



**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE ELEMENTOS DE BORDE DE MURO**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**PABLO SANTIAGO POLANCO CAPRILE**

**PROFESOR GUÍA:**  
**LEONARDO MASSONE SANCHEZ**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:**  
**AUGUSTO HOLMBERG FUENZALIDA**  
**FERNANDO YAÑEZ URIBE**

**SANTIAGO DE CHILE**  
**ENERO 2013**

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA  
OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
POR: PABLO POLANCO C.  
FECHA: 30/01/2013  
PROF. GUÍA: LEONARDO MASSONE S.

## RESUMEN

En el trabajo de título se estudia el comportamiento de muros esbeltos sometidos a cargas axiales, y se analiza el papel que cumple el confinamiento en él, todo esto, basado en los daños observados en el último terremoto del 27 de febrero de 2010. Los elementos esbeltos buscan semejar los bordes de muros que durante un sismo son sometidos a cargas axiales.

Para realizar lo anterior, se estudia experimentalmente el comportamiento de elementos (probetas) de borde de muros de hormigón armado sometidos a cargas axiales, analizando la influencia que tiene el tipo de confinamiento (estribos) en la respuesta global de los elementos, entre otros parámetros. Se construyeron 24 y se ensayaron 10 probetas de hormigón armado, de manera de comparar cada una de las respuestas obtenidas, para concluir sobre la influencia real del confinamiento en los elementos, en cuanto al aumento de ductilidad, y la restricción que proveen para evitar o controlar el pandeo de las barras longitudinales de refuerzo.

Mediante el estudio experimental realizado, se determinó, en primer lugar, que al darle cierto confinamiento al elemento de hormigón armado, este es capaz de aumentar su capacidad de deformación, degradando más paulatinamente la resistencia a la compresión, y por ende, disipando una mayor cantidad de energía. Además, como las probetas no se restringieron para deformaciones fuera del plano para una carga de compresión pura, se produjo un pandeo global característico en las probetas con confinamiento, en su eje débil, reduciendo la capacidad del elemento. Por esto último, también se apreció un pandeo local del refuerzo longitudinal en forma de “S”, abarcando, en algunos casos, más de dos estribos consecutivos sin asegurar la relación de aspecto otorgada por ellos. Los ganchos con dobleces en 90° no fueron capaces de restringir el pandeo de las barras para deformaciones más allá del 1%.

En general el comportamiento de las probetas tuvo un buen ajuste con el modelo predictivo escogido, presentando variaciones de menos de un 25% en todas las probetas de 1 metro de longitud.

## AGRADECIMIENTOS

En el largo proceso que fue la gestación de mi memoria de título, se hace casi interminable el número de personas que participaron, directa e indirectamente, en el.

Primero agradezco a toda mi familia, la que siempre se preocupó preguntando como iba en mi trabajo, dando todo su apoyo para que todo resultara bien. Especialmente agradezco a mi mamá y hermanos, los que siempre estuvieron ahí para escuchar mis alegrías y alegatos a medida que pasaba el tiempo, quizás sin entender todo lo que decía, pero escuchando y dando sus opiniones al respecto. Además, siempre han sido la mejor familia del mundo otorgando todo lo que un hijo necesita, sin ellos probablemente no sería nada de lo que soy ahora.

Agradezco a mi hermosa polola, Carolina Jaramillo, que participó íntegramente en el proceso, teniendo que soportar todas mis neuras, arrebatos y lateras conversaciones, cuando le contaba sobre cómo iba mi trabajo. Ella siempre fue y será un pilar dentro de mi vida desde que la conocí, dándome todo el apoyo posible, lo cual agradezco infinitamente, como también agradezco el día que la conocí.

Gracias a mi profesor guía, Leonardo Massone, por siempre estar ahí para las dudas y demases, teniendo siempre la intención de ayudar en poder agilizar la burocracia que implican ensayos experimentales. Agradezco al ICH y Augusto Holmberg, por entregar todos los recursos necesarios para la realización de los ensayos. También al personal del IDIEM por realizar los ensayos.

Un especial agradecimiento a Víctor Gonzales, que me ayudó en todo el proceso previó a los ensayos, siendo siempre de gran especial ayuda con toda su disposición, buena onda y sentido del humor. Gracias a Pedro Soto por aportar con todo su conocimiento en los ensayos previos.

Agradezco a todos mis amigos y partner de la Universidad, Gaspar Besio, José Gacitúa, Gabriel Guggisberg, Bruno Morales, Sebastián Arancibia, Felipe Ahumada, Jorge Alfaro, pablo del Río, Mario Sandoval, Manuel Rojas, Daniel Muñoz, Camilo Palape y Vicente Gainza, que siempre fueron importantes para el relajo, cofradía, apoyo, consejos, paños de lágrima, etc.

Gracias a todos mis amigos del colegio: Sergio Miranda, Andrés Díaz, Felipe Aranda, Felipe Lazo y Pablo Santa Cruz.

En general agradezco a todos los que estuvieron y están a mi lado.

¡¡¡MUCHAS GRACIAS!!!

