio experimental diferido puede ampliarse a otras variables relativas a la dosificación del hormigón, incluyendo aspectos como la granulometría de los áridos, el empleo de adiciones y diferentes porcentajes de sustitución con áridos reciclados.
- Además, se puede ampliar el estudio experimental sobre diferentes tipos de armaduras, verificando si las conclusiones obtenidas con los cordones empleados son aplicables a cordones de distinto diámetro y al caso de alambres, ya sean lisos o grafilados.
- Otra variable posible en el estudio diferido es la variación de la excentricidad de la armadura, para el control de la fisura por hendimiento, y a su vez, analizar este comportamiento al añadir diferentes tipos y contenidos de fibras.
- Se puede plantear un ambicioso programa experimental para ampliar el análisis de la variación de la longitud de transmisión para establecer el valor del factor  $\beta$  en la mayoría de elementos de estructuras de hormigón pretensado.
- También se recomendaría analizar la influencia en las pérdidas de pretensado, de diferentes factores medioambientales variando la humedad relativa y la temperatura a la que son sometidas las probetas de hormigón durante el tiempo que se encuentran almacenadas.
- Asimismo sería recomendable evaluar la influencia del comportamiento diferido del hormigón, analizando diferentes edades al solicitar el anclaje de la armadura.

(Esta página se ha dejado intencionalmente en blanco)

## REFERENCIAS

- AASHTO (1989). Standard Specifications for highway bridges, American Association of State Highway and Transportation Officials. Fourteenth Edition, Washington, D.C.
- AASHTO (1992). Standard Specifications for highway bridges, American Association of State Highway and Transportation Officials. Fifteenth Edition, Washington, D.C.
- AASHTO (1993). Standard Specifications for highway bridges, American Association of State Highway and Transportation Officials. Fifteenth Edition, Washington, D.C.
- AASHTO (1996). Standard Specifications for highway bridges, American Association of State Highway and Transportation Officials. Sixteenth Edition, Washington, D.C.
- AASHTO (1998). LRFD Bridge Design Specifications, American Association of State Highway and Transportation Officials. Second Edition, Washington, D.C.
- AASHTO (1998). Standard Specifications for highway bridges, American Association of State Highway and Transportation Officials. Sixteenth Edition, Washington, D.C.
- AASHTO (2004). LRFD Bridge Design Specifications, American Association of State Highway and Transportation Officials. Third Edition, Washington, D.C.
- AASHTO (2005). LRFD Bridge Design Specifications, American Association of State Highway and Transportation Officials. Third Edition-2005 Interim revision, Washington, D.C.
- AASHTO (2006). LRFD Bridge Design Specifications, American Association of State Highway and Transportation Officials. Third Edition, Washington, D.C.
- AASHTO (2007). LRFD Bridge Design Specifications, American Association of State Highway and Transportation Officials. Fourth Edition, Washington, D.C.
- AASHTO (2008). LRFD Bridge Design Specifications, American Association of State Highway and Transportation Officials. Fourth Edition-2008 Interim Revisions. Washington, D.C.
- AASHTO (2012). LRFD Bridge Design Specifications, American Association of State Highway and Transportation Officials. Fifteenth Edition-2012 Interim Revisions Washington, D.C.

- Abrishami, H. H. y Mitchell, D. (1992). Simulation of uniform Bond Stress. PCI 89[2], 161-168.
- Abrishami, H.H. y Mitchell, D. (1993). Bond Characteristics of Pretensioned Strand. ACI Materials Journal, 90(3), 228-235.
- ACI 318-89 (1989). Building code requirements for reinforced concrete and commentary, American Concrete Institute. Detroit.
- ACI 209R-92 (1992). American Concrete Institute Committee 209, Prediction of creep, shrinkage and temperature effects in concrete structures.
- ACI 318-89 (Revised 1992) (1992). Building code requirements for reinforced concrete and commentary, American Concrete Institute. Detroit, Michigan.
- ACI Committee 209 (1997). Prediction of creep, shrinkage and temperature effects in concrete structures. ACI 209R-92 (Reapproved 1997).
- ACI Committee 318 (2008). Building code requirements for reinforced concrete (ACI-318-02) and commentary (ACI318R-02), American Concrete Institute. Farmington Hill, MI.
- ACI Committee 318 (2011). Building code requirements for reinforced concrete (ACI-318-11), American Concrete Institute. Farmington Hill, MI.
- AENOR (1997). UNE 36094: Alambres y Cordones de Acero para Armaduras de Hormigón Pretensado. Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid.
- Ahlborn T.M., French C.E. y Leon R.T. (1995). Applications of high-strength concrete to long-span prestressed bridge girders. Transportation Research Record, 22-30.
- Al-Omaishi N., Tadros M.K. y Seguirant S.J. (2009). Estimating Prestress Losses in Pretensioned High-Strength Concrete members. PCI Journal, 54(4), 132-159.
- Anderson A. y Anderson R. (1976). An assurance criterion for flexural bond in pretensioned hollow core units. ACI Journal proceedings, 73(8), 457-464.
- Arbeláez C.A., Martí Vargas J.R., Serna R. y Caro L.A. (2004). Efecto de las propiedades y composición del hormigón en las longitudes de transmisión y anclaje de armaduras pretesas. PCI Journal.
- Arbeláez C.A. (2006). Análisis paramétrico de las variables que influyen en el comportamiento adherente de las armaduras pretesas en el hormigón. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- Armstrong W. (1949). Bond in Pre-stressed Concrete. Journal of Institution of Civil Engineers, 33(1), 19-40.

- Au Francis T.K. y Si X.T. (2011). Accurate time-dependent analysis of concrete bridges considering concrete creep, concrete shrinkage and cable relaxation. *Engineering Structures*, 33(1), 118-126.
- Azizinamini A., Keeler B.J., Rohde J. y Mehrabi A.B. (1996). Application of a new nondestructive evaluation technique to a 25-year-old prestressed concrete girder. *PCI Journal*, 41(3), 82-95.
- Balázs Gyögy L. y Guyon Y. (1992). Transfer control of prestressing strand. *PCI Journal*, 60-71.
- Balázs Gyögy L. y Rainer K. (1992). Influence of Load History on Bond Behaviour. *Bond in concrete*, 7-1-7-10.
- Balázs Gyögy L. (1993). Transfer length of prestressing strand as a function of Draw-in and initial prestress. *PCI Journal*, 86-93.
- Balogh Tamás (1992). Statical distribution of draw-in of seven-wire strands. *Bond in concrete*, Riga, 2.10-2.19.
- Baran E., Shield C.K. y French C.E. (2005). A comparison of methods for experimentally determining prestress losses in pretensioned prestressed concrete girders. In: Russell B.W., Gross S.P. editors. *Historic innovations in prestressed concrete*. Farmington Hill, MI: American Concrete Institute; p. 161-179.
- Barnes, R.W., Grove, J.W. y Burns, N.H. (2003). Experimental assessment of factors affecting transfer length. *ACI Structural Journal*, 100(6), 740-748.
- Base G.D. (1957). Some test on the effect of time on transmission length in pre-tensioned concrete. *Magazine of Concrete Research*, 73-82.
- Base G.D. (1958). *An Investigation of Transmission Length in Pre-tensioned Concrete*. Cement and Concrete Association.
- Benítez Baena José M<sup>a</sup>. (2006). Estudio de la interacción entre el alambre preteso y el hormigón durante la transmisión de la fuerza de pretensado. Tesis Doctoral, Universidad de Castilla y la Mancha.
- Brooks Mark D., Gerstle Kurt H. y Logan Donald R. (1998). Effect of initial strand slip on the strength of hollow-core slabs. *PCI Journal*, 90-111.
- Bruggeling A.S.G. y Huyghe (1991). Prefabrication whit concrete. *PCI Journal*, 79-86.
- Buckner C.Dale (1995). A Review of Strand Development Length for pretensioned concrete members. *PCI Journal*, 84-105.
- Calvera, J. (1999). Proyecto y cálculo de estructuras de hormigón, INTEMAC. Madrid.

- CEB-FIP (2010). Model Code 2010, International Federation for Structural Concrete (FIB) - Fédération Internationale du Béton. *Fib Bulletin* 55-56.
- Chen H., Wissawapaisal K. (2001). Measurement of tensile forces in a seven-wire prestressing strands using stress waves. *Journal of engineering mechanics*, ASCE, ISSN 0733-9399, 599-606.
- Cousins T.E. (1986). Bond of epoxy coated prestressing strand. Tesis Doctoral, UMI.
- Cousins, T.E., David W. Johnston y Zia Paul (1990). Transfer Development length of Epoxy coated and Uncoated Prestressing strand. *PCI Journal*, 92-103.
- Cousins, T.E., Francis L. y Gopu V. (1992). "Spacing and Concrete Cover Requirements for Epoxy-coated Prestressing Strand in Unconfined Sections." *Bond in Concrete: From research to Practice*, Ed. Riga Technical University, Latvia, 5.81-5.90.
- Cousins, T.E., Stallings, J.M., y Simmons, M.B. (1994). Reduced Strand Spacing in Pretensioned, Prestressed Members. *ACI Structural Journal*, 91(3), 277-286.
- Deatherage J. Harold, Burdette Edwin G. y Chew Key Chong (1994). Development length and lateral spacing requirements of prestressing strand for prestressed concrete bridge girder. *PCI Journal*, 70-83.
- Den Uijl J.A. (1995). Transfer length of prestressing strand in HPC. *Progress in Concrete Research*, 75-90.
- Den Uijl J.A. (1996). Bond of strands in high performance concrete. *Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussees*, Paris, 1175-1184.
- Den Uijl J.A. (1998). Bond Modelling of prestressing Strand. *ACI Journal*, 145-169.
- Do Carmo, R. N. F. y Lopes, S. M. R. (2001). Influence of cover on bond of strands prestressed by pretensioning. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 28(6), 938-948.
- Dolan C.W. y LaFraugh R. (1993). High strength concrete in the precast concrete industry. *PCI Journal*, 38(3), 16-19.
- Dorsten V., Hunt F.F. y Preston H.K. (1984). Epoxy coated Seven-Wire Strand for Prestressed Concrete. *PCI Journal*, 29(4), 100-109.
- Dummet T. y Pinheiro I. (2002). Experimental investigation of the local bond stress-slip behavior of pretensioned strands embedded in plain and steel fiber reinforcement concrete. *U. of Leipzig*.
- Dwariri Hazim M., Wagner Matthew C., Kowalsky Mervyn J. y Zia Paul (2010). Behavior of instrumented prestressed high performance concrete bridge girders. *Construction and Building Materials*, 24(11), 2294-2311.

- EHE-08 (2008). Instrucción de hormigón estructural. Cuarta Edición, Ministerio de fomento.
- Ehsani, M.R., Saadatmanesh, H. y Nelson, C.T. (1997). Transfer and flexural bond performance of aramid and carbon FRP tendons. *PCI Journal*, 42(1), 76-&.
- Eiras López Javier (2009). Estudio experimental de la capacidad adherente de las armaduras de pretensado: Análisis de los aceros de fabricación nacional y propuesta de método de control de la producción. Tesis Doctoral, Universidad de la Coruña.
- Eurocódigo 2: (CEN) (2010). Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para la edificación. Normas Europeas EN 1992-1-1:2004 y EN 1992-1-1:2004/AC:2008. Comité Europeo de Normalización.
- Evans R.H. (1951). Research and development in prestressing. *Journal of Institution of Civil Engineers*, 35, 231-261.
- Evans R.H. y Robinson W.R. (1955). Bond Stresses in Prestressed Concrete from X-Ray Photographs. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, V1. Part. 1, 212-235.
- Fu X. y Chung D. (1995). "Linear Correlation of Bond Strength and Contact Electrical Resistivity between Steel Rebar and Concrete." *Cement and Concrete Research*, 25(7), pp. 1397-1402.
- Girgis, A.F.M. y Tuan, C.Y. (2005). Bond strength and transfer length of pretensioned bridge girders cast with self-consolidating concrete. *PCI Journal*, 50(6), 72-+.
- Gilberston C.G. y Ahlborn T.M. (2004). A probabilistic comparison of prestress loss methods in prestressed concrete beams. *PCI Journal*, 49(5), 52-69.
- Goto Y. (1971). Cracks formed in concrete around deformed tension bars. *ACI Journal*, 68(4) pp. 244-251.
- Grace, N.F. (2000). Transfer length of CFRP/CFCC strands for double-T girders. *PCI Journal*, 45(5), 110-+.
- Greuel A., Baseheart T.M., Rogers B.T., Miller R.A. y Shahrooz B.M. (2000). Evaluation of a high performance concrete box girder bridge. *PCI Journal*, 60-71.
- Gross, S.P. y Burns, N.H. (1999). Field Performance of Prestressed High Performance Concrete Bridges in Texas. Rep. No. 580/589-2, University of Texas at Austin, Austin, TX.
- Gross, S.P. y Burns, N.H. (2000). Implementation of high strength-high performance concrete in two texas highway overpass structures: Critical comparison. *Transportation research record*, 178-187.

- Gustavson, R. (2004). Experimental studies of the bond response of three-wire strands and some influencing parameters. *Materials and Structures*, 37(266), 96-106.
- Gutierrez S.E., Cudmani R.O. y Danesi R.F (1996). Time-dependent analysis of reinforced and prestressed concrete members. *ACI Structural Journal*, 93(4), 420-427.
- Guyon Y. (1953). *Betón précontrainte. Étude théorique et expérimentale*, París.
- Hale W.M. y Russell B.W (2006). Effects of Allowable Compressive Stress at Release on Prestress Losses and on the Performance of Precast, Prestressed Concrete Bridge Girders. *PCI Journal*, 51(2), 14-25.
- Halsey J.T. y Miller R. (1996). Destructive testing of two forty-year-old prestressed concrete bridge beams. *PCI Journal*, 41(5), 84-93.
- Hanson N., Kaar P. (1959). Flexural Bond Tests of Pretensioned Prestressed Beams. *Journal of the American Concrete Institute*, 30(7), pp. 783-802.
- Harajli, M.H. (2007). Cyclic response of concrete members with bond-damaged zones repaired using concrete confinement. *Construction and Building Materials*, 21(5), 937-951.
- Holmberg A. y Lindgren S. (1970). Anchorage and prestress transmission. National Swedish Building Research, Sweden.
- Huo X.M. y Tadros M.K. (1999). Time-dependent effects in prestressed concrete composite bridge members. *High Strength Concrete, Proceedings*, 308-320.
- Idriss R.L. y Liang Z. (2006). Monitoring an Interstate Highway Bridge with a Built-In Fiber-optic Sensor System. Civil Engineering Department, Las Cruces, NM, USA.
- Issa, M.A., Sen, R. y Amer A. (1993). Comparative study of transfer length in fiberglass and steel pretensioned concrete members. *PCI Journal*, 52-63.
- Janney J. (1954). Nature of bond in pre-tensioned prestressed concrete. *ACI Structural Journal*, 25, 717-737.
- Jonsson Esben (1992). Anchorage of strands in prestressed extruded hollow-core slabs. *Bond in concrete*, Riga, 2.20-2.28.
- Kaar P., LaFraugh R. y Mass M. (1963). Influence of Concrete Strength on Strand Transfer Length. *PCI Journal*, 8(5), 47-67.
- Kaar, P. H. y Hanson, N. W. (1975). Bond Fatigue Tests of Beams Simulating Pretensioned Concrete Crossties. *Journal Prestressed Concrete Institute*, 20(5), 65-80.



- Kahn, L. F., Dill, J. C. y Reutlinger, C. G. (2002). Transfer and development length of 15-mm strand in high performance concrete girders. *Journal of Structural Engineering-Asce*, 128(7), 913-921.
- Kahn, L. F. y Lopez M. (2005). Prestress losses in high performance lightweight concrete pretensioned bridge girders. *PCI Journal*, 50(5), 84-&.
- KDOT (2003). Kansas department of transportation design manual, bridge section (3). Kansas Department of Transportation.
- Kommer B. (2004). Bond Anchorage Behaviour of Pretensioned Tendons in High Performance Concrete. 5th International Phd Symposium in Civil Engineering, Delft, Netherland, 833-840. ISSN 90 5809 677 7
- Kose, M. M. y Burkett, W. R. (2005). Evaluation of code requirement for 0.6 in. (15 mm) prestressing strand. *ACI Structural Journal*, 102(3), 422-428.
- Krishnamurthy Dommalapati (1970). Influencia del procedimiento de destesado sobre las tensiones en las zonas de anclaje y sobre la longitud de transmisión, en elementos de hormigón pretensado con armaduras pretesas. *The Indian Concrete Journal* 44[3], 49-65.
- Krishnamurthy Dommalapati (1973). A theory for the transmission length of prestressing tendons. *PCI Journal*, 73-80.
- Król, M. y Szerafin J. (1992). Dynamics of bond development in permanently compressed concrete. *Bond in concrete*, 2-47-2-57.
- Labia Y., Saiidi M.S. y Douglas B. (1997). Full-Scale testing and analysis of 20-year-old pretensioned concrete box girders. *PCI Journal*, 41(6), 78-89.
- Lane S.N. (1992). Transfer Lengths in Rectangular Prestressed Concrete Concentric Specimens. *Public Roads*, 56(2), 67-71.
- Lane S.N. (1998). A New Development Length Equation For Pretensioned Strands in Bridge Beams and Piles. Federal Highway Administration Rep. No. *FHWRA-RD-98-116*.
- Larson, K. H., Peterman, R. J. y Esmaily, A. (2007). Bond characteristics of self-consolidating concrete for prestressed bridge girders. *PCI Journal*, 52(4), 44-+.
- Larson, K.H., Peterman, R.J. y Esmaily, A. (2007). Time-dependent characteristics of a self-consolidating concrete mix for PC concrete bridge girder. *Fracture mechanics of concrete and concrete structures*, London, 1283-1288.
- Linger D., Bhonsle S. (1963). An Investigation of Transfer Length in Pretensioned Concrete Using Photoelasticity. *PCI Journal*, 8(4), pp. 13-30.

- Logan, D.R. (1997). Acceptance criteria for bond quality of strand for pretensioned prestressed concrete applications - Closure. *PCI Journal*, 42(5), 99-100.
- Lopes, S.M.R. y do Carmo, R.N.F. Bond of prestressed strand to concrete: transfer rate and relationship between transmission length and tendon draw-in. *FIP Structural Concrete* 3[3], 117-126. 2002.
- López M. y Kahn, L. F. (2007). Hormigón liviano de alto desempeño - Una comparación entre pérdidas de pretensado reales y estimadas por los códigos de diseño. *Ingeniería y construcción* 22[1].
- Lorrain M. y Khelafi H. (2008). Contribution à l'Étude de l'Endommagement de la Liason Armature-Béton de Haute Performance. *Matériaux et Constructions*, 127-138.
- Lu, Z., Boothby, T. E., Bakis, C. E. y Nanni, A. (2000). Transfer and development lengths of FRP prestressing tendons. *PCI Journal*, 45(2), 84-+.
- Mahmound Zaki I., Rizkalla Sami H. y Zaghloul Ezz-Eldin R (1999). Transfer and development lengths of carbon fiber reinforced polymers prestressing reinforcement. *PCI* 96[4], 594-602.
- Marshall G. (1949). End anchorage and bond stress in prestressed concrete. *Magazine of Concrete Research*, 123-127.
- Marshall W.T. y Krishnamurthy Dommalapati (1969). Transmission length of prestressing tendons from concrete cube strengths at transfer. *PCI*, 244-275.
- Martí-Vargas J.R. (2002). Estudio experimental de la adherencia de cordones pretesos en hormigones de altas prestaciones iniciales. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- Marti-Vargas, J. R., Serna-Ros, P., Arbelaez, C. A. y Rigueira-Victor, J. W. (2006). Transfer and anchorage bond behavior in self-compacting concrete. *Materiales de Construcción*, 56(284), 27-42.
- Marti-Vargas, J. R., Arbelaez, C. A., Fernandez-Prada, M. A., Serna-Ros, P. y Miguel-Sosa, P. F. (2006). Transfer and development lengths of concentrically prestressed concrete. *PCI Journal*, 51(5), 74-85.
- Marti-Vargas, J. R., Serna-Ros, P., Fernandez-Prada, M. A., Miguel-Sosa, P. F., y Arbelaez, C. A. (2006). Test method for determination of the transmission and anchorage lengths in prestressed reinforcement. *Magazine of Concrete Research*, 58(1), 21-29.
- Marti-Vargas, J. R., Arbelaez, C. A., Serna-Ros, P., Navarro-Gregori, J. y Pallares-Rubio, L. (2007a). Analytical model for transfer length prediction of 13 mm prestressing strand. *Structural Engineering and Mechanics*, 26(2), 211-229.

- Marti-Vargas, J. R., Arbelaez, C. A., Serna-Ros, P., y Castro-Bugallo, C. (2007b). Reliability of transfer length estimation from strand end slip. *ACI Structural Journal*, 104(4), 487-494.
- Marti-Vargas, J. R., Caro L.A., Arango S. y Serna-Ros, P. (2008). Experimental study on bond of prestressing strand in SCC and FRC. RILEM Publications SARL, 699-709.
- Marti-Vargas, J. R., Caro L.A., García-Taengua E. y Serna P. (2012). Test method to characterize bond creep in pretensioned concrete. *Bond in concrete: Bond, Anchorage, Detailing. Fourth International Symposium*, June 17-20th, Brescia.
- Mayfield B, Davies G. y Kong F.K. (1970). Some test on the transmission length and ultimate strength of pre-tensioned concrete beams incorporating dyform strand. *Magazine of Concrete Research* 22[73], 219-226.
- Mitchell, D., William D.Cook, Arshad A.Khan y Thomas Tham (1993). Influence of high strength concrete on transfer and development length of pretensioning strand. *PCI Journal*, 52-66.
- Naaman A.E. (1992). *Prestressed concrete analysis and design*, McGraw-Hill, New York.
- Naaman A.E. y Hamza A.M. (1993). Prestress losses in partially prestressed high strength concrete beams. *PCI Journal*, 38(3), 98-114.
- Nanni, A. y Tanigaki, M. (1992). Pretensioned Prestressed Concrete Members with Bonded Fiber Reinforced Plastic Tendons - Development and Flexural Bond Lengths (Static). *ACI Structural Journal*, 89(4), 433-441.
- Nanni, A., Tanigaki, M. y Hasuo, K. (1992). Bond Anchorage of Pretensioned Frp Tendon at Force Release. *Journal of Structural Engineering-Asce*, 118(10), 2837-2854.
- Nanni, A., Utsunomiya, T., Yonekura, H. y Tanigaki, M. (1992). Transmission of Prestressing Force to Concrete by Bonded Fiber Reinforced Plastic Tendons. *Aci Structural Journal*, 89(3), 335-344.
- Nijhawan Jagdish C., Zia Paul, Mostafa Talat y K.J.Sanderson (1978). Development length of prestressing strand. *PCI* 22[5], 97-107.
- Nilson A.H. (1987). *Desing of prestressed concrete*. 2<sup>nd</sup> ed. New York: John Wiley & Sons.
- Oh, B.H. y Kim, E.S. (2000). Realistic evaluation of transfer lengths in pretensioned prestressed concrete members. *ACI Structural Journal*, 97(6), 821-830.
- Olesniewicz, A. y Balázs Gyögy L. (1992). Transfer control of prestressing strands. *PCI*, 60-71.

- Onyemelukwe O.U., Issa P.E.M. y Mills C.J. (2003). Field measured pre-stress concrete losses versus design code estimates. *Experimental Mechanics*, 43(2), 201-215.
- Osunade, J.A. y Babalola, J.I. (1991). Effect of mix proportion and reinforcement size on the anchorage bond stress of laterized concrete. *Building and Environment*, 26(4), 447-452.
- PCI Bridge Design Manual Steering Committee (2003). *Precast Prestressed Concrete Bridge Design Manual*. Fourth Edition, Chicago, IL: PCI Journal.
- PCI Commite on prestress losses (1975). Recommendation for estimating prestress losses. *PCI Journal*, 20(4), 44-70.
- PCI Design Handbook (1992). *Precast/Prestressed Concrete Institute*. Fourth Edition, Chicago, IL.
- PCI Design Handbook (1998). *Precast/Prestressed Concrete Institute*. Chicago, IL.
- PCI Design Handbook (1999). *Precast/Prestressed Concrete Institute*. Fifth Edition, Chicago, IL.
- PCI Design Handbook (2004). *Precast/Prestressed Concrete Institute*. Sixth Edition, Chicago, IL.
- Pessiki S., Kaczinski M. y Wescott H.H. (1996). Evaluation of effective prestress force in 28-year-old prestressed. *PCI Journal*, 41(6), 78-&.
- Peterman, R. J. (2007). The effect of as-cast depth and concrete fluidity on strand bond. *PCI Journal*.
- Petrou, M.F., Wan, B.L., Joiner, W.S., Trezos, C.G. y Harries, K.A. (2000). Excessive strand end slip in prestressed piles. *ACI Structural Journal*, 97(5), 774-782.
- Podolny Walter, J. (1969). Understanding the losses in prestressing. *PCI Journal*, 14(00209184), 43-53.
- Pozolo A y Andrawes B. (2011). Analytical prediction of transfer length in prestressed self-consolidating concrete girders using pull-out test results. *Construction and Building Materials*, 25(2), 1026-1036.
- Rabbat B.G (1984). 25-Year-Old prestressed concrete bridge girders tested. *PCI Journal*, 29, 177-179.
- Ramirez J.A. y Russell B.W. (2008). Transfer, development and splices length for strand/reinforcement in high-strength concrete. NCHRP Report 603. National Cooperative Highway Research Program.
- Ratz E., Holmjanski M., Kolner V. (1958). The Transmission of Prestress to Concrete by Bond. *PCI Journal*, pp. 52-65.

- Roller J.J., Martin, B.T., Russell, H.G. y Bruce, R.N. (1993). Performance of prestressed high strength concrete bridge girders. *PCI Journal*, 38(3), 34-45.
- Roller J.J., Russell, H.G., Bruce, R.N. y Martin, B.T. (1995). Long-term performance of prestressed, pretensioned high strength concrete bridge girders. *PCI Journal*, 40(6), 48-59.
- Roller J.J., Russell, H.G., Bruce, R.N. y Alaywan W.R. (2011). Evaluation of prestress losses in high-strength concrete bulb-tee girders for the rigolets pass bridge. *PCI Journal*, 56(1), 110-134.
- Russell B. (1994). Impact of high strength concrete on the design and construction of pretensioned girder bridges. *PCI journal*, 34(4), 76-89.
- Russell Bruce W. y Burns Ned H. (1996). Measured Transfer Lengths Of 0.5 and 0.6 in Strands in prestressed Concrete. *PCI 41[5]*, 44-65.
- Russell Bruce W. y Burns Ned H. (1997). Measurement of transfer lengths on pretensioned concrete elements. *PCI*, 541-549.
- Salmons J., Mccrate, T. (1977). Bond Characteristics of Untensioned Prestressing Strand. *Journal Prestressed Concrete Institute*, 22(1), pp. 52-65.
- Scribner, C.F. y Kobayashi, K. (1984). Prestressing Strand Bond Characteristics Under Reversed Cyclic Loading. *Journal Prestressed Concrete Institute*, 29(5), 118-137.
- Shahawy Mohsen A, Moussa Issa y Batchelor Barrington de V. (1992). Strand transfer length in full scale AASHTO Prestressed concrete girders. *PCI*, 84-96.
- Shahawy M. (2001). A critical evaluation of the AASHTO provisions for strand development length of prestressed concrete members. *PCI Journal*, 46(4), 94-+.
- Shenoy C.V. and Frantz G.C. (1991). Structural test of 27-year-old Prestressed Concrete Bridge Beams. *PCI Journal*, 36(5), 80-90.
- Shing P.B., Cooke, D.E., Frangopol, D.M., Leonard, M.A., McMullen, M.L. y Hutter W. (2000). Strand development and transfer length tests on high performance concrete box girders. *PCI Journal*, 45(5), 96-+.
- Soudki K., Green M. y Clapp F. (1997). Transfer Length of Carbon Fiber Rods in Precast Pretensioned Concrete Beams. *PCI Journal*, 42(5), 78-87.
- Stallings J. M., Barnes R. W. y Eskildsen S. (2003). Camber and prestress losses in Alabama HPC bridge girders. *PCI Journal*, 48(5), 90-104.
- Staton B.W., Do N.H., Ruiz E.D. y Hale W.M. (2009). Transfer length of prestressed beams cast with self-consolidating concrete. *PCI Journal*, 64-83.

- Tabatabai H., Dickson T. (1993). The History of the Prestressing Strand Development Length Equation. *PCI Journal*, 38(5), pp. 64-75.
- Steinberg E.P. (1995). Probabilistic assessment of prestress loss in pretensioned prestressed concrete. *PCI Journal*, 40(6), 76-85.
- Swamy R.N. y Anand K.L. (1975). Losses in transmission length and prestress in high alumina cement concrete. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part 2*. 59, 293-307.
- Swords J.S. (2005). Transfer length in prestressed self-consolidating concrete. MS Thesis, Auburn University.
- Tadros M.K., Ghali A. y Dilger, W.H. (1975). Time-dependent prestress loss and deflection in prestressed concrete members. *PCI Journal*, 20, 86-98.
- Tadros M.K., Buckner C.Dale, Logan Donald R., Russell Bruce W., Burns Ned H. y Baishya Mantu C. (1996). A Review of Strand Development Length for pretensioned concrete members. *PCI*, 112-127.
- Tadros M.K., Al-Omashi N., Seguirant S.J. y Gallat G. (2003). Prestress Losses in Pretensioned High-Strength Concrete Bridge Girders. NCHRP Report 496, National cooperative highway research program, Washington, D.C.
- Tepfers R. (1973). A theory of bond to overlapped tensile reinforcement splices for deformed bars. Chalmers University of Technology, Division of Concrete Structures, Goteborg, Sweden, publication 73:2.
- Thorsen N. (1954). Use of Large Tendons in Pre-tensioned Concrete. *Journal of the American Concrete Institute* 27[6], 649-659.
- Trent Justin D. (2007). Transfer length, development length, flexural strength, and prestress loss evaluation in pretensioned self-consolidating concrete members. MS Thesis, Virginia University.
- Tork B. (1999). Estudio de los mecanismos combinados de fisuración y adherencia en elementos de hormigón armado y pretensado. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.
- Vandewalle L. y Mortelmans F. (1994). Anchorage of strands. 12 Congreso Internacional del FPI, J16-J22.
- Vazquez-Herrero, C. (2000). Estudio comparativo de las propiedades de adherencia de cordones de pretensado en elementos prefabricados de hormigones de alta prestaciones iniciales. Tesis Doctoral. Universidad de la Coruña.
- Weerassekera, I. (1991). Transfer and flexural bond in pretensioned prestressed concrete. UMI.

- 
- Wu C.H., Zhao W., Beck T. y Peterman R. (2011). Optical sensor developments for measuring the surface strains in prestressed concrete members. 47:376-386.
- Yang Y. and Myers J. (2005). Prestress loss measurements in Missouri's first fully instrumented high-performance concrete bridge. Journal of the transportation research board, 1952, 118-125.
- Youakim S.A. y Karbhari V.M. (2007). An approach to determine long-term behavior of concrete members prestressed with FRP tendons. Construction and Building Materials, 21(5), 1052-1060.
- Yu S. (1993). Characteristic Bond Behavior of Prestressing Strands Within the Transfer Length. Tesis Doctoral, UMI Order nº 9505663.
- Zia Paul, Mostafa Talat y Guyon Y. (1977). Development length of prestressing Strands. PCI, 54-65.
- Zia Paul, Preston H.K., Scott N. y Workman E. (1979). Estimating Prestress Losses. Concrete International, 1(6), 32-38.
- Zou Patrick X.W. (2003). Long-term properties and transfer length of fiber-reinforced polymers. Journal of Composites for Construction, 7(1), 10-19.

(Esta página se ha dejado intencionalmente en blanco)



## ANEJOS

ANEJO A. Longitud de transmisión inicial. Método de fuerzas (ECADA+)

ANEJO B. Longitud de transmisión inicial. Método deslizamientos

ANEJO C. Longitud de transmisión inicial. Método de deformaciones longitudinales en el hormigón (95% AMS)

ANEJO D. Longitud de anclaje

ANEJO E. Pérdida de pretensado (Probetas)

ANEJO F. Pérdida de pretensado (Series)

ANEJO G. Longitud de transmisión diferida. Método de fuerzas (ECADA+)

ANEJO H. Evolución de deslizamientos en el extremo libre con el tiempo

ANEJO I. Longitud de transmisión diferida. Método deslizamientos

ANEJO J. Longitud de transmisión diferida. Método de deformaciones longitudinales en el hormigón (95% AMS)

ANEJO K. Retracción del hormigón

ANEJO L. Evolución de deformaciones longitudinales del hormigón en el tramo de meseta con el tiempo

ANEJO M. Pérdidas de pretensado en el tramos de meseta

ANEJO N. Comparación de las pérdidas de pretensado y las pérdidas en el tramo de meseta

ANEJO O. Cálculo de las pérdidas de pretensado según modelos teóricos

(Esta página se ha dejado intencionalmente en blanco)

ANEJO A. LONGITUD DE TRANSMISIÓN INICIAL. MÉTODO DE FUERZAS (ECADA+)

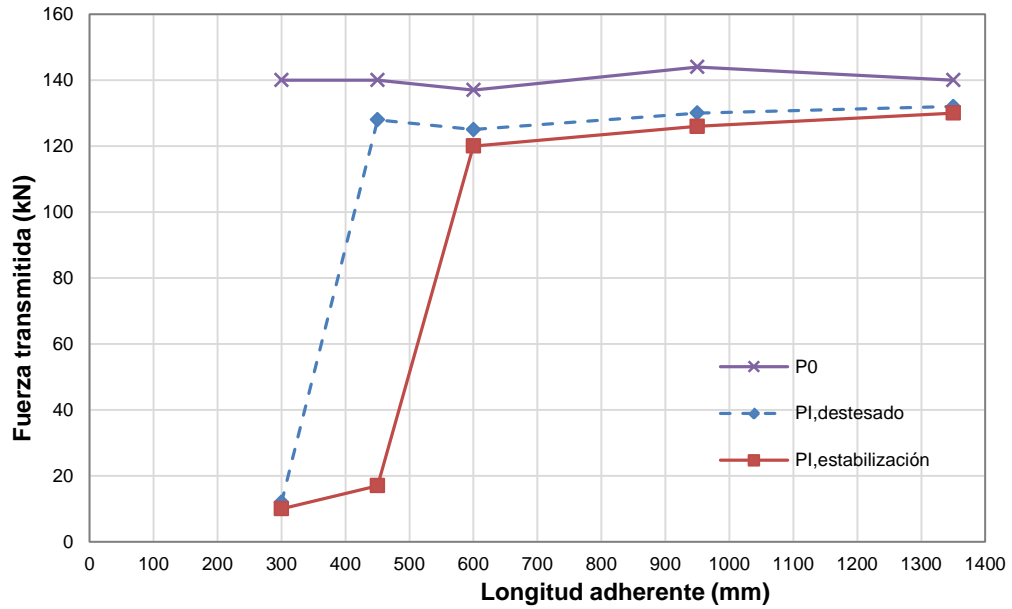


Figura A-1.1. Longitud de transmisión inicial por el método de fuerza transmitida. Fuerza transmitida vs. Longitud adherente. Serie HT-A-60-24.

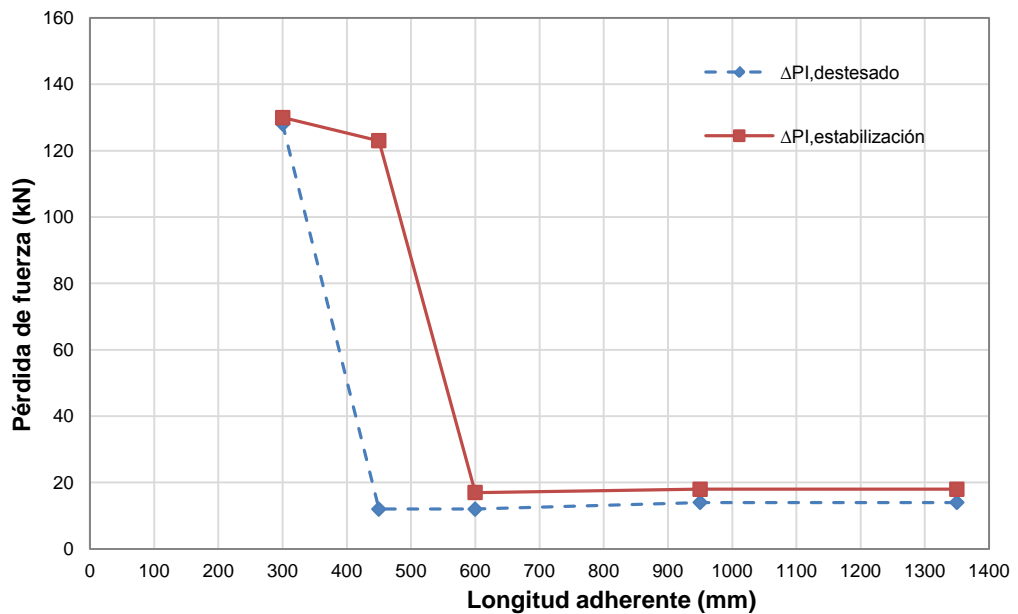


Figura A-1.2. Longitud de transmisión inicial por el método de pérdida de fuerza. Pérdida de fuerza vs. Longitud adherente. Serie HT-A-60-24.

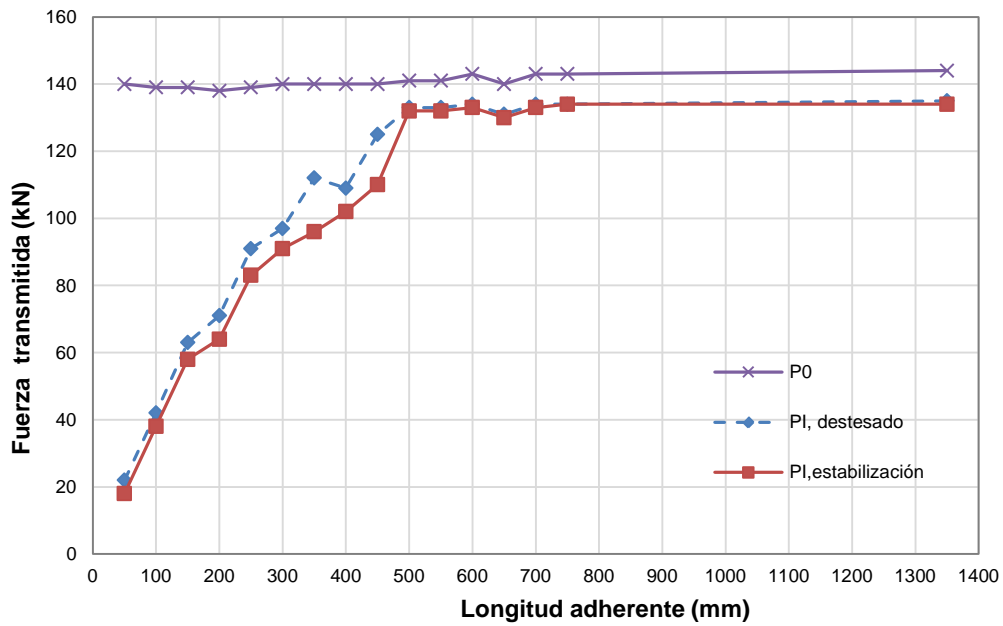


Figura A-2.1. Longitud de transmisión inicial por el método de fuerza transmitida. Fuerza transmitida vs. Longitud adherente. Serie HT-A-80-24.

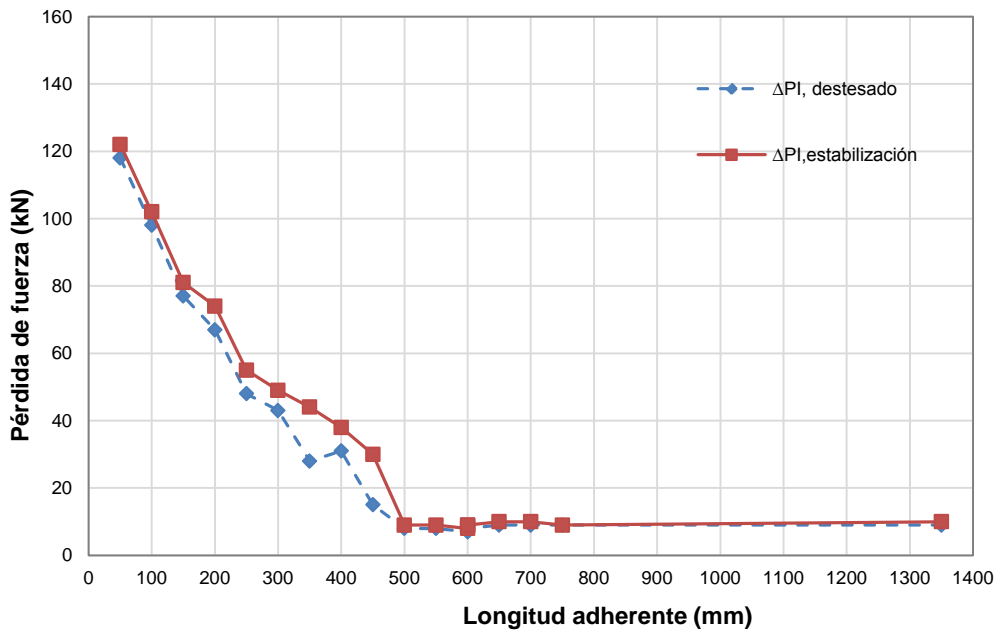


Figura A-2.2. Longitud de transmisión inicial por el método de pérdida de fuerza. Pérdida de fuerza vs. Longitud adherente. Serie HT-A-80-24.

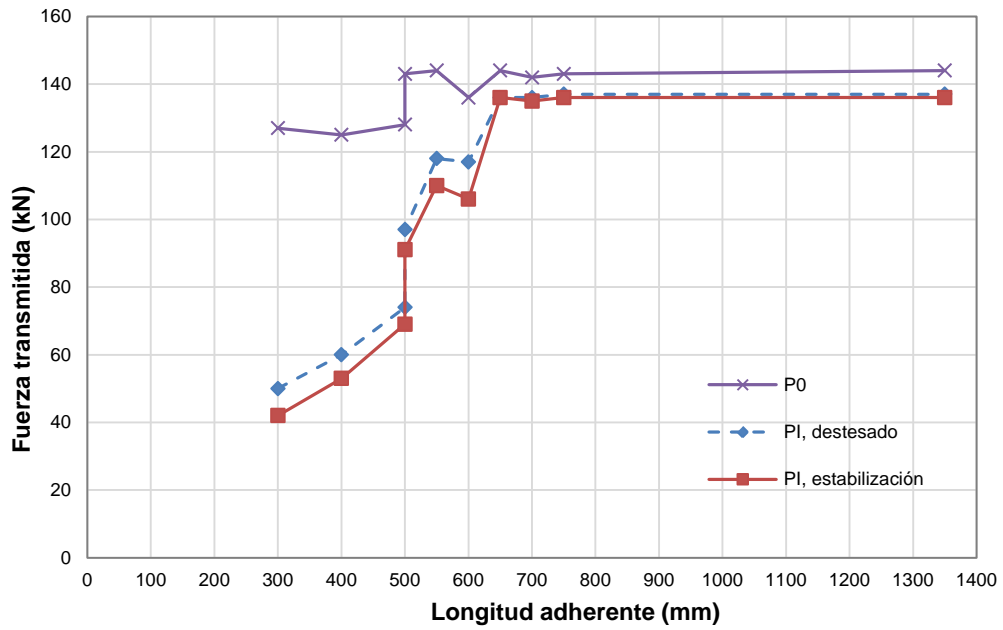


Figura A-3.1. Longitud de transmisión inicial por el método de fuerza transmitida. Fuerza transmitida vs. Longitud adherente. Serie HT-A-100-12.

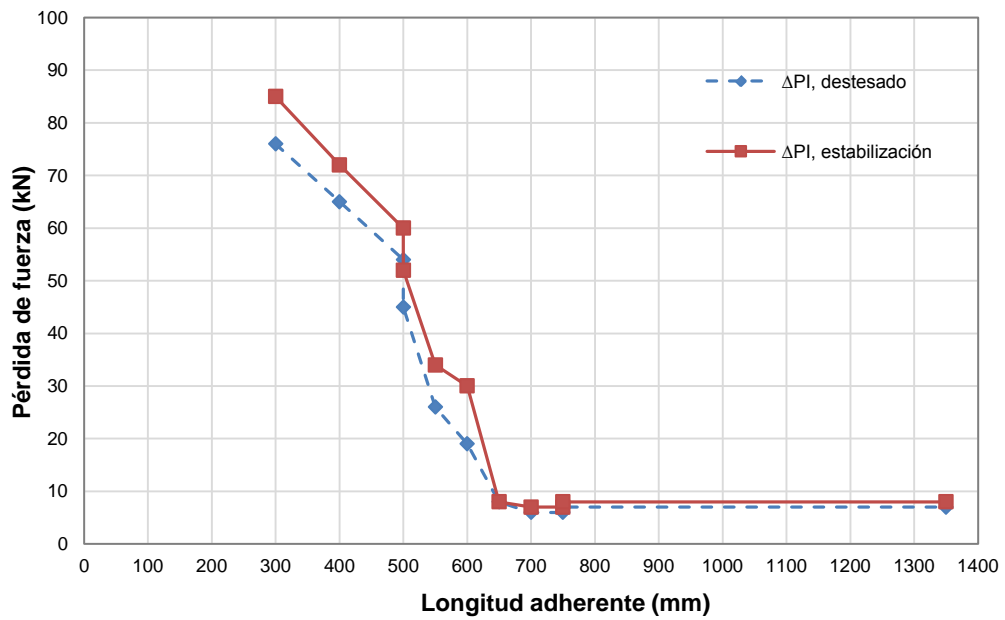


Figura A-3.2. Longitud de transmisión inicial por el método de pérdida de fuerza. Pérdida de fuerza vs. Longitud adherente. Serie HT-A-100-12.

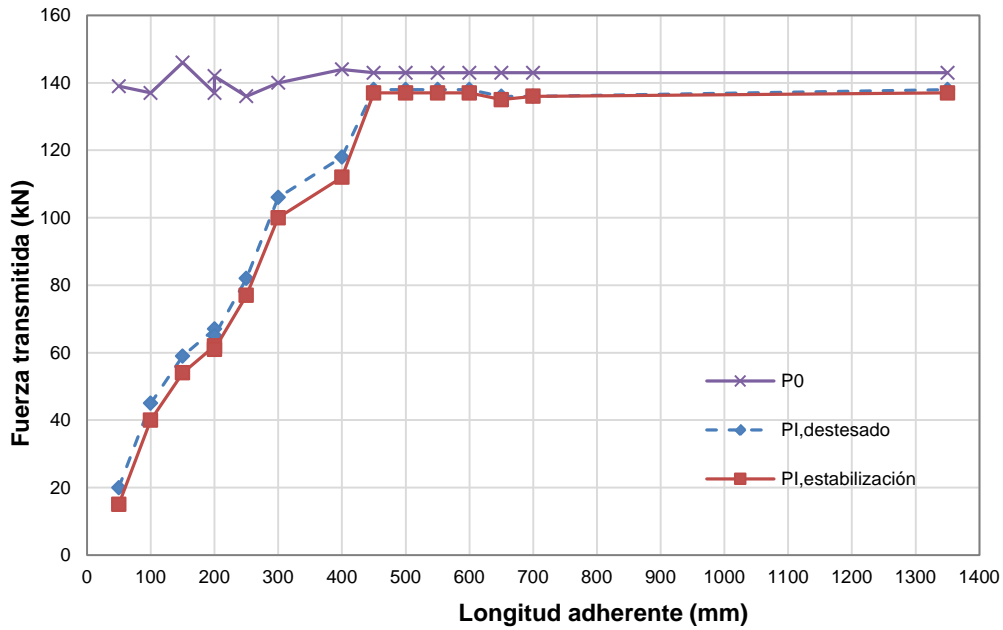


Figura A-4.1. Longitud de transmisión inicial por el método de fuerza transmitida. Fuerza transmitida vs. Longitud adherente. Serie HT-A-100-24.

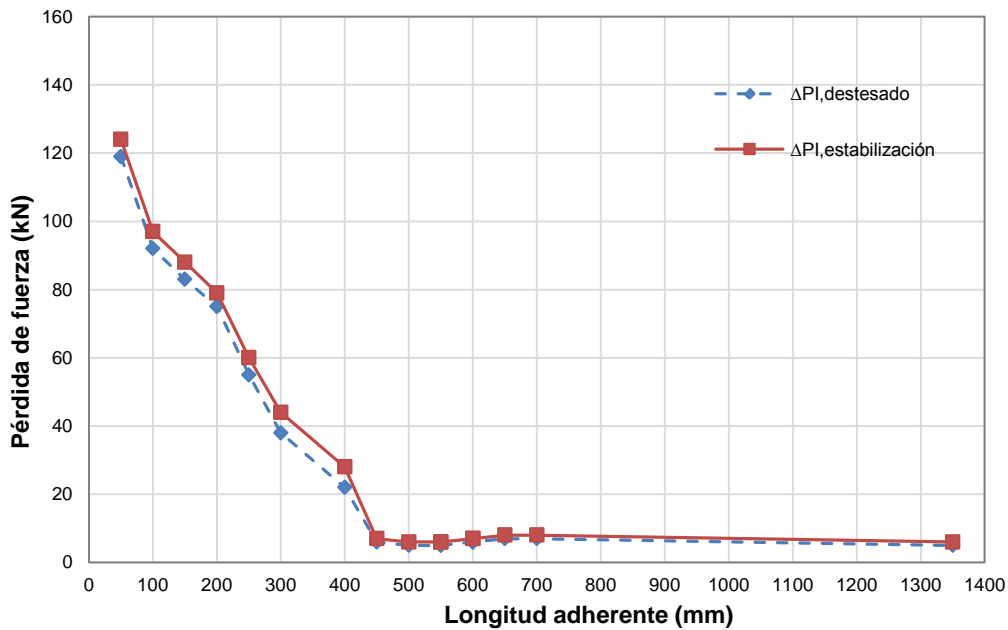


Figura A-4.2. Longitud de transmisión inicial por el método de pérdida de fuerza. Pérdida de fuerza vs. Longitud adherente. Serie HT-A-100-24.

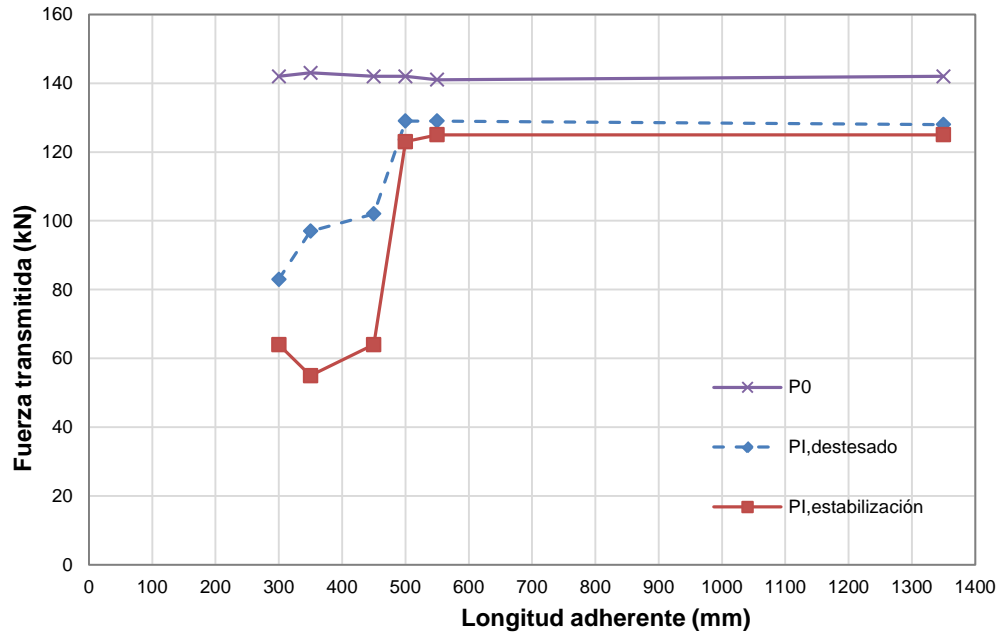


Figura A-5.1. Longitud de transmisión inicial por el método de fuerza transmitida. Fuerza transmitida vs. Longitud adherente. Serie HT-B-60-48.

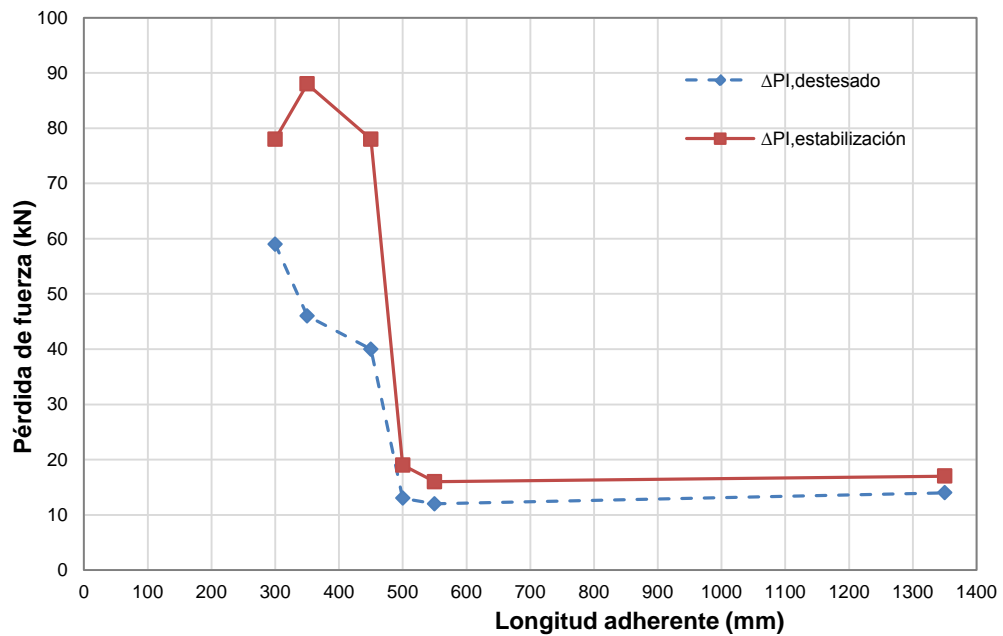


Figura A-5.2. Longitud de transmisión inicial por el método de pérdida de fuerza. Pérdida de fuerza vs. Longitud adherente. Serie HT-B-60-48.

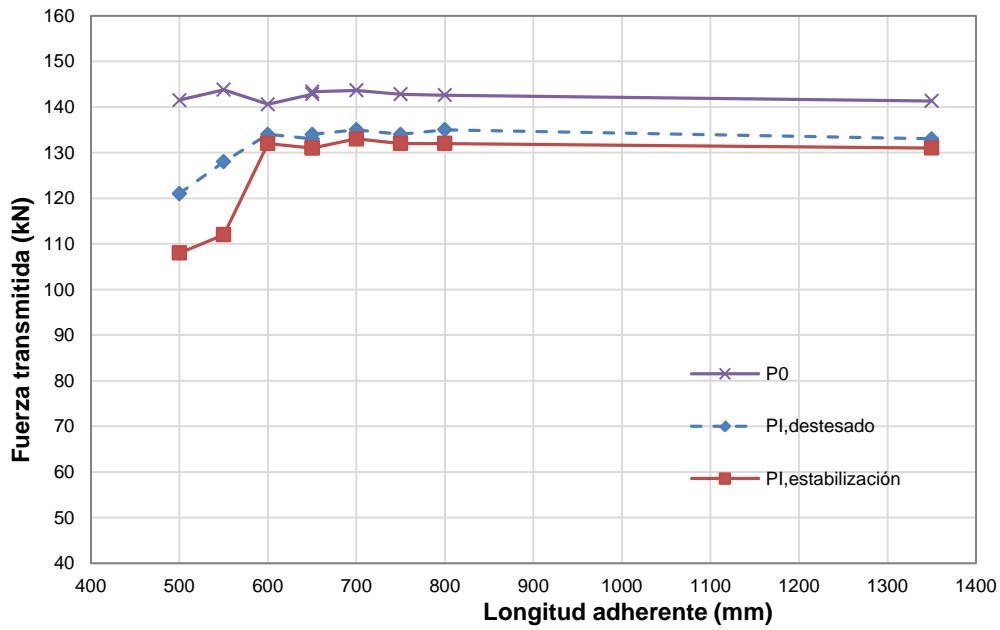


Figura A-6.1. Longitud de transmisión inicial por el método de fuerza transmitida. Fuerza transmitida vs. Longitud adherente. Serie HT-B-80-24.

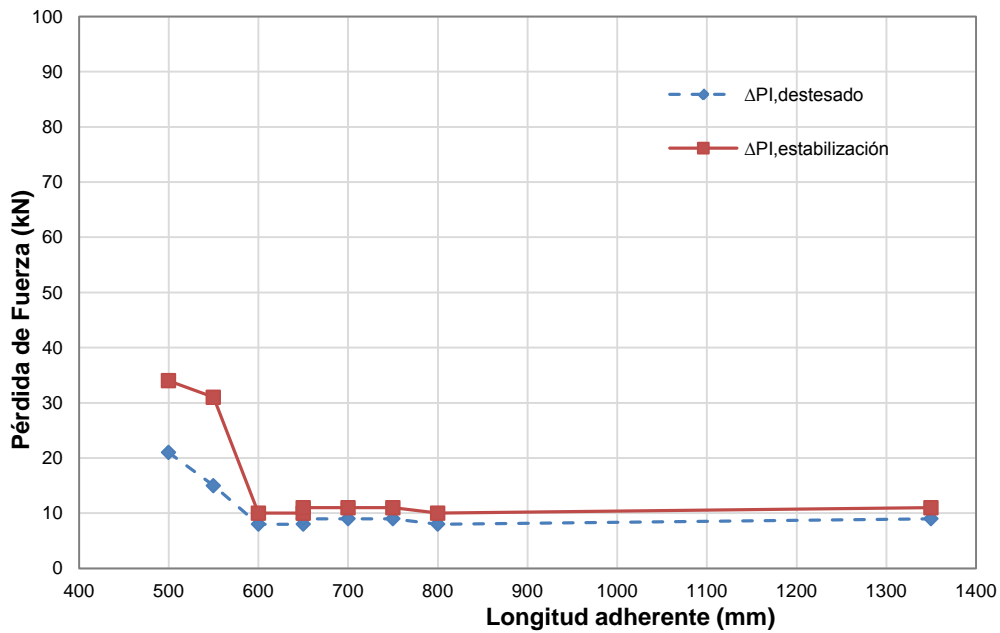


Figura A-6.2. Longitud de transmisión inicial por el método de pérdida de fuerza. Pérdida de fuerza vs. Longitud adherente. Serie HT-B-80-24.



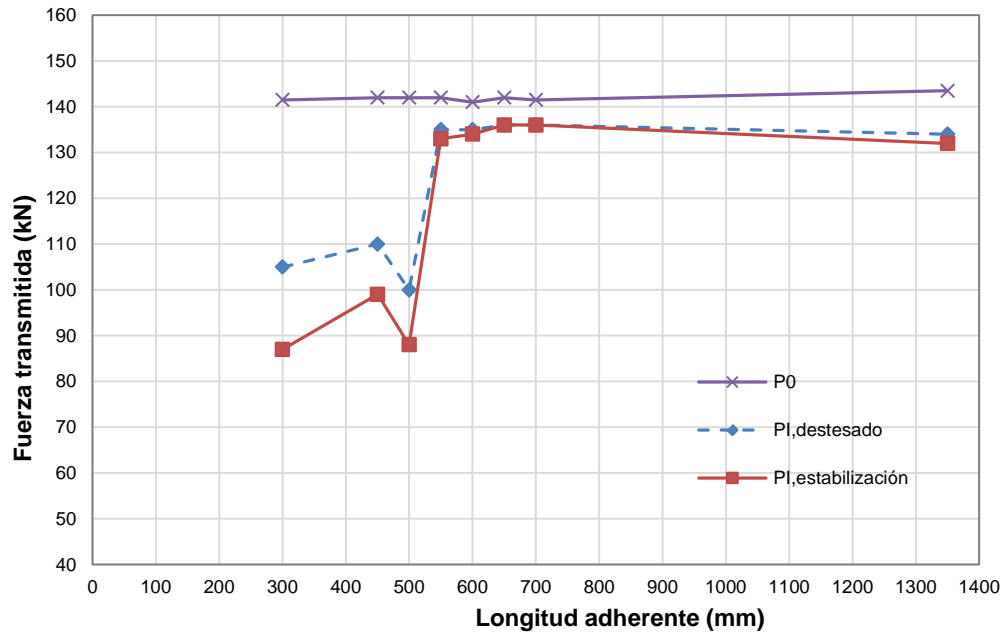


Figura A-7.1. Longitud de transmisión inicial por el método de fuerza transmitida. Fuerza transmitida vs. Longitud adherente. Serie HT-B-80-48.

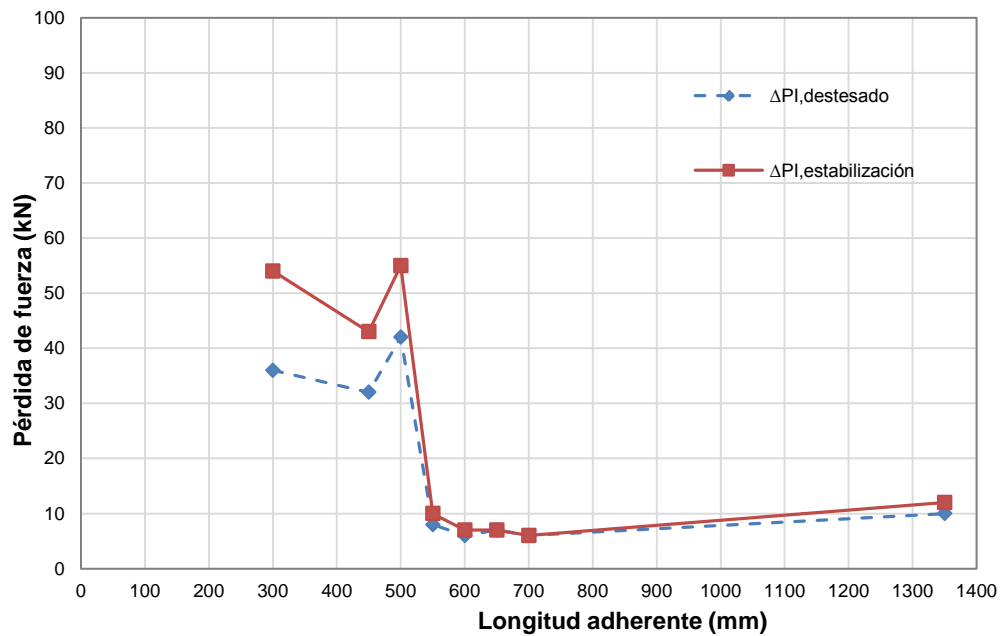


Figura A-7.2. Longitud de transmisión inicial por el método de pérdida de fuerza. Pérdida de fuerza vs. Longitud adherente. Serie HT-B-80-48.

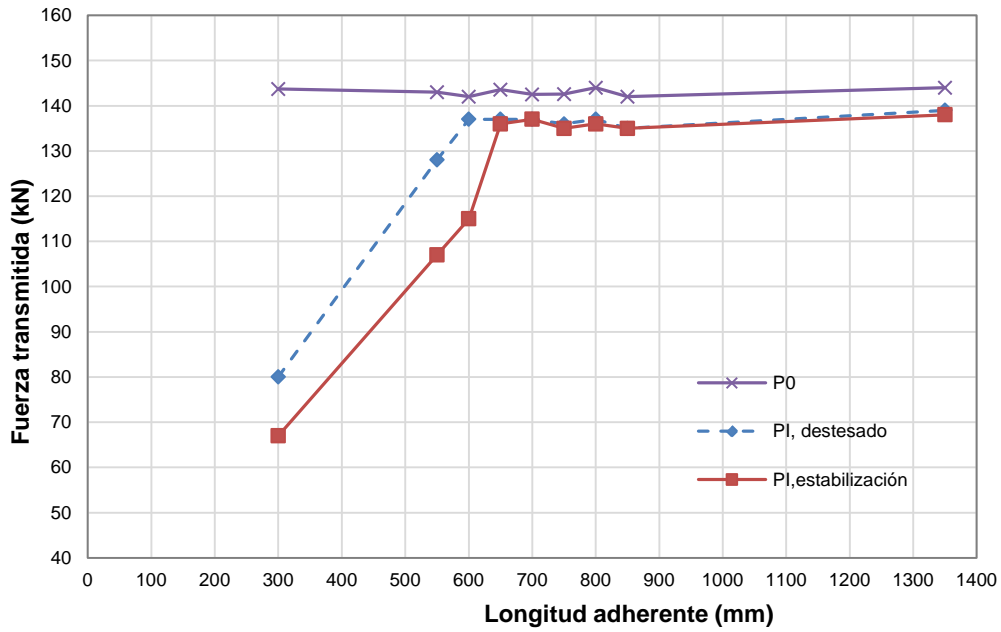


Figura A-8.1. Longitud de transmisión inicial por el método de fuerza transmitida. Fuerza transmitida vs. Longitud adherente. Serie HT-B-100-24.

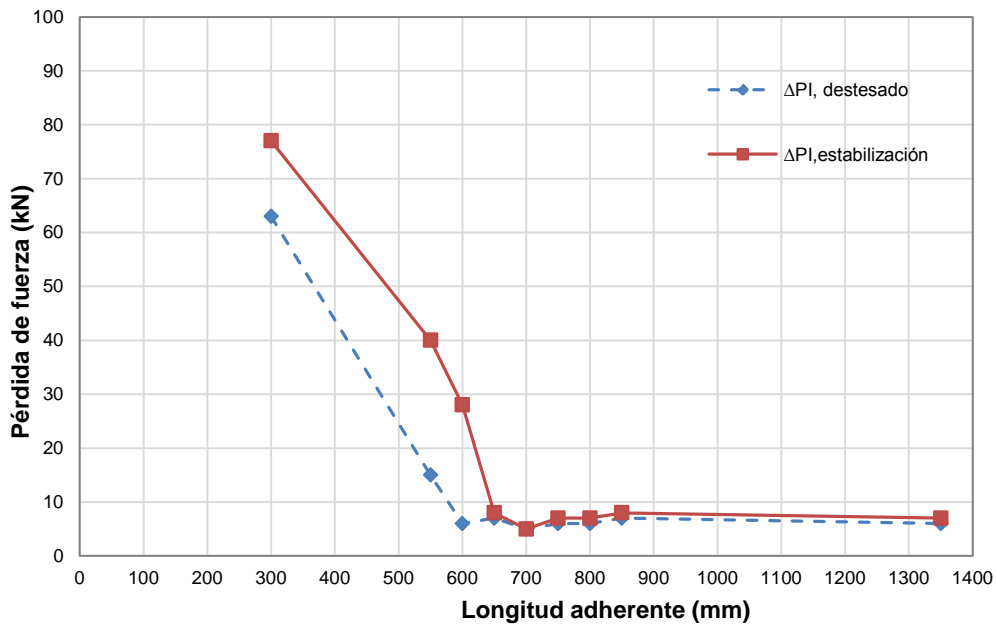


Figura A-8.2. Longitud de transmisión inicial por el método de pérdida de fuerza. Pérdida de fuerza vs. Longitud adherente. Serie HT-B-100-24.

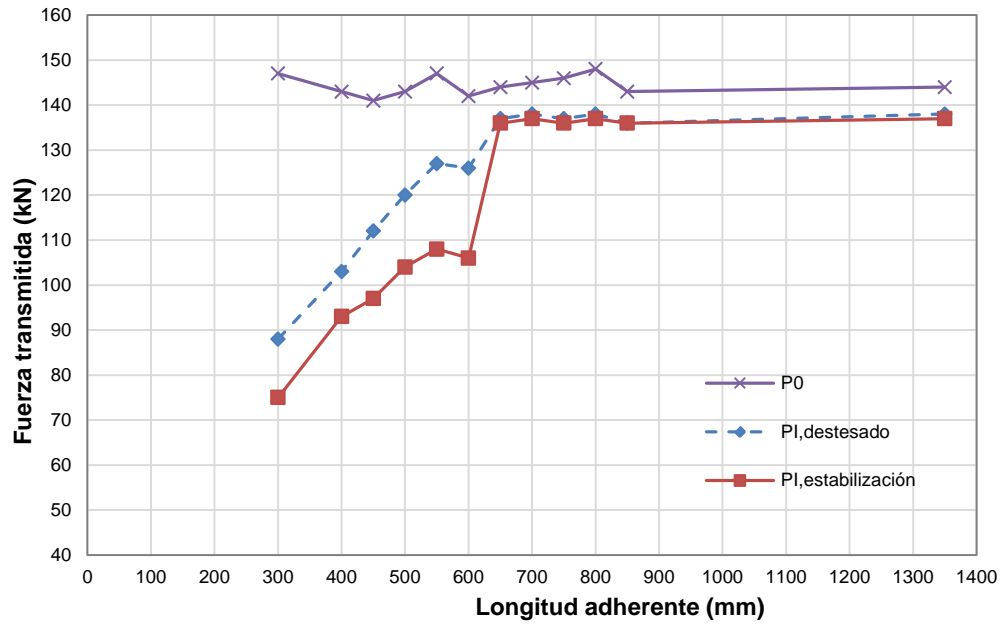


Figura A-9.1. Longitud de transmisión inicial por el método de fuerza transmitida. Fuerza transmitida vs. Longitud adherente. Serie HT-B-100-48.

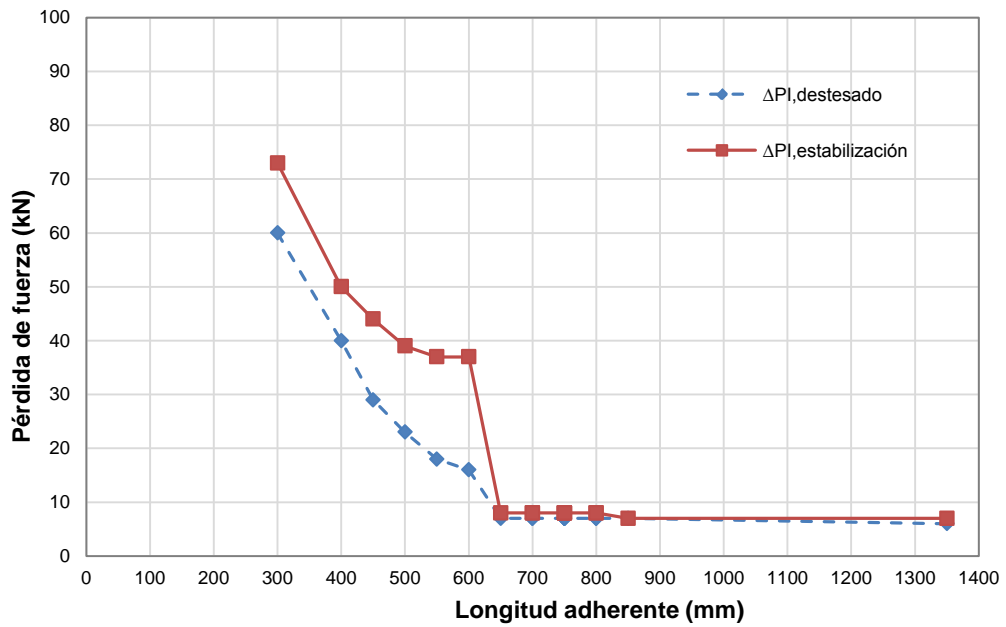


Figura A-9.2. Longitud de transmisión inicial por el método de pérdida de fuerza. Pérdida de fuerza vs. Longitud adherente. Serie HT-B-100-48.

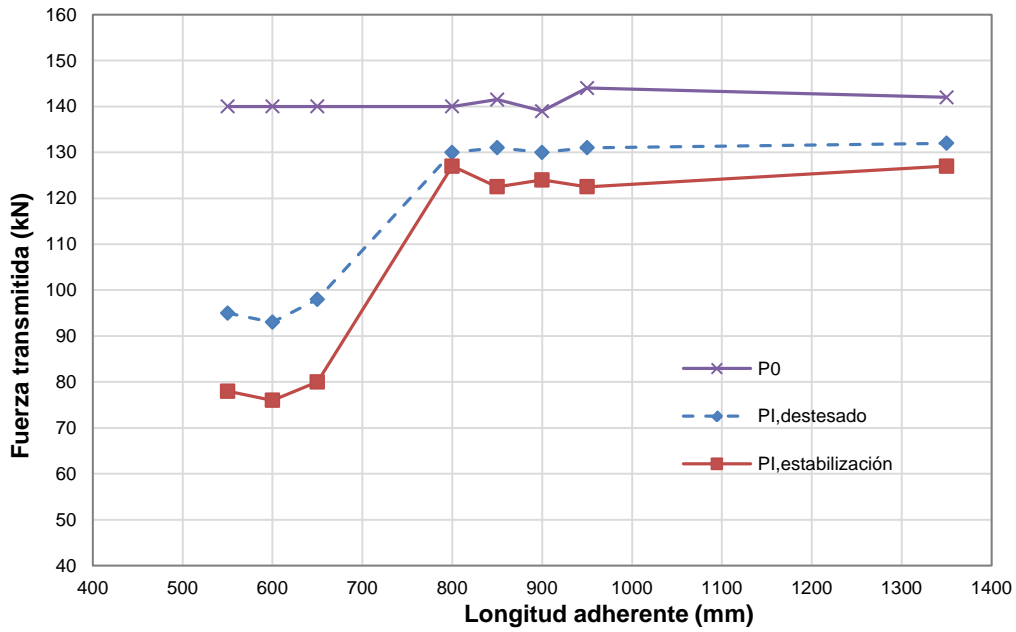


Figura A-10.1. Longitud de transmisión inicial por el método de fuerza transmitida. Fuerza transmitida vs. Longitud adherente. Serie HT-C-80-48.

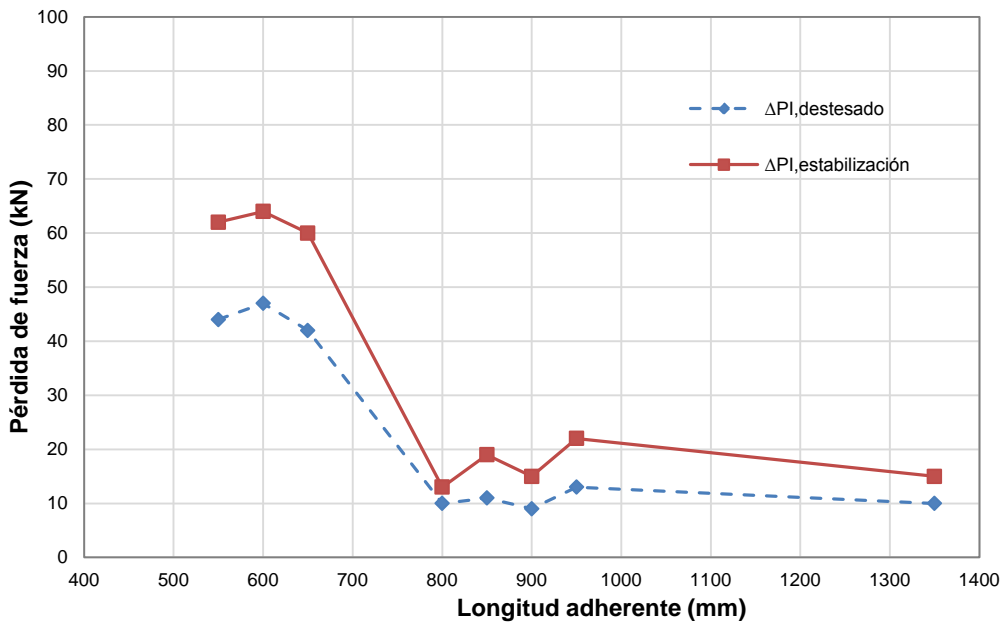


Figura A-10.2. Longitud de transmisión inicial por el método de pérdida de fuerza. Pérdida de fuerza vs. Longitud adherente. Serie HT-C-80-48.

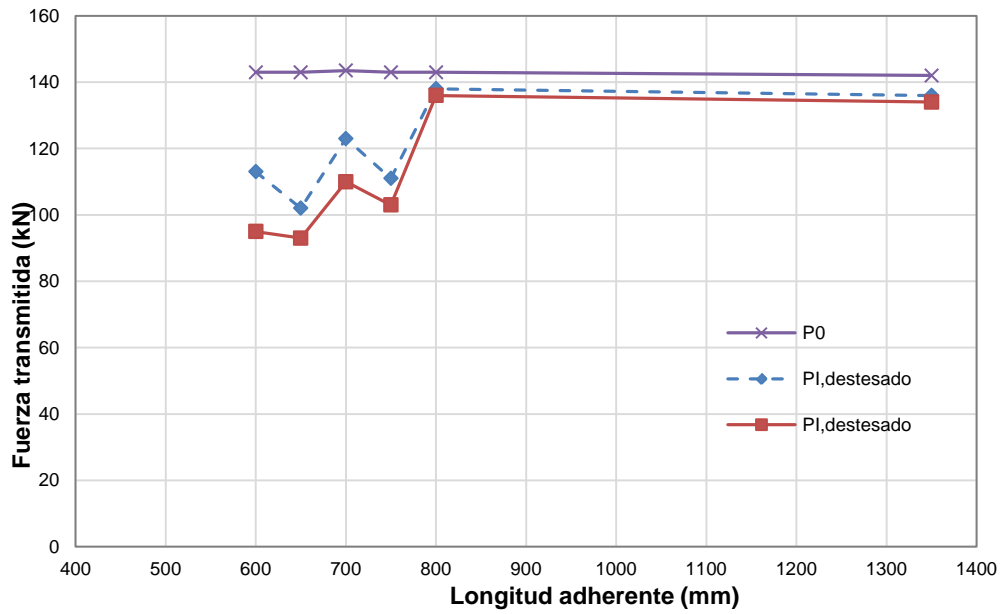


Figura A-11.1. Longitud de transmisión inicial por el método de fuerza transmitida. Fuerza transmitida vs. Longitud adherente. Serie HT-C-100-24.

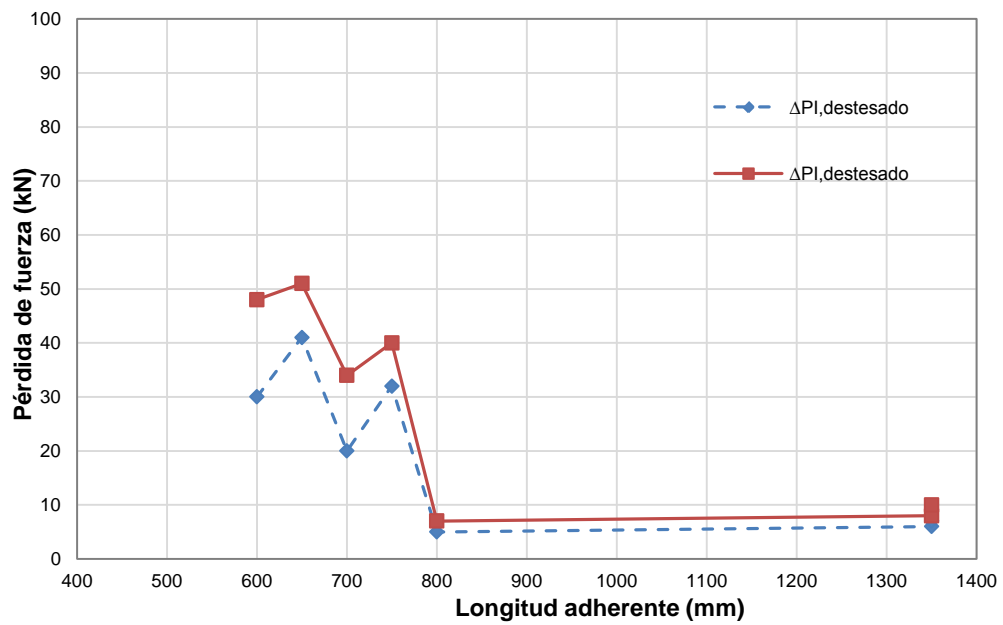


Figura A-11.2. Longitud de transmisión inicial por el método de pérdida de fuerza. Pérdida de fuerza vs. Longitud adherente. Serie HT-C-100-24.

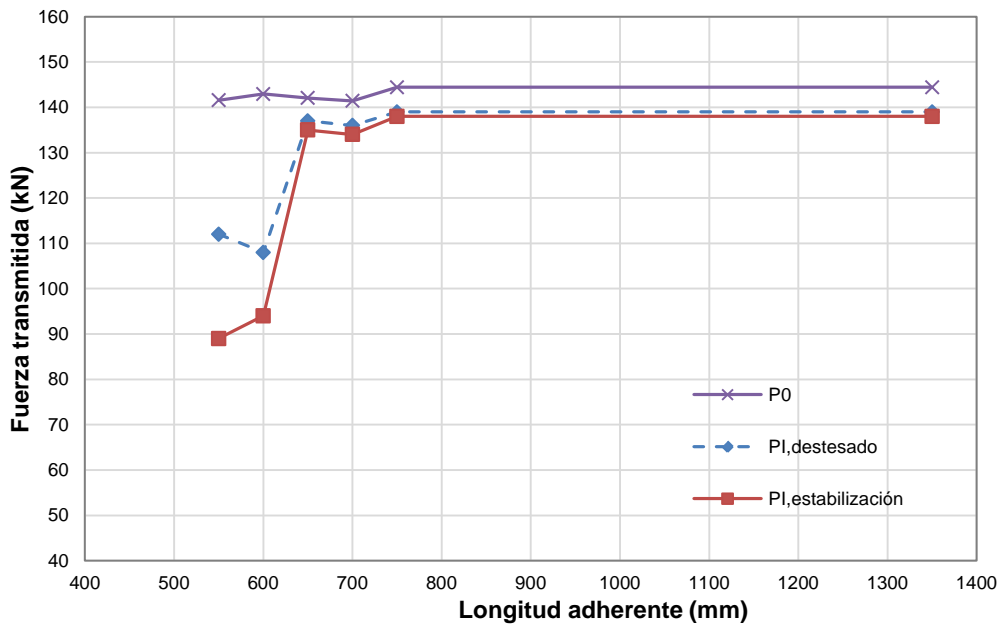


Figura A-12.1. Longitud de transmisión inicial por el método de fuerza transmitida. Fuerza transmitida vs. Longitud adherente. Serie HT-C-100-48.

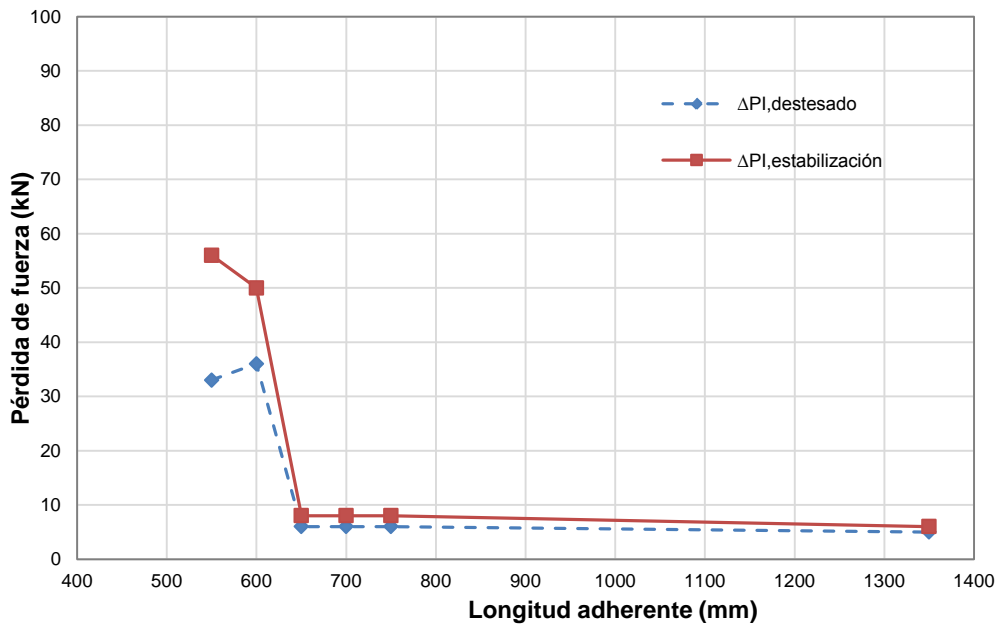


Figura A-12.2. Longitud de transmisión inicial por el método de pérdida de fuerza. Pérdida de fuerza vs. Longitud adherente. Serie HT-C-100-48.

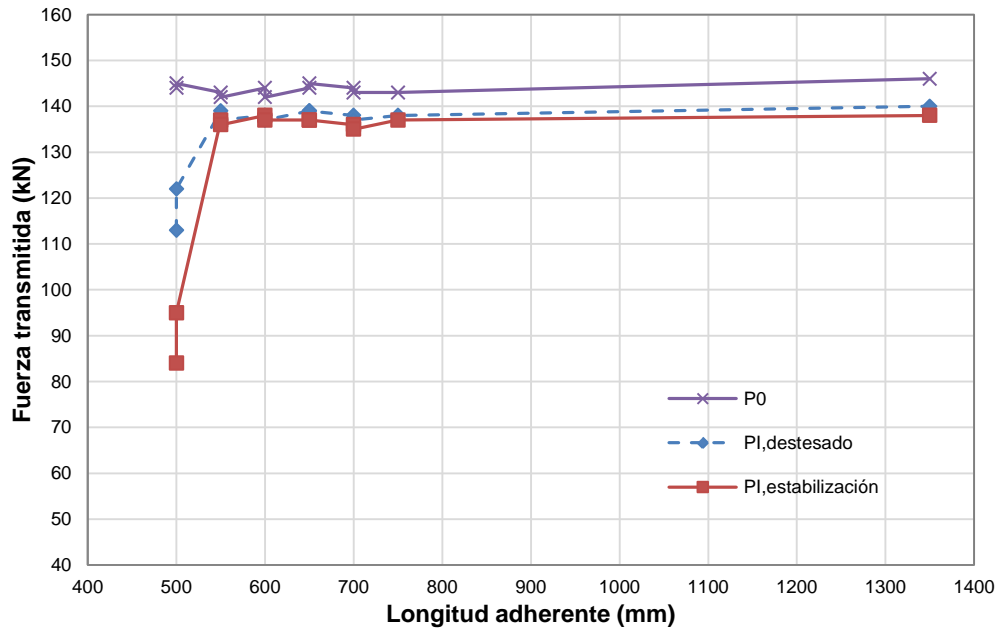


Figura A-17.1. Longitud de transmisión inicial por el método de fuerza transmitida. Fuerza transmitida vs. Longitud adherente. Serie HR-100-48.

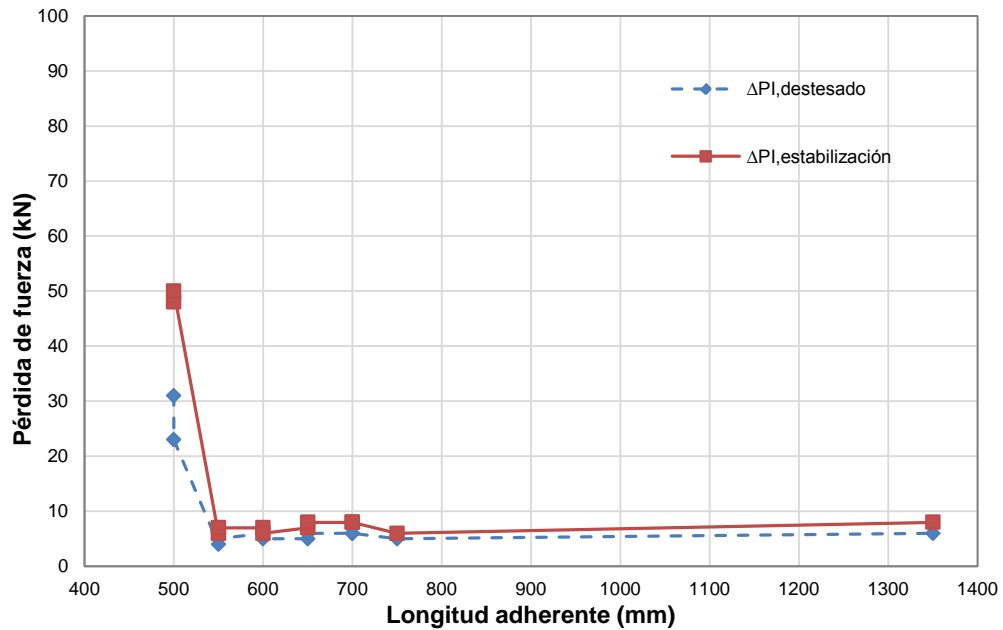


Figura A-17.2. Longitud de transmisión inicial por el método de pérdida de fuerza. Pérdida de fuerza vs. Longitud adherente. Serie HR-100-48.

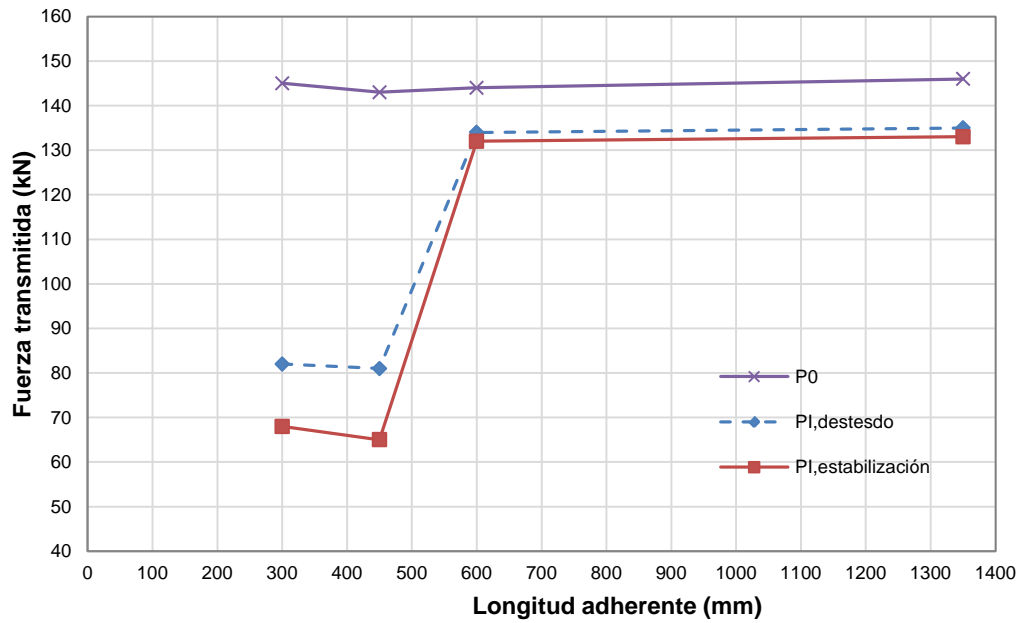


Figura A-18.1. Longitud de transmisión inicial por el método de fuerza transmitida. Fuerza transmitida vs. Longitud adherente. Serie FA-60-24.

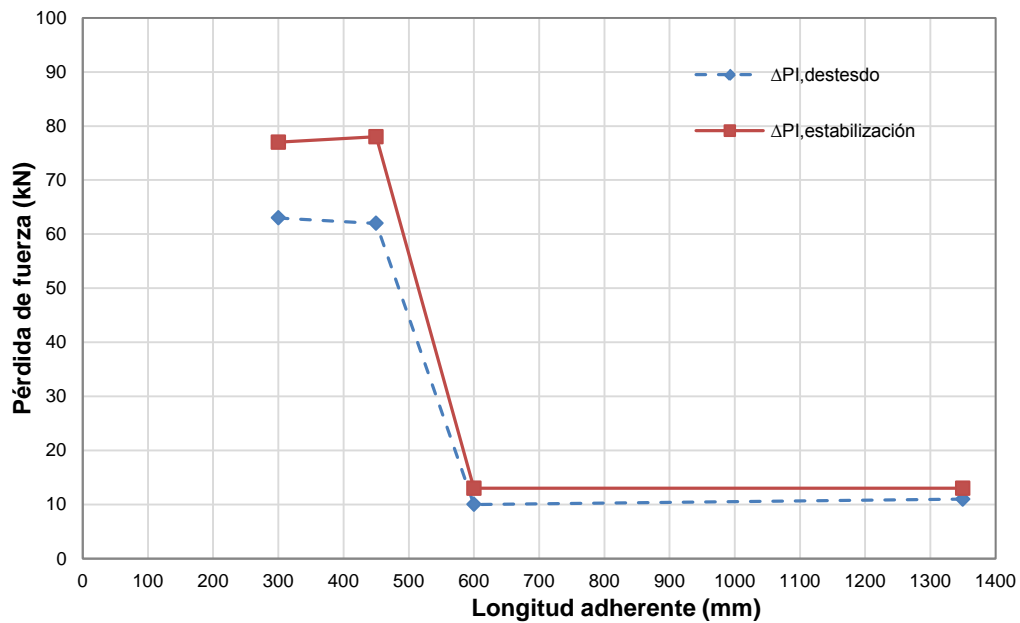


Figura A-18.2. Longitud de transmisión inicial por el método de pérdida de fuerza. Pérdida de fuerza vs. Longitud adherente. Serie FA-60-24.



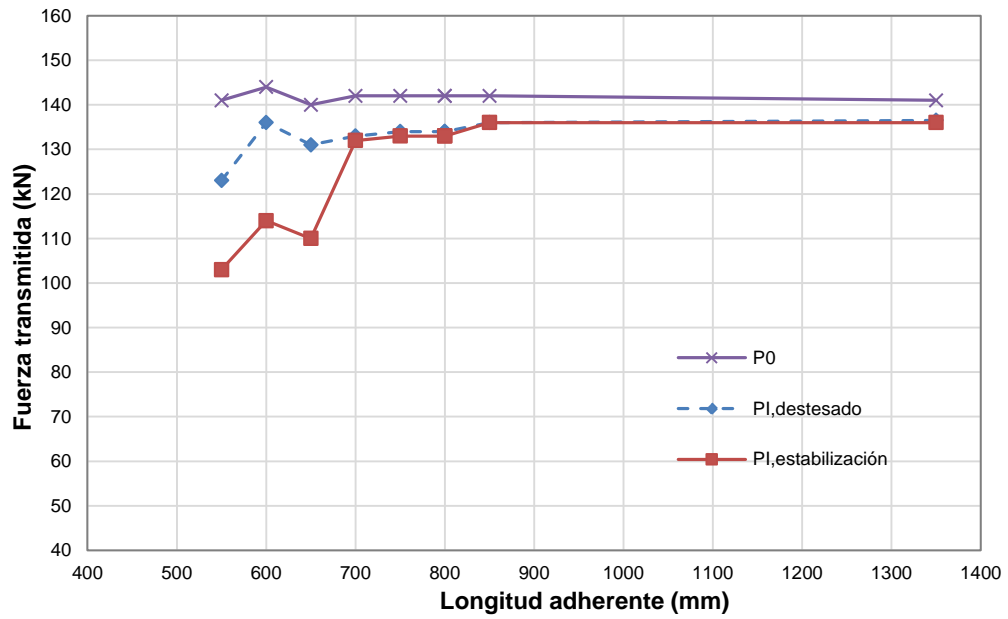


Figura A-22.1. Longitud de transmisión inicial por el método de fuerza transmitida. Fuerza transmitida vs. Longitud adherente. Serie HAC-NF-100-48.

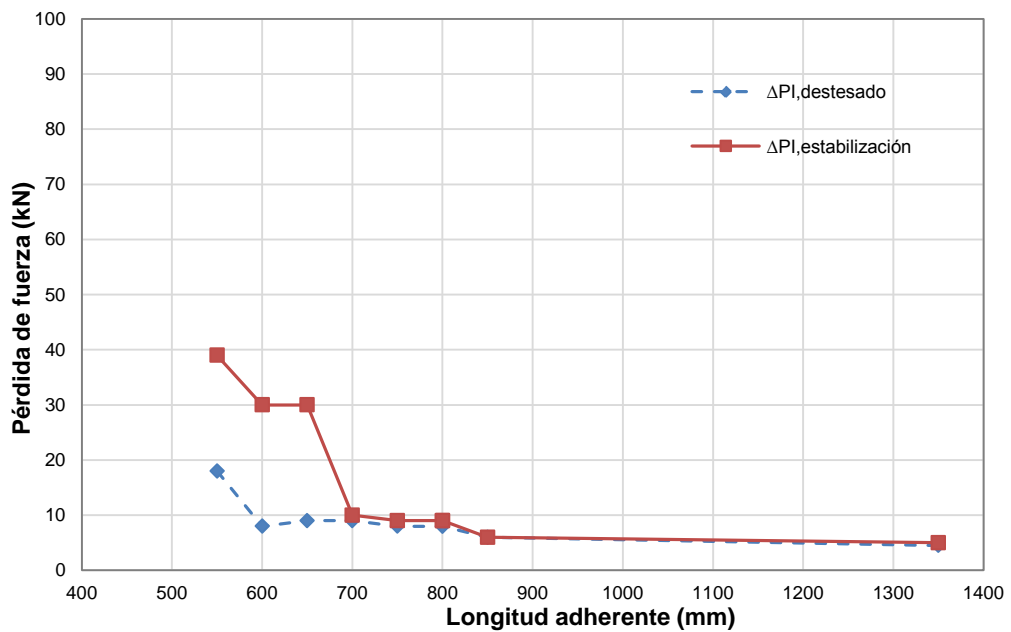


Figura A-22.2. Longitud de transmisión inicial por el método de pérdida de fuerza. Pérdida de fuerza vs. Longitud adherente. Serie HAC-NF-100-48.

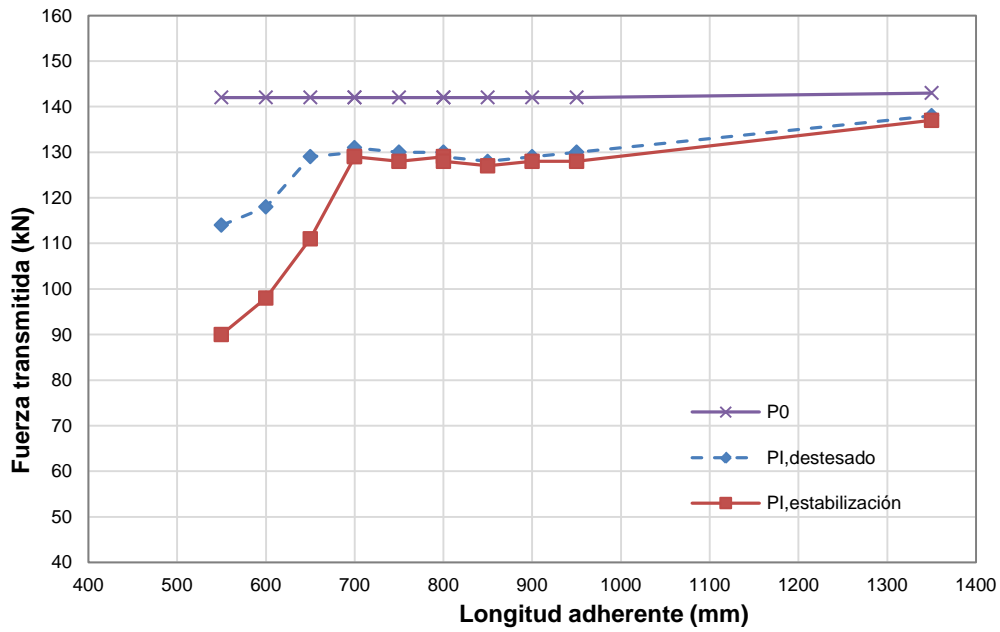


Figura A-23.1. Longitud de transmisión inicial por el método de fuerza transmitida. Fuerza transmitida vs. Longitud adherente. Serie HAC-LF-100-48.