# TABLA DE CONTENIDO

Capitulo 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1    Introducción.....	1
1.2    Motivación.....	2
1.3    Objetivos .....	3
1.3.1    Objetivos generales.....	3
1.3.2    Objetivos específicos .....	3
1.4    Metodología.....	4
1.5    Organización de la Memoria .....	5
Capitulo 2: COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES .....	6
2.1    Descripciones Generales .....	6
2.1.1    Descripción Probetas y Equipo de Ensayo.....	6
2.1.2    Montaje e Instrumentación.....	7
2.2    Resultados .....	8
2.2.1    Ensayos Hormigón No Confinado.....	8
2.2.2    Ensayos Acero a Tracción.....	14
Capitulo 3: DESCRIPCIÓN ELEMENTOS DE BORDE MURO CONFINADOS.....	18
3.1    Descripción Modelos .....	18
3.1.1    Hormigón a Compresión.....	18
3.1.2    Hormigón a Tracción-Compresión.....	31
3.1.3    Acero.....	34
3.2    Matriz de Ensayos.....	46
3.3    Descripción de Probetas.....	48
3.4    Montaje e Instrumentación.....	52
3.5    Proceso Constructivo .....	54
Capitulo 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	59
4.1    Modelo de predicción escogido .....	61
4.2    Forma de falla observada .....	65

4.3	Curvas tensión deformación .....	72
4.4	Giro de la sección .....	84
4.5	Deformaciones estribos y barras longitudinales .....	87
Capitulo 5:	CONCLUSIONES .....	94
Capitulo 6:	REFERENCIAS .....	97
ANEXO A:	PLANOS PROBETAS.....	99
ANEXO C:	COMPARACIONES GIRO PROBETAS .....	123
ANEXO D:	DEFORMACIONES LADO CORTO ESTRIBO CENTRAL .....	126
ANEXO E:	PREDICCIÓN MODELOS EXCLUIDOS .....	128

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - (a) Modo de falla a estudiar (b) Representación elemento de borde de muro .....	2
Figura 2.1 - Instrumentación (a) Interna (b) Externa.....	7
Figura 2.2 - Tensión vs Deformación unitaria (acoplada) para hormigón H25.....	9
Figura 2.3 - Tensión vs Deformación unitaria (acoplada) para hormigón H30.....	10
Figura 2.4 - Curva calibrada y resultados experimentales para H25 .....	11
Figura 2.5 - Curva calibrada y resultados experimentales para H30 .....	12
Figura 2.6 - Comparación para H25 .....	13
Figura 2.7 - Comparación para H30 .....	13
Figura 2.8 - Comportamiento tracción barras ensayadas .....	14
Figura 2.9 - Esquema comportamiento acero en tracción (Dhakar y Maekawa, 2002).....	16
Figura 2.10 - Comparación ensayo con modelo de Dhakar y Maekawa (2002) .....	17
Figura 3.1 - Modelo hormigón no confinado de calidad H30.....	19
Figura 3.2 - Núcleo efectivo de confinamiento en secciones rectangulares (Mander et. al., 1988) .....	21
Figura 3.3 - Ejemplo modelo Mander para confinamiento tipo A.....	23
Figura 3.4 - Forma estándar modelo hormigón confinado Saatcioglu y Razvi (Saatcioglu y Razvi. 1992) .....	23
Figura 3.5 - Ilustración de la distribución de tensiones de confinamiento (Saatcioglu y Razvi 1992) .....	24
Figura 3.6 - Ejemplo modelo Saatcioglu y Razvi para confinamiento tipo A .....	27
Figura 3.7 - Esquema relación tensión – deformación hormigón confinado y no confinado (Legeron y Paultre, 2003) .....	30
Figura 3.8 - Ejemplo modelo Legeron y Paultre para confinamiento tipo A.....	30
Figura 3.9 - Modelo hormigón a tracción .....	32
Figura 3.10 - Representación esquemática modelo cierre de grietas.....	32
Figura 3.11 - Modelo tracción-compresión para confinamiento tipo A .....	34
Figura 3.12 - Esquema comportamiento monotónico de la envolvente de compresión (Dhakar y Maekawa 2002) .....	36
Figura 3.13 - Modelo acero propuesto por Dhakar y Maekawa .....	38
Figura 3.14 - Curva transición modelo original Giuffre-Menegotto-Pinto (Dhakar y Maekawa, 2002) .....	38
Figura 3.15 - Ajuste de la pendiente objetivo en la descarga (Dhakar y Maekawa, 2002) .....	40
Figura 3.16 - Modelo Dhakar y Maekawa tracción-compresión con 1% de pre-tracción .....	41
Figura 3.17 - Modelo Dhakar y Maekawa tracción-compresión con 2% de pre-tracción .....	41
Figura 3.18 - Modelamiento de pandeo con imperfección inicial (Massone y Moroder, 2009)....	42
Figura 3.19 - Modelo plasticidad concentrada acero a compresión .....	43

Figura 3.20 - Modelo de acero cíclico de Massone y Moroder (2009) y modificación de Lacaze (2009) (Massone y Moroder, 2009).....	44
Figura 3.21 - Modelo plasticidad concentrada, pre-tracción de 1%.....	45
Figura 3.22 - Modelo plasticidad concentrada, pre-tracción de 2%.....	46
Figura 3.23 - Detalle confinamientos zona central.....	48
Figura 3.24 - Distribución armadura transversal probetas sin pre tracción (barras cortadas) ...	49
Figura 3.25 - Distribución armadura transversal probetas con pre tracción de 1 m (barras pasadas) .....	49
Figura 3.26 - Distribución armadura transversal probetas con pre tracción de 1.6 m (barras pasadas) .....	50
Figura 3.27 - Confinamiento en extremo de probetas de 8 barras longitudinales.....	51
Figura 3.28 - Pedestal de reacción para probetas de 6 barras longitudinales.....	52
Figura 3.29 - Pedestal de reacción para probetas de 8 barras longitudinales.....	52
Figura 3.30 - Esquema de ubicación de Strain Gauges en probetas.....	53
Figura 3.31 - Esquema de disposición de los LVDT.....	54
Figura 3.32 - Procedimiento montaje Strain Gauges en barras longitudinales (a) Strain Gauge pegado sobre superficie espejo (b) Conectores soldado a Strain Gauge (c) Situación final .....	55
Figura 3.33 - Ejemplo diferentes espaciamientos (a) Confinamiento 0 (b) $S=100$ mm .....	56
Figura 3.34 - (a) Barras pasadas para pre-tracción (b) Conectores Strain Gauges (c) Barras aluminio para LVDT (d) Barra $\Phi 18$ auxiliar.....	57
Figura 3.35 - Ejemplo probetas, 7 días luego del hormigonado .....	58
Figura 4.1 - Esquema representativo comportamiento zona de daño y fuera de ella .....	59
Figura 4.2 - Error curva completa modelos por probeta.....	61
Figura 4.3 - Error total modelos predictivos curva completa, en probetas con confinamiento ....	62
Figura 4.4 - Error capacidad máxima por probeta .....	63
Figura 4.5 - Error total modelos predictivos capacidad máxima, probetas confinadas .....	63
Figura 4.6 - Secuencia forma de falla (a) Desprendimiento hormigón perimetral (b) Desprendimiento notorio de hormigón y pandeo entre estribos (c) Pandeo en forma de S de barras longitudinales (d) Pandeo a través de más de dos estribos y abertura de ganchos .....	66
Figura 4.7 - Esquema representativo forma de falla (a) Probetas no confinadas (b) Probetas confinadas .....	66
Figura 4.8 - Falla probeta 1 .....	67
Figura 4.9 - (a) Falla probeta 2 (b) Falla probeta 3 .....	68
Figura 4.10 - Falla probeta 4 .....	68
Figura 4.11 - Falla probeta 5 .....	69
Figura 4.12 - Falla probeta 6 .....	69
Figura 4.13 - Falla probeta 12 .....	70
Figura 4.14 - Falla probeta 13 .....	70
Figura 4.15 - Falla probeta 14 .....	71

Figura 4.16 - <i>Falla probeta 15</i> .....	71
Figura 4.17 - (a) <i>Resultados probetas sin confinamiento de diferente sección</i> (b) <i>Predicción mejor ajuste</i> .....	72
Figura 4.18 - (a) <i>Resultados probetas con confinamiento A de diferente sección</i> (b) <i>Predicción mejor ajuste</i> .....	74
Figura 4.19 - <i>Comparaciones probetas confinadas y no confinadas de diferentes anchos</i> (a) <i>Ancho 130 mm</i> (b) <i>Ancho 180 mm</i> (c) <i>Ancho 250 mm</i> .....	75
Figura 4.20 - <i>Predicción probetas confinadas y no confinadas de diferentes anchos</i> (a) <i>Ancho 130 mm</i> (b) <i>Ancho 180 mm</i> (c) <i>Ancho 250 mm</i> .....	76
Figura 4.21 - <i>Resultados diferente espaciamiento zona central</i> (a) <i>Acero A630-420</i> (b) <i>Acero A440-280</i> .....	77
Figura 4.22 - <i>Predicción diferentes espaciamientos</i> (a) <i>Acero A630-420</i> (b) <i>Acero A440-280</i> ....	79
Figura 4.23 - <i>Resultados diferentes tipo de acero con igual espaciamiento</i> (a) <i>S=100 mm</i> (b) <i>S=150 mm</i> .....	80
Figura 4.24 - <i>Predicción diferentes tipo de acero con igual espaciamiento</i> (a) <i>S=100 mm</i> (b) <i>S=150 mm</i> .....	81
Figura 4.25 - <i>Probetas con 50% de diferencia en acero y confinamiento</i> (a) <i>Resultados</i> (b) <i>Predicción</i> .....	82
Figura 4.26 - <i>Comparación probetas de diferente longitud</i> .....	83
Figura 4.27 - <i>Esquema cálculo giro sección</i> .....	84
Figura 4.28 - <i>Giro para diferentes anchos de sección</i> (a) <i>Probetas sin confinamiento</i> (b) <i>Probetas con confinamiento</i> .....	85
Figura 4.29 - <i>Comparación giro diferente espaciamiento</i> (a) <i>Acero A630-420</i> (b) <i>Acero A440-280</i> .....	86
Figura 4.30 - <i>Deformaciones estribos exteriores</i> (a) <i>Probetas sin confinamiento</i> (b) <i>Diferentes secciones probetas confinadas</i> (c) <i>Diferentes calidades de acero</i> .....	90
Figura 4.31 - <i>Deformaciones lado largo estribo central</i> (a) <i>Diferentes secciones probetas confinadas</i> (b) <i>Diferentes calidades de acero</i> .....	91
Figura 4.32 - <i>Deformaciones media barras longitudinales</i> (a) <i>Probetas sin confinamiento</i> (b) <i>Diferentes secciones probetas confinadas</i> (c) <i>Diferentes calidades de acero</i> .....	92



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 - $f'c$ y $\varepsilon_0$ para hormigón H25 .....	8
Tabla 2.2 - $f'c$ y $\varepsilon_0$ para hormigón H30 .....	9
Tabla 2.3 - $f_y$ de barras $\Phi 8$ , A440-280 y A630-420.....	15
Tabla 2.4 - Valores $\Phi 12$ A630-420.....	15
Tabla 3.1 - Valores iniciales y finales para cada curva. ....	33
Tabla 3.2 - Matriz de ensayo .....	46
Tabla 4.1 - Capacidades y deformaciones, experimentales y predictivas .....	64
Tabla 4.2 - Días de maduración del hormigón.....	65
Tabla 4.3 - Deformaciones asociadas a la máxima capacidad en estribos y barras longitudinales .....	87

# Capítulo 1: INTRODUCCIÓN

## 1.1 Introducción

Chile presenta una gran porción de su territorio ubicada en la zona donde se produce la interacción de la placa de Nazca con la Sudamericana, deslizando la de Nazca por debajo de la Sudamericana. En la zona de contacto de ambas placas se generan grandes presiones, produciendo deslizamientos cada cierto tiempo los cuales son la causa de los sismos de diversa magnitud que se producen en el territorio nacional. Por esta razón Chile es un país con altas tasas de sismicidad y en donde se han producido los mayores terremotos del planeta. Por todo lo anterior, se hace fundamental, diseñar construcciones que sean capaces de enfrentar estos acontecimientos con el mínimo de daño posible para un sismo de intensidad moderada y evitando el colapso para un evento de intensidad severa. Entre estos últimos se encuentra el terremoto del 27 de Febrero de 2010, siendo uno de los 6 más grandes registrados en el mundo.