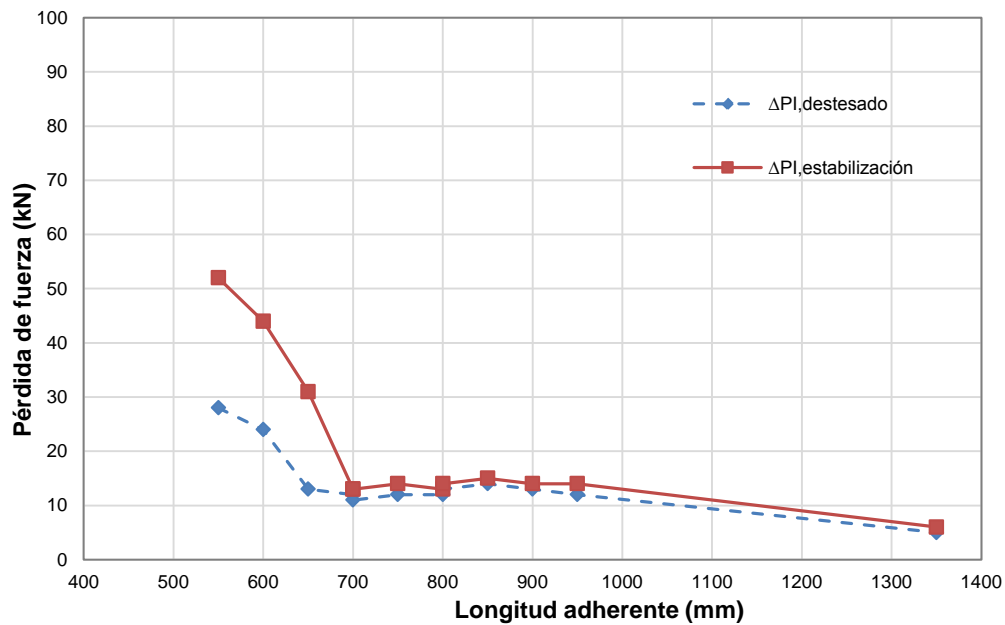


Figura A-23.2. Longitud de transmisión inicial por el método de pérdida de fuerza. Pérdida de fuerza vs. Longitud adherente. Serie HAC-LF-100-48.

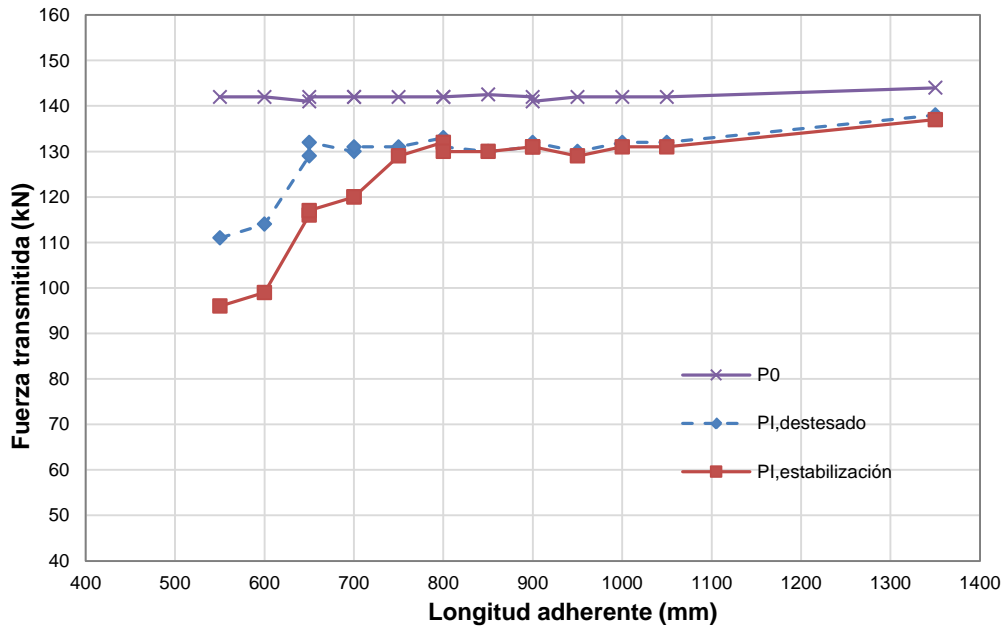


Figura A-24.1. Longitud de transmisión inicial por el método de fuerza transmitida. Fuerza transmitida vs. Longitud adherente. Serie HAC-MF-100-48.

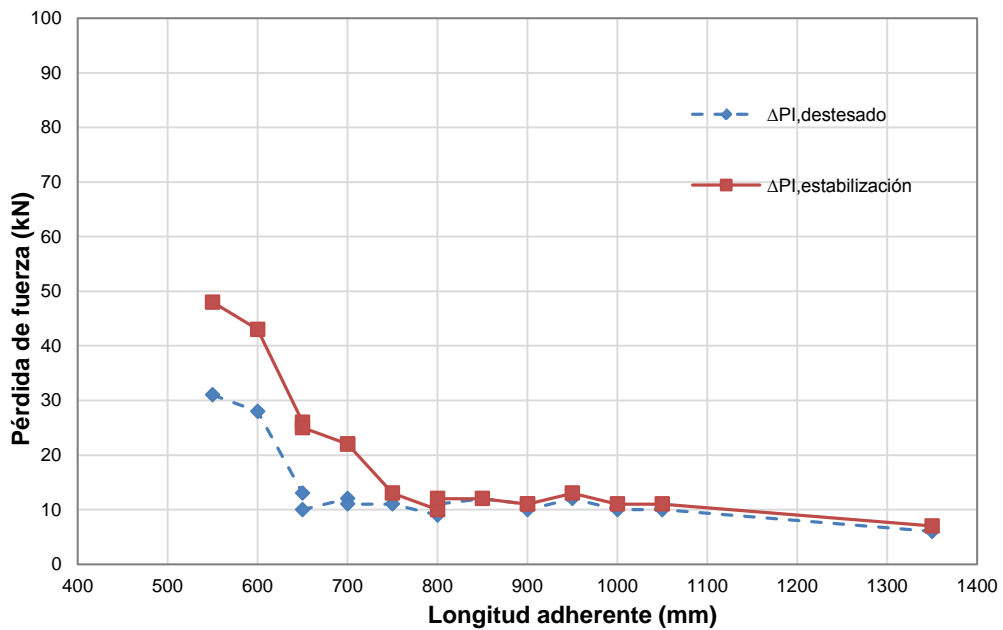


Figura A-24.2. Longitud de transmisión inicial por el método de pérdida de fuerza. Pérdida de fuerza vs. Longitud adherente. Serie HAC-MF-100-48.

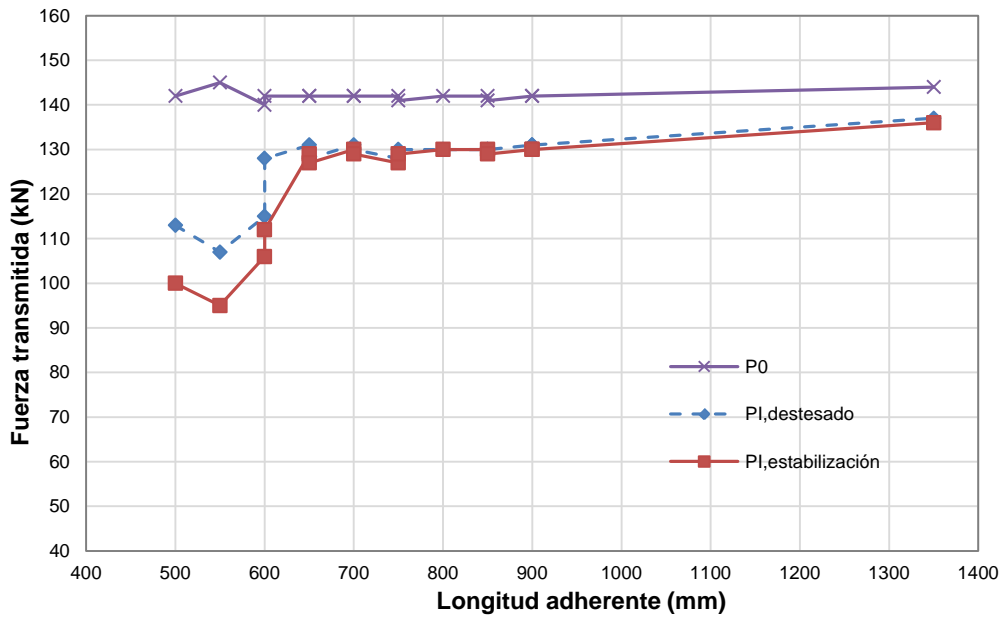


Figura A-25.1. Longitud de transmisión inicial por el método de fuerza transmitida. Fuerza transmitida vs. Longitud adherente. Serie HAC-HF-100-48.

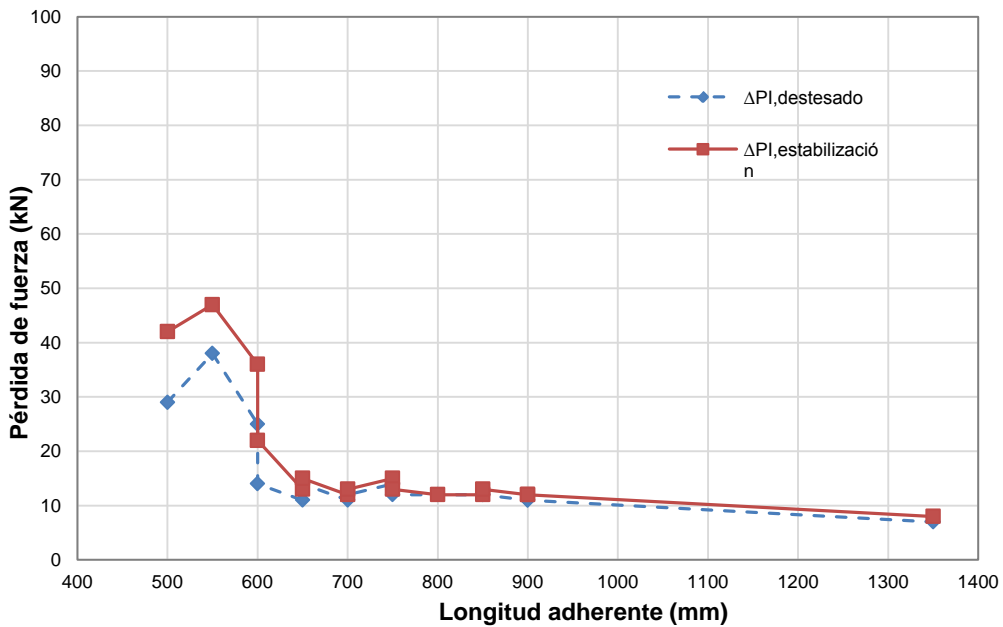


Figura A-25.2. Longitud de transmisión inicial por el método de pérdida de fuerza. Pérdida de fuerza vs. Longitud adherente. Serie HAC-HF-100-48.

ANEJO B. LONGITUD DE TRANSMISIÓN INICIAL. MÉTODO DE DESLIZAMIENTOS

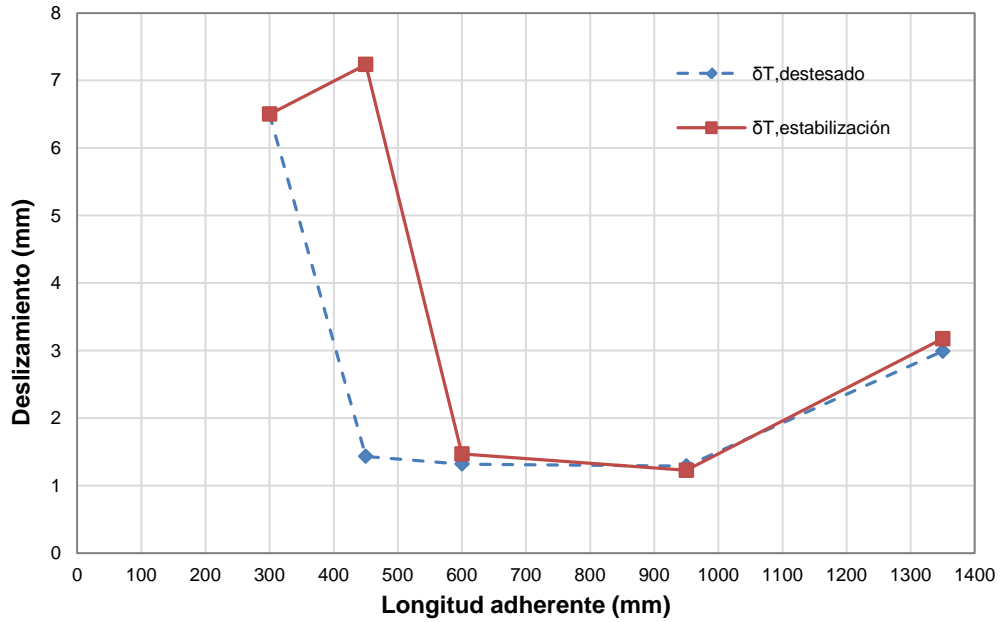


Figura B-1.1. Longitud de transmisión inicial por el método del deslizamiento en el extremo libre. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HT-A-60-24.

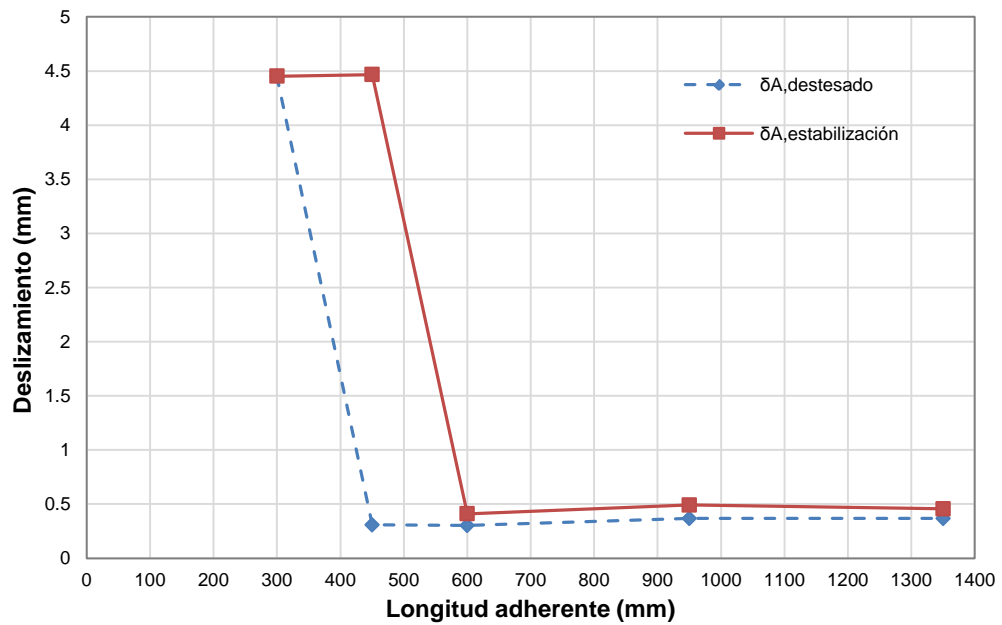


Figura B-1.2. Longitud de transmisión inicial por el método del deslizamiento en el extremo de arrancamiento. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HT-A-60-24.

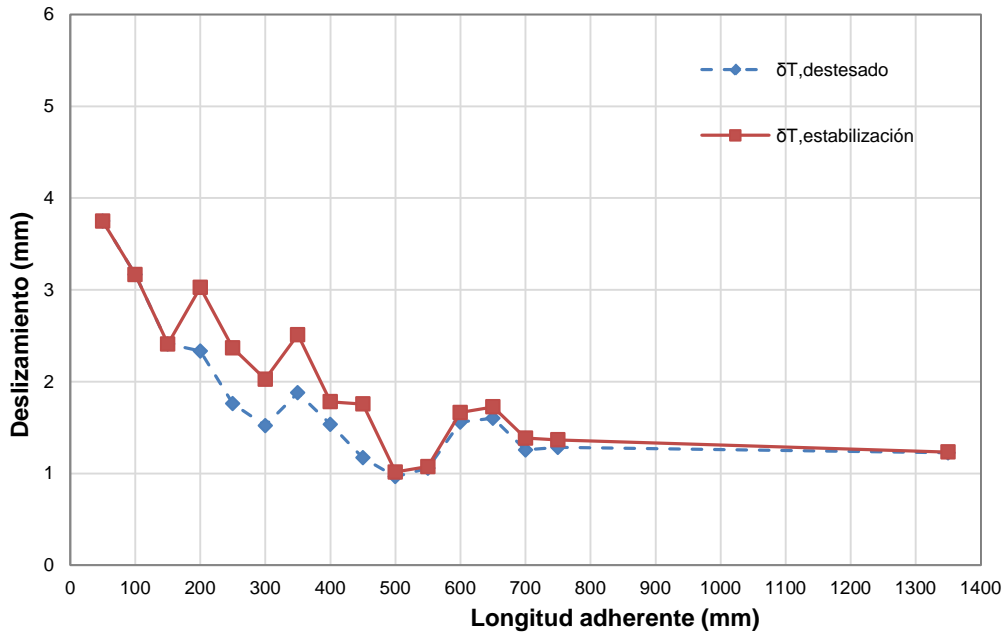


Figura B-2.1. Longitud de transmisión inicial por el método del deslizamiento en el extremo libre. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HT-A-80-24.

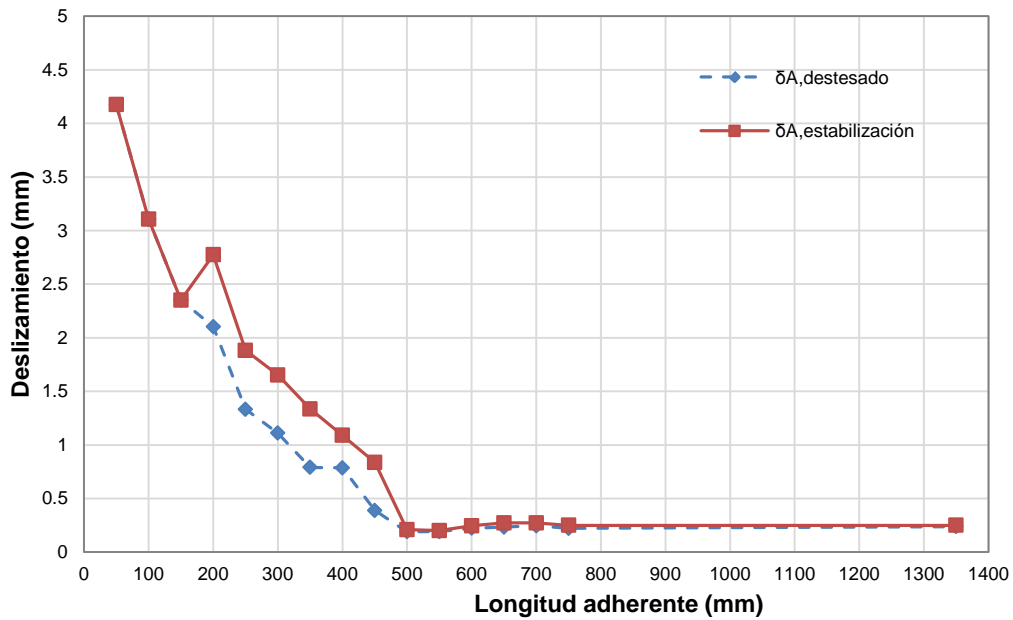


Figura B-2.2. Longitud de transmisión inicial por el método del deslizamiento en el extremo de arrancamiento. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HT-A-80-24.

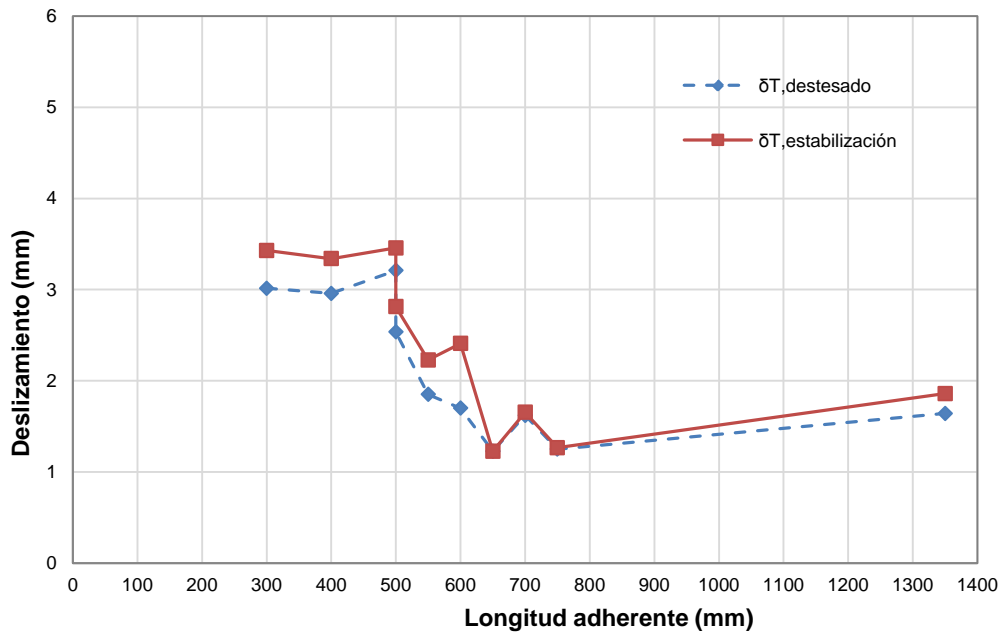


Figura B-3.1. Longitud de transmisión inicial por el método del deslizamiento en el extremo libre. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HT-A-100-12.

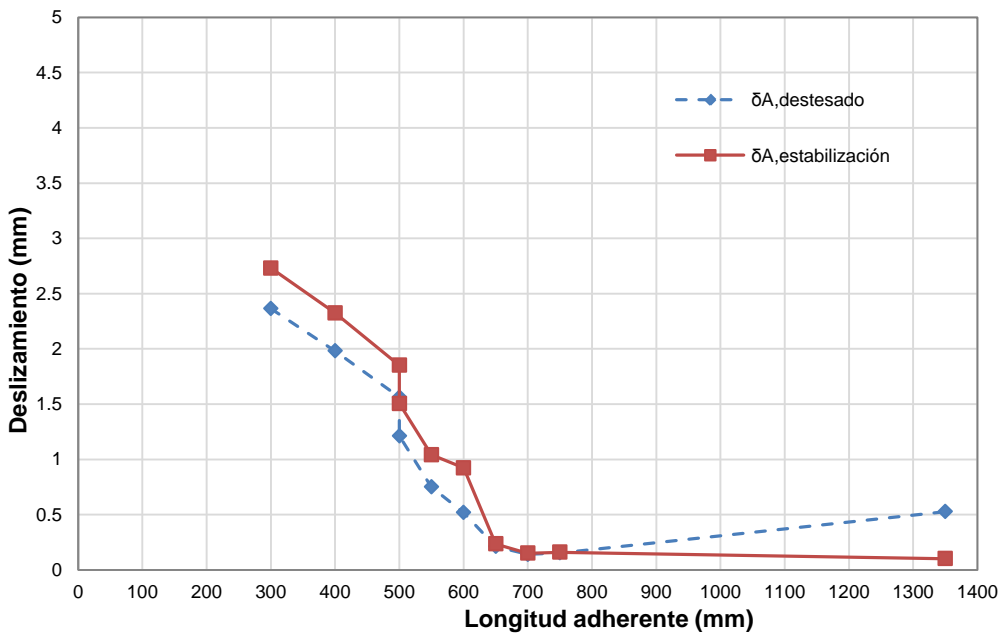


Figura B-3.2. Longitud de transmisión inicial por el método del deslizamiento en el extremo de arrancamiento. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HT-A-100-12.

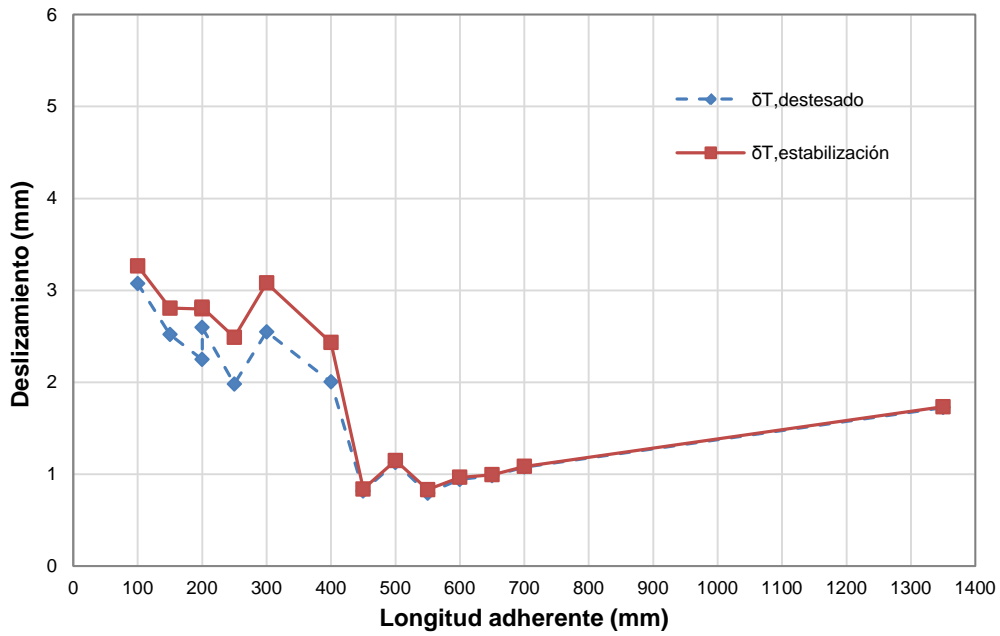


Figura B-4.1. Longitud de transmisión inicial por el método del deslizamiento en el extremo libre. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HT-A-100-24.

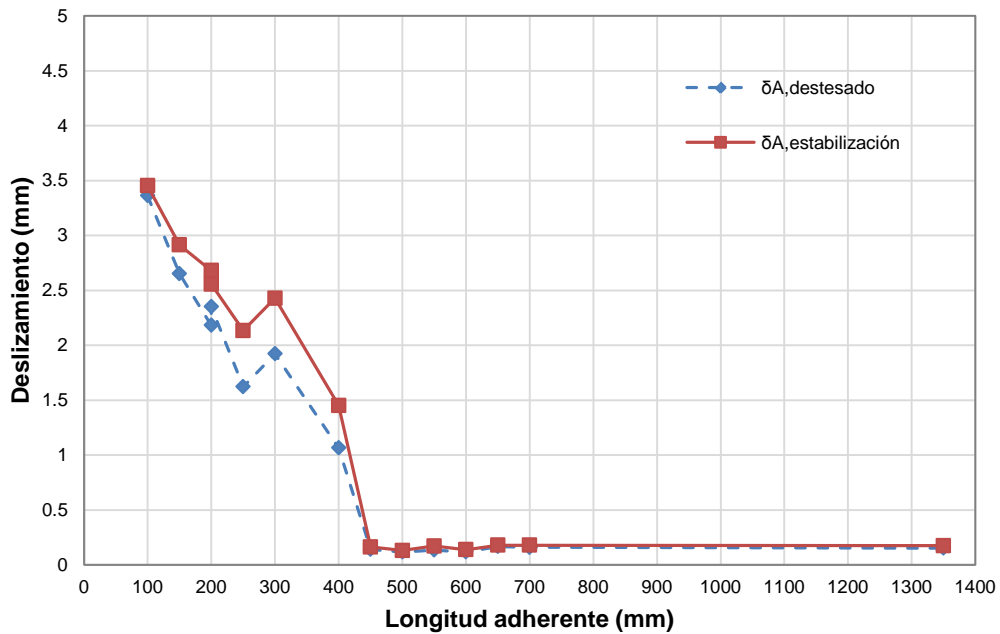
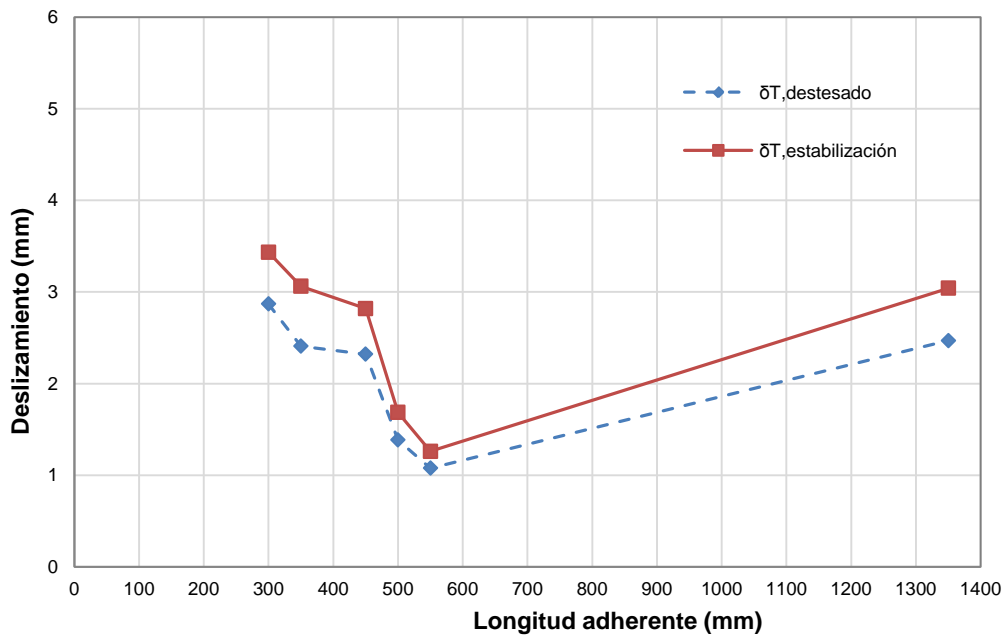
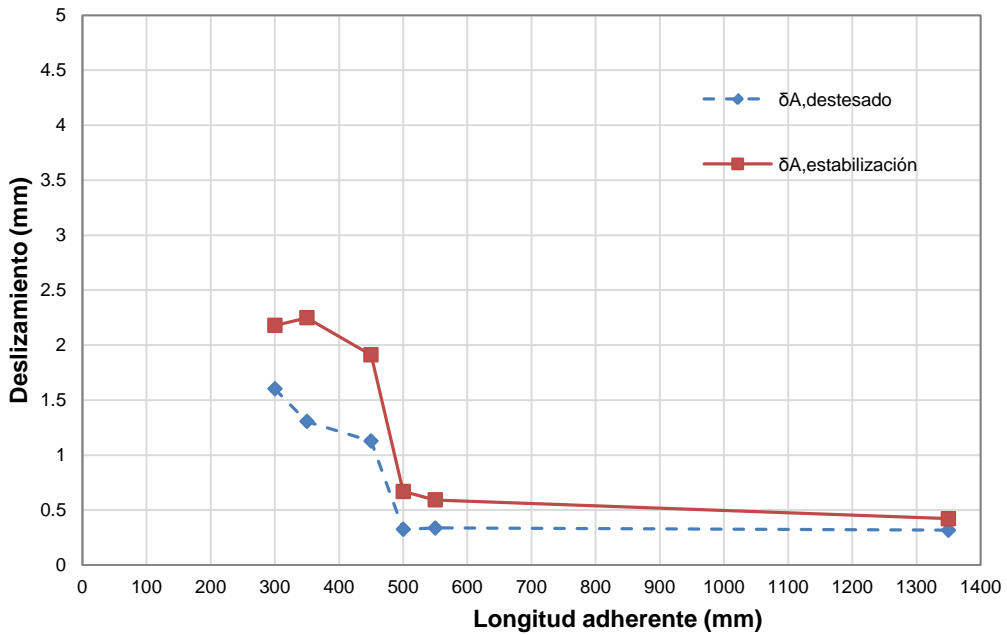


Figura B-4.2. Longitud de transmisión inicial por el método del deslizamiento en el extremo de arrancamiento. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HT-A-100-24.





**Figura B-5.1.** Longitud de transmisión inicial por el método del deslizamiento en el extremo libre. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HT-B-60-48.



**Figura B-5.2.** Longitud de transmisión inicial por el método del deslizamiento en el extremo de arrancamiento. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HT-B-60-48.

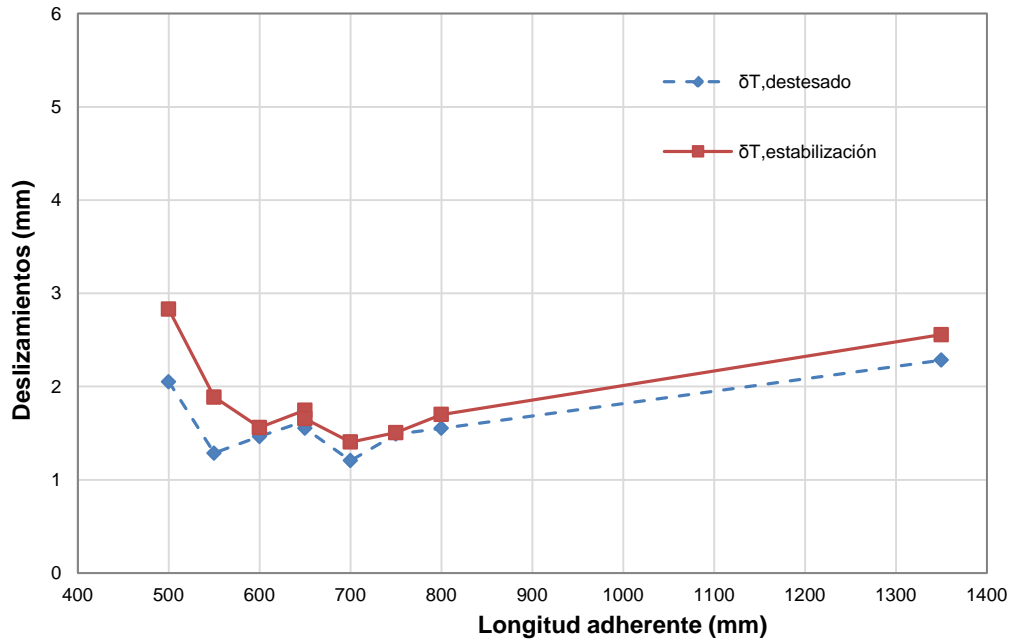


Figura B-6.1. Longitud de transmisión inicial por el método del deslizamiento en el extremo libre. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HT-B-80-24.

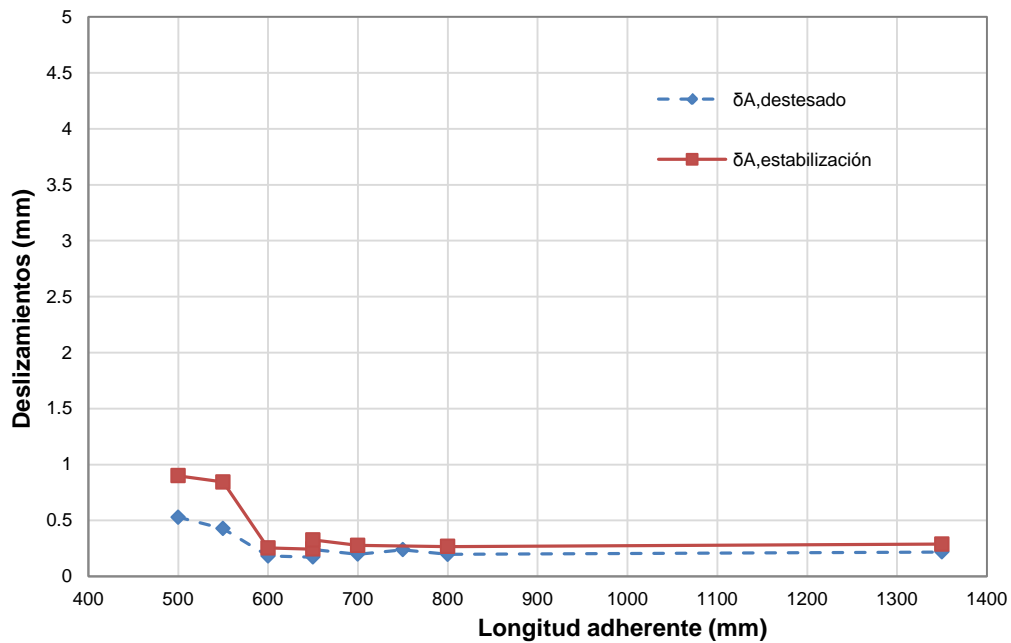


Figura B-6.2. Longitud de transmisión inicial por el método del deslizamiento en el extremo de arrancamiento. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HT-B-80-24.

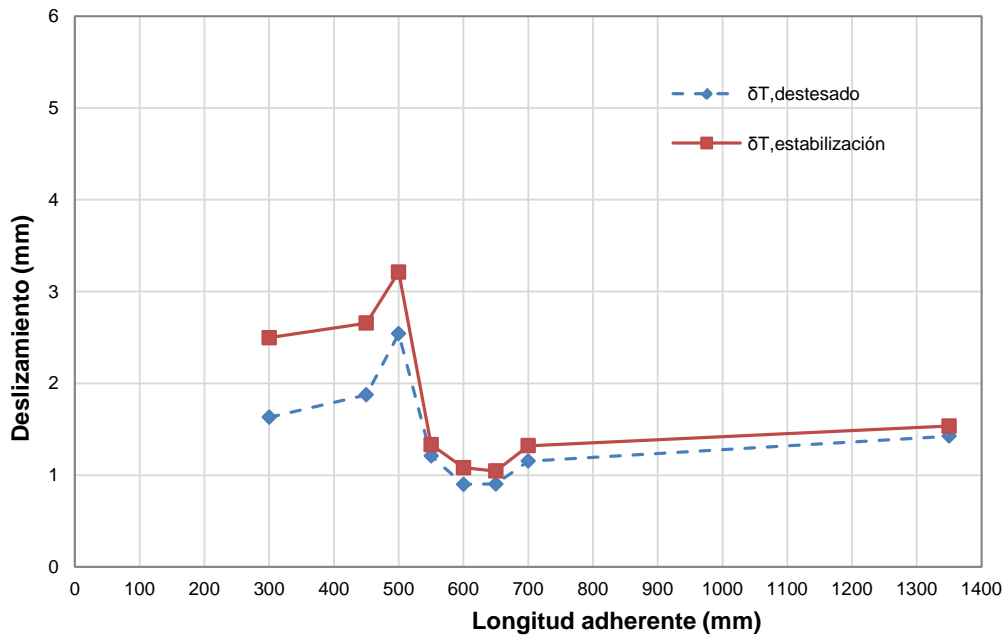


Figura B-7.1. Longitud de transmisión inicial por el método del deslizamiento en el extremo libre. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HT-B-80-48.

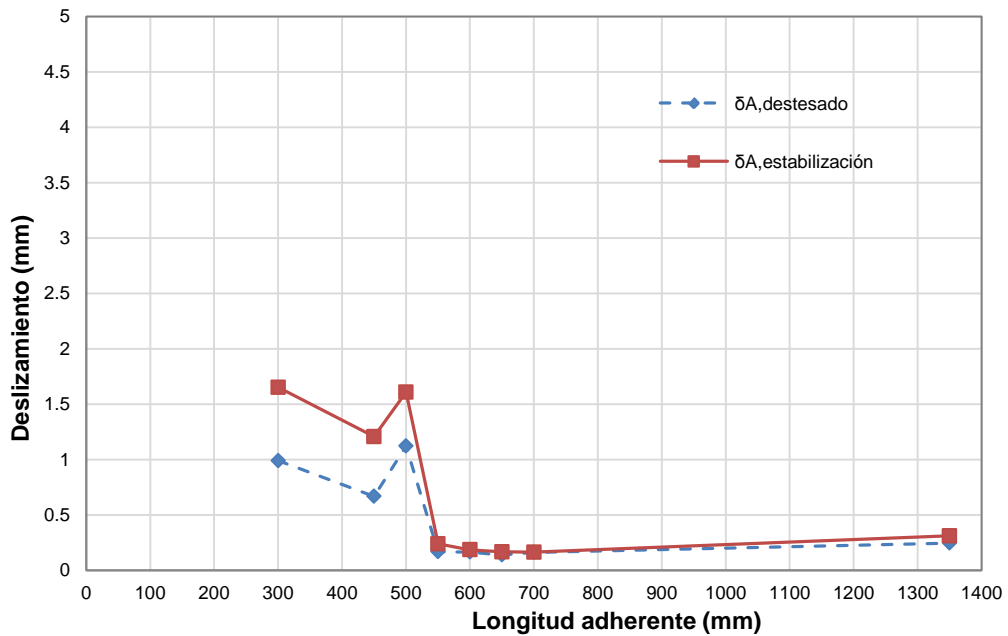


Figura B-7.2. Longitud de transmisión inicial por el método del deslizamiento en el extremo de arrancamiento. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HT-B-80-48.

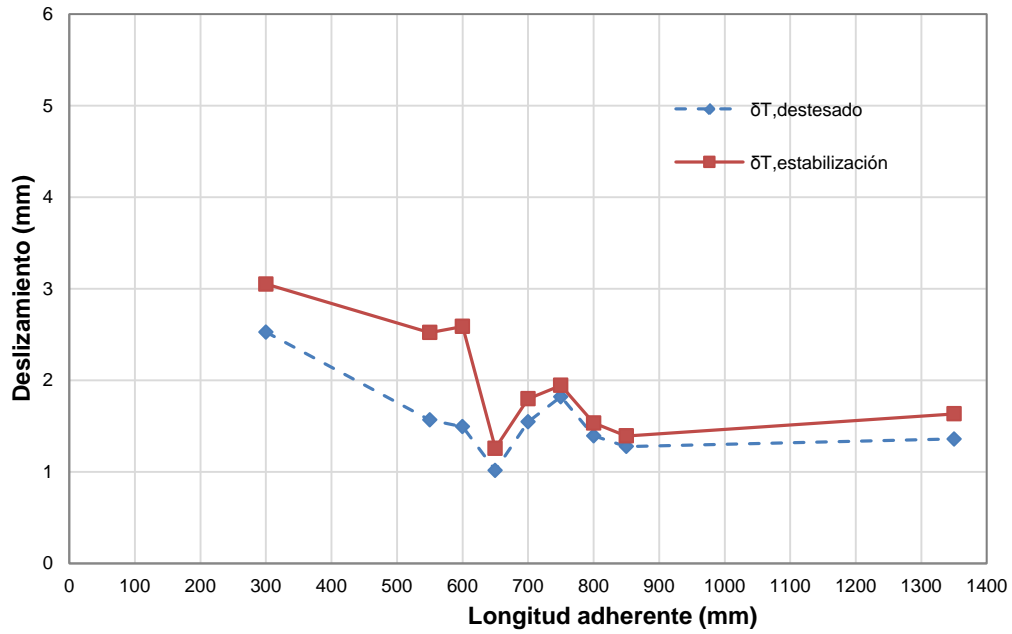


Figura B-8.1. Longitud de transmisión inicial por el método del deslizamiento en el extremo libre. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HT-B-100-24.

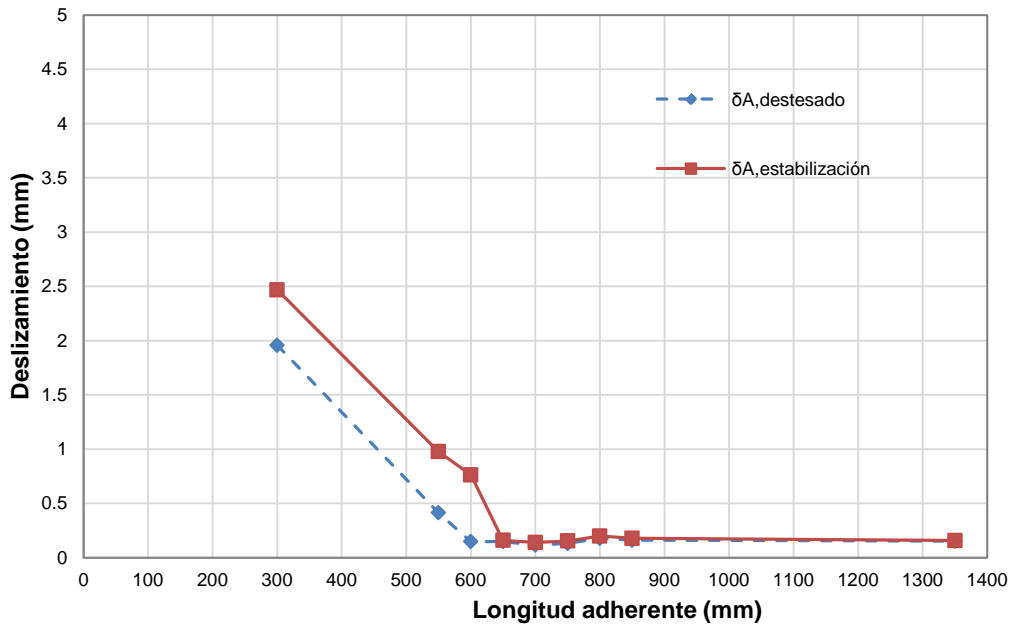


Figura B-8.2. Longitud de transmisión inicial por el método del deslizamiento en el extremo de arrancamiento. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HT-B-100-24.

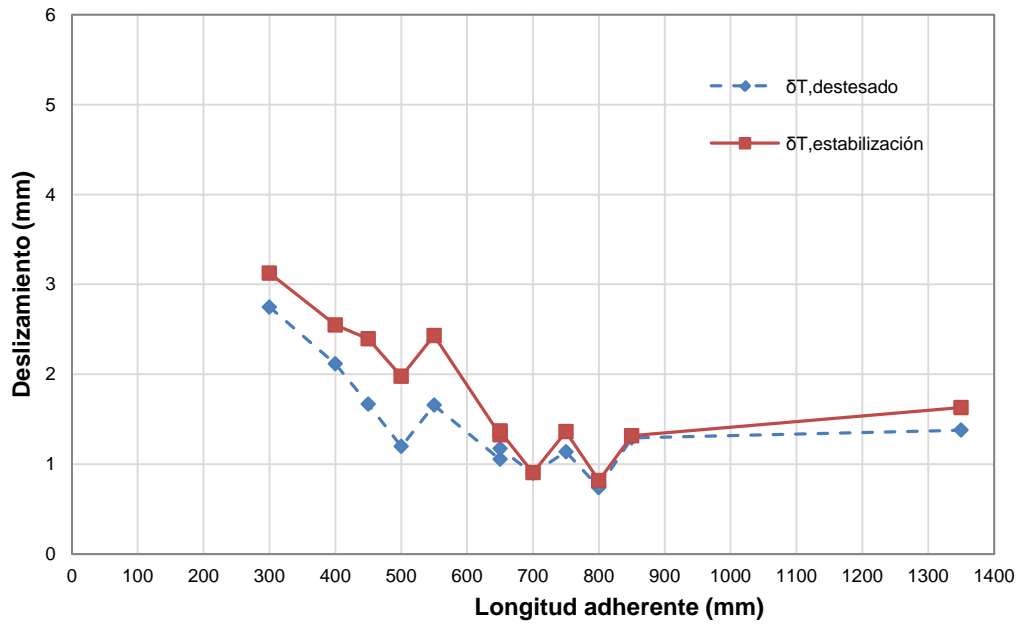


Figura B-9.1. Longitud de transmisión inicial por el método del deslizamiento en el extremo libre. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HT-B-100-48.

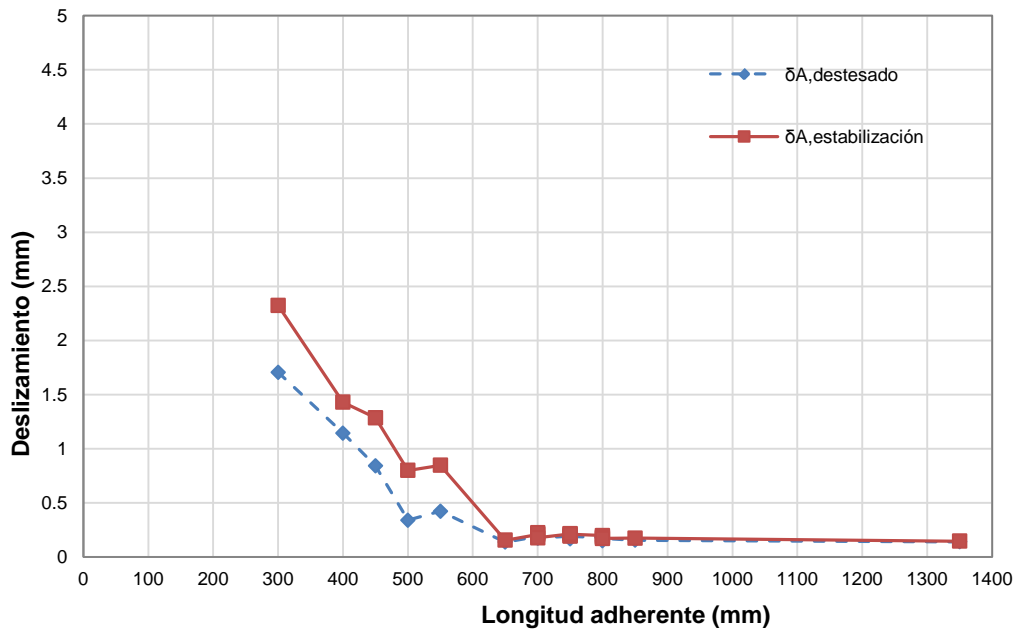


Figura B-9.2. Longitud de transmisión inicial por el método del deslizamiento en el extremo de arrancamiento. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HT-B-100-48.

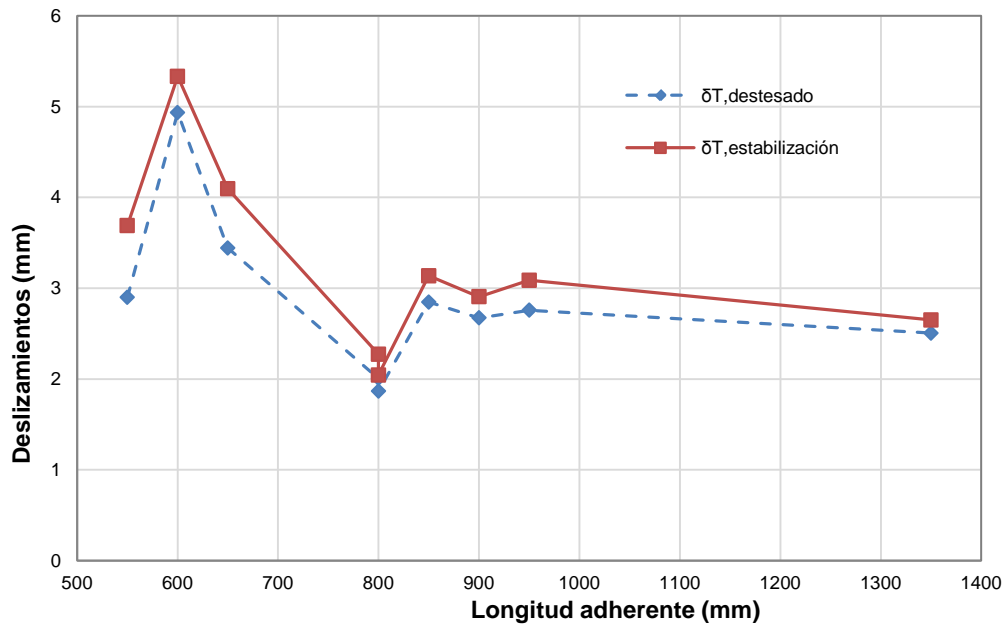


Figura B-10.1. Longitud de transmisión inicial por el método del deslizamiento en el extremo libre. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HT-C-80-48.

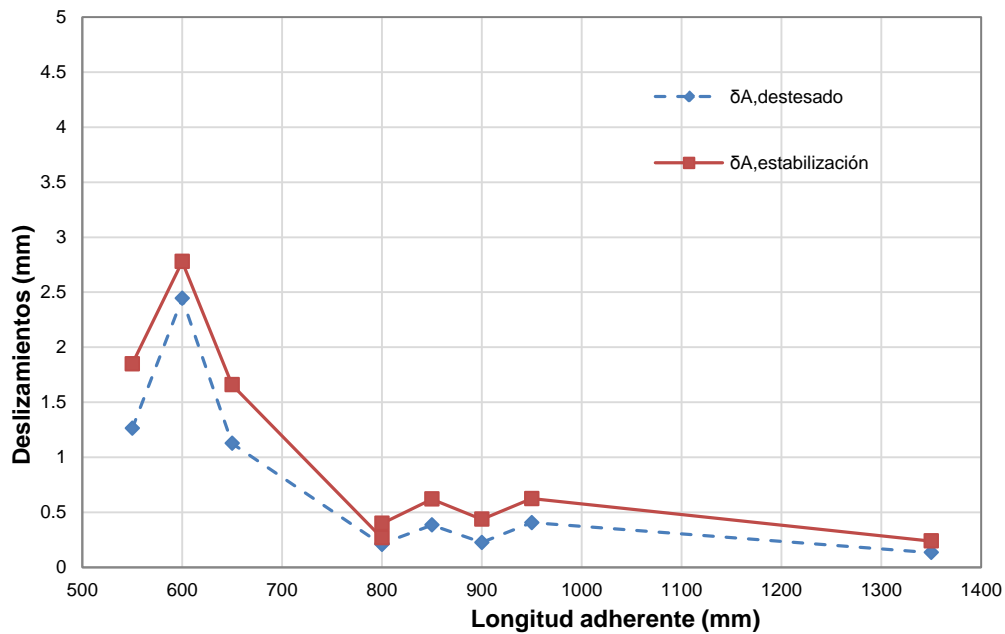


Figura B-10.2. Longitud de transmisión inicial por el método del deslizamiento en el extremo de arrancamiento. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HT-C-80-48.

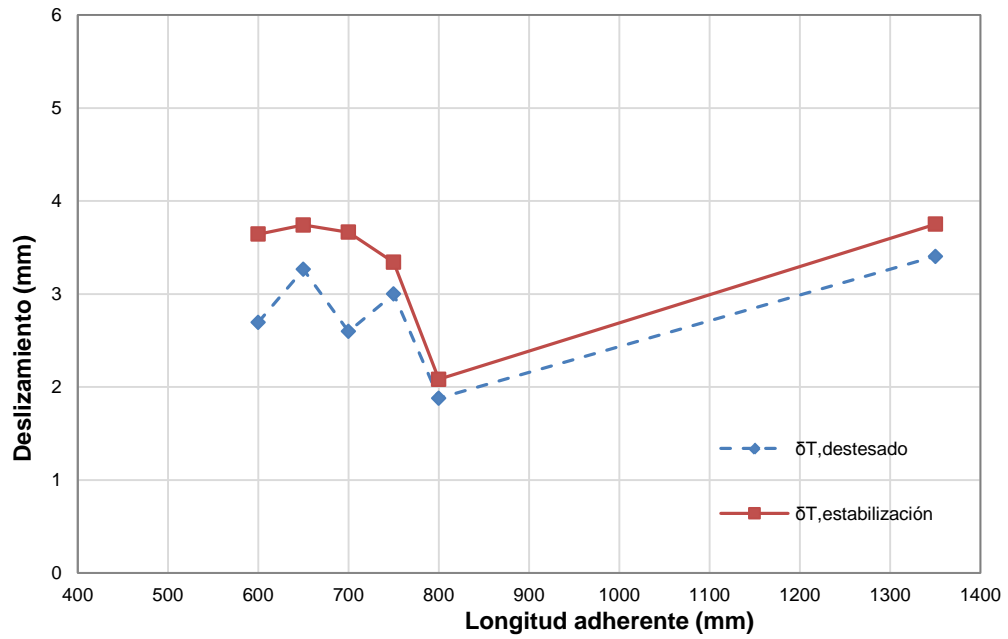


Figura B-11.1. Longitud de transmisión inicial por el método del deslizamiento en el extremo libre. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HT-C-100-24.

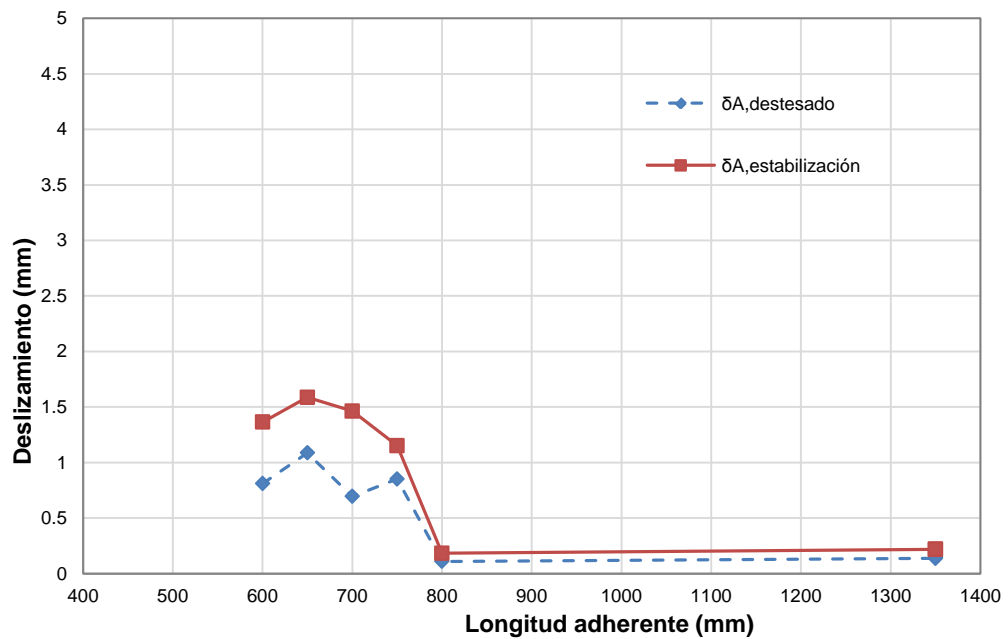


Figura B-11.2. Longitud de transmisión inicial por el método del deslizamiento en el extremo de arrancamiento. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HT-C-100-24.

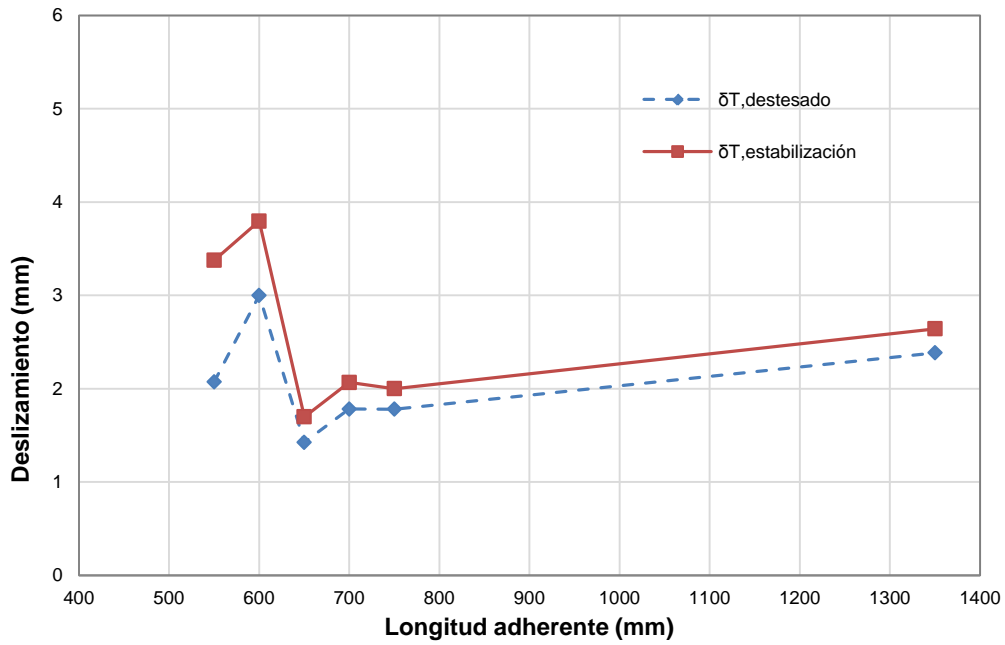


Figura B-12.1. Longitud de transmisión inicial por el método del deslizamiento en el extremo libre. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HT-C-100-48.

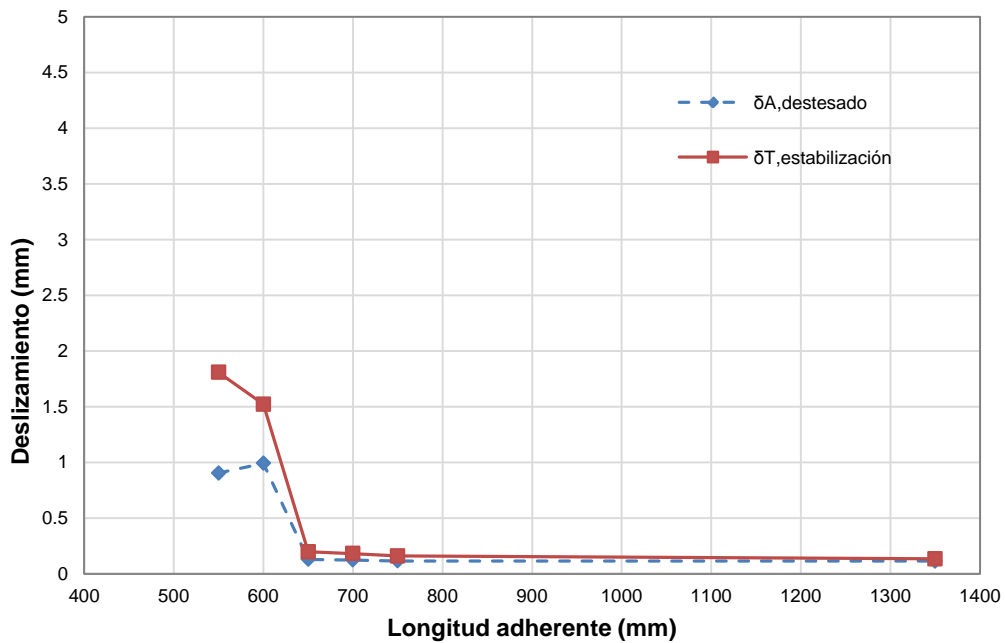
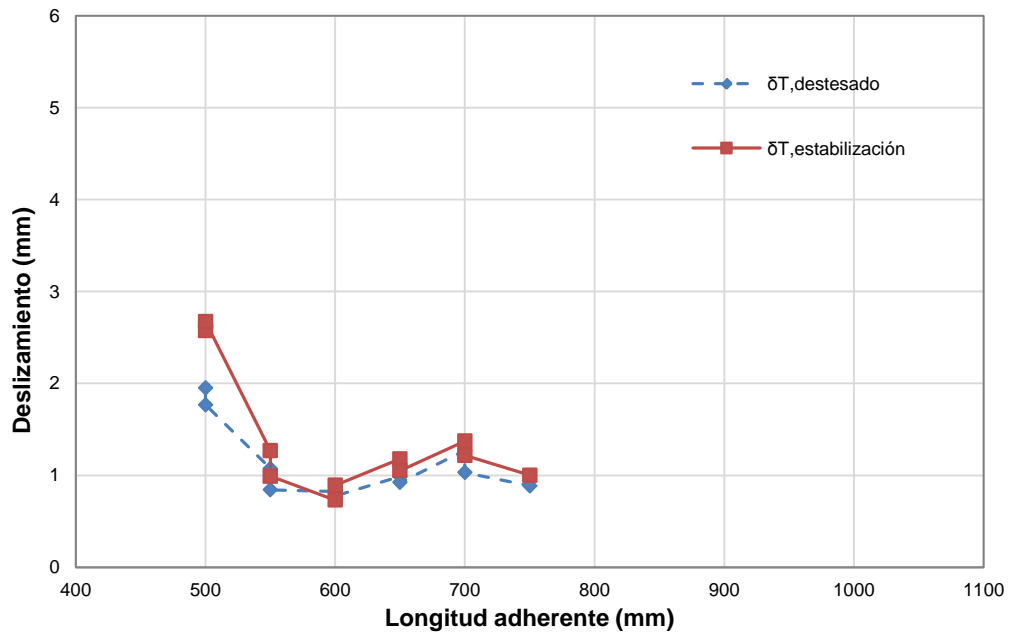
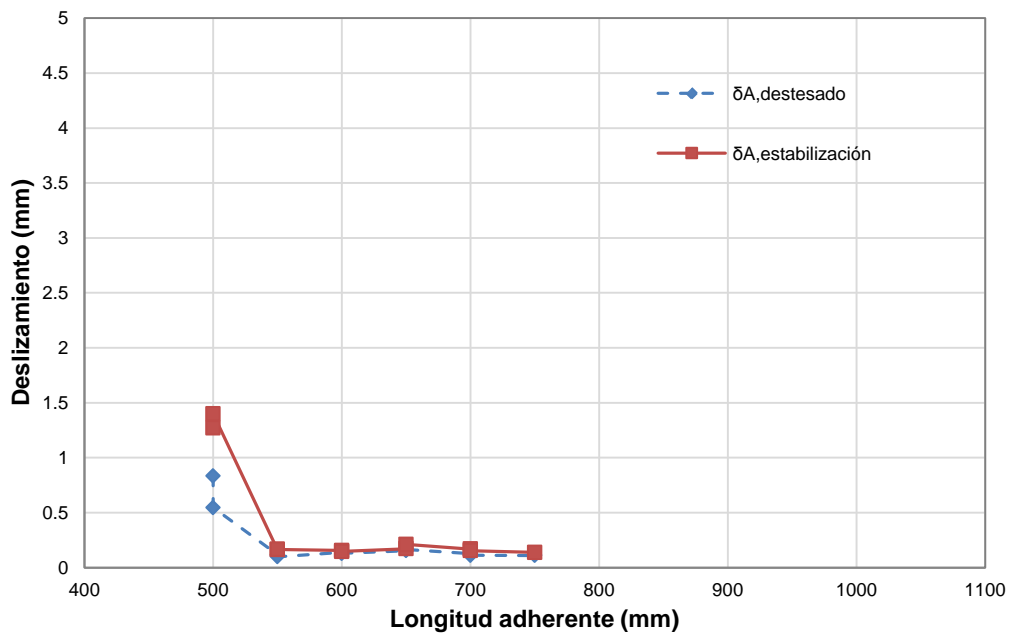


Figura B-12.2. Longitud de transmisión inicial por el método del deslizamiento en el extremo de arrancamiento. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HT-C-100-48.





**Figura B-17.1.** Longitud de transmisión inicial por el método del deslizamiento en el extremo libre. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HR-100-48.



**Figura B-17.2.** Longitud de transmisión inicial por el método del deslizamiento en el extremo de arrancamiento. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HR-100-48.

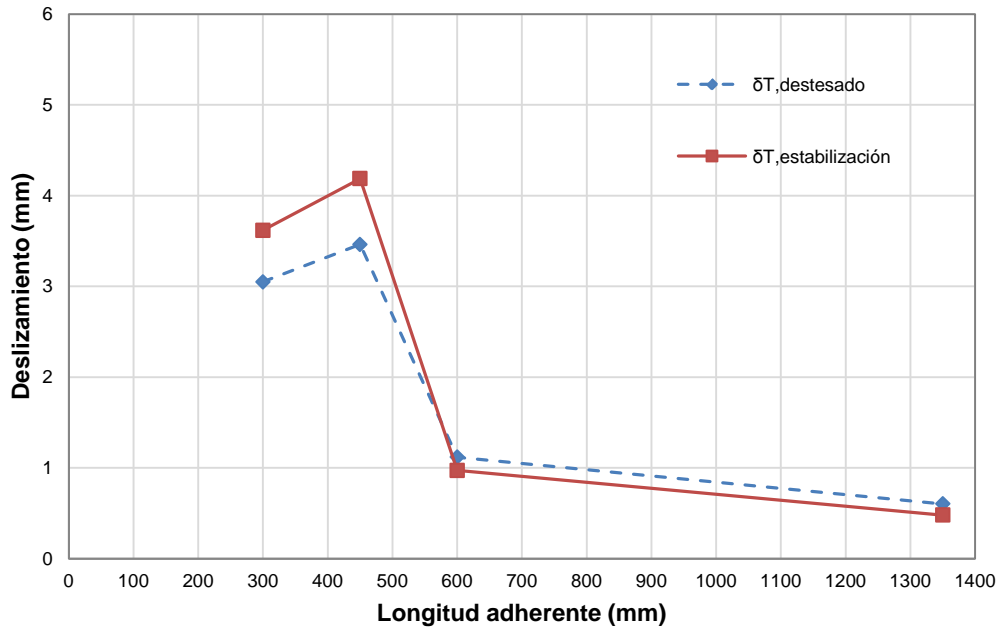


Figura B-18.1. Longitud de transmisión inicial por el método del deslizamiento en el extremo libre. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie FA-60-24.

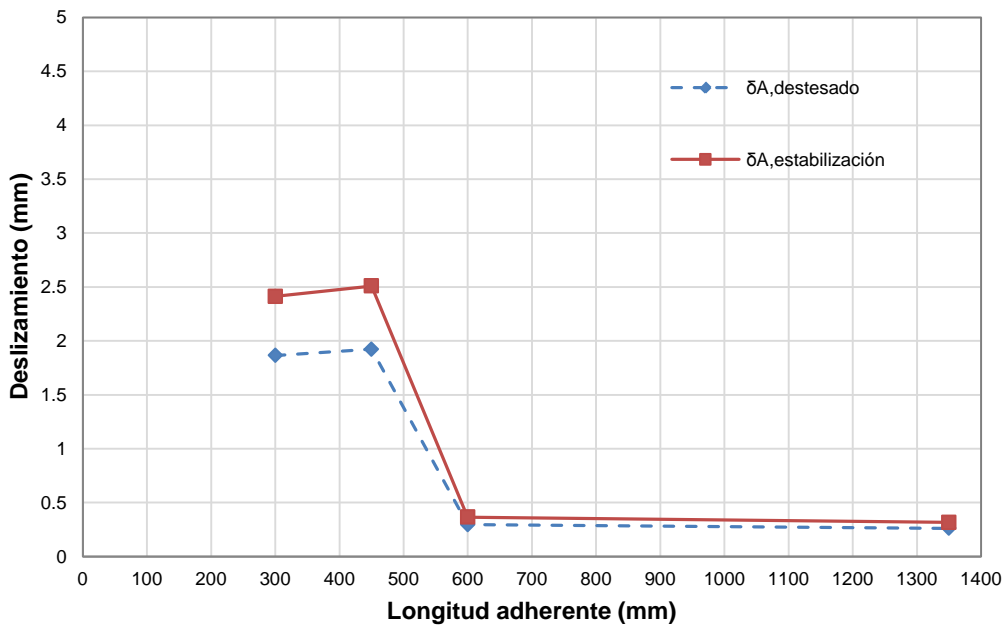


Figura B-18.2. Longitud de transmisión inicial por el método del deslizamiento en el extremo de arrancamiento. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie FA-60-24.

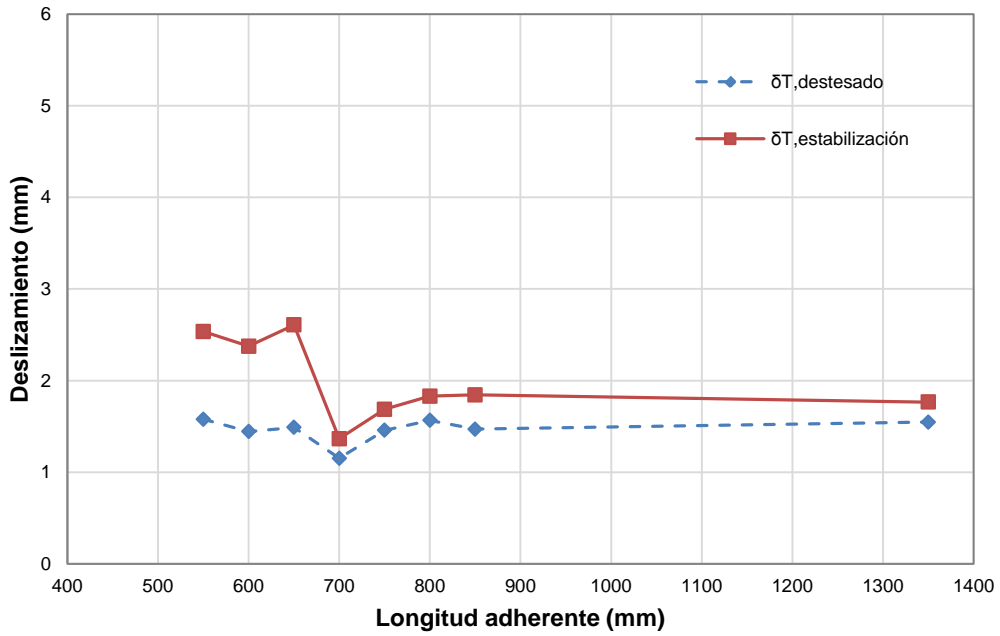


Figura B-22.1. Longitud de transmisión inicial por el método del deslizamiento en el extremo libre. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HAC-NF-100-48.

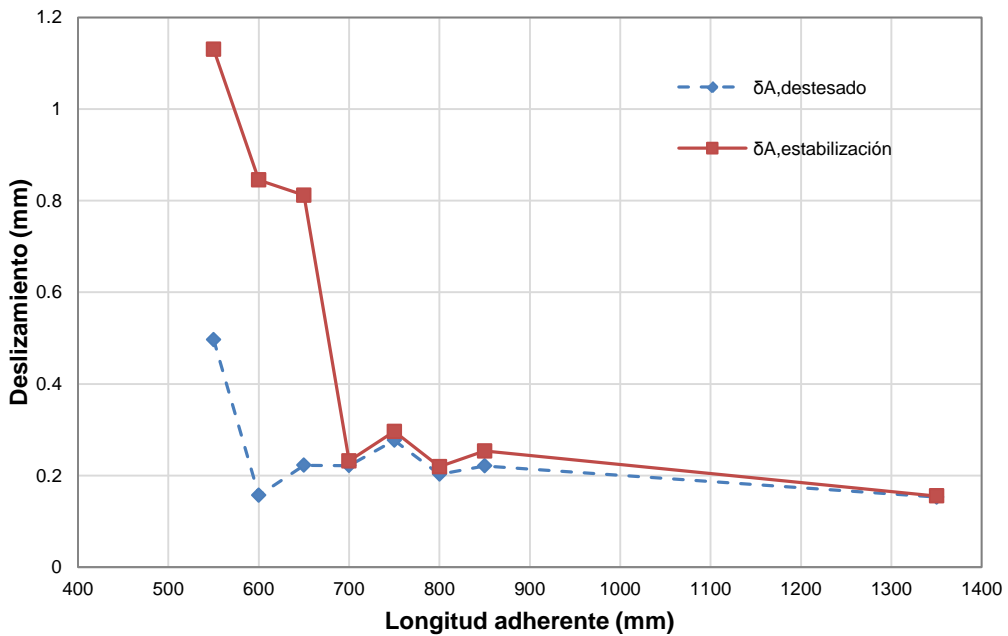


Figura B-22.2. Longitud de transmisión inicial por el método del deslizamiento en el extremo de arrancamiento. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HAC-NF-100-48.

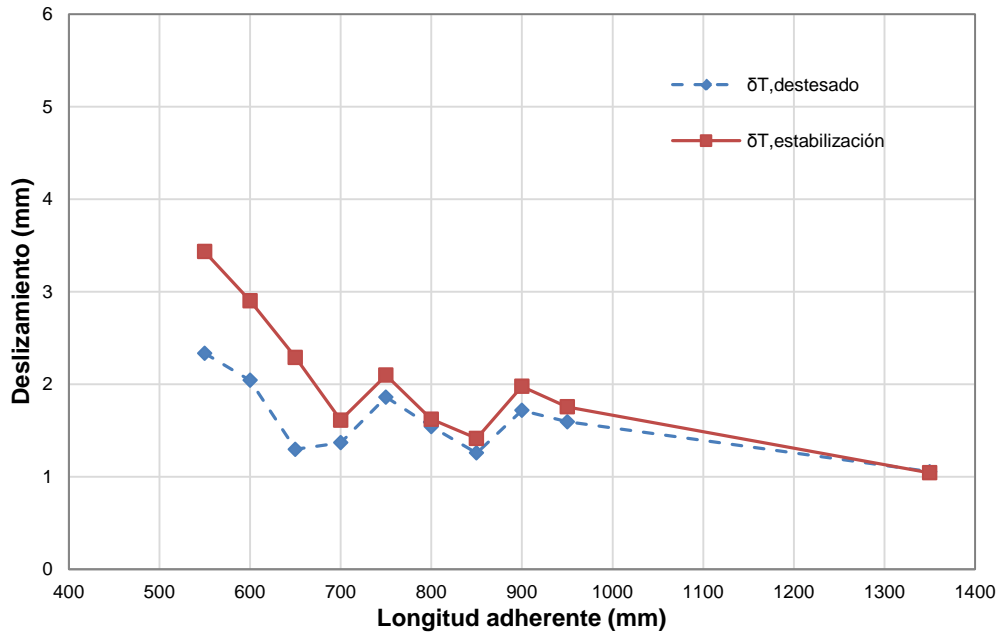


Figura B-23.1. Longitud de transmisión inicial por el método del deslizamiento en el extremo libre. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HAC-LF-100-48.

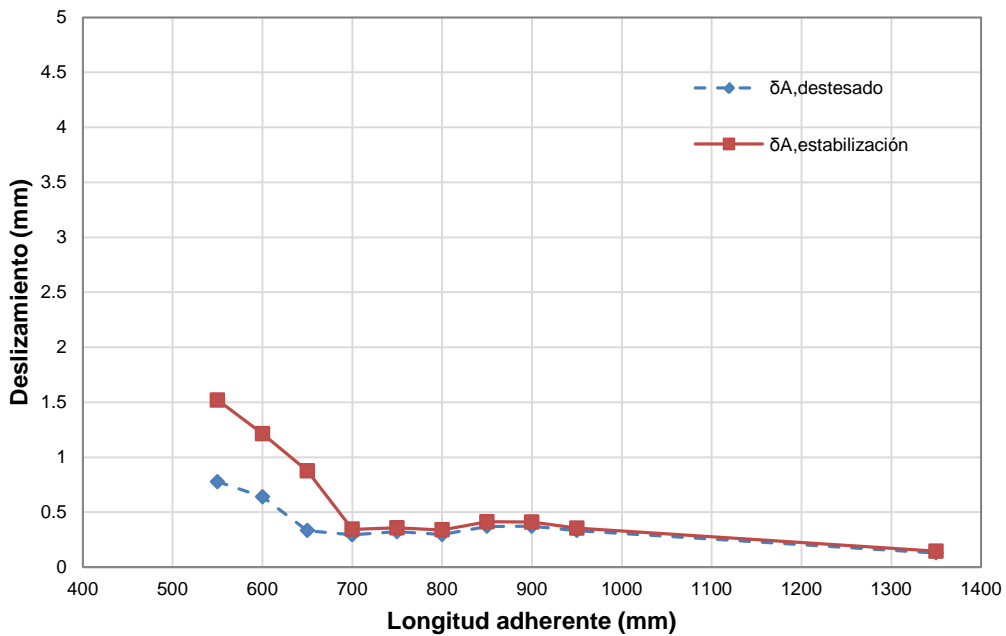


Figura B-23.2. Longitud de transmisión inicial por el método del deslizamiento en el extremo de arrancamiento. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HAC-LF-100-48.

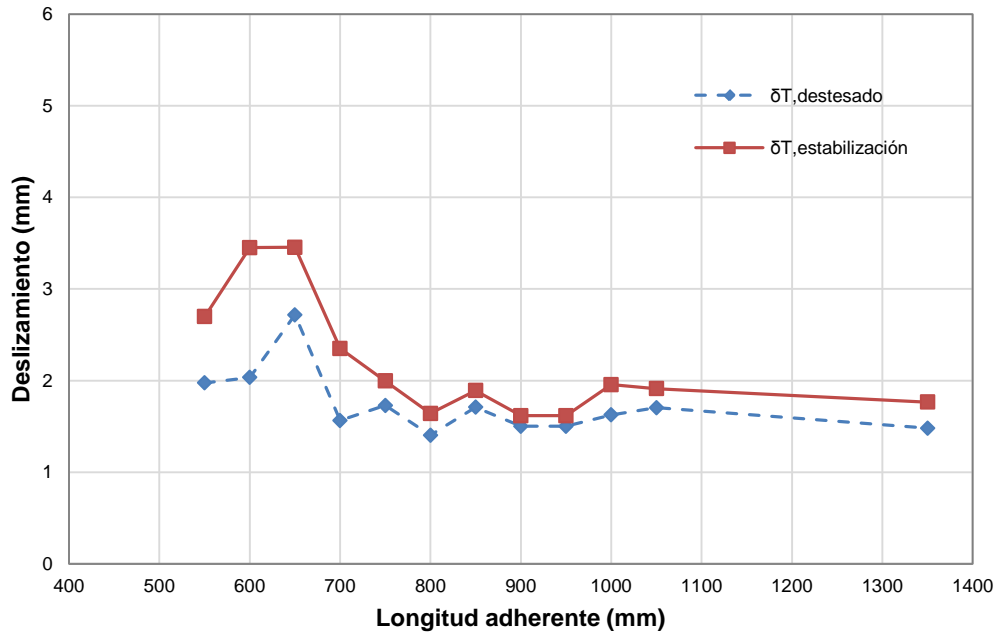


Figura B-24.1. Longitud de transmisión inicial por el método del deslizamiento en el extremo libre. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HAC-MF-100-48.

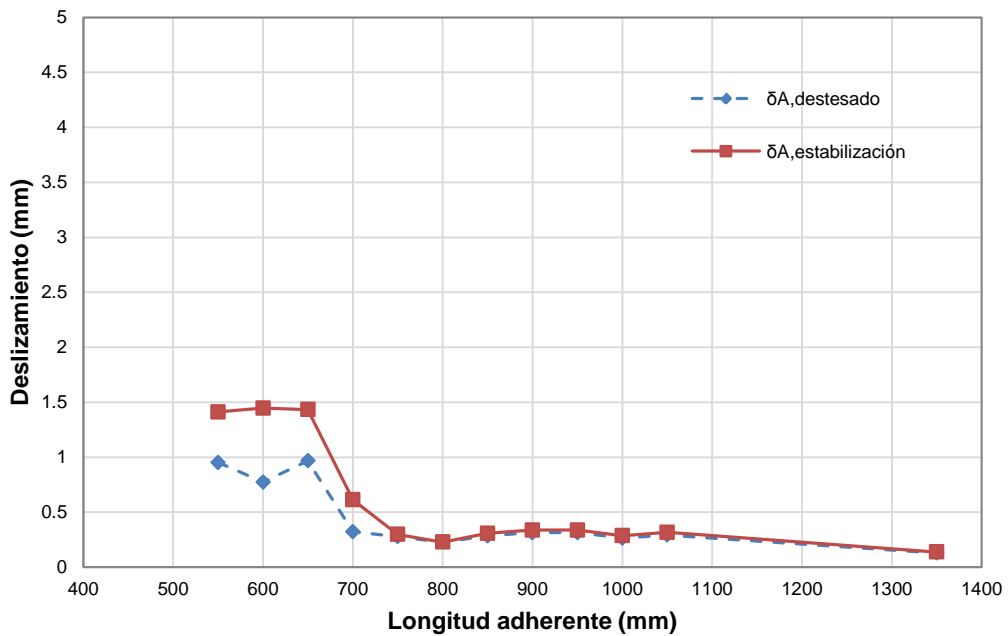


Figura B-24.2. Longitud de transmisión inicial por el método del deslizamiento en el extremo de arrancamiento. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HAC-MF-100-48.

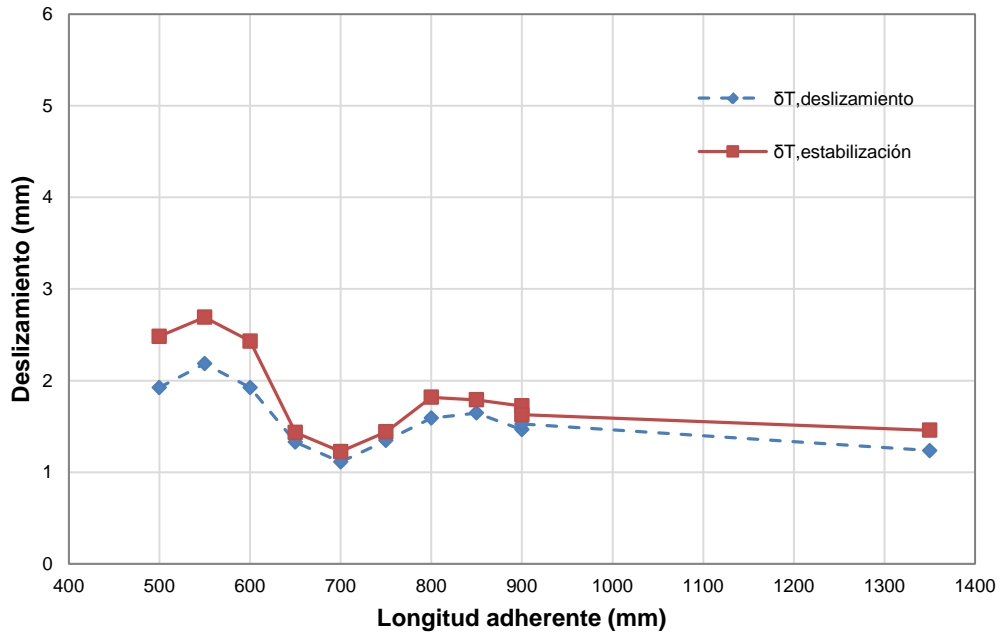


Figura B-25.1. Longitud de transmisión inicial por el método del deslizamiento en el extremo libre. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HAC-HF-100-48.

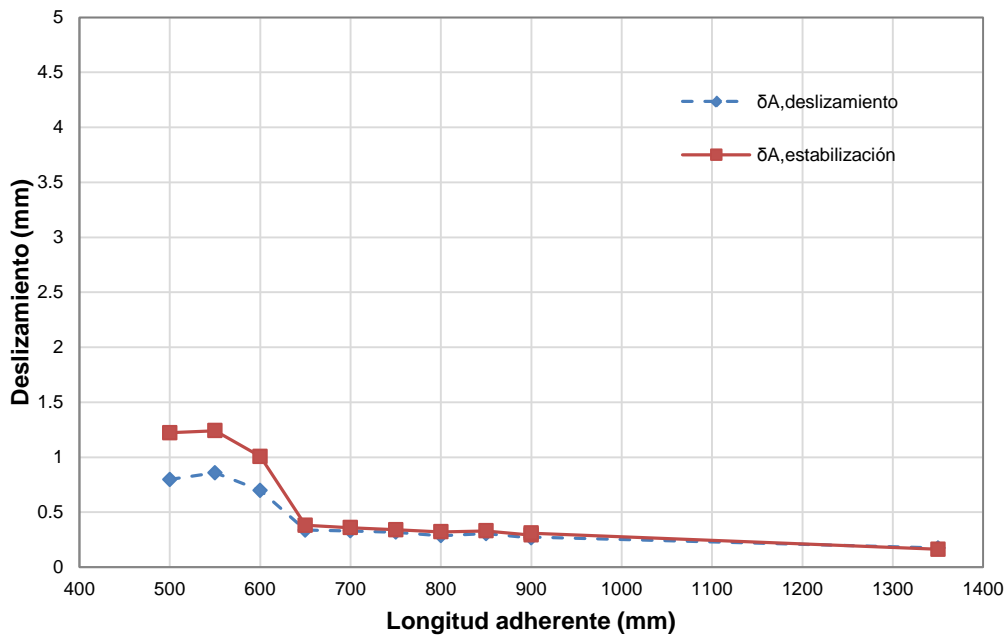
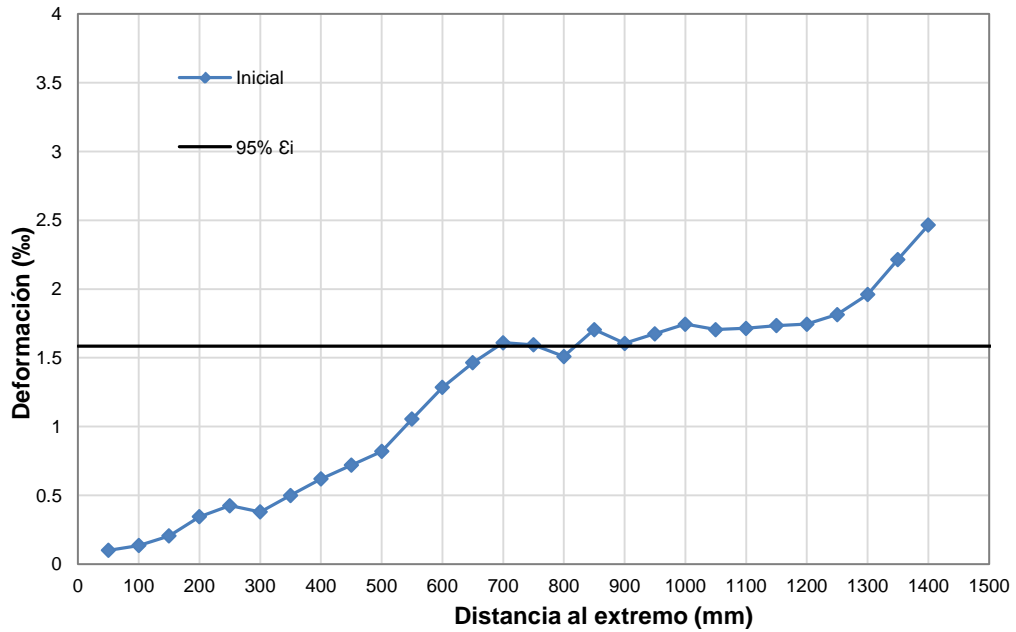
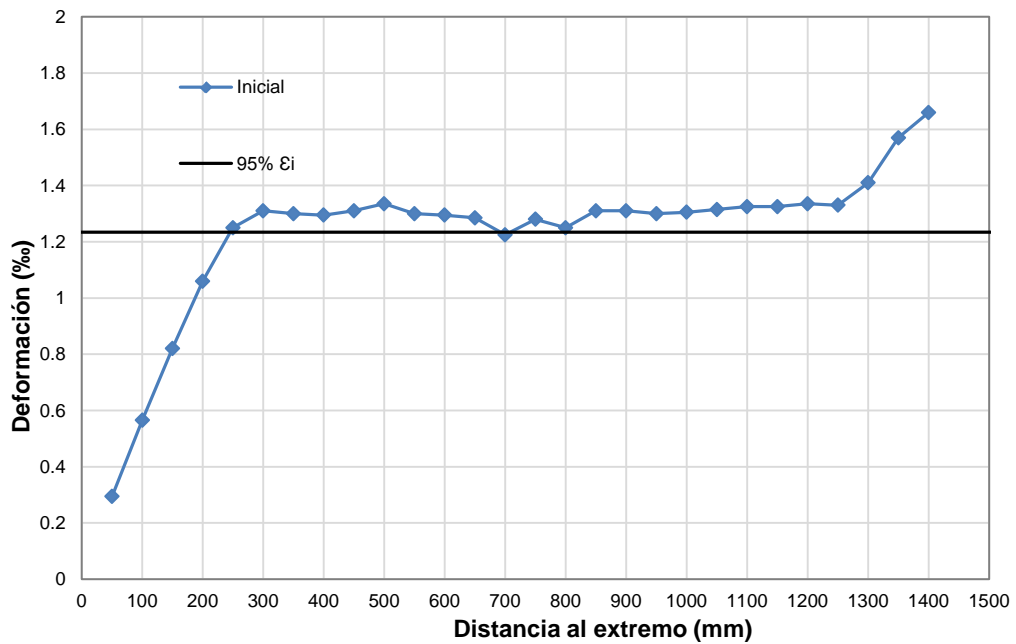


Figura B-25.2. Longitud de transmisión inicial por el método del deslizamiento en el extremo de arrancamiento. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HAC-HF-100-48.

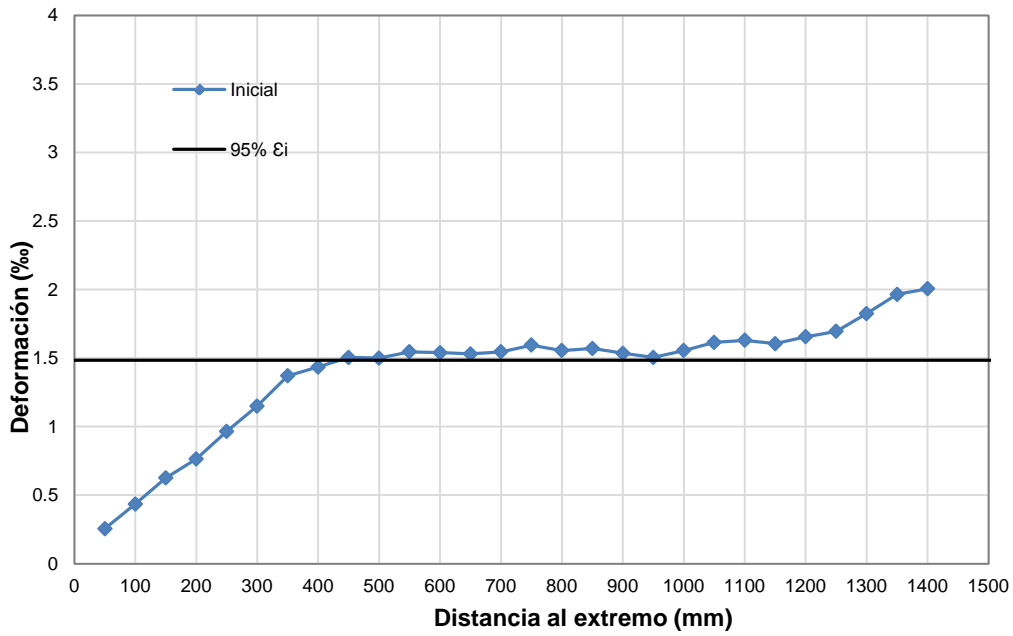
## ANEJO C. LONGITUD DE TRANSMISIÓN INICIAL. MÉTODO DE DEFORMACIONES LONGITUDINALES EN EL HORMIGÓN (95% AMS)



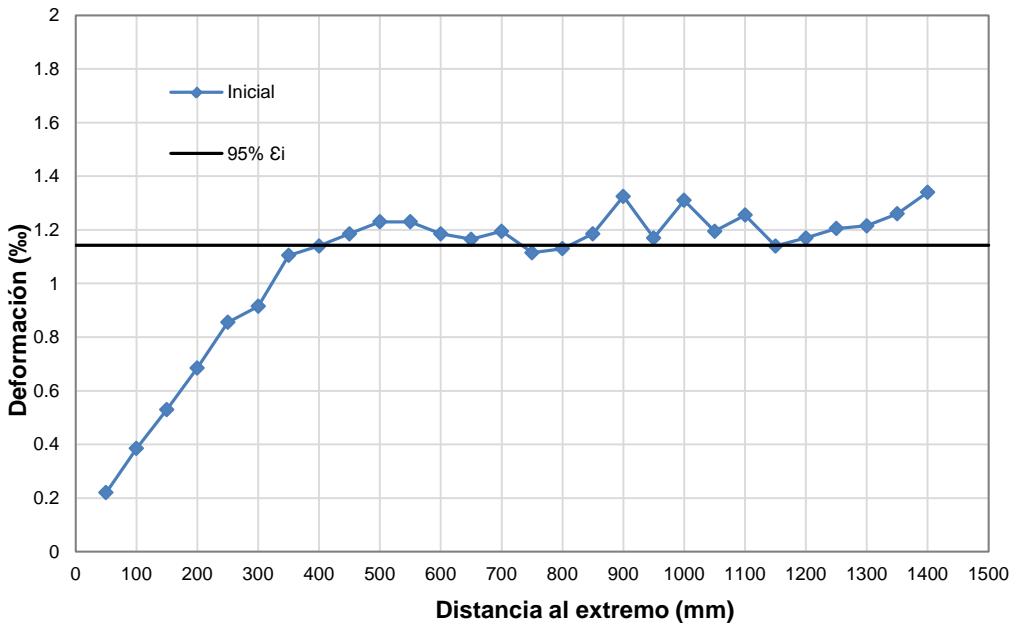
**Figura C-1.** Longitud de transmisión inicial por el método del 95% AMS.  
Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-A-60-24-LS.



**Figura C-2.** Longitud de transmisión inicial por el método del 95% AMS.  
Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-A-60-48-LS.

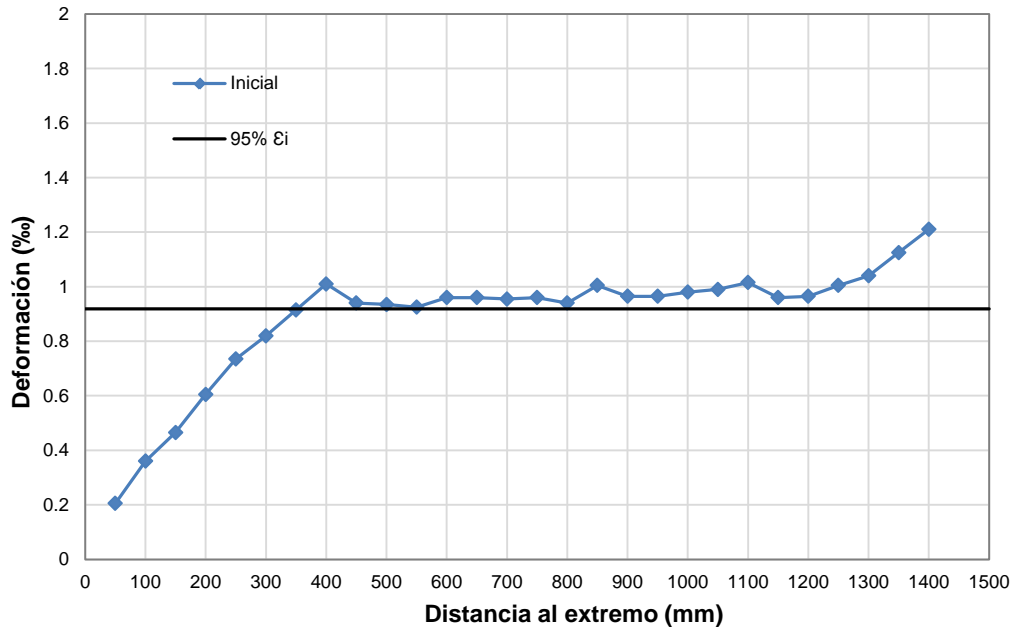


**Figura C-3.** Longitud de transmisión inicial por el método del 95% AMS. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-A-80-12-LS.

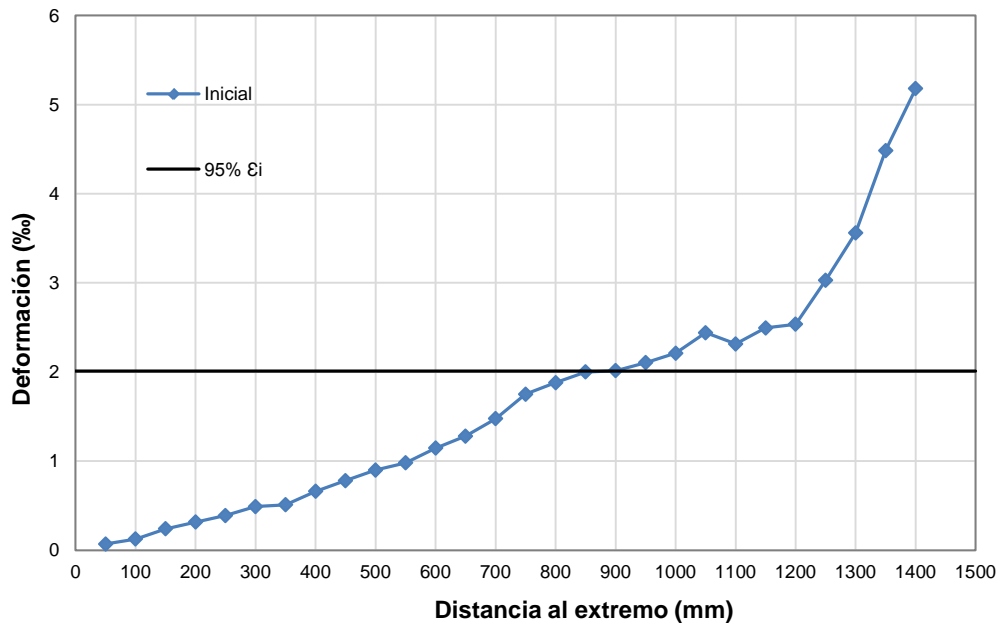


**Figura C-4.** Longitud de transmisión inicial por el método del 95% AMS. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-A-80-24-LS.