En este último evento se observó una cierta forma de falla de elementos de borde de muros de hormigón armado, principalmente en muros tipo T, esbeltos y de bajo espesor. La falla, esencialmente, se caracteriza por una grieta horizontal propagada a lo largo del alma del muro, iniciándose desde la zona más comprimida hacia el ala, producto de la carga de flexo-compresión en el elemento. Altas demandas de deformación de compresión hicieron fallar el hormigón, primero el perimetral y luego, con las barras longitudinales expuestas, sin mayor restricción fuera del plano, éstas se pandearon y, en algunos casos, fracturaron dejando un hormigón interior con baja capacidad.

Al observar los daños, luego del pasado terremoto, se estableció que la falla fue producida, principalmente, por un mal confinamiento del hormigón armado o por poca restricción al pandeo de barras longitudinales, ya sea por espaciamiento de estribos demasiado grandes, en relación al diámetro de las barras longitudinales, por mal doblado de los estribos en sus extremos, dejándolos sin el anclaje adecuado, o por el hecho de no considerar estribos que amarraran ciertas barras longitudinales (Figura 1.1a).

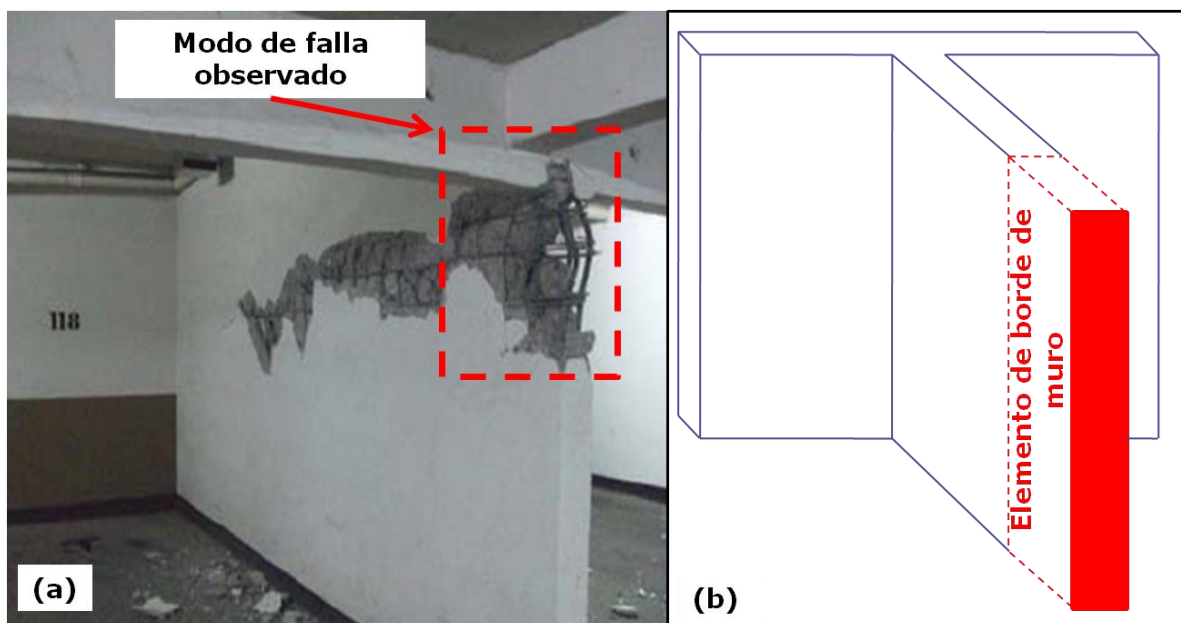


Figura 1.1 - (a) *Modo de falla a estudiar* (b) *Representación elemento de borde de muro*

En este trabajo se determinan: (a) las variables más relevantes que afectan en este tipo de fallas, y (b) se caracterizan formas correctas de confinamiento del hormigón armado, sometido a grandes cargas axiales y laterales. Para lograr lo anterior se construyeron 24 probetas de hormigón armado con diferentes confinamientos, que representan elementos de borde de muro a escala sometidos a cargas uniaxiales (Figura 1.1b). De estas 24, se ensayaron 10 para efectos de la memoria, las cuales fueron sometidas a carga axial pura sin restricción lateral de sus deformaciones. Como una etapa preliminar, para determinar las propiedades del hormigón no confinado, se ensayaron alrededor de 20 probetas cilíndricas de hormigones calidad H25 y H30.

## 1.2 Motivación

Las razones que motivan el estudio experimental realizado en el presente trabajo son las siguientes:

- En Chile, el hormigón armado es uno de los materiales más utilizados en la construcción de estructuras en altura. Además, en el pasado terremoto, algunos muros presentaron fallas que no se habían observado anteriormente, por lo cual se hace necesario estudiar su comportamiento para poder determinar los factores más influyentes en la generación de dicha falla.

- En el último tiempo el confinamiento de elementos de hormigón armado ha sido un tema relevante en el diseño de estructuras, pues con él se pueden lograr mayores deformaciones en el hormigón, y por ende, una mejor capacidad para disipar energía.
- El pandeo prematuro de las barras longitudinales de refuerzo, puede producir una disminución considerable en la capacidad del elemento de hormigón armado, por lo que es de suma importancia establecer espaciamientos de estribos en función de los diámetros de barra.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivos generales**

En términos generales, un objetivo de este Trabajo de Título es realizar un estudio experimental de diferentes configuraciones de confinamiento en elementos de borde de muro a escala, mediante el ensayo de 10 probetas, y establecer parámetros influyentes en su mejor comportamiento bajo cargas uniaxiales, mediante la identificación de variables relevantes en la respuesta del elemento. Esto permitirá entregar recomendaciones en el armado de los bordes de muros de hormigón armado, para garantizar un comportamiento dúctil y evitar las fallas observadas en el pasado terremoto.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

En términos específicos, los objetivos son los siguientes:

- 1) Obtener una curva que sea representativa del comportamiento del hormigón no confinado.
- 2) Cuantificar la efectividad del confinamiento en secciones angostas, caracterizando la respuesta del elemento respecto de su ancho.
- 3) Estudiar el efecto del aumento en la ductilidad por confinamiento.
- 4) Estudiar el efecto de la esbeltez global de la sección en el pandeo global del elemento, determinando la importancia del giro de la sección en la respuesta global.

## 1.4 Metodología

La metodología de trabajo que permitió alcanzar los objetivos propuestos para este trabajo fue la siguiente:

- *Recopilación Bibliográfica:* Mediante revisión de diferentes publicaciones y reportes, se sintetizan los modelos para el comportamiento del hormigón no confinado, confinado y de las barras longitudinales. Para el hormigón no confinado para la calibración de la curva se utilizará el modelo propuesto por Popovics (1973), mientras que para compararlo, los modelos propuestos por Collins et. al. (1989) y Carreira et. al. (1985), para el hormigón confinado los propuestos por Mander et. al. (1989) y Saatcioglu et. al. (1992), y para las barras los propuestos por Dhakal y Maekawa(2002), y un modelo de plasticidad concentrada de Massone y Moroder(2009). Con la implementación de dichos modelos, se obtiene la respuesta esperada de cada una de las probetas, y se compara con los resultados experimentales obtenidos.
- *Ensayo probetas cilíndricas y barras de acero:* Para establecer la ley constitutiva del hormigón no confinado perimetral, se ensayaron alrededor de 20 probetas cilíndricas de dos diferentes calidades, H25 y H30. Para la ley constitutiva del acero, se utilizaron resultados de ensayos realizados por IDIEM, para diferentes diámetros y calidades (A440-280 y A630-420).
- *Ensayo probetas de hormigón armado:* Se ensayaron 10 probetas escaladas de elemento de borde muro, con diferentes disposiciones de confinamiento, de manera de cuantificar la importancia de las variables que ellas presentaban. Dichas probetas se ensayaron en las instalaciones del IDIEM, según el diseño determinado en el proyecto InnoVaCorfo del ICH (10CREC – 8580 – Metodología de diseño sísmico en muros de edificio).
- *Recopilación y ordenamiento de la información:* Luego de realizar los ensayos de los elementos de borde de muro, se ordenó la información obtenida en cada tipo de ensayo, clasificando cada uno de los resultados según los tipos de confinamientos y comentando sobre lo más relevante observado.

- *Obtención de conclusiones:* Análisis de la información.

## 1.5 Organización de la Memoria

La memoria se organiza en cinco capítulos cuyo contenido es el siguiente:

*Capítulo 1: Introducción.* Se presenta una introducción del tema, la motivación, los objetivos y la secuencia de pasos a seguir para alcanzar los propósitos establecidos.

*Capítulo 2: Comportamiento de los materiales.* En este capítulo se presentan las leyes constitutivas, obtenidas experimentalmente, del hormigón no confinado, en compresión, y del acero, en tracción.

*Capítulo 3: Comportamiento de elementos de borde muro confinados.* Primero se describen las probetas, con cada una de las configuraciones de las probetas construidas, luego se detallan los modelos a utilizar en el comportamiento esperado de las probetas, sobre las cuales se graficaran los resultados experimentales obtenidos.

*Capítulo 4: Análisis de resultados.* Con la información obtenida en los ensayos, se realizaron comparaciones entre las diferentes configuraciones, de manera de cuantificar la influencia clara del confinamiento. Además, se comparó el comportamiento de cada probeta con los modelos de la literatura previamente generados.

*Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones.* Según el análisis de resultados, se muestran las conclusiones y recomendaciones para obtener el comportamiento adecuado de muros de hormigón armado.

## Capítulo 2: **COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES**

Se ensayaron cilindros de hormigón a compresión, para obtener la representación completa del comportamiento de éste, es decir, el comportamiento tanto ascendente como el descendente (degradante), por lo que se debió utilizar instrumentación interna (LVDT) y externa (potenciómetros) al cilindro.

En este capítulo se describe el trabajo realizado en relación a los ensayos de los cilindros de hormigón no confinado, incluyendo la descripción del montaje de ensayo, tipo de probeta, resultados obtenidos (curva tensión vs. deformación) y comparaciones con curvas propuestas en la literatura.

### **2.1 Descripciones Generales**

En esta sección se describen todos los aspectos relevantes, tales como, las probetas, equipo utilizado, montaje e instrumentación.

#### **2.1.1 Descripción Probetas y Equipo de Ensayo**

Se ensayaron 13 probetas cilíndricas de calidades H25 y 9 de calidad H30, cada una de 15cm de diámetro y 30cm de alto. Se recibieron para ser ensayadas en compresión, luego de los 28 días de fraguado y se mantuvieron en el laboratorio para el ensayo. Algunas de ellas se utilizaron para hacer pruebas preliminares de manera de poder determinar el montaje final, el cual entregó los resultados deseados sobre el comportamiento del hormigón.

Para realizar los ensayos de compresión de las probetas cilíndricas, se utilizó una máquina universal INSTRON de 60ton de capacidad. En particular, este equipo puede aplicar carga por medio de una deformación controlada, lo que permite observar la respuesta degradante del material hasta el nivel de pérdida de carga que se desee. En los ensayos realizados se consideró un nivel de degradación de 80% luego del cual el ensayo se terminó.

## 2.1.2 Montaje e Instrumentación

Para realizar las mediciones de deformación de los cilindros, se incorporó tanto instrumentación interna como externa. La *instrumentación interna* permitió obtener el comportamiento del hormigón en la zona de carga ascendente. Esta corresponde a los LVDT que se encuentran en el anillo alrededor del cilindro (Figura 2.1a) cubriendo la mitad del largo de la probeta. Los LVDT no son capaces de registrar el comportamiento de degradación del hormigón, producto que luego del agrietamiento los anillos tienden a desmontarse de la probeta, además de medir en una zona particular que no garantiza que corresponda a la zona dañada por degradación.