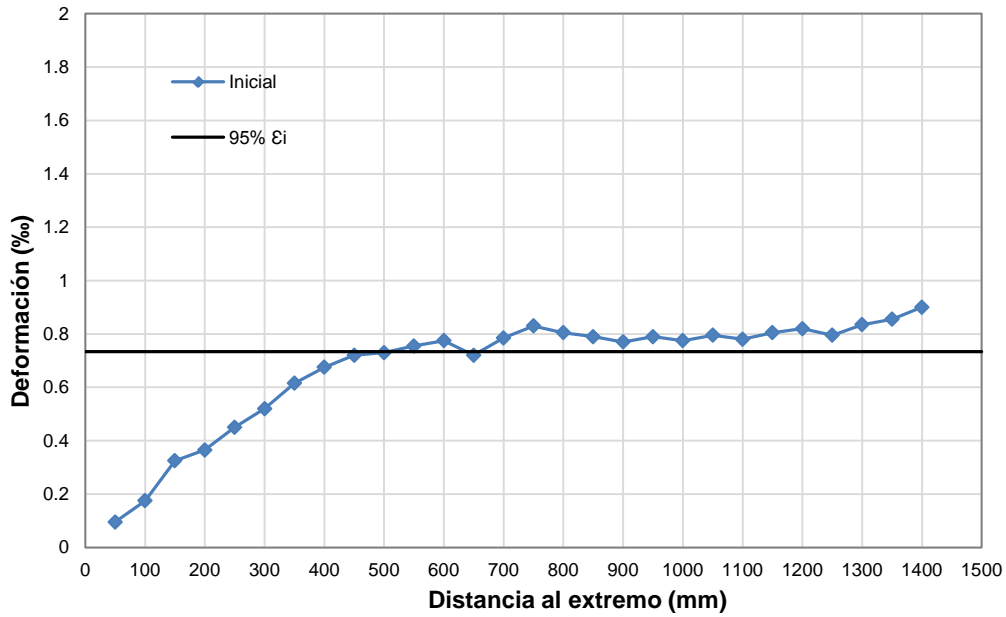




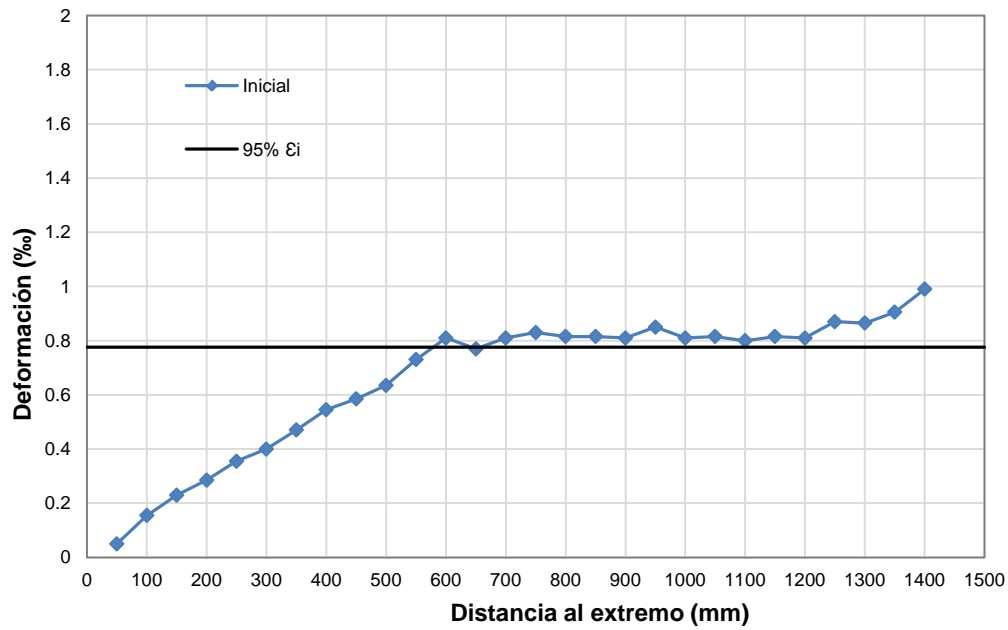
**Figura C-5.** Longitud de transmisión inicial por el método del 95% AMS.  
Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-A-80-24-LS-FA.



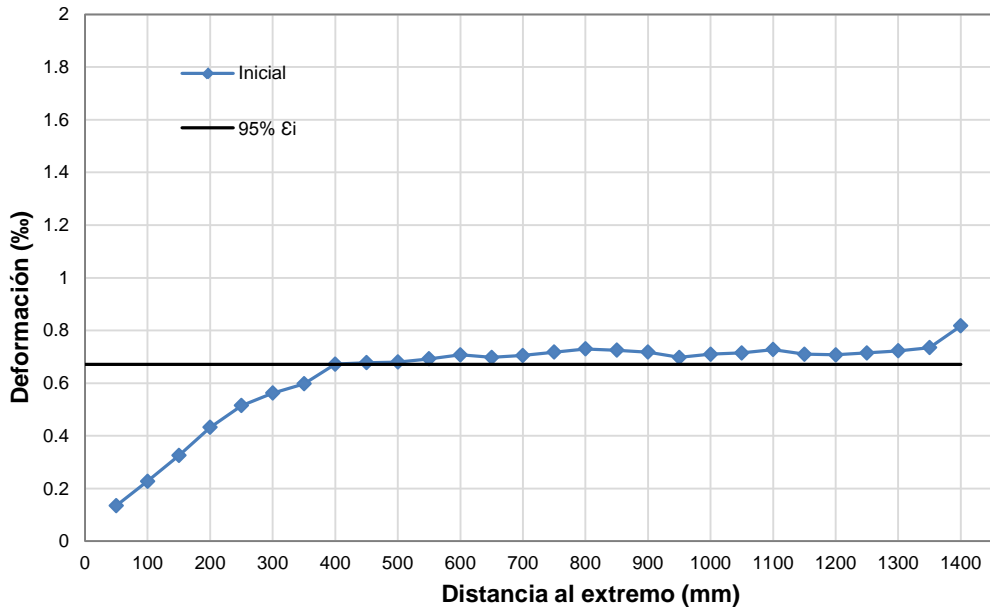
**Figura C-6.** Longitud de transmisión inicial por el método del 95% AMS.  
Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-A-100-6-LS.



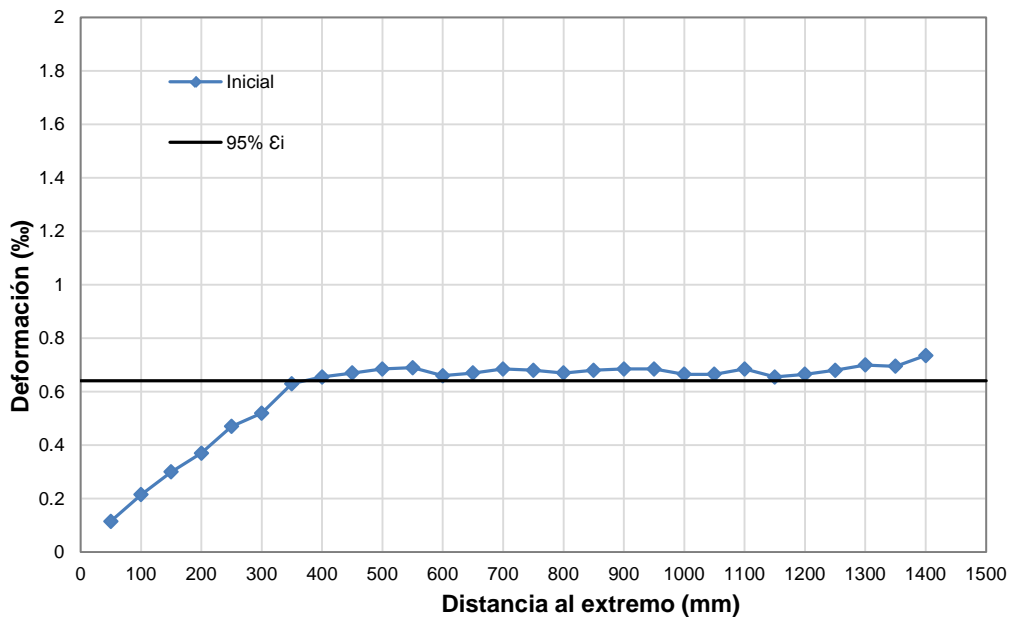
**Figura C-7.** Longitud de transmisión inicial por el método del 95% AMS. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-A-100-12-LS.



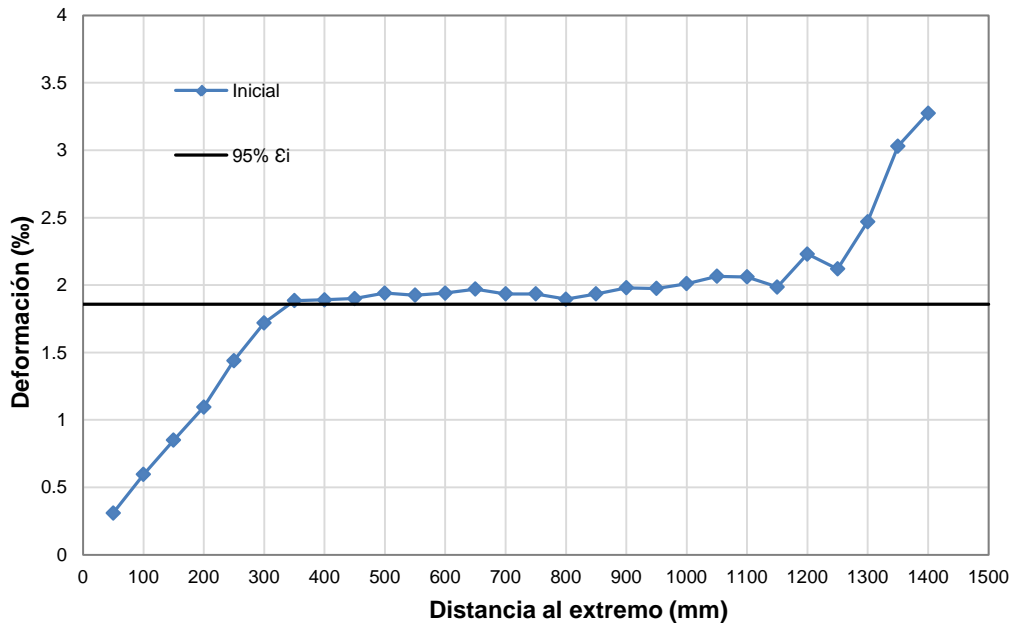
**Figura C-8.** Longitud de transmisión inicial por el método del 95% AMS. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-A-100-12-LS-FA.



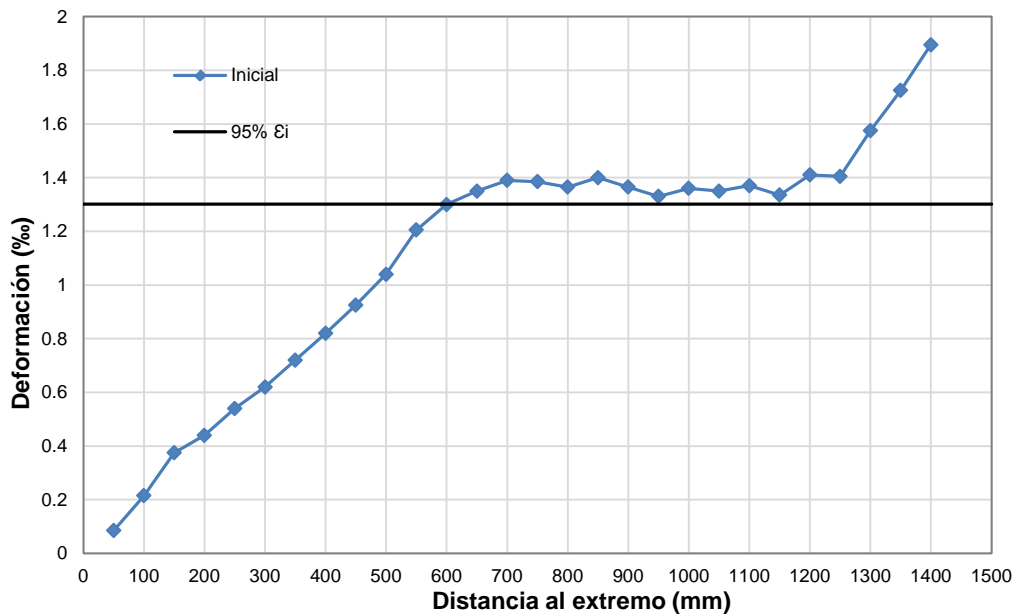
**Figura C-9.** Longitud de transmisión inicial por el método del 95% AMS.  
Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-A-100-24-LS.



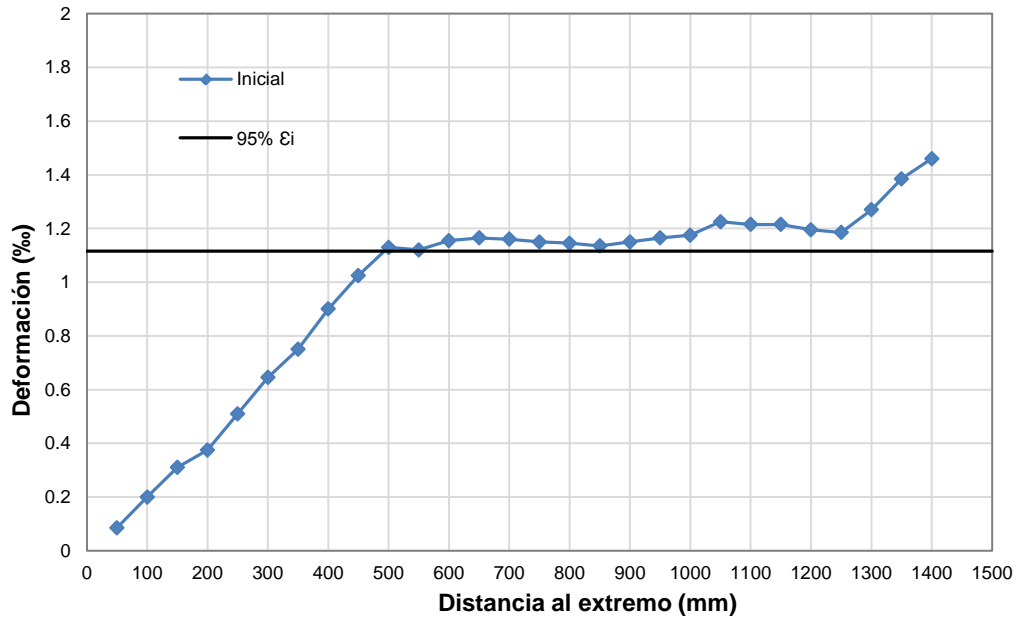
**Figura C-10.** Longitud de transmisión inicial por el método del 95% AMS.  
Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-A-100-24-LS-FA.



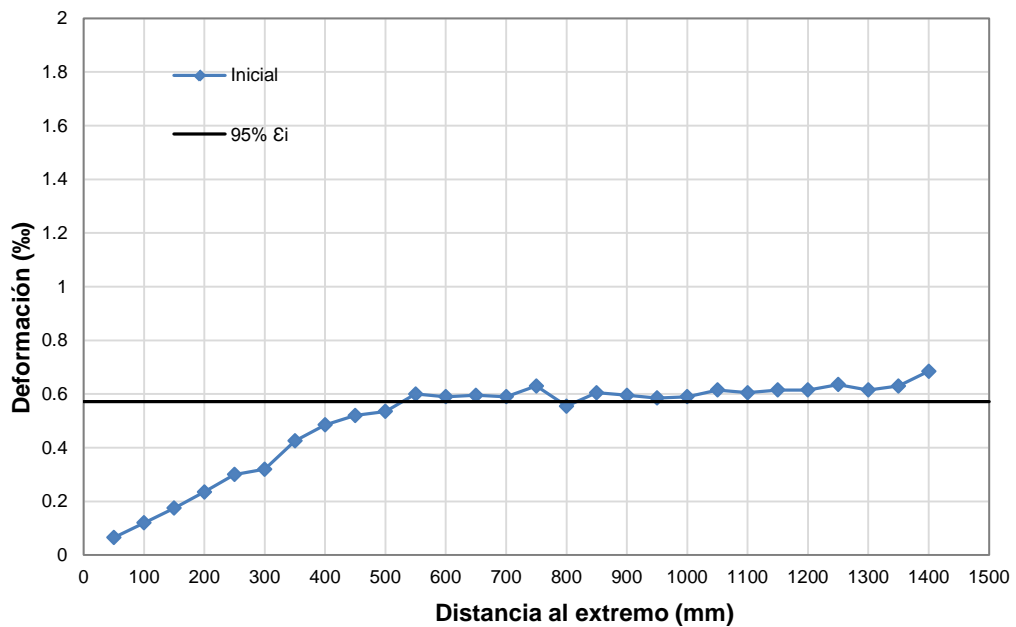
**Figura C-11.** Longitud de transmisión inicial por el método del 95% AMS. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-B-60-48-LS.



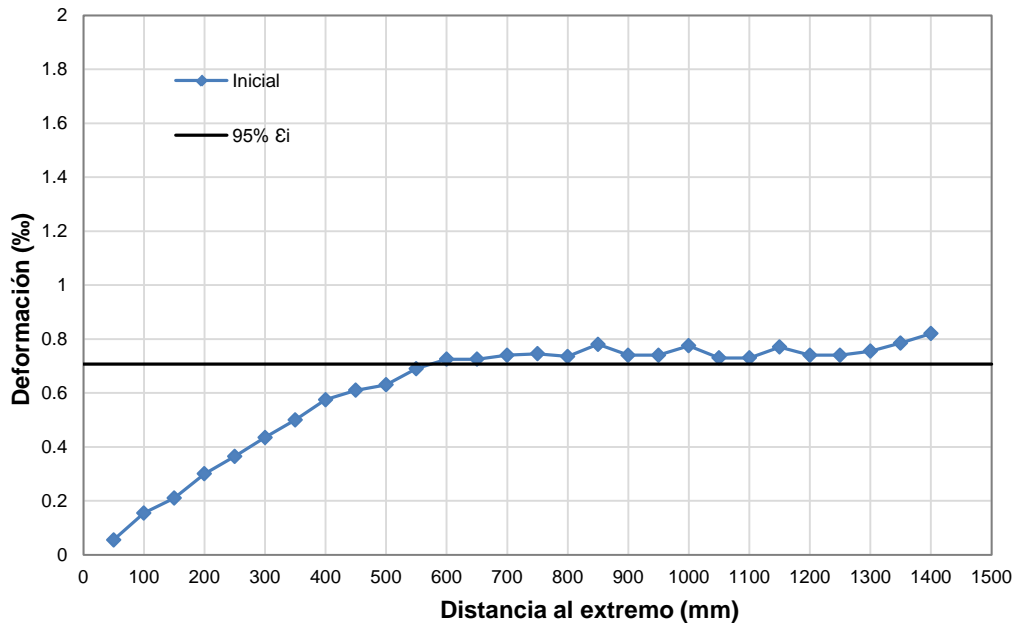
**Figura C-12.** Longitud de transmisión inicial por el método del 95% AMS. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-B-80-24-LS.



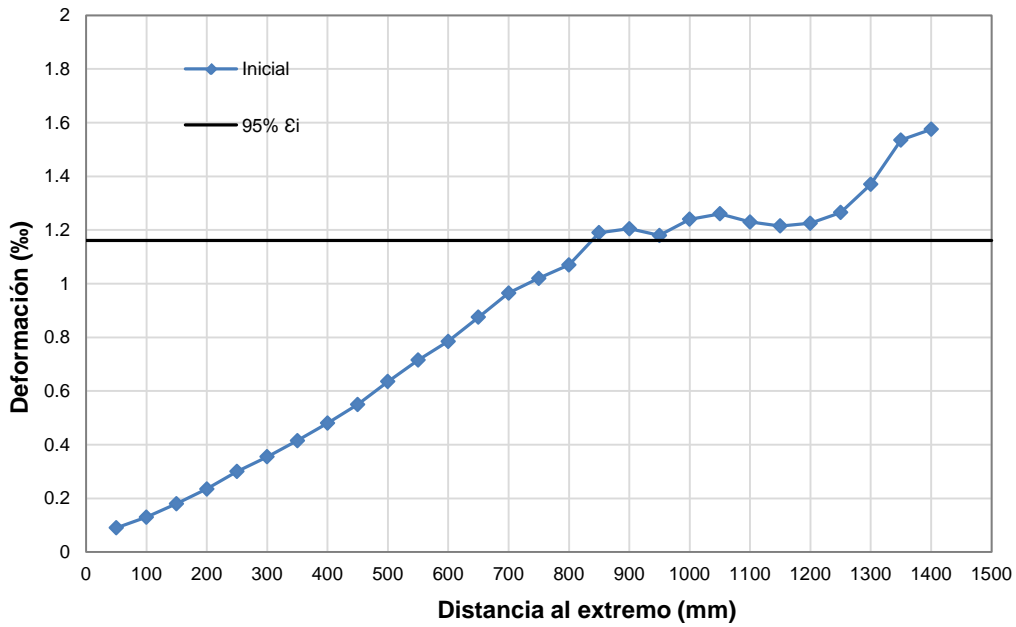
**Figura C-13.** Longitud de transmisión inicial por el método del 95% AMS.  
Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-B-80-48-LS.



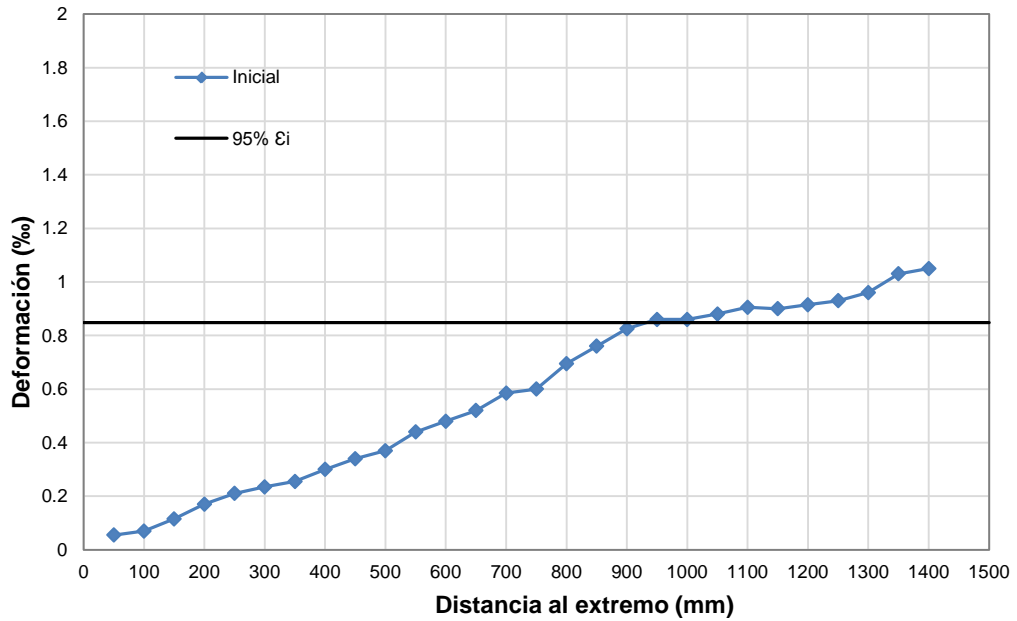
**Figura C-14.** Longitud de transmisión inicial por el método del 95% AMS.  
Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-B-100-24-LS.



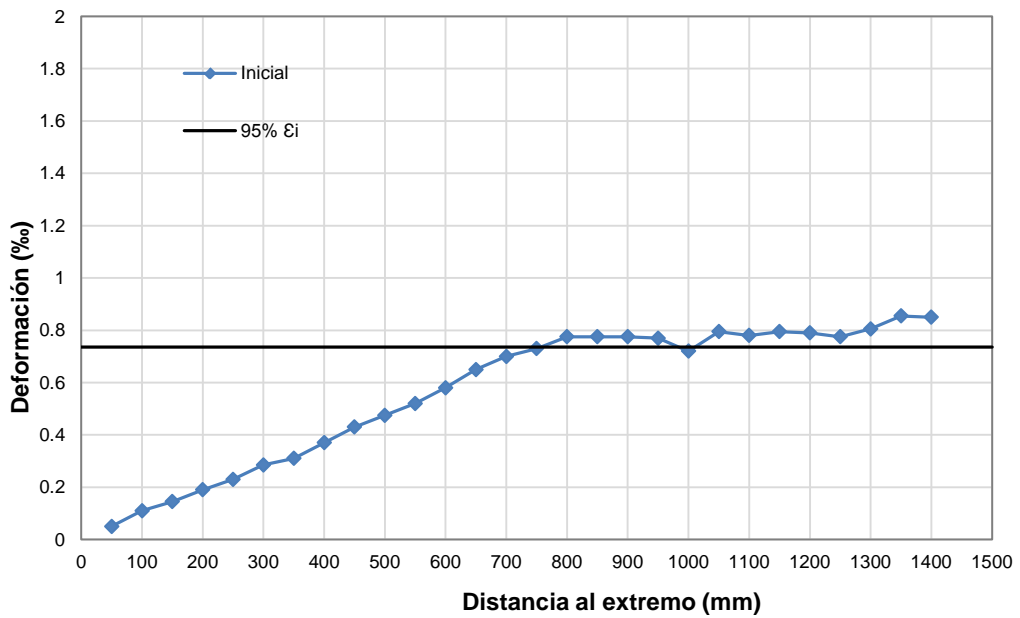
**Figura C-15.** Longitud de transmisión inicial por el método del 95% AMS. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-B-100-48-LS.



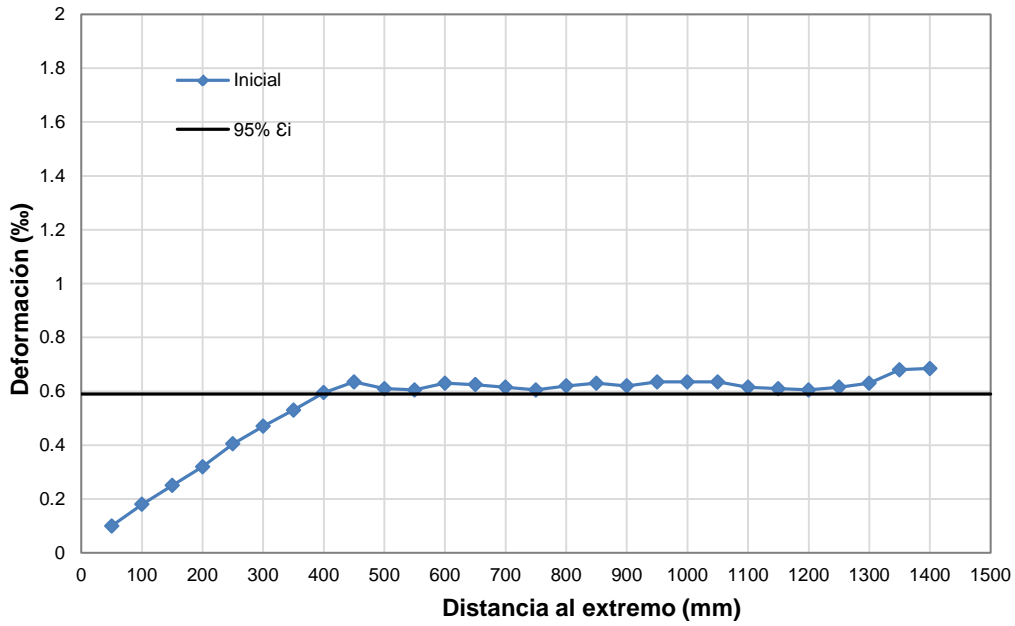
**Figura C-16.** Longitud de transmisión inicial por el método del 95% AMS. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-C-80-48-LS.



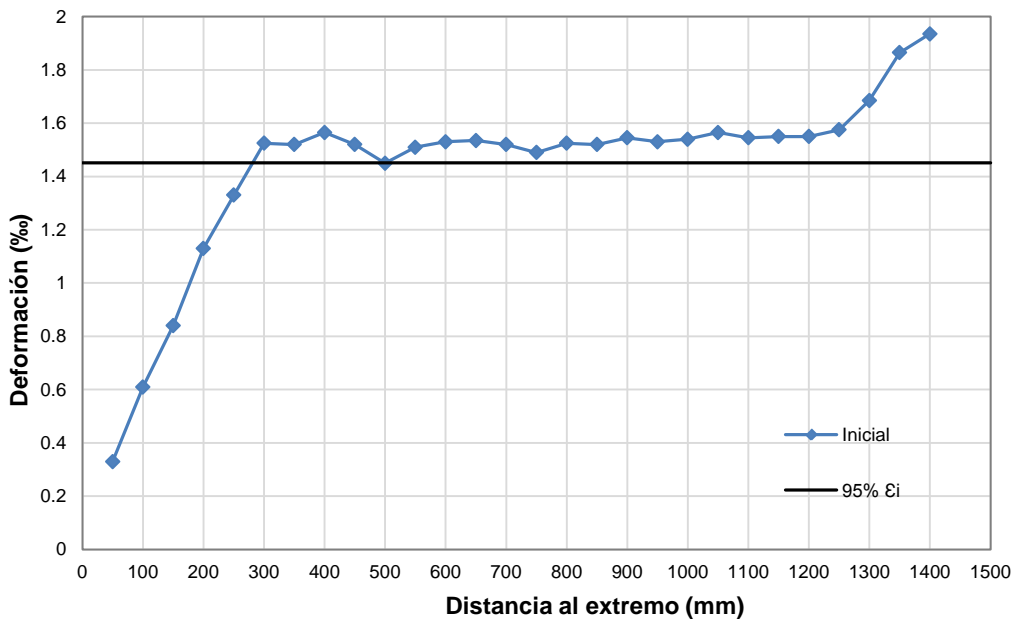
**Figura C-17.** Longitud de transmisión inicial por el método del 95% AMS.  
Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-C-100-24-LS.



**Figura C-18.** Longitud de transmisión inicial por el método del 95% AMS.  
Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-C-100-48-LS.

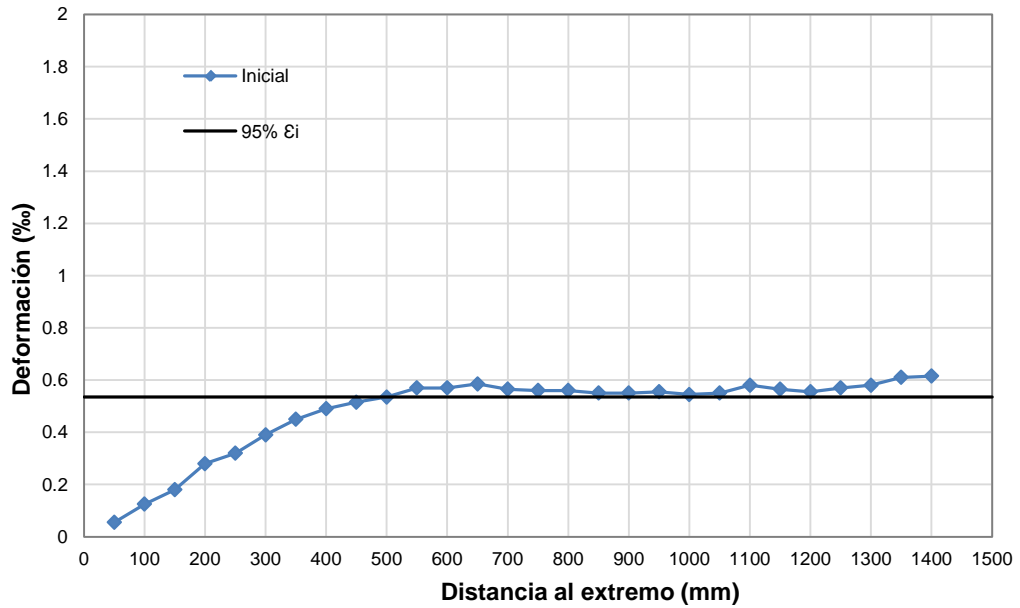


**Figura C-21.** Longitud de transmisión inicial por el método del 95% AMS. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HR-100-48-LS.

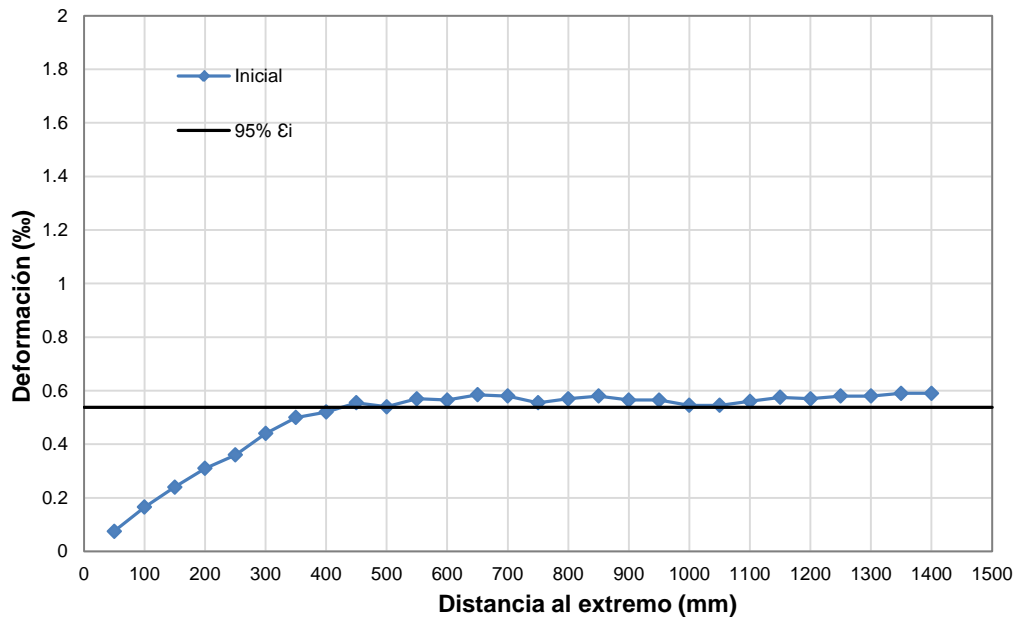


**Figura C-22.** Longitud de transmisión inicial por el método del 95% AMS. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta FA-60-24-LS.

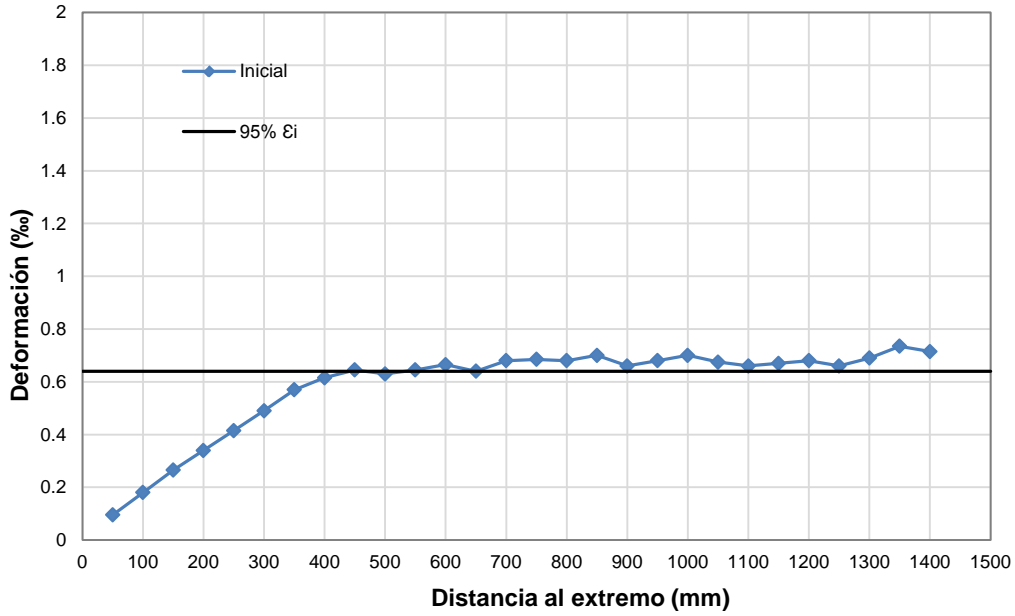




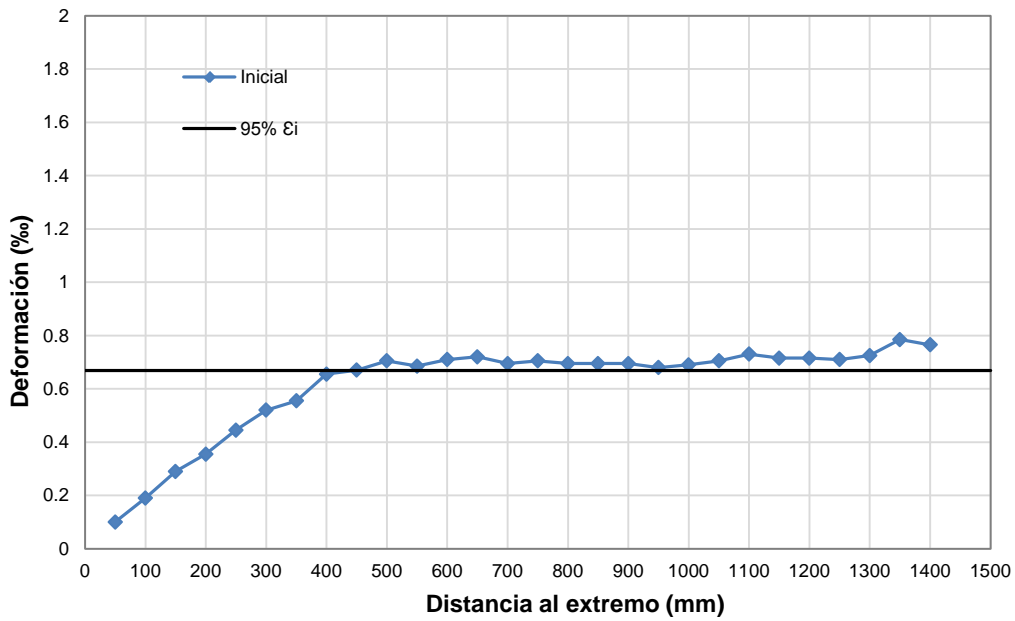
**Figura C-23.** Longitud de transmisión inicial por el método del 95% AMS.  
Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HAC-NF-100-48-LS.



**Figura C-24.** Longitud de transmisión inicial por el método del 95% AMS.  
Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HAC-LF-100-48-LS.

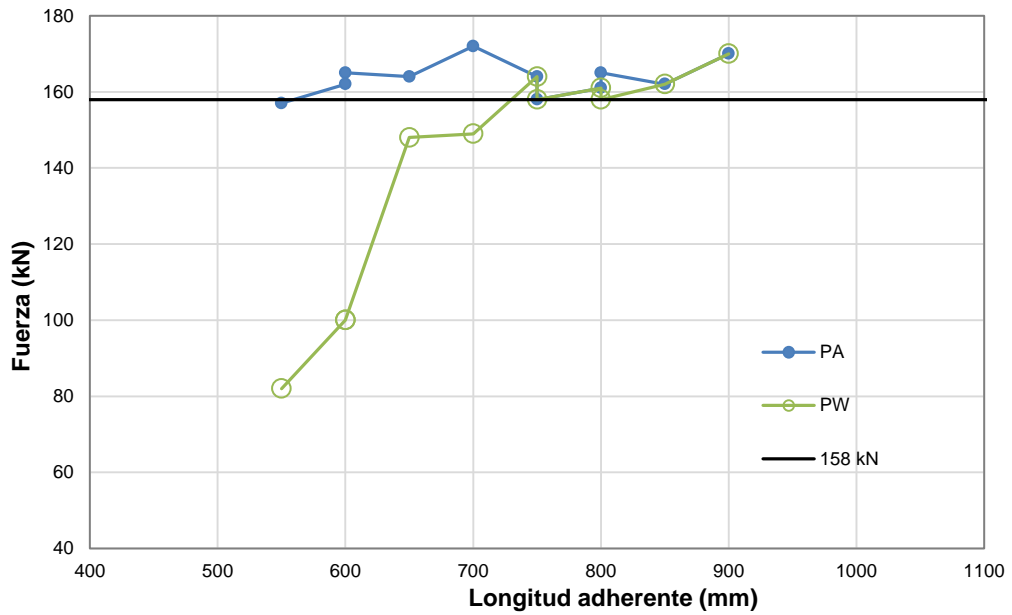


**Figura C-25.** Longitud de transmisión inicial por el método del 95% AMS. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HAC-MF-100-48-LS.

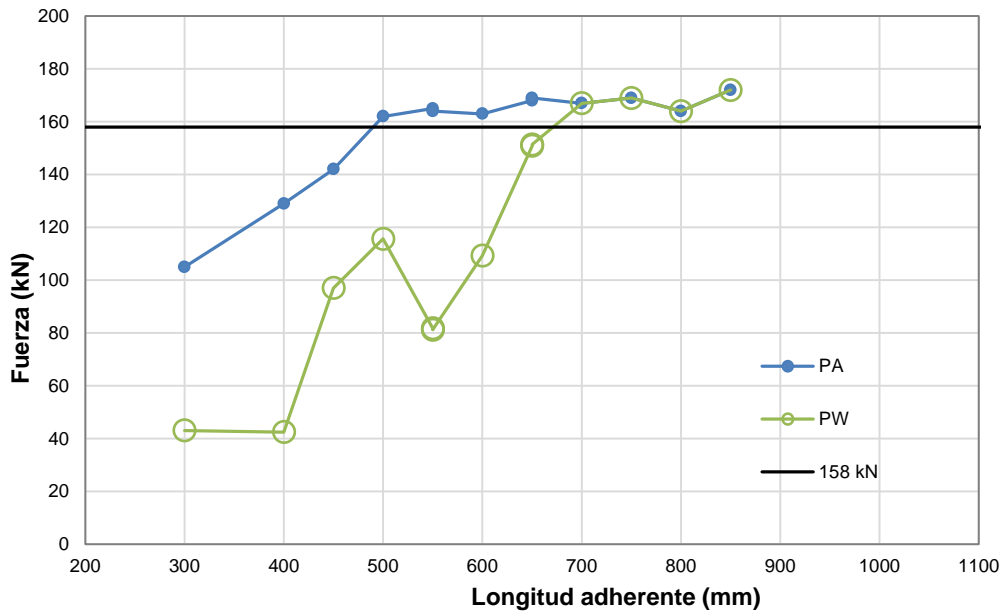


**Figura C-26.** Longitud de transmisión inicial por el método del 95% AMS. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HAC-HF-100-48-LS.

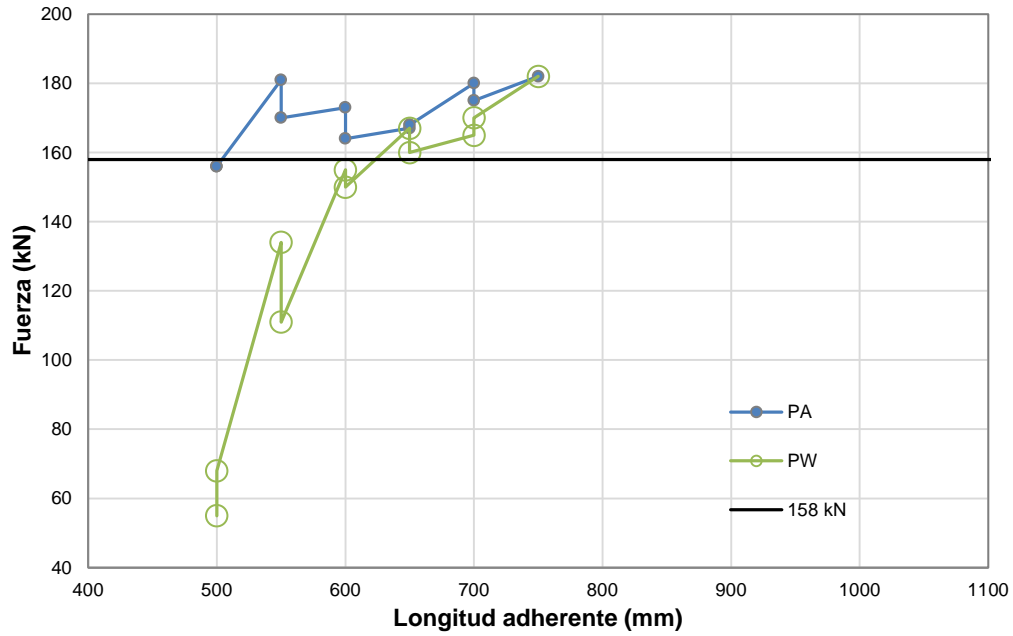
ANEJO D. LONGITUD DE ANCLAJE



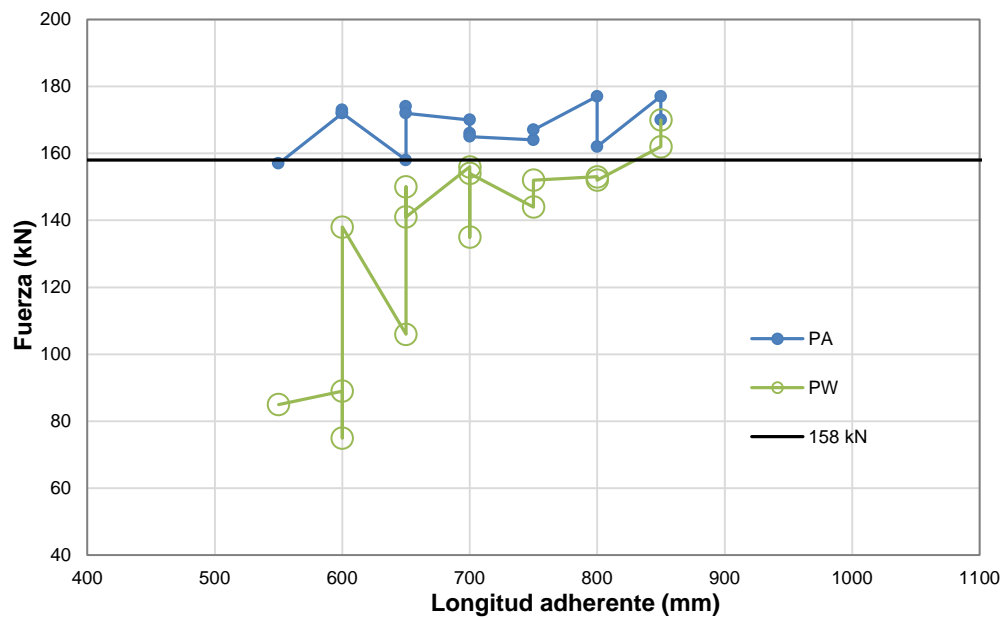
**Figura D-1.** Longitud de anclaje.  
Fuerza de arrancamiento vs. Longitud adherente. Serie HT-B-100-24.



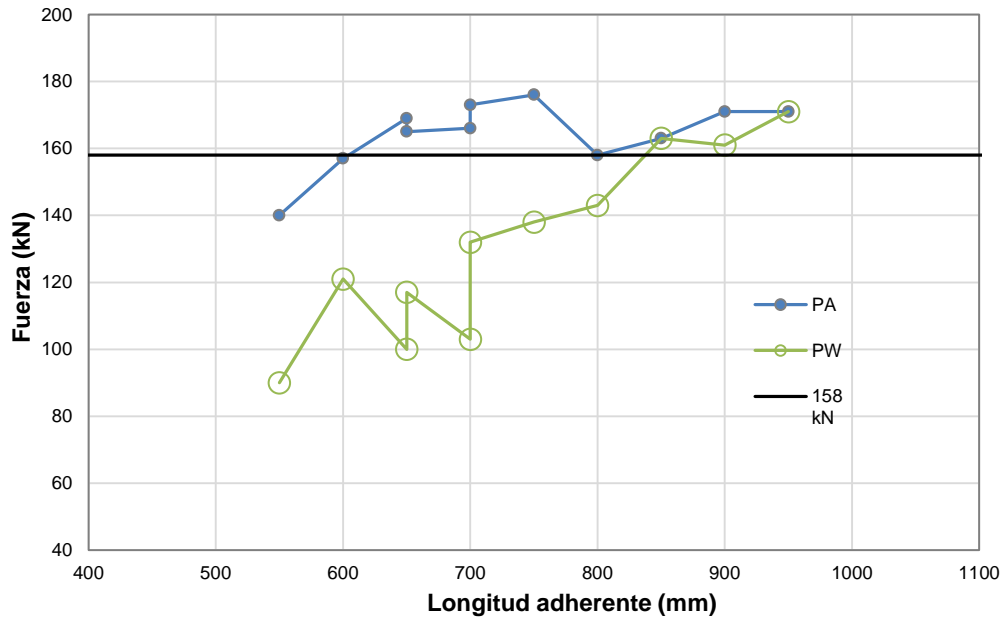
**Figura D-2.** Longitud de anclaje.  
Fuerza de arrancamiento vs. Longitud adherente. Serie HT-B-100-48.



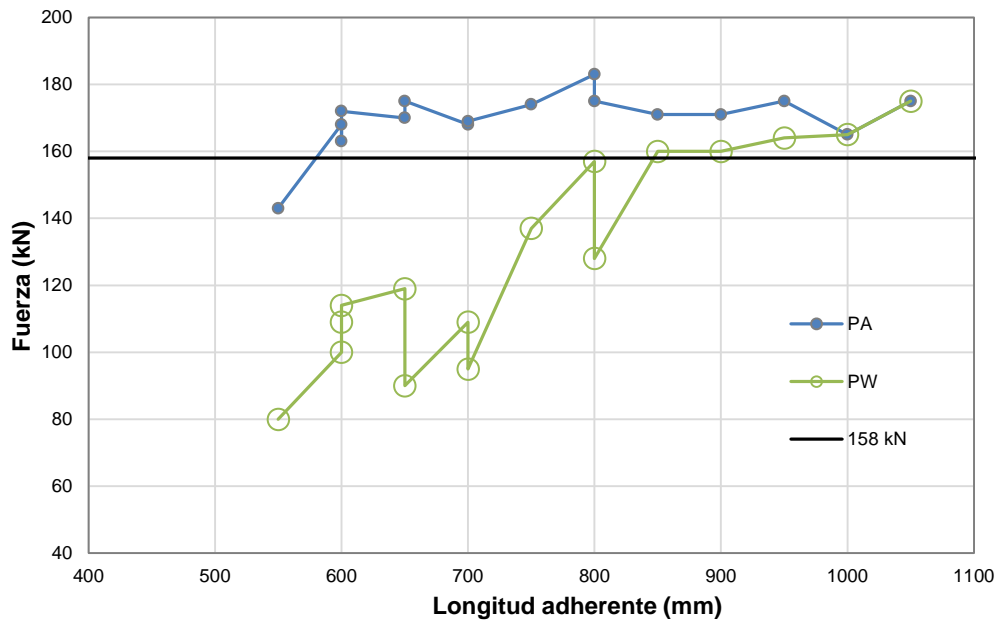
**Figura D-7.** Longitud de anclaje.  
Fuerza de arrancamiento vs. Longitud adherente. Serie HR-100-48.



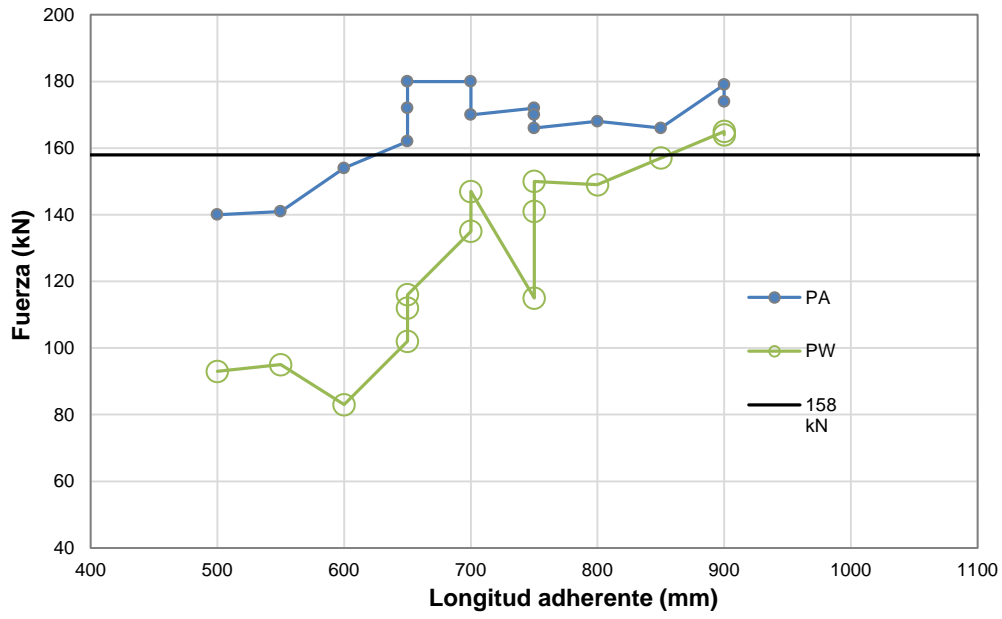
**Figura D-11.** Longitud de anclaje.  
Fuerza de arrancamiento vs. Longitud adherente. Serie HAC-NF-100-48.



**Figura D-12.** Longitud de anclaje.  
Fuerza de arrancamiento vs. Longitud adherente. Serie HAC-LF-100-48.



**Figura D-13.** Longitud de anclaje.  
Fuerza de arrancamiento vs. Longitud adherente. Serie HAC-MF-100-48.



**Figura D-14.** Longitud de anclaje.  
Fuerza de arrancamiento vs. Longitud adherente. Serie HAC-HF-100-48.

ANEJO E. PÉRDIDA DE PRETENSADO (PROBETAS)

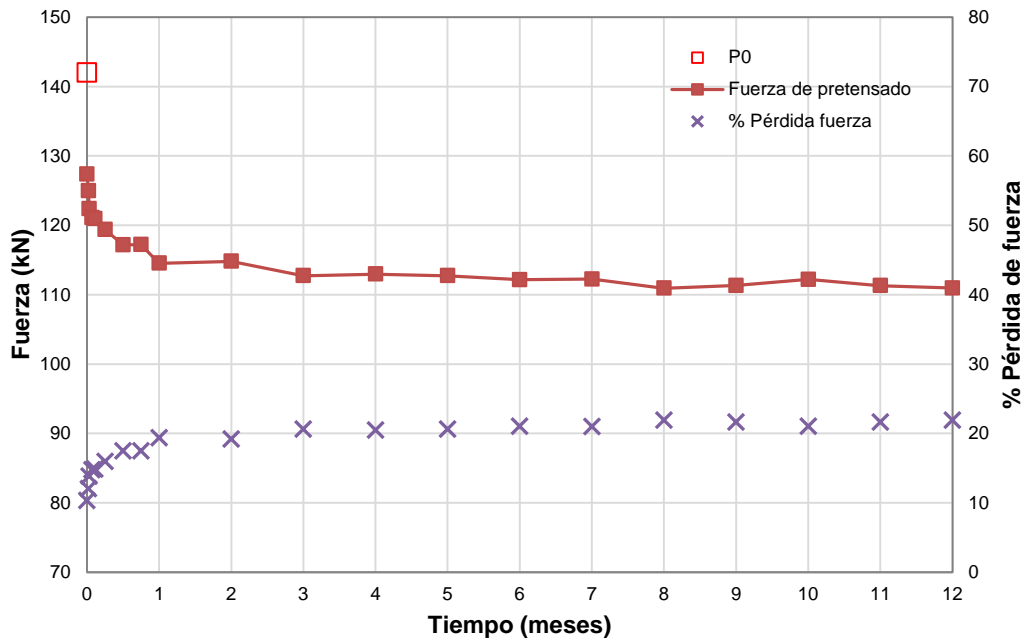


Figura E-1. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
 Probeta HT-A-60-24-LS.

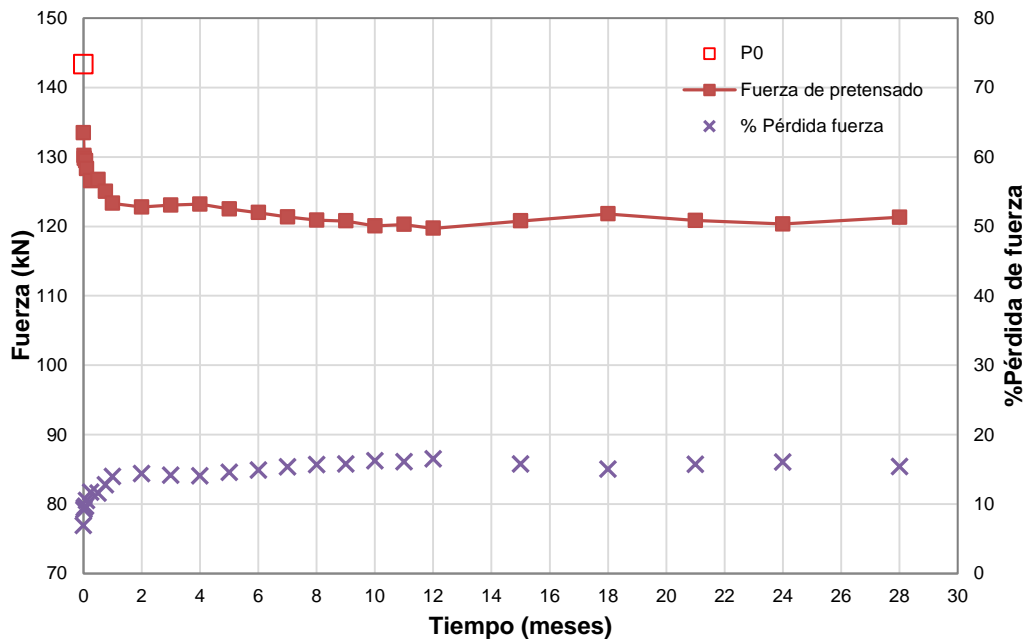


Figura E-2. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
 Probeta HT-A-60-48-LS.

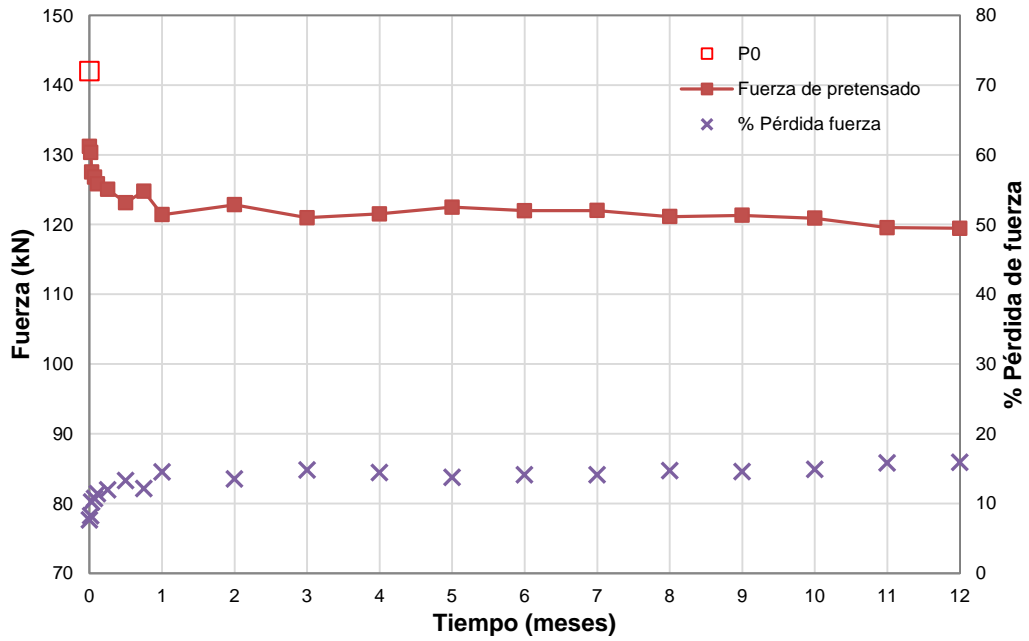


Figura E-3. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta HT-A-80-12-LS.

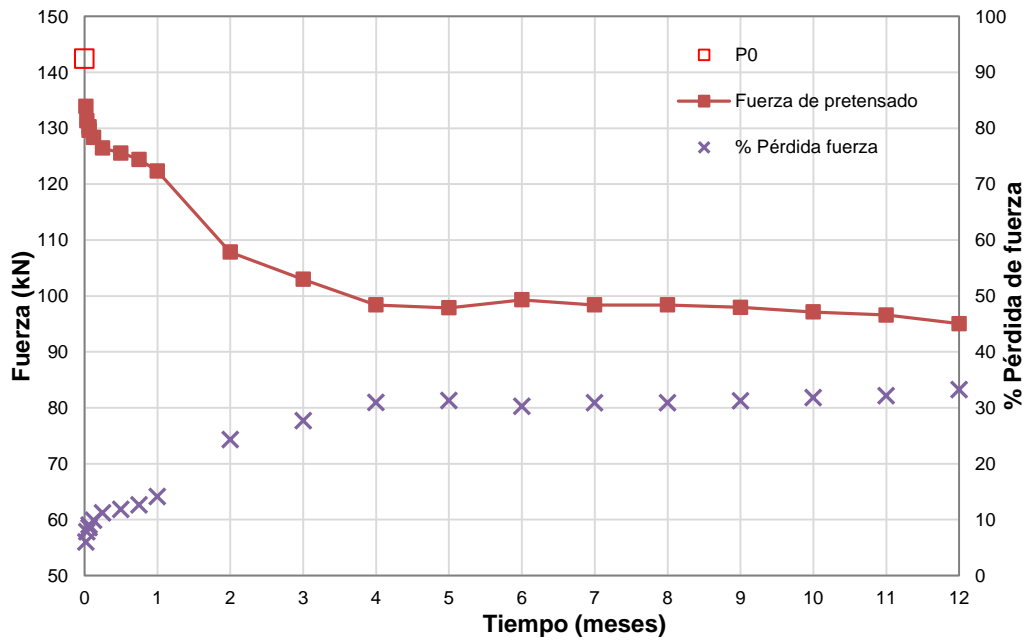


Figura E-4. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta HT-A-80-24-500.



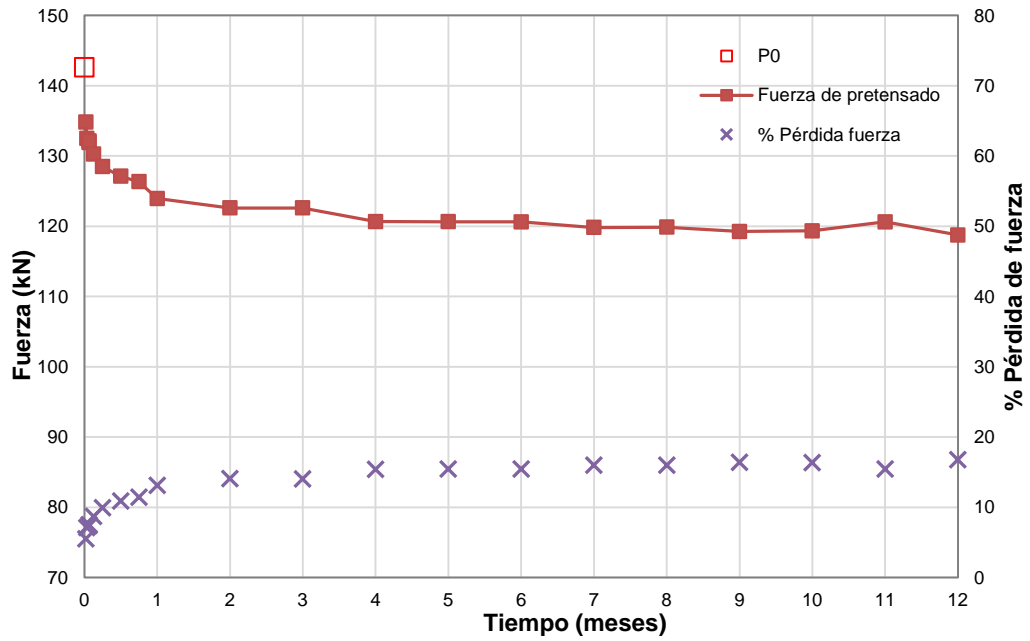


Figura E-5. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta HT-A-80-24-550.

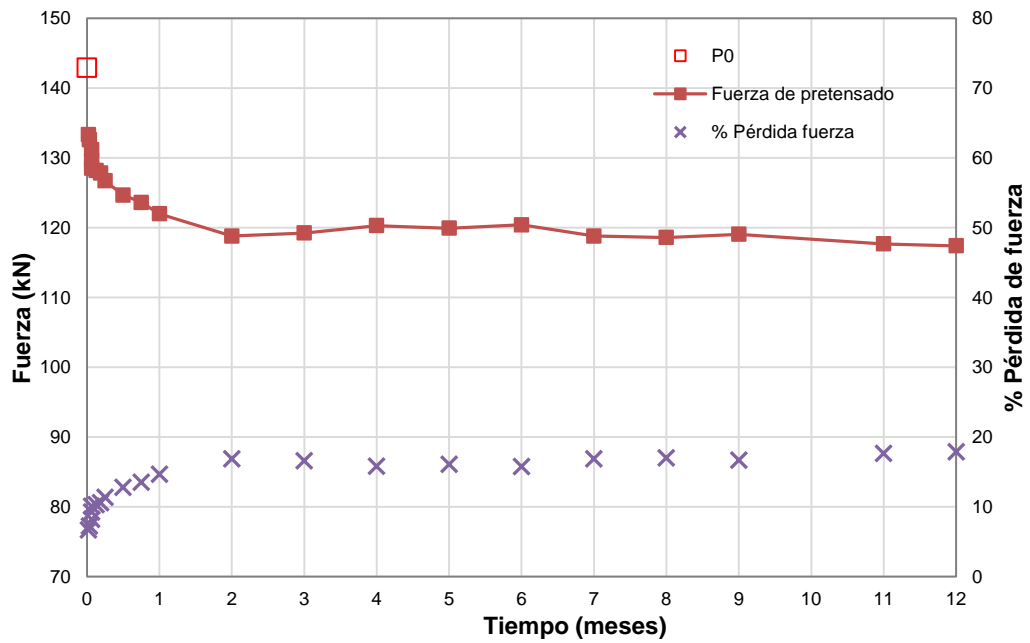


Figura E-6. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta HT-A-80-24-600.

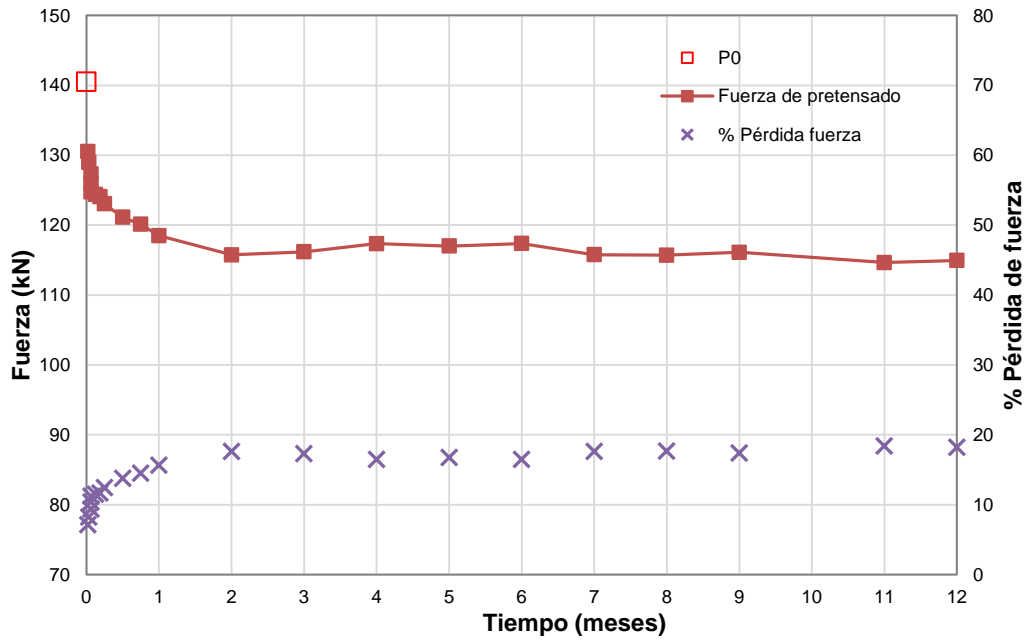


Figura E-7. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta HT-A-80-24-650.

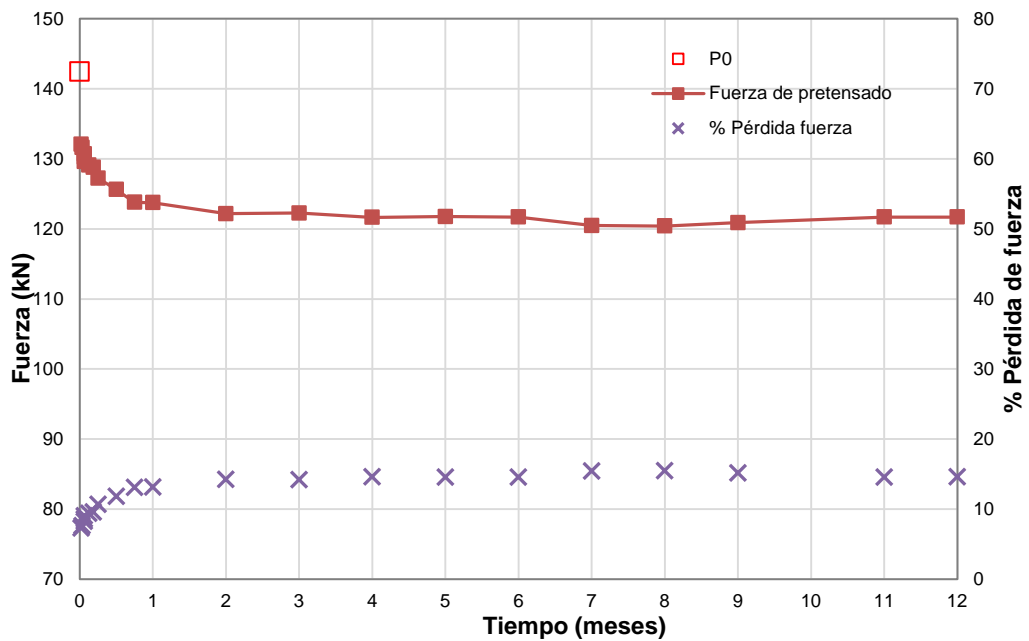


Figura E-8. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta HT-A-80-24-700.

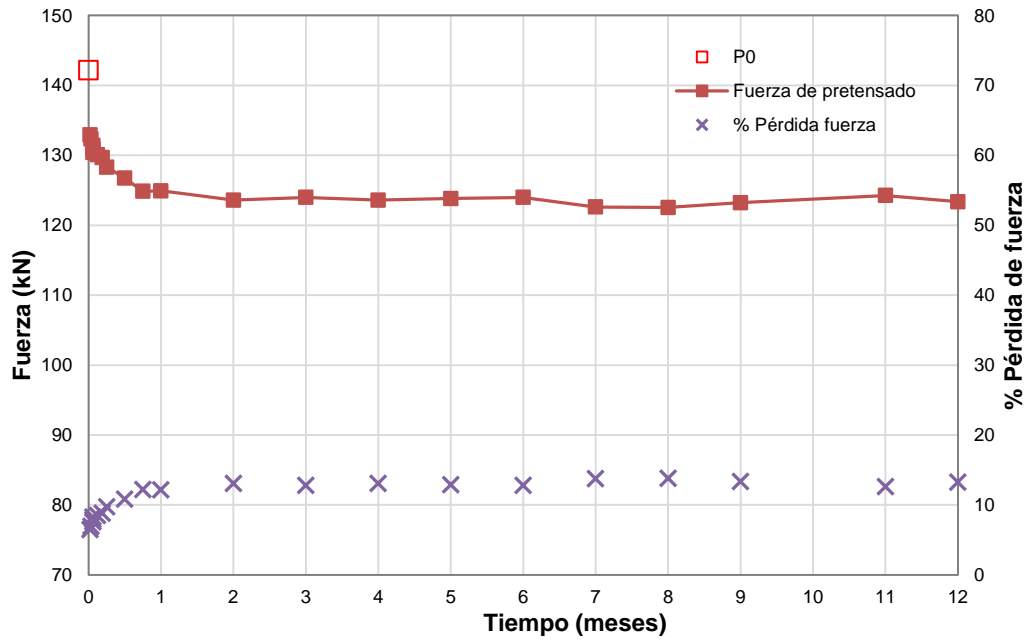


Figura E-8. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta HT-A-80-24-750.

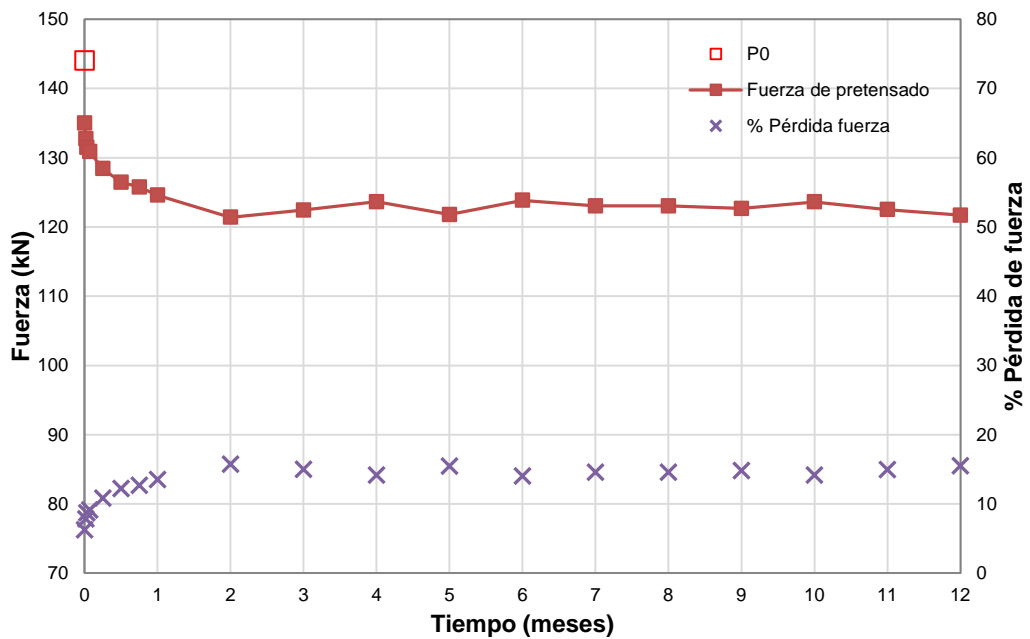


Figura E-9. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta HT-A-80-24-LS.

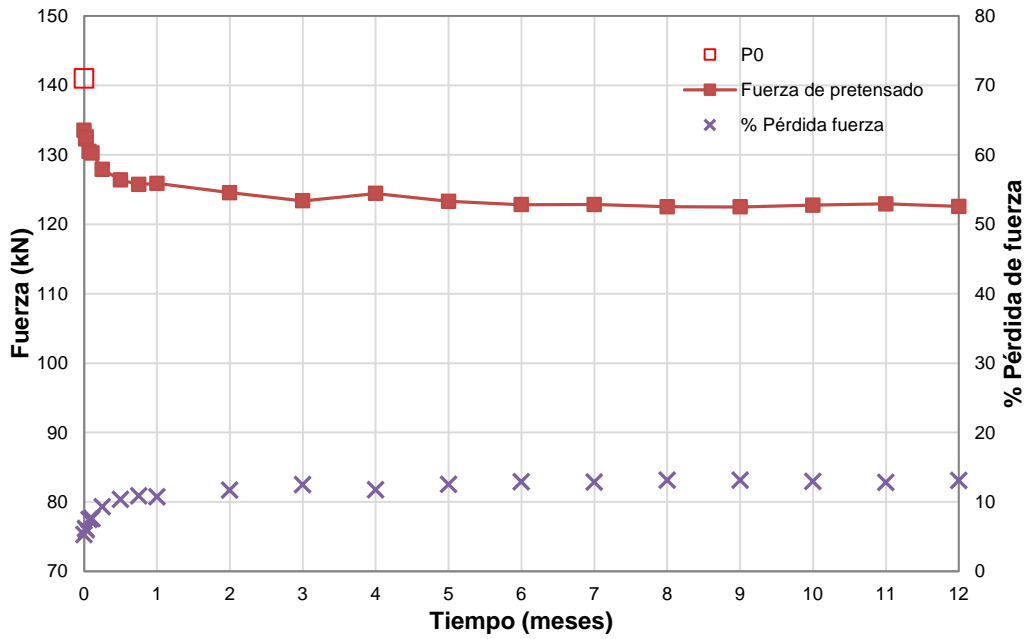


Figura E-10. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta HT-A-80-24-LS-FA.

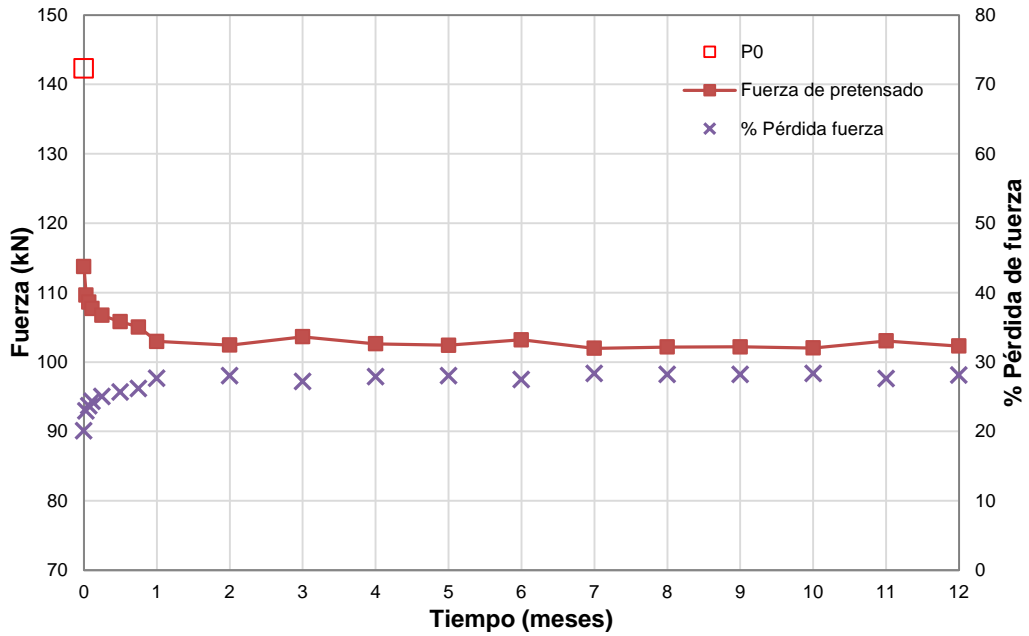


Figura E-11. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta HT-A-100-6-LS.

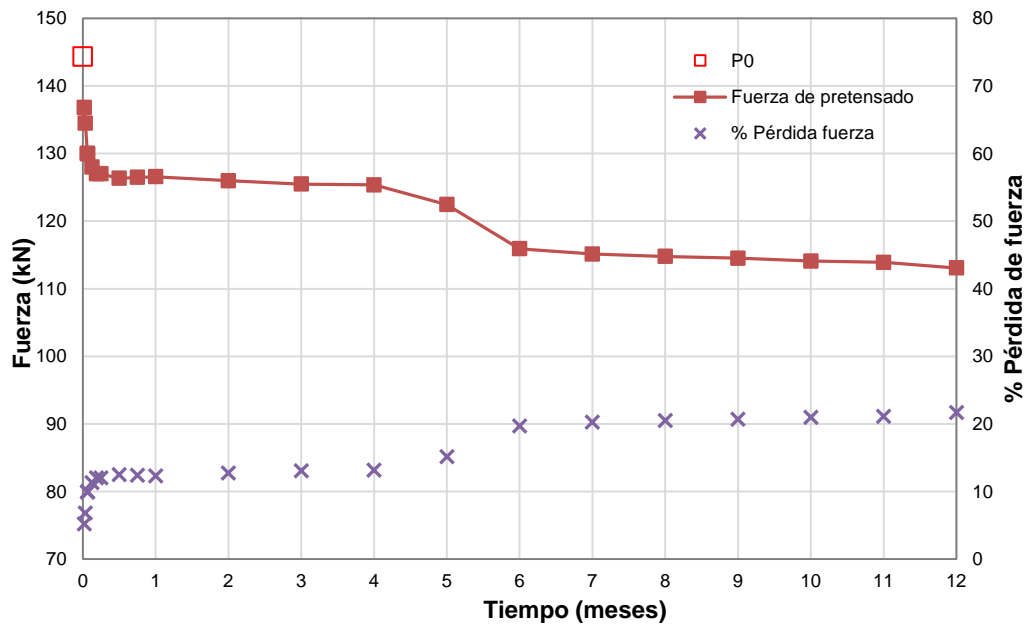


Figura E-12. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
 Probeta HT-A-100-12-650.

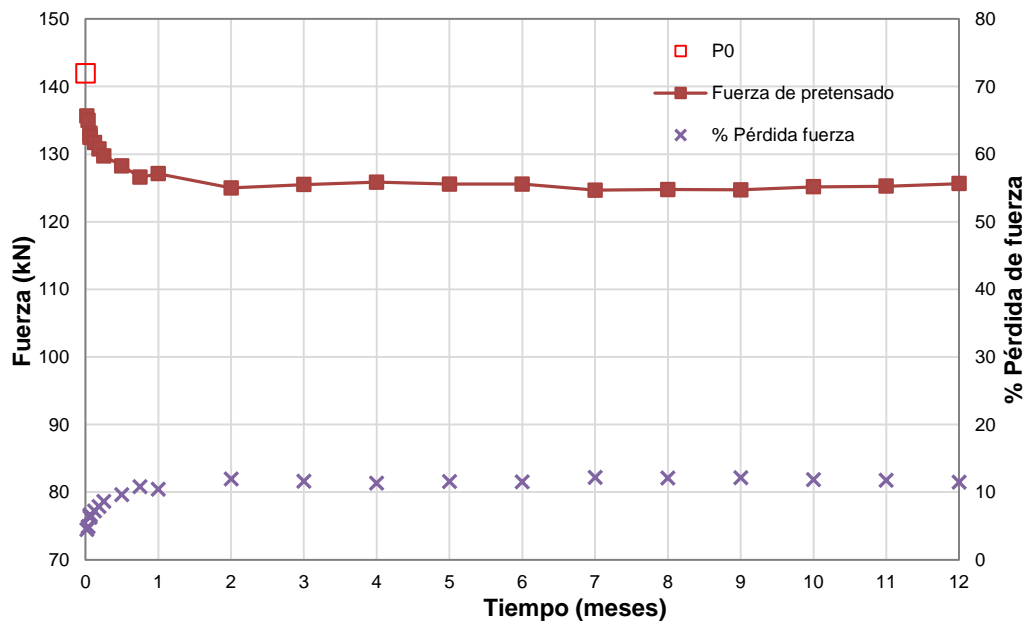


Figura E-13. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
 Probeta HT-A-100-12-700.

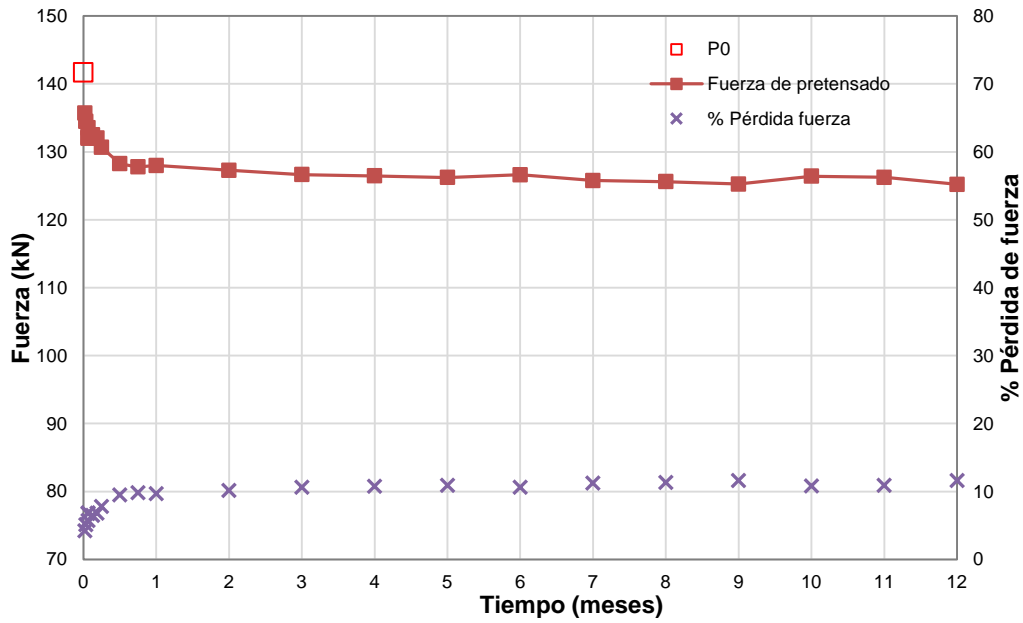


Figura E-14. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta HT-A-100-12-750.

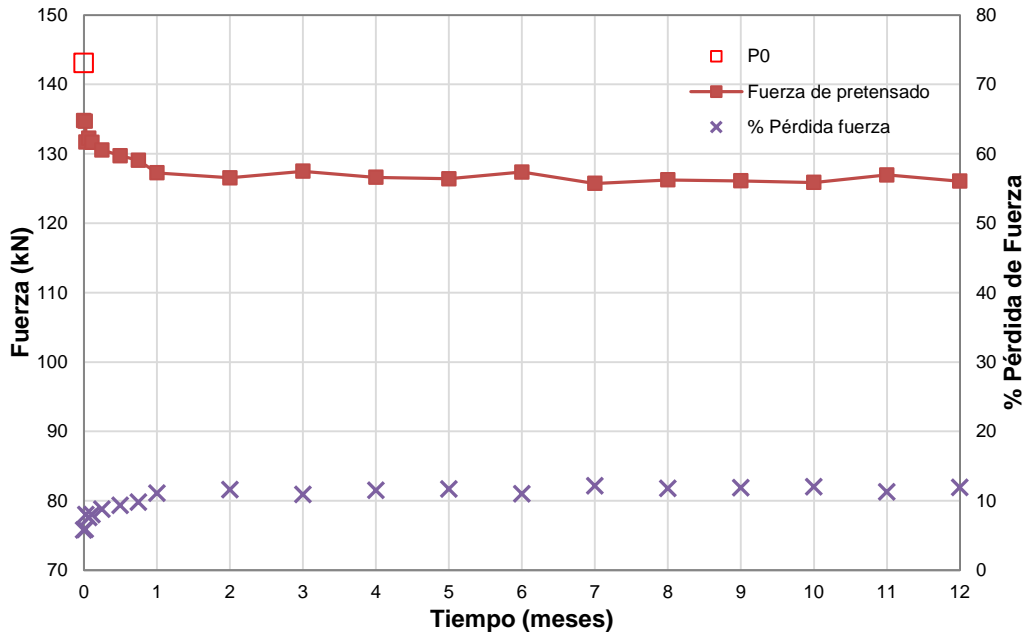


Figura E-15. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta HT-A-100-12-LS.

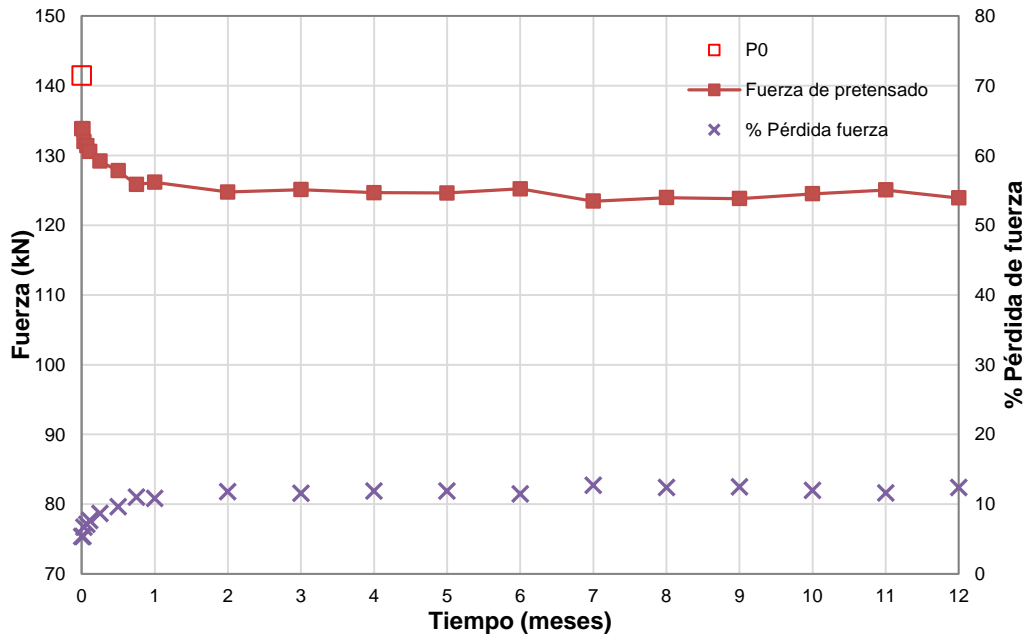


Figura E-16. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
 Probeta HT-A-100-12-LS-FA.

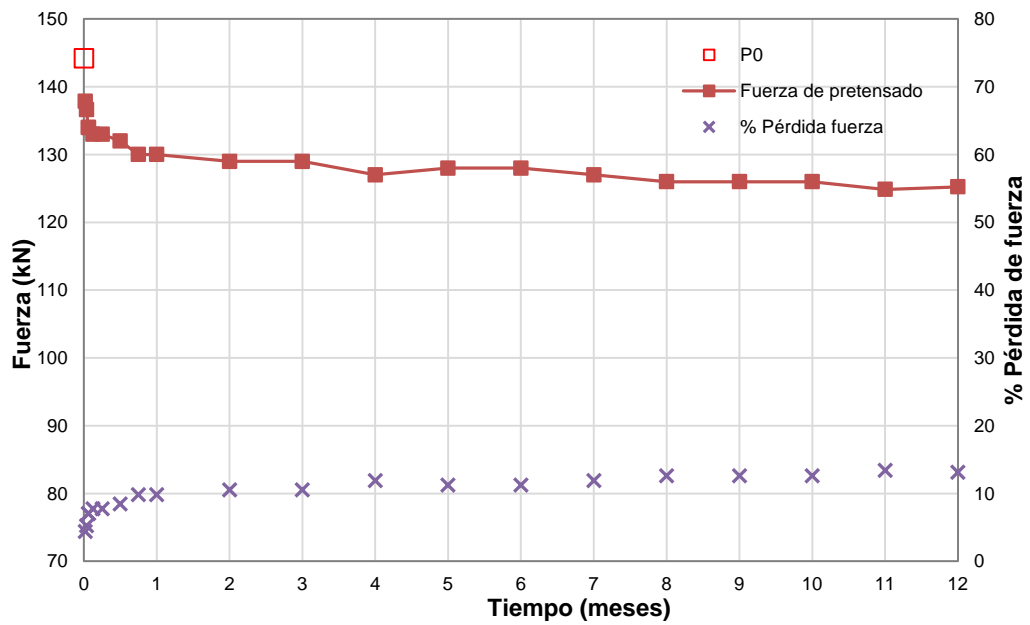


Figura E-17. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
 Probeta HT-A-100-24-450.

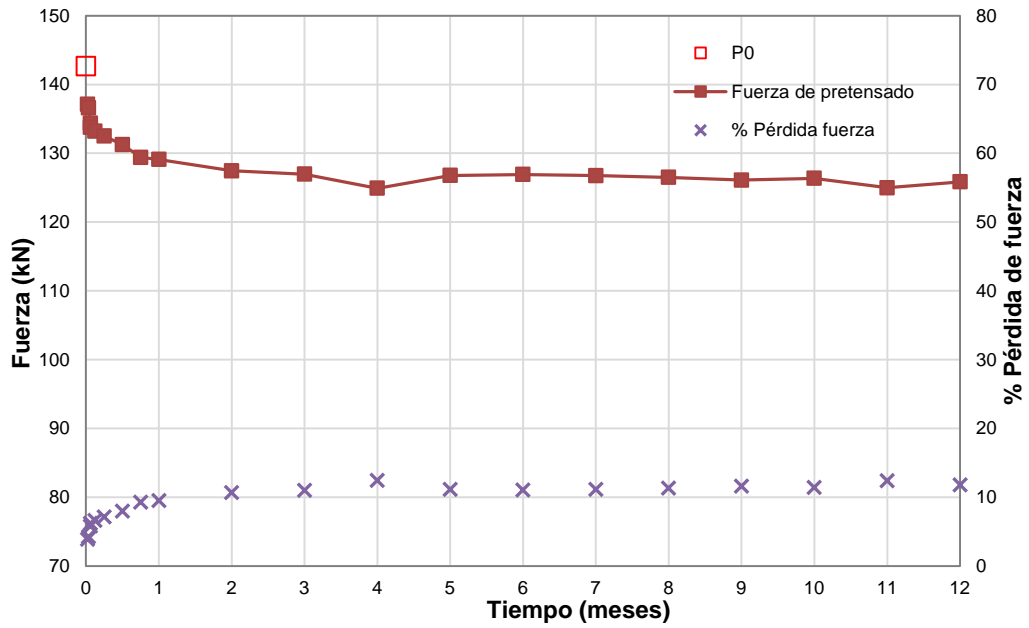


Figura E-18. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta HT-A-100-24-500.

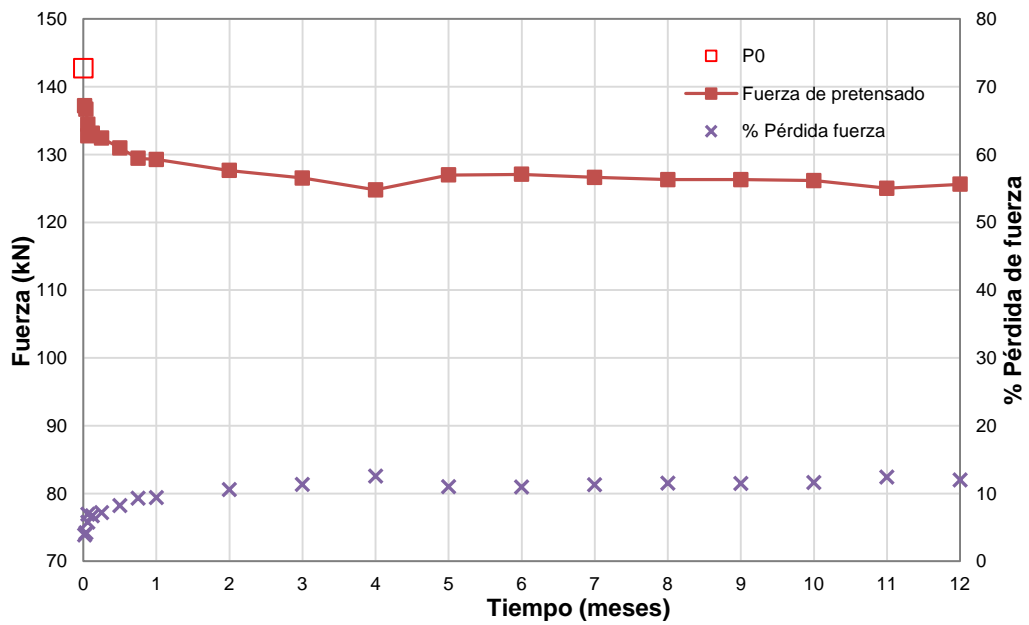


Figura E-19. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta HT-A-100-24-550.



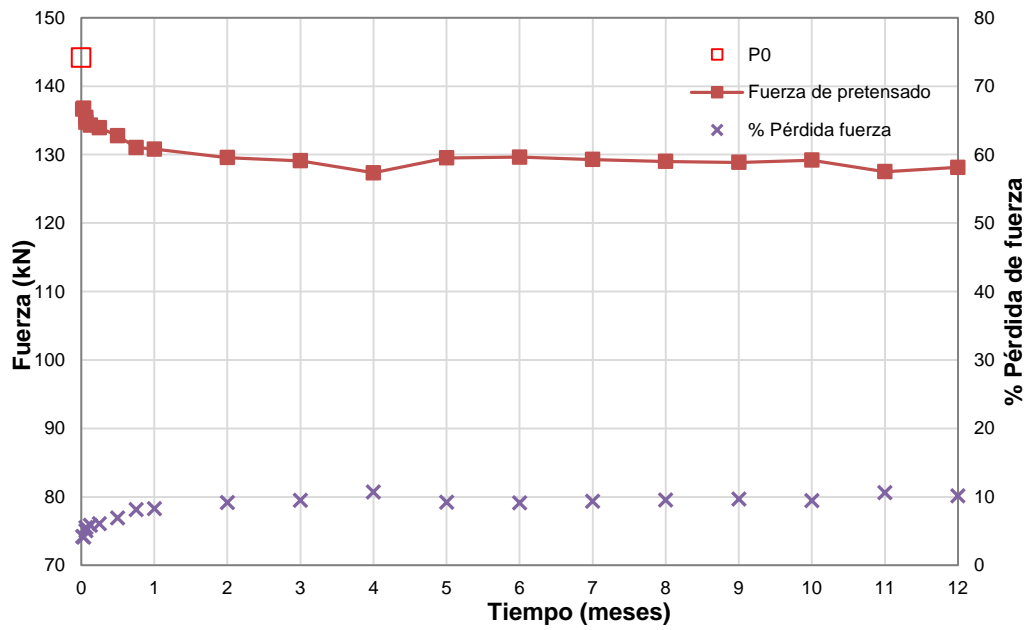


Figura E-20. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
 Probeta HT-A-100-24-600.

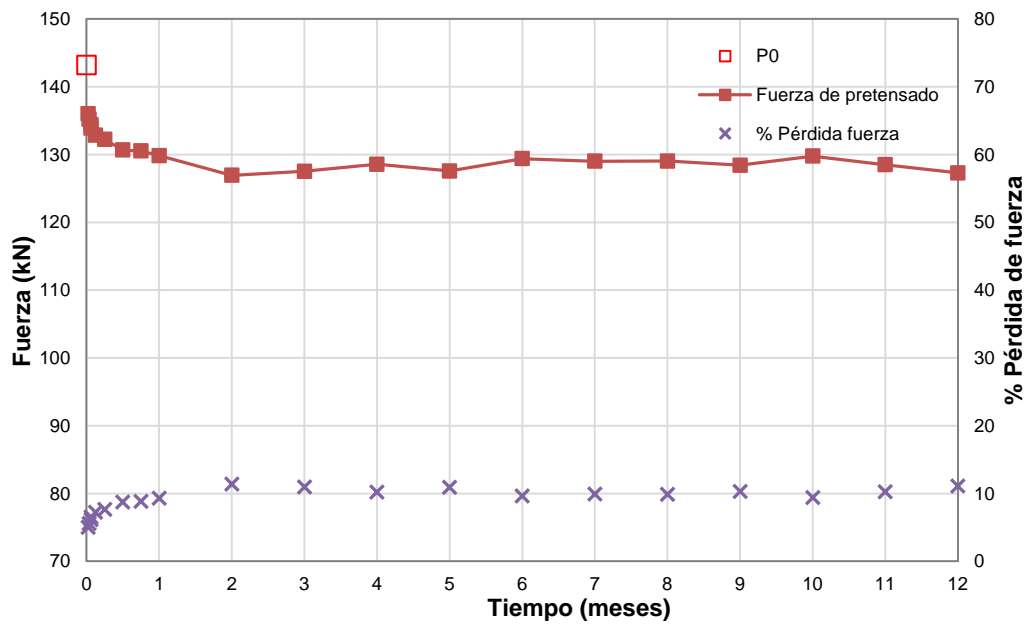


Figura E-20. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
 Probeta HT-A-100-24-650.