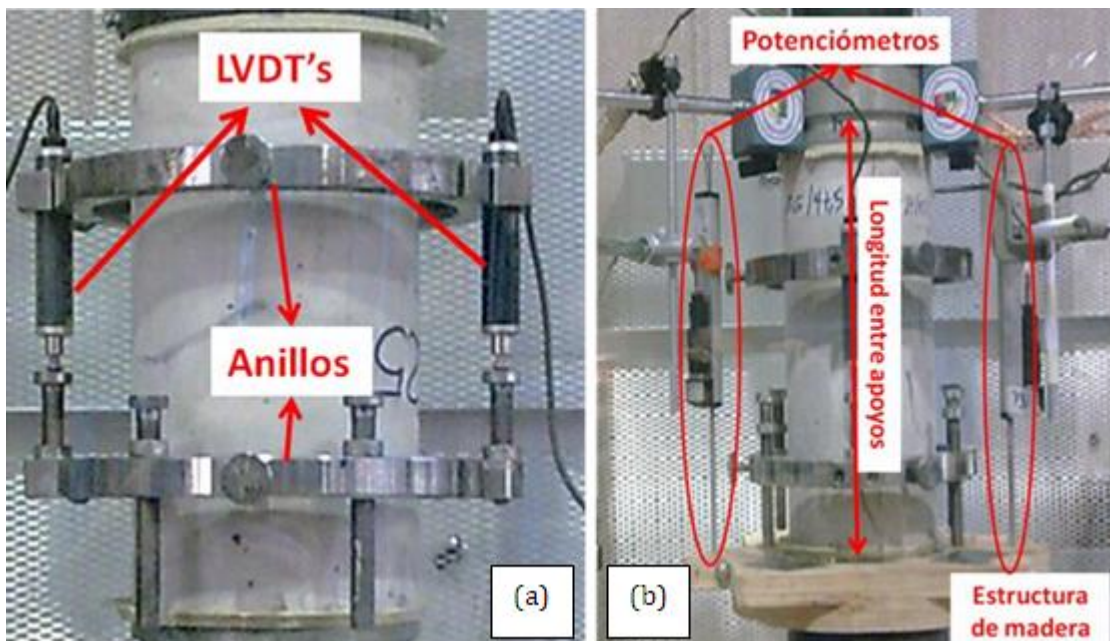


Figura 2.1 - Instrumentación (a) Interna (b) Externa

La *instrumentación externa* corresponde a la dispuesta fuera del cilindro, de manera tal que no se vea alterada luego de que éste comienza a agrietarse. Esta instrumentación, tiene como principal función describir de manera adecuada la degradación del hormigón (curva descendente). La instrumentación interna fue necesaria, ya que esta entrega una mayor precisión para determinar la rigidez inicial, así como eliminar desplazamientos asociados a ajustes de la probeta que no corresponden al acortamiento real del cilindro de hormigón. Luego de una serie de pruebas, para determinar el montaje de la instrumentación externa, se dispuso de una estructura de madera, para apoyar los potenciómetros, para que así se tuviera una mayor superficie de apoyo y una distancia acotada entre los apoyos de los potenciómetros, de tal manera de medir sólo la deformación del cilindro de hormigón (Figura 2.1b).



## 2.2 Resultados

En esta sección se muestran los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos realizados. En particular, se exponen las capacidades máximas de cada probeta, y se muestran los gráficos de tensión vs deformación, que permitieron calibrar las curvas según los modelos para hormigón no confinado.

### 2.2.1 Ensayos Hormigón No Confinado

En las Tabla 2.1 y 2.2 se muestran las máximas tensiones ( $f'_c$ ) y deformación unitaria en la tensión máxima ( $\epsilon_0$ ) para el hormigón de calidad H25 y H30, respectivamente.

Con el montaje final se realizaron un total de 17 ensayos, 10 de hormigón H25 y 7 de H30, para los que se obtuvo la curva tensión vs deformación. Cinco probetas se ensayaron con un montaje previo que no permitió determinar la curva completa, sin embargo, si se pudo determinar  $f'_c$  y  $\epsilon_0$ , los que se incluyen en las tablas.

Tabla 2.1 -  $f'_c$  y  $\epsilon_0$  para hormigón H25

Fecha ensayo (N° probeta)	maduración [días]	$f'_c$ [Mpa]	$\epsilon_0$	Observaciones
02-05-2011 (*)	28	19,48	0,0016	(*) probeta de prueba no considerada en análisis
09-05-2011 (1)	35	19,92	0,0018	Curva incompleta – montaje previo
16-05-2011 (2)	42	20,42	0,0014	Curva incompleta – montaje previo Rotación de anillos anticipada
17-05-2011 (3)	43	21,45	0,0018	Curva tensión vs. deformación determinada
17-05-2011 (4)	43	21,64	0,0018	
17-05-2011 (5)	43	20,94	0,0019	
18-05-2011 (6)	44	21,68	0,0019	
18-05-2011 (7)	44	20,73	0,0018	
18-05-2011 (8)	44	21,05	0,0018	
23-05-2011 (9)	49	20,92	0,0020	
23-05-2011 (10)	49	21,67	0,0017	
03-06-2011 (11)	60	22,61	0,0017	
03-06-2011 (12)	60	22,70	0,0020	

Tabla 2.2 -  $f'c$  y  $\epsilon_0$  para hormigón H30

fecha ensayo (rótulo)	maduración [días]	$f'c$ [Mpa]	$\epsilon_0$	Observaciones
02-05-2011 (**)	28	24,04	0,0021	(**) probeta de prueba no considerada en análisis
09-05-2011 (13)	35	23,61	0,0018	Curva incompleta – montaje previo
17-05-2011 (14)	43	25,05	0,0019	Curva tensión vs. deformación determinada
17-05-2011 (15)	43	25,27	0,0019	
18-05-2011 (16)	44	26,65	0,0020	
18-05-2011 (17)	44	26,54	0,0018	
18-05-2011 (18)	44	26,30	0,0020	
23-05-2011 (19)	49	26,77	0,0020	
03-06-2011 (20)	60	27,63	0,0019	

La curva tensión vs deformación se obtuvo combinando las mediciones de la instrumentación interna y externa. La curva ascendente se obtuvo con la instrumentación interna, mientras que la curva descendente se obtuvo con la instrumentación externa. En las Figura 2.2 y 2.3 se muestran las curvas combinadas (acopladas) para los hormigones de calidad H25 y H30.

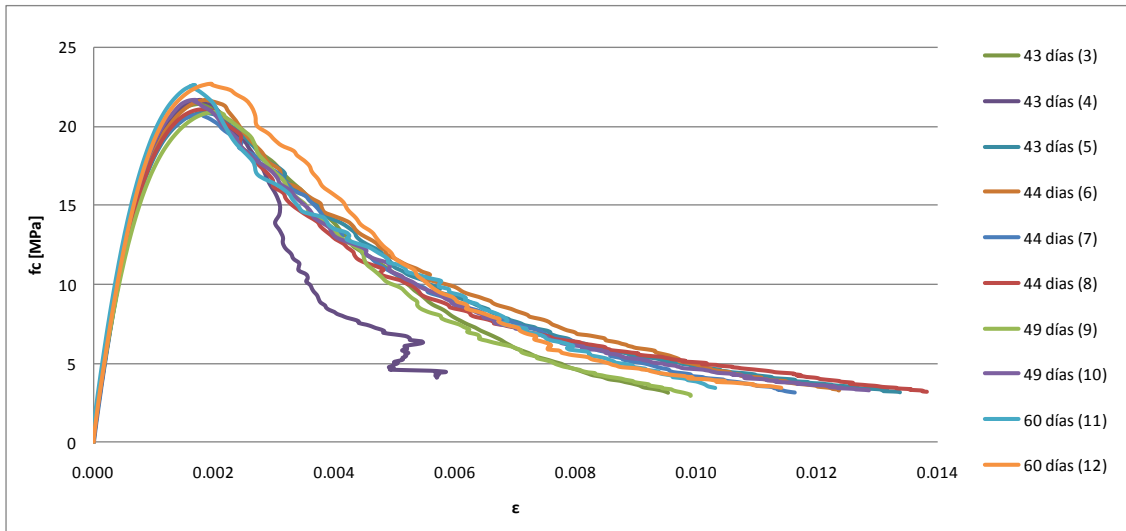


Figura 2.2 - Tensión vs Deformación unitaria (acoplada) para hormigón H25

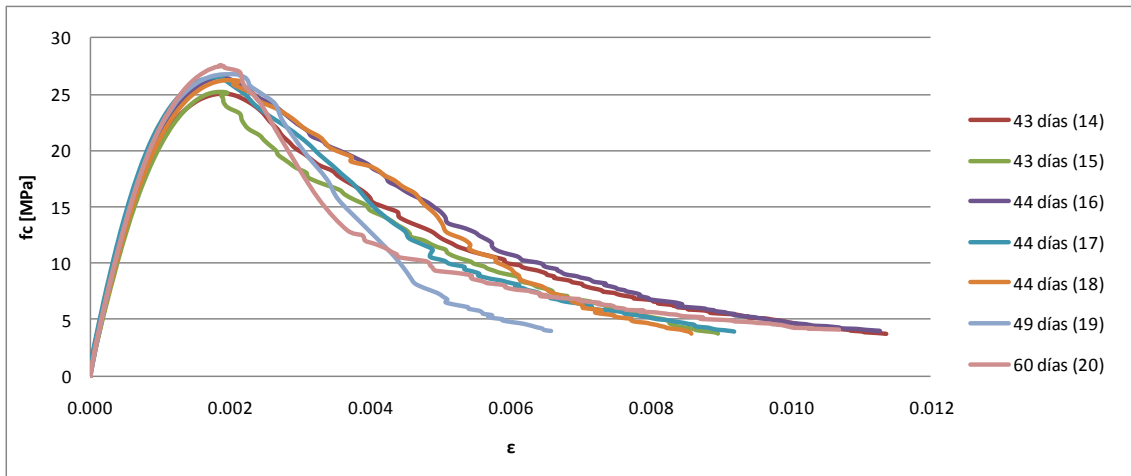


Figura 2.3 - Tensión vs Deformación unitaria (acoplada) para hormigón H30.

### 2.2.1.1 Calibración Curva de Ajuste y Comparación

Para efectos de calibración sólo se utilizaron las curvas de los cilindros ensayados entre 43 y 49 días para evitar incluir algunos casos que presentaron una tensión mayor al ser ensayados a los 60 días producto del endurecimiento. Además, se descartó la probeta No 4 que presentó un comportamiento anómalo en el descenso.

Se contrastaron los resultados experimentales (normalizados) con una curva teórica, minimizando el cuadrado de los errores para determinar los parámetros. La curva teórica utilizada, corresponde a una modificación de la curva propuesta por Popovics (1973), que tiene la siguiente forma:

$$\frac{f_c}{f'_c} = \frac{r * \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right)}{r - 1 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right)^{r*k}} \quad (2.1)$$

Se consideró utilizar un valor de  $k = 1.0$  en la zona ascendente. Realizando el proceso descrito, los valores obtenidos para  $r$  y  $k$ , tanto para H25 como H30 son los que se muestran a continuación.