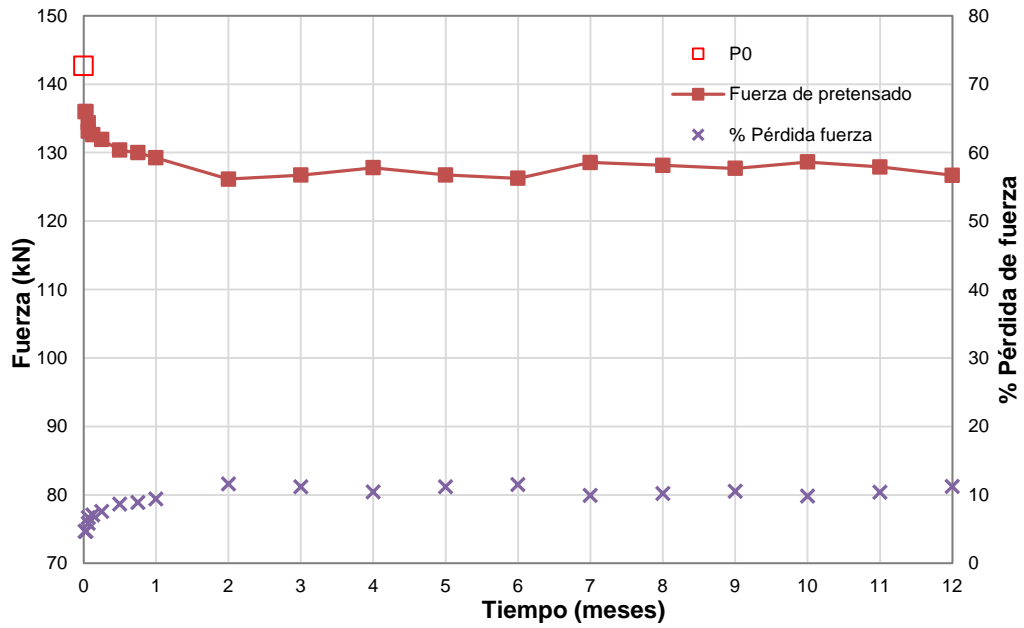


Figura E-21. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
 Probeta HT-A-100-24-700.

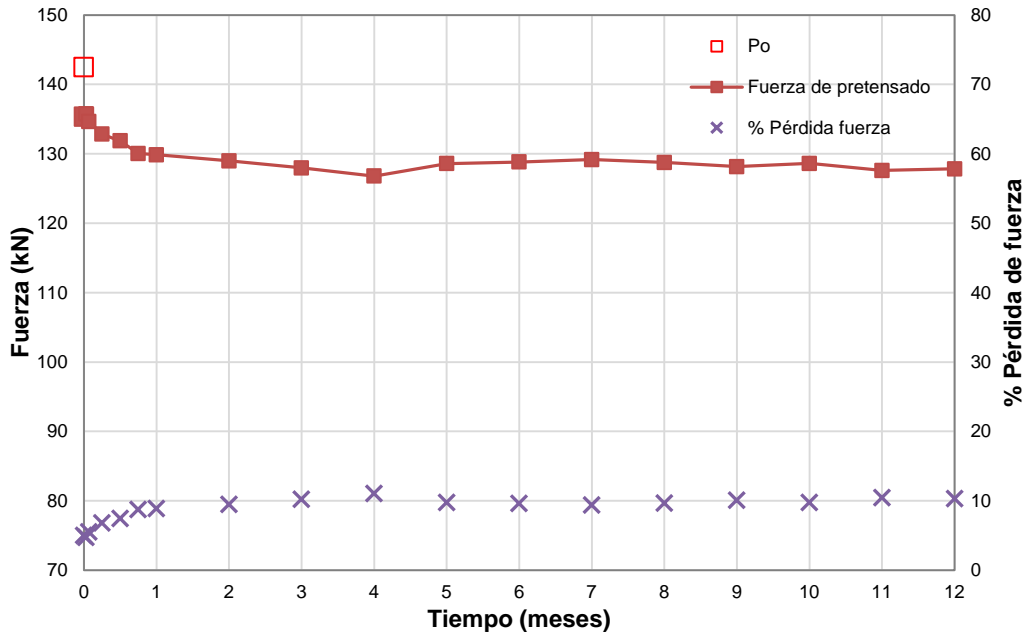


Figura E-22. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
 Probeta HT-A-100-24-LS.

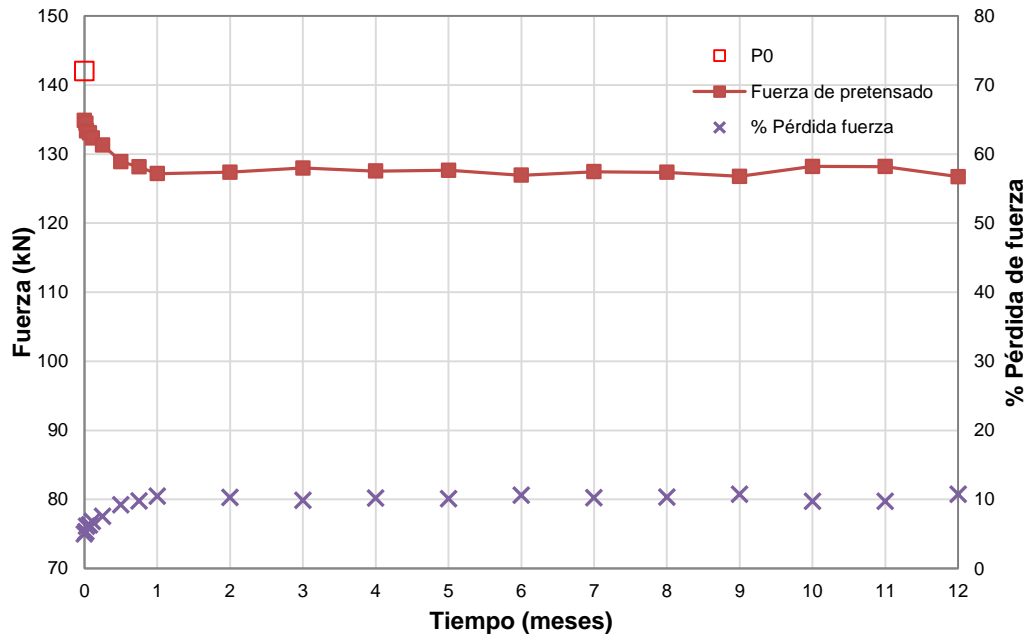


Figura E-23. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
 Probeta HT-A-100-24-LS-FA.

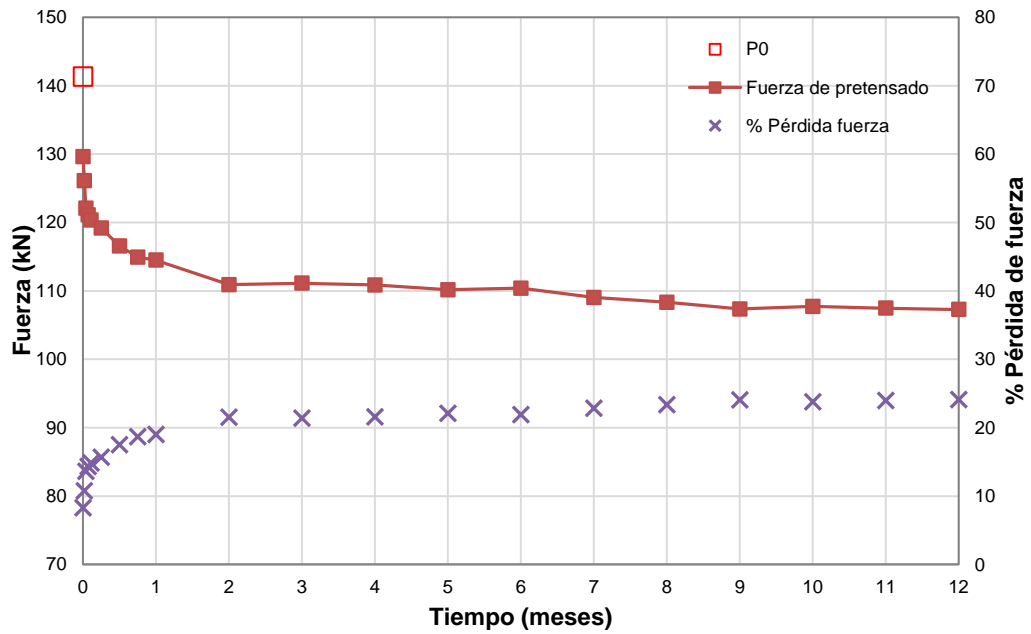


Figura E-24. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
 Probeta HT-B-60-48-LS.

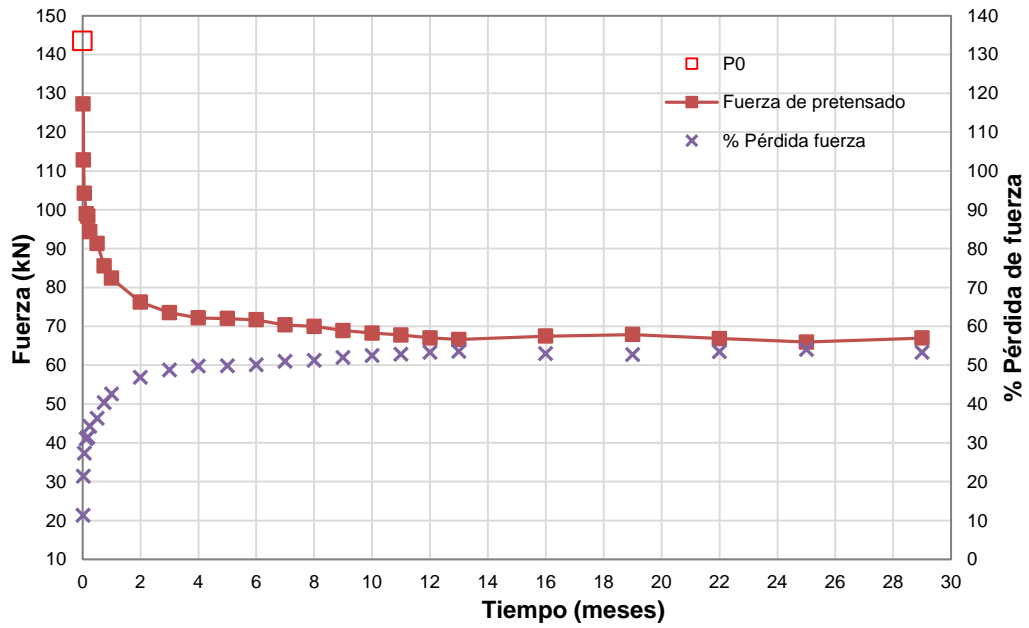


Figura E-25. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta HT-B-80-24-550.

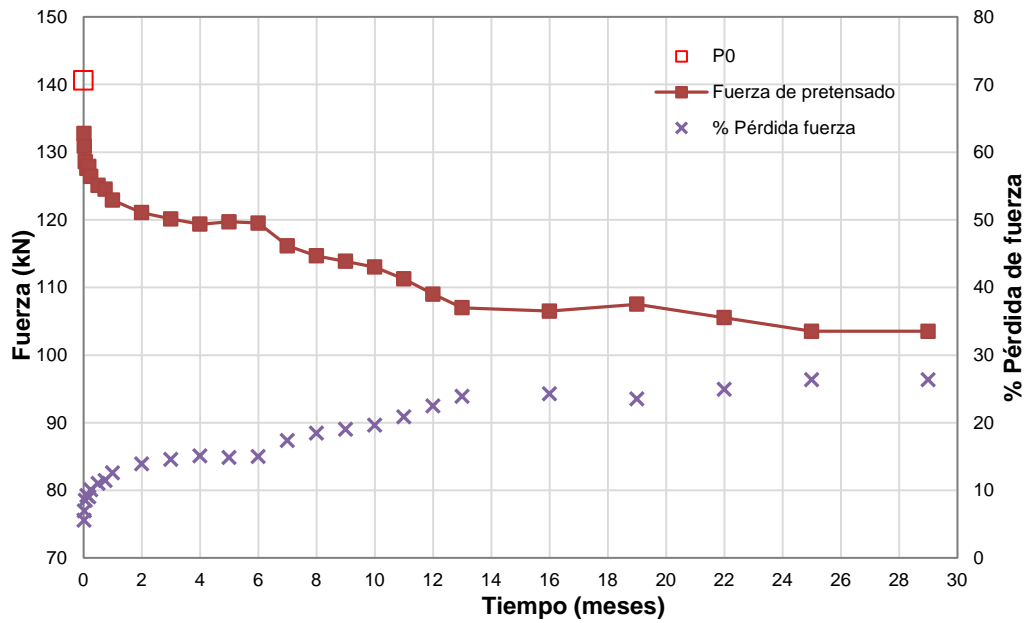


Figura E-26. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta HT-B-80-24-600.

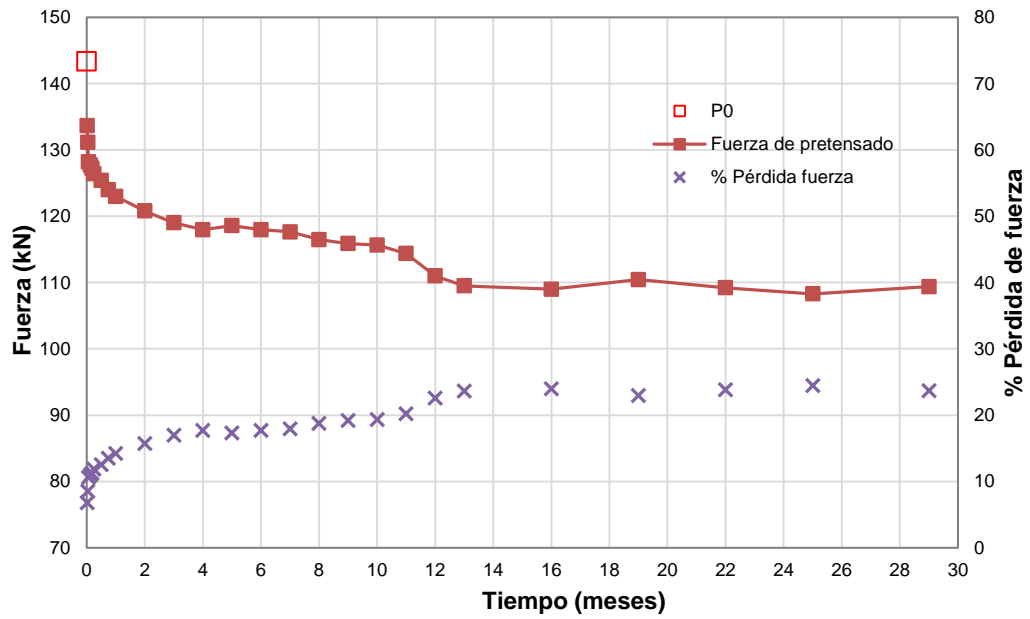


Figura E-27. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
 Probeta HT-B-80-24-650.

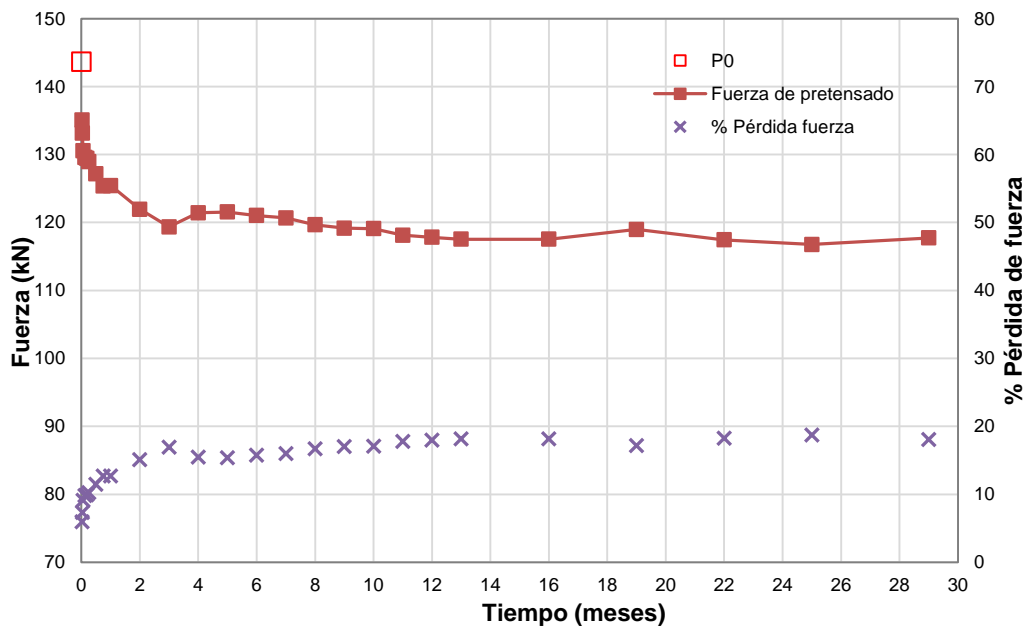


Figura E-28. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
 Probeta HT-B-80-24-700.

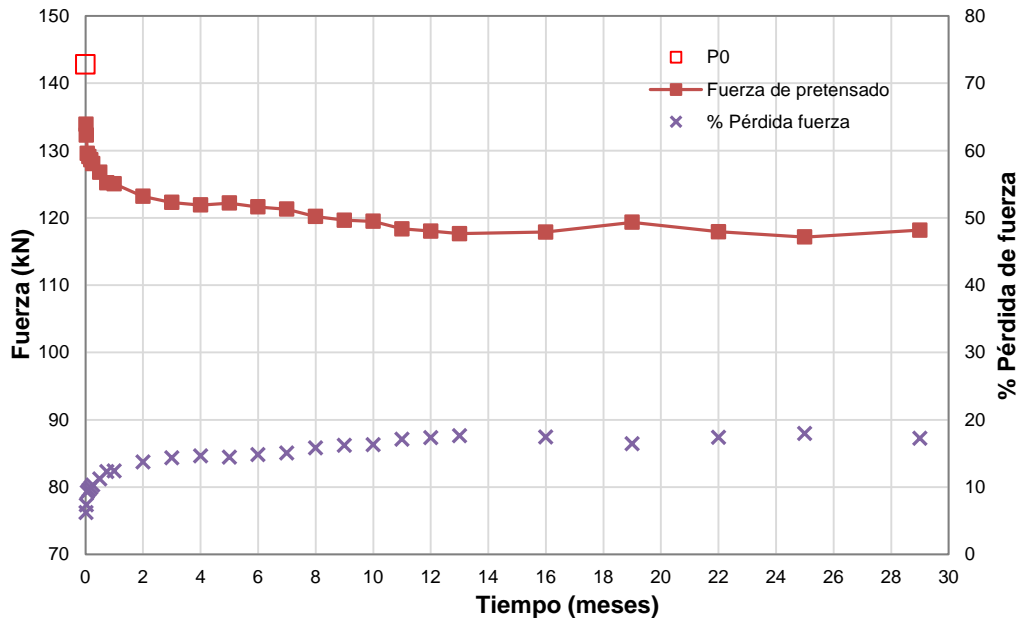


Figura E-29. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta HT-B-80-24-750.

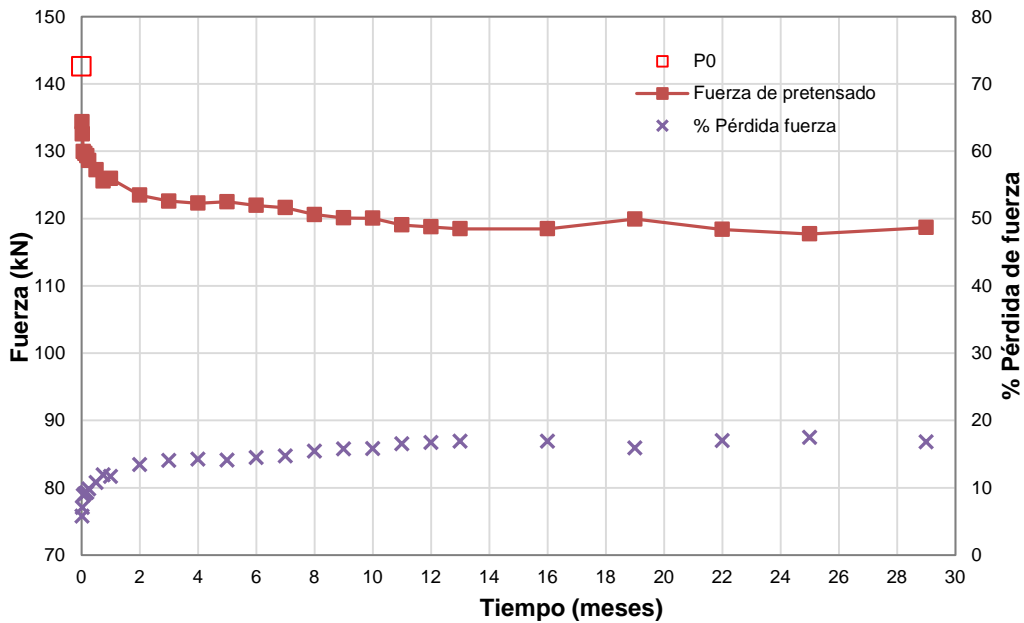


Figura E-30. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta HT-B-80-24-800.

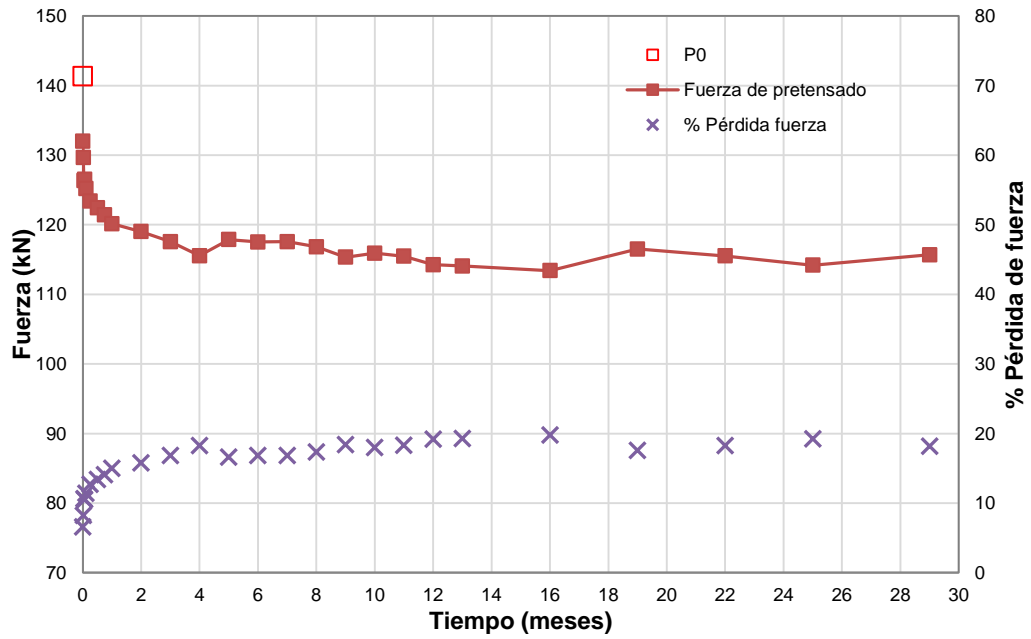


Figura E-31. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta HT-B-80-24-LS.

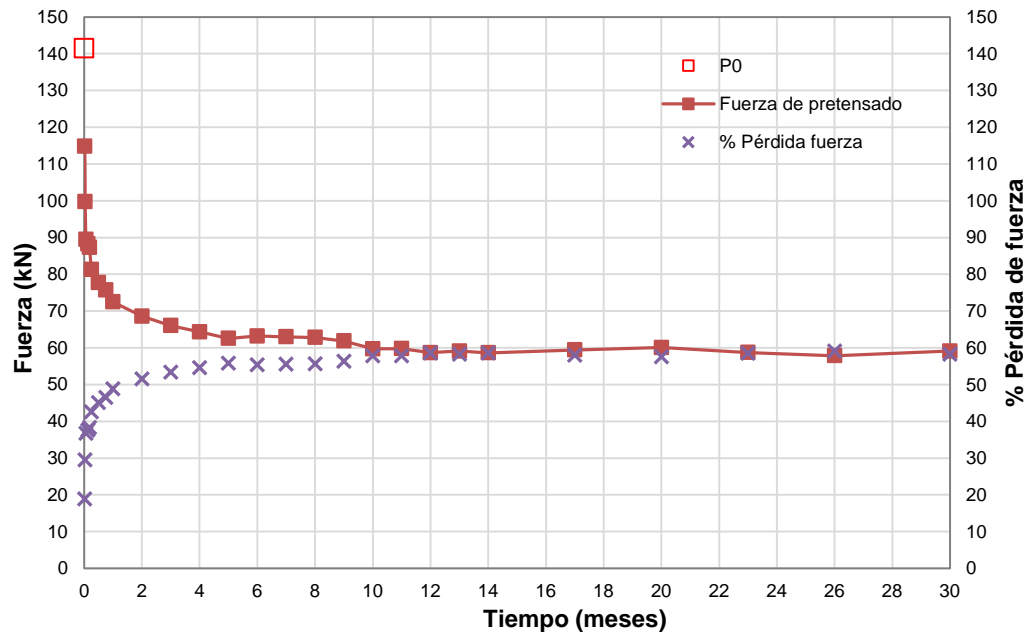


Figura E-32. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta HT-B-80-48-450.

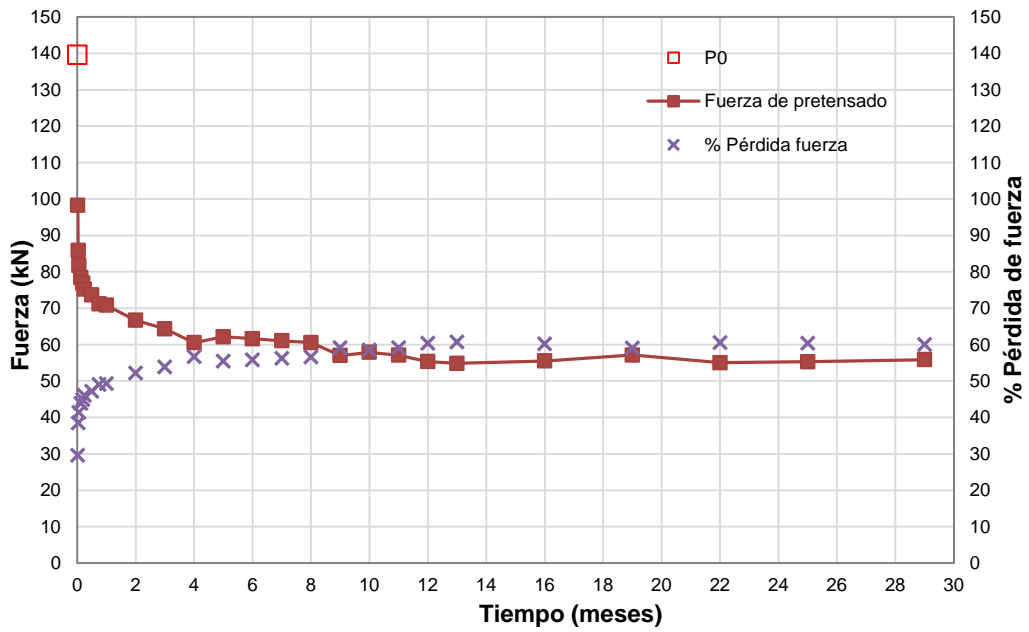


Figura E-33. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta HT-B-80-48-500.

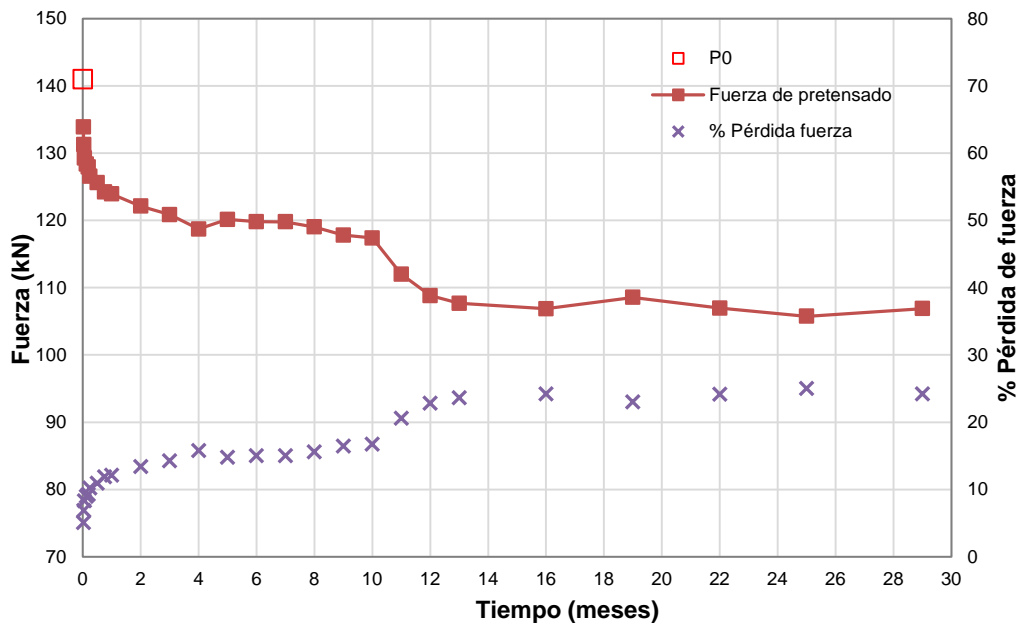


Figura E-34. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta HT-B-80-48-550.



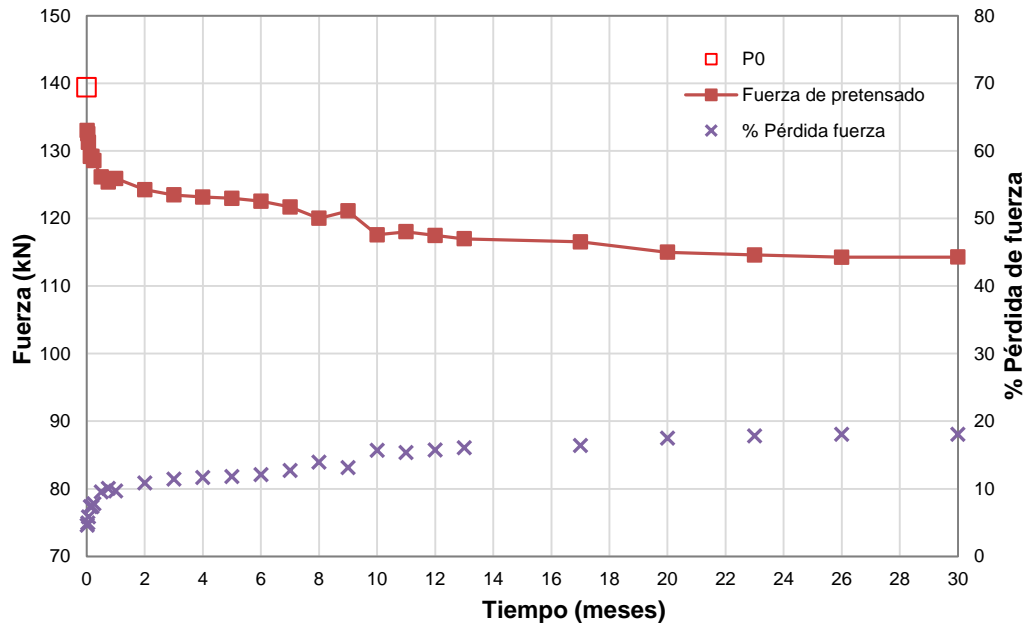


Figura E-35. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta HT-B-80-48-600.

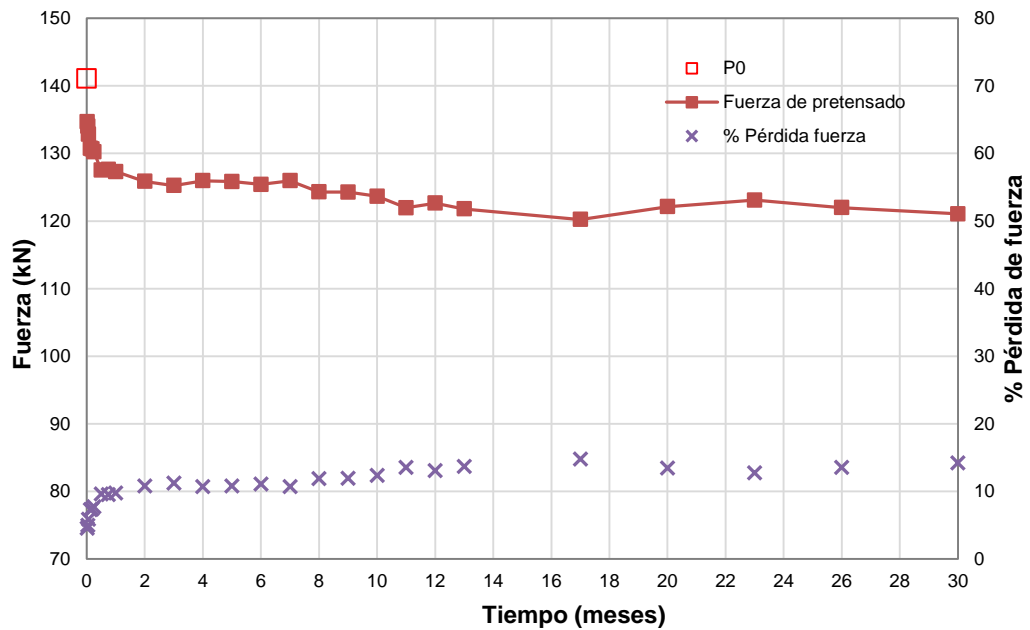


Figura E-36. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta HT-B-80-48-650.

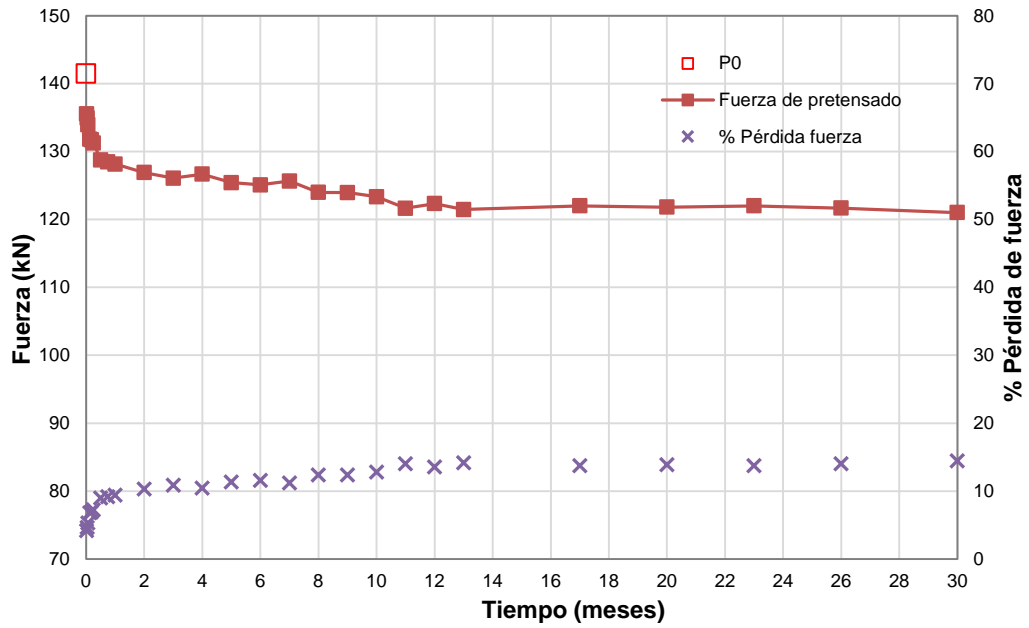


Figura E-37. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta HT-B-80-48-700.

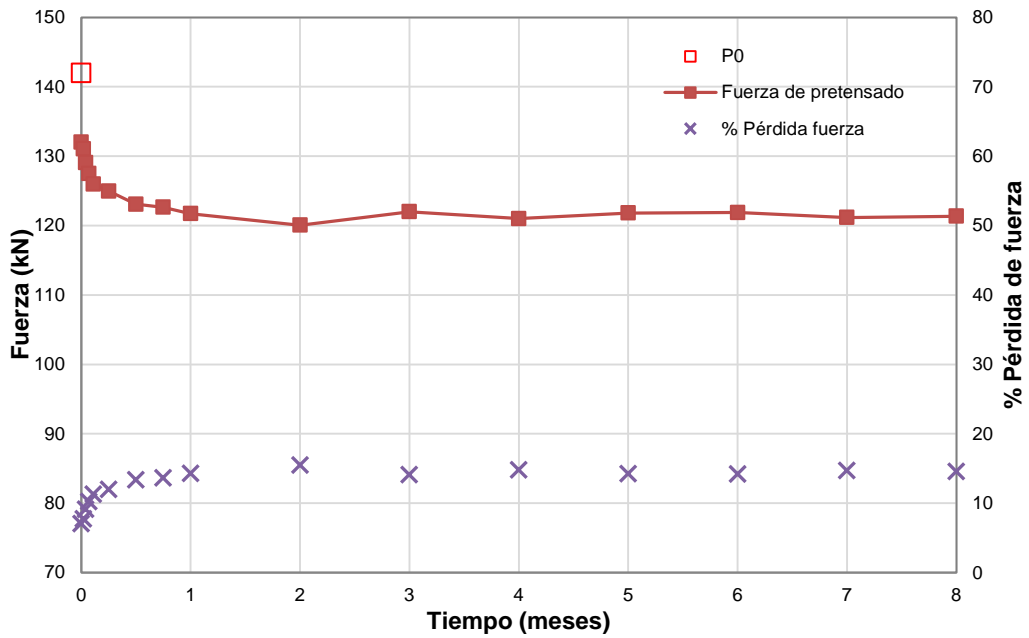


Figura E-38. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta HT-B-80-48-LS.

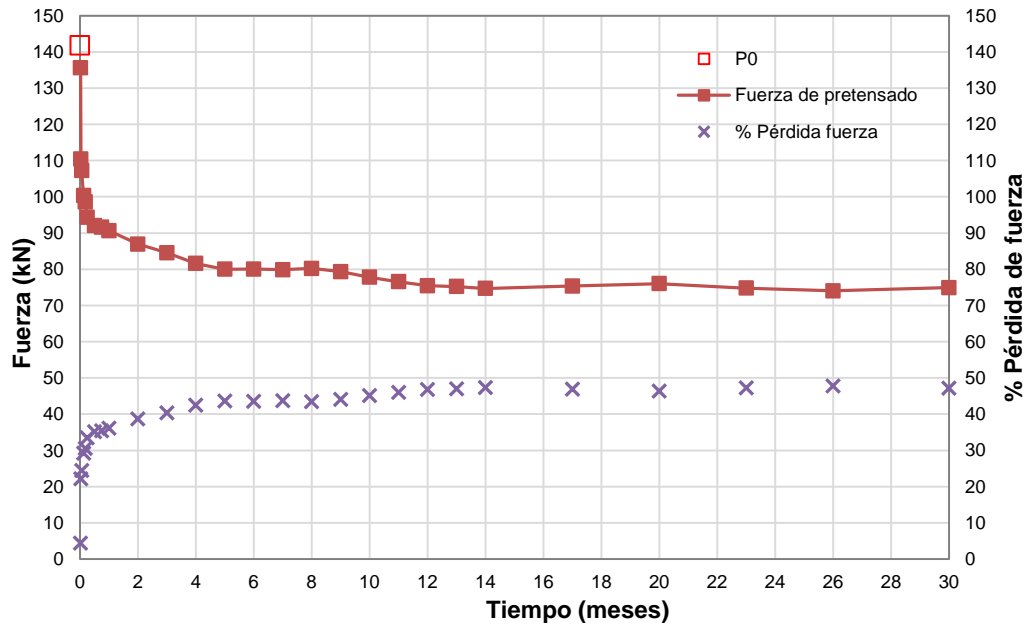


Figura E-39. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta HT-B-100-24-600.

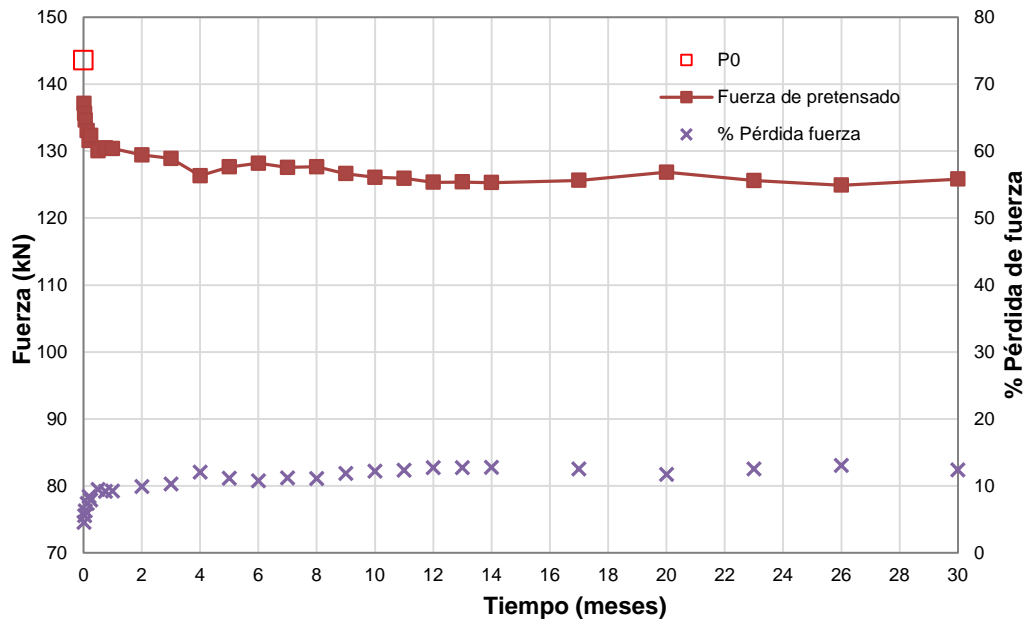


Figura E-40. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta HT-B-100-24-650.

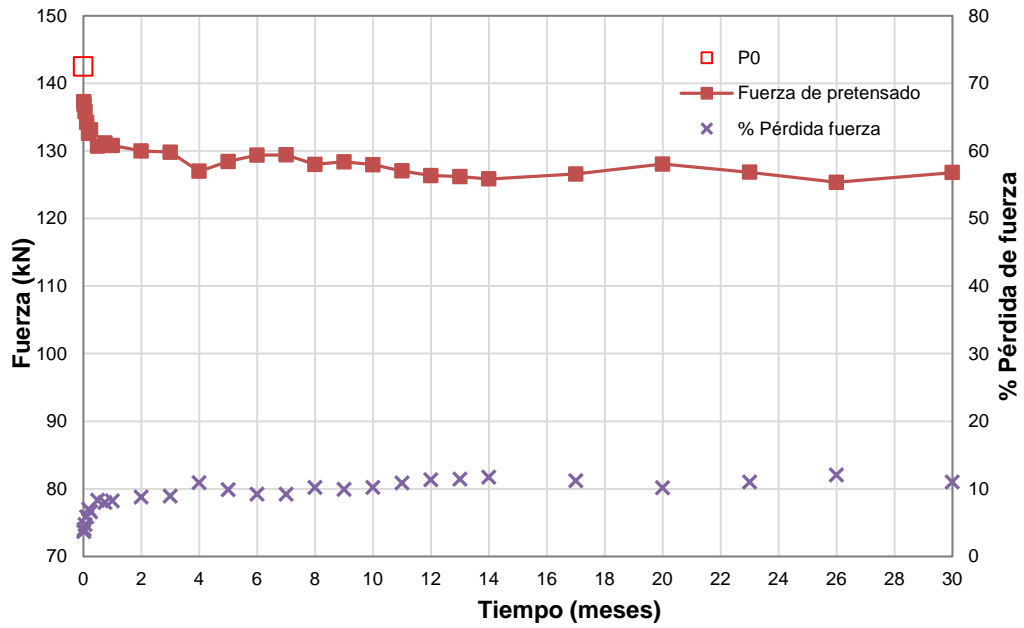


Figura E-41. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta HT-B-100-24-700.

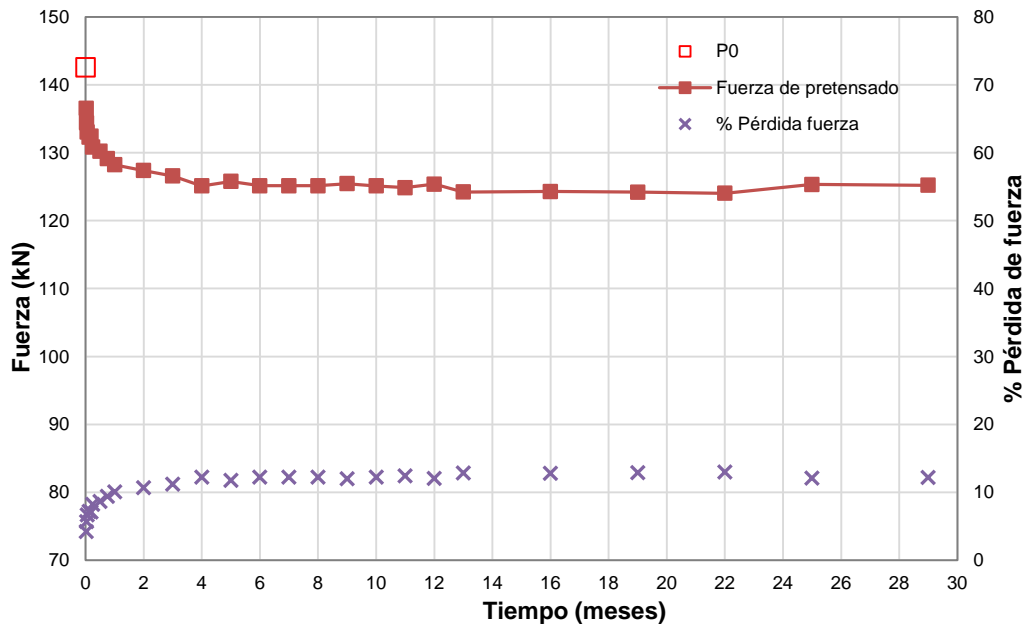


Figura E-42. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta HT-B-100-24-750.

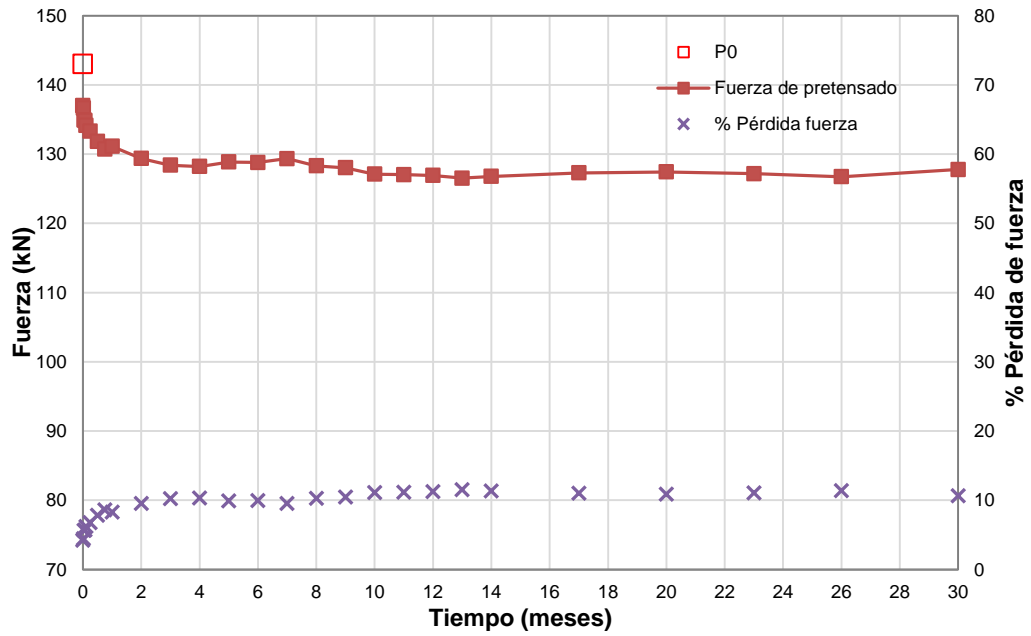


Figura E-43. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
 Probeta HT-B-100-24-LS.

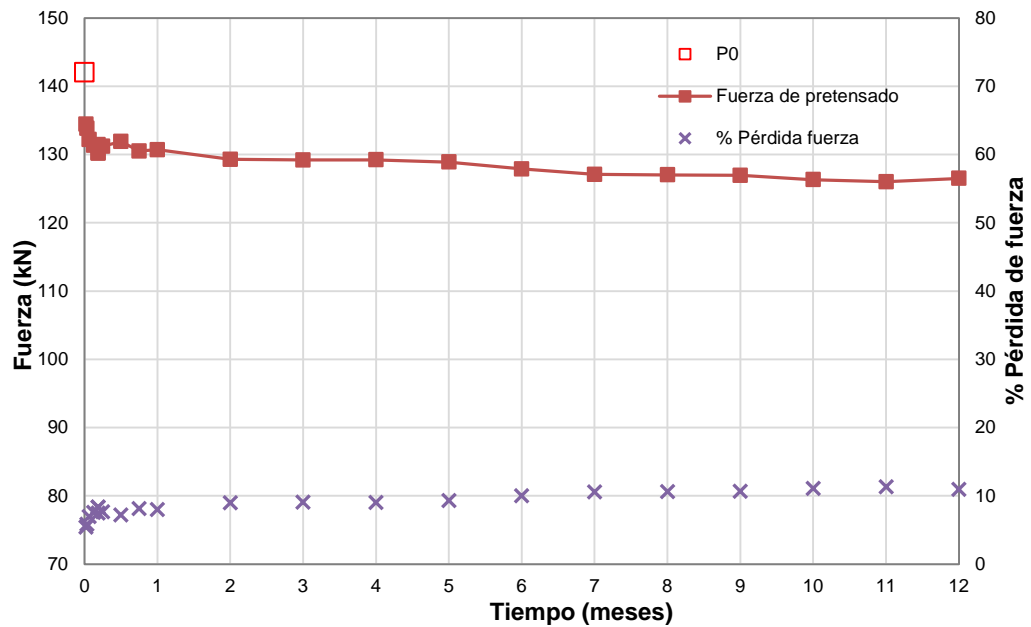


Figura E-44. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
 Probeta HT-B-100-48-650.

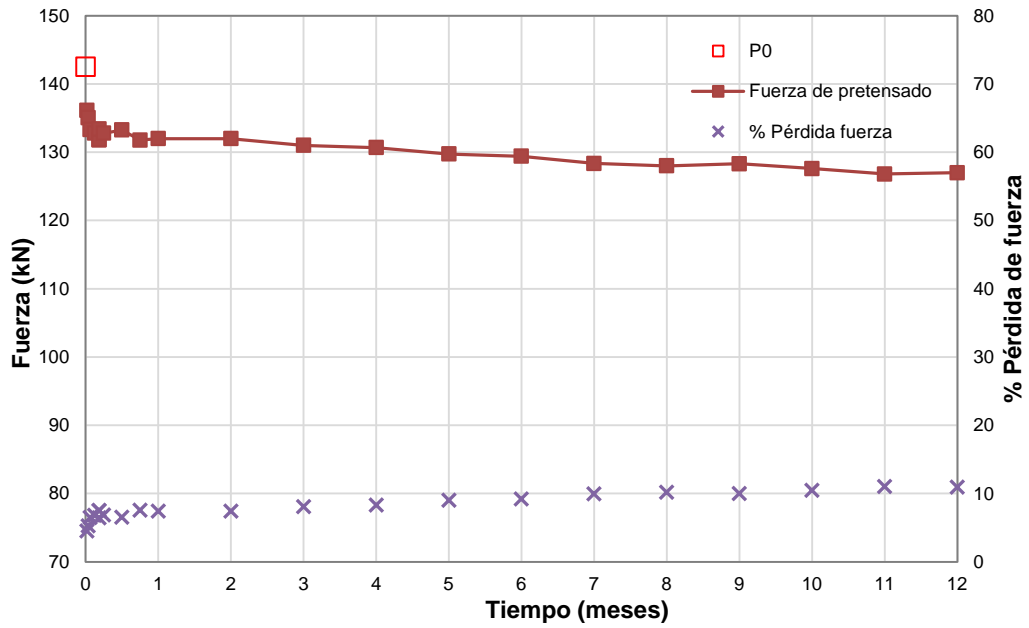


Figura E-45. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta HT-B-100-48-700.

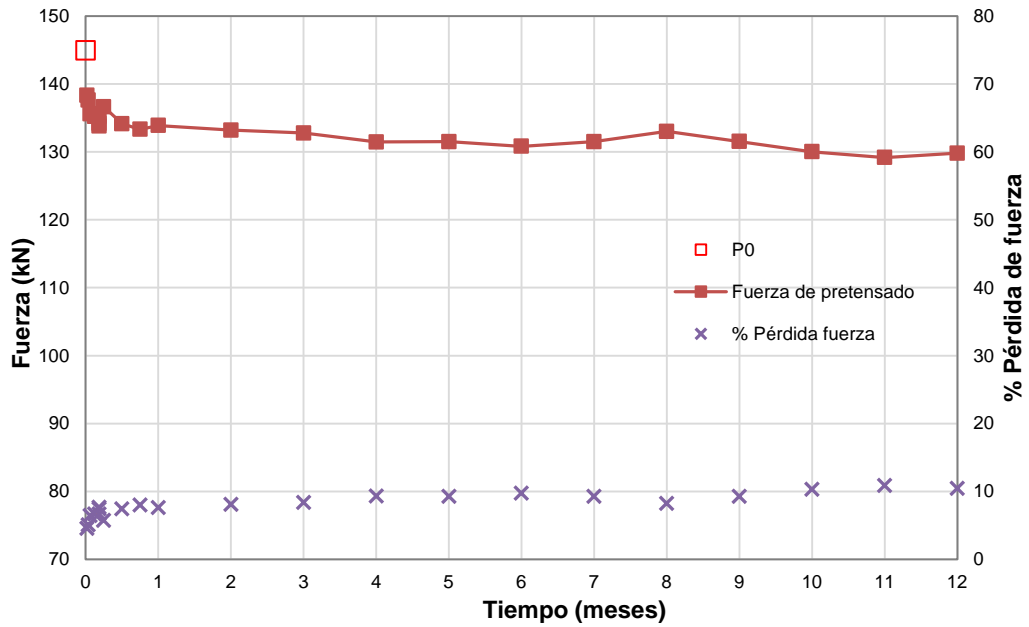


Figura E-46. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta HT-B-100-48-750.

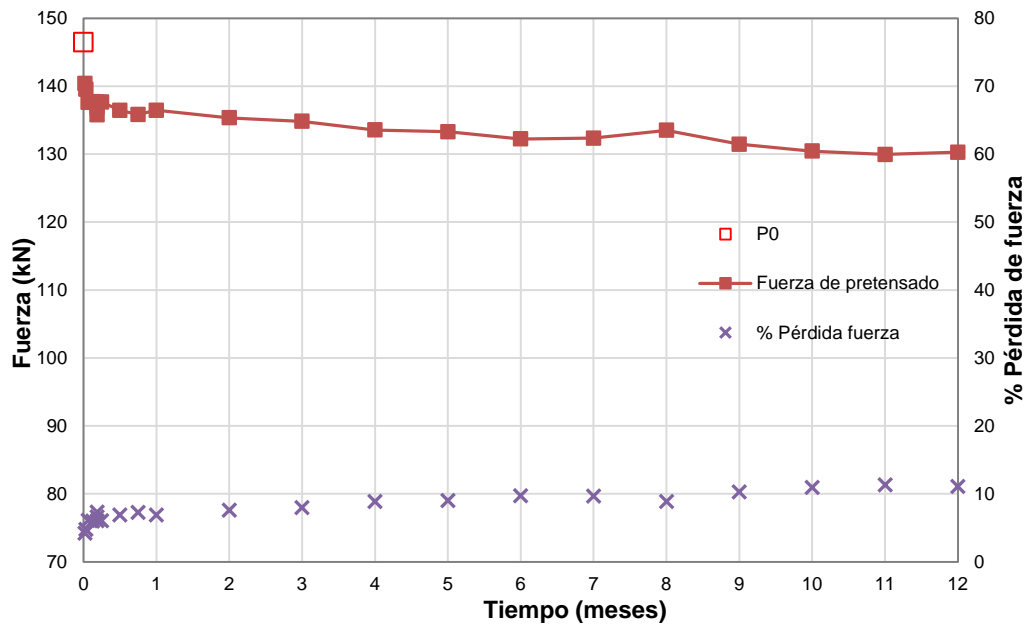


Figura E-47. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
 Probeta HT-B-100-48-800.

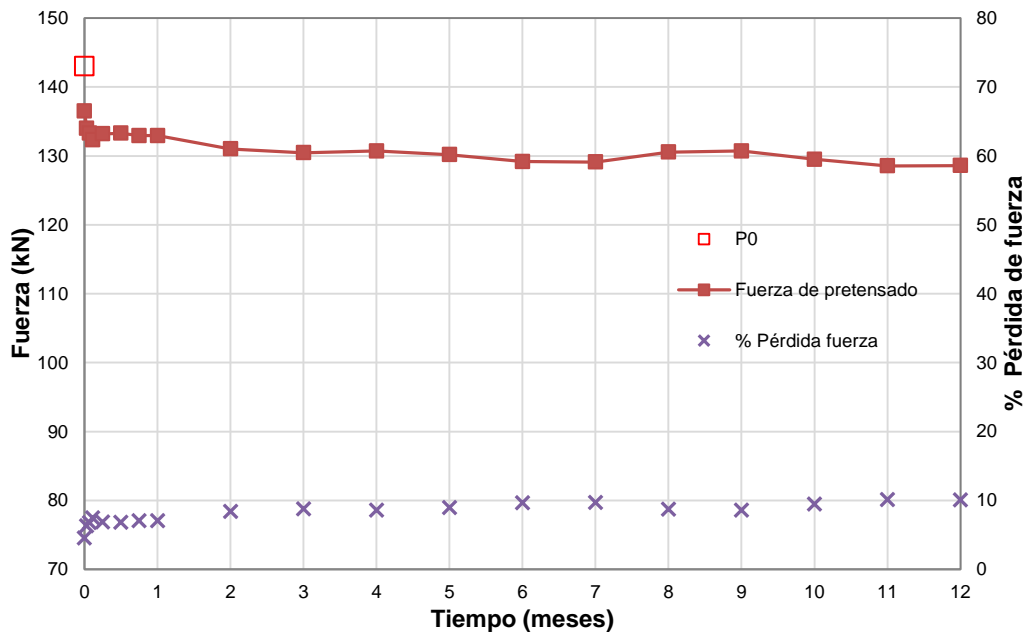


Figura E-48. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
 Probeta HT-B-100-48-LS.

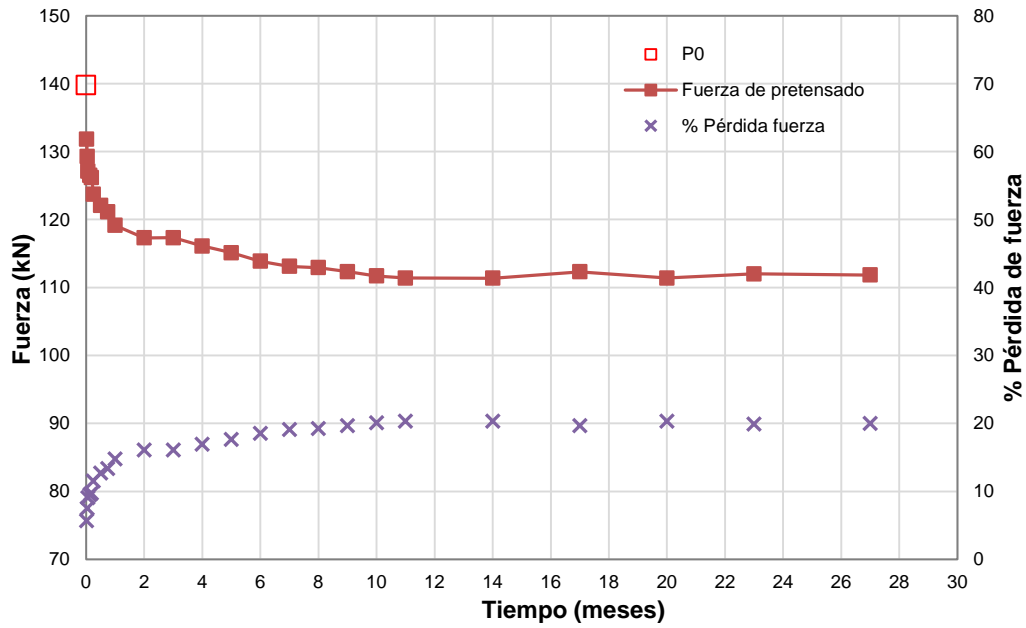


Figura E-49. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta HT-C-80-48-800.

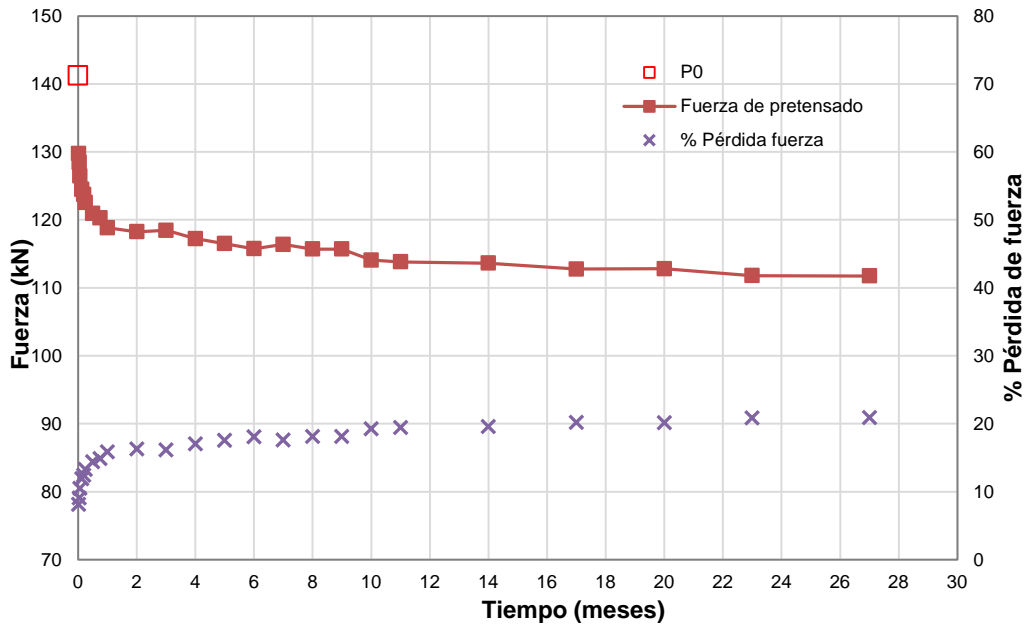


Figura E-50. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta HT-C-80-48-850.



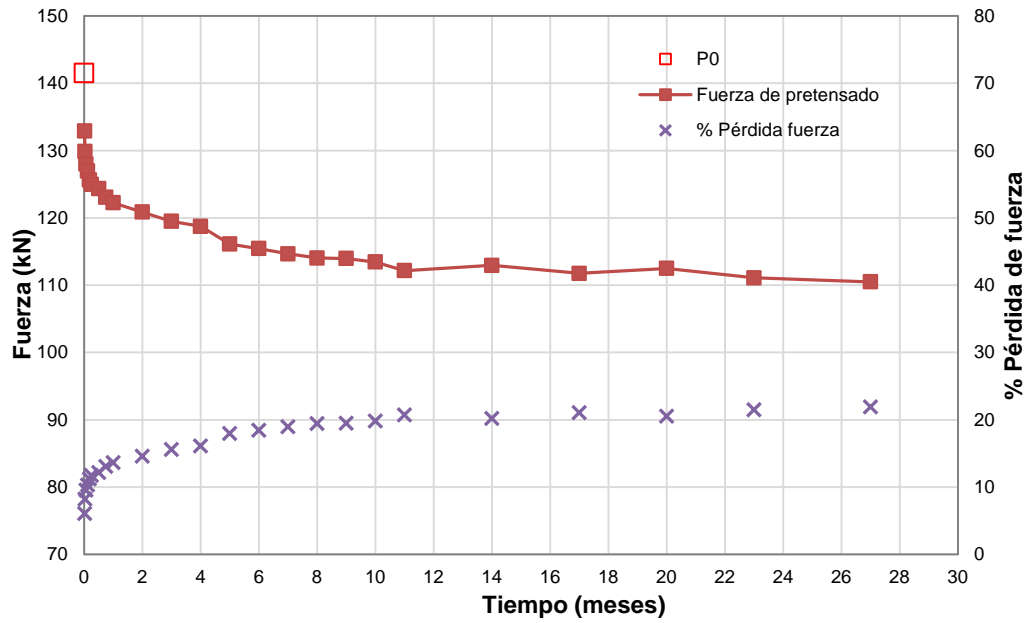


Figura E-51. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta HT-C-80-48-900.

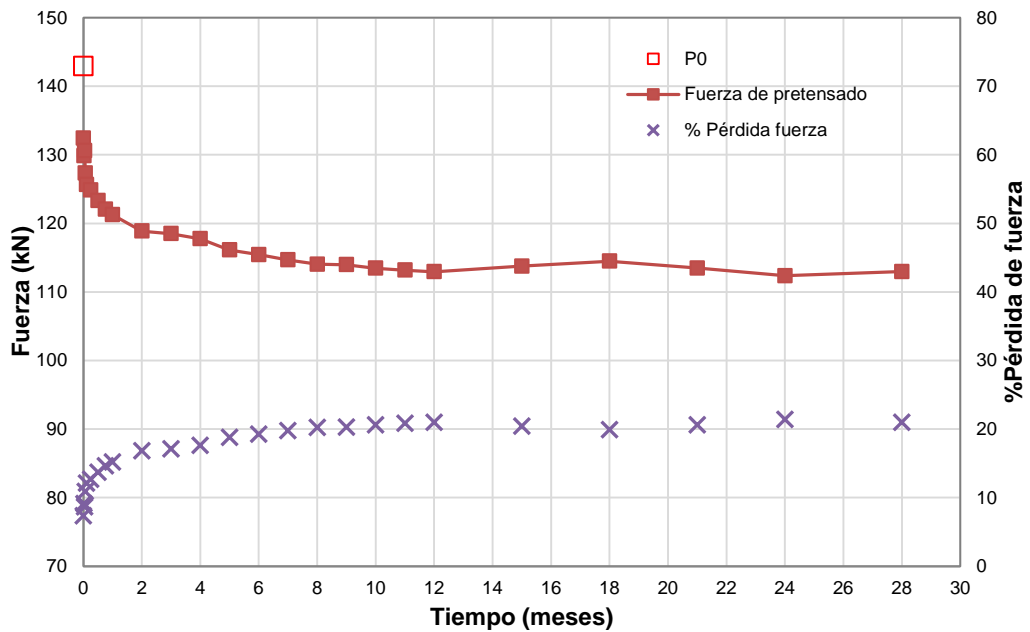


Figura E-52. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta HT-C-80-48-LS.

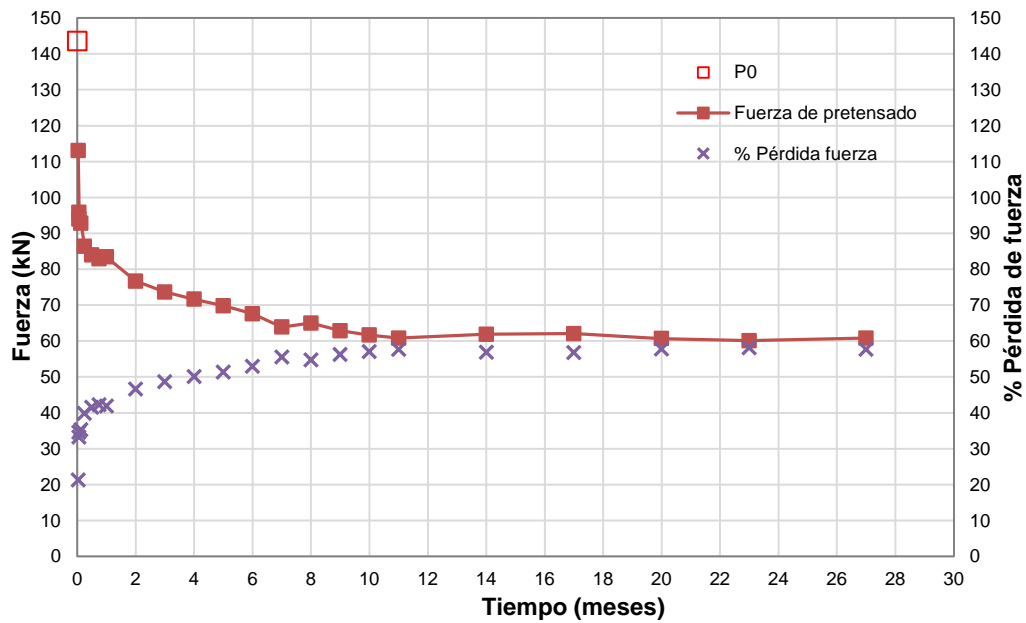


Figura E-53. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta HT-C-100-24-750.

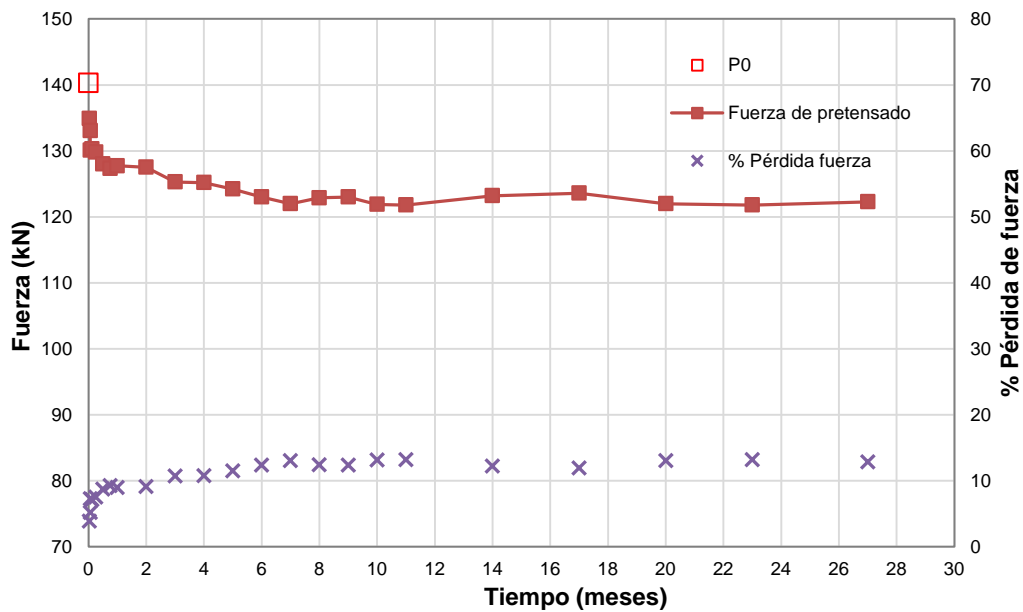


Figura E-54. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta HT-C-100-24-800.

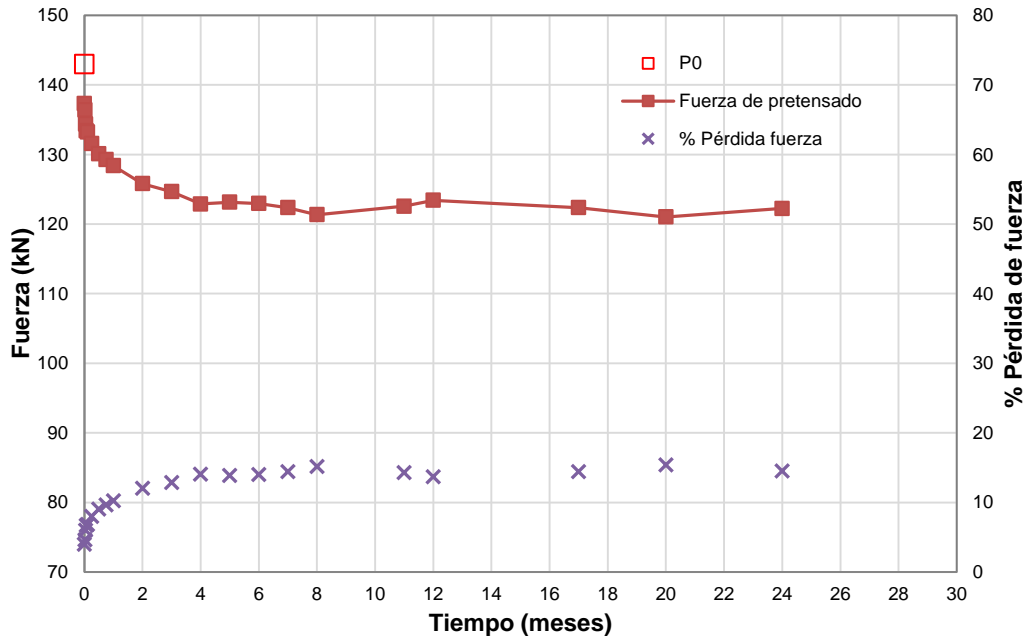


Figura E-55. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta HT-C-100-24-LS.

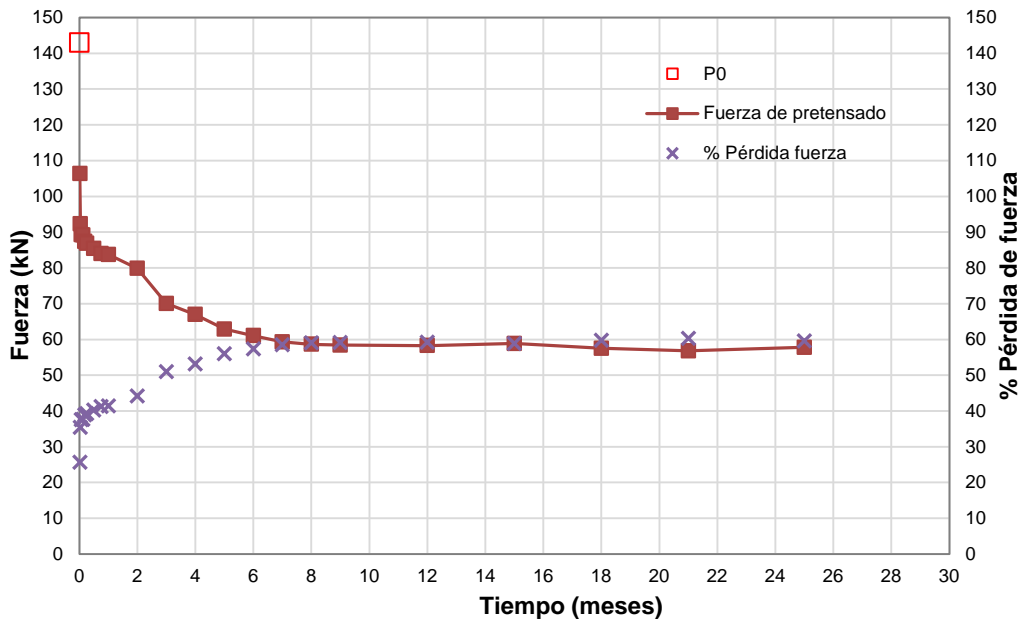


Figura E-56. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta HT-C-100-48-600.

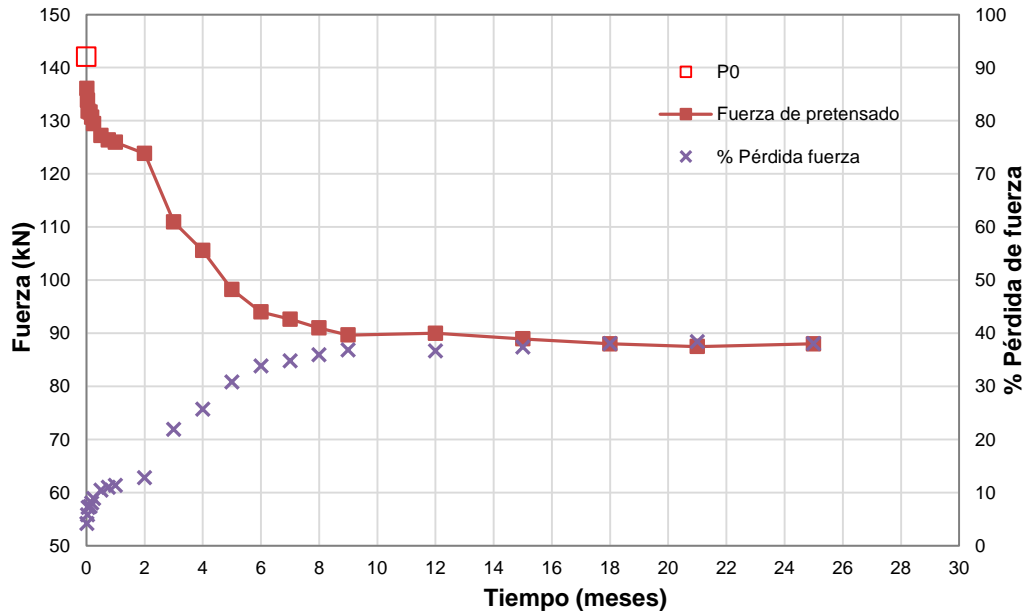


Figura E-57. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
 Probeta HT-C-100-48-650.

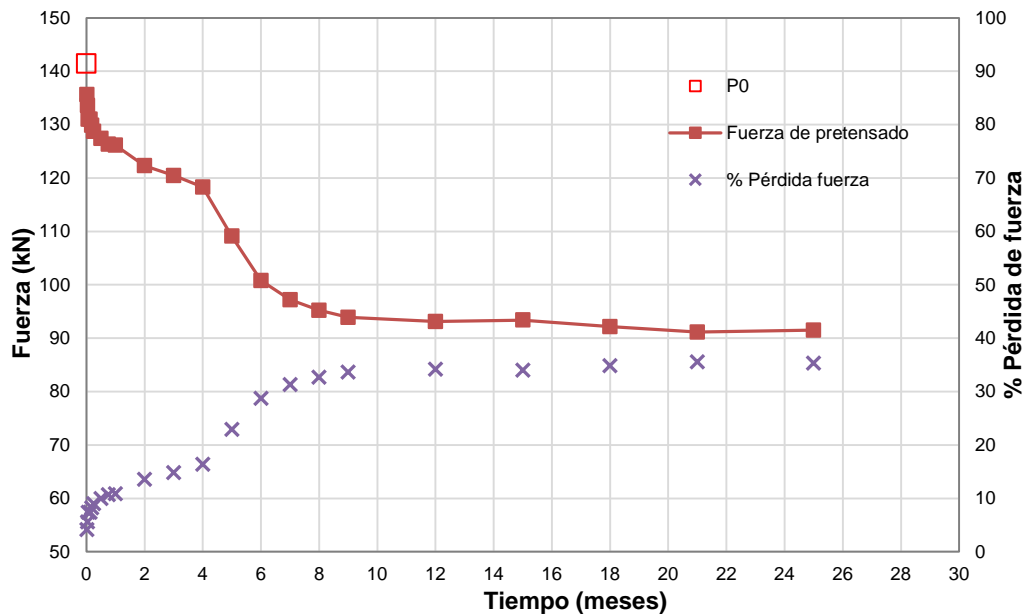


Figura E-58. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
 Probeta HT-C-100-48-700.

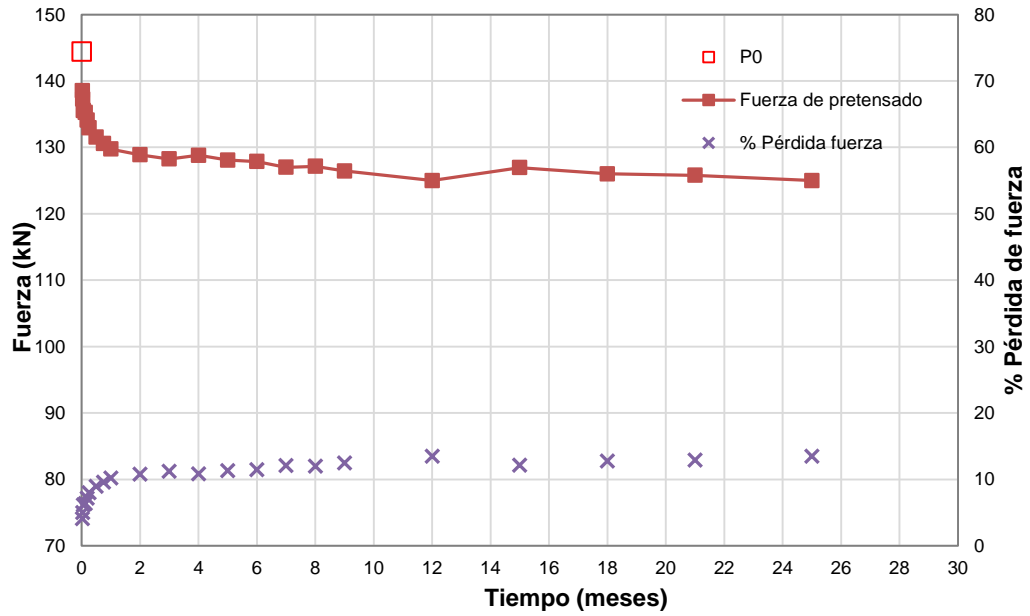


Figura E-59. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta HT-C-100-48-750.

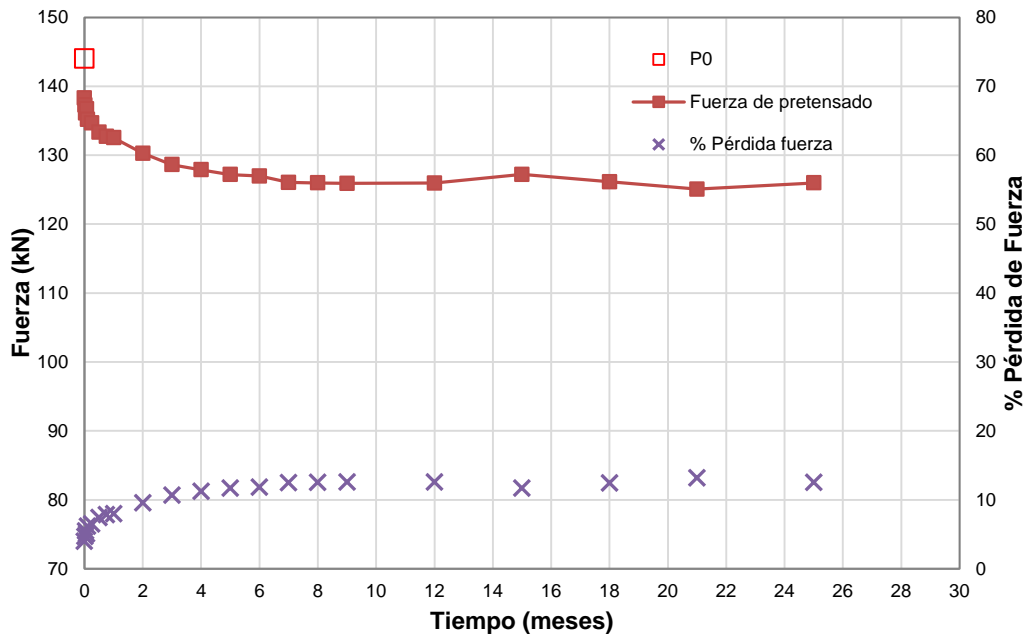


Figura E-60. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta HT-C-100-48-LS.

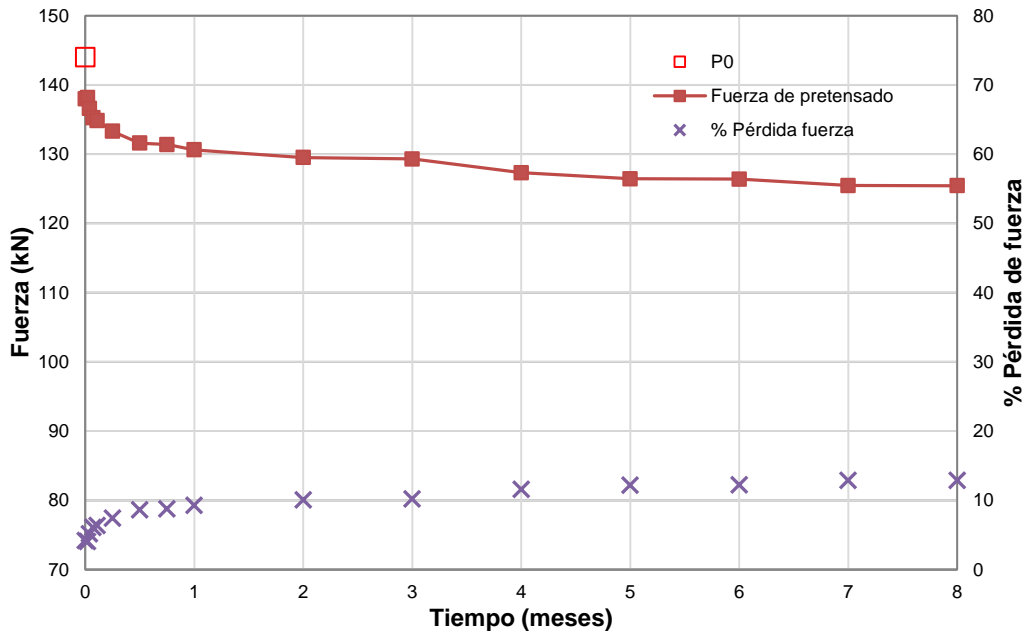


Figura E-61. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta HR-100-48-LS.

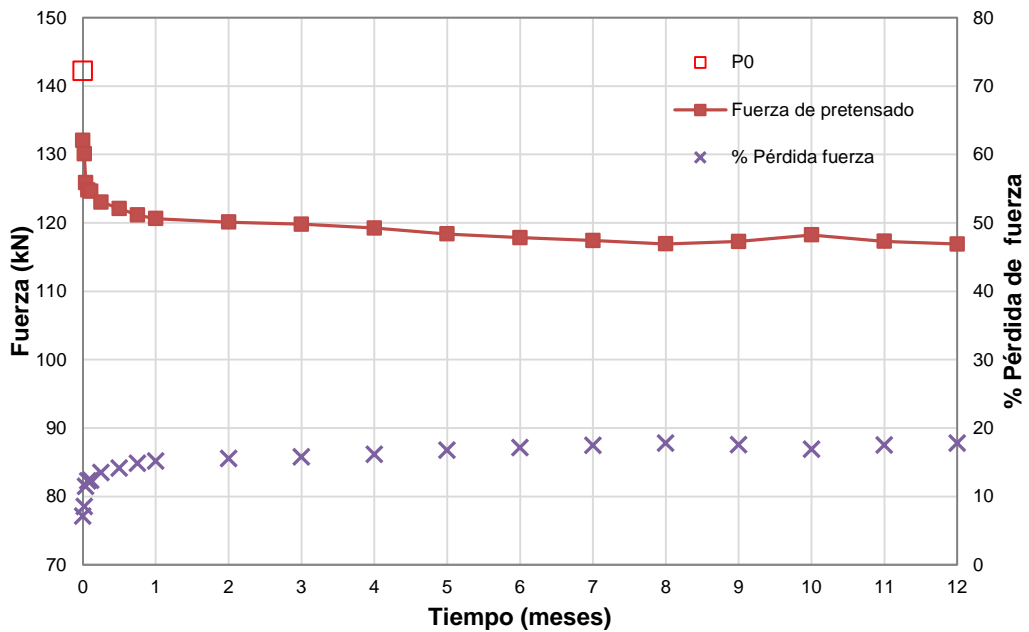


Figura E-62. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta FA-600-24-LS.

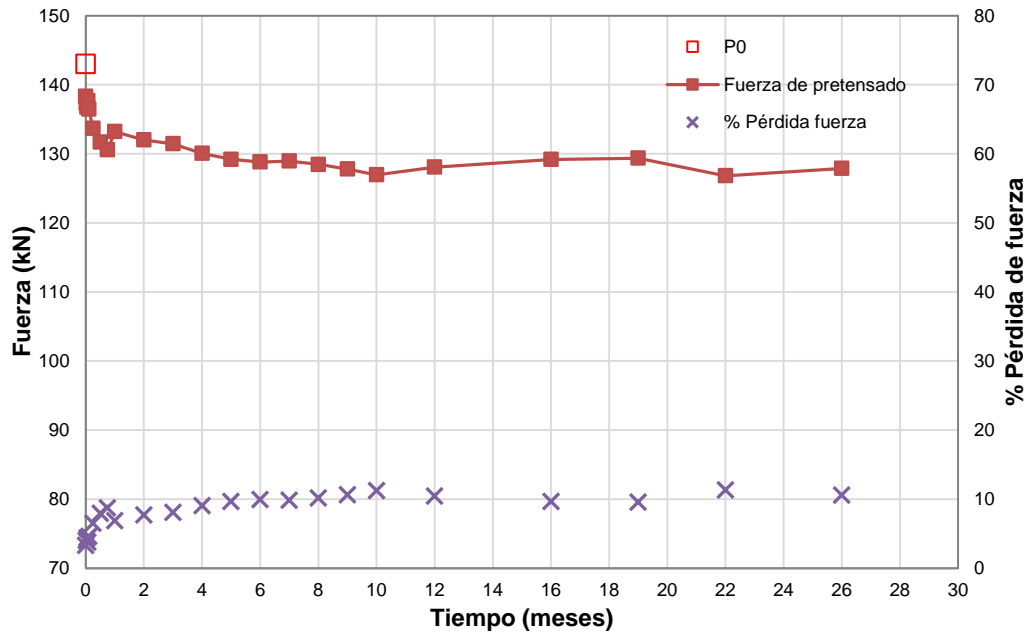


Figura E-63. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta HAC-NF-100-48-LS.

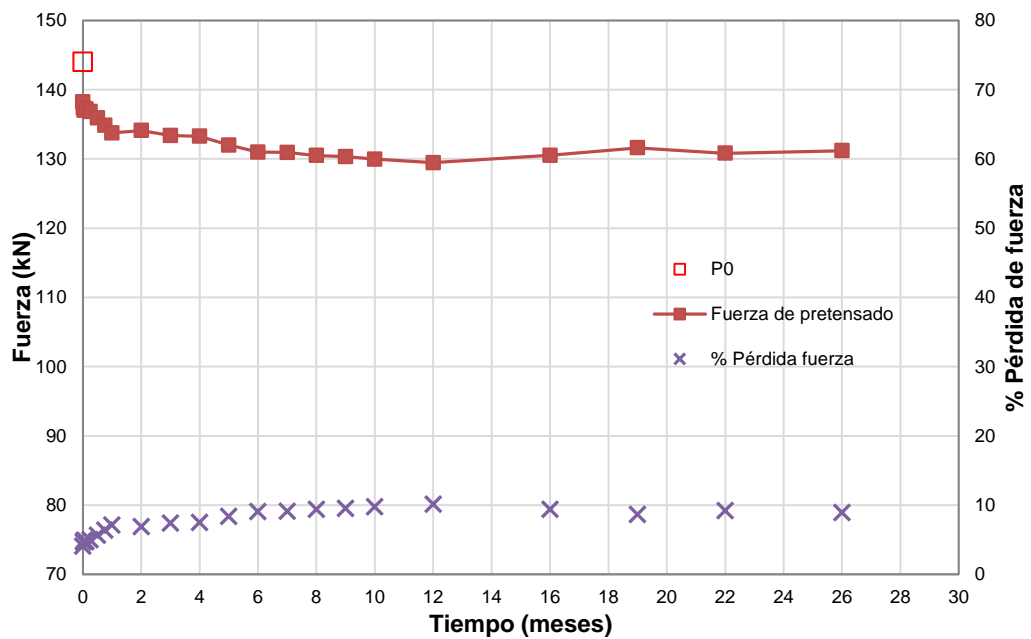


Figura E-64. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
Probeta HAC-LF-100-48-LS.

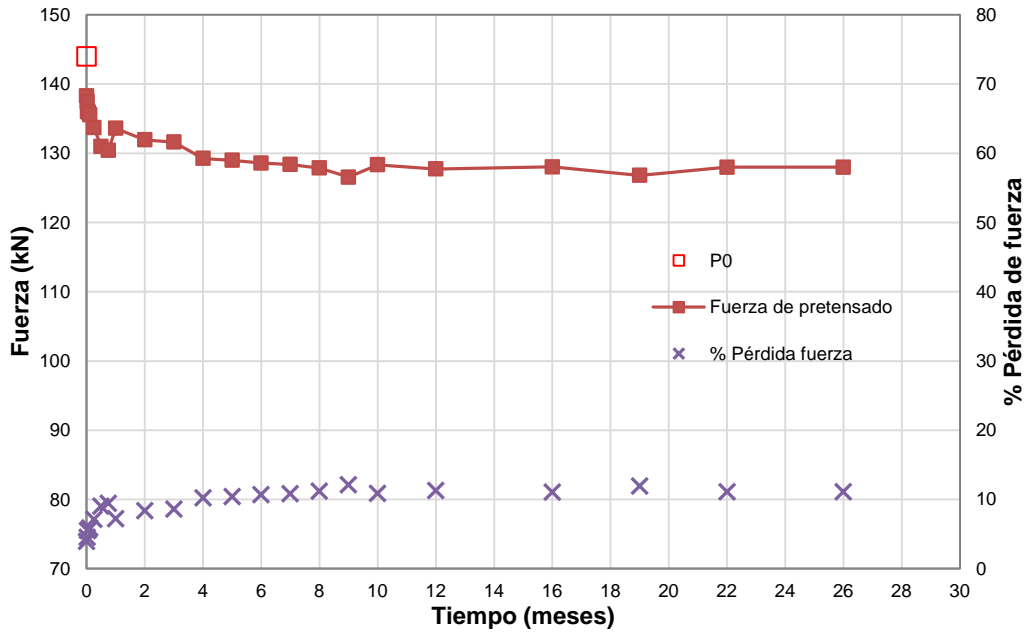


Figura E-65. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
 Probeta HAC-MF-100-48-LS.

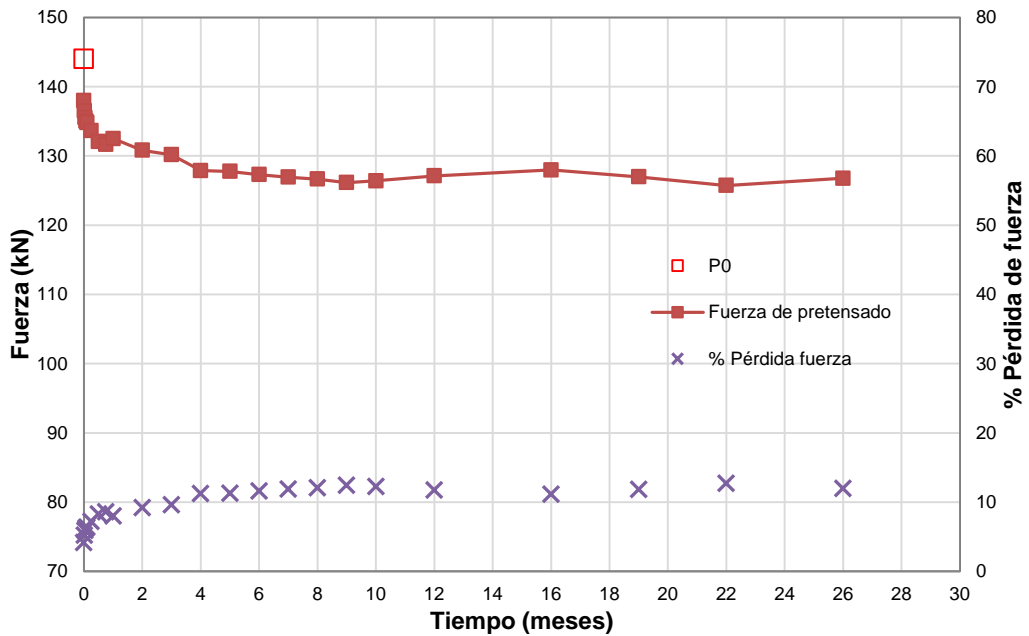


Figura E-66. Fuerza de pretensado y % de pérdidas.  
 Probeta HAC-HF-100-48-LS.



ANEJO F. PÉRDIDAS DE PRETENSADO (SERIES)

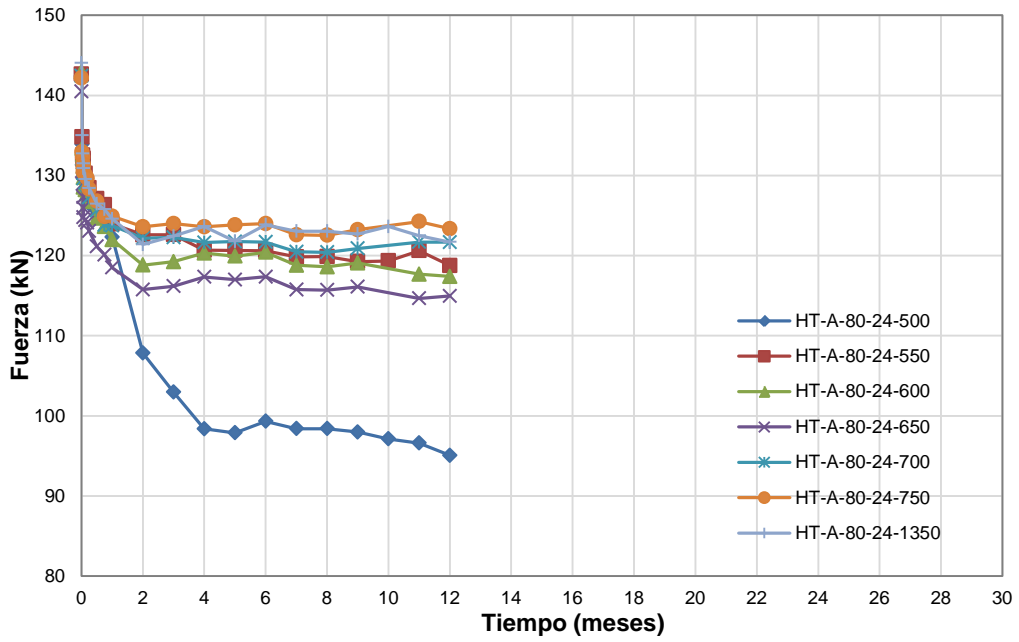


Figura F-1. Fuerza de pretensado vs. Tiempo. Serie de probetas HT-A-80-24.

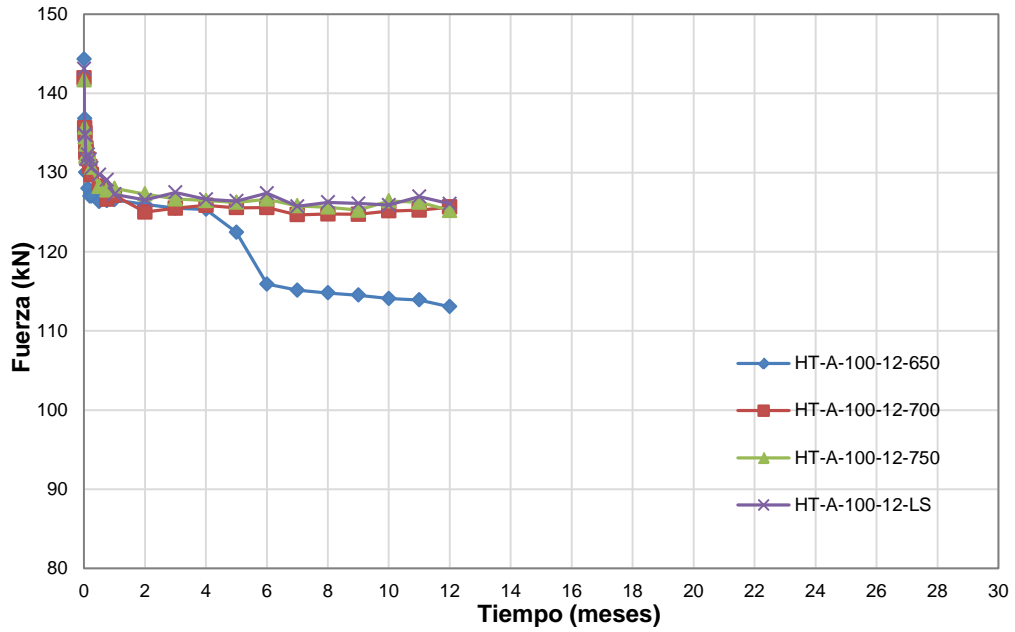


Figura F-2. Fuerza de pretensado vs. Tiempo. Serie de probetas HT-A-100-12.

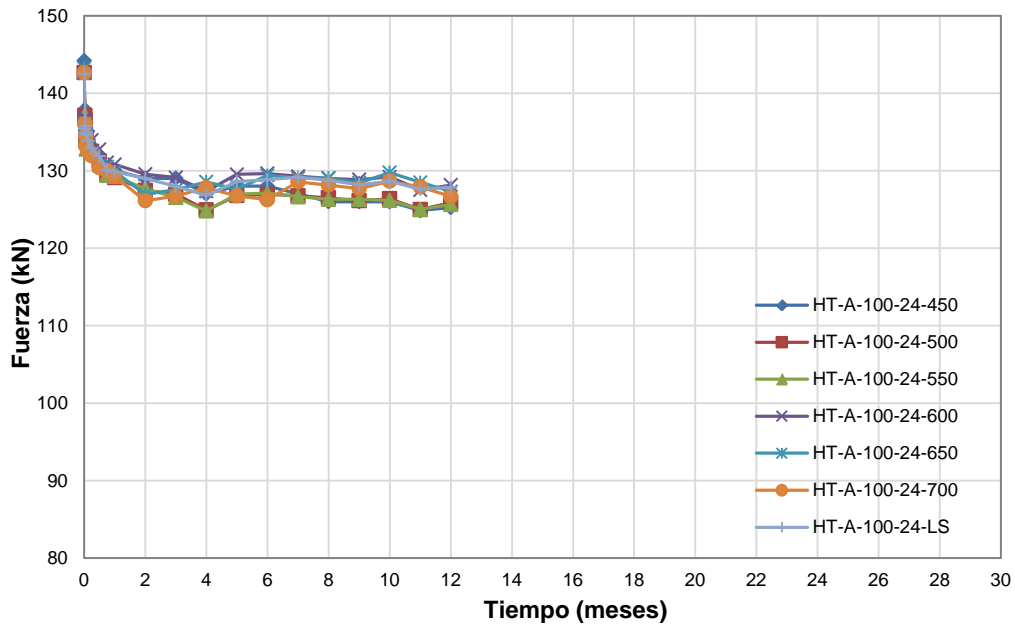


Figura F-3. Fuerza de pretensado vs. Tiempo. Serie de probetas HT-A-100-24.

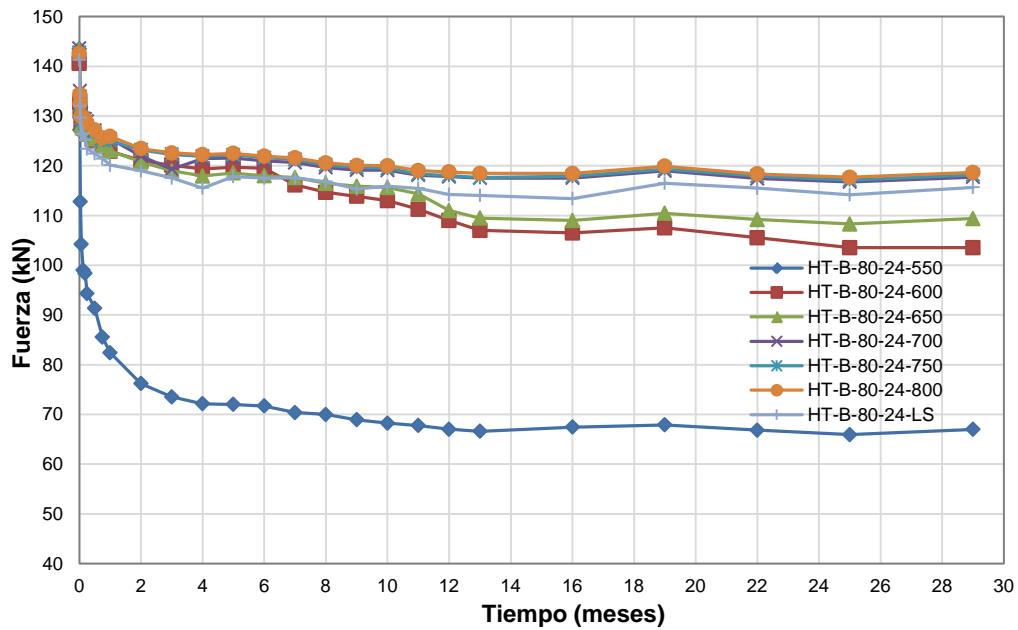


Figura F-4. Fuerza de pretensado vs. Tiempo. Serie de probetas HT-B-80-24.

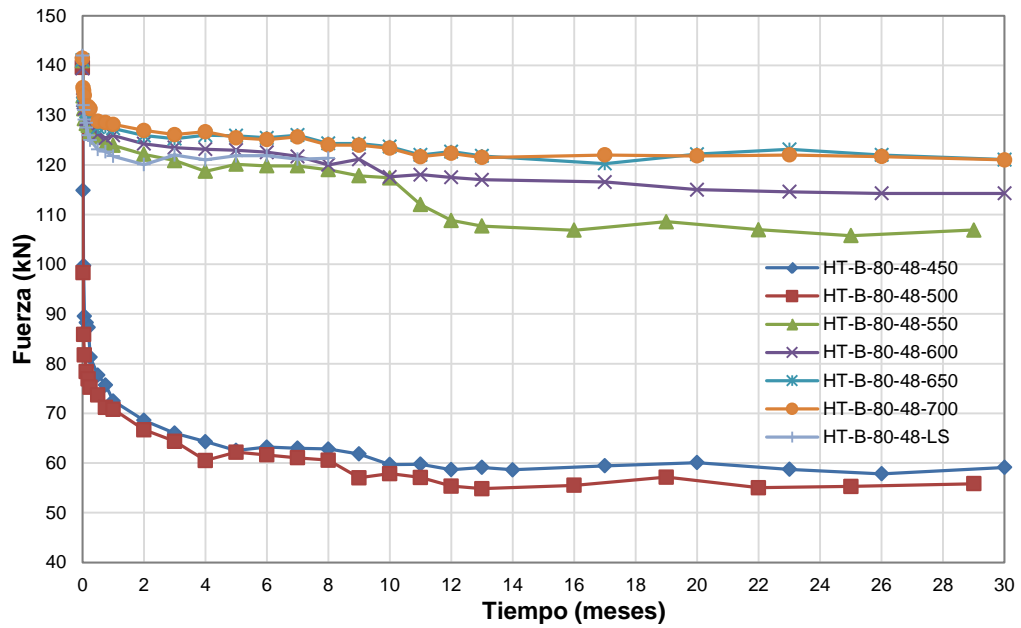


Figura F-5. Fuerza de pretensado vs. Tiempo. Serie de probetas HT-B-80-48.

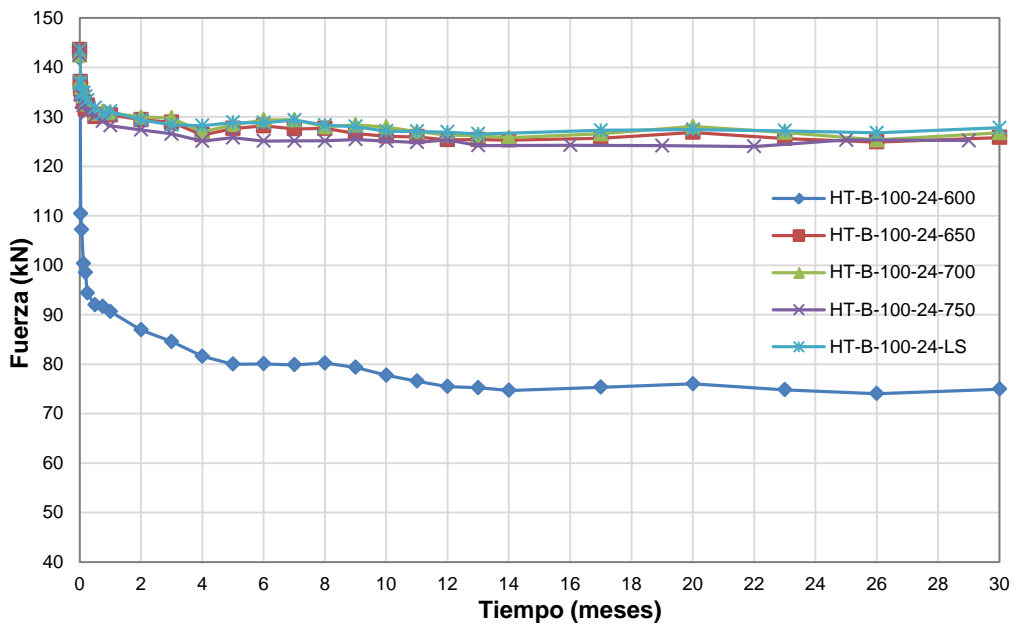


Figura F-6. Fuerza de pretensado vs. Tiempo. Serie de probetas HT-B-100-24.

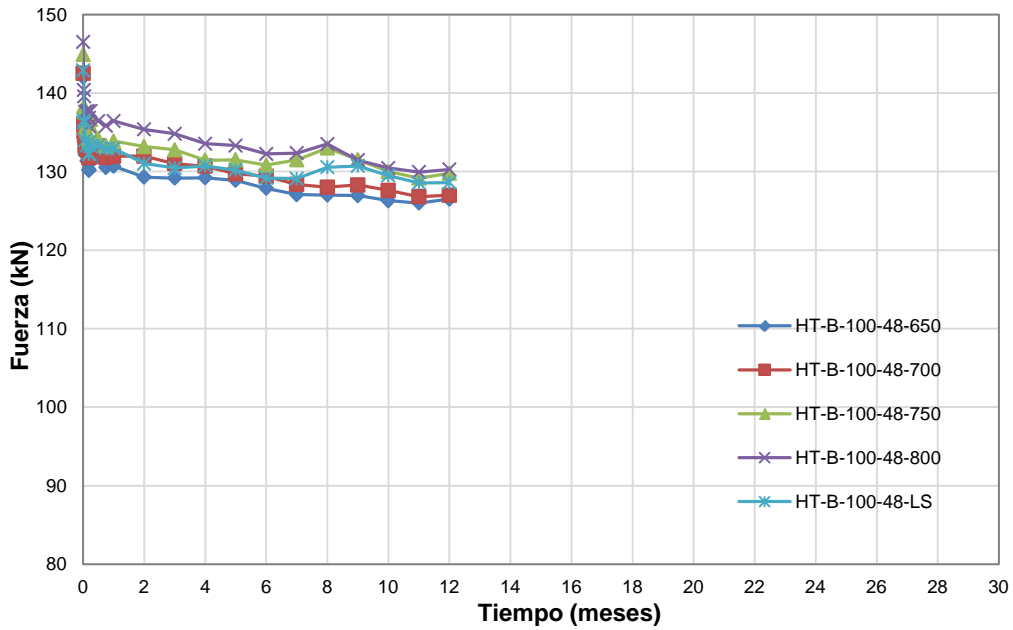


Figura F-7. Fuerza de pretensado vs. Tiempo. Serie de probetas HT-B-100-48.

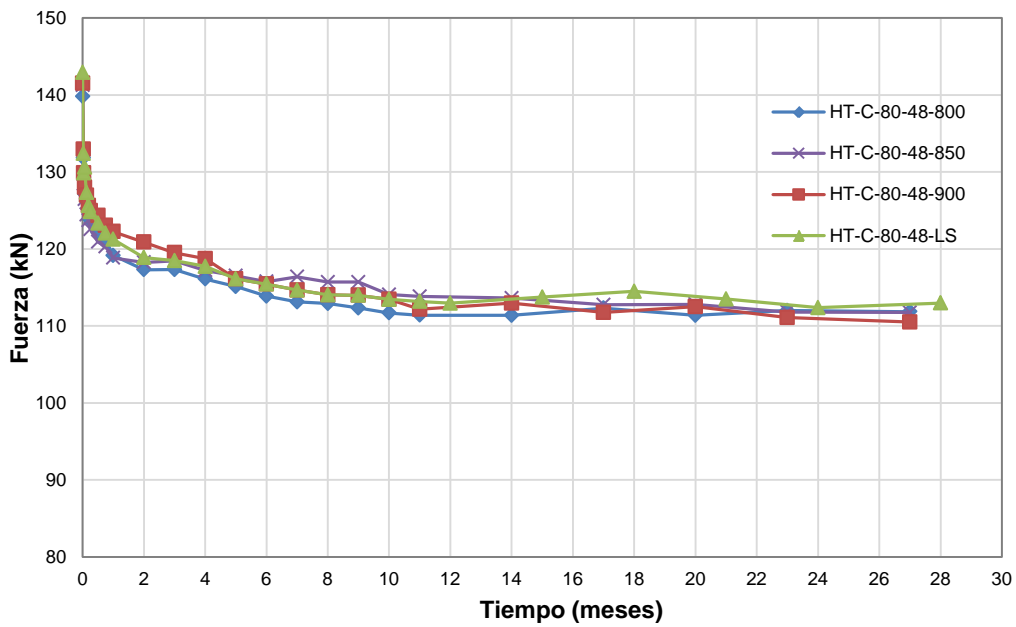


Figura F-8. Fuerza de pretensado vs. Tiempo. Serie de probetas HT-C-80-48.

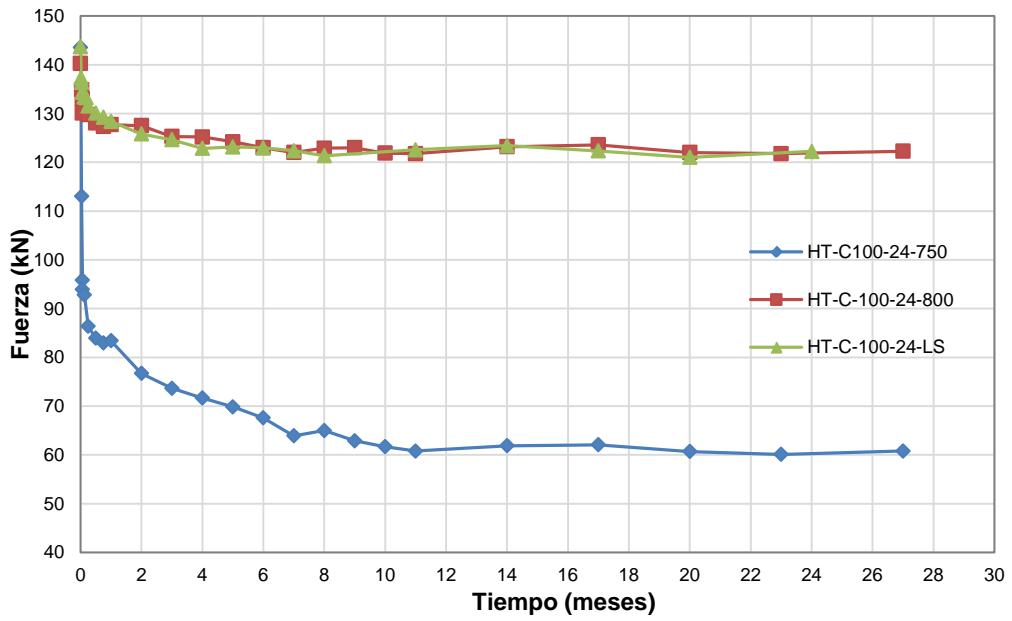


Figura F-9. Fuerza de pretensado vs. Tiempo. Serie de probetas HT-C-100-24.

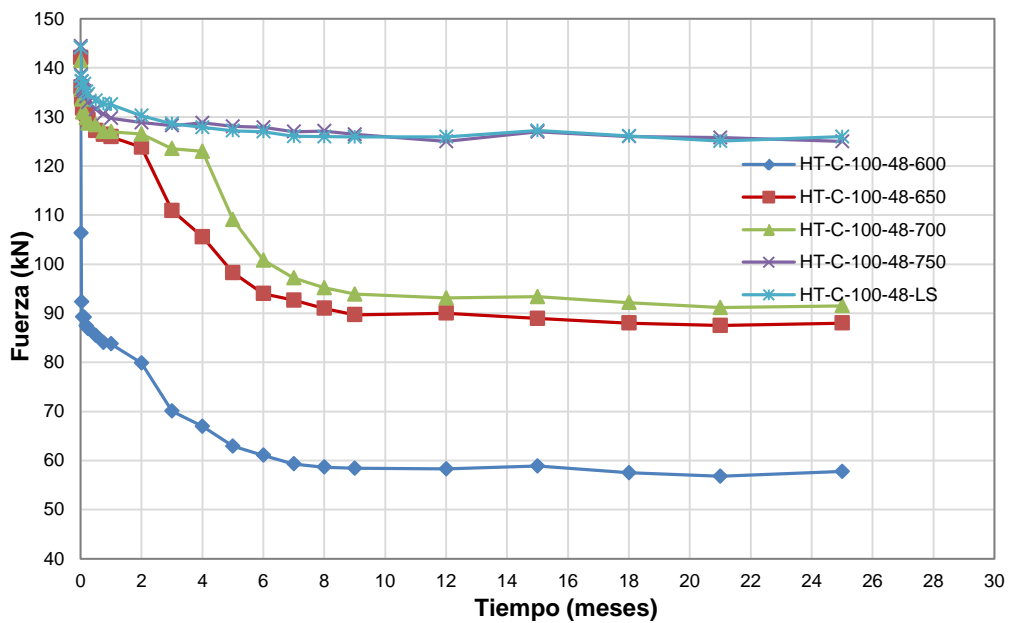
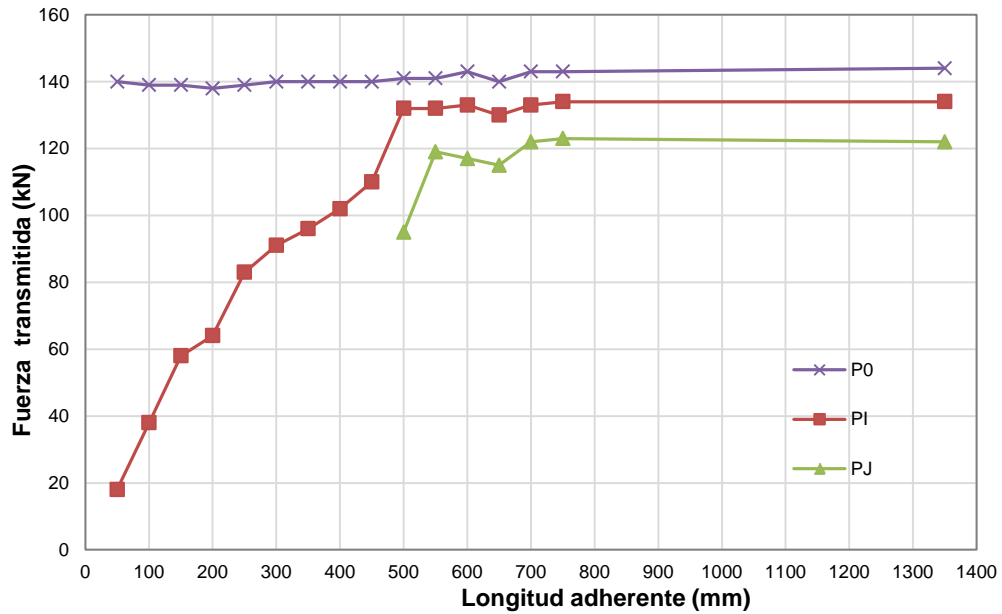


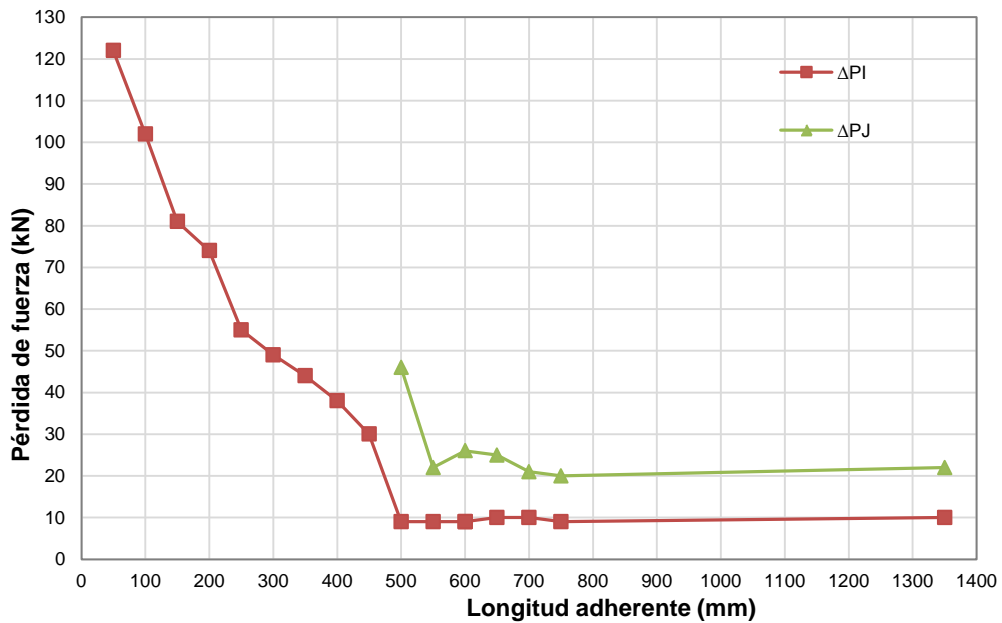
Figura F-10. Fuerza de pretensado vs. Tiempo. Serie de probetas HT-C-100-48.

(Esta página se ha dejado intencionalmente en blanco)

**ANEJO G. LONGITUD DE TRANSMISIÓN DIFERIDA.  
MÉTODO DE FUERZAS (ECADA+)**



**Figura G-1.1.** Longitud de transmisión diferida por el método de fuerza transmitida. Fuerza transmitida vs. Longitud adherente. Serie HT-A-80-24.



**Figura G-1.2.** Longitud de transmisión diferida por el método de pérdida de fuerza. Pérdida de fuerza vs. Longitud adherente. Serie HT-A-80-24.

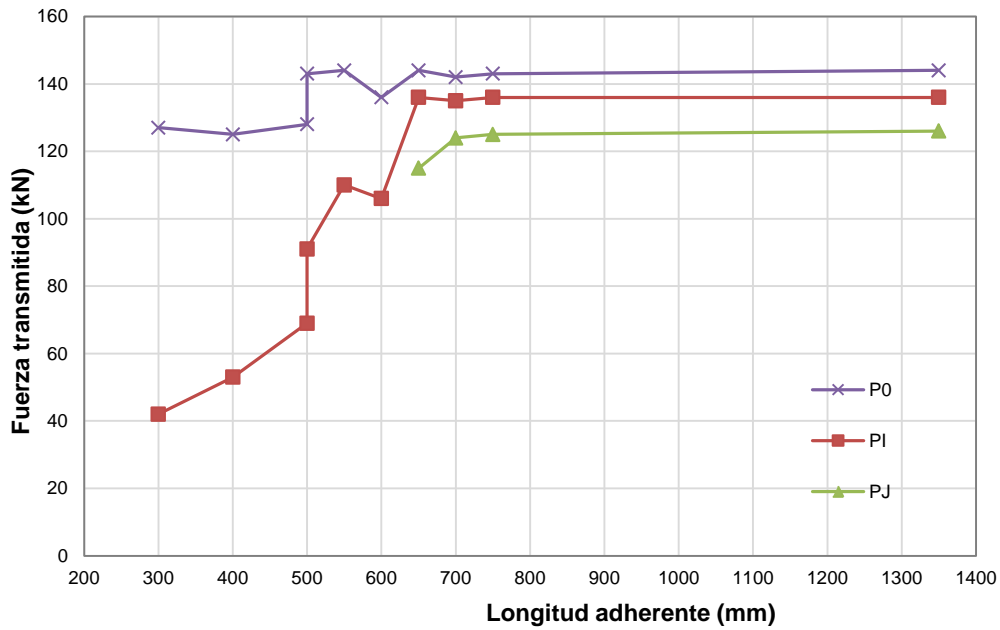


Figura G-2.1. Longitud de transmisión diferida por el método de fuerza transmitida. Fuerza transmitida vs. Longitud adherente. Serie HT-A-100-12.

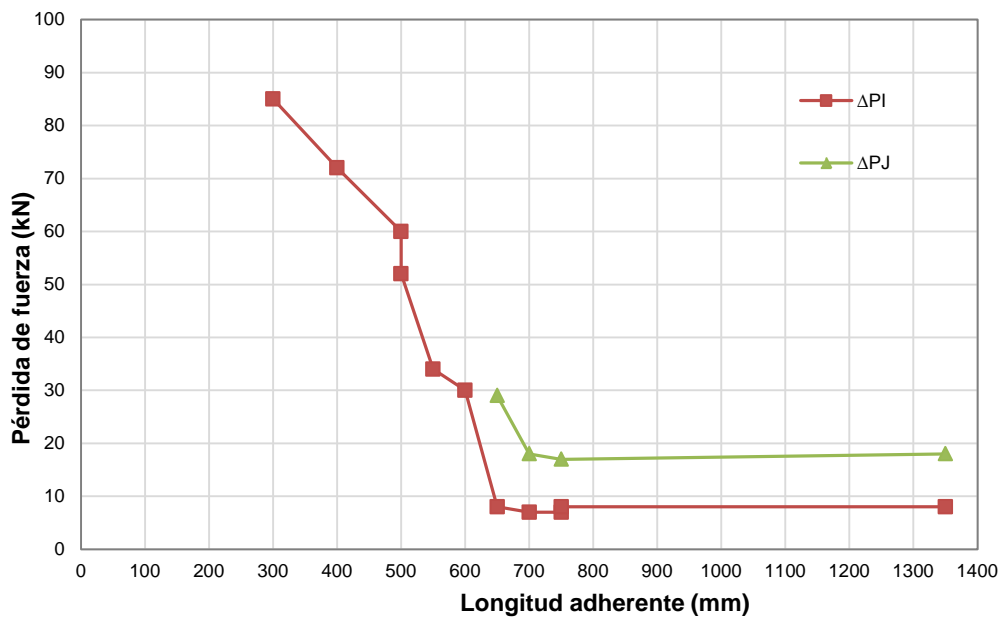


Figura G-2.2. Longitud de transmisión diferida por el método de pérdida de fuerza. Pérdida de fuerza vs. Longitud adherente. Serie HT-A-100-12.



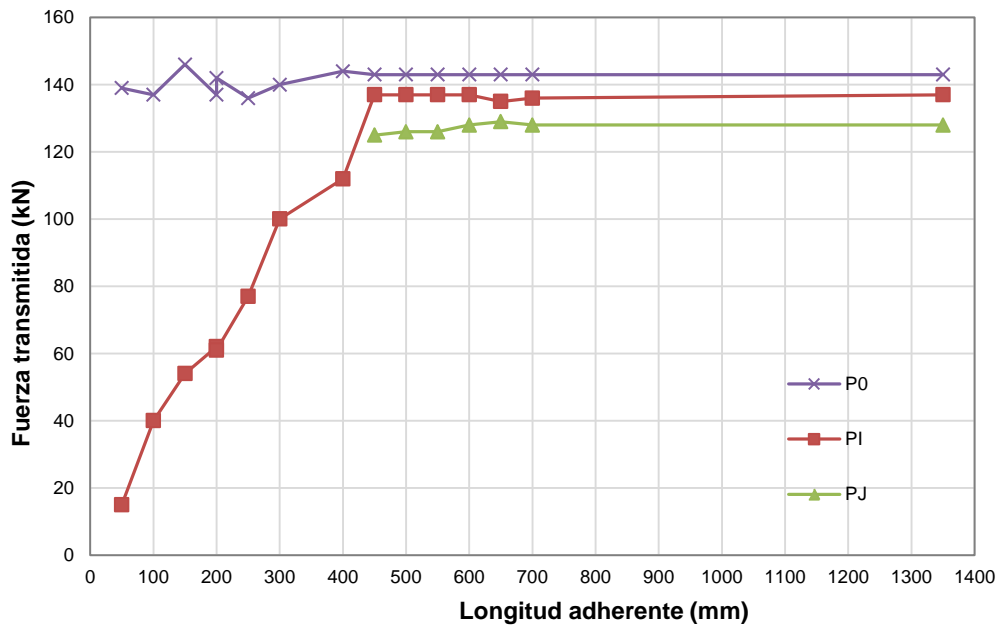


Figura G-3.1. Longitud de transmisión diferida por el método de fuerza transmitida. Fuerza transmitida vs. Longitud adherente. Serie HT-A-100-24.

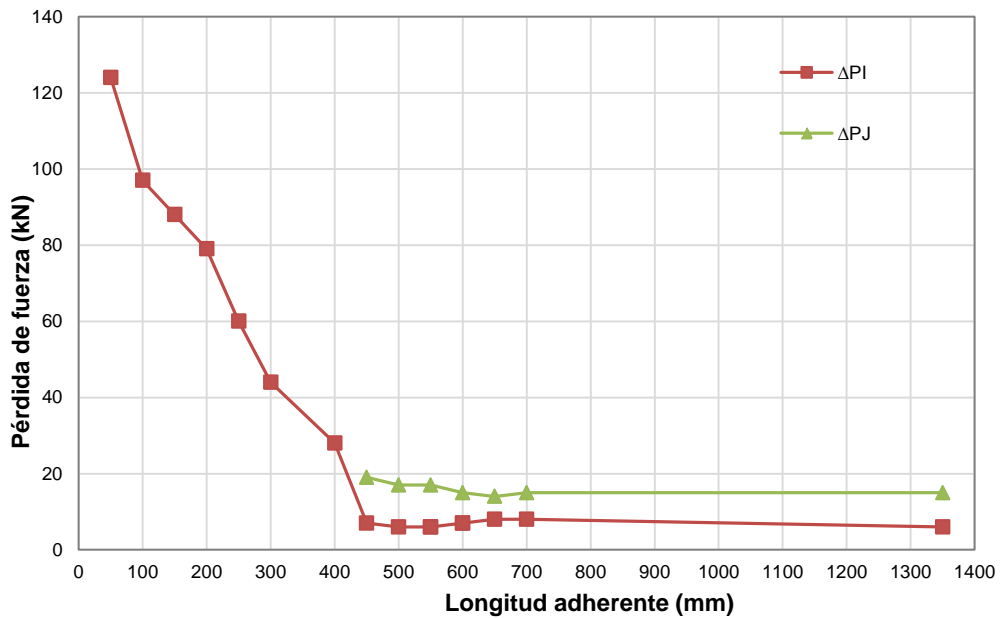


Figura G-3.2. Longitud de transmisión diferida por el método de pérdida de fuerza. Pérdida de fuerza vs. Longitud adherente. Serie HT-A-100-24.

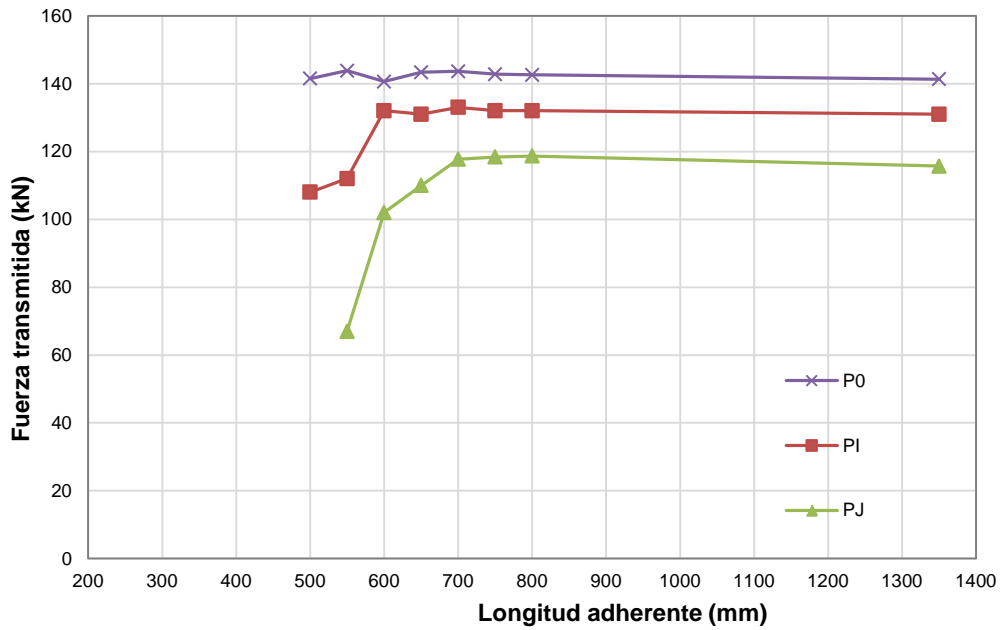


Figura G-4.1. Longitud de transmisión diferida por el método de fuerza transmitida. Fuerza transmitida vs. Longitud adherente. Serie HT-B-80-24.

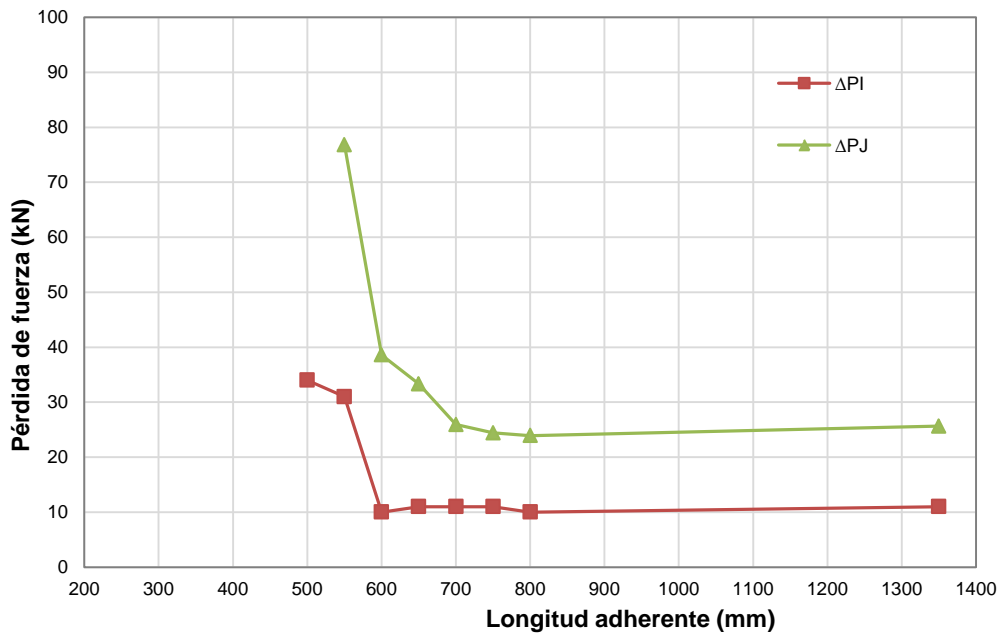


Figura G-4.2. Longitud de transmisión diferida por el método de pérdida de fuerza. Pérdida de fuerza vs. Longitud adherente. Serie HT-B-80-24.

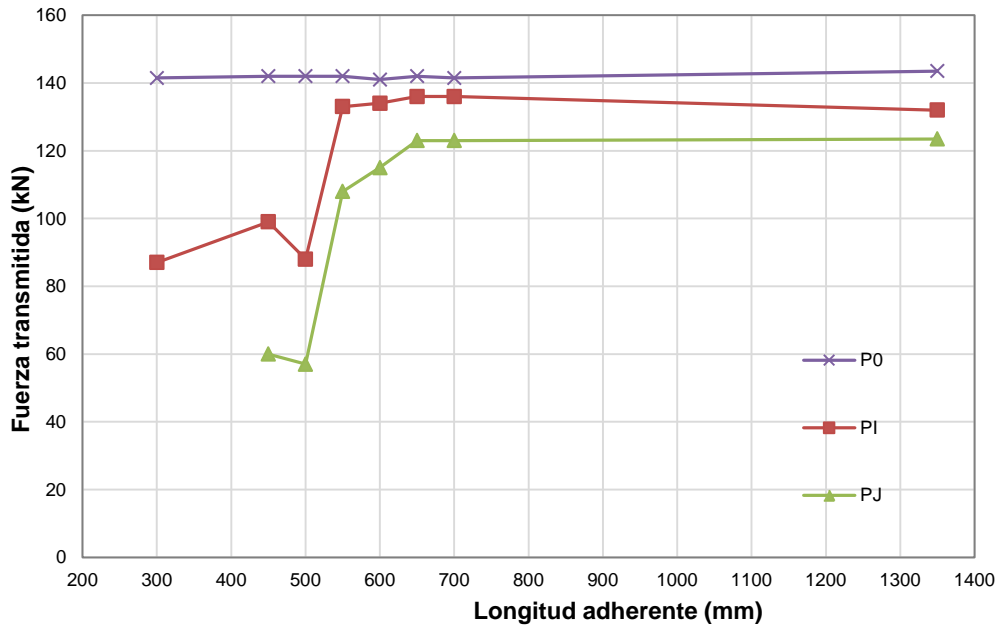


Figura G-5.1. Longitud de transmisión diferida por el método de fuerza transmitida. Fuerza transmitida vs. Longitud adherente. Serie HT-B-80-48.

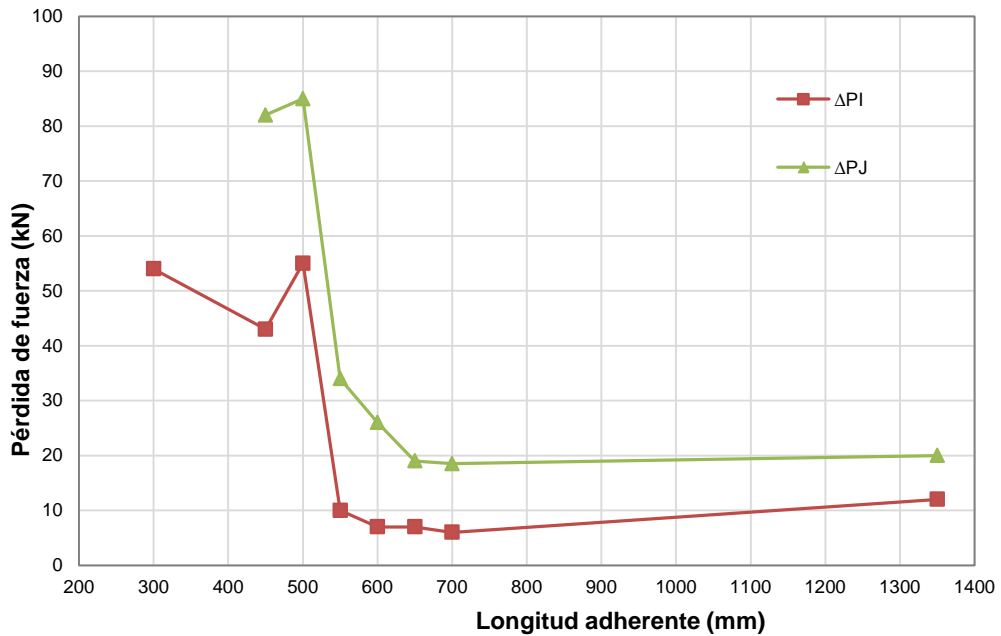


Figura G-5.2. Longitud de transmisión diferida por el método de pérdida de fuerza. Pérdida de fuerza vs. Longitud adherente. Serie HT-B-80-48.

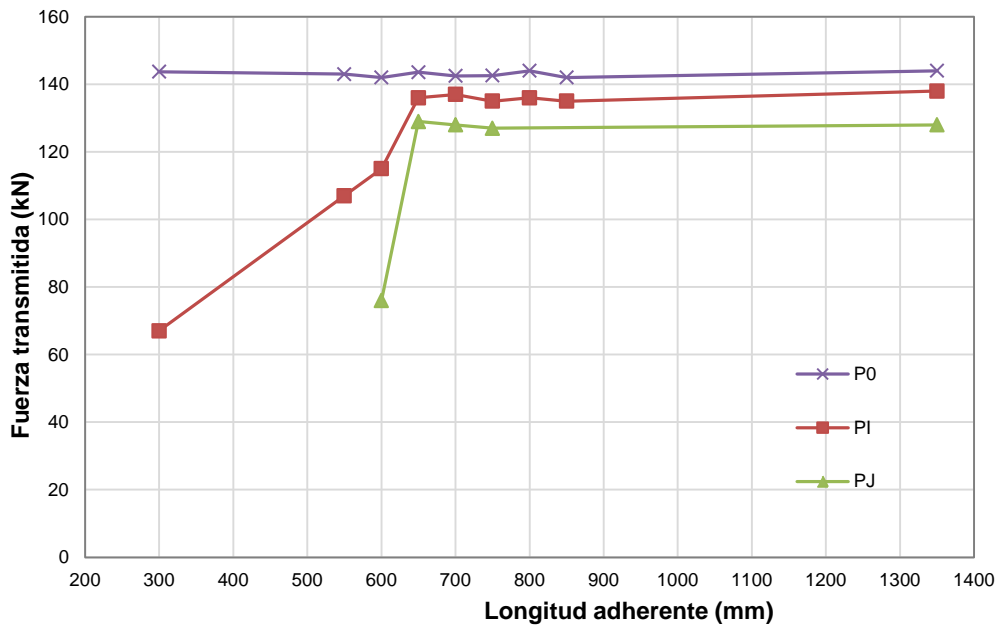


Figura G-6.1. Longitud de transmisión diferida por el método de fuerza transmitida. Fuerza transmitida vs. Longitud adherente. Serie HT-B-100-24.

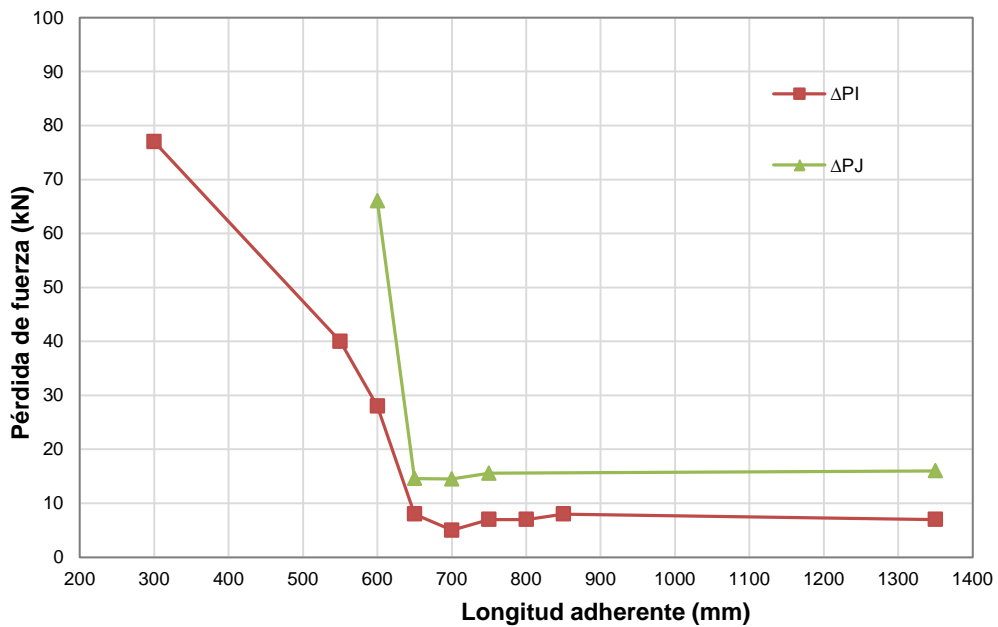


Figura G-6.2. Longitud de transmisión diferida por el método de pérdida de fuerza. Pérdida de fuerza vs. Longitud adherente. Serie HT-B-100-24.

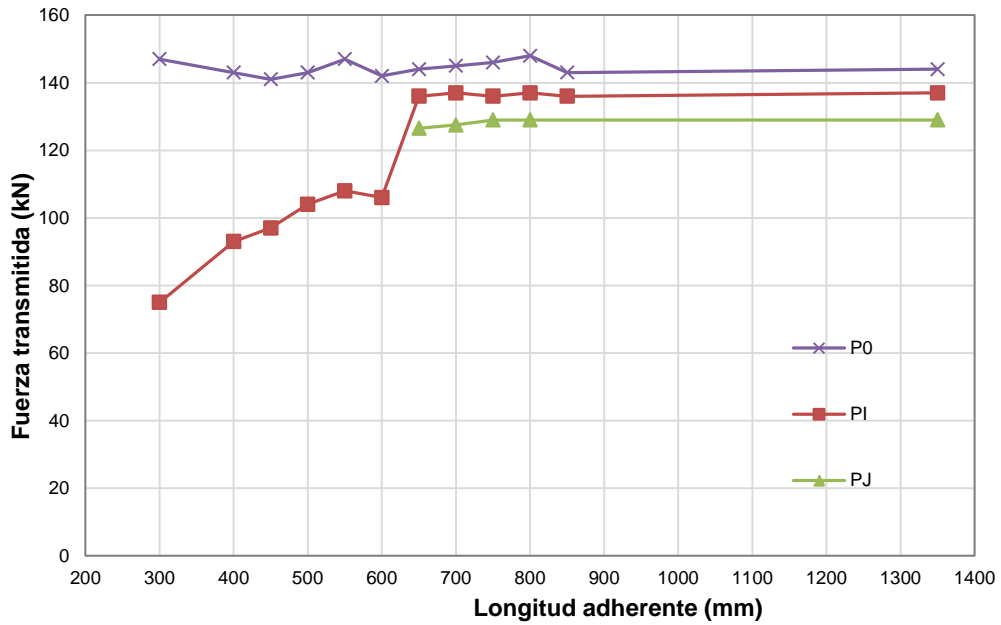


Figura G-7.1. Longitud de transmisión diferida por el método de fuerza transmitida. Fuerza transmitida vs. Longitud adherente. Serie HT-B-100-48.

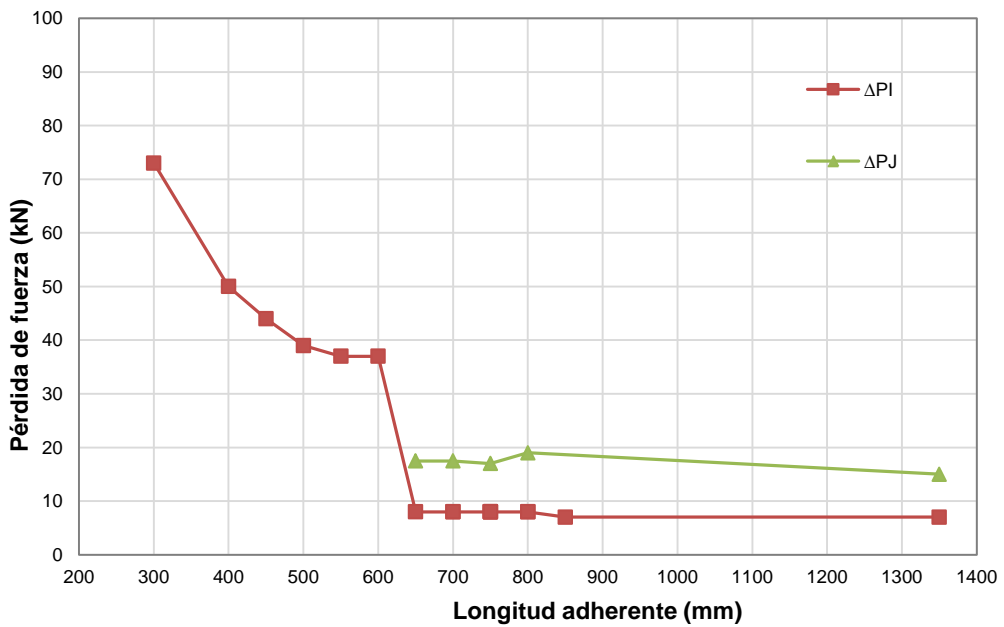


Figura G-7.2. Longitud de transmisión diferida por el método de pérdida de fuerza. Pérdida de fuerza vs. Longitud adherente. Serie HT-B-100-48.

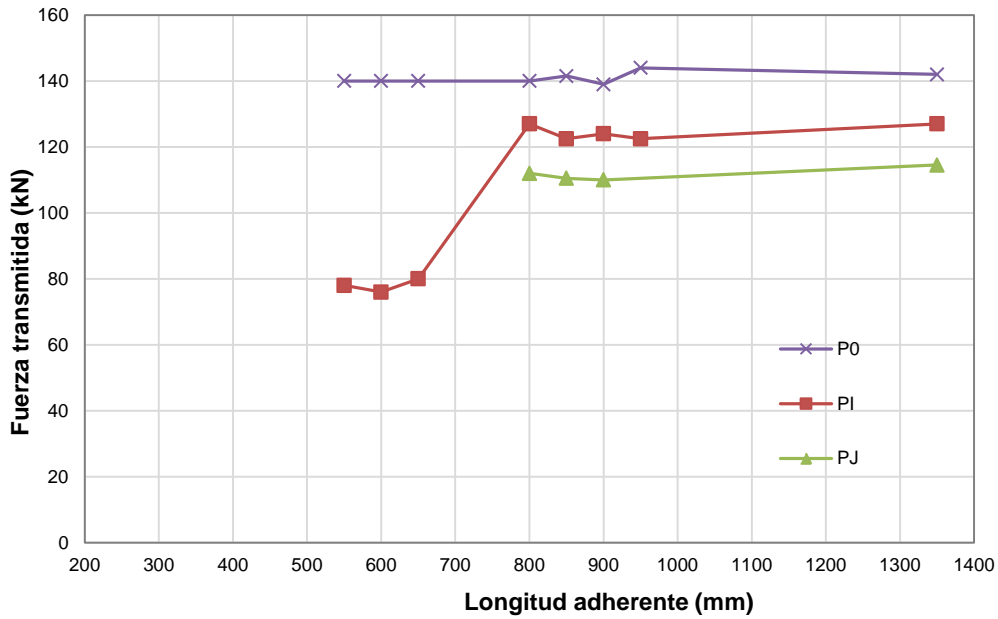


Figura G-8.1. Longitud de transmisión diferida por el método de fuerza transmitida. Fuerza transmitida vs. Longitud adherente. Serie HT-C-80-48.

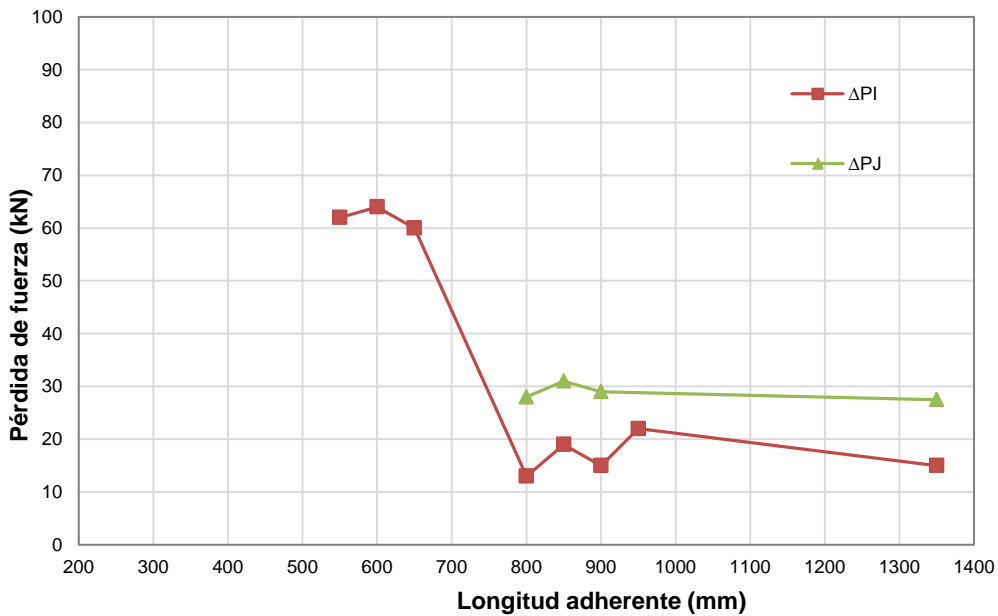
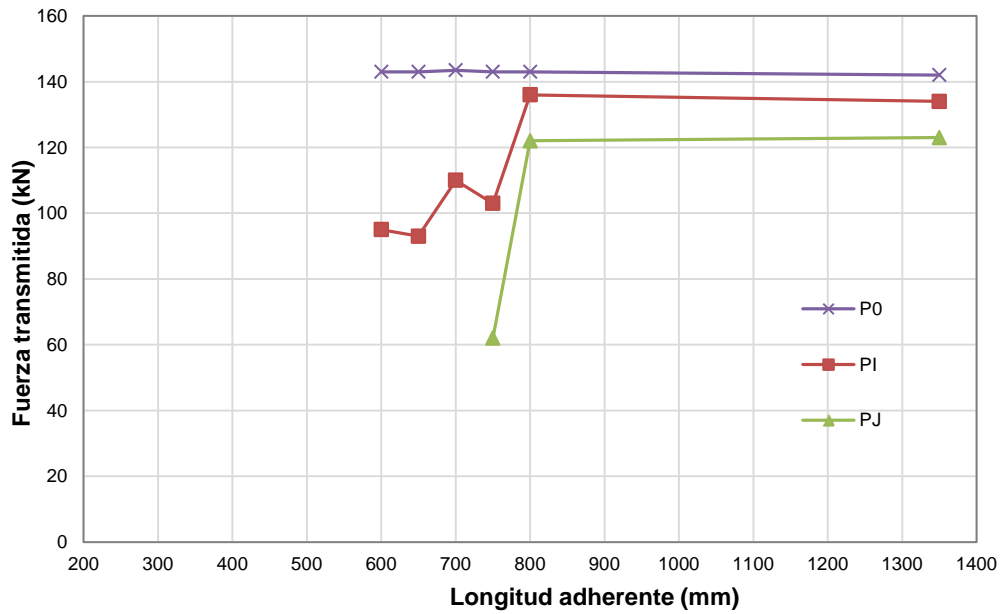
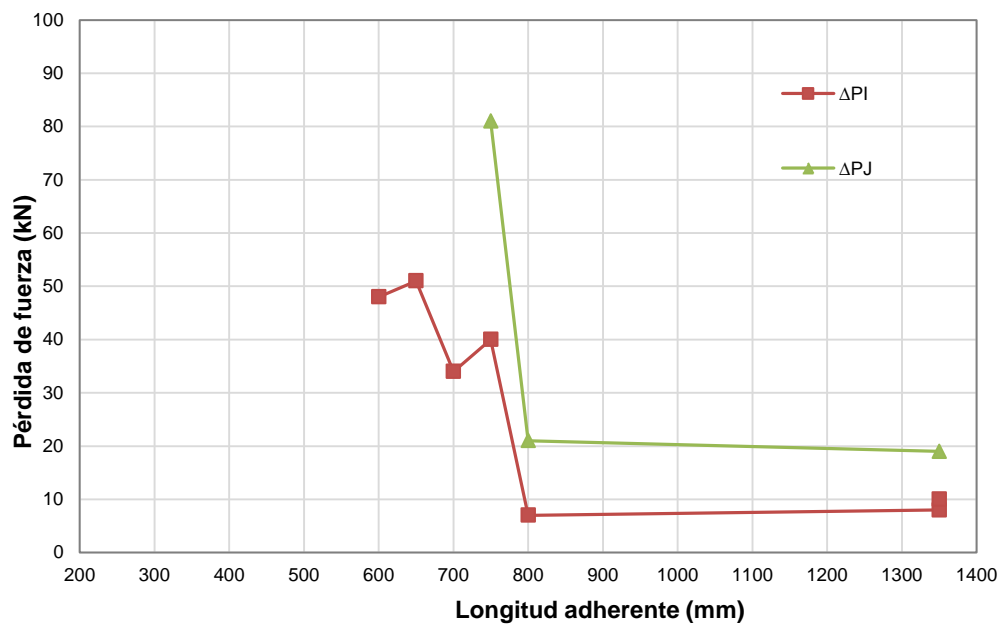


Figura G-8.2. Longitud de transmisión diferida por el método de pérdida de fuerza. Pérdida de fuerza vs. Longitud adherente. Serie HT-C-80-48.



**Figura G-9.1.** Longitud de transmisión diferida por el método de fuerza transmitida. Fuerza transmitida vs. Longitud adherente. Serie HT-C-100-24.



**Figura G-9.2.** Longitud de transmisión diferida por el método de pérdida de fuerza. Pérdida de fuerza vs. Longitud adherente. Serie HT-C-100-24.

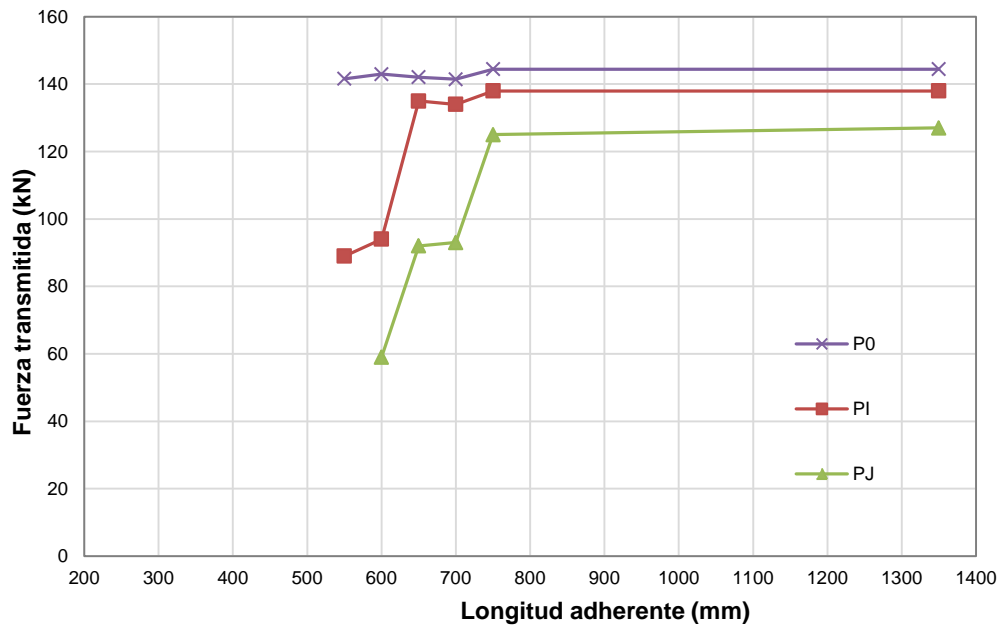


Figura G-10.1. Longitud de transmisión diferida por el método de fuerza transmitida. Fuerza transmitida vs. Longitud adherente. Serie HT-C-100-48.

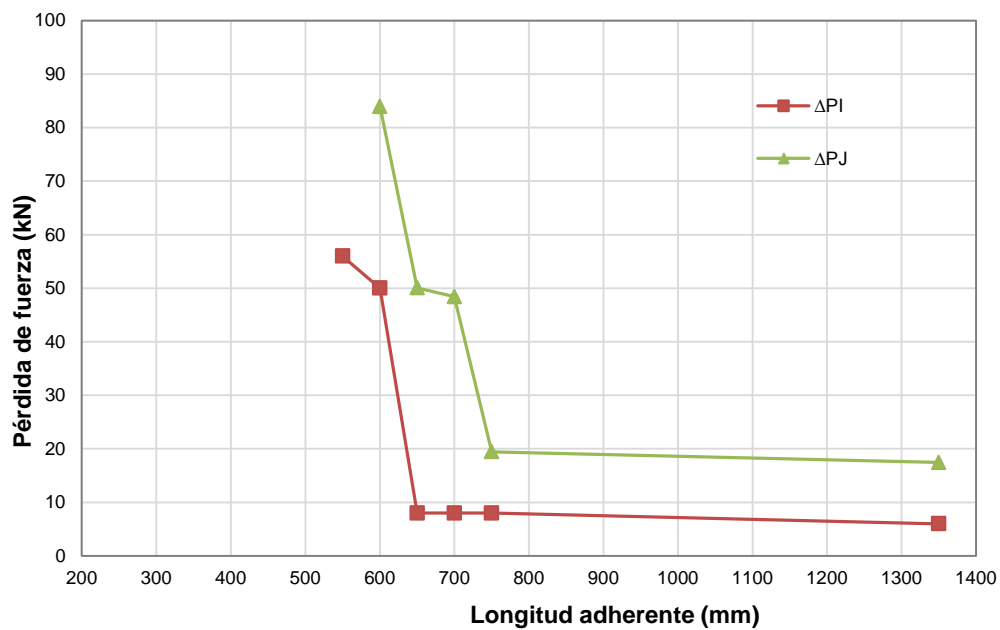


Figura G-10.2. Longitud de transmisión diferida por el método de pérdida de fuerza. Pérdida de fuerza vs. Longitud adherente. Serie HT-C-100-48.



## ANEJO H. EVOLUCIÓN DE DESLIZAMIENTOS EN EL EXTREMO LIBRE CON EL TIEMPO

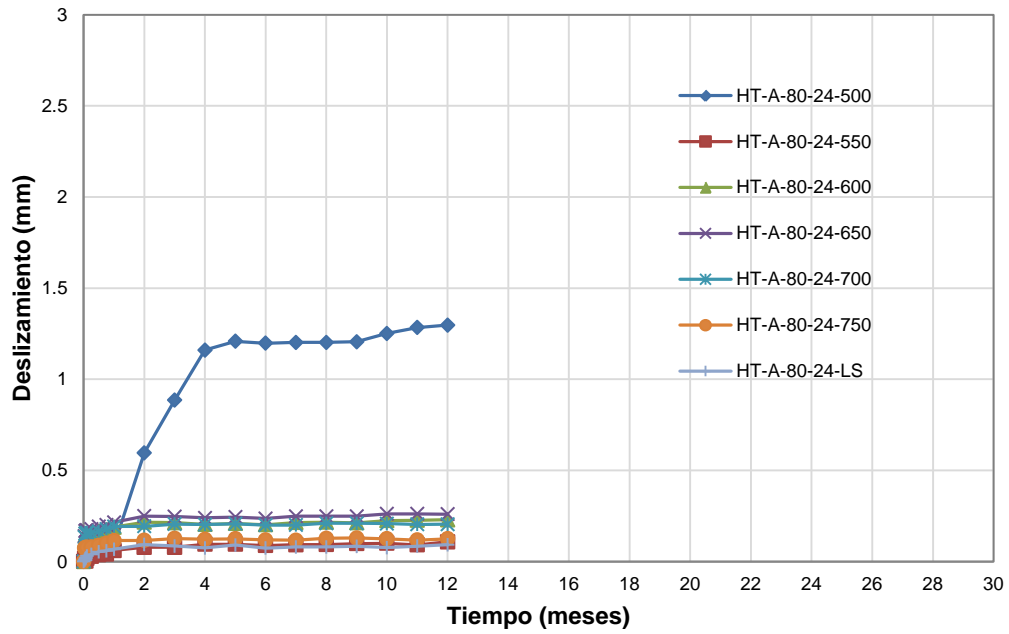


Figura H-1. Deslizamiento en el extremo libre vs. Tiempo. Serie HT-A-80-24.

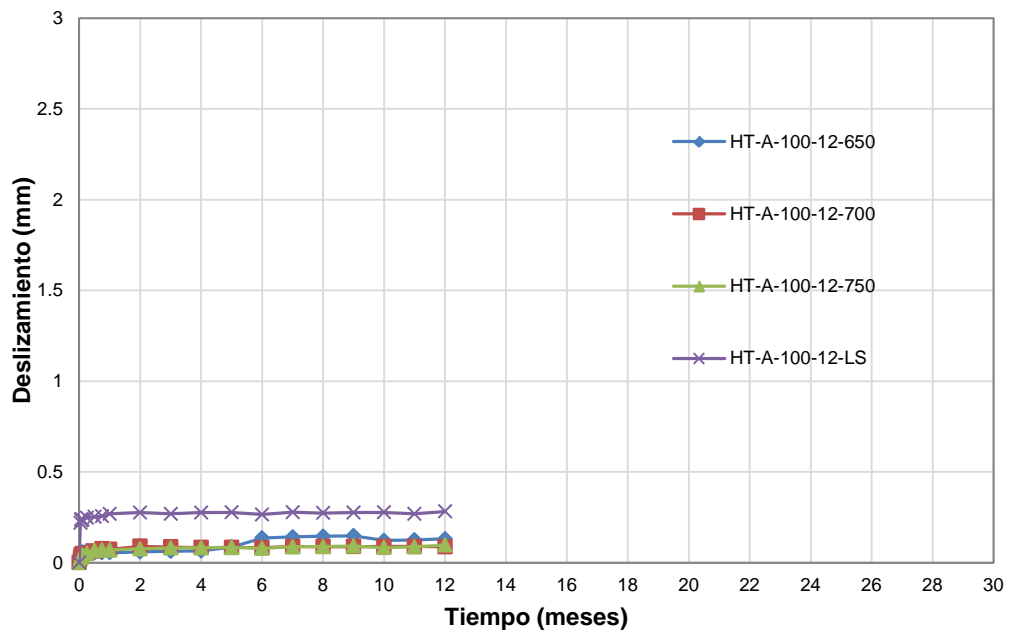


Figura H-2. Deslizamiento en el extremo libre vs. Tiempo. Serie HT-A-100-12.

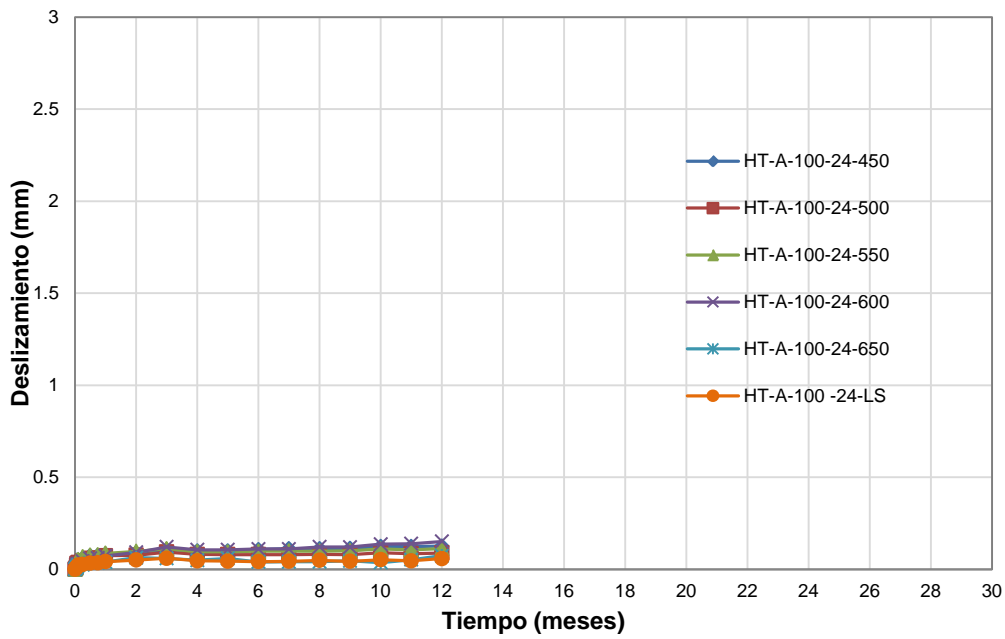


Figura H-3. Deslizamiento en el extremo libre vs. Tiempo. Serie HT-A-100-24.

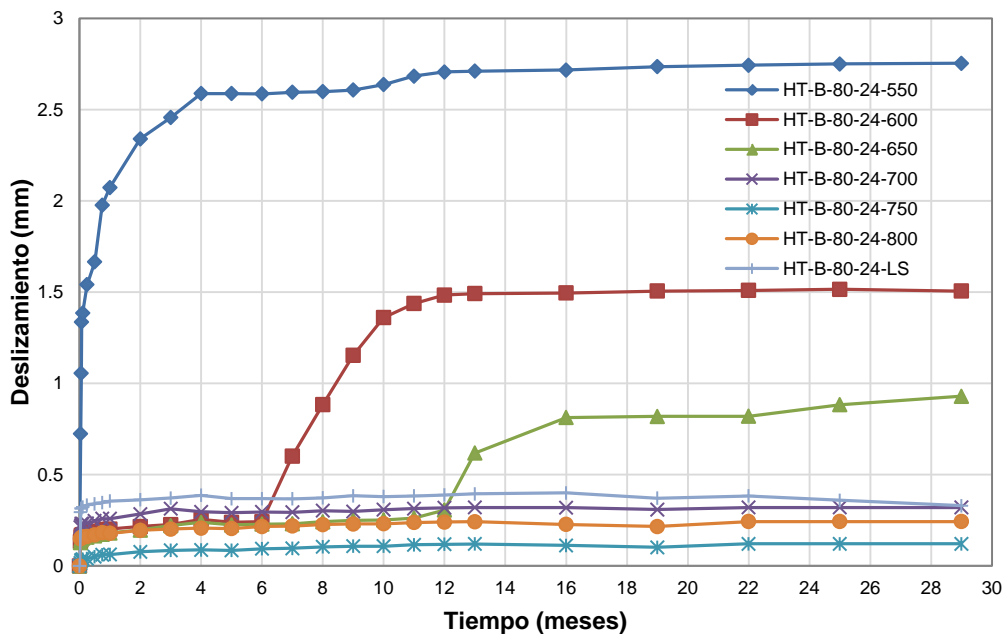


Figura H-4. Deslizamiento en el extremo libre vs. Tiempo. Serie HT-B-80-24.

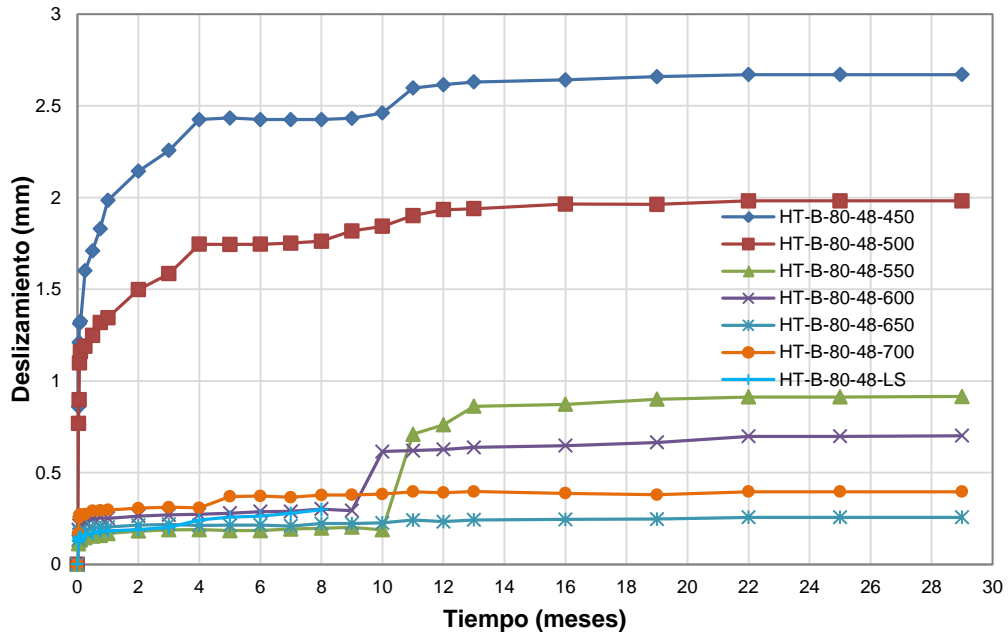


Figura H-5. Deslizamiento en el extremo libre vs. Tiempo. Serie HT-B-80-48.

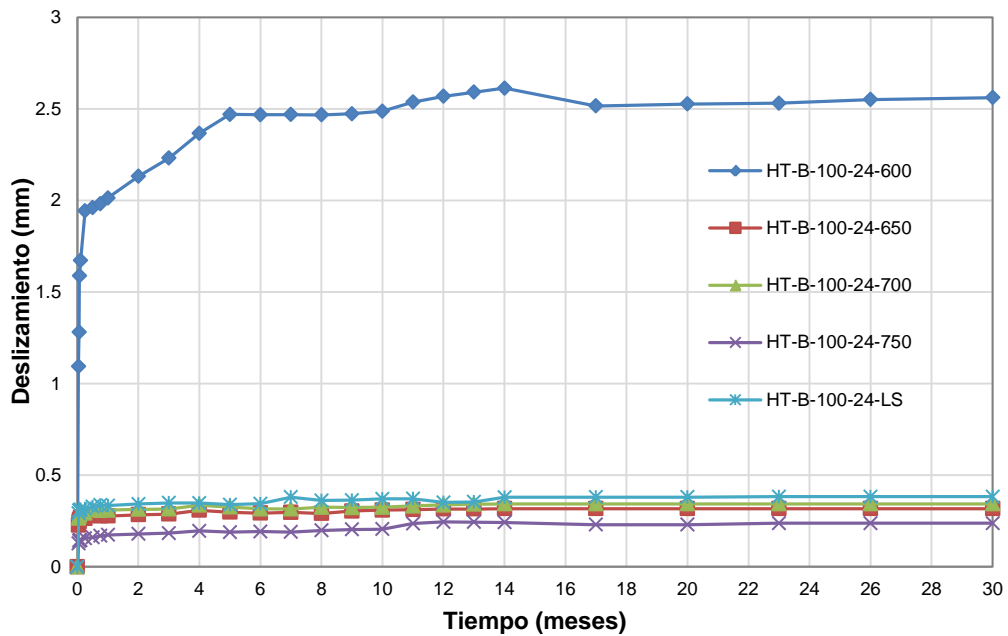


Figura H-6. Deslizamiento en el extremo libre vs. Tiempo. Serie HT-B-100-24.

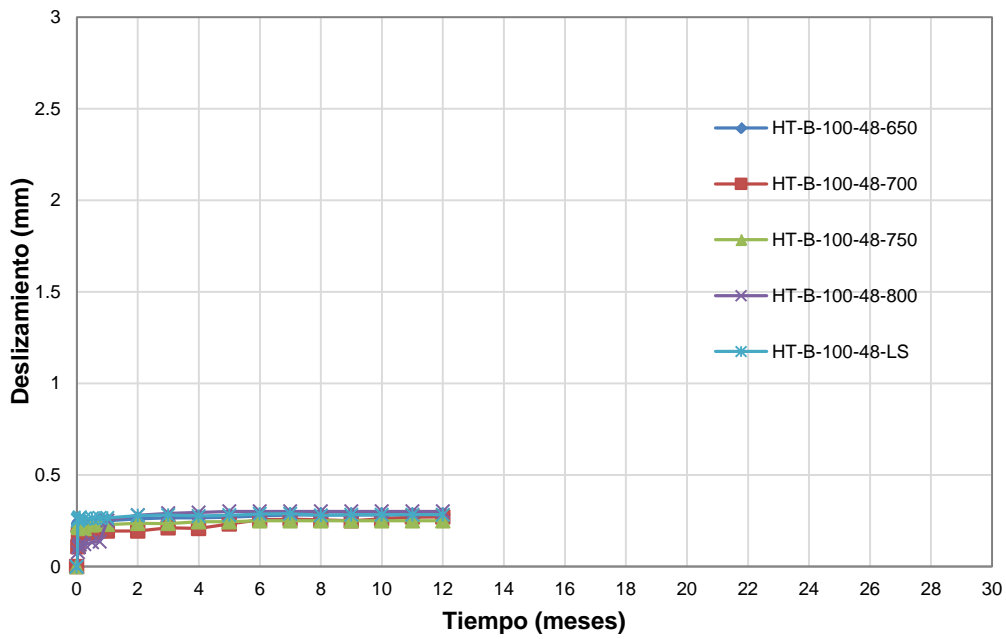


Figura H-7. Deslizamiento en el extremo libre vs. Tiempo. Serie HT-B-100-48.

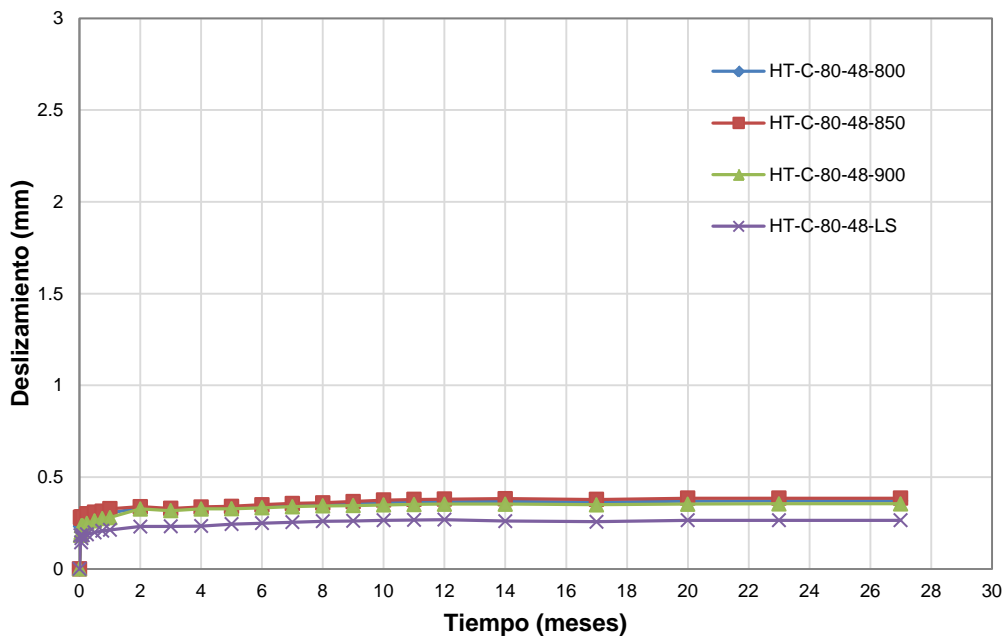


Figura H-8. Deslizamiento en el extremo libre vs. Tiempo. Serie HT-C-80-48.

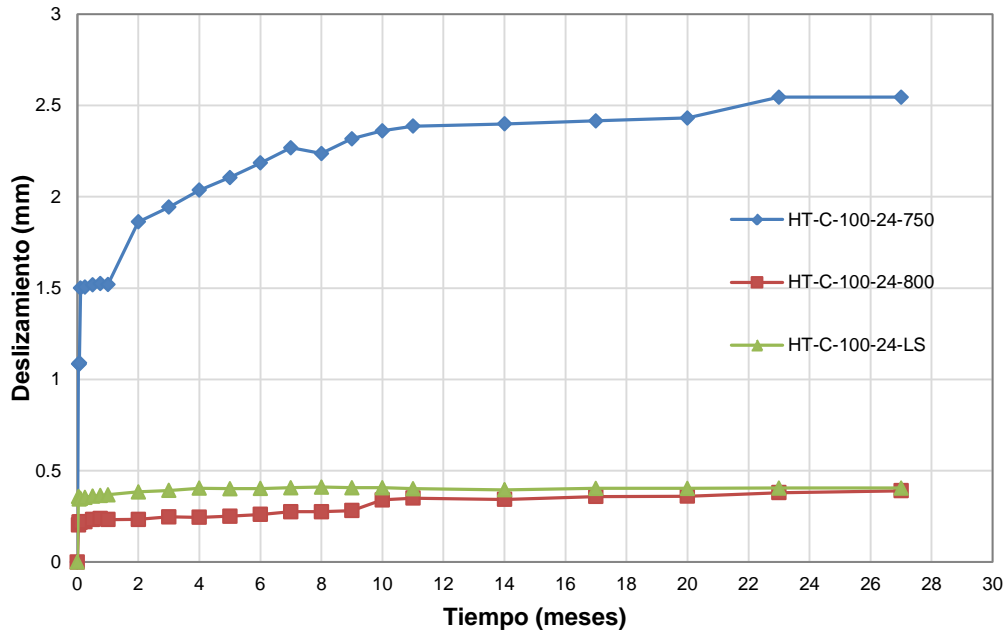


Figura H-9. Deslizamiento en el extremo libre vs. Tiempo. Serie HT-C-100-24.

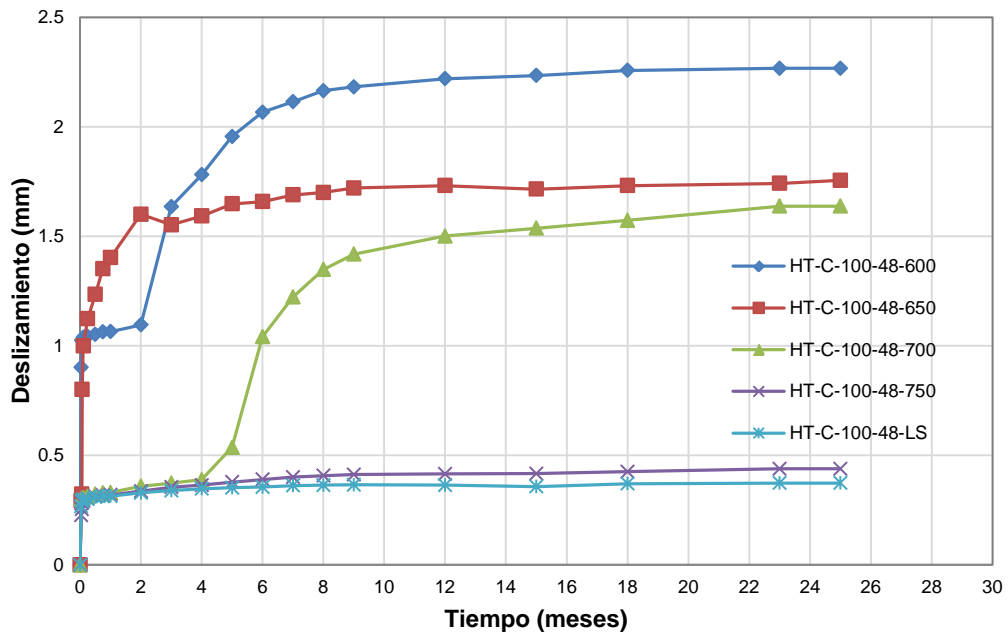


Figura H-10. Deslizamiento en el extremo libre vs. Tiempo. Serie HT-C-100-48.

(Esta página se ha dejado intencionalmente en blanco)

## ANEJO I. LONGITUD DE TRANSMISIÓN DIFERIDA. MÉTODO DE DESLIZAMIENTOS

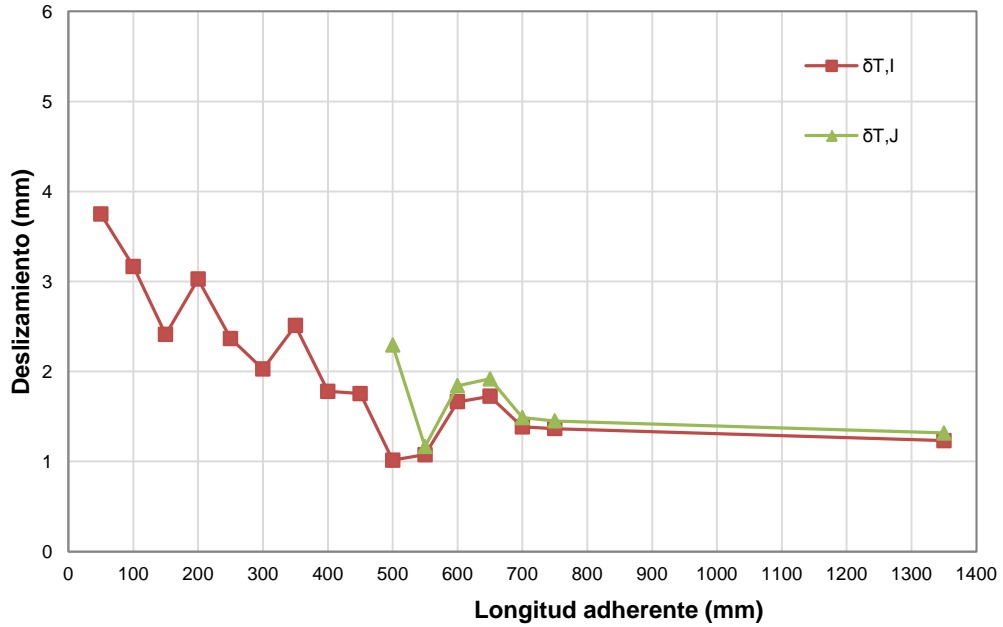


Figura I-1. Longitud de transmisión diferida por el método del deslizamiento en el extremo libre. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HT-A-80-24.

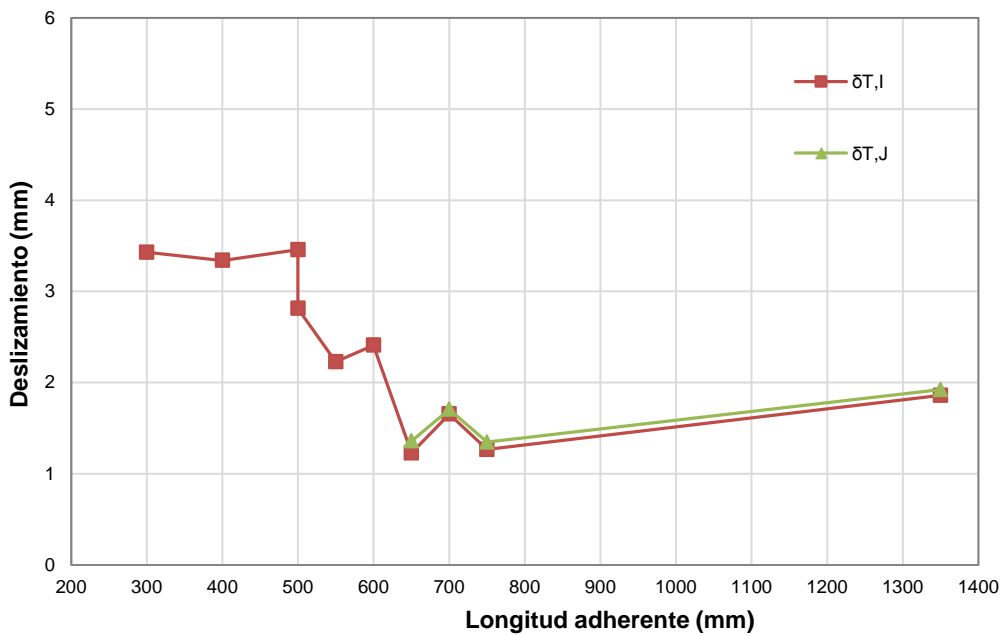


Figura I-2. Longitud de transmisión diferida por el método del deslizamiento en el extremo libre. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HT-A-100-12.

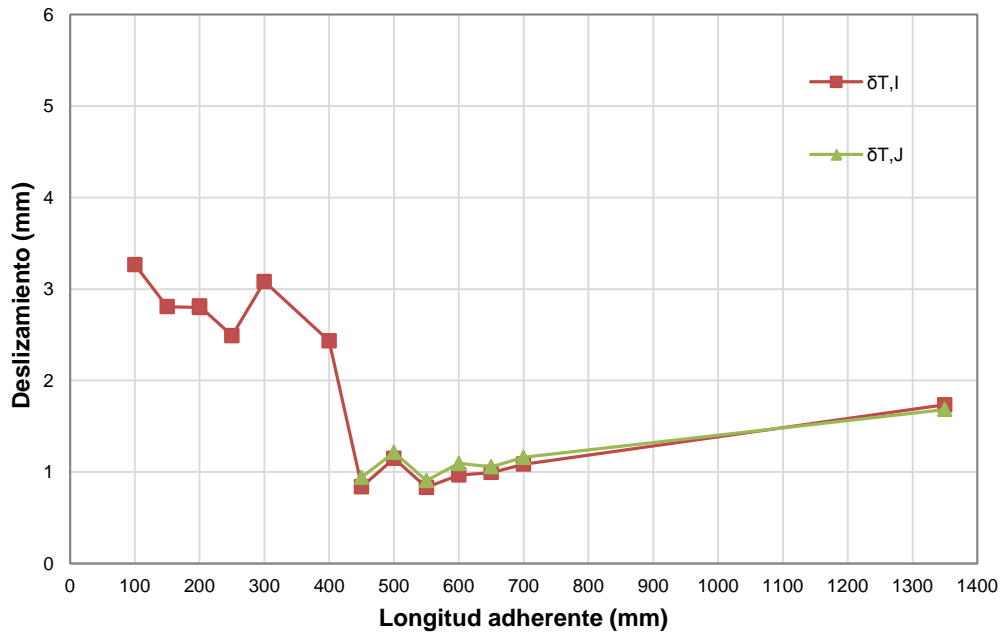


Figura I-3. Longitud de transmisión diferida por el método del deslizamiento en el extremo libre. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HT-A-100-24.

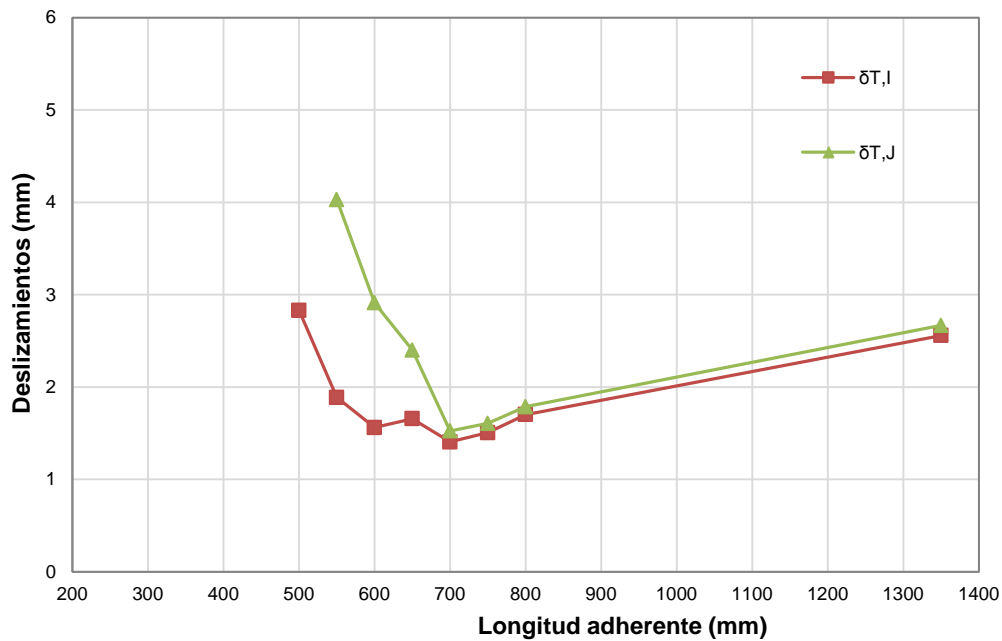


Figura I-4. Longitud de transmisión diferida por el método del deslizamiento en el extremo libre. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HT-B-80-24.



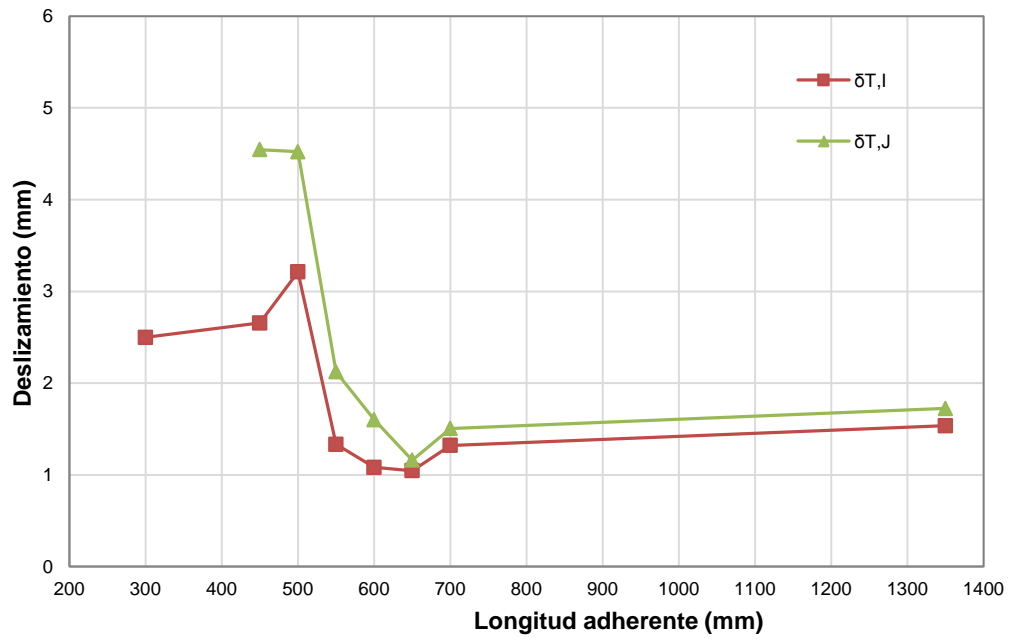


Figura I-5. Longitud de transmisión diferida por el método del deslizamiento en el extremo libre. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HT-B-80-48.

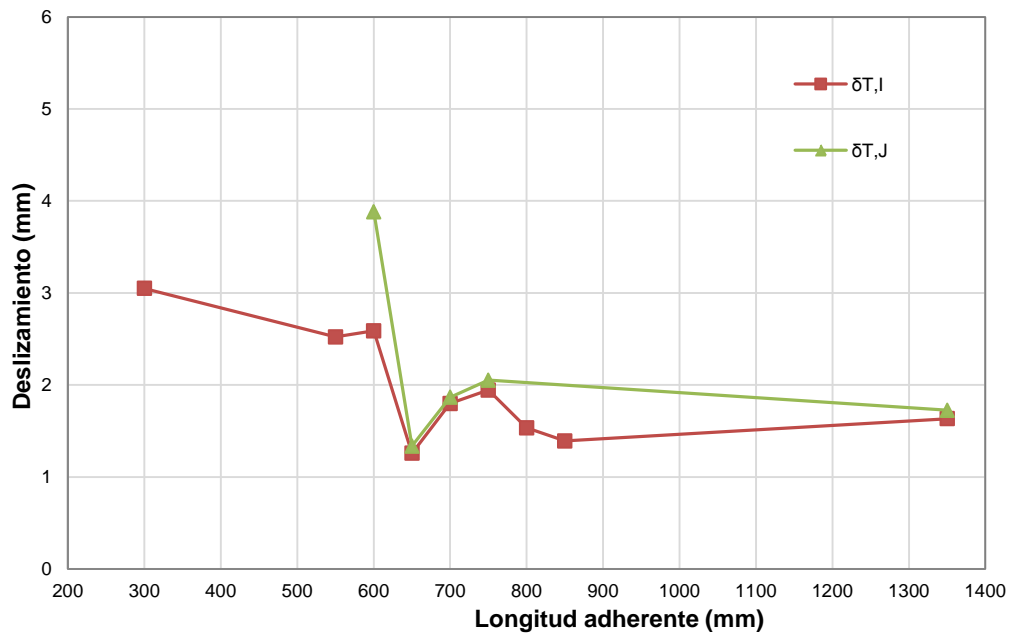


Figura I-6. Longitud de transmisión diferida por el método del deslizamiento en el extremo libre. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HT-B-100-24.

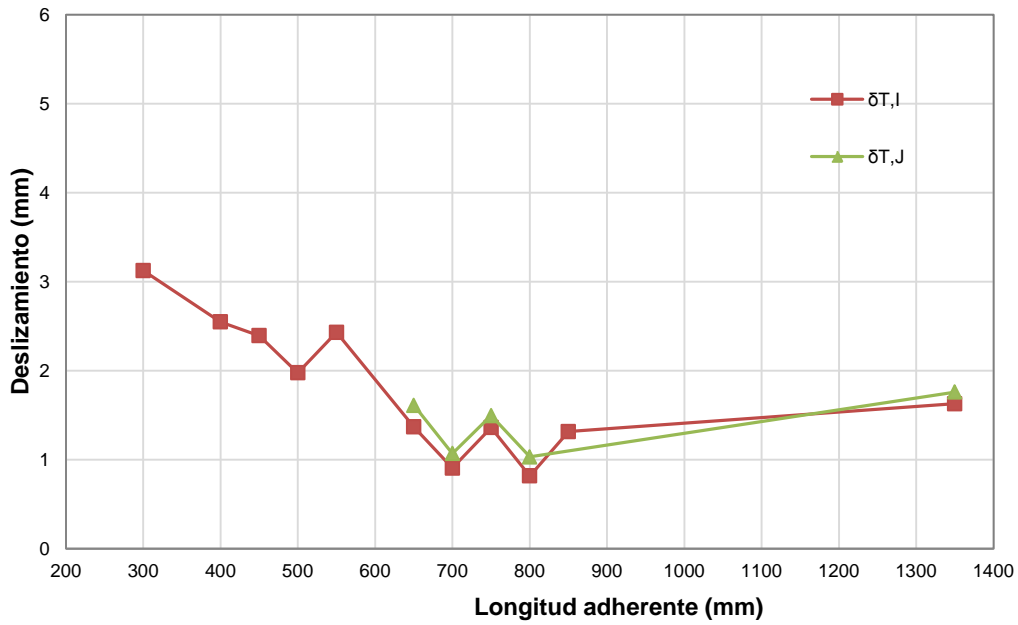


Figura I-7. Longitud de transmisión diferida por el método del deslizamiento en el extremo libre. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HT-B-100-48.

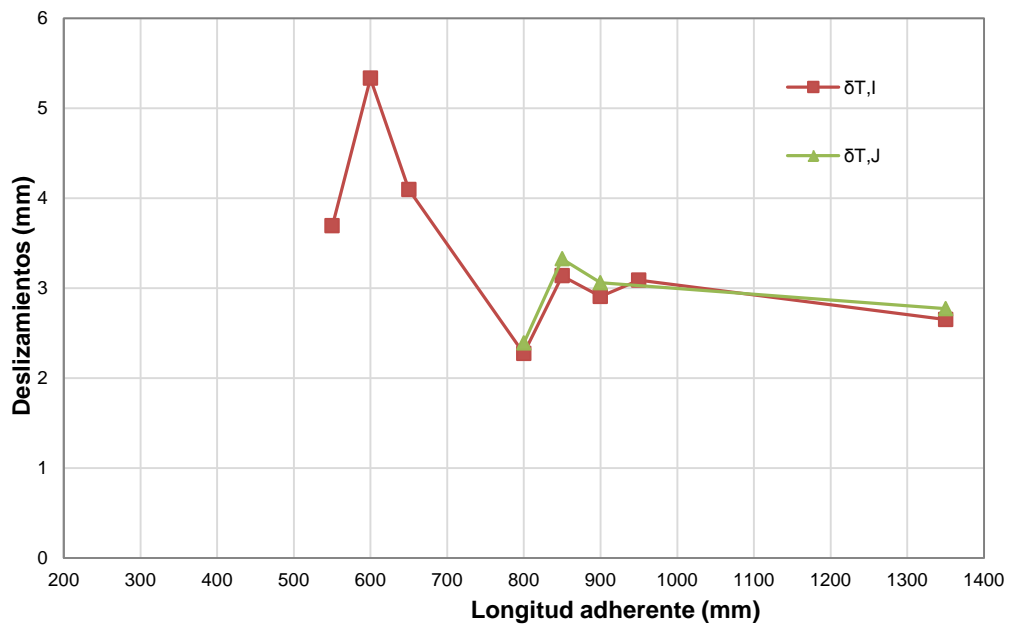


Figura I-8. Longitud de transmisión diferida por el método del deslizamiento en el extremo libre. Deslizamientos vs. Longitud adherente. Serie HT-C-80-48.

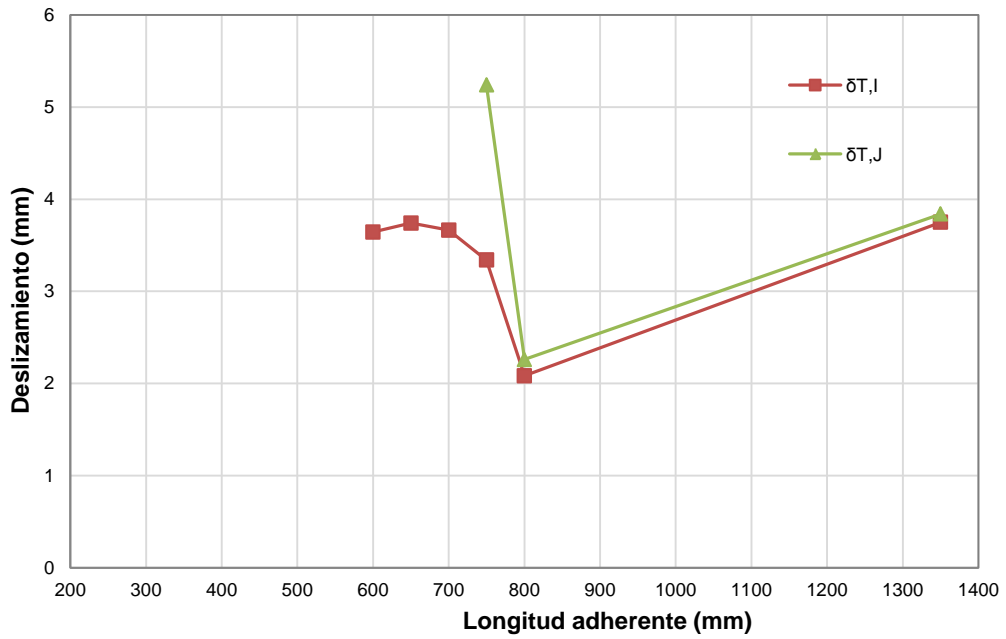


Figura I-9. Longitud de transmisión diferida por el método del deslizamiento en el extremo libre. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HT-C-100-24.

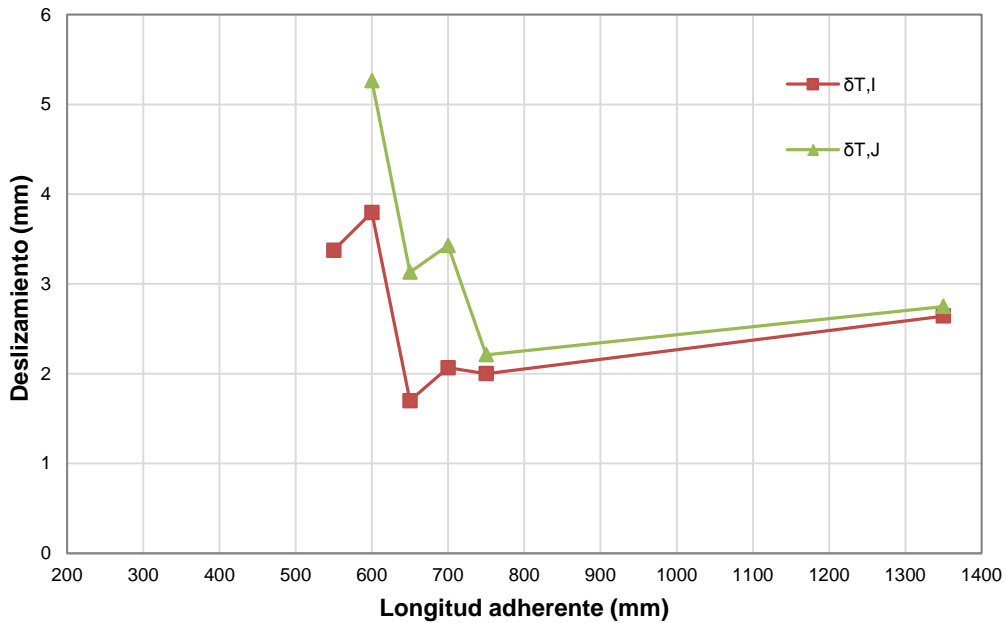


Figura I-10. Longitud de transmisión diferida por el método del deslizamiento en el extremo libre. Deslizamiento vs. Longitud adherente. Serie HT-C-100-48.

(Esta página se ha dejado intencionalmente en blanco)

ANEJO J. LONGITUD DE TRANSMISIÓN DIFERIDA. MÉTODO DE DEFORMACIONES LONGITUDINALES EN EL HORMIGÓN (95% AMS)

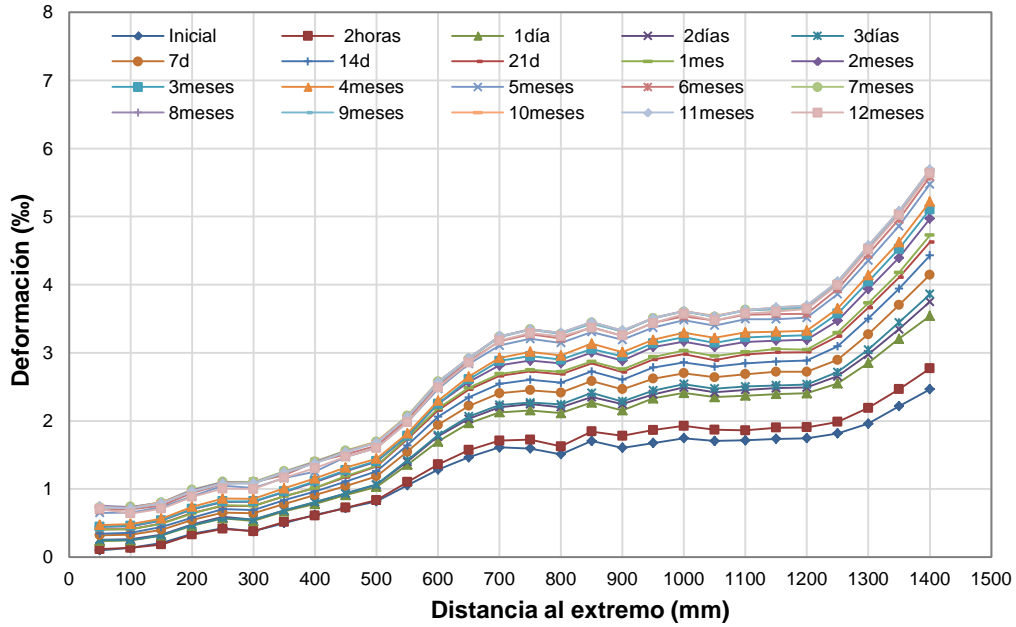


Figura J-1.1. Evolución de deformaciones longitudinales del hormigón hasta 12 meses. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-A-60-24-LS.

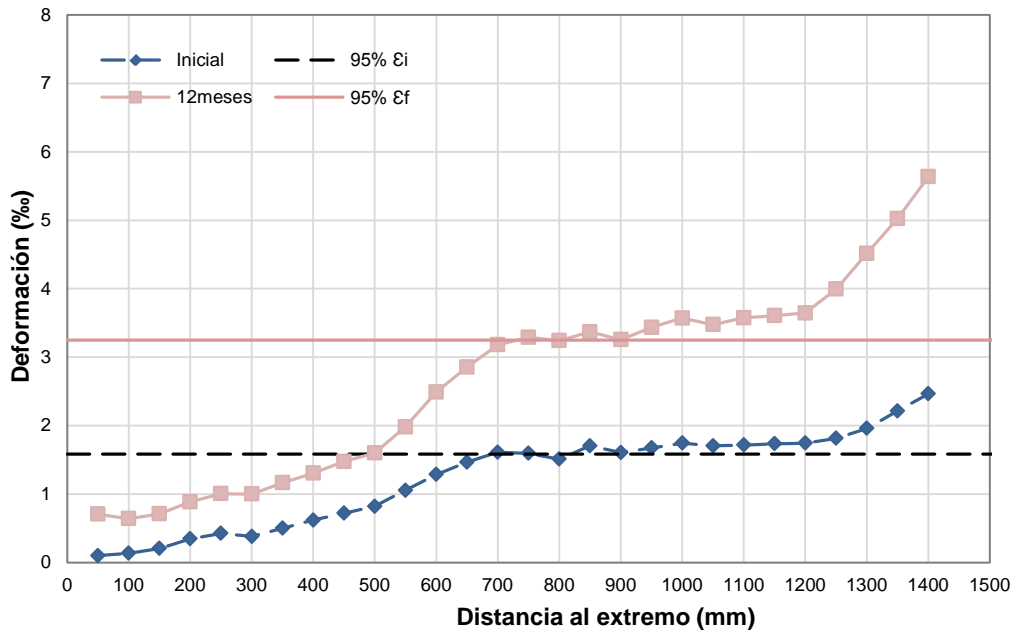


Figura J-1.2. Longitud de transmisión diferida por el método del 95% AMS. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-A-60-24-LS.

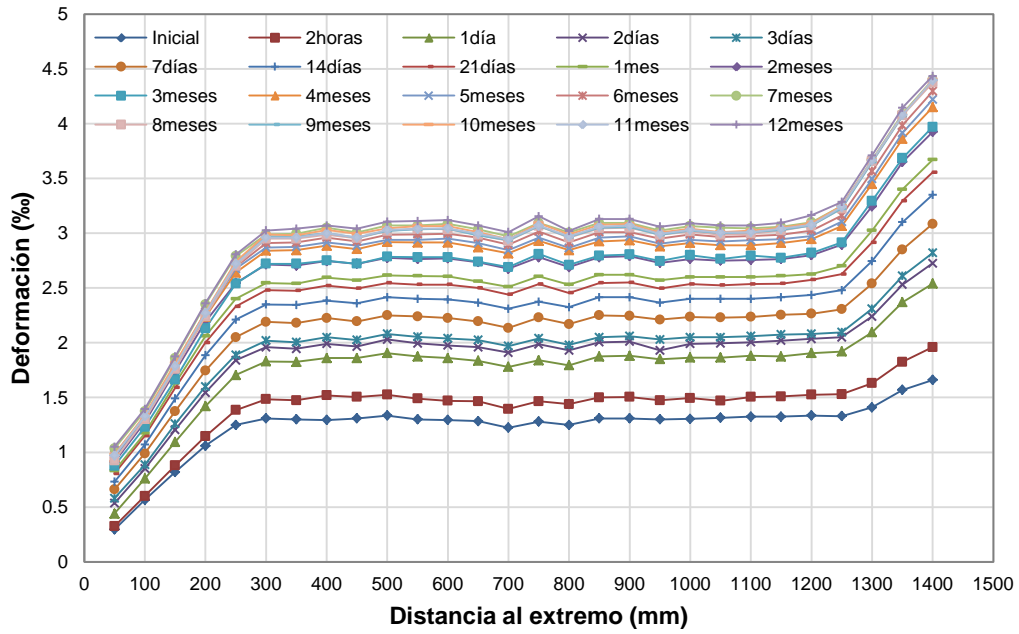


Figura J-2.1. Evolución de deformaciones longitudinales del hormigón hasta 12 meses. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-A-60-48-LS.

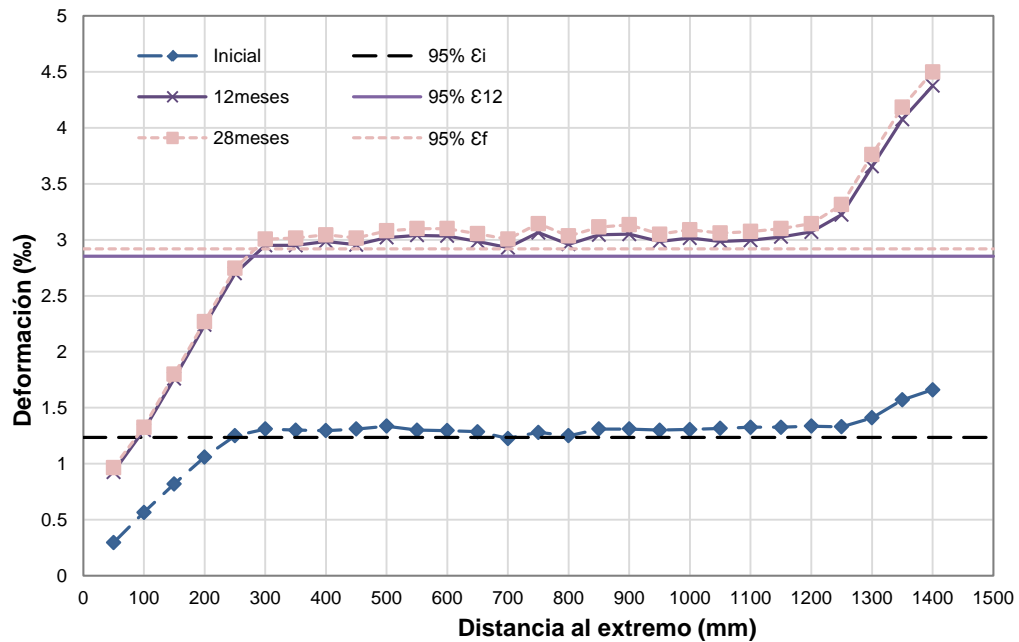


Figura J-2.2. Longitud de transmisión diferida por el método del 95% AMS. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-A-60-48-LS.

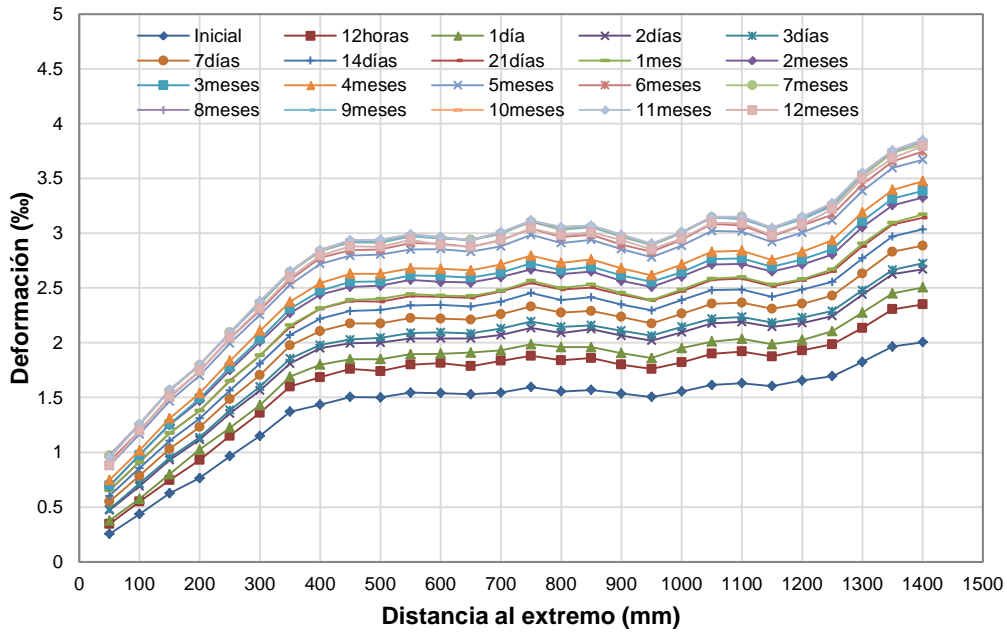


Figura J-3.1. Evolución de deformaciones longitudinales del hormigón hasta 12 meses. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-A-80-12-LS.

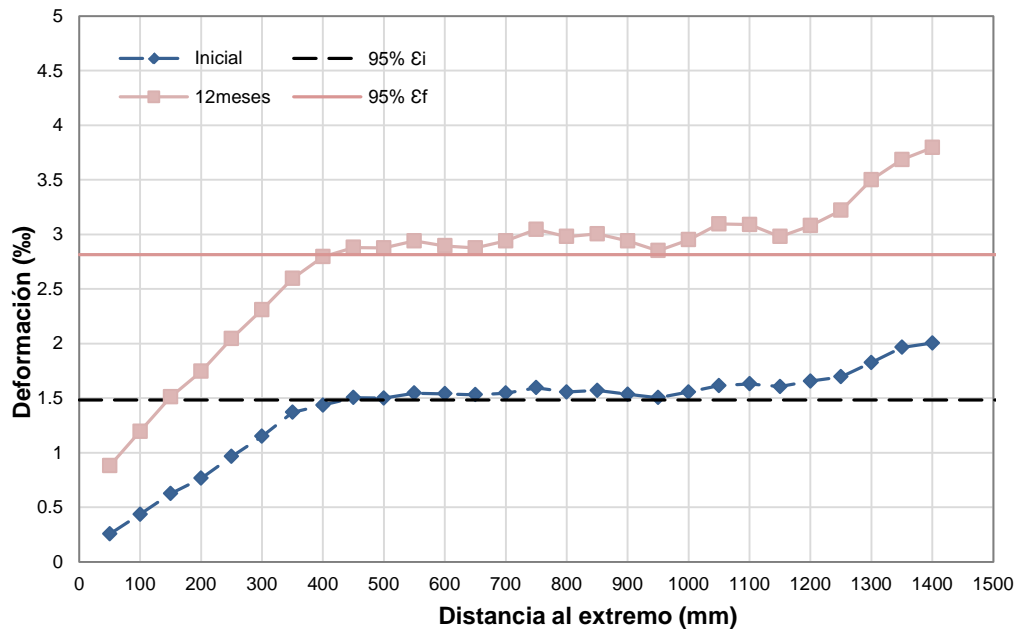


Figura J-3.2 Longitud de transmisión diferida por el método del 95% AMS. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-A-80-12-LS.

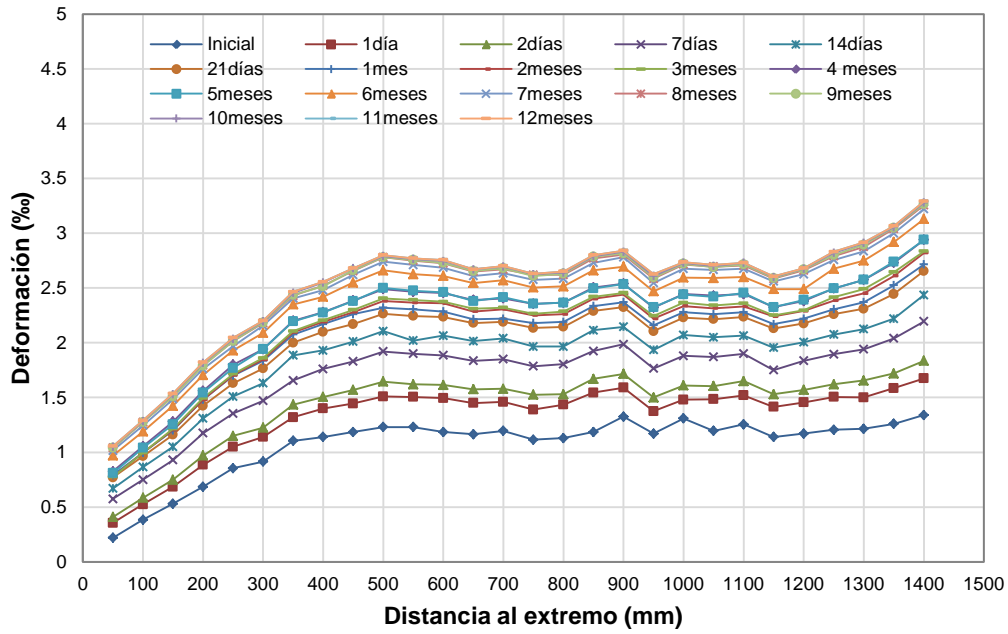


Figura J-4.1. Evolución de deformaciones longitudinales del hormigón hasta 12 meses. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-A-80-24-LS.

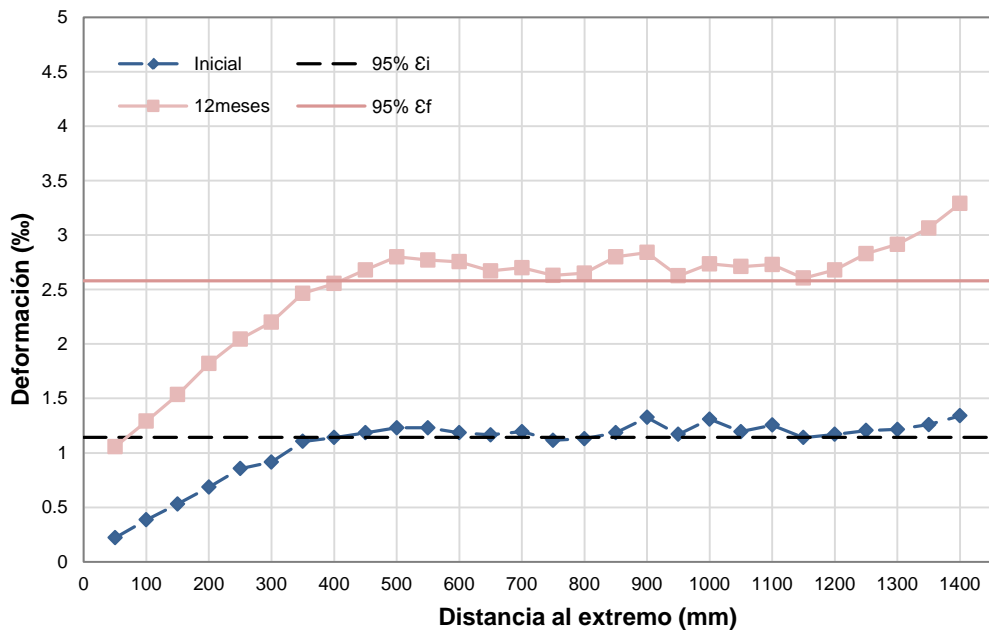


Figura J-4.2 Longitud de transmisión diferida por el método del 95% AMS. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-A-80-24-LS.



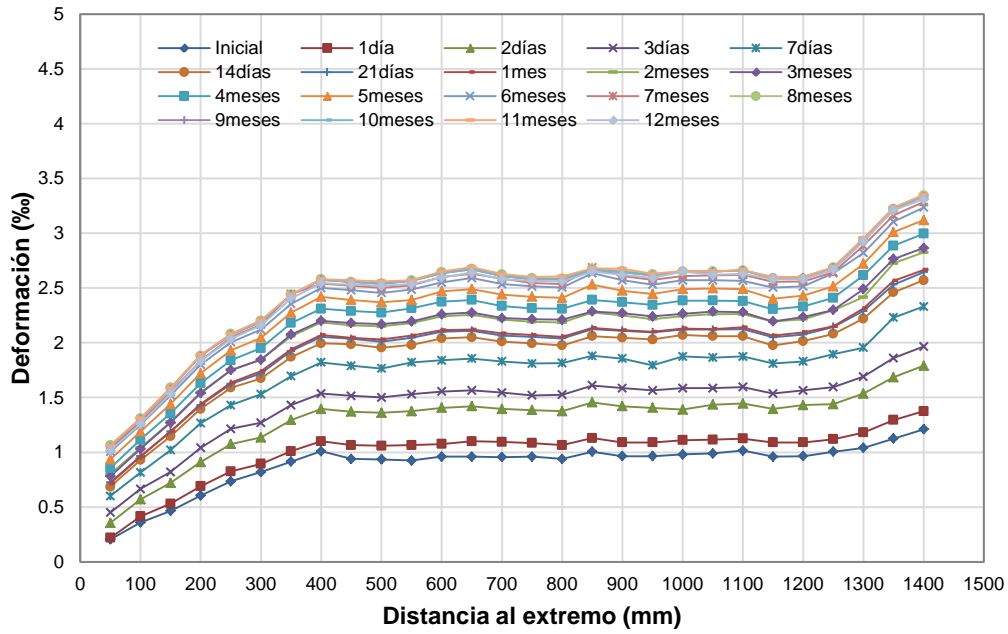


Figura J-5.1. Evolución de deformaciones longitudinales del hormigón hasta 12 meses. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-A-80-24-LS-FA.

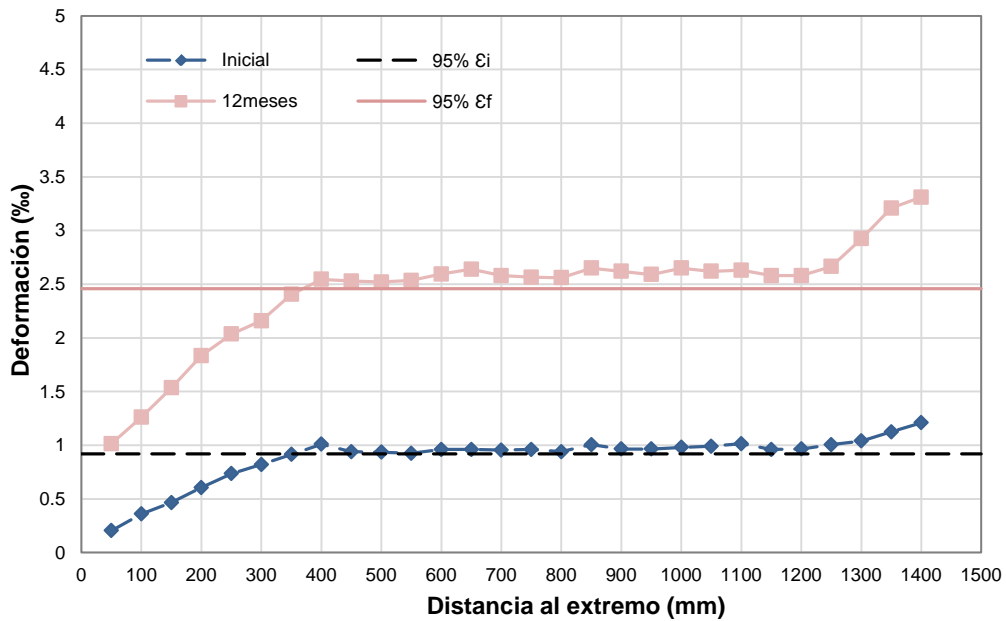


Figura J-5.2 Longitud de transmisión diferida por el método del 95% AMS. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-A-80-24-LS-FA.

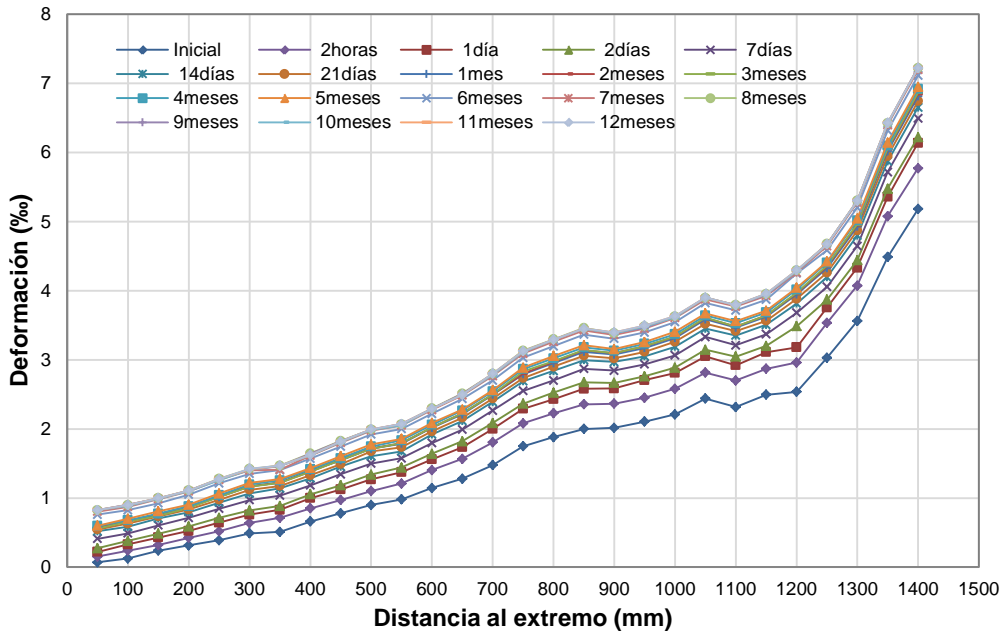


Figura J-6.1. Evolución de deformaciones longitudinales del hormigón hasta 12 meses. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-A-100-6-LS.

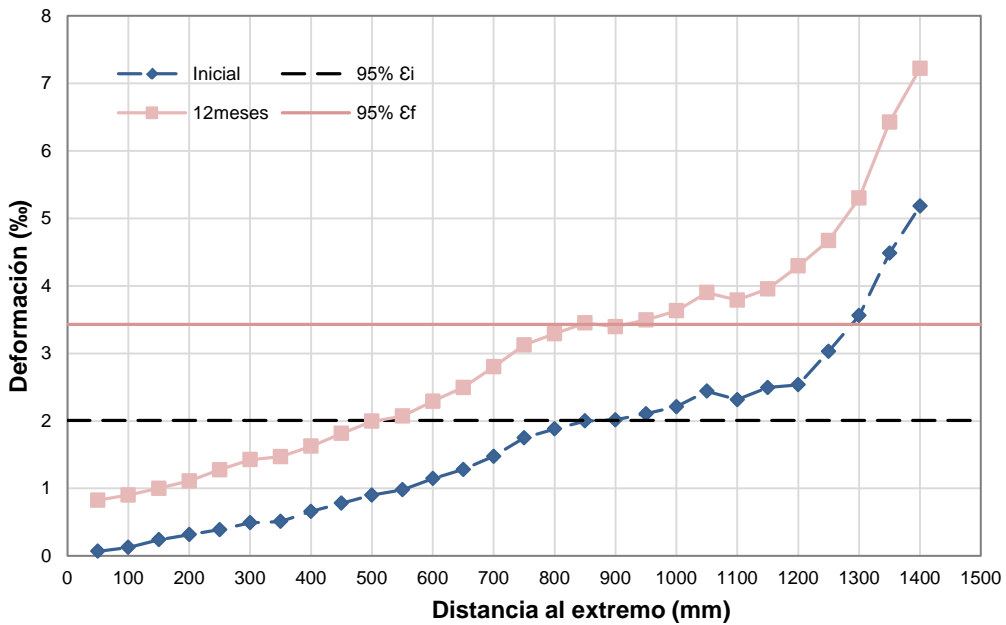


Figura J-6.2 Longitud de transmisión diferida por el método del 95% AMS. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-A-100-6-LS.

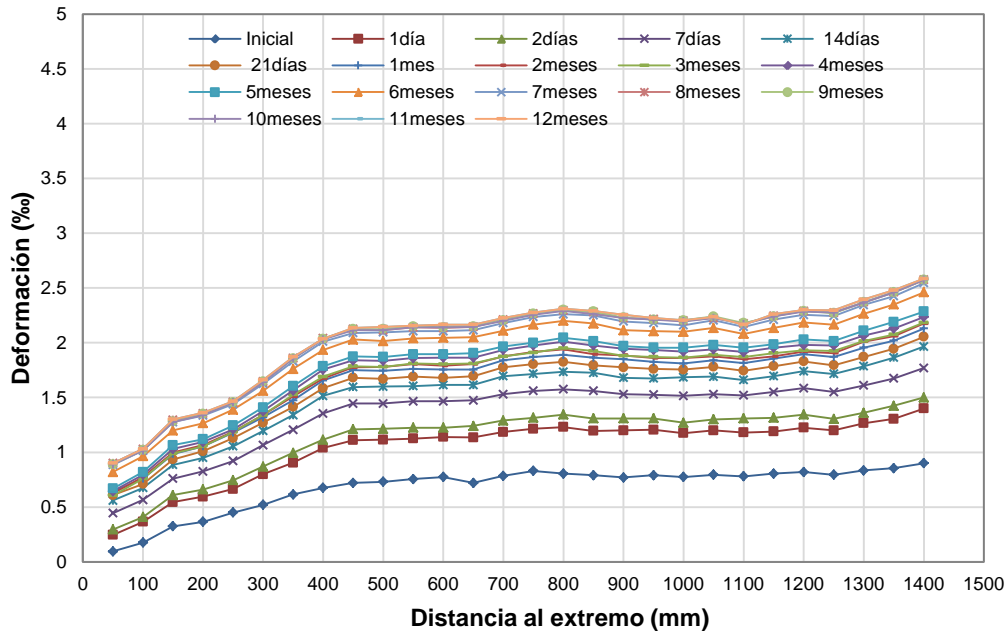


Figura J-7.1. Evolución de deformaciones longitudinales del hormigón hasta 12 meses. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-A-100-12-LS.

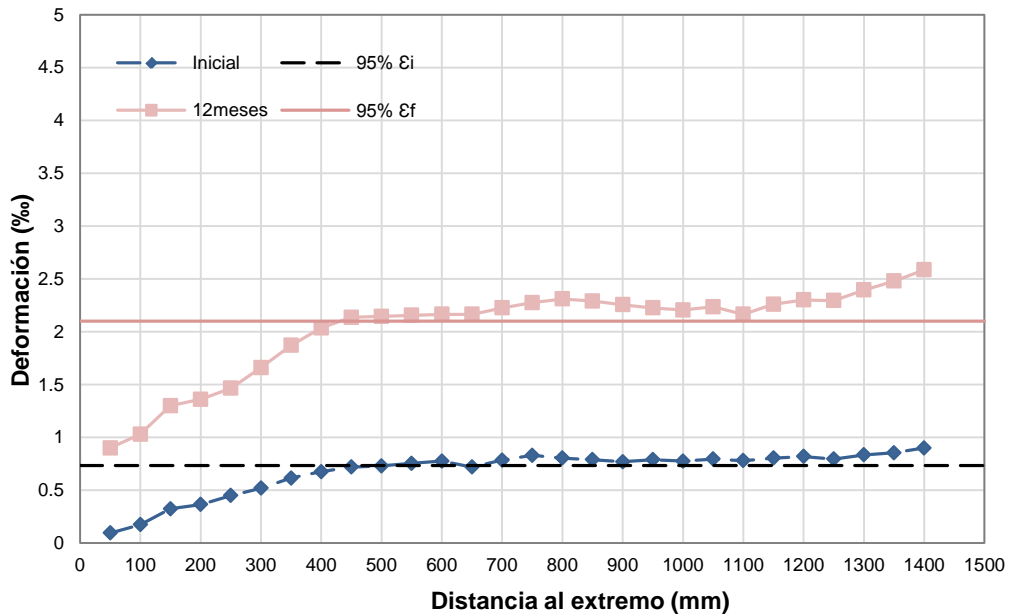


Figura J-7.2 Longitud de transmisión diferida por el método del 95% AMS. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-A-100-12-LS.

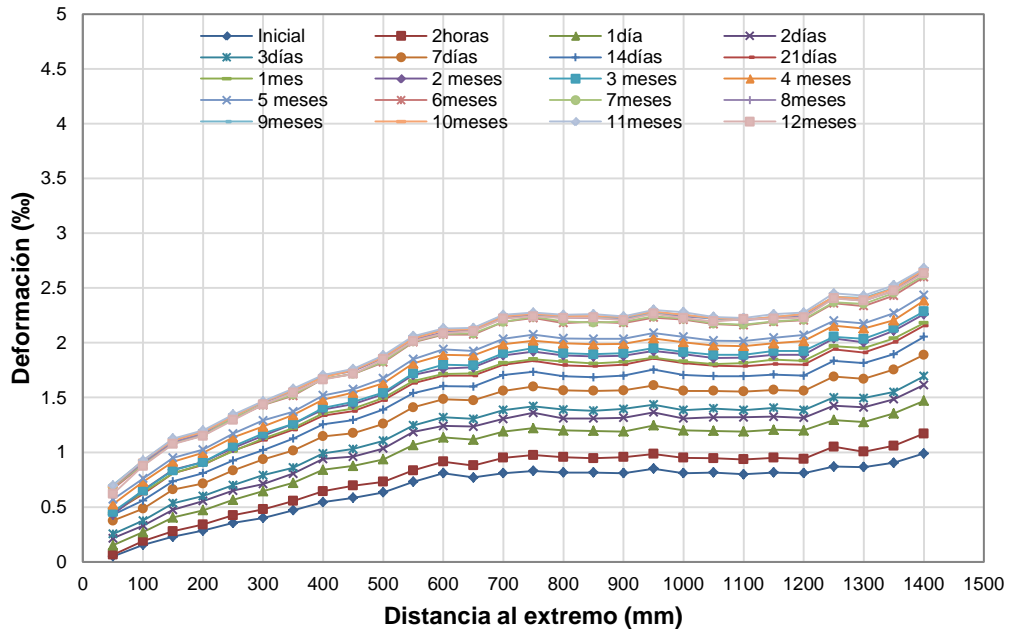


Figura J-8.1. Evolución de deformaciones longitudinales del hormigón hasta 12 meses. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-A-100-12-LS-FA.

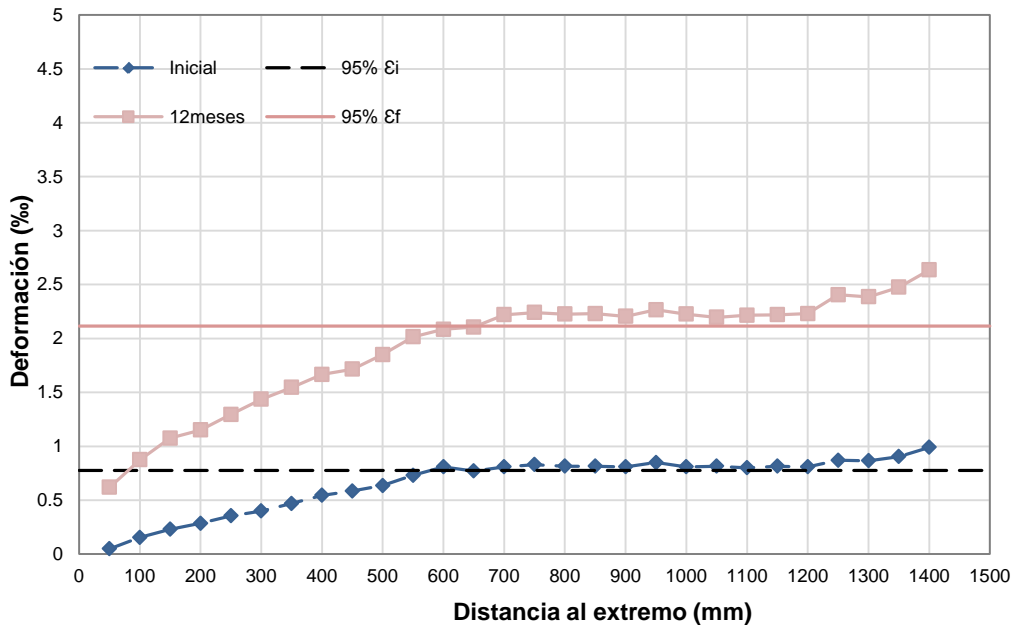


Figura J-8.2 Longitud de transmisión diferida por el método del 95% AMS. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-A-100-12-LS-FA.

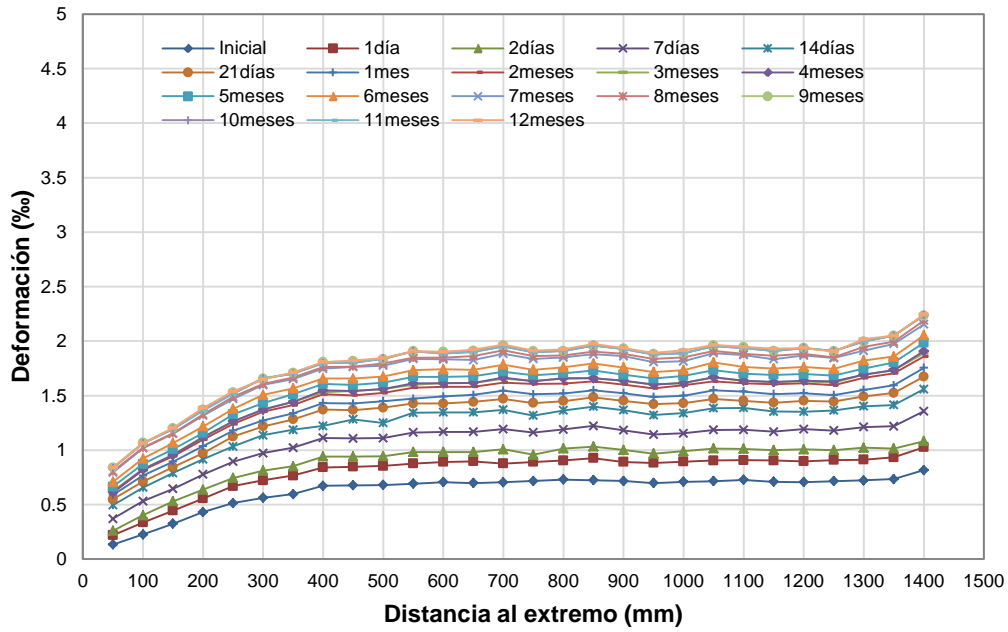


Figura J-9.1. Evolución de deformaciones longitudinales del hormigón hasta 12 meses. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-A-100-24-LS.

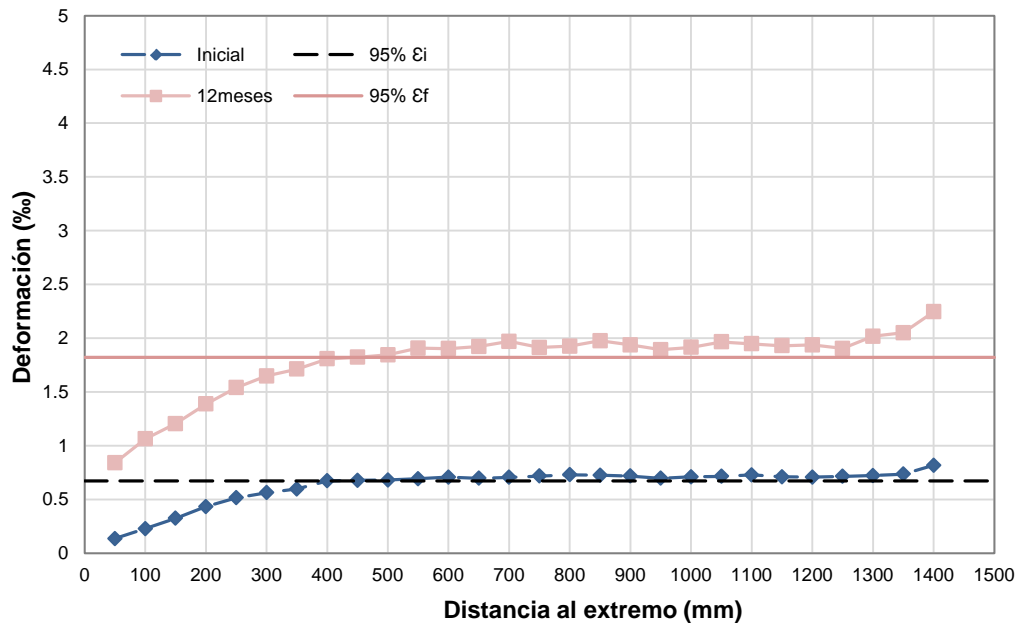


Figura J-9.2 Longitud de transmisión diferida por el método del 95% AMS. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-A-100-24-LS.

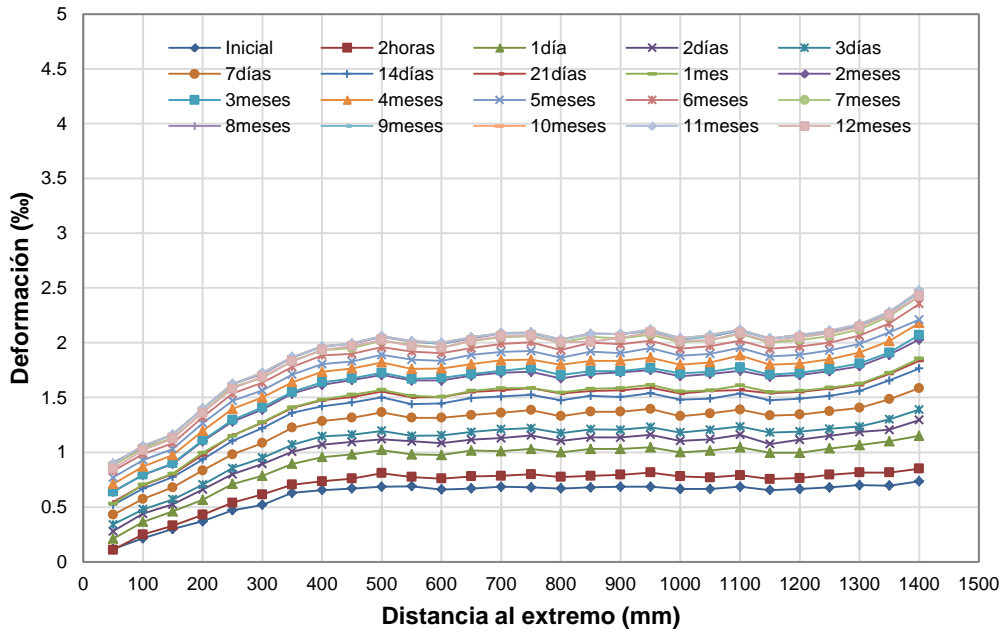


Figura J-10.1. Evolución de deformaciones longitudinales del hormigón hasta 12 meses. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-A-100-24-LS-FA.

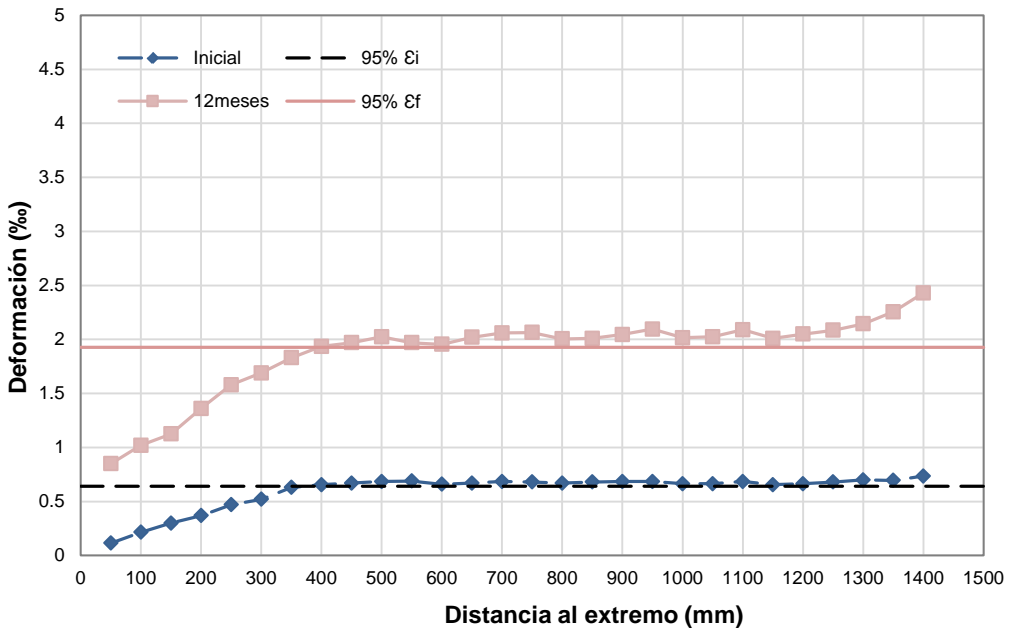


Figura J-10.2 Longitud de transmisión diferida por el método del 95% AMS. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-A-100-24-LS-FA.

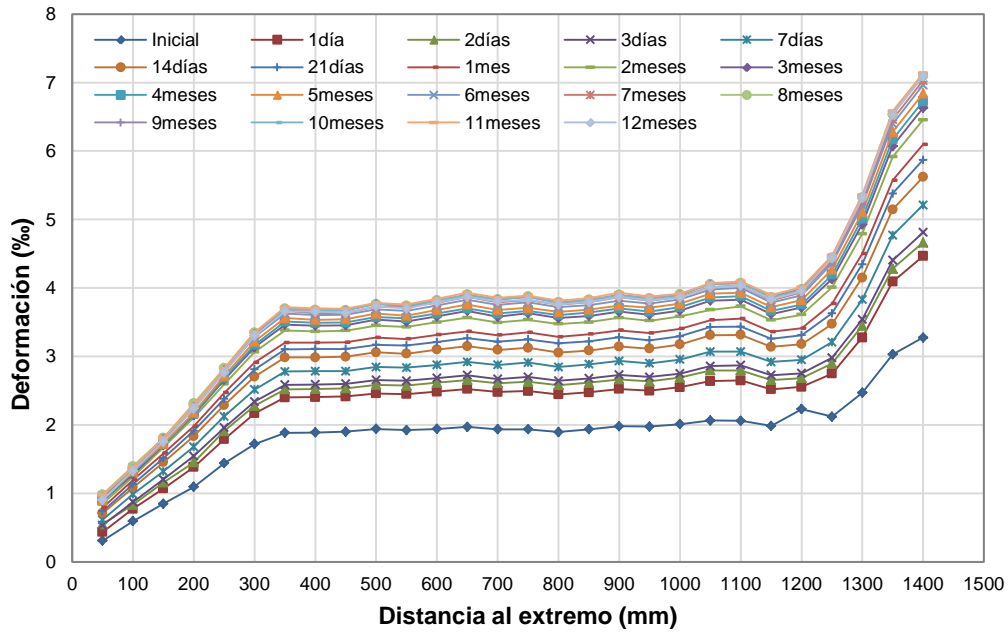


Figura J-11.1. Evolución de deformaciones longitudinales del hormigón hasta 12 meses. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-B-60-48-LS.

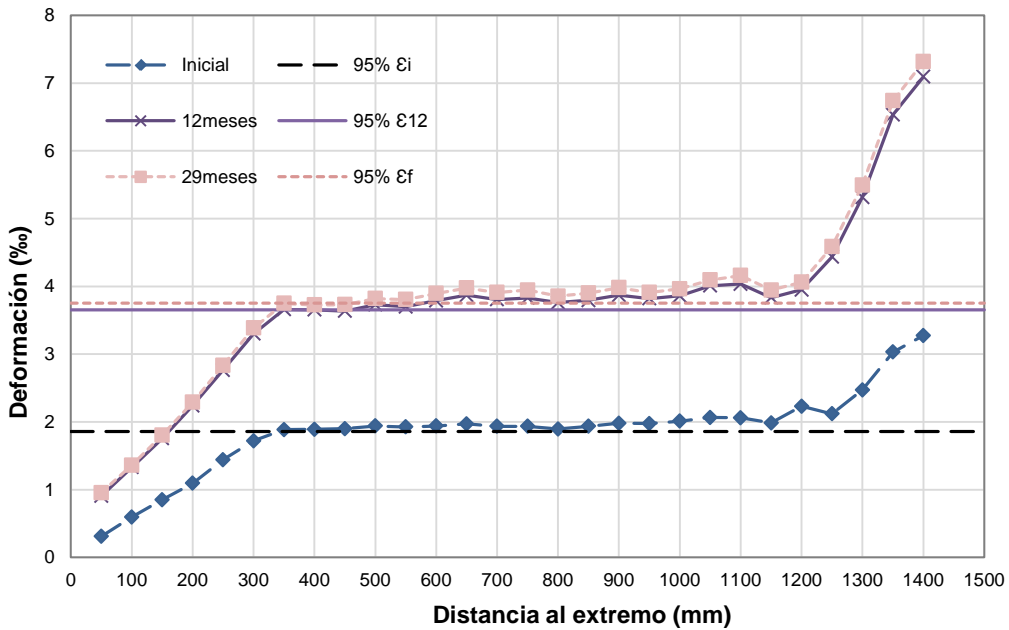


Figura J-11.2 Longitud de transmisión diferida por el método del 95% AMS. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-B-60-48-LS.

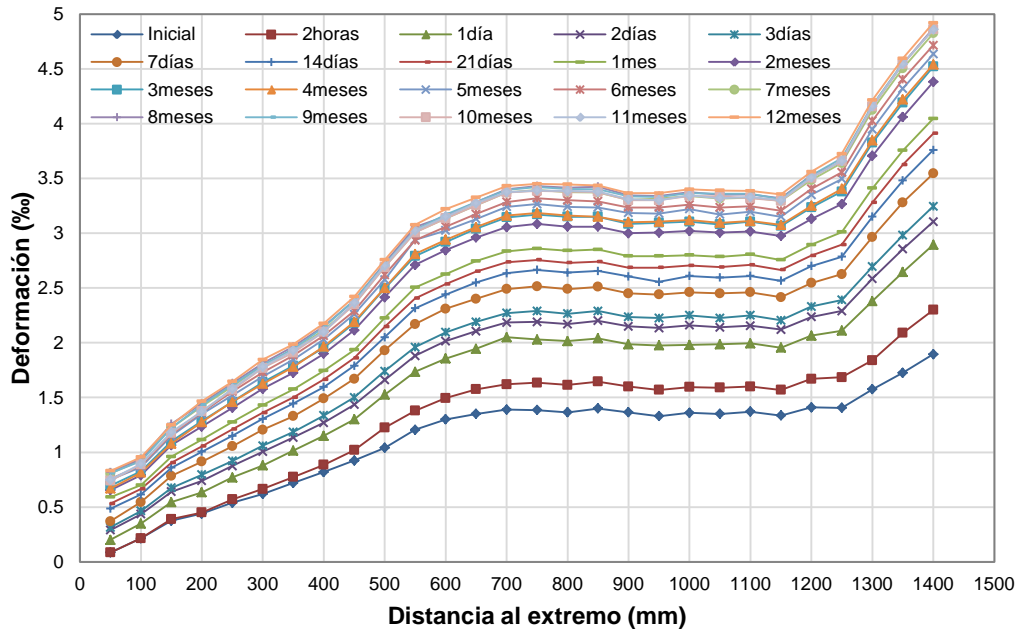


Figura J-12.1. Evolución de deformaciones longitudinales del hormigón hasta 12 meses. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-B-80-24-LS.

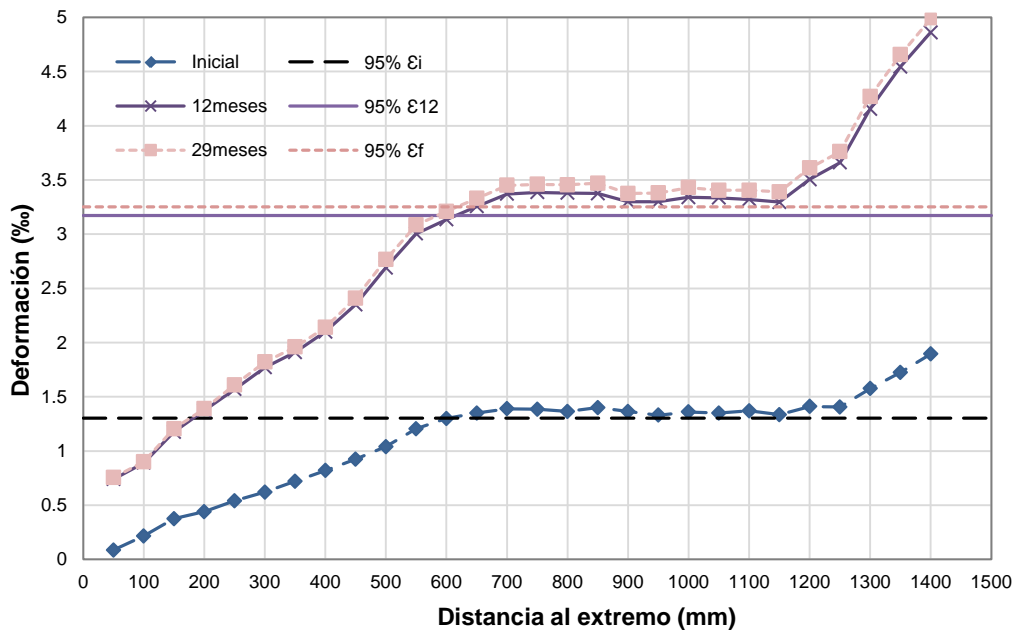


Figura J-12.2 Longitud de transmisión diferida por el método del 95% AMS. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-B-80-24-LS.



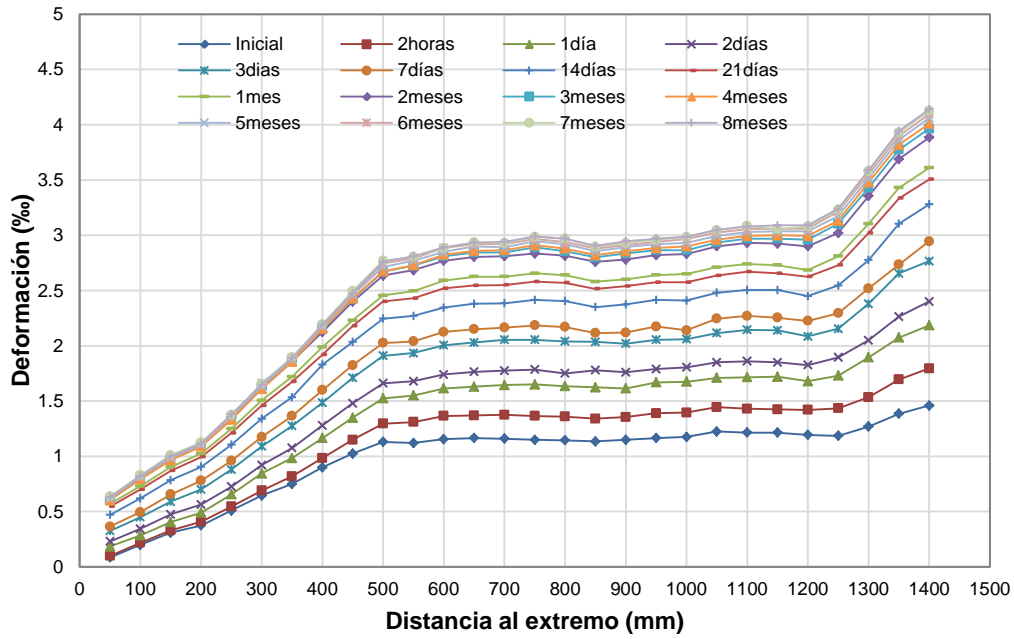


Figura J-13.1. Evolución de deformaciones longitudinales del hormigón hasta 8 meses. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-B-80-48-LS.

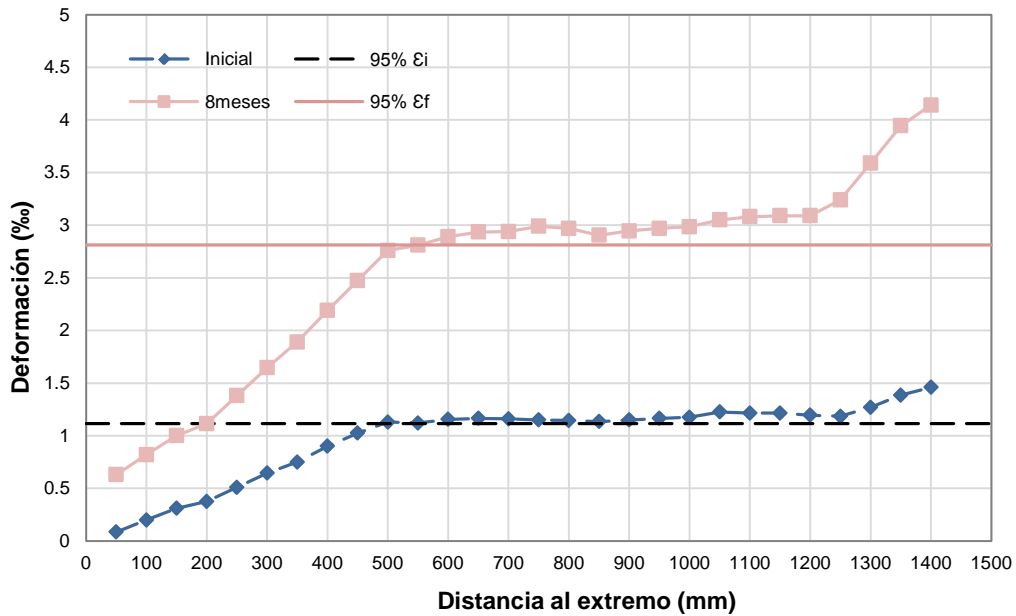


Figura J-13.2 Longitud de transmisión diferida por el método del 95% AMS. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-B-80-48-LS.

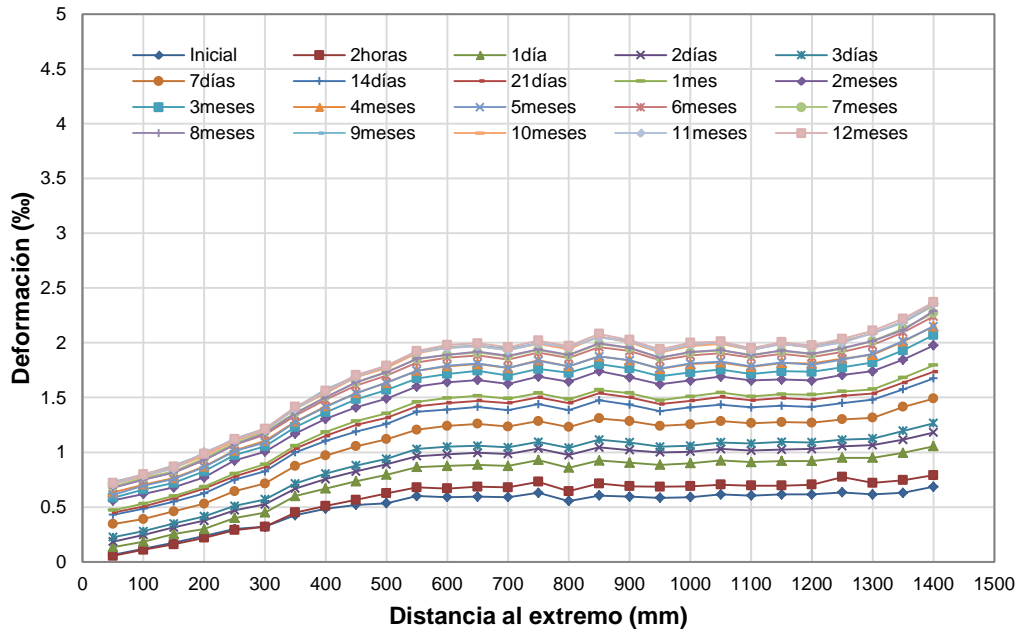


Figura J-14.1. Evolución de deformaciones longitudinales del hormigón hasta 12 meses. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-B-100-24-LS.

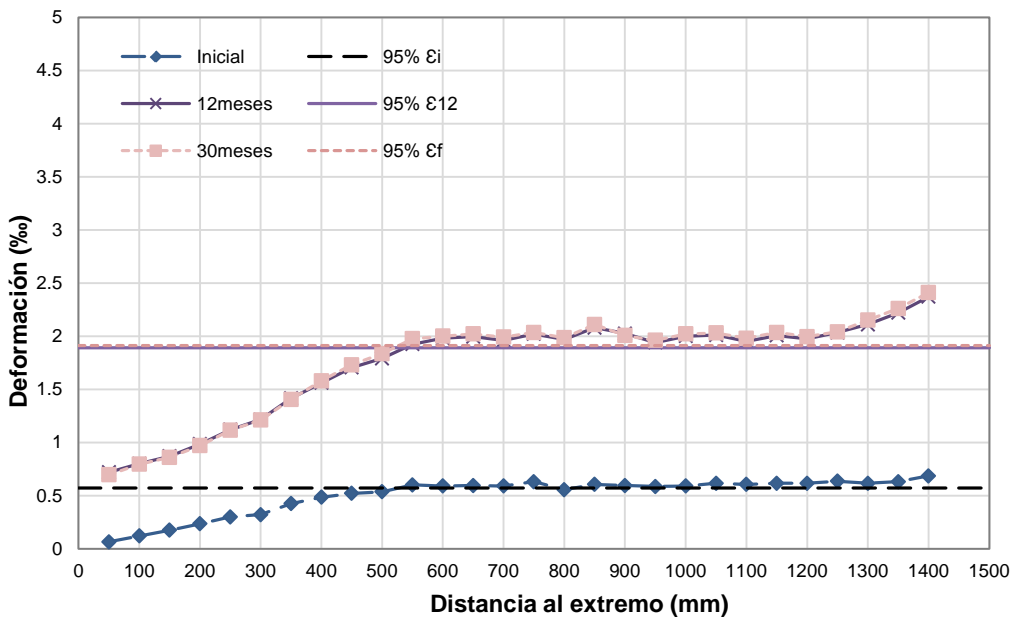
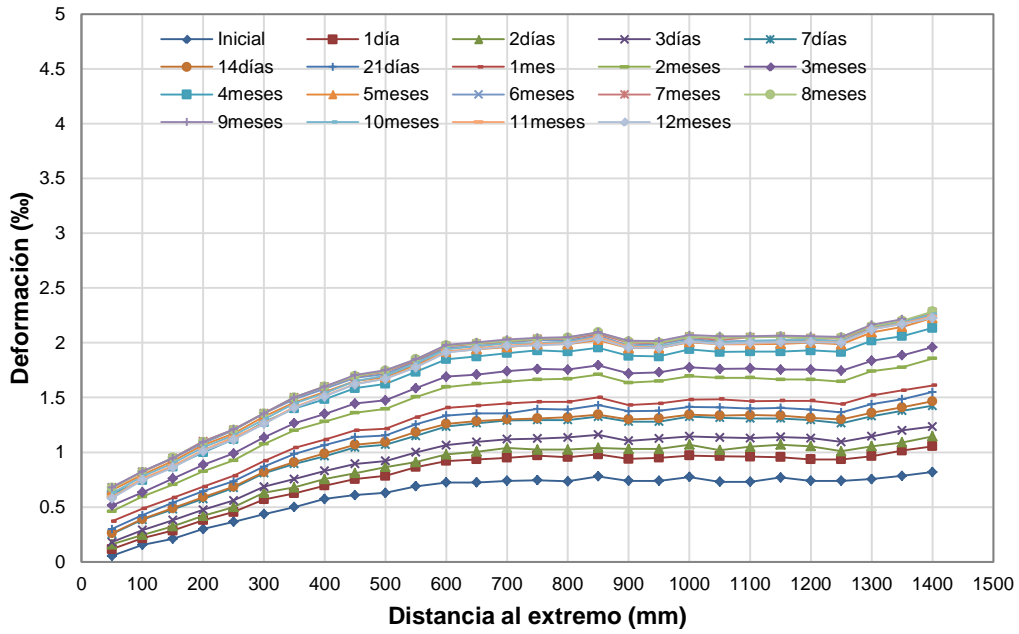
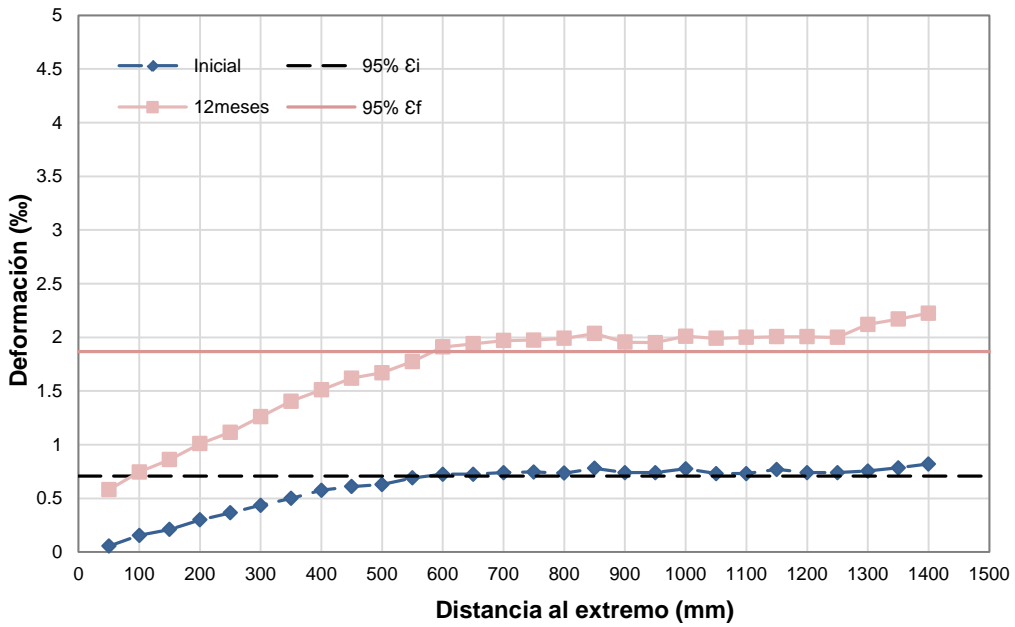


Figura J-14.2 Longitud de transmisión diferida por el método del 95% AMS. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-B-100-24-LS.

**ANEJO J. LONGITUD DE TRANSMISIÓN DIFERIDA.  
MÉTODO DE DEFORMACIONES LONGITUDINALES EN EL HORMIGÓN (95% AMS)**



**Figura J-15.1.** Evolución de deformaciones longitudinales del hormigón hasta 12 meses. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-B-100-48-LS.



**Figura J-15.2** Longitud de transmisión diferida por el método del 95 AMS. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-B-100-48-LS.

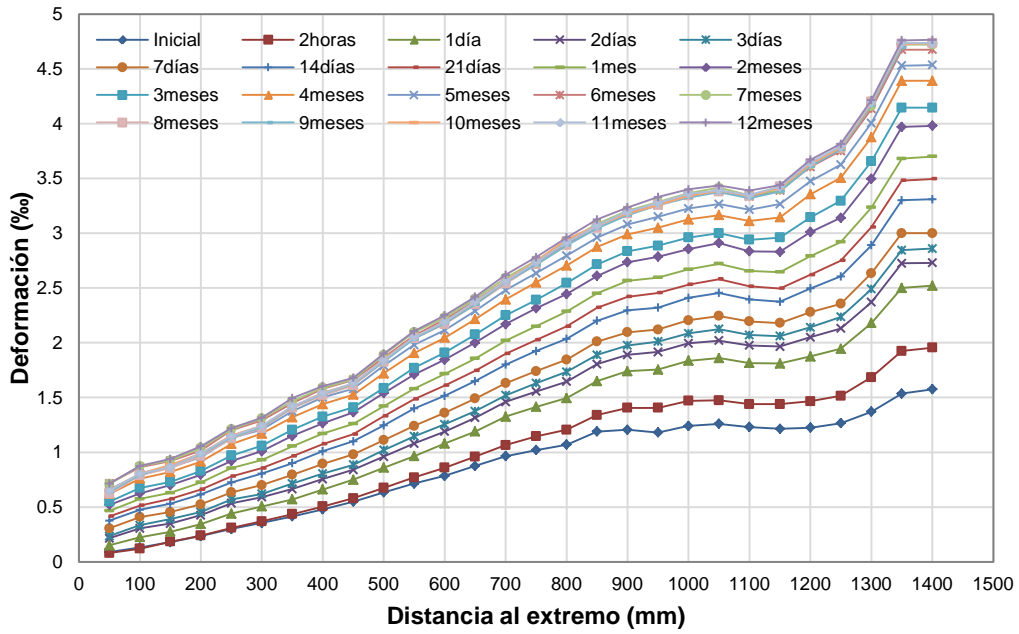


Figura J-16.1. Evolución de deformaciones longitudinales del hormigón hasta 12 meses. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-C-80-48-LS.

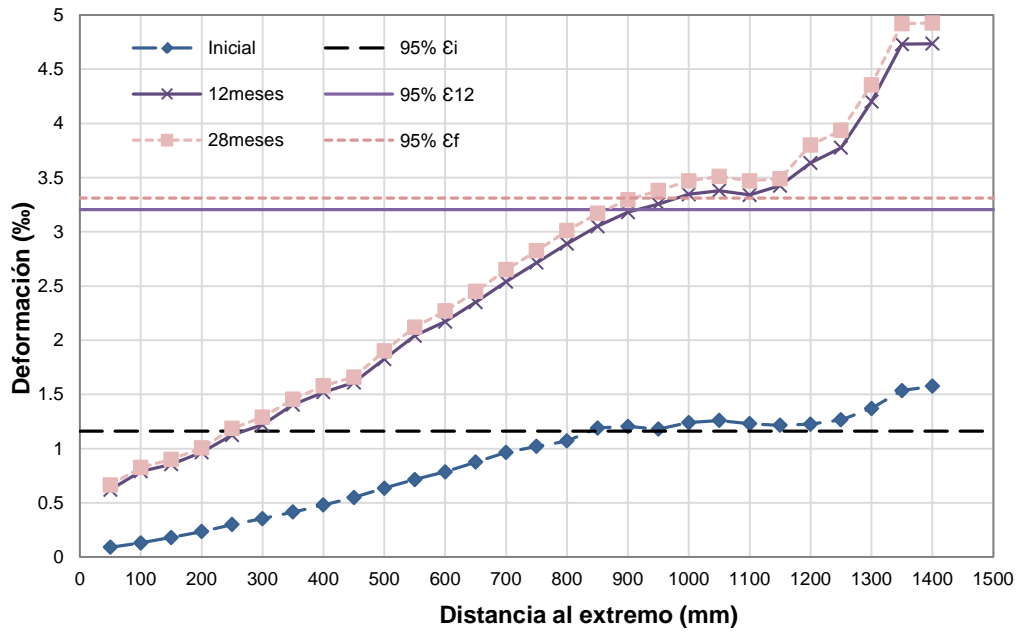
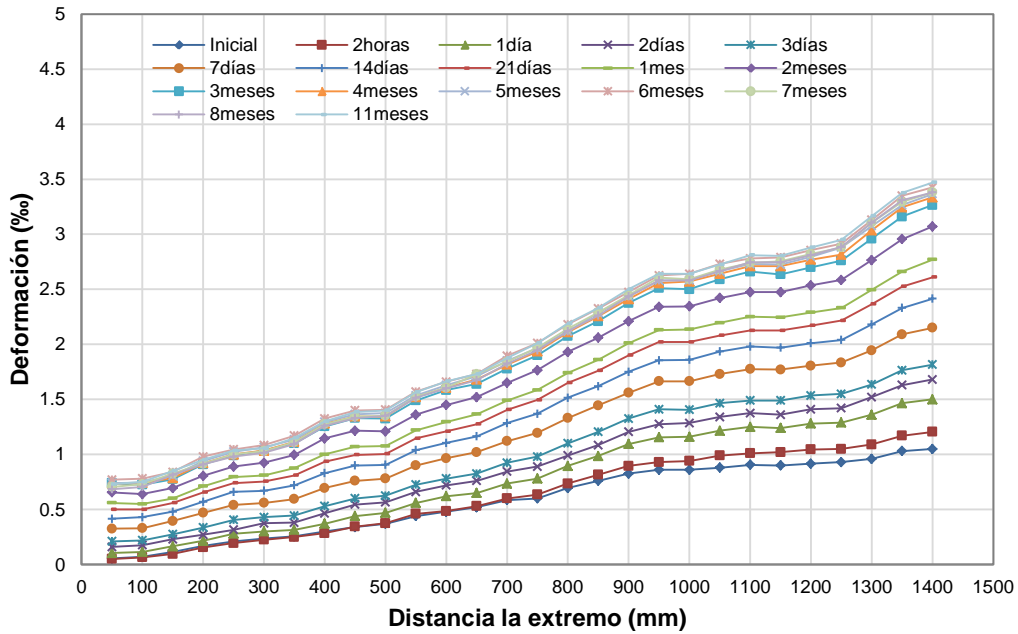
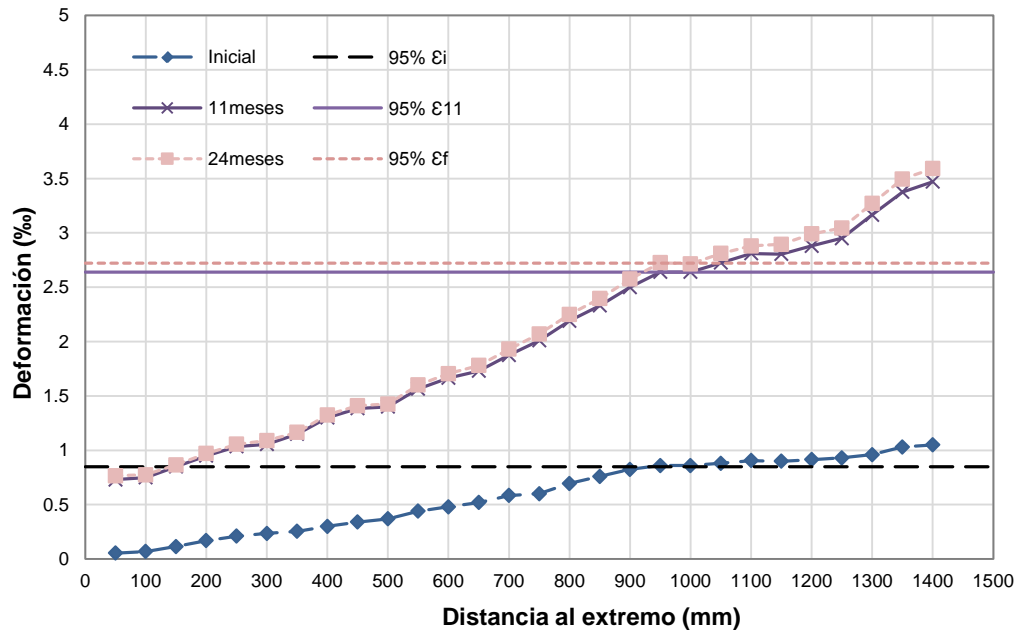


Figura J-16.2 Longitud de transmisión diferida por el método del 95% AMS. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-C-80-48-LS.

**ANEJO J. LONGITUD DE TRANSMISIÓN DIFERIDA.  
MÉTODO DE DEFORMACIONES LONGITUDINALES EN EL HORMIGÓN (95% AMS)**



**Figura J-17.1.** Evolución de deformaciones longitudinales del hormigón hasta 11 meses. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-C-100-24-LS.



**Figura J-17.2** Longitud de transmisión diferida por el método del 95% AMS. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-C-100-24-LS.

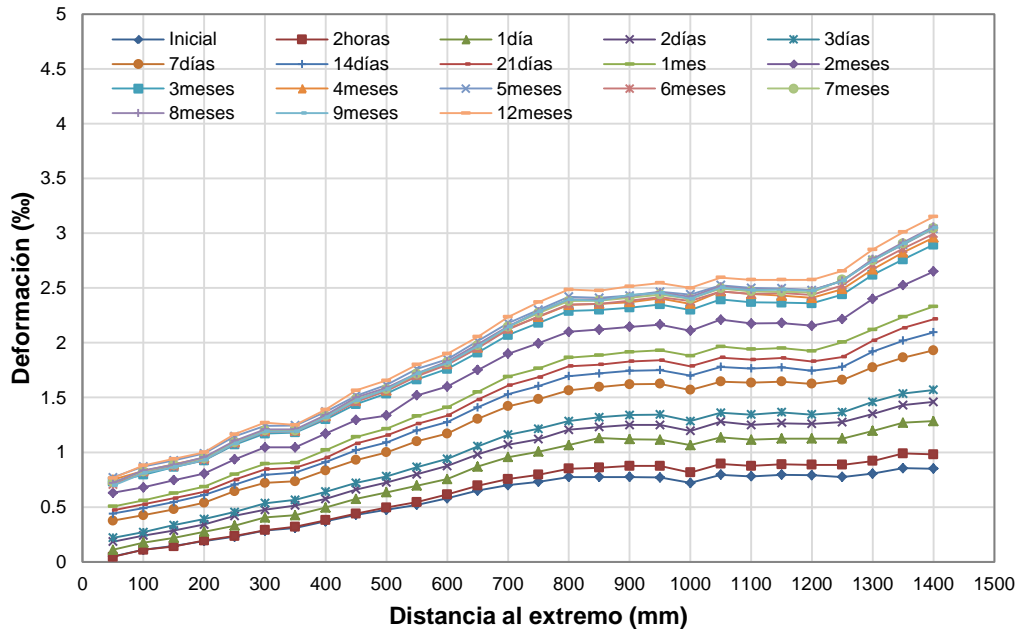


Figura J-18.1. Evolución de deformaciones longitudinales del hormigón hasta 12 meses. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-C-100-48-LS.

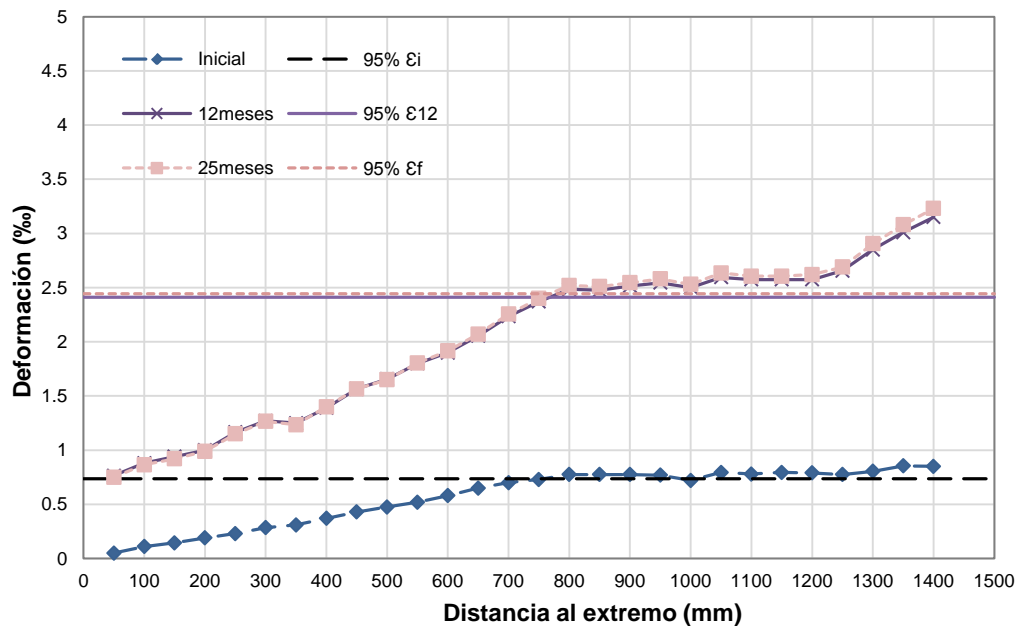


Figura J-18.2 Longitud de transmisión diferida por el método del 95% AMS. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HT-C-100-48-LS.

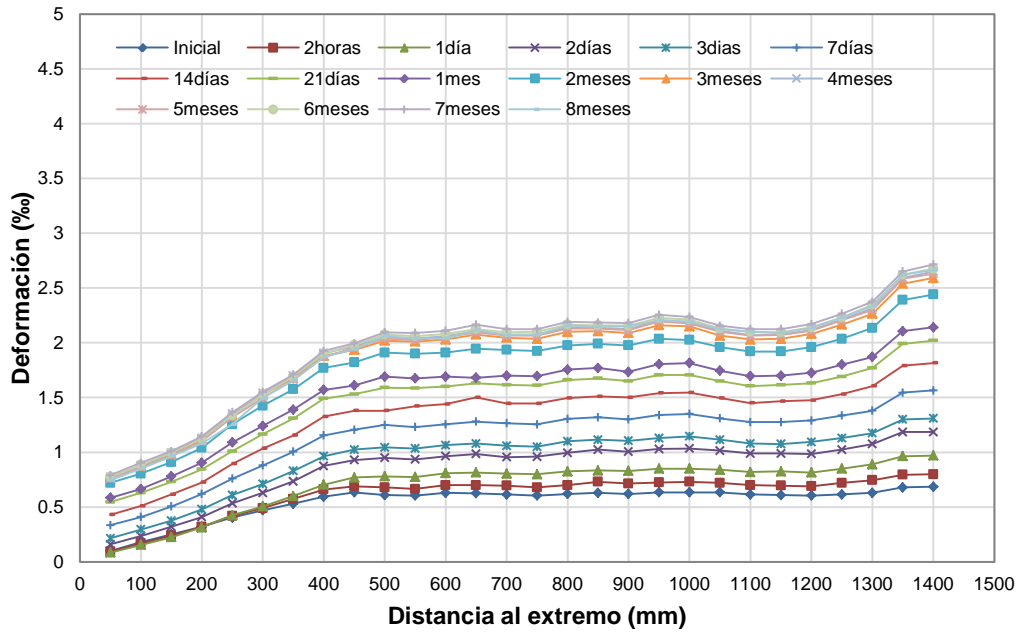


Figura J-19.1. Evolución de deformaciones longitudinales del hormigón hasta 8 meses. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HR-100-48-LS.

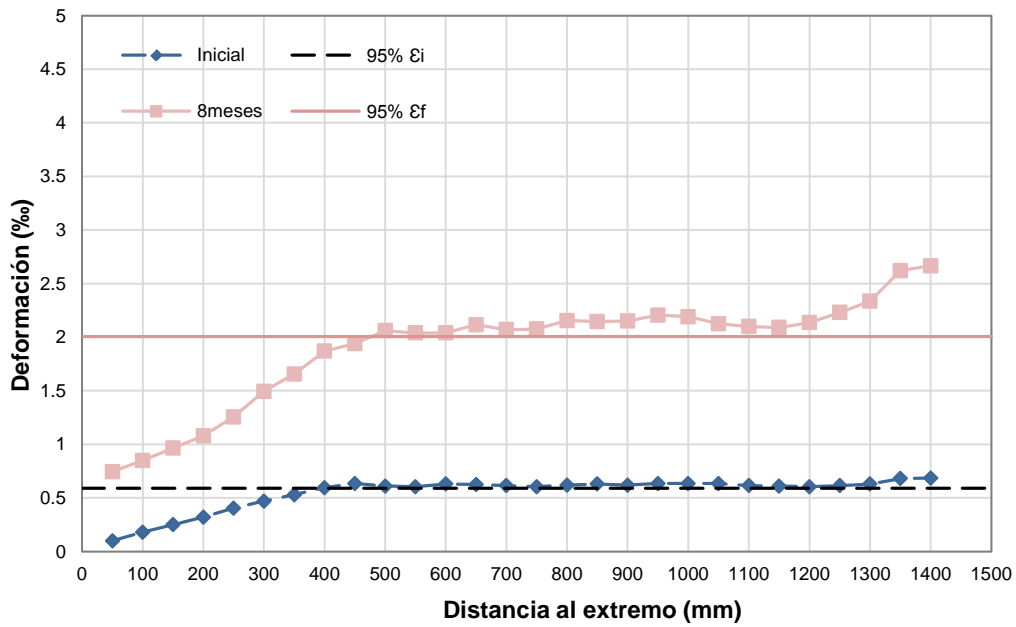


Figura J-19.2 Longitud de transmisión diferida por el método del 95% AMS. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HR-100-48-LS.

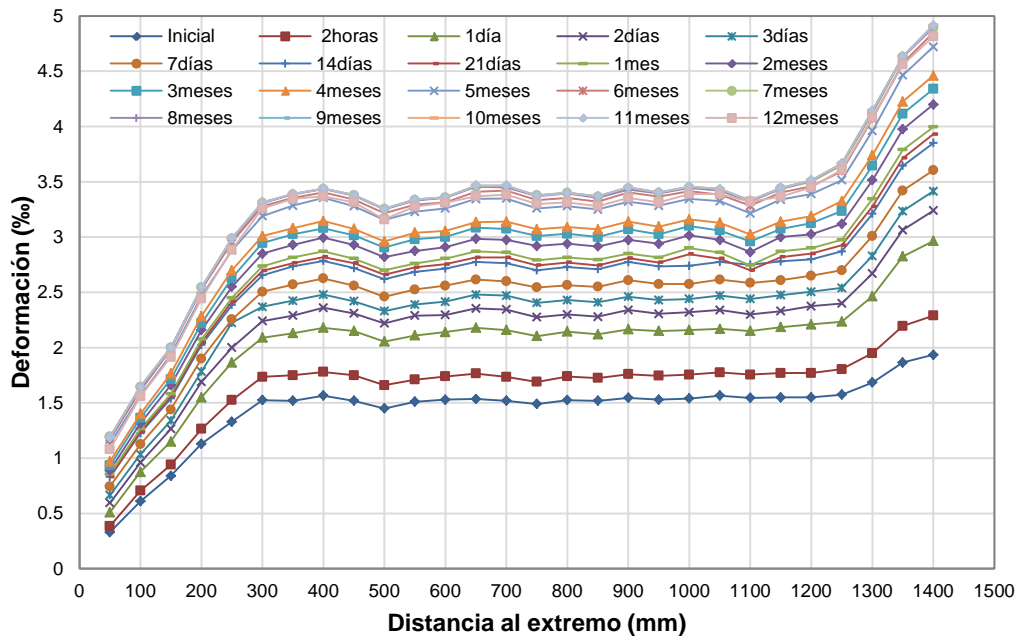


Figura J-20.1. Evolución de deformaciones longitudinales del hormigón hasta 12 meses. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta FA-60-24-LS.

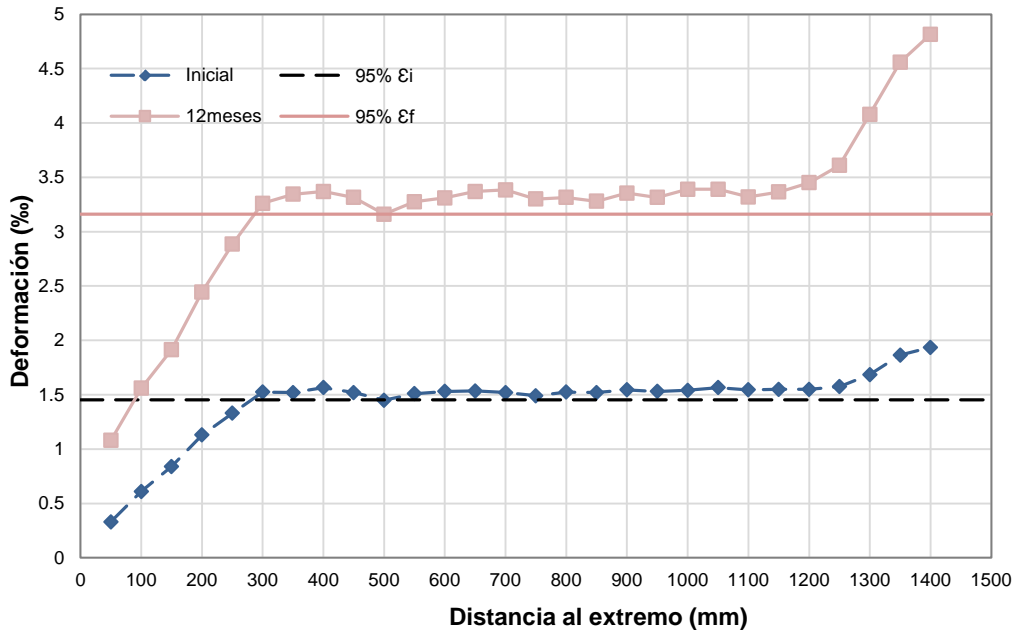


Figura J-20.2 Longitud de transmisión diferida por el método del 95% AMS. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta FA-60-24-LS.



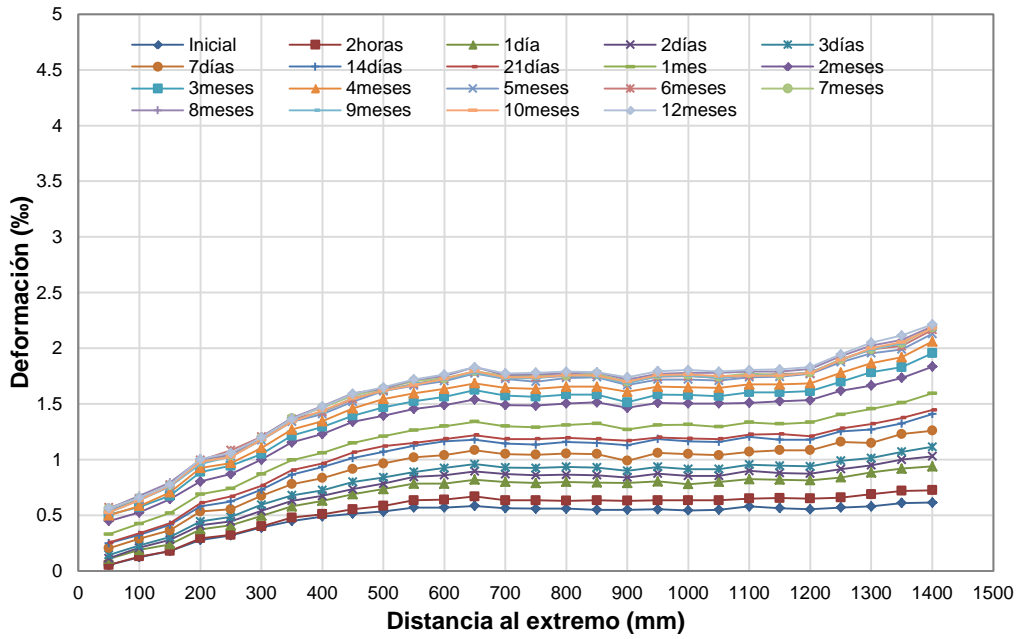


Figura J-21.1. Evolución de deformaciones longitudinales del hormigón hasta 12 meses. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HAC-NF-100-48-LS.

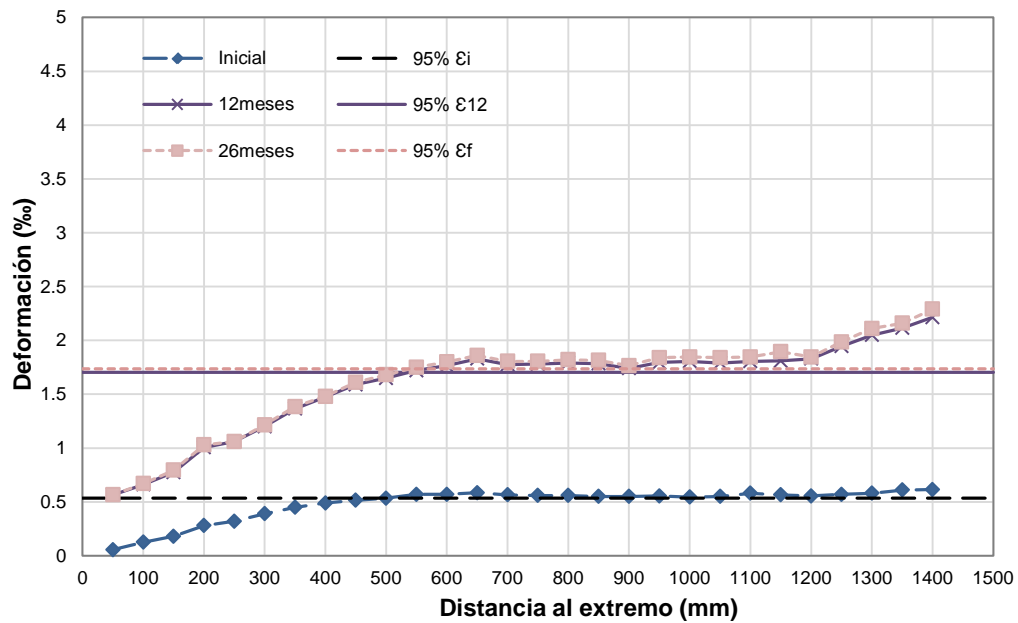


Figura J-21.2 Longitud de transmisión diferida por el método del 95% AMS. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HAC-NF-100-48-LS.

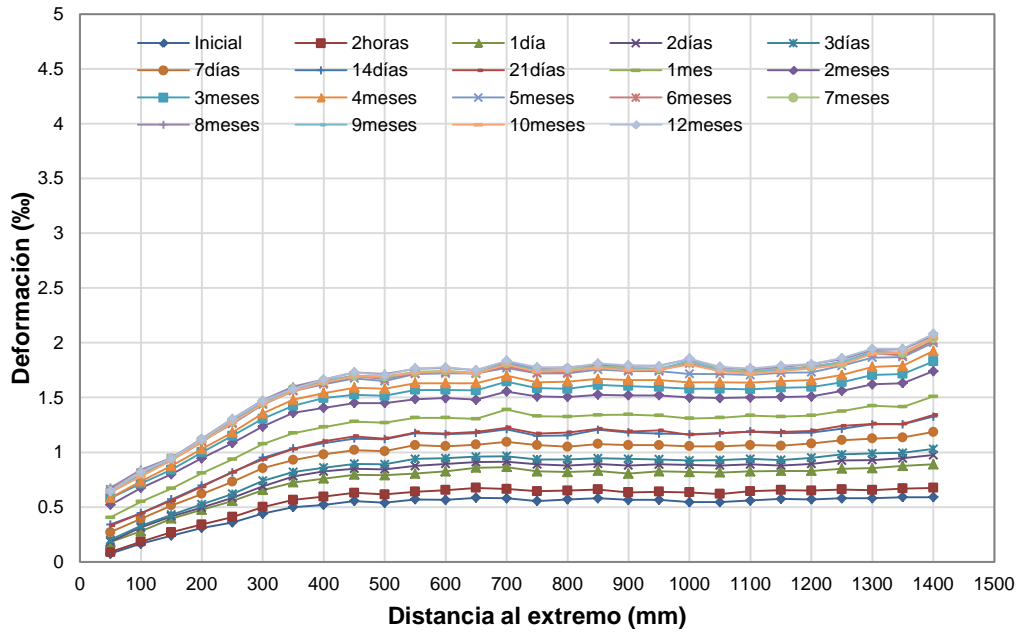


Figura J-22.1. Evolución de deformaciones longitudinales del hormigón hasta 12 meses. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HAC-LF-100-48-LS.

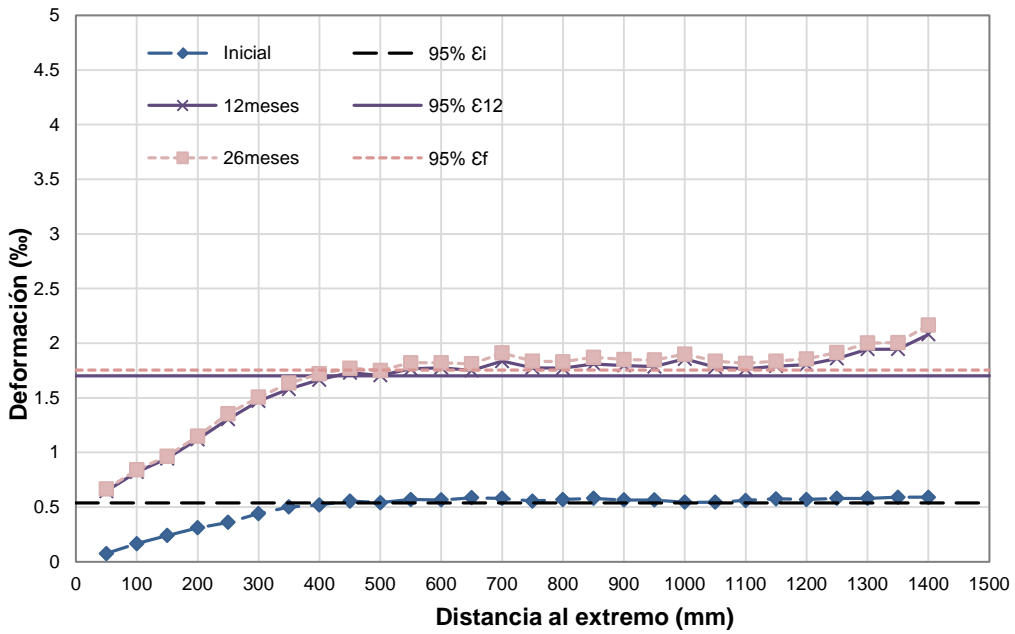


Figura J-22.2 Longitud de transmisión diferida por el método del 95% AMS. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HAC-LF-100-48-LS.

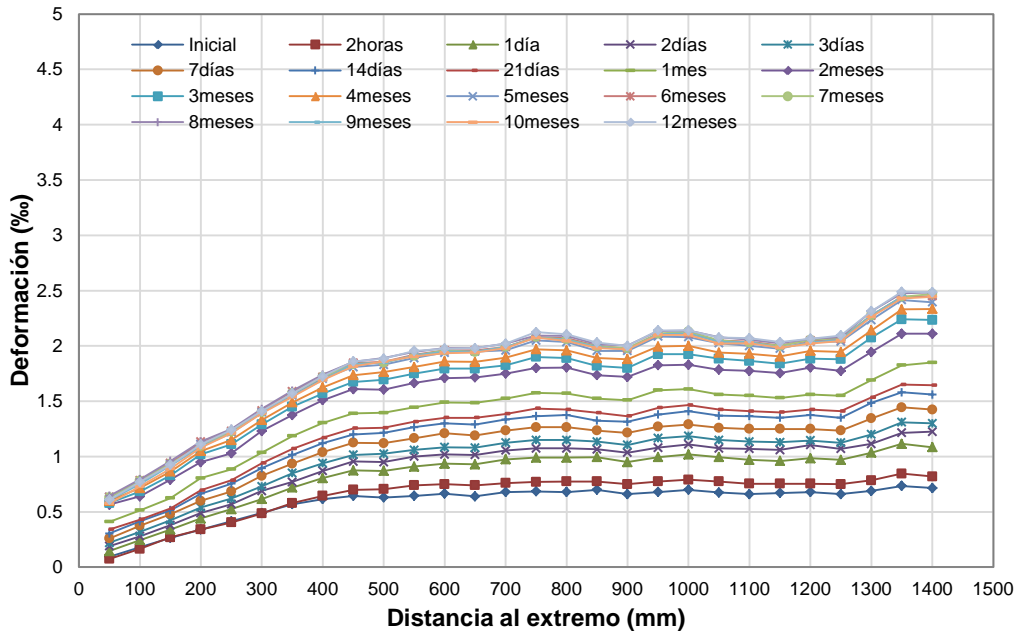


Figura J-23.1. Evolución de deformaciones longitudinales del hormigón hasta 12 meses. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HAC-MF-100-48-LS.

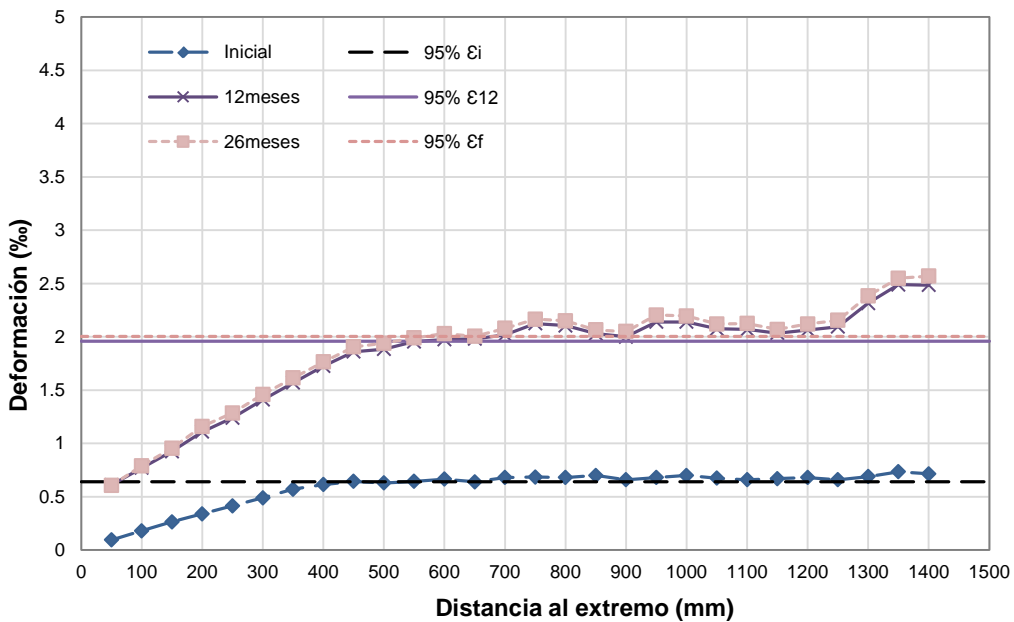


Figura J-23.2 Longitud de transmisión diferida por el método del 95% AMS. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HAC-MF-100-48-LS.

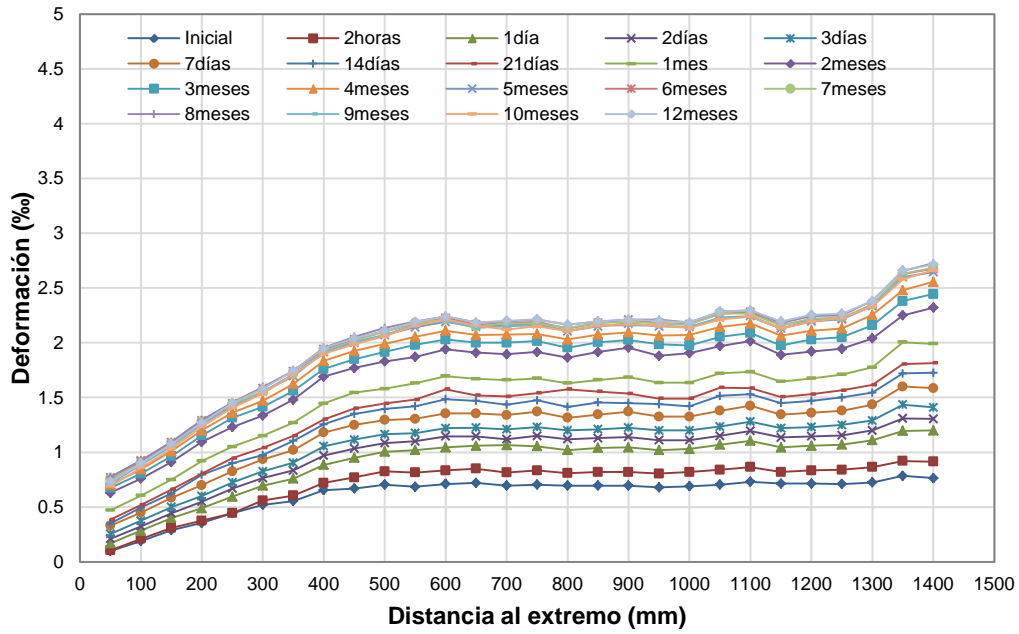


Figura J-24.1. Evolución de deformaciones longitudinales del hormigón hasta 12 meses. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HAC-HF-100-48-LS.

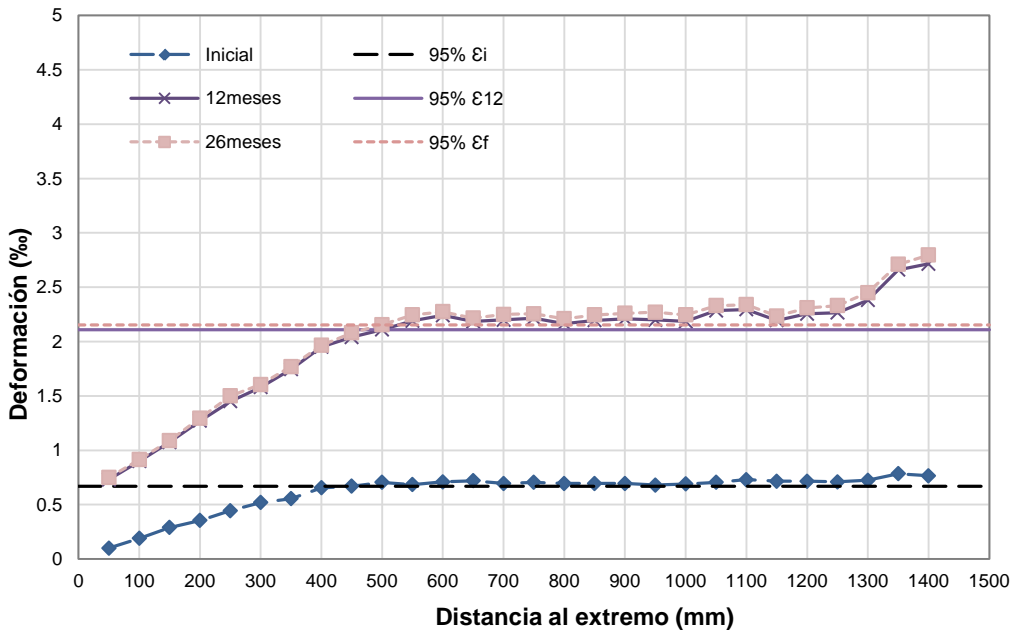


Figura J-24.2 Longitud de transmisión diferida por el método del 95% AMS. Deformación vs. Longitud de probeta. Probeta HAC-HF-100-48-LS.

ANEJO K. RETRACCIÓN DEL HORMIGÓN

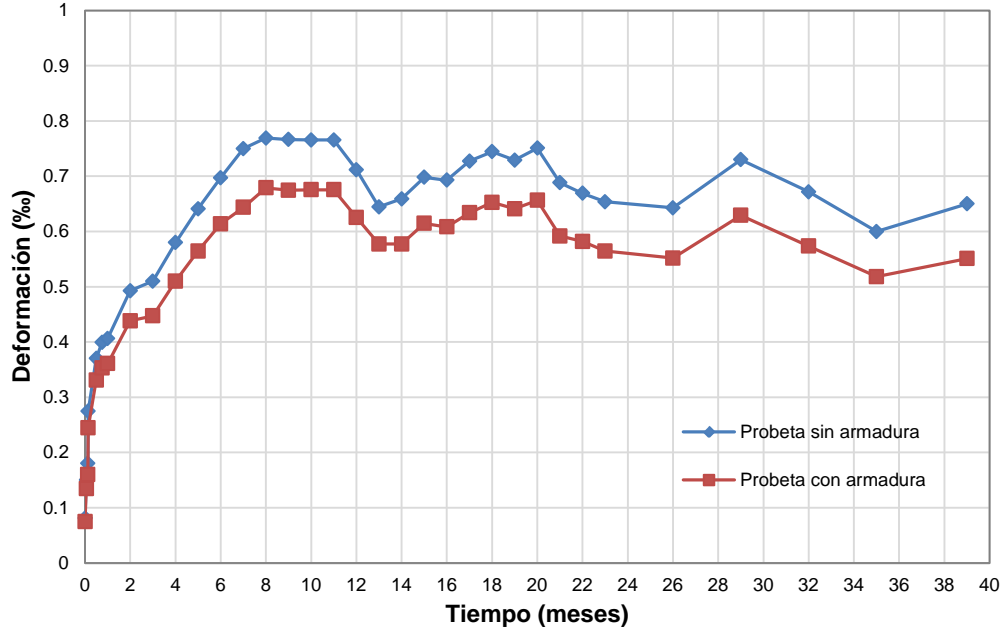


Figura K-1. Retracción media del hormigón tipo A. Deformación longitudinal del hormigón vs. Tiempo.

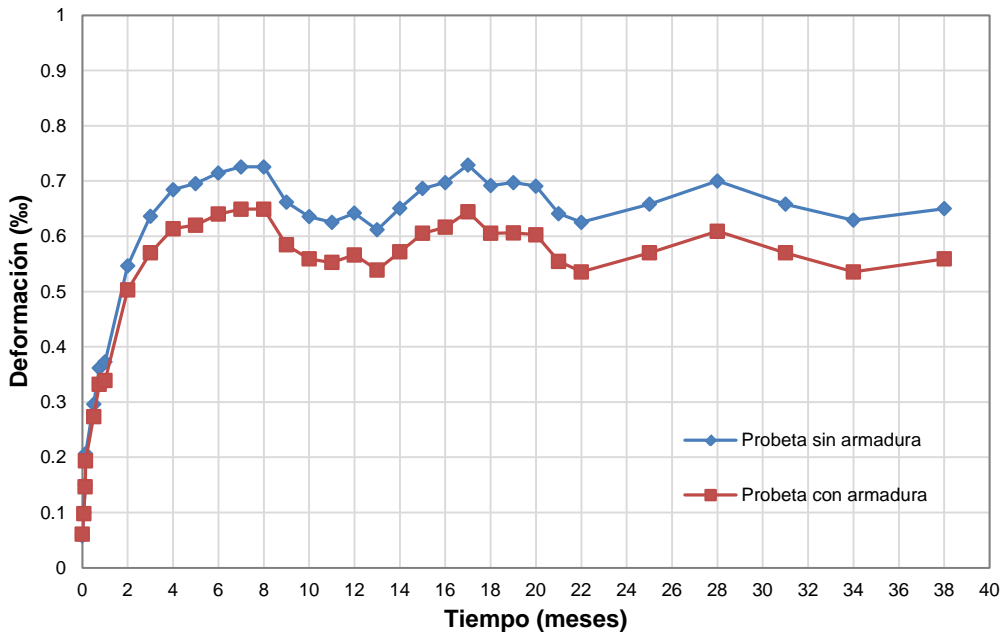
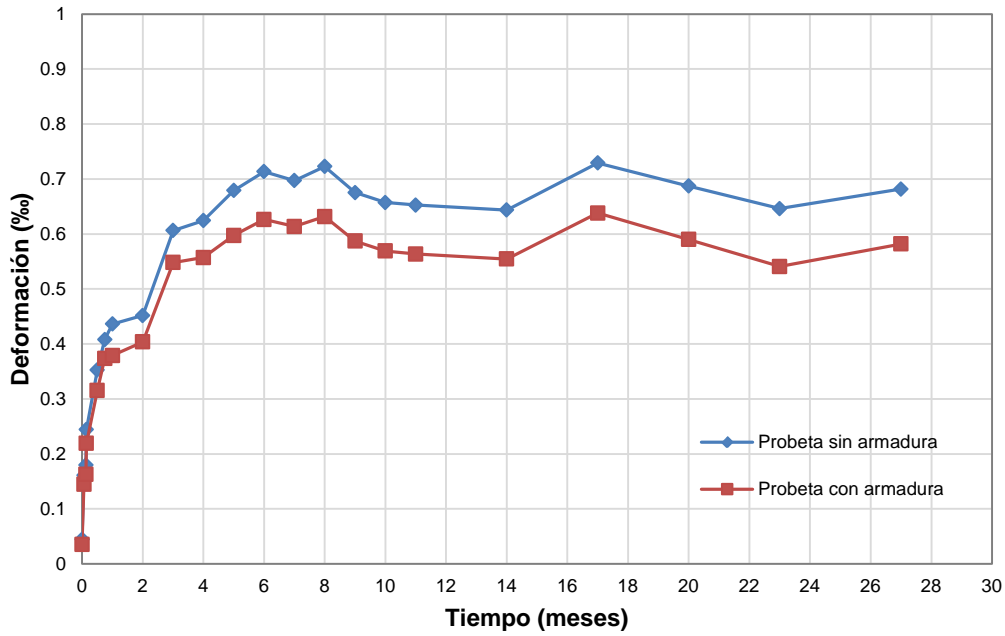
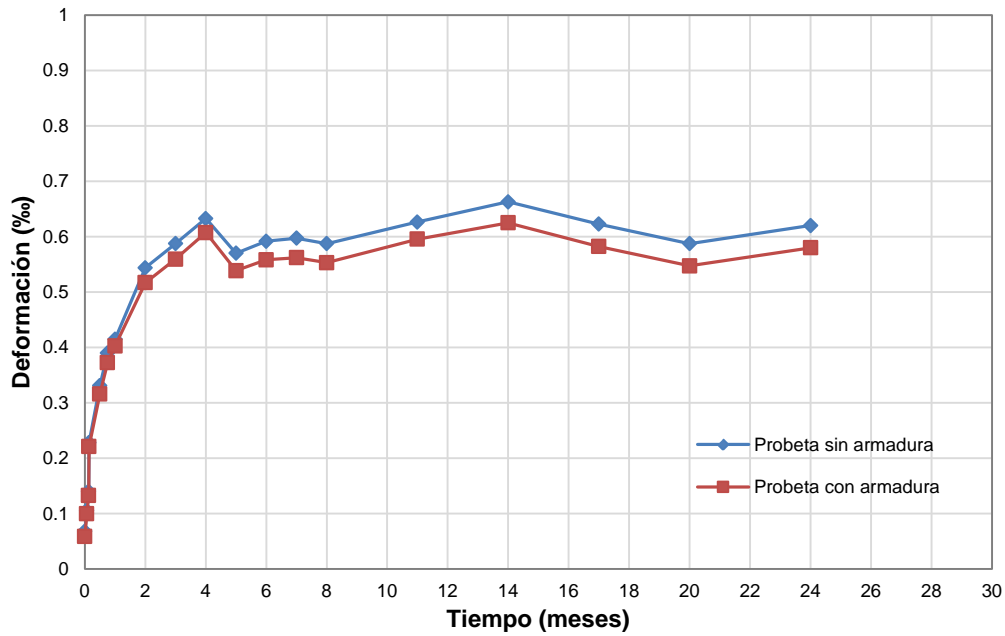


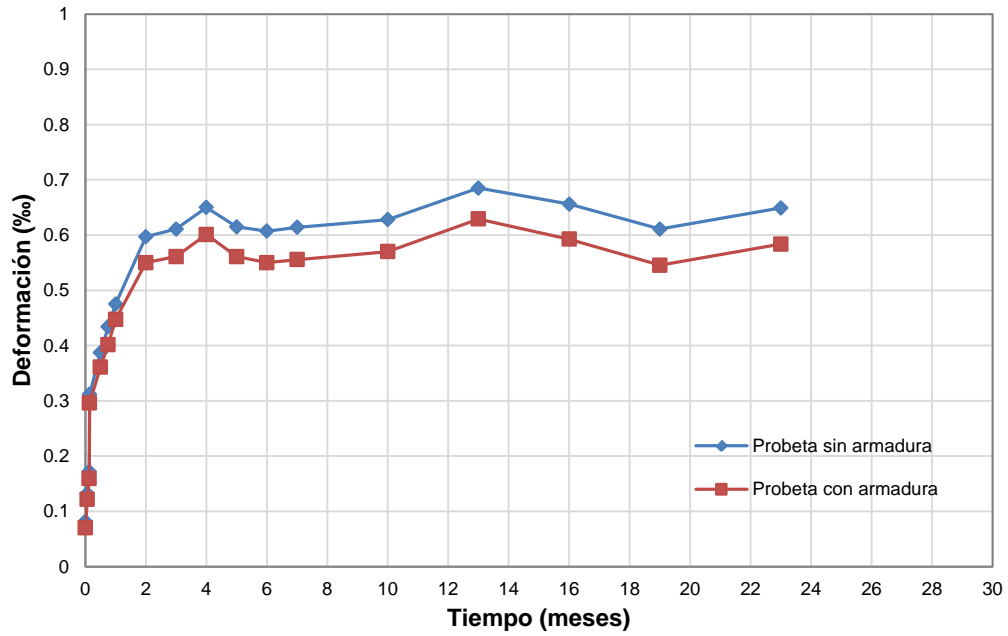
Figura K-2. Retracción media del hormigón tipo B. Deformación longitudinal del hormigón vs. Tiempo.



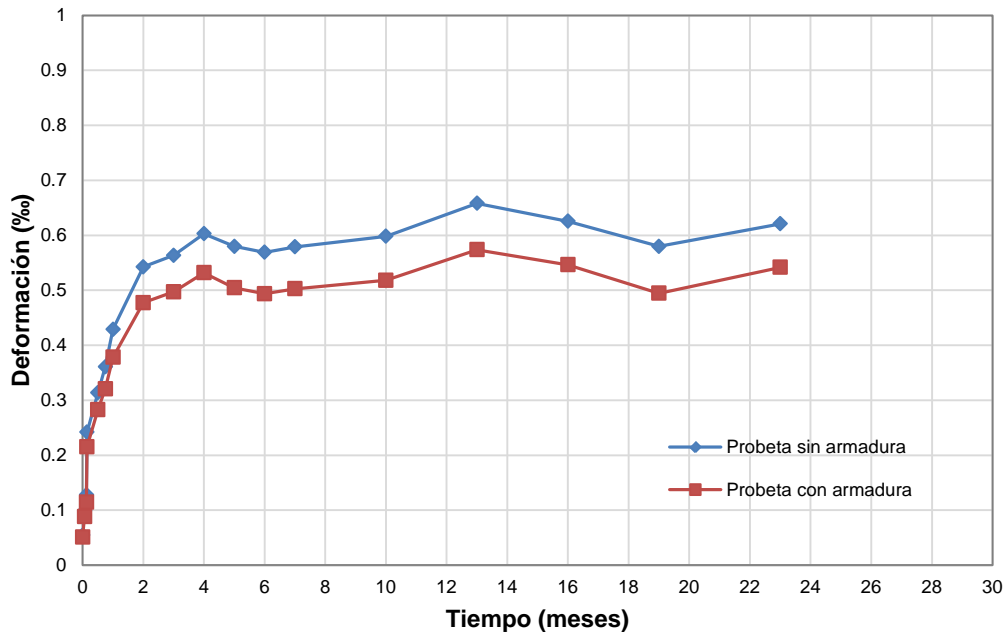
**Figura K-3.** Retracción media del hormigón tipo C. Deformación longitudinal del hormigón vs. Tiempo.



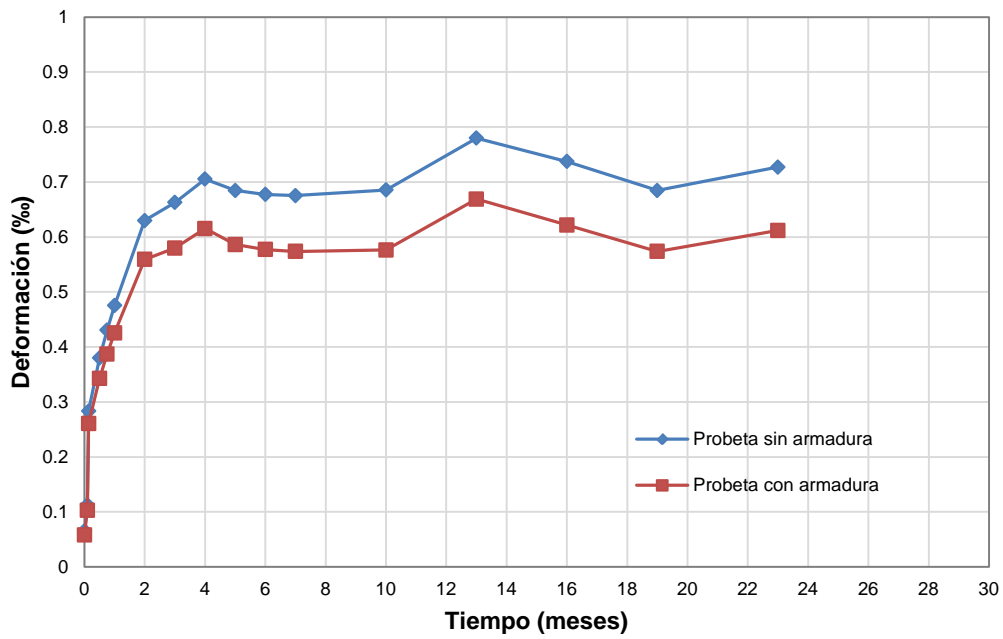
**Figura K-4.** Retracción media del hormigón tipo HAC-NF. Deformación longitudinal del hormigón vs. Tiempo.



**Figura K-5.** Retracción media del hormigón tipo HAC-LF.  
Deformación longitudinal del hormigón vs. Tiempo.



**Figura K-6.** Retracción media del hormigón tipo HAC-MF.  
Deformación longitudinal del hormigón vs. Tiempo.



**Figura K-7.** Retracción media del hormigón tipo HAC-HF.  
Deformación longitudinal del hormigón vs. Tiempo.



### ANEJO L. EVOLUCIÓN DE DEFORMACIONES LONGITUDINALES DEL HORMIGÓN EN EL TRAMO DE MESETA CON EL TIEMPO

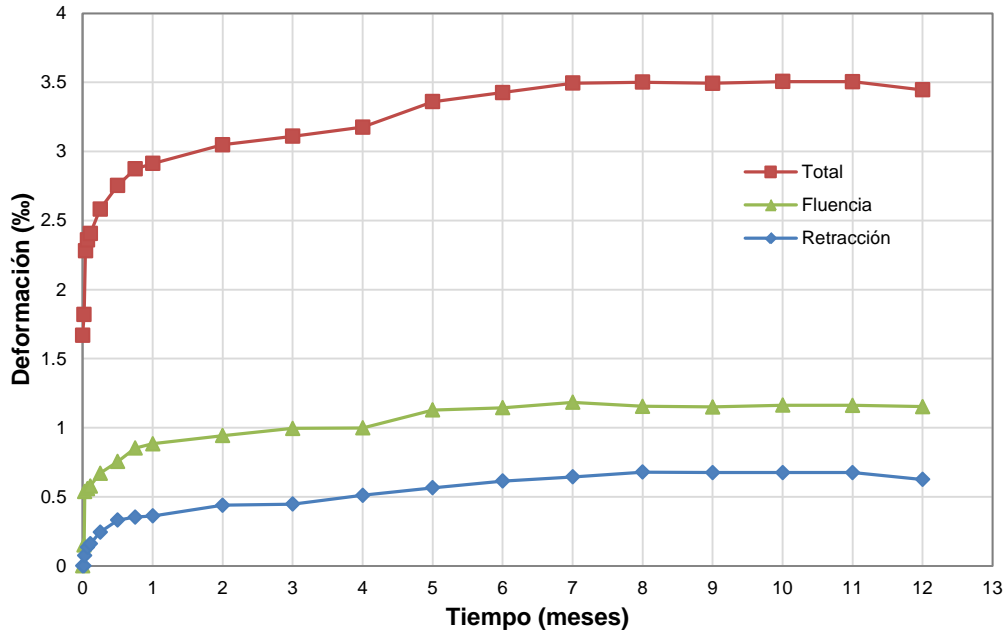


Figura L-1. Deformación media en el tramo de meseta vs. Tiempo. Probeta HT-A-60-24-LS.

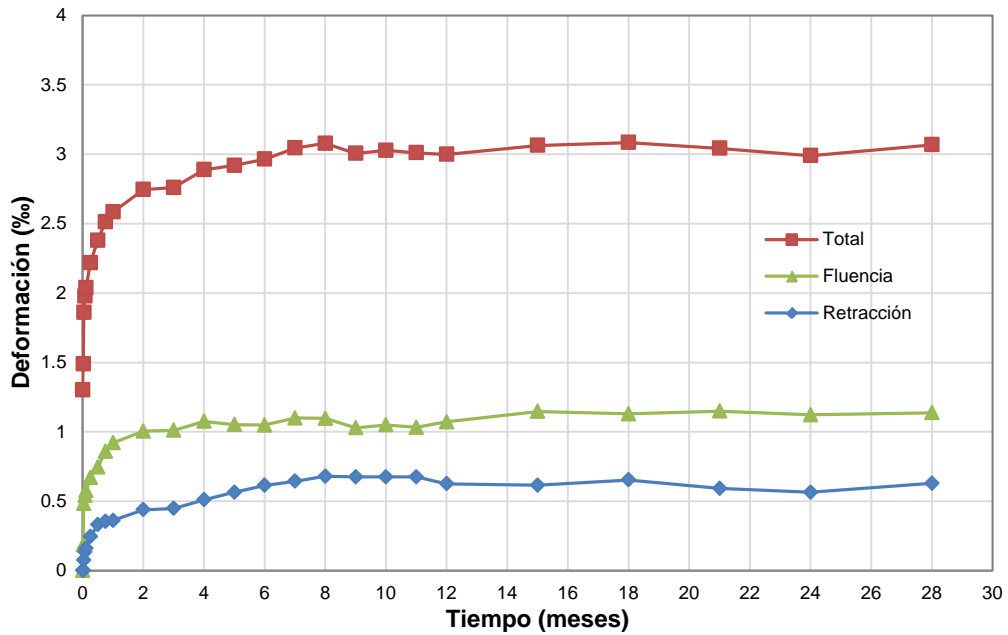


Figura L-2. Deformación media en el tramo de meseta vs. Tiempo. Probeta HT-A-60-48-LS.

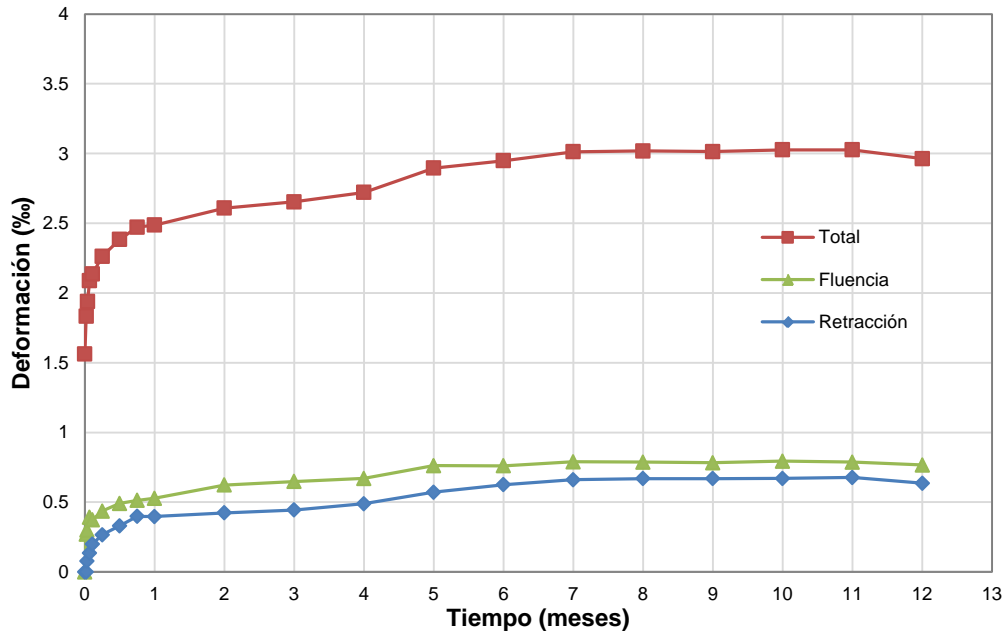


Figura L-3. Deformación media en el tramo de meseta vs. Tiempo. Probeta HT-A-80-12-LS.

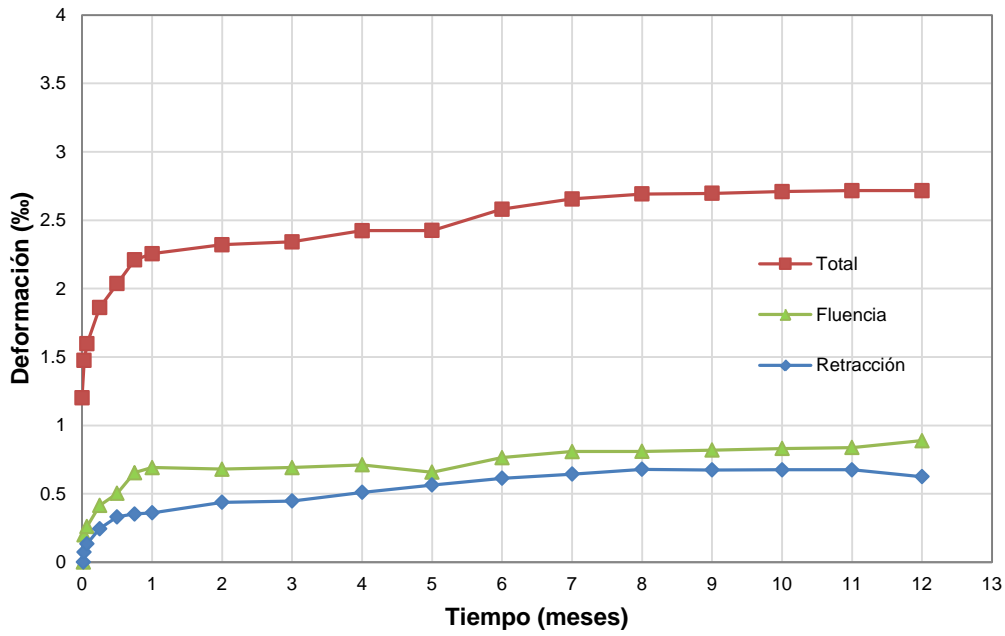
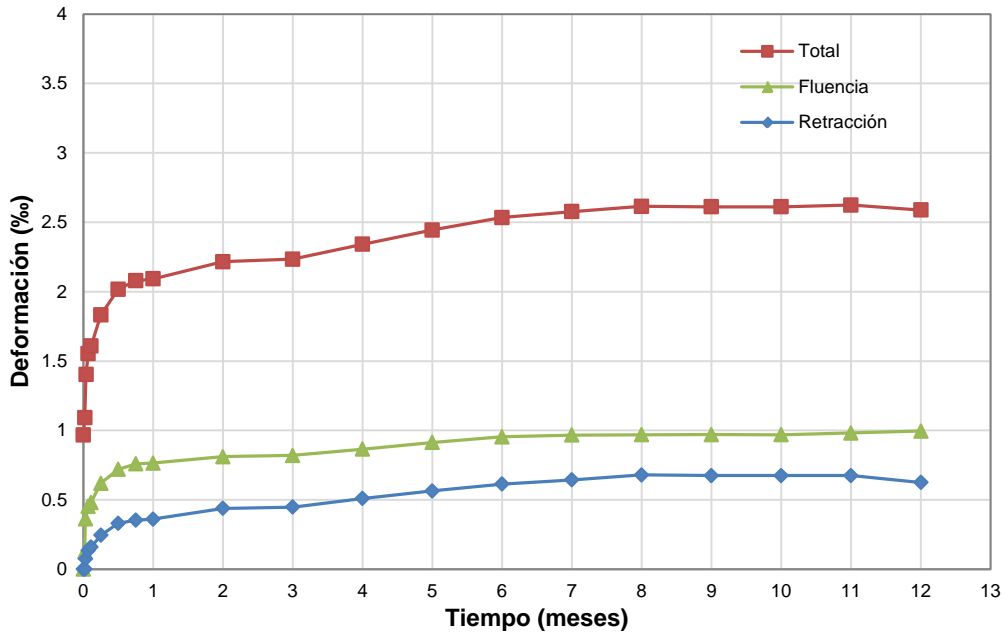
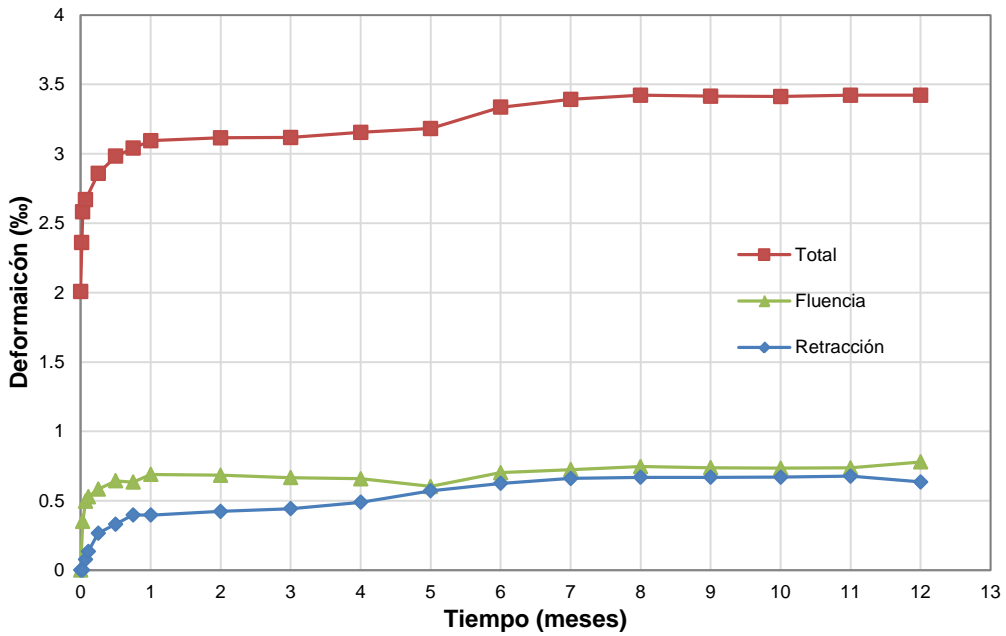


Figura L-4. Deformación media en el tramo de meseta vs. Tiempo. Probeta HT-A-80-24-LS.

**ANEJO L. EVOLUCIÓN DE DEFORMACIONES LONGITUDINALES DEL HORMIGÓN  
EN EL TRAMO DE MESETA CON EL TIEMPO**



**Figura L-5.** Deformación media en el tramo de meseta vs. Tiempo.  
Probeta HT-A-80-24-LS-FA.



**Figura L-6.** Deformación media en el tramo de meseta vs. Tiempo.  
Probeta HT-A-100-6-LS.

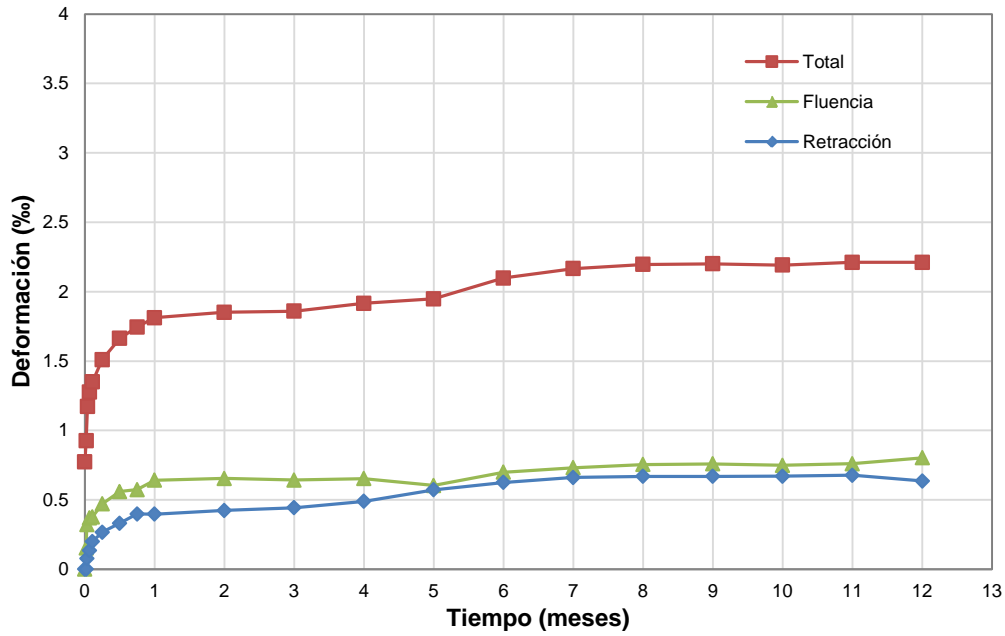


Figura L-7. Deformación media en el tramo de meseta vs. Tiempo. Probeta HT-A-100-12-LS.

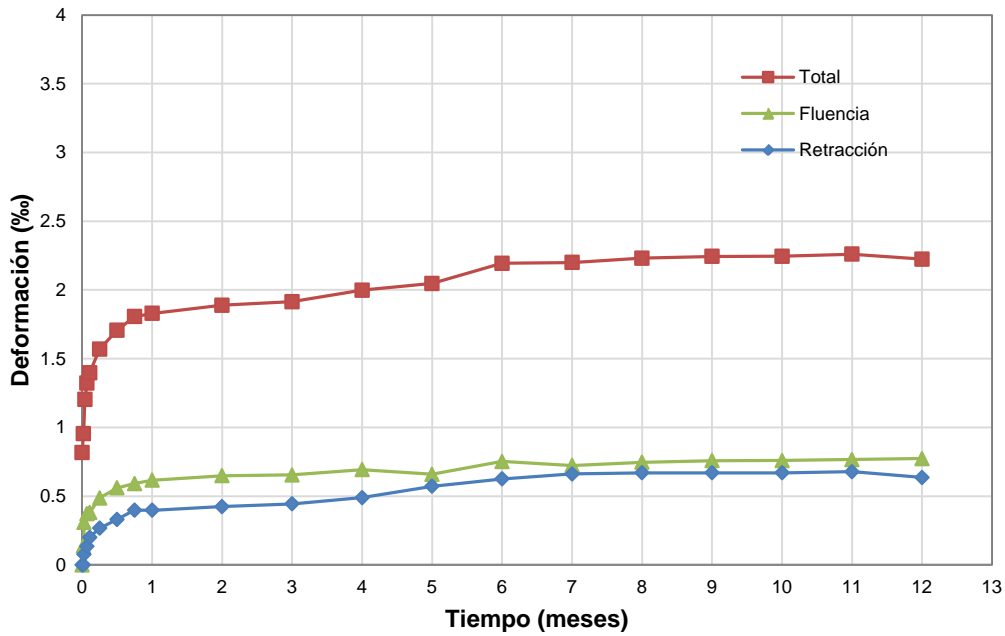
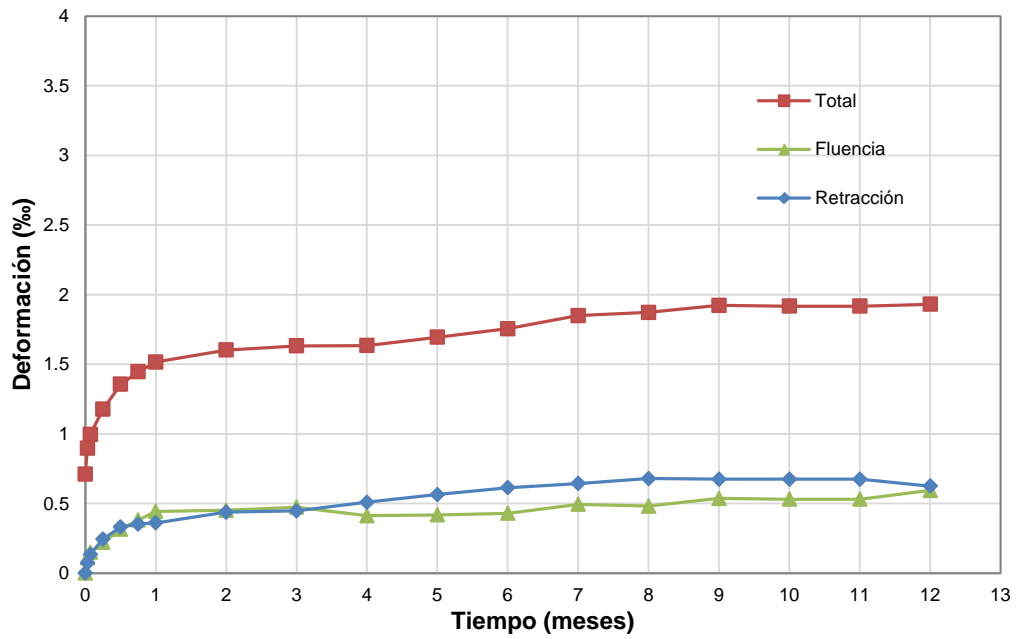
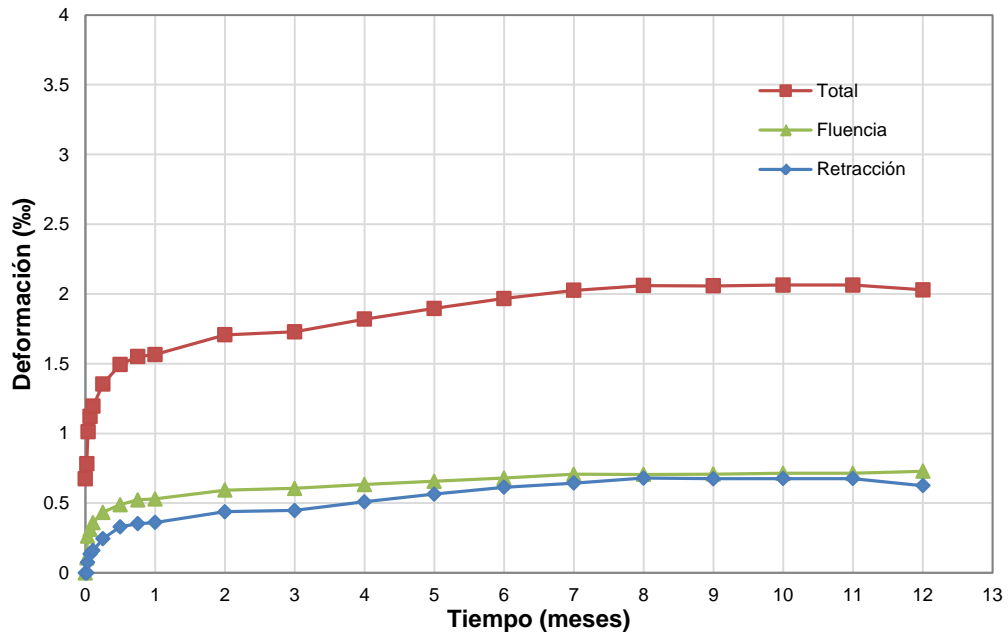


Figura L-8. Deformación media en el tramo de meseta vs. Tiempo. Probeta HT-A-100-12-LS-FA.

**ANEJO L. EVOLUCIÓN DE DEFORMACIONES LONGITUDINALES DEL HORMIGÓN  
EN EL TRAMO DE MESETA CON EL TIEMPO**



**Figura L-9.** Deformación media en el tramo de meseta vs. Tiempo.  
Probeta HT-A-100-24-LS.



**Figura L-10.** Deformación media en el tramo de meseta vs. Tiempo.  
Probeta HT-A-100-24-LS-FA.

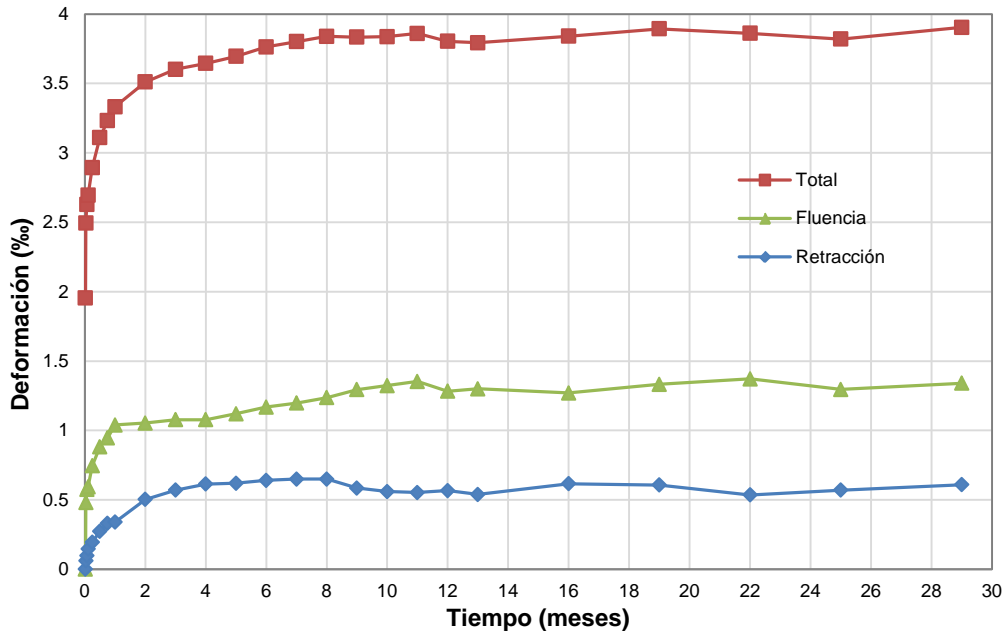


Figura L-11. Deformación media en el tramo de meseta vs. Tiempo. Probeta HT-B-60-48-LS.

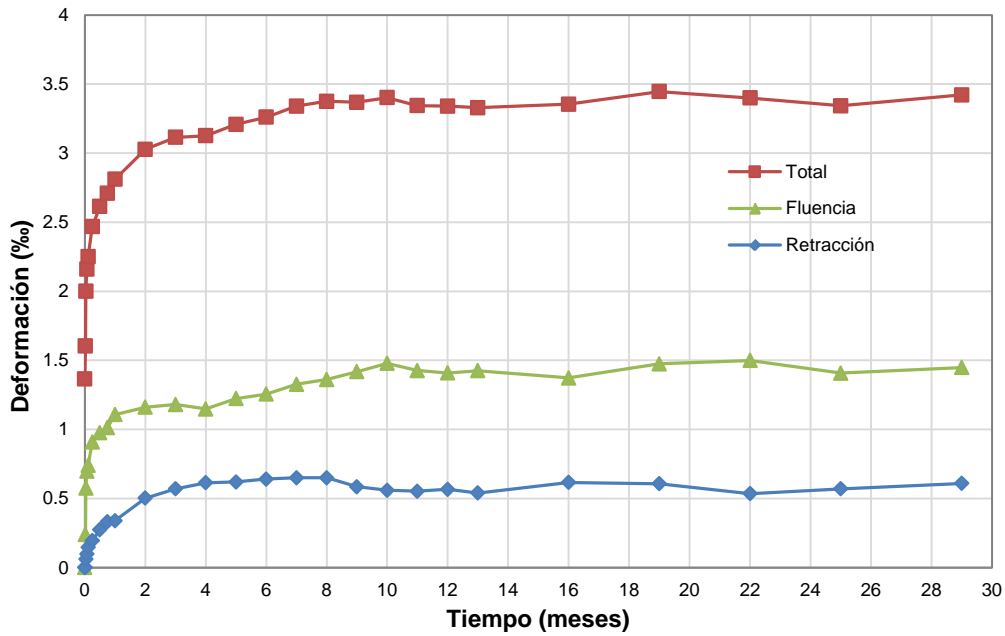


Figura L-12. Deformación media en el tramo de meseta vs. Tiempo. Probeta HT-B-80-24-LS.

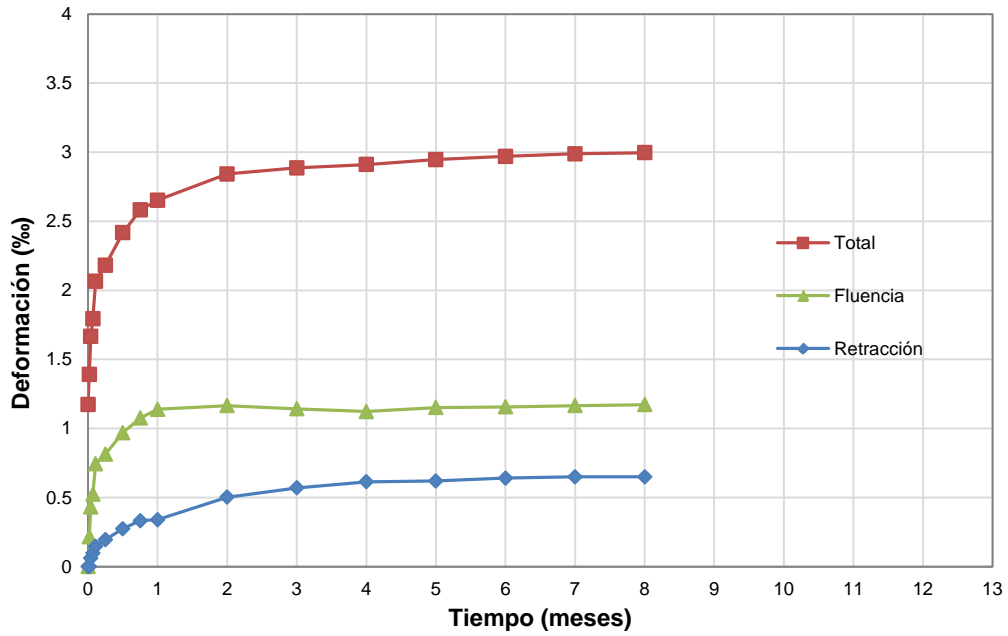


Figura L-13. Deformación media en el tramo de meseta vs. Tiempo.  
Probeta HT-B-80-48-LS.

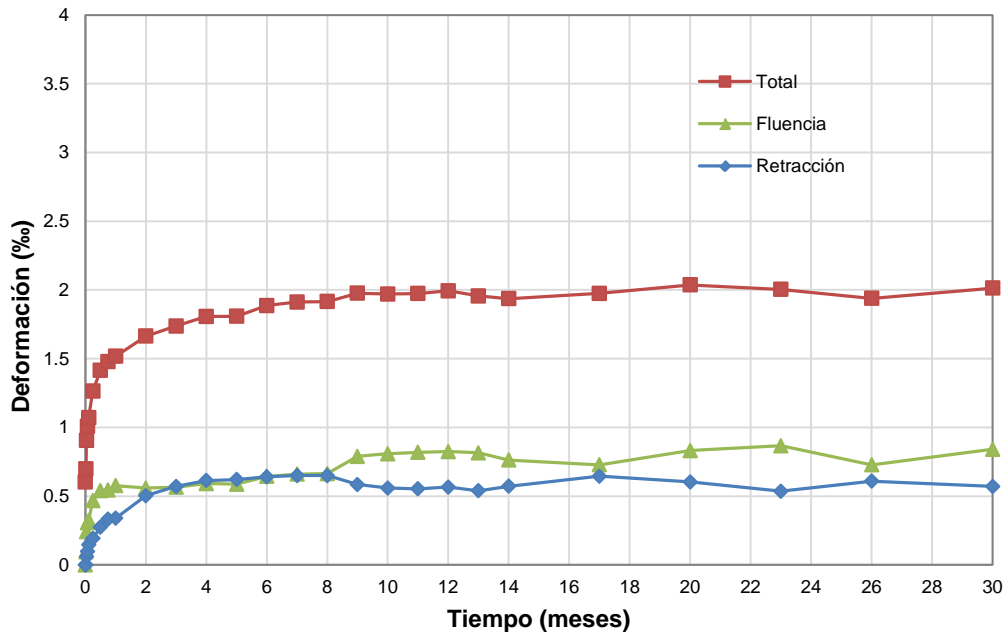


Figura L-13. Deformación media en el tramo de meseta vs. Tiempo.  
Probeta HT-B-100-24-LS.

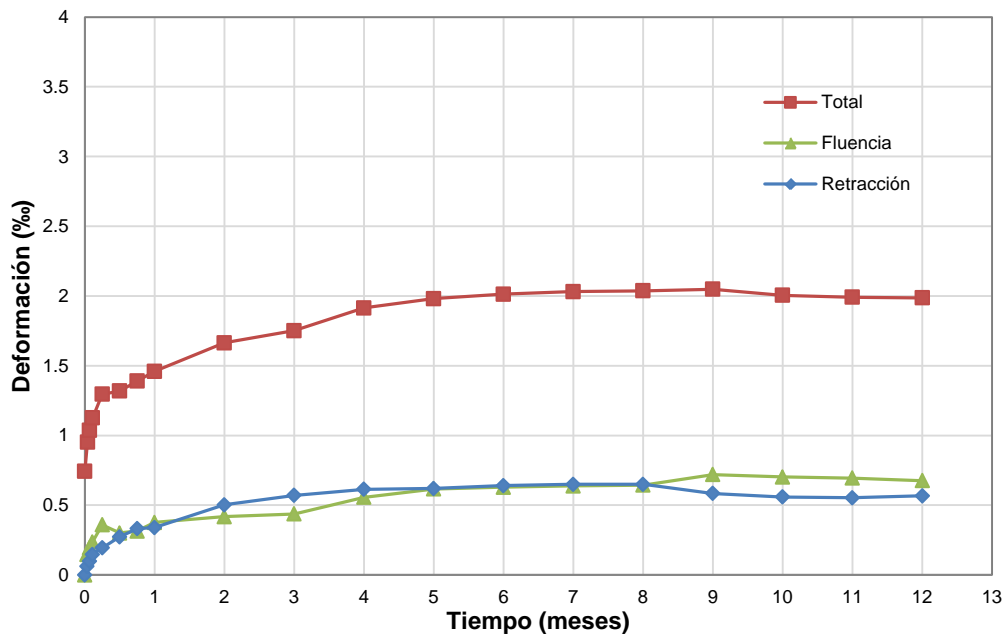


Figura L-15. Deformación media en el tramo de meseta vs. Tiempo. Probeta HT-B-100-48-LS.

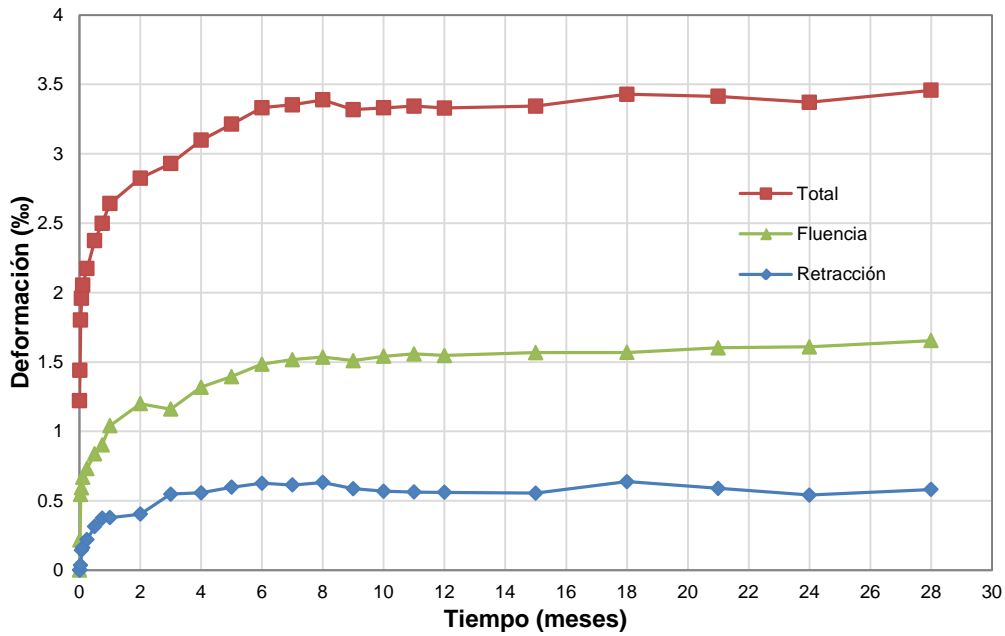
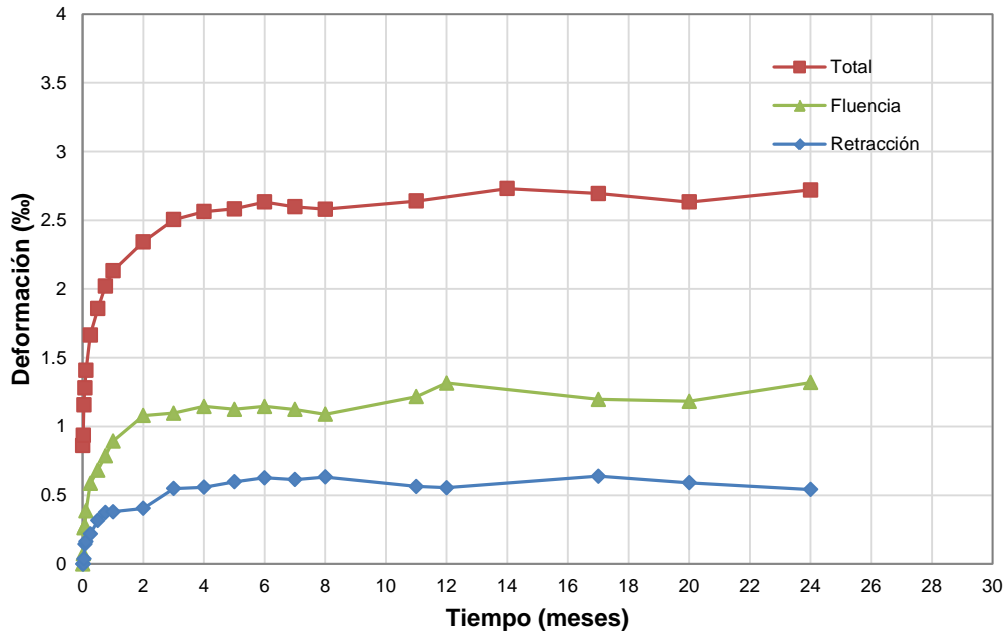


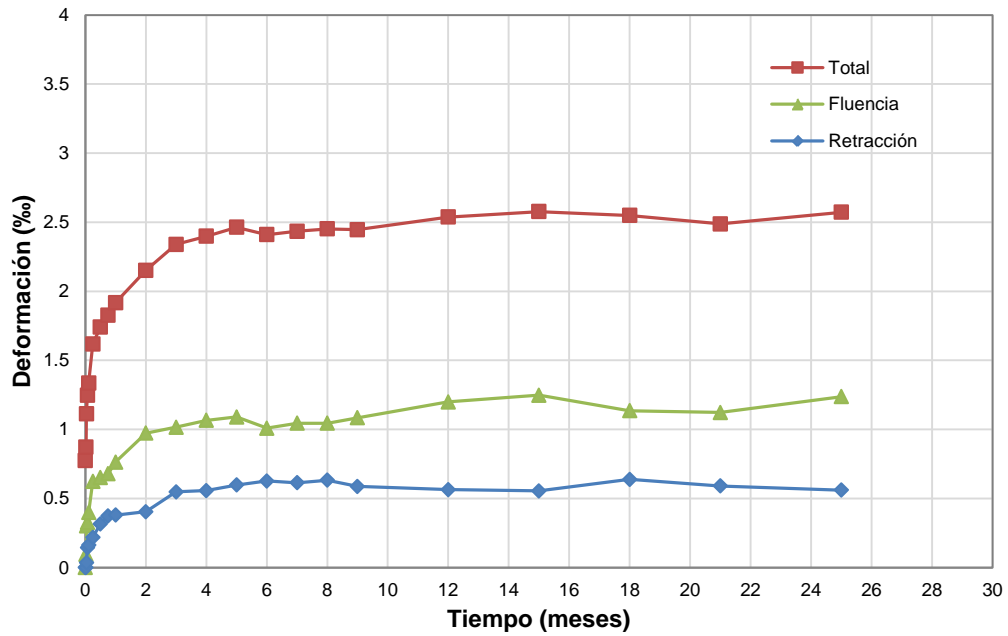
Figura L-16. Deformación media en el tramo de meseta vs. Tiempo. Probeta HT-C-80-48-LS.



**ANEJO L. EVOLUCIÓN DE DEFORMACIONES LONGITUDINALES DEL HORMIGÓN  
EN EL TRAMO DE MESETA CON EL TIEMPO**



**Figura L-17.** Deformación media en el tramo de meseta vs. Tiempo.  
Probeta HT-C-100-24-LS.



**Figura L-18.** Deformación media en el tramo de meseta vs. Tiempo.  
Probeta HT-C-100-48-LS.

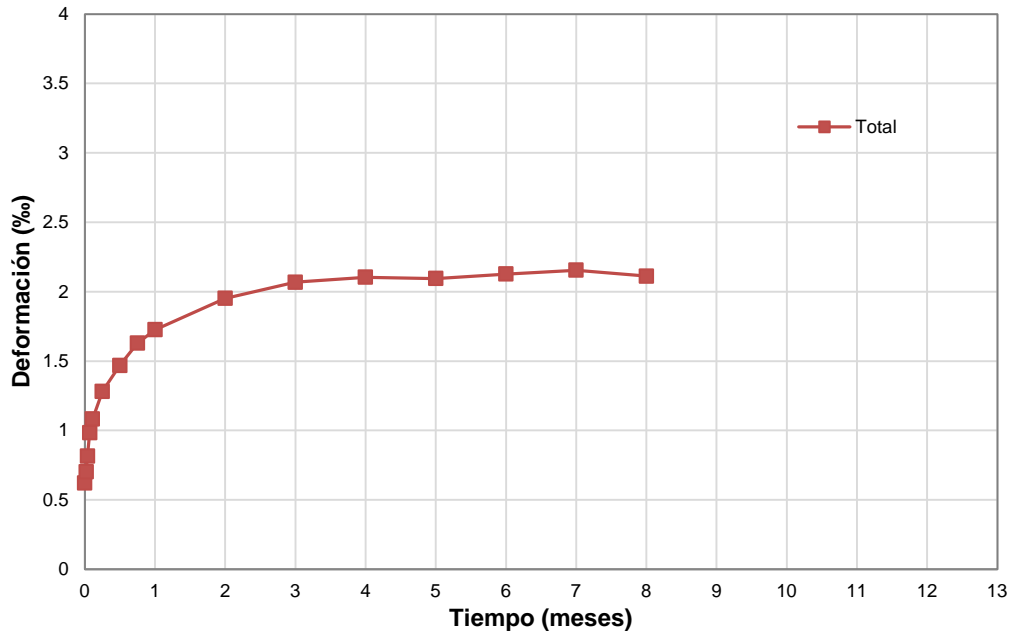


Figura L-19. Deformación media en el tramo de meseta vs. Tiempo.  
Probeta HR-100-48-LS.

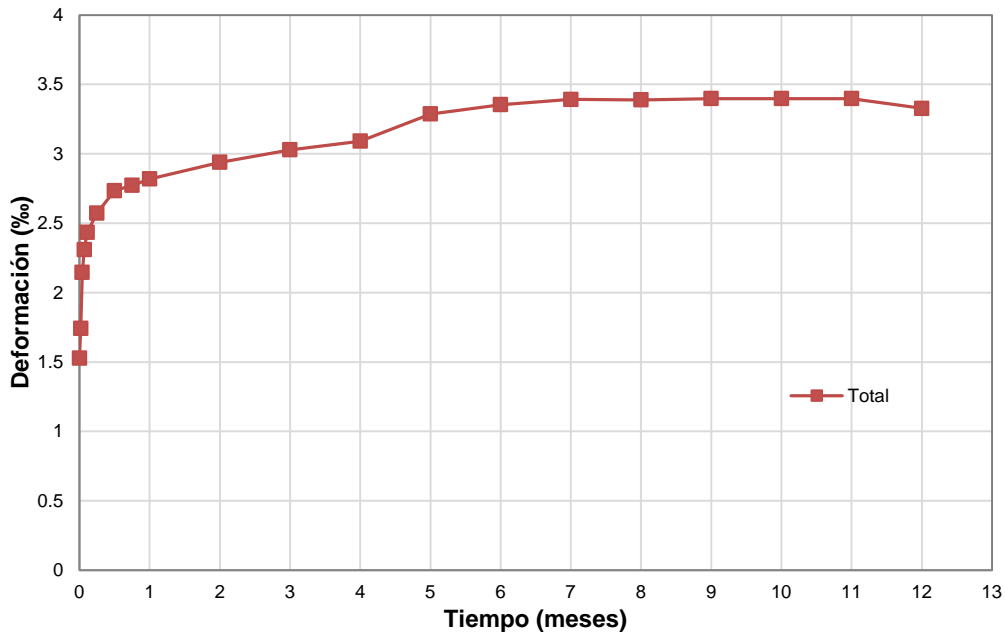


Figura L-20. Deformación media en el tramo de meseta vs. Tiempo.  
Probeta FA-60-24-LS.

ANEJO L. EVOLUCIÓN DE DEFORMACIONES LONGITUDINALES DEL HORMIGÓN  
EN EL TRAMO DE MESETA CON EL TIEMPO

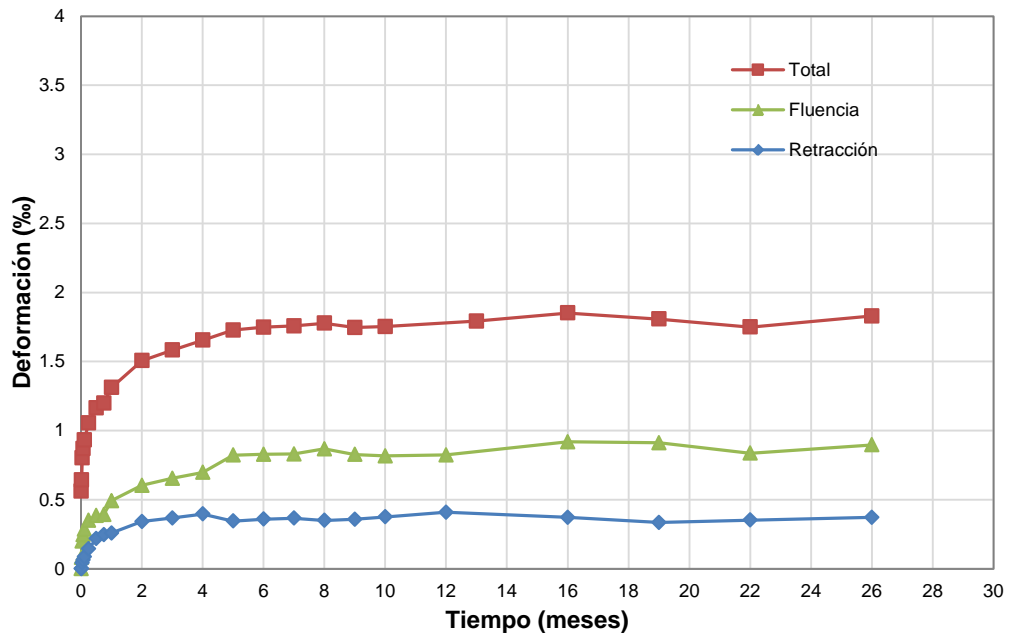


Figura L-21. Deformación media en el tramo de meseta vs. Tiempo.  
Probeta HAC-NF-100-48-LS.

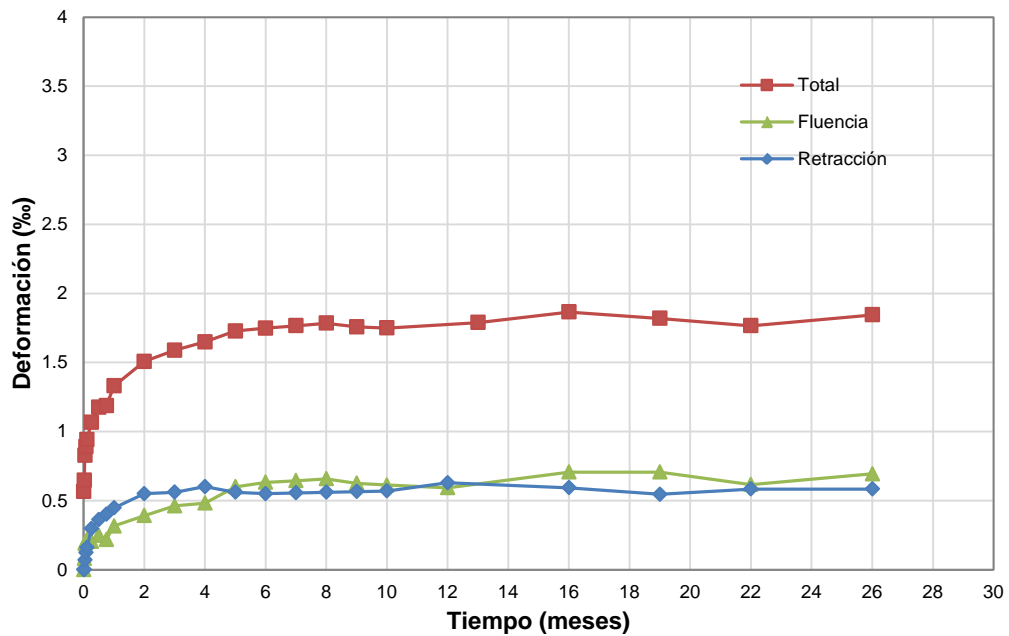


Figura L-22. Deformación media en el tramo de meseta vs. Tiempo.  
Probeta HAC-LF-100-48-LS.

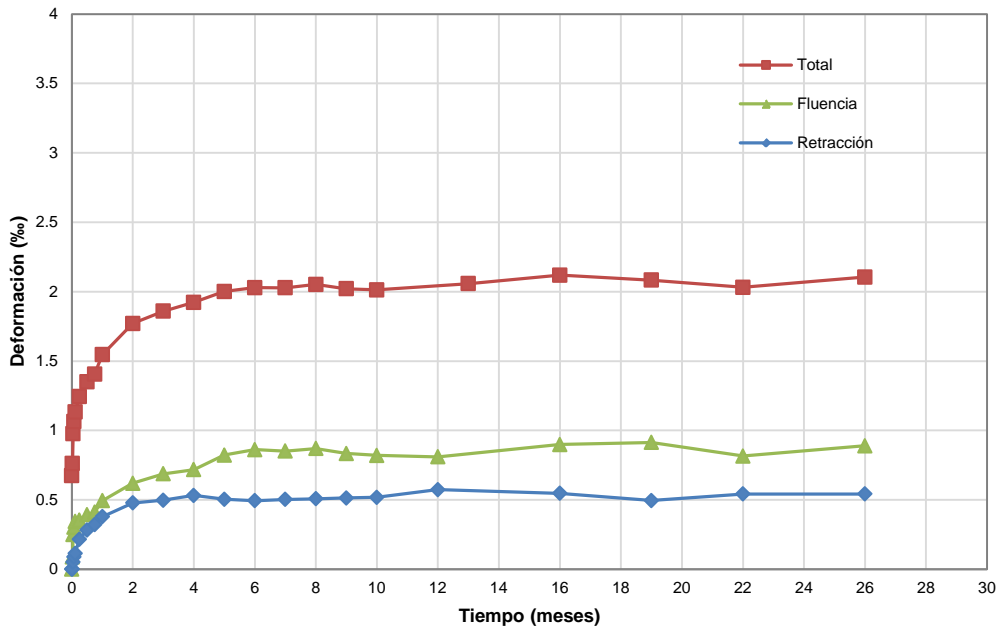


Figura L-23. Deformación media en el tramo de meseta vs. Tiempo. Probeta HAC-MF-100-48-LS.

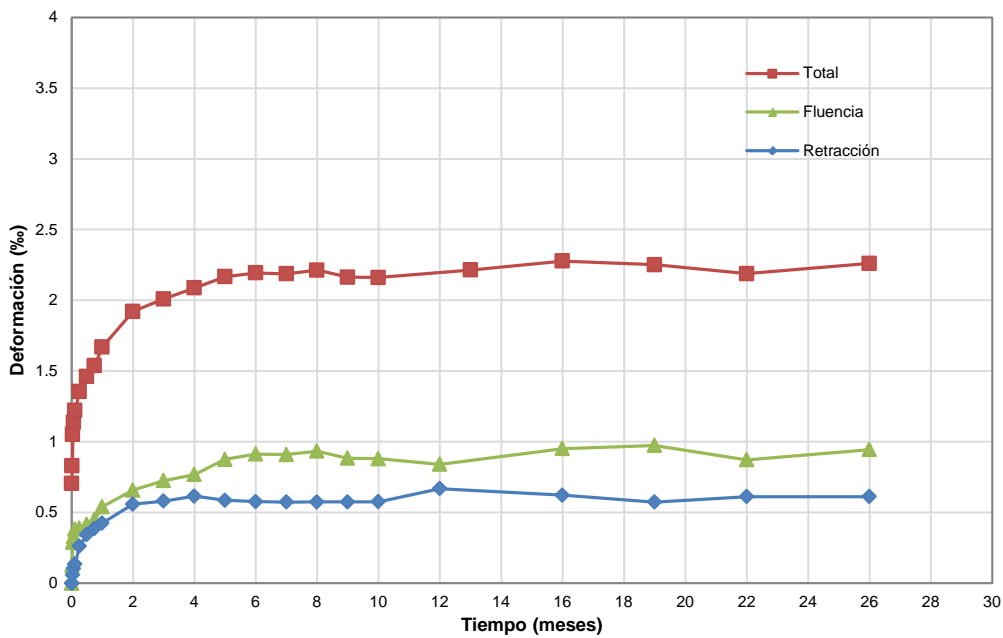


Figura L-24. Deformación media en el tramo de meseta vs. Tiempo. Probeta HAC-HF-100-48-LS.

ANEJO M. PÉRDIDAS DE PRETENSADO EN EL TRAMO DE MESETA

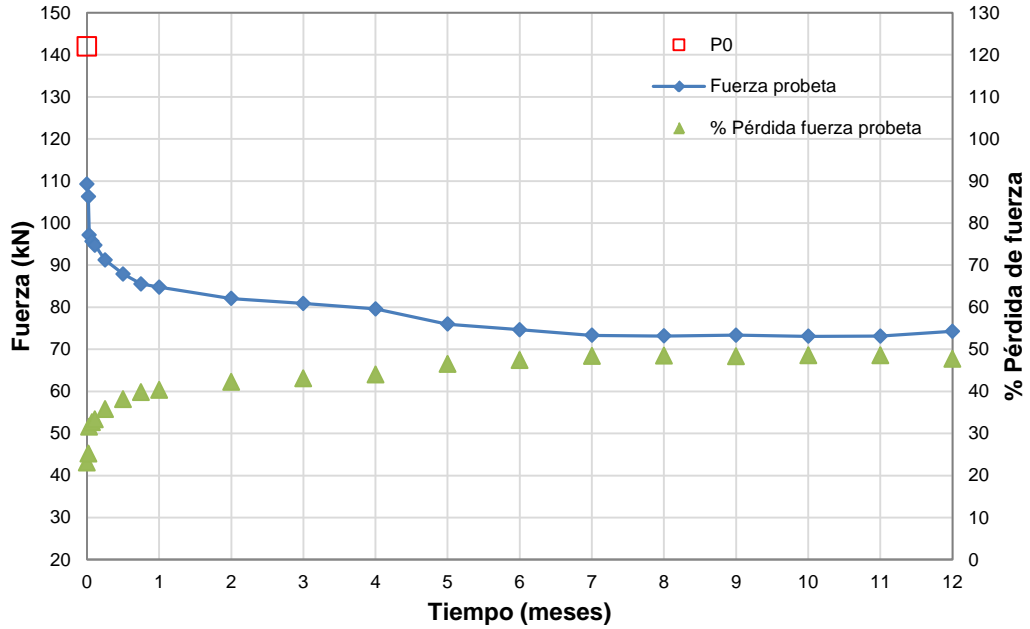


Figura M-1. Fuerza de pretensado y % de pérdidas en el tramo de meseta. Probeta HT-A-60-24-LS.

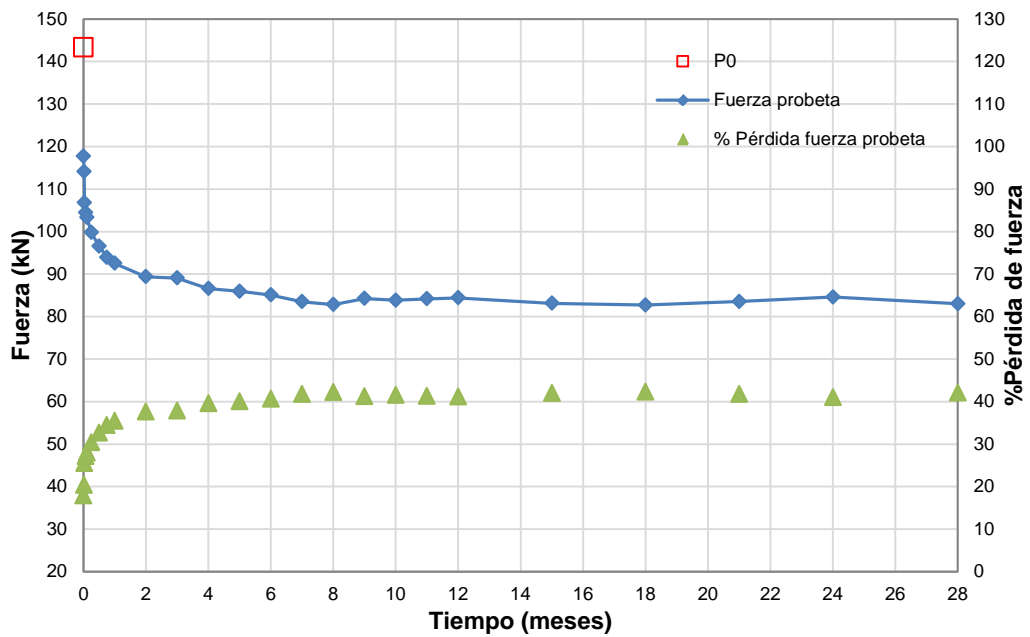


Figura M-2. Fuerza de pretensado y % de pérdidas en el tramo de meseta. Probeta HT-A-60-48-LS.

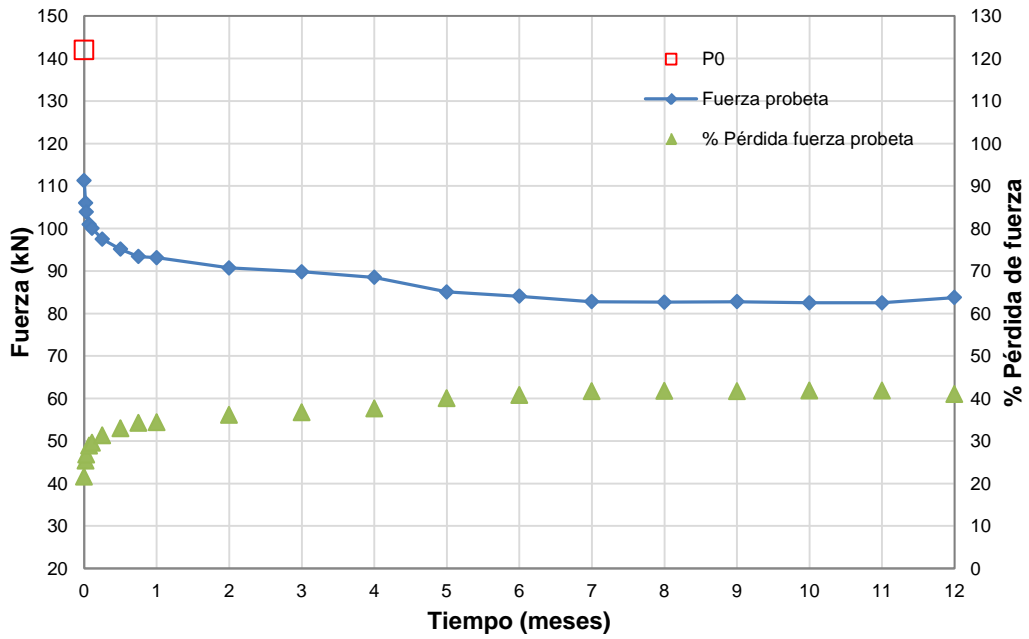


Figura M-3. Fuerza de pretensado y % de pérdidas en el tramo de meseta. Probeta HT-A-80-12-LS.

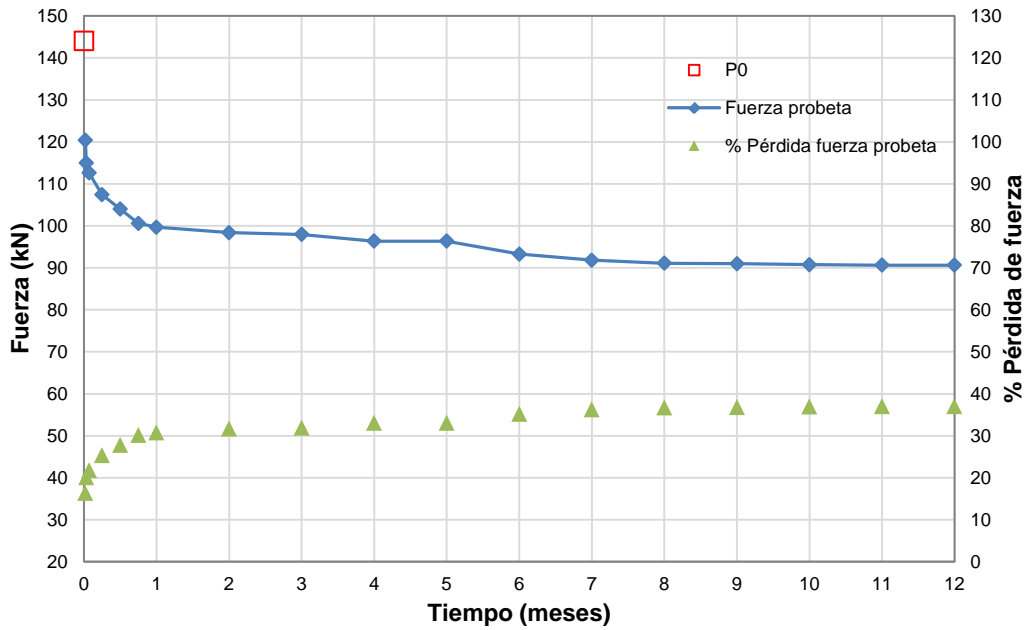


Figura M-4. Fuerza de pretensado y % de pérdidas en el tramo de meseta. Probeta HT-A-80-24-LS.

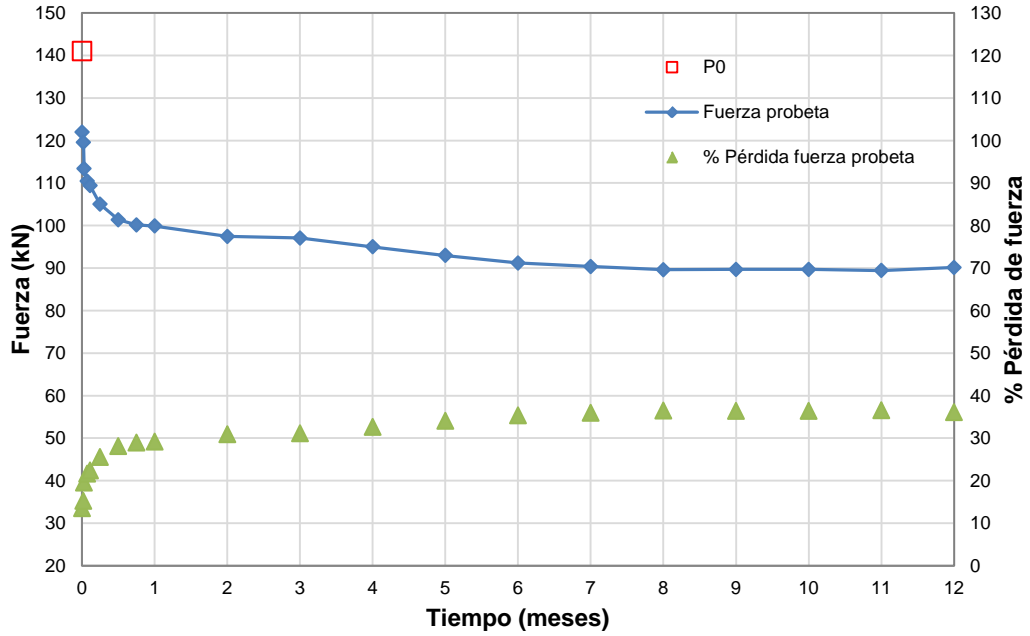


Figura M-5. Fuerza de pretensado y % de pérdidas en el tramo de meseta. Probeta HT-A-80-24-LS-FA.

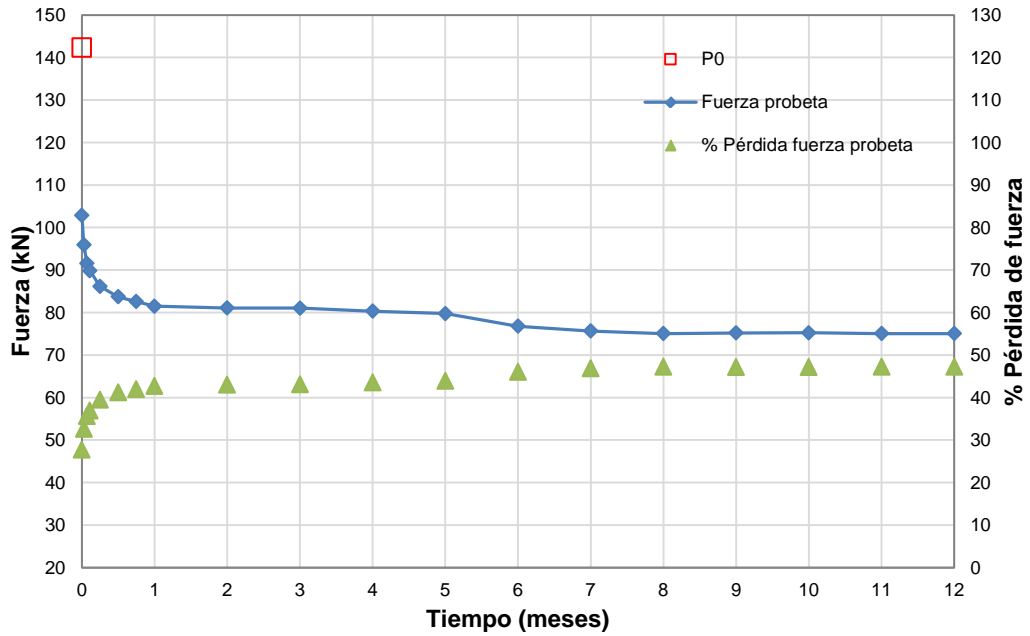


Figura M-6. Fuerza de pretensado y % de pérdidas en el tramo de meseta. Probeta HT-A-100-6-LS.

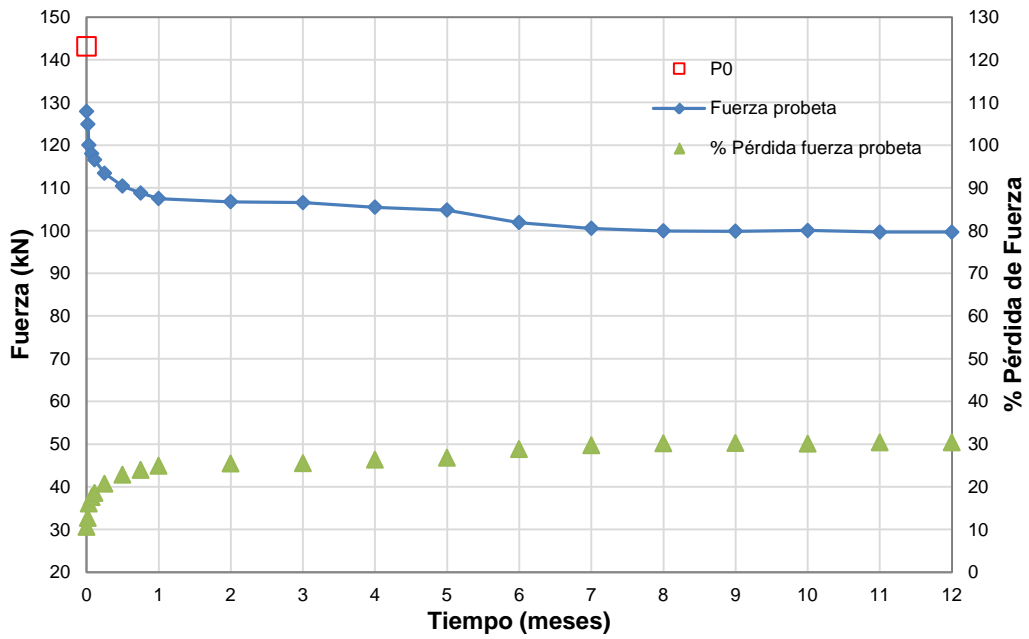


Figura M-7. Fuerza de pretensado y % de pérdidas en el tramo de meseta. Probeta HT-A-100-12-LS.

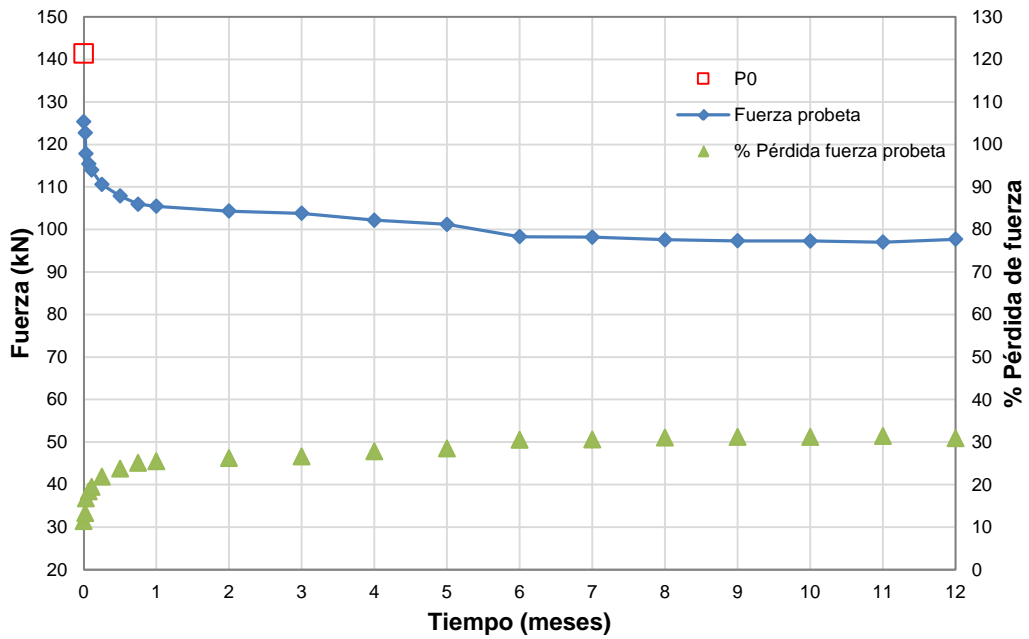


Figura M-8. Fuerza de pretensado y % de pérdidas en el tramo de meseta. Probeta HT-A-100-12-LS-FA.



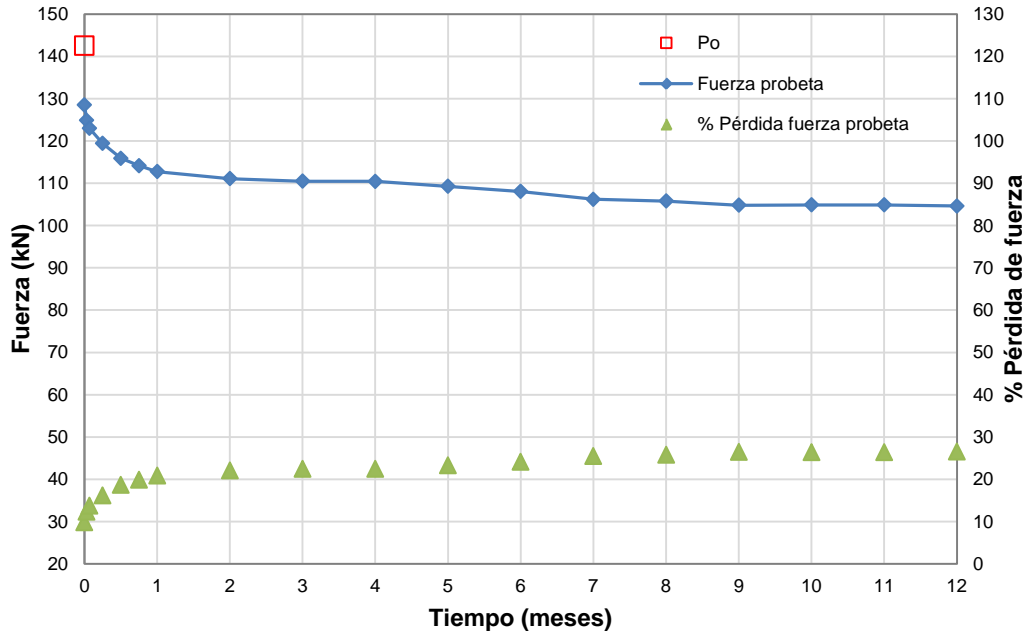


Figura M-9. Fuerza de pretensado y % de pérdidas en el tramo de meseta. Probeta HT-A-100-24-LS.

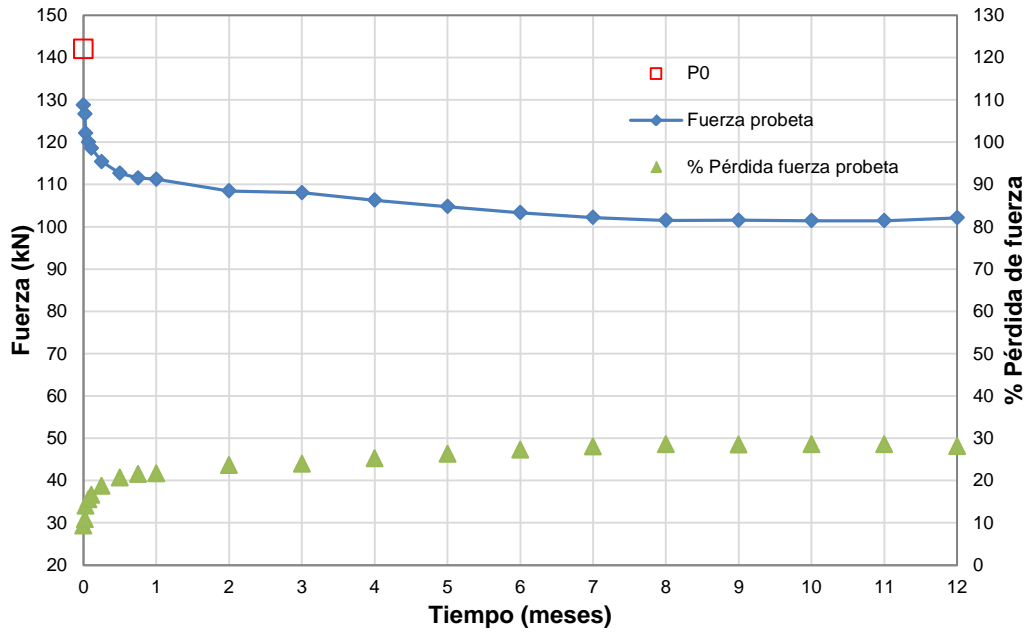


Figura M-10. Fuerza de pretensado y % de pérdidas en el tramo de meseta. Probeta HT-A-100-24-LS-FA.

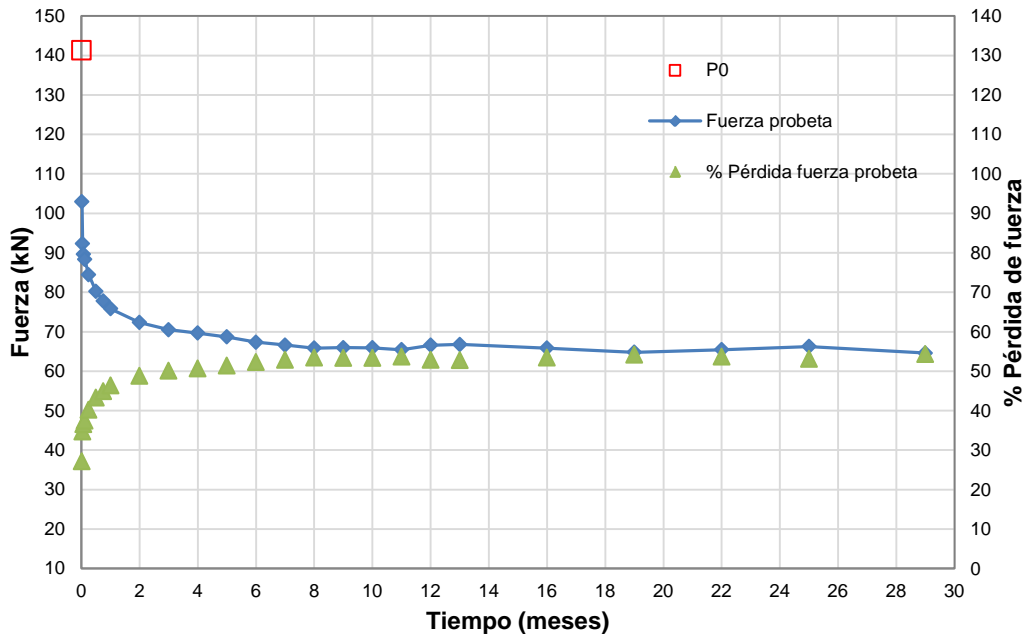


Figura M-11. Fuerza de pretensado y % de pérdidas en el tramo de meseta. Probeta HT-B-60-48-LS.

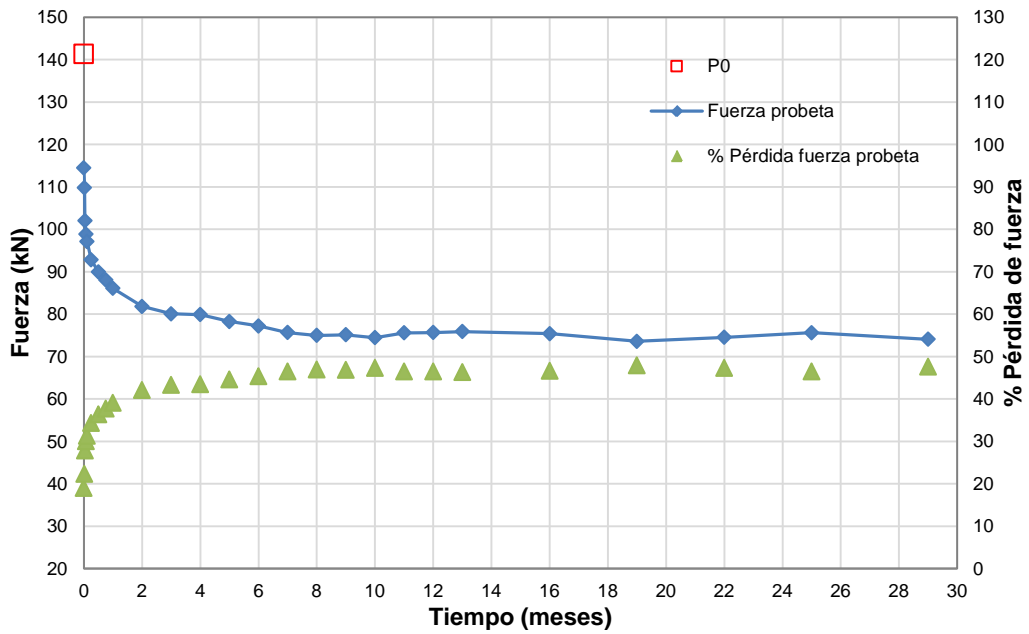


Figura M-12. Fuerza de pretensado y % de pérdidas en el tramo de meseta. Probeta HT-B-80-24-LS.

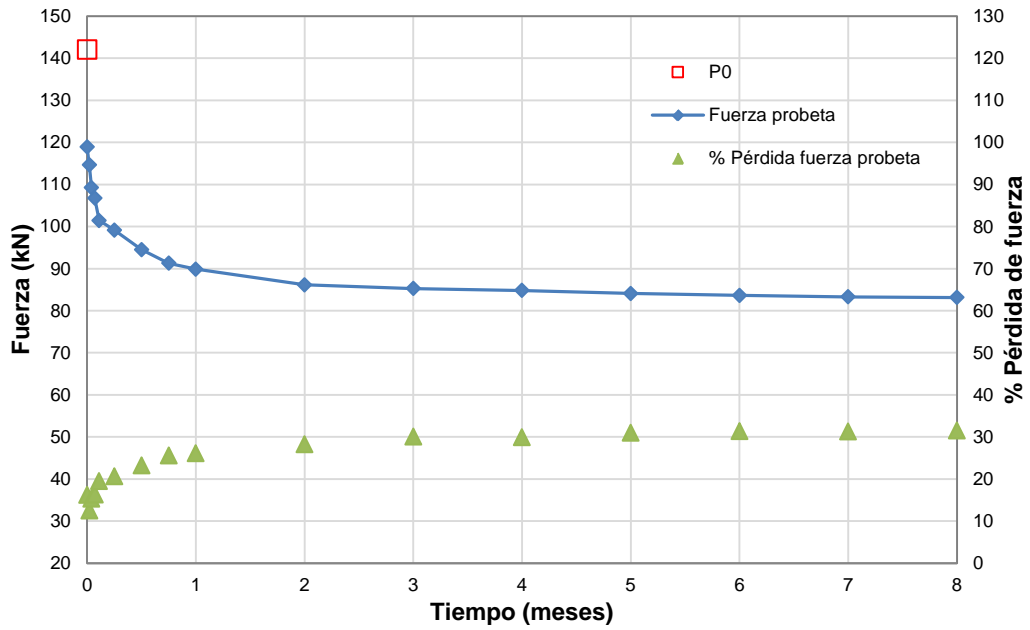


Figura M-13. Fuerza de pretensado y % de pérdidas en el tramo de meseta. Probeta HT-B-80-48-LS.

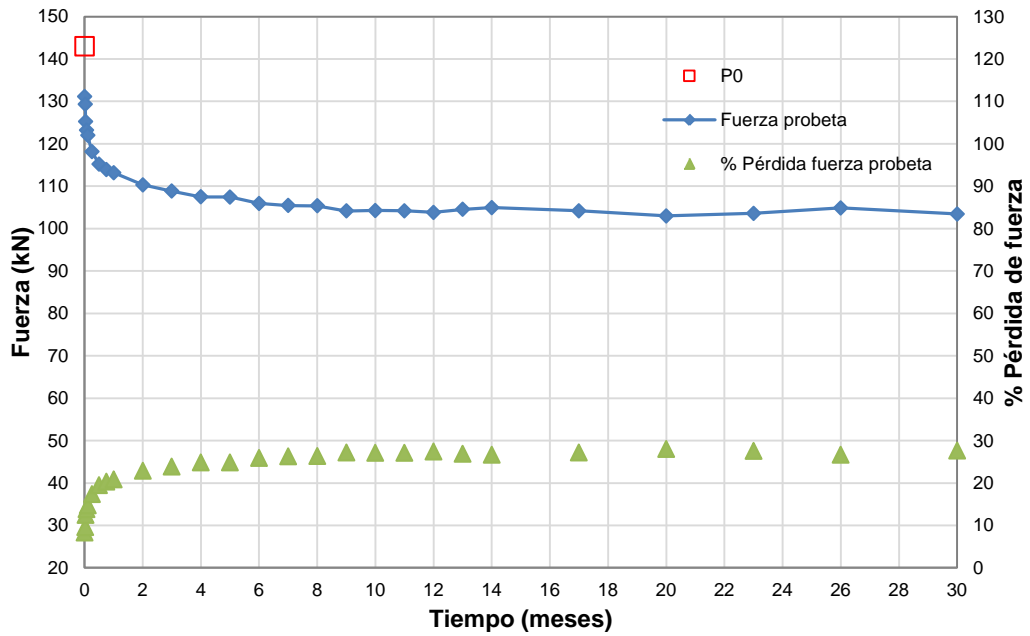


Figura M-14. Fuerza de pretensado y % de pérdidas en el tramo de meseta. Probeta HT-B-100-24-LS.

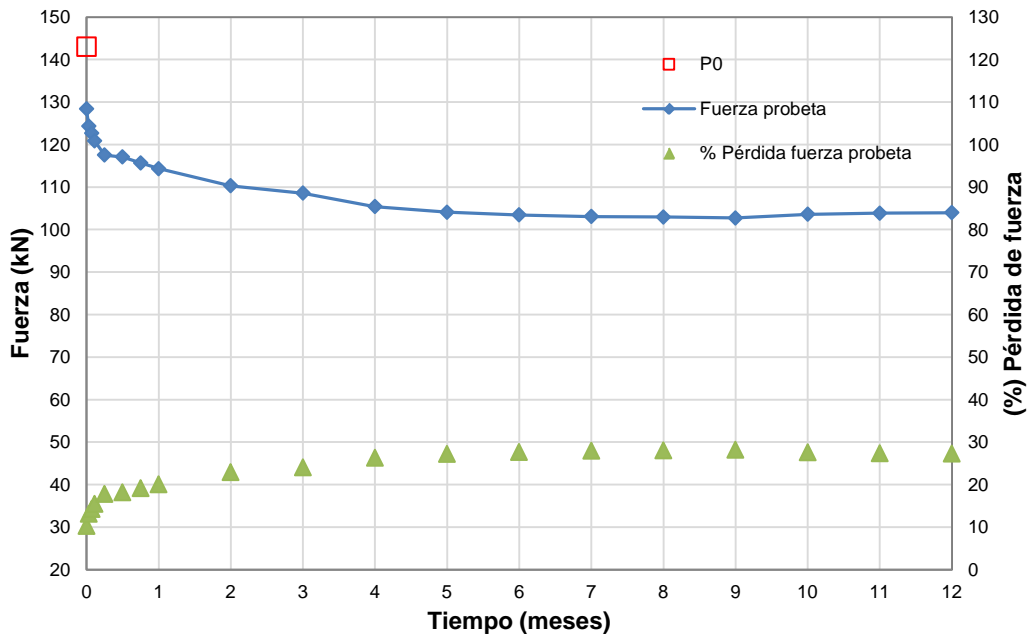


Figura M-15. Fuerza de pretensado y % de pérdidas en el tramo de meseta. Probeta HT-B-100-48-LS.

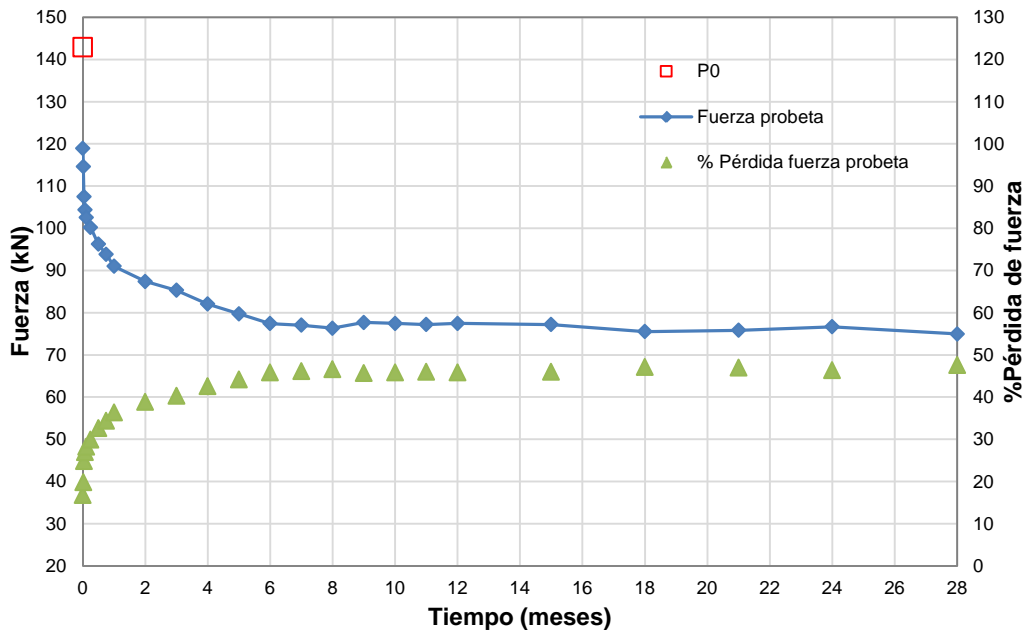


Figura M-16. Fuerza de pretensado y % de pérdidas en el tramo de meseta. Probeta HT-C-80-48-LS.

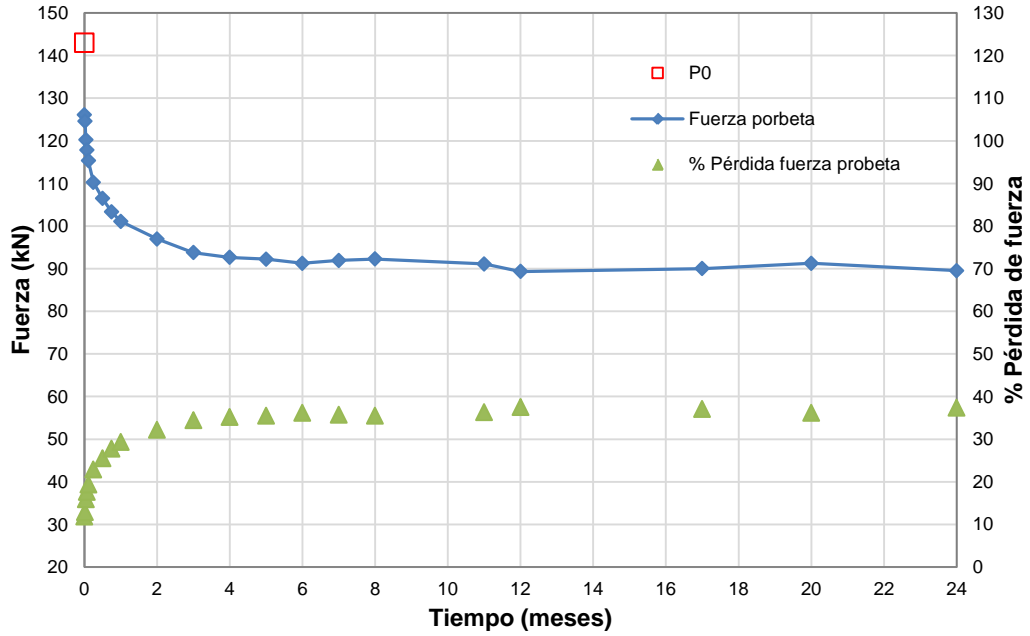


Figura M-17. Fuerza de pretensado y % de pérdidas en el tramo de meseta. Probeta HT-C-100-24-LS.

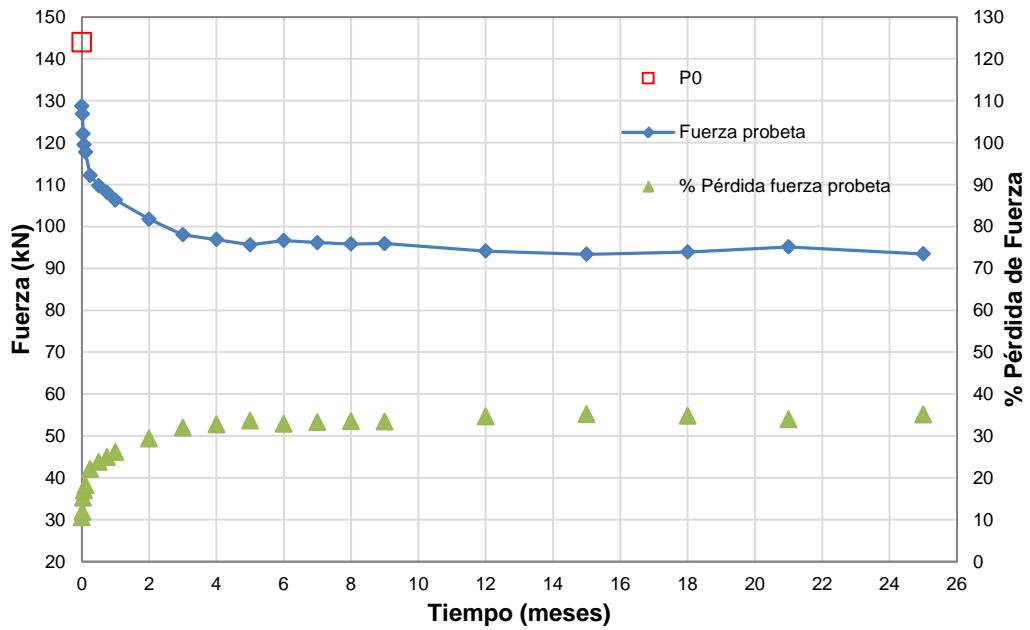


Figura M-18. Fuerza de pretensado y % de pérdidas en el tramo de meseta. Probeta HT-C-100-48-LS.

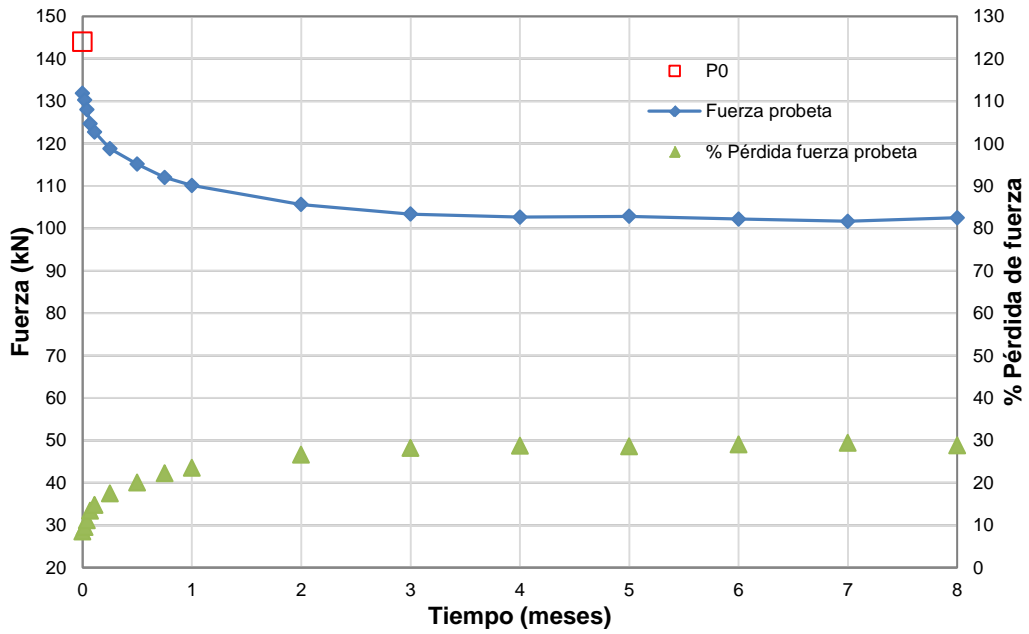


Figura M-19. Fuerza de pretensado y % de pérdidas en el tramo de meseta. Probeta HR-100-48-LS.

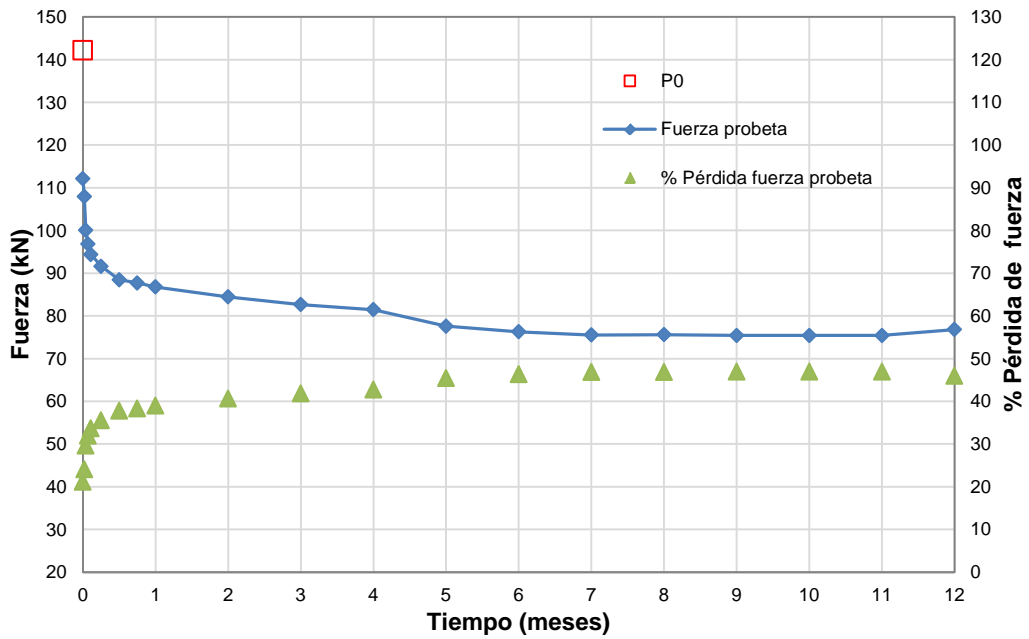


Figura M-20. Fuerza de pretensado y % de pérdidas en el tramo de meseta. Probeta FA-60-24-LS.

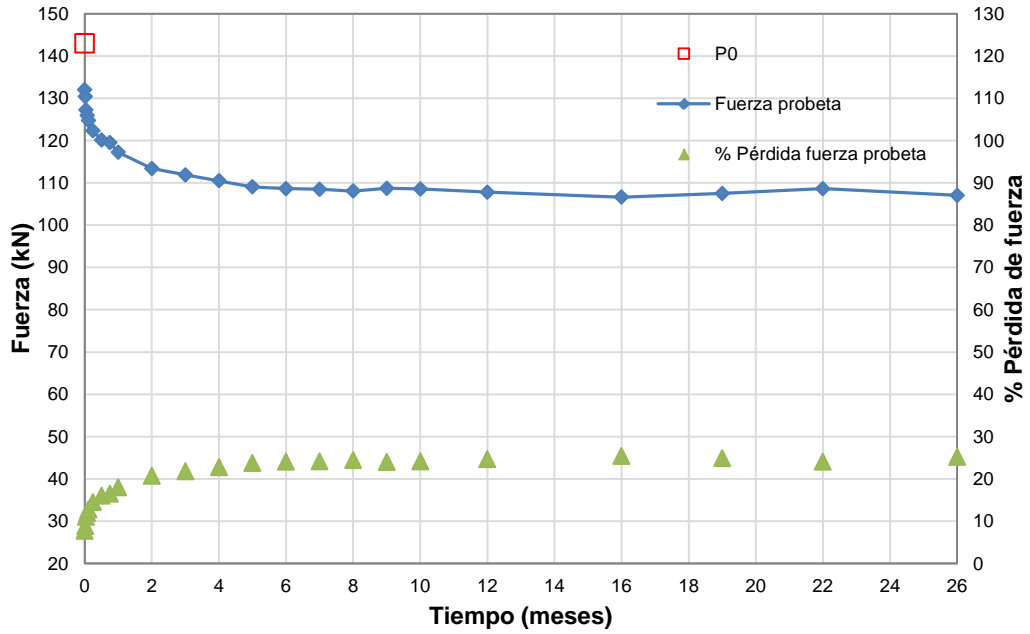


Figura M-21. Fuerza de pretensado y % de pérdidas en el tramo de meseta. Probeta HAC-NF-100-48-LS.

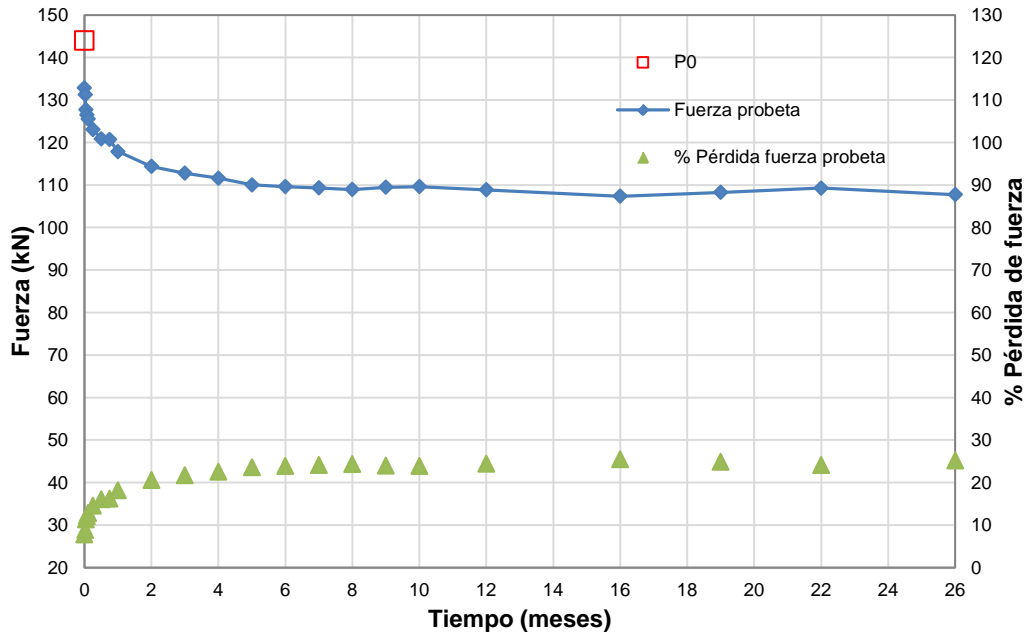


Figura M-22. Fuerza de pretensado y % de pérdidas en el tramo de meseta. Probeta HAC-LF-100-48-LS.

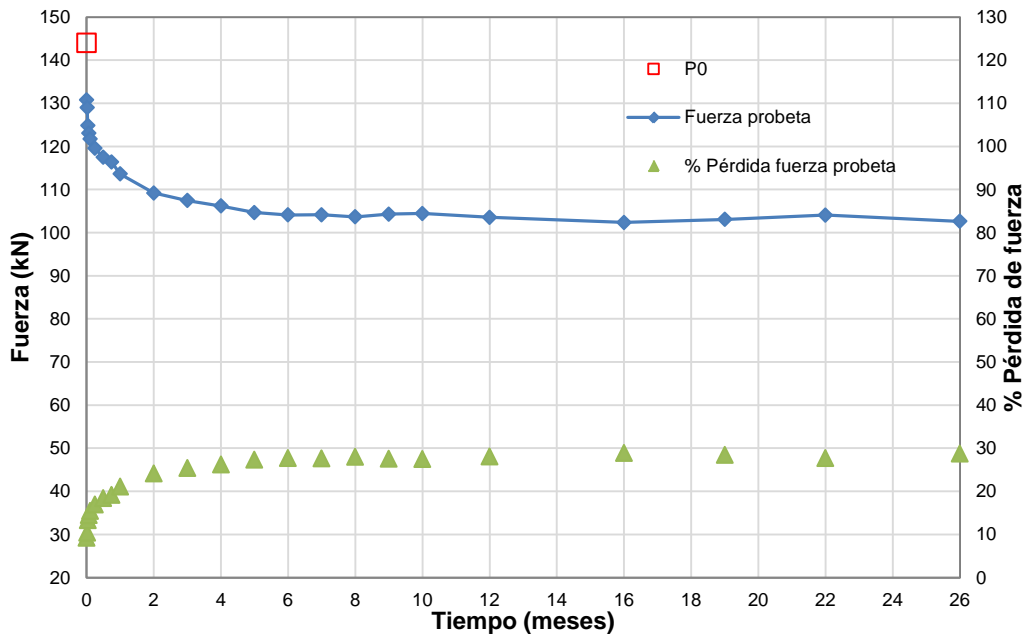


Figura M-23. Fuerza de pretensado y % de pérdidas en el tramo de meseta. Probeta HAC-MF-100-48-LS.

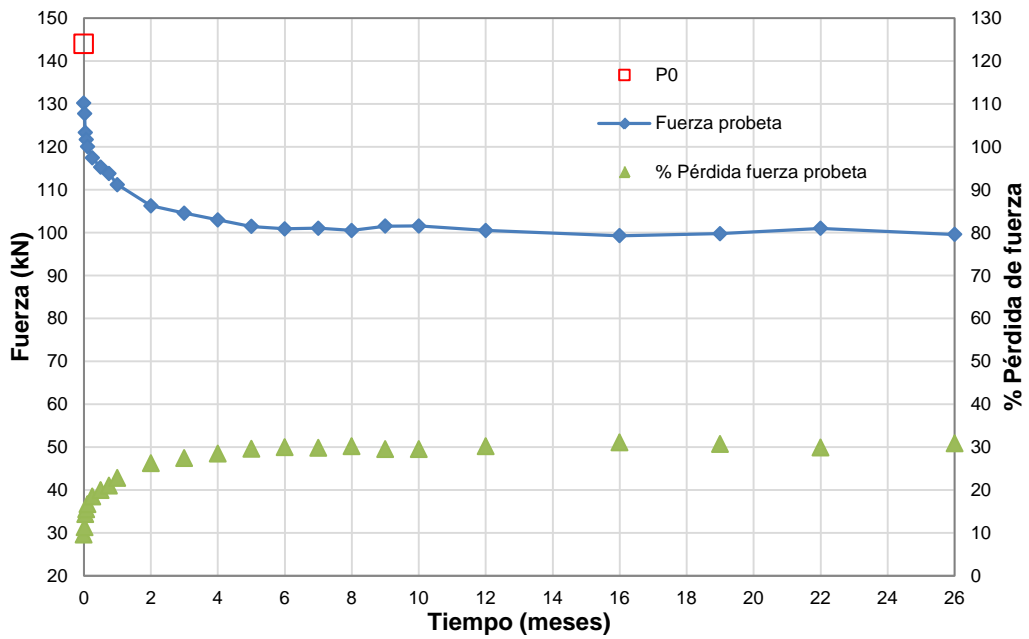


Figura M-24. Fuerza de pretensado y % de pérdidas en el tramo de meseta. Probeta HAC-HF-100-48-LS.



ANEJO N. COMPARACIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE PRETENSADO Y LAS PÉRDIDAS EN EL TRAMO DE MESETA

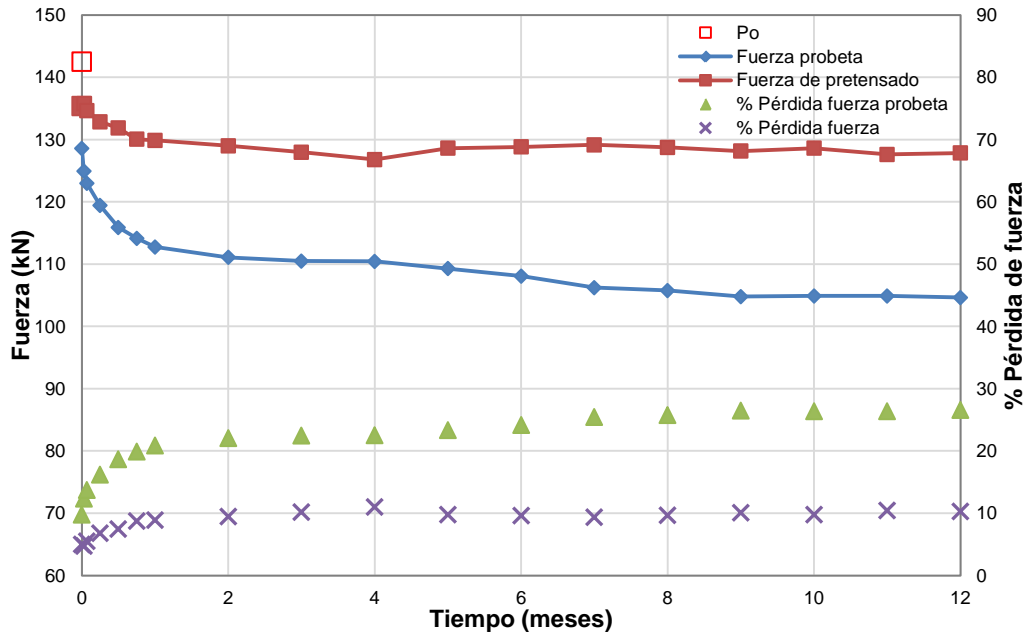


Figura N-1. Fuerza de pretensado y % de pérdidas de fuerza. Probeta HT-A-100-24-LS.

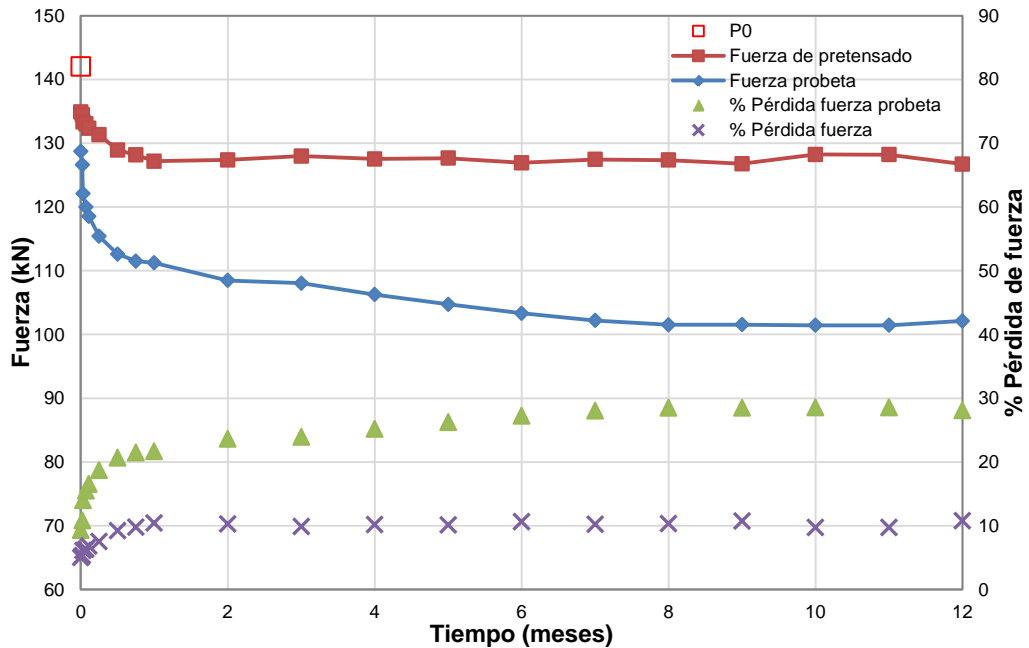


Figura N-2. Fuerza de pretensado y % de pérdidas de fuerza. Probeta HT-A-100-24-LS-FA.

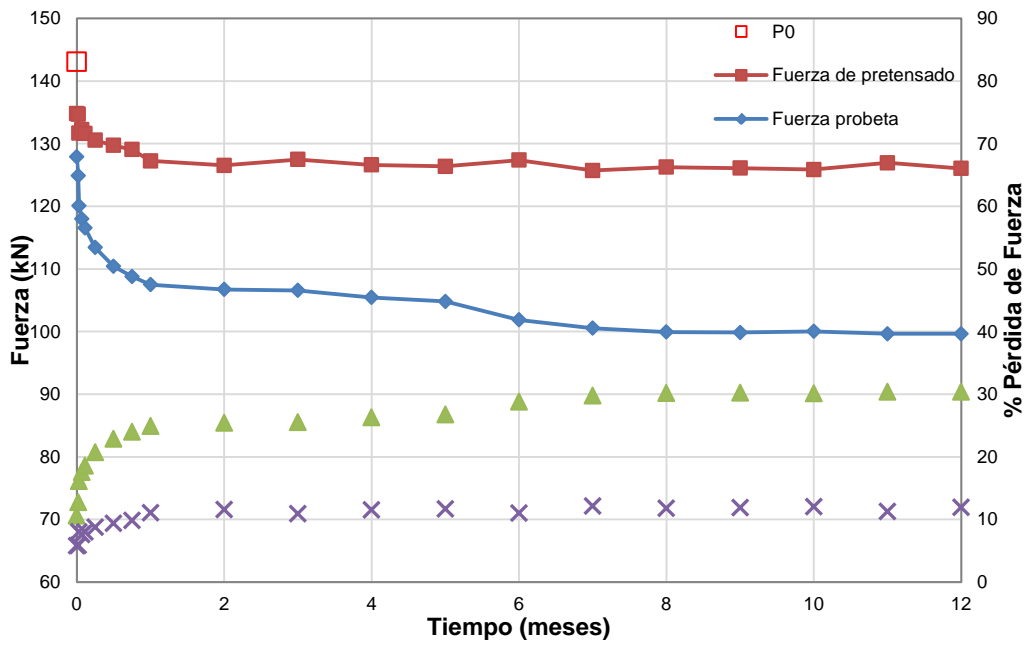


Figura N-3. Fuerza de pretensado y % de pérdidas de fuerza. Probeta HT-A-100-12-LS.

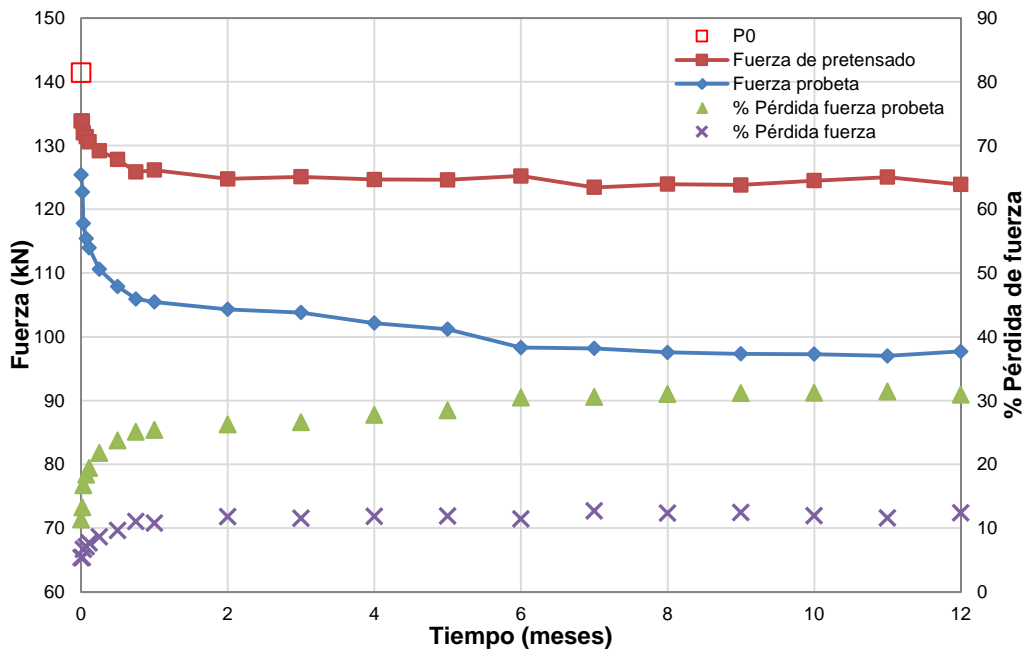


Figura N-4. Fuerza de pretensado y % de pérdidas de fuerza. Probeta HT-A-100-12-LS-FA.

ANEJO N. COMPARACIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE PRETENSADO  
Y LAS PÉRDIDAS EN EL TRAMO DE MESETA

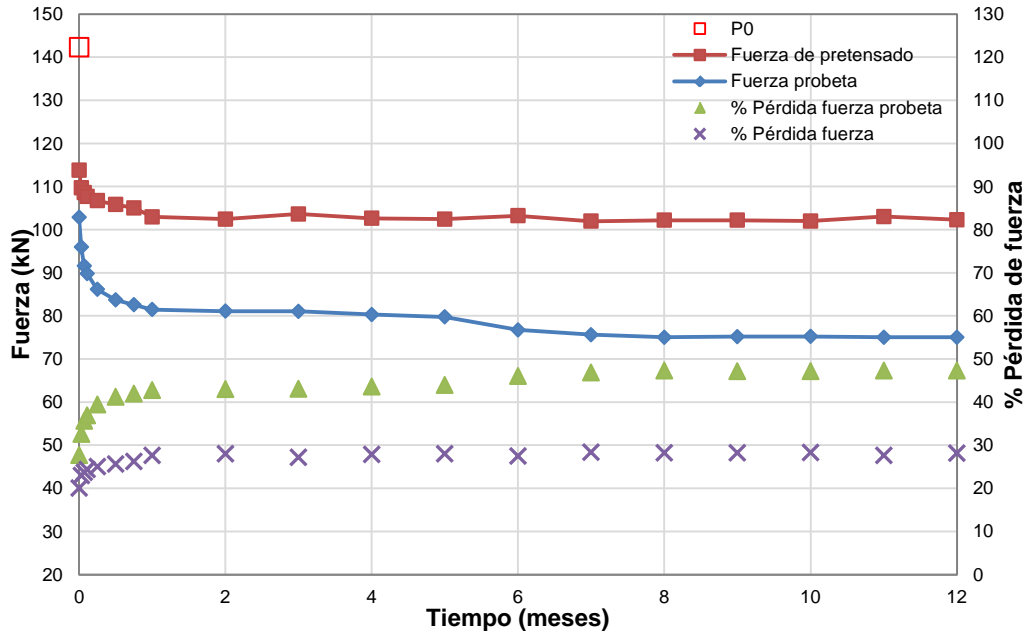


Figura N-5. Fuerza de pretensado y % de pérdidas de fuerza.  
Probeta HT-A-100-6-LS.

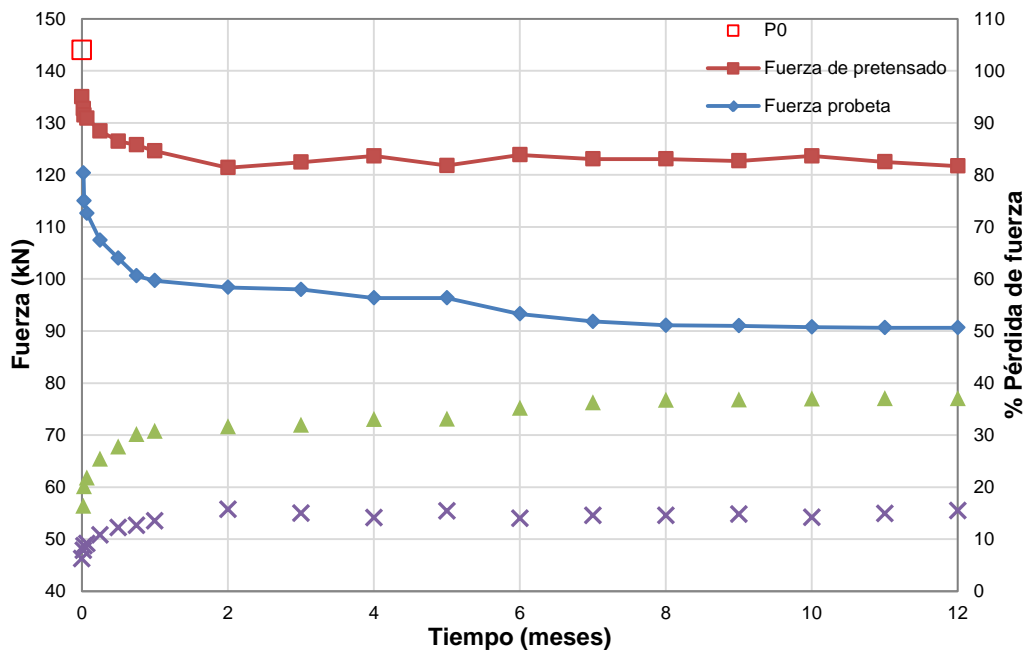


Figura N-6. Fuerza de pretensado y % de pérdidas de fuerza.  
Probeta HT-A-80-24-LS.

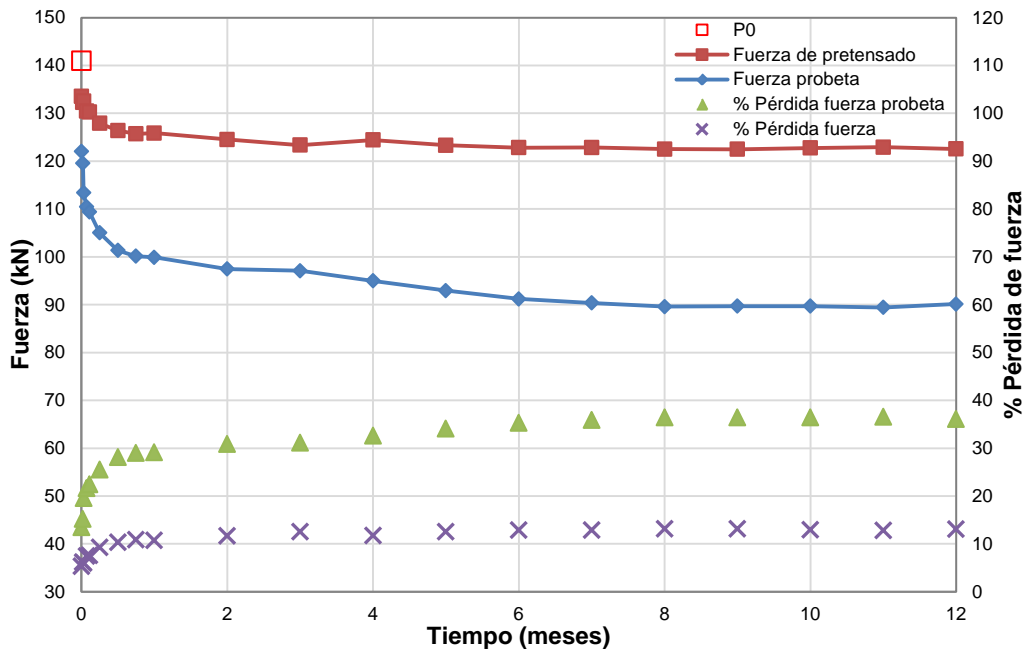


Figura N-7. Fuerza de pretensado y % de pérdidas de fuerza. Probeta HT-A-80-24-LS-FA.

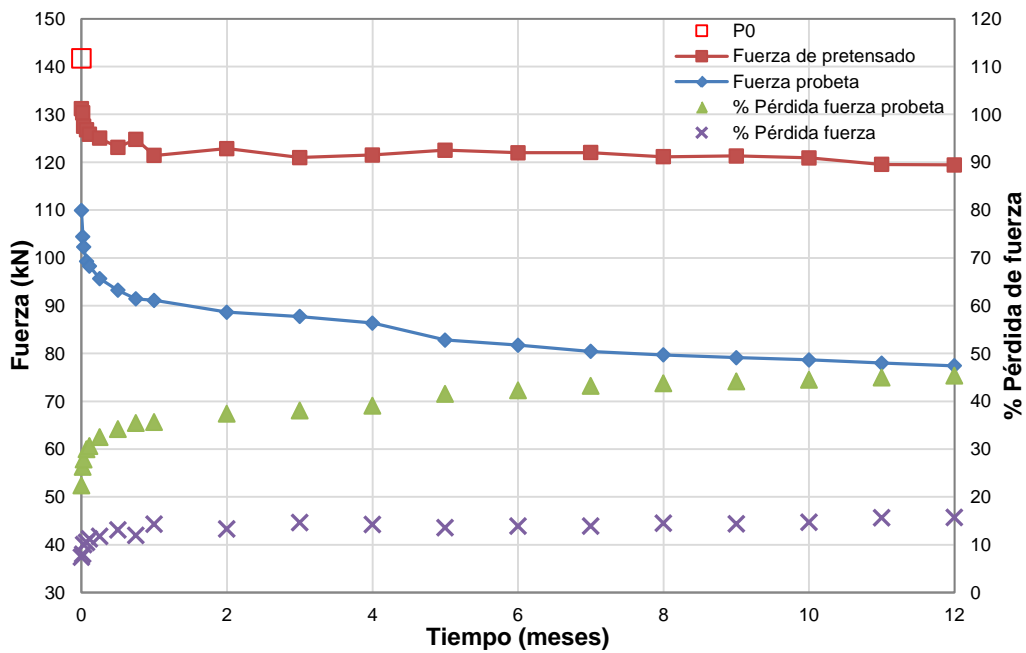


Figura N-8. Fuerza de pretensado y % de pérdidas de fuerza. Probeta HT-A-80-12-LS.

ANEJO N. COMPARACIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE PRETENSADO Y LAS PÉRDIDAS EN EL TRAMO DE MESETA

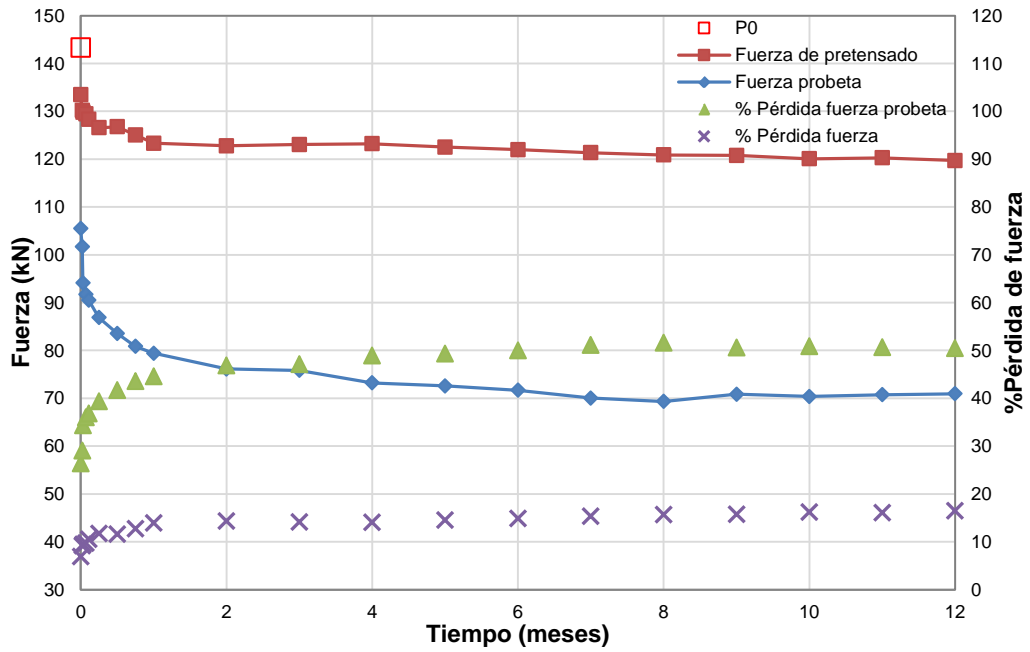


Figura N-9. Fuerza de pretensado y % de pérdidas de fuerza. Probeta HT-A-60-48-LS.

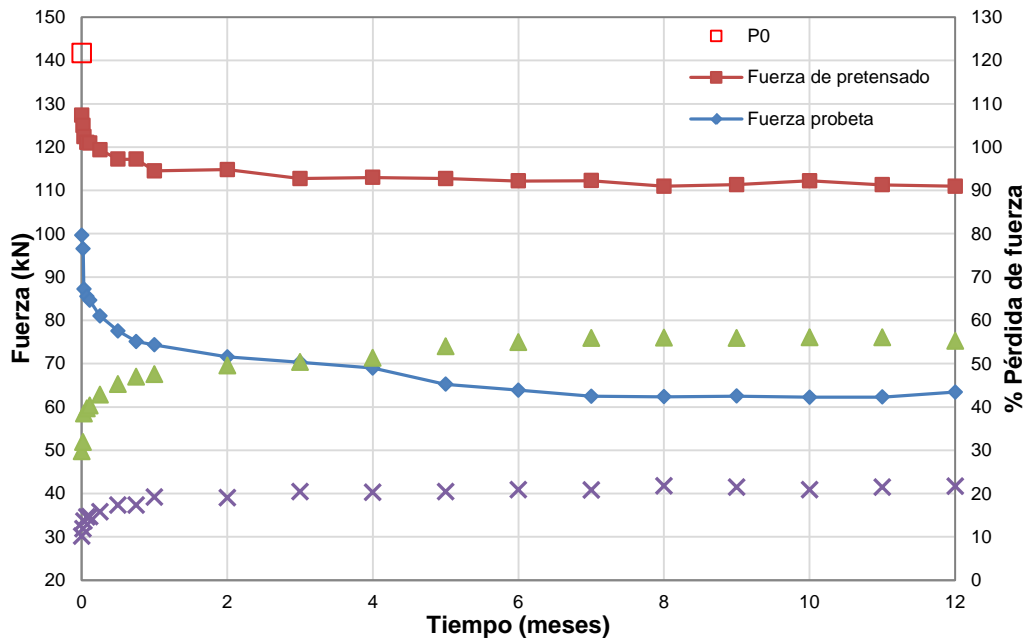


Figura N-10. Fuerza de pretensado y % de pérdidas de fuerza. Probeta HT-A-60-24-LS.

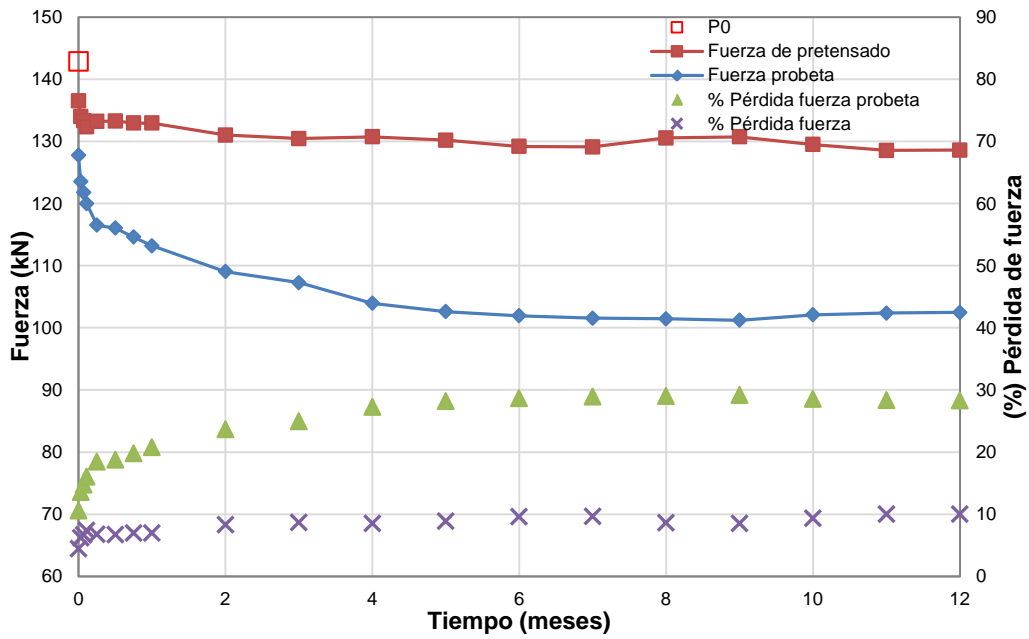


Figura N-11. Fuerza de pretensado y % de pérdidas de fuerza. Probeta HT-B-100-48-LS.

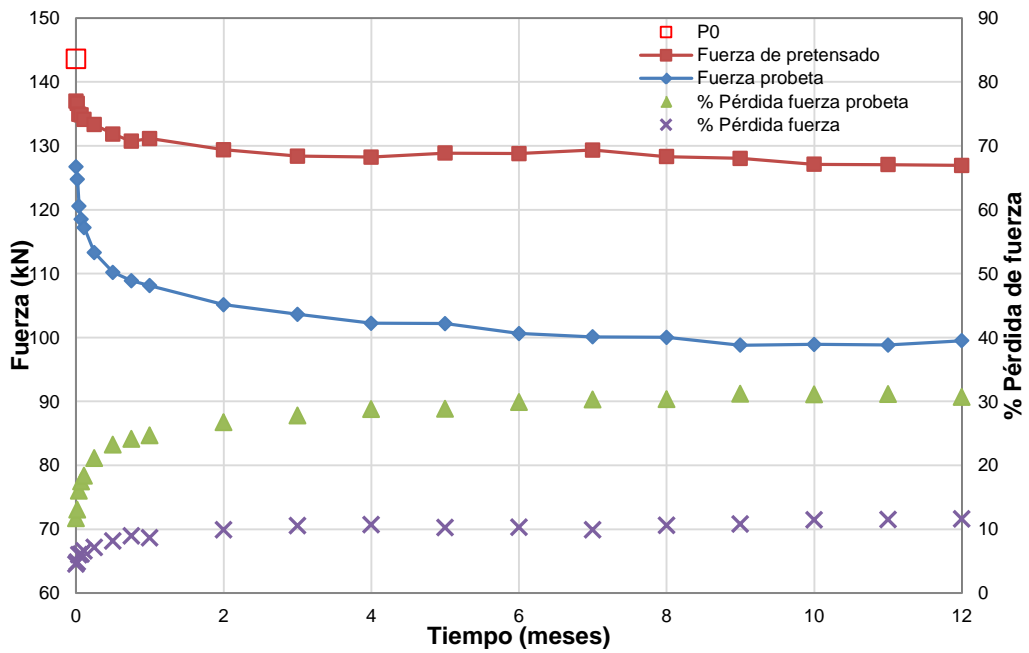


Figura N-12. Fuerza de pretensado y % de pérdidas de fuerza. Probeta HT-B-100-24-LS.

ANEJO N. COMPARACIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE PRETENSADO  
Y LAS PÉRDIDAS EN EL TRAMO DE MESETA

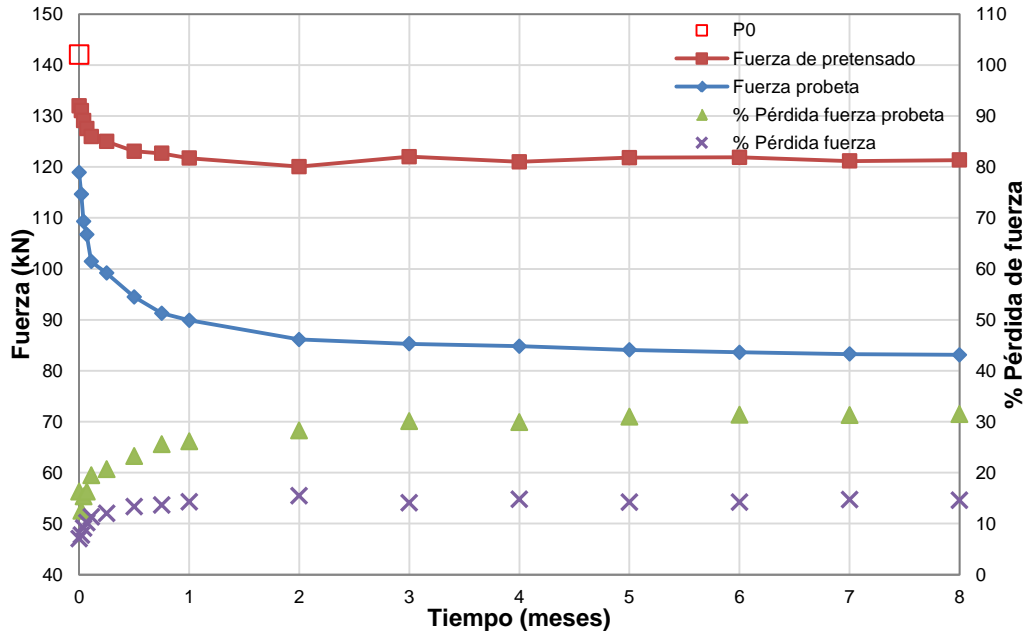


Figura N-13. Fuerza de pretensado y % de pérdidas de fuerza.  
Probeta HT-B-80-48-LS.

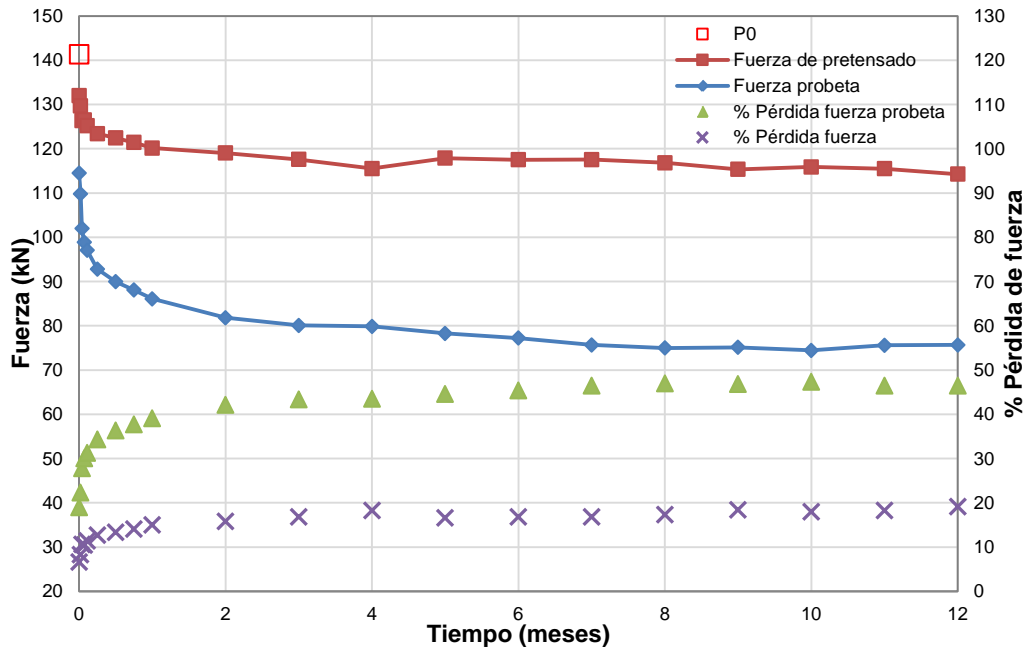


Figura N-14. Fuerza de pretensado y % de pérdidas de fuerza.  
Probeta HT-B-80-24-LS.

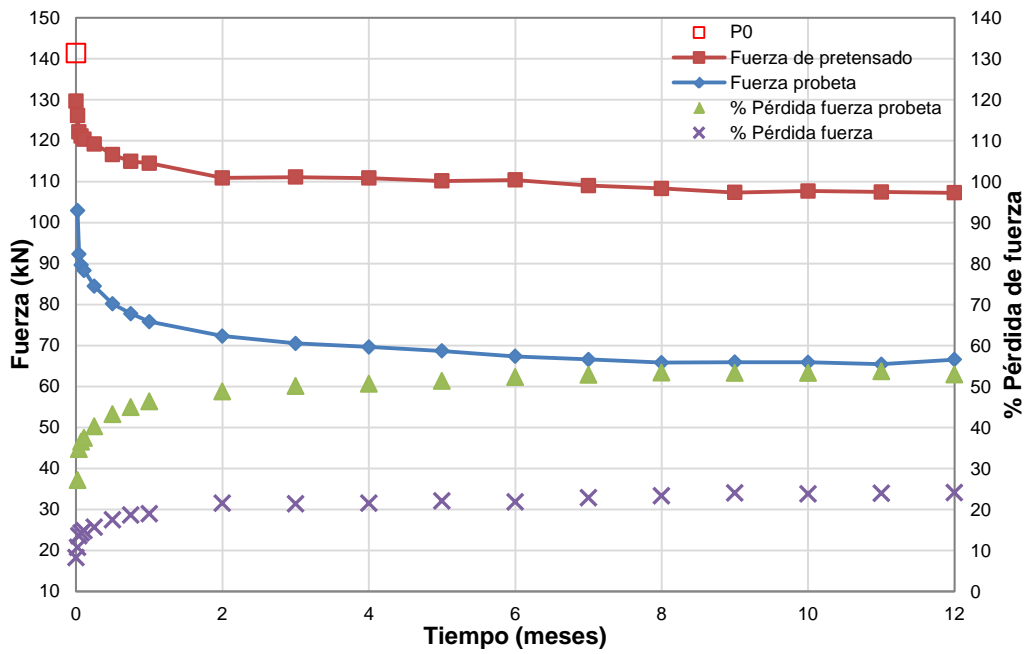


Figura N-15. Fuerza de pretensado y % de pérdidas de fuerza. Probeta HT-B-60-48-LS.

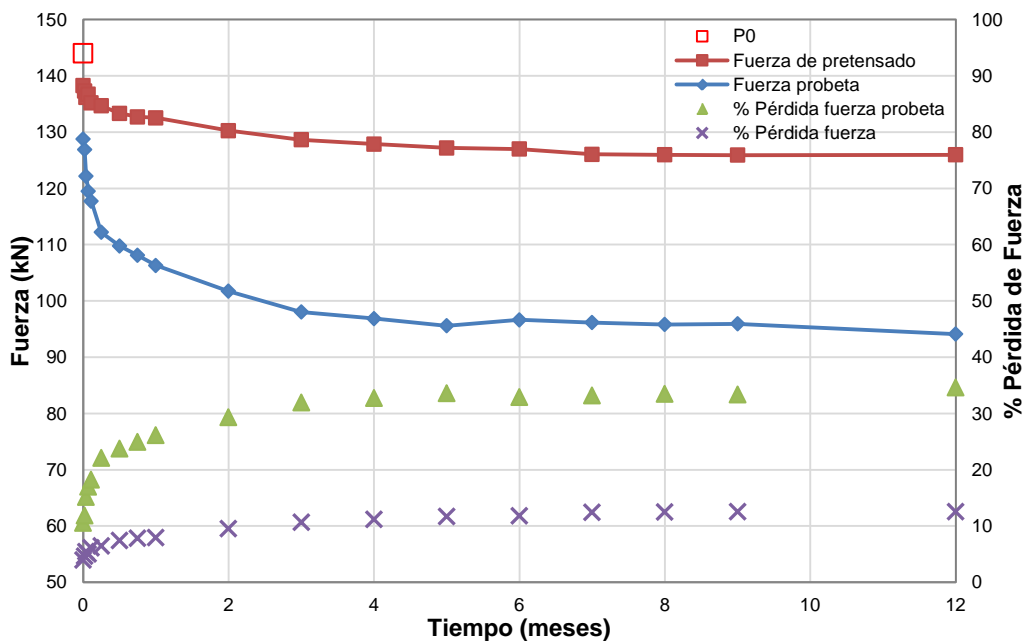


Figura N-16. Fuerza de pretensado y % de pérdidas de fuerza. Probeta HT-C-100-48-LS.



ANEJO N. COMPARACIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE PRETENSADO  
Y LAS PÉRDIDAS EN EL TRAMO DE MESETA

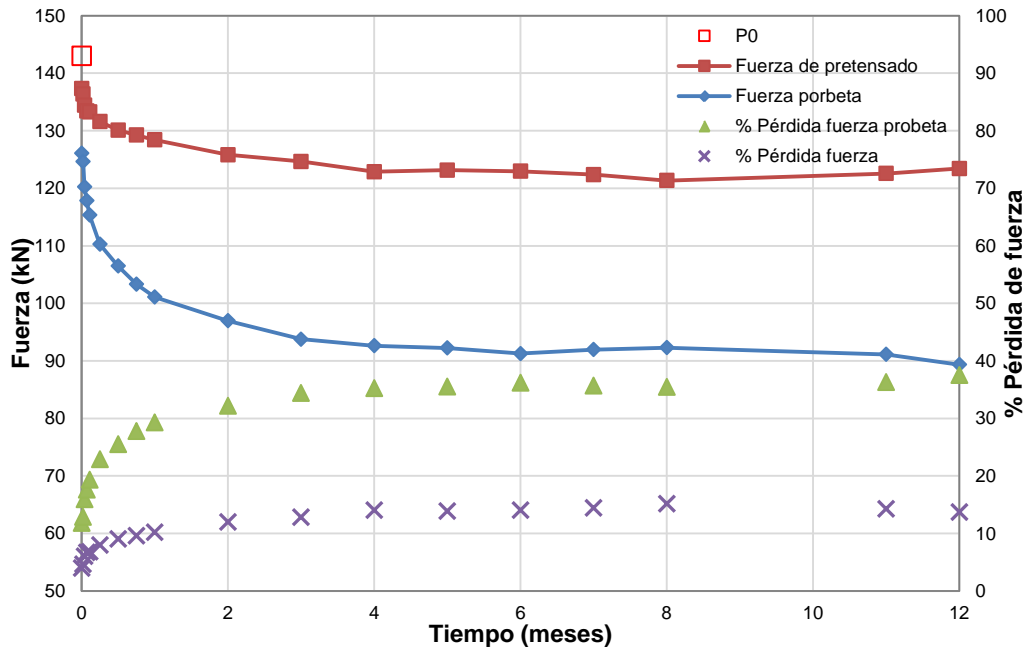


Figura N-17. Fuerza de pretensado y % de pérdidas de fuerza. Probeta HT-C-100-24-LS.

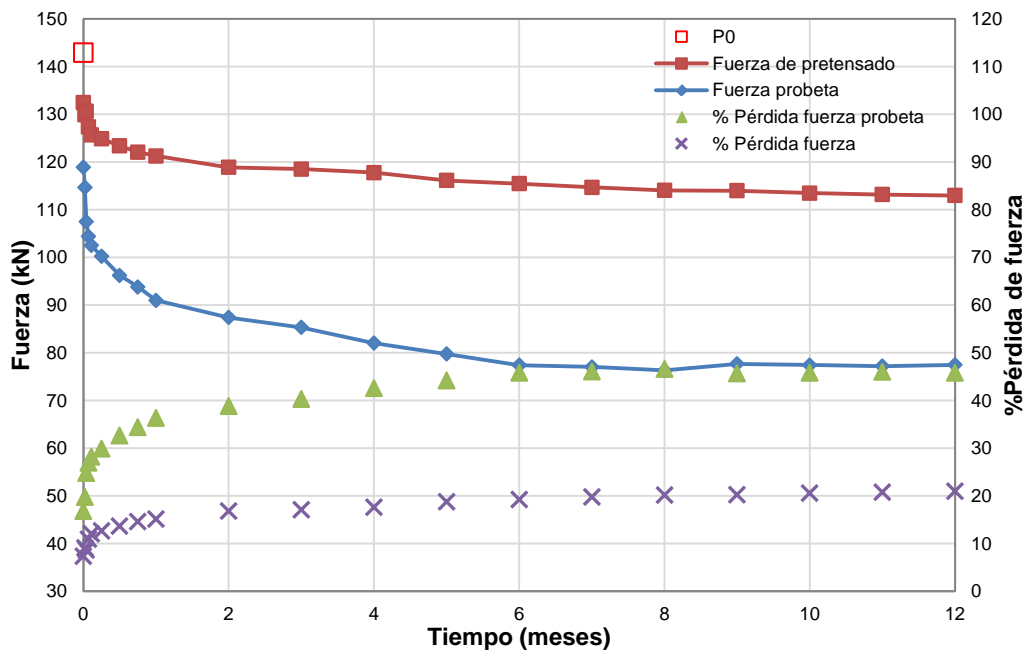


Figura N-18. Fuerza de pretensado y % de pérdidas de fuerza. Probeta HT-C-80-48-LS.

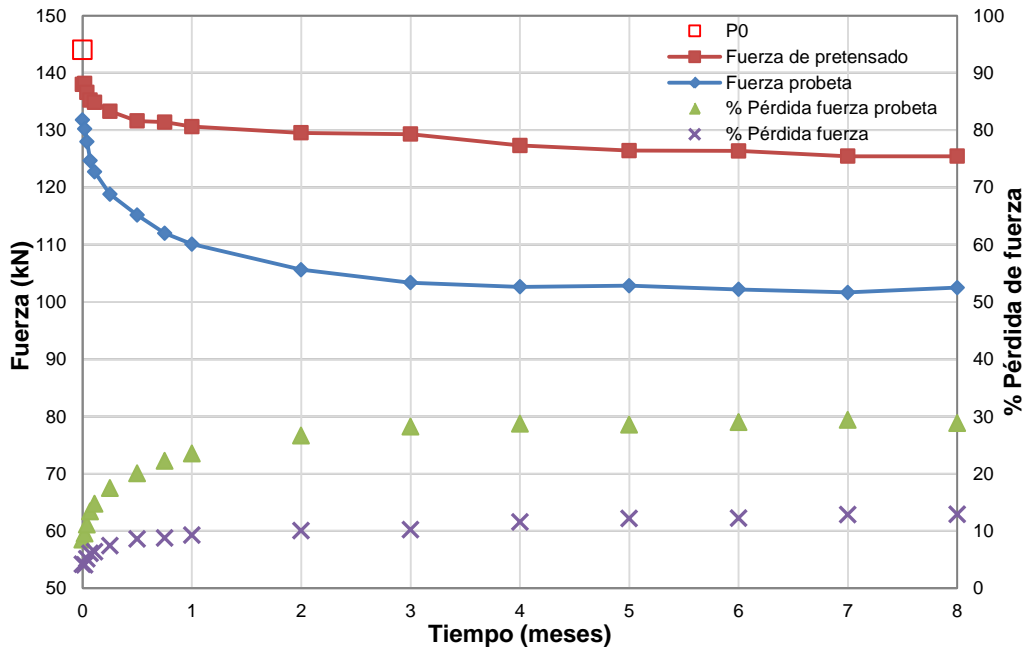


Figura N-19. Fuerza de pretensado y % de pérdidas de fuerza. Probeta HR-100-48-LS.

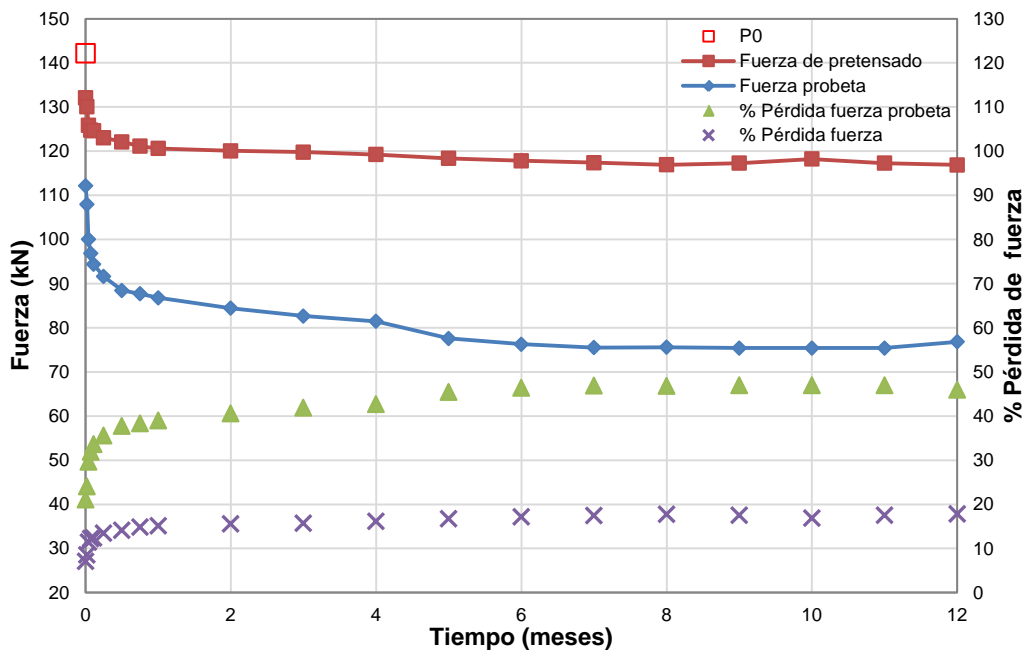


Figura N-20. Fuerza de pretensado y % de pérdidas de fuerza. Probeta FA-60-24-LS.

ANEJO N. COMPARACIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE PRETENSADO Y LAS PÉRDIDAS EN EL TRAMO DE MESETA

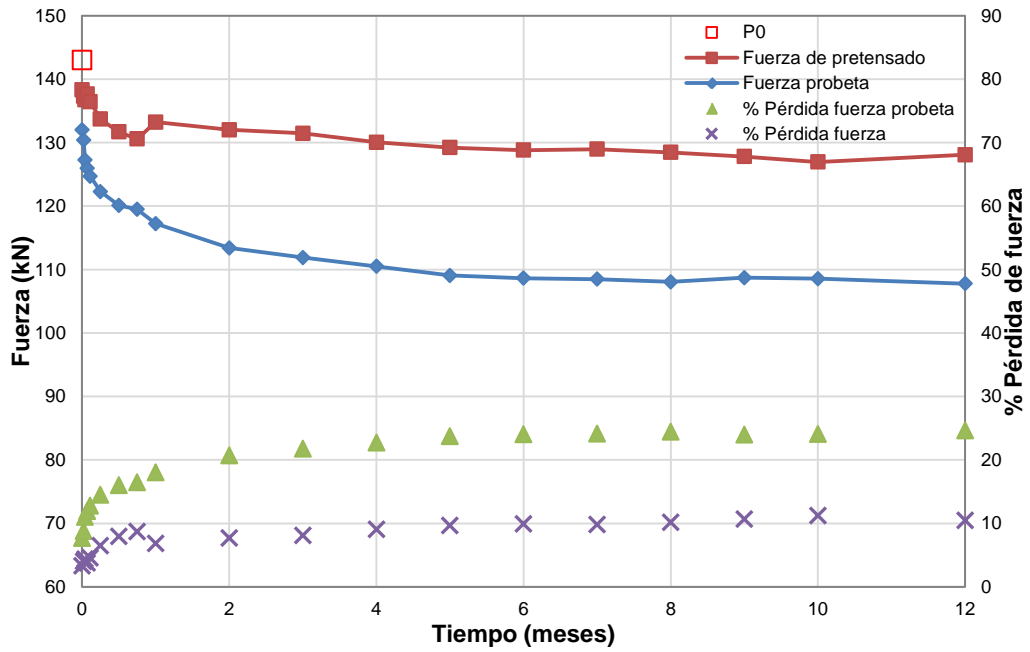


Figura N-21. Fuerza de pretensado y % de pérdidas de fuerza. Probeta HAC-NF-100-48-LS.

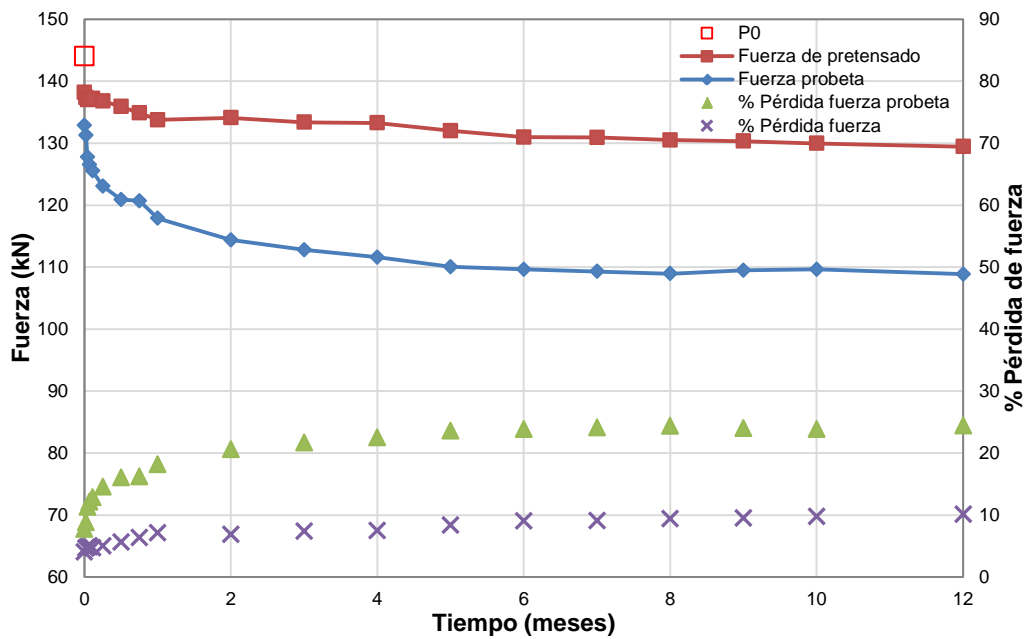


Figura N-22. Fuerza de pretensado y % de pérdidas de fuerza. Probeta HAC-LF-100-48-LS.

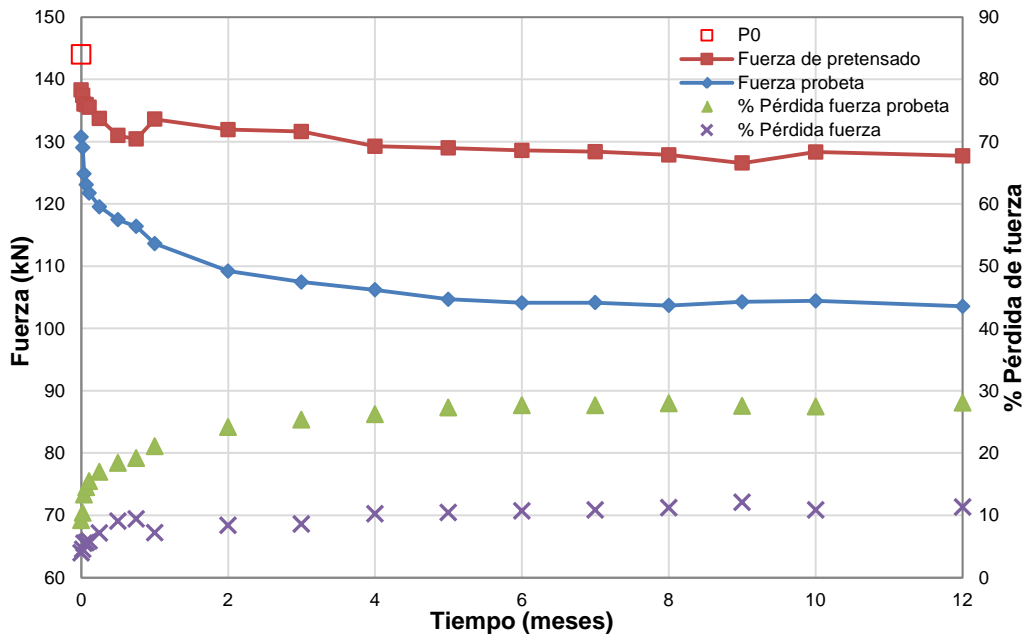


Figura N-23. Fuerza de pretensado y % de pérdidas de fuerza. Probeta HAC-MF-100-48-LS.

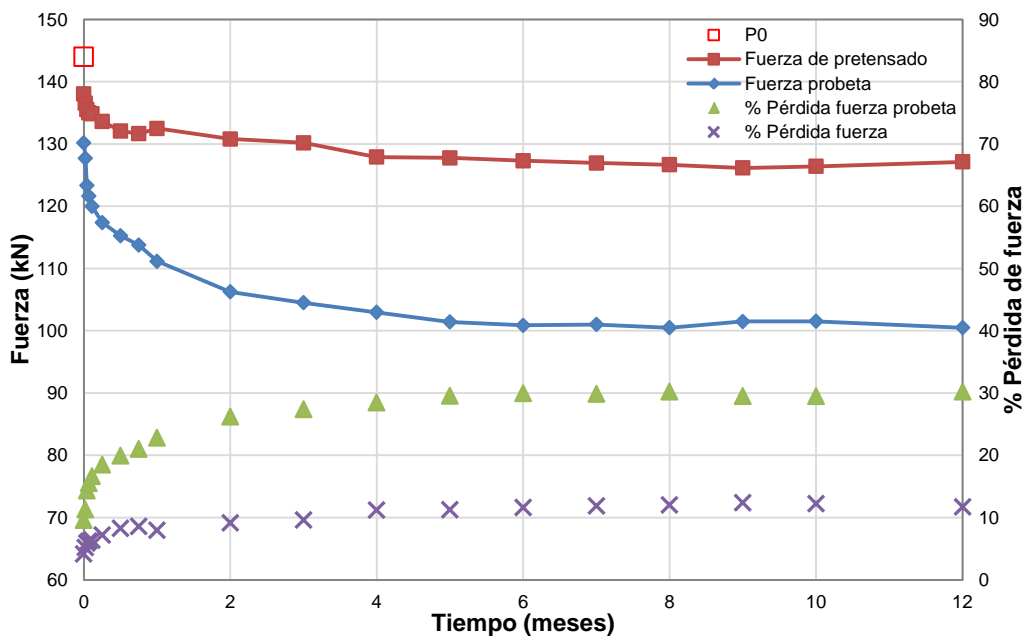


Figura N-24. Fuerza de pretensado y % de pérdidas de fuerza. Probeta HAC-HF-100-48-LS.

## ANEJO O. EJEMPLO PÉRDIDAS DIFERIDAS SEGÚN MODELOS TEÓRICOS

Cálculo de las pérdidas diferidas (CR+SH), en condiciones experimentales para los diferentes modelos.

Propiedades de la sección de la probeta HT-A-100-24-LS

$A_g$ = Sección transversal=	10,000 mm <sup>2</sup>
$A_c$ = Sección neta=	9,900 mm <sup>2</sup>
$I_c$ = Momento de Inercia =	8,3 x 10 <sup>6</sup> mm <sup>4</sup>
V/S = Relación Volumen Superficie =	25 mm
$h$ = Espesor Medio =	50 mm
$u$ = Perímetro =	400 mm

Propiedades de los materiales

- Hormigón:

$f'_c$ = Resistencia del hormigón a 28 días	= 85 MPa
$E_c$ = Módulo de elasticidad a 28 días	= 19,400 · ( $f'_c/10$ ) <sup>1/3</sup> = 39,592 MPa
$f'_{ci}$ = Resistencia a la edad de destesado	= 52 MPa
$\Delta\varepsilon_{ci}$ = Deformación en el hormigón en el momento del destesado	= 0.00071
$E_{ci}$ = Módulo de elasticidad a la edad de destesado	

$$E_{ci} = \frac{\frac{P_0}{\Delta\varepsilon_{ci}} - E_p A_p}{A_c} = \frac{\frac{142,500}{0.00071} - 203,350 \cdot 100}{9,900} = 18,219 \text{ MPa}$$

- Acero:

$f_{pu}$	= 1,860 MPa
$f_{py}$	= 1,674 MPa
$E_p$	= 203,350 MPa
$A_p$	= 100 mm <sup>2</sup>
Tipo	= Cordón de baja relajación

Propiedades de la viga pretensada

$P_0$	= Fuerza antes de destesado = 142.50 kN
$y_p$	= $e$ = Distancia de CG armadura a CG de la sección = 0
$n$	= $E_p / E_c$ = relación modular inicial del acero = 203,350/18,219 = 11.2
$f_{cgp}$	= Tensión de compresión en el centro de gravedad de la armadura pretensada

$$f_{cgp} = \frac{P_0}{A_g + (n - 1) \cdot A_p} = \frac{142,500}{10,000 + (11.2 - 1) \cdot 100} = 12.93 \text{ MPa}$$

Las pérdidas por relajación han sido excluidas en todos los casos (por previa proceso de sobretensión)

Unidades: 1 ksi = 6.895 MPa; pulgada 25.4 mm

➤ PCI Desing handbook (2010)

Acortamiento elástico del hormigón

$$ES = K_{es} E_{ps} f_{cir} / E_{ci}$$

$$f_{cir} = K_{cir} \left( \frac{P_i}{A_g} + \frac{P_i e^2}{I_g} \right) - \frac{M_g e}{I_g}$$

$$ES = 1 \cdot 203,350 \cdot \frac{0.9 \left( \frac{142,500}{10,000} + 0 \right) - 0}{18,219} = 143.1 \text{ MPa}$$

Pérdida por fluencia del hormigón

$$CR = K_{cr} \frac{E_p}{E_c} (f_{cir} - f_{c ds})$$

$$CR = 2.0 \frac{203,350}{39,592} (12.83) = 132 \text{ MPa}$$

$$K_{cr} = 2.0$$

$$f_{c ds} = 0 \text{ (se subestiman cargas permanentes después del tesado)}$$

$f_{cir}$  = tensión de compresión neta en el hormigón a nivel del centro de gravedad de los elementos tensores inmediatamente después de la transferencia =  $K_{cir} \cdot f_c - f_g$

$$K_{cir} = 0.9$$

$f_g$  = tensión en el hormigón a nivel del centro de gravedad de los elementos tensores debida a las cargas exteriores que actúan en el momento del tesado = 0

$f_c$  = tensión en el hormigón a nivel del centro de gravedad de los elementos tensores debida a la fuerza de tesado descontadas las pérdidas de fricción, acuñamiento y retroceso de anclaje

$$f_{cir} = 0,9 \cdot 14,25 = 12,83 \text{ MPa}$$

Pérdida por retracción del hormigón

$$SH = 8,2 \times 10^{-6} K_{sh} E_p \left( 1 - 0,0024 \frac{V}{S} \right) (100 - RH)$$

$$K_{sh} = 1,0$$

$$RH = \text{humedad relativa} = 55\%$$

$$SH = 8,2 \times 10^{-6} \cdot 1,0 \cdot 203,350 (1 - 0,0024 \cdot 25) (100 - 55) = 71 \text{ MPa}$$

- Instrucción de Hormigón estructural (EHE-08), Código Modelo (CM-2010) y Eurocódigo 2 (EC-2)

Acortamiento elástico del hormigón

$$ES = f_{cr} E_s / E_{ci} = 12,93 \cdot 203,350 / 18,219 = 144,3 \text{ MPa}$$

Pérdida por fluencia del hormigón

$$CR = \frac{\frac{E_p}{E_c} \cdot \varphi(t, t_0) \cdot \sigma_c}{1 + \frac{E_p A_p}{E_c A_c} \left( 1 + \frac{A_c y_p^2}{I_c} \right) (1 + \chi \varphi(t, t_0))}$$

$$= \frac{\frac{203,350}{39,592} \cdot 1,99 \cdot 12,93}{1 + \frac{203,350}{39,592} \frac{100}{(10000 - 100)} \left( 1 + \frac{9,900 \cdot 0^2}{8,3 \cdot 10^6} \right) (1 + 0,8 \cdot 1,99)} = 116,5 \text{ MPa}$$

$\sigma_c$  = 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 = 12.93 MPa

$\chi$  = coeficiente de envejecimiento = 0.8

$\varphi(t, t_0)$  = coeficiente de fluencia

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \cdot \beta_c(t, t_0) = 2.30 \cdot 0.86 = 1.99$$

$\varphi_0$  = coeficiente básico de fluencia

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \cdot \beta(f'_c) \cdot \beta(t_0) = 1.39 \cdot 1.82 \cdot 0.9 = 2.30$$

$\varphi_{RH}$  = coeficiente de influencia de humedad relativa (RH)

$$\varphi_{RH} = \left[ 1 + \frac{1 - RH/100}{0.1 \sqrt[3]{h}} \alpha_1 \right] \alpha_2 = \left[ 1 + \frac{1 - 55/100}{0.1 \sqrt[3]{50}} 0.54 \right] 0.84 = 1.39$$

$\beta(f'_c)$  = factor que permite tener en cuenta el efecto de la resistencia del hormigón en el coeficiente básico de fluencia

$$\beta(f'_c) = \frac{16,8}{\sqrt{f'_c}} = \frac{16,8}{\sqrt{85}} = 1,82$$

$\beta(t_0)$  = factor de fluencia de la edad de carga ( $t_0$ ) en el coeficiente básico de fluencia

$t_0$  = 1 día

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0.1 + (t_0)^{0,2}} = \frac{1}{0.1 + (1)^{0,2}} = 0,9$$

$$\alpha_1 = \left[ \frac{35}{f'_c} \right]^{0,7} = \left[ \frac{35}{85} \right]^{0,7} = 0.54$$

$$\alpha_2 = \left[ \frac{35}{f'_c} \right]^{0,2} = \left[ \frac{35}{85} \right]^{0,2} = 0.84$$

$\beta_c(t, t_0)$  = coeficiente que describe el desarrollo de la fluencia con el tiempo tras la puesta en carga

$t$  = 365 días



$$\beta_c(t, t_0) = \left[ \frac{(t - t_0)}{\beta_H + (t - t_0)} \right]^{0,3} = \left[ \frac{(365 - 1)}{235 + (365 - 1)} \right]^{0,3} = 0.86$$

$$\beta_H = 1,5h[1 + (1,2 RH/100)^{18}] + 250\alpha_3 \leq 1500\alpha_3$$

$$\beta_H = 1,5 \cdot 50[1 + (1,2 \cdot 55/100)^{18}] + 250 \cdot 0,64 = 235 \leq 963$$

$$\alpha_3 = \left[ \frac{35}{f'_c} \right]^{0,5} = \left[ \frac{35}{85} \right]^{0,5} = 0.64$$

Pérdida por retracción del hormigón

$$SH = \frac{E_p \varepsilon_{cs}(t, t_0)}{1 + \frac{E_p A_p}{E_c A_c} \left( 1 + \frac{A_c y_p^2}{I_c} \right) (1 + \chi \varphi(t, t_0))}$$

$$= \frac{203,350 \cdot 0.00053}{1 + \frac{203350}{39,592} \frac{100}{9,900} \left( 1 + \frac{9,900 \cdot 0^2}{8,3 \cdot 10^6} \right) (1 + 0.8 \cdot 1.99)} = 95 \text{ MPa}$$

$\varphi(t, t_0)$  = coeficiente de fluencia = 1.99

$\varepsilon_{cs}(t, t_0)$  = deformación por retracción

$$\varepsilon_{cs}(t, t_0) = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca} = 0.00036 + 0.00017 = 0.00053$$

$\varepsilon_{cd}$  = deformación de retracción por secado

$$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t - t_s) k_e \varepsilon_{cd, \infty} = 0.96 \cdot 1.0 \cdot 0.000379 = 0.00036$$

$$k_e = 1.0$$

$\beta_{ds}$  = coeficiente evolución temporal

$$\beta_{ds}(t - t_s) = \frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0.04\sqrt{h^3}} = \frac{(365 - 1)}{(365 - 1) + 0.04\sqrt{50^3}} = 0.96$$

$$t = 365 \text{ días}$$

$$t_s = 1 \text{ día}$$

$\varepsilon_{cd, \infty}$  = coeficiente de retracción a tiempo infinito

$$\begin{aligned}\varepsilon_{cd,\infty} &= 0.85 \left[ (220 + 110\alpha_{ds1}) \exp(-\alpha_{ds2} \frac{f'_c}{10}) \right] 10^{-6} \beta_{HR} \\ &= 0.85 \left[ (220 + 110 \cdot 6) \exp(-0.11 \frac{85}{10}) \right] 10^{-6} \cdot 1.29 = 0.000379\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\alpha_{ds1} &= 6 \\ \alpha_{ds2} &= 0.11\end{aligned}$$

$$\beta_{HR} = 1.55 \left[ 1 - \left( \frac{HR}{100} \right)^3 \right] = 1.55 \left[ 1 - \left( \frac{55}{100} \right)^3 \right] = 1.29$$

$\varepsilon_{ca}$  = deformación de retracción autógena

$$\varepsilon_{ca} = \beta_{as}(t) \varepsilon_{ca,\infty} = 0.00017 \cdot 0.98 = 0.00017$$

$$\varepsilon_{ca,\infty} = 2.5(f'_c - 10)10^{-6} = 2.5((85 - 8) - 10)10^{-6} = 0,00017$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0.2t^{0.5}) = 1 - \exp(-0.2 \cdot 365^{0.5}) = 0.98$$

➤ PCI Committee (1975)

Acortamiento elástico del hormigón

$$ES = f_{cr} E_s / E_{ci} = 12.93 \cdot 203,350 / 18,219 = 144.3 \text{ MPa}$$

Pérdida por fluencia del hormigón

$$\begin{aligned}CR &= (UCR)(SCF)(MCF)(PCR)(\sigma_c) = 11 \cdot 1.05 \cdot 1.21 \cdot 0.74 \cdot 1,877 = 19,406 \text{ PSI} \\ &= 134 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$UCR = 95 - 20 \frac{E_c}{10^6} \geq 11$$

$$UCR = 95 - 20 \frac{5742132}{10^6} = -19.8 ; UCR = 11$$

$$E_c = 5742132 \text{ PSI (39,592 MPa)}$$

PCR = coeficiente dependiente de la variación de la fluencia con el tiempo

$$PCR = AUC_t - AUC_{t1} = 0.74$$

MCF = 1.21 (factor según la edad de destesado)

SCF = 1.05 (factor de fluencia según la relación V/S)

$\sigma_c$  = tensión de compresión del hormigón en el centro de gravedad de la armadura, teniendo en cuenta la pérdida de la fuerza de pretensado que ocurren en el intervalo de tiempo anterior.

$$= 12.93 \text{ MPa}$$

Pérdida por retracción del hormigón

$$SH = (USH)(SSF)(PSH) = 12000 \cdot 1.04 \cdot 0.86 = 10,733 \text{ PSI}$$

$$= 74 \text{ MPa}$$

$$USH = 27000 - 3000 \frac{E_c}{10^6} \geq 12000$$

$$USH = 27000 - 3000 \frac{5742132}{10^6} = 9,773 \text{ PSI}; USH = 12000$$

PSH = coeficiente de retracción con el tiempo

$$PSH = AUS_t - AUS_{t1} = 0.86$$

SSF = 1.04 (factor de fluencia según la relación V/S)

➤ AASHTO STD (2003)

Acortamiento elástico del hormigón

$$ES = \frac{E_s}{E_{ci}} f_{cir} = \frac{203,350}{18,219} \cdot 12.93 = 144.3 \text{ MPa}$$

Pérdida por fluencia del hormigón

$$\begin{aligned} CR &= 12\sigma_c - 7\Delta\sigma_{cdp} = 12 \cdot 1.877 - 0 = 22.52 \text{ Ksi} \\ &= 155 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$\Delta\sigma_{cdp} = 0$  (se subestiman cargas permanentes después del tesado)

$\sigma_c$  = tensión del hormigón en el centro de gravedad de la armadura debido a la fuerza de pretensado al transmitir y el peso propio del elemento de la sección en el momento máximo  
= 12.93 MPa (1.877 ksi)

Pérdida por retracción del hormigón

$$\begin{aligned} SH &= (17 - 0.15H) = 17 - 0.15 \cdot 55 = 8.75 \text{ ksi} \\ &= 60.3 \text{ MPa} \end{aligned}$$

H = humedad relativa = 55%

➤ AASHTO LRFD Specifications (2008) – Método Aproximado

Acortamiento elástico del hormigón

$$\Delta f_{pES} = \frac{E_p}{E_{ct}} f_{cgp} = \frac{203,350}{18,219} \cdot 12.93 = 144.3 \text{ MPa}$$

Pérdida por fluencia del hormigón

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{pCR} &= 10 \frac{\sigma_{cp} A_p}{A_g} \gamma_h \gamma_{st} \\ &= 10 \cdot \frac{142,500}{10,000} 1.15 \cdot 0.59 = 96.7 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$\sigma_{cp}$  = tensión en la armadura antes del destesado = 142,500 MPa

$$A_p = 100 \text{ mm}^2$$

$$A_g = 10000 \text{ mm}^2$$

$\gamma_h$  = factor de corrección de la humedad relativa

$$= 1.7 - 0.01H = 1.7 - 0.01 \cdot 55 = 1.15$$

H = humedad relativa = 55%

$\gamma_{st}$  = factor de corrección de la resistencia del hormigón en el destesado

$$= \frac{5}{(1 + f'_{ci})} = \frac{5}{(1 + 7.547)} = 0.59$$

$f'_{ci}$  = 7.547 ksi (52 MPa)

Pérdida por retracción del hormigón

$$\Delta\sigma_{pCR} = 12\gamma_h\gamma_{st}$$

$$\Delta\sigma_{pCR} = 12 \cdot 1.15 \cdot 0.59 \cdot 6.895 = 56.1 \text{ MPa}$$

➤ AASHTO LRFD Specifications (2008) – Método Refinado

Acortamiento elástico del hormigón

$$\Delta f_{pES} = \frac{E_p}{E_{ct}} f_{cgp} = \frac{203,350}{18,219} \cdot 12.93 = 144.3 \text{ MPa}$$

Pérdida por fluencia del hormigón

$$CR = \frac{E_p}{E_{ci}} \sigma_{cgp} \cdot \psi_b(t_d, t_i) \cdot K_{id} = \frac{203,350}{18,219} 12.93 \cdot 1.528 \cdot 0.812 = 179.1 \text{ MPa}$$

$K_{id}$  = coeficiente de la sección transformada

$$K_{id} = \frac{1}{1 + \left(\frac{E_p A_p}{E_{ci} A_c}\right) \left(1 + \frac{A_c e^2}{I_c}\right) [1 + 0.7 \Psi_b(t_f, t_i)]}$$

$$= \frac{1}{1 + \left(\frac{203,350 \cdot 100}{18,219 \cdot 10000}\right) (1 + 0) [1 + 0.7 \cdot 1.528]} = 0,812$$

$$\Psi_b(t_f, t_i) = 1.9 k_s \cdot k_{hc} \cdot k_f \cdot k_{td} \cdot t_i^{-0.118} = 1.9 \cdot 1.32 \cdot 1.12 \cdot 0.59 \cdot 0.922 \cdot 1^{-0.118}$$

$$= 1.53$$

$k_s$  = factor por el efecto V/S

$$= 1.45 - 0.13(V/S) \geq 1.0$$

$$= 1.45 - 0.13(0.98) = 1.32 \geq 1.0$$

V/S = 0.98 in (25 mm)

$k_{hc}$  = factor de humedad por fluencia

$$= 1.56 - 0.008H = 1.12$$

H = humedad relativa = 55%

$k_f$  = factor por el efecto de resistencia del hormigón

$$= \frac{5}{(1 + f'_{ci})} = \frac{5}{(1 + 7.547)} = 0.59$$

$f'_{ci}$  = 7.547 ksi (52 MPa)

$K_{td}$  = factor dependiente del tiempo

$$= \left(\frac{t}{61 - 4f'_{ci} + t}\right) = \left(\frac{365}{61 - 4 \cdot 7.547 + 365}\right) = 0.922$$

t = 365 días

$t_i$  = 1 día

Pérdida por retracción del hormigón

$$SR = \epsilon_{bid} E_p K_{id} = 0.00042 \cdot 203,350 \cdot 0.812 = 69 \text{ MPa}$$

$\epsilon_{bid}$  = deformación por retracción del hormigón

$$\begin{aligned} \epsilon_{bid} &= k_s \cdot k_{hs} \cdot k_f \cdot k_{td} (0,48 \times 10^{-3}) = 1.32 \cdot 1.23 \cdot 0.59 \cdot 0.922 \cdot (0.48 \times 10^{-3}) \\ &= 0.00042 \end{aligned}$$

$k_{hs}$  = factor de humedad por retracción

$$= 2 - 0.014H = 2 - 0.014 \cdot 55 = 1.23$$

H = humedad relativa = 55%

Tabla resumen de las pérdidas de pretensado para la probeta HT-A-100-24-LS

Referencia	Clases de pérdidas de pretensado (MPa)			Pérdidas diferidas	Pérdidas totales de pretensado
	Acortamiento elástico	Fluencia	Retracción		
PCI DH	143.1	97.5 (131.7·0.74*)	60.7 (70.6·0.86**)	158.2	301.3
PCI	144.3	133.7	74.0	207.7	352.0
AASHTO Standard	144.3	155.2	60.3	215.5	359.8
AASHTO LRFD	144.3	96.7 (Aprox.) 179.1 (Refinado)	56.1 (Aprox.) 69.4 (Refinado)	152.8 (Aprox.) 248.5 (Refinado)	297.1 (Aprox.) 392.8 (Refinado)
MC2010 EC-2 EHE	144.3	116.50	95.0	211.5	355.8

\*Factor para un año de vida de servicio (Tabla 5 del PCI Committee on Prestress Losses (1975))

\*\*Factor para un año de vida de servicio (Tabla 7 del PCI Committee on Prestress Losses (1975))

(Esta página se ha dejado intencionadamente en blanco)