- **Para H25:**  $k = 1.0, r = 1.92$  para  $0 \leq \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \leq 1$   
 $k = 1.21, r = 1.92$  para  $1 < \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}$
- **Para H30:**  $k = 1.0, r = 1.92$  para  $0 \leq \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \leq 1$   
 $k = 1.27, r = 1.92$  para  $1 < \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}$

Con los parámetros ya calibrados, en la Figura 2.4 se muestra la curva obtenida para el hormigón H25 y en la Figura 2.5 se muestra para el hormigón H30. Además, se obtuvo que el módulo de elasticidad del hormigón ensayado, calculado como la secante al 50% de  $f'_c$ , se ajusta a la siguiente expresión:

$$E_c = 4300\sqrt{f'_c} = 19230 \text{ [MPa]} \quad \text{PARA H25}$$

$$E_c = 4810\sqrt{f'_c} = 24050 \text{ [MPa]} \quad \text{PARA H30}$$

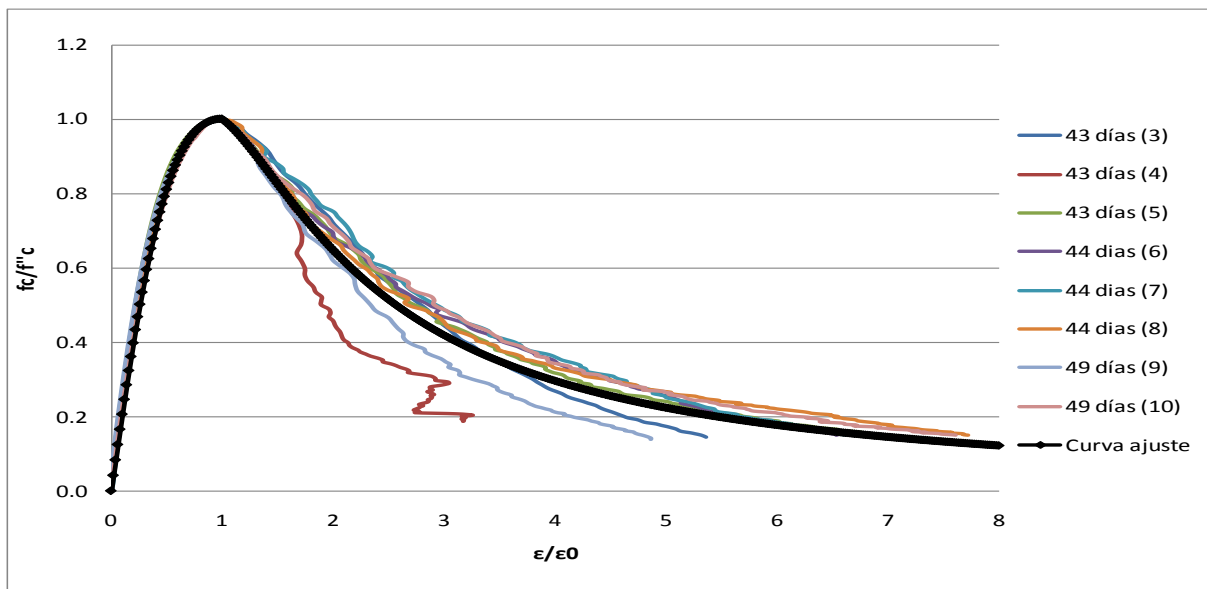


Figura 2.4- Curva calibrada y resultados experimentales para H25

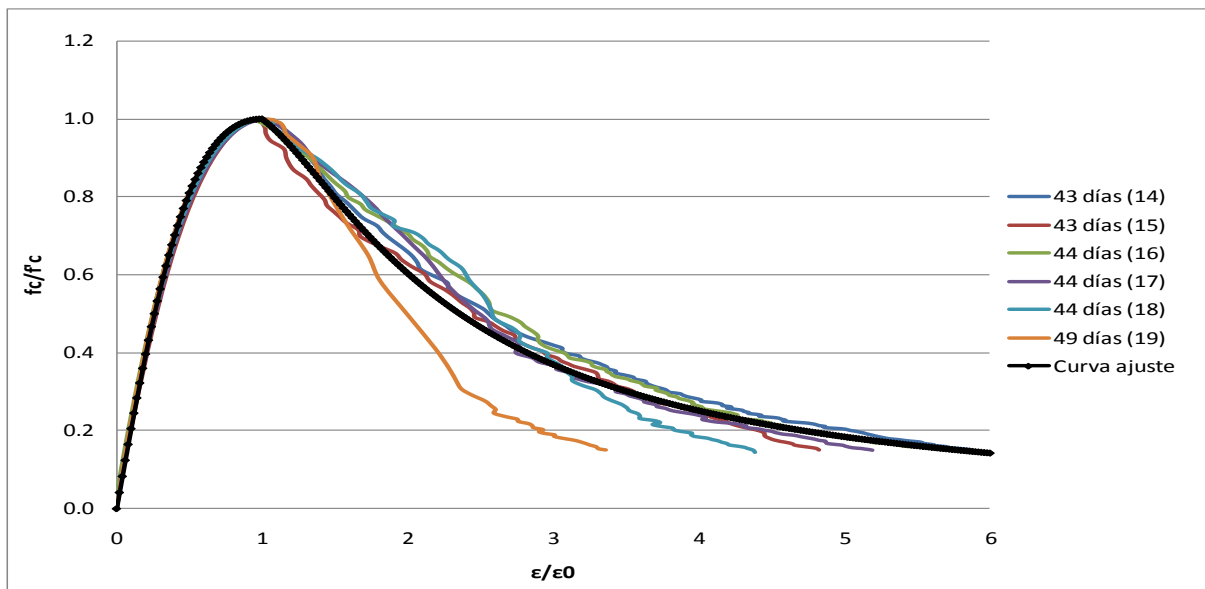


Figura 2.5 - Curva calibrada y resultados experimentales para H30

La curva ya calibrada para los valores experimentales se compara con las curvas mostradas por otros autores, como la de Collins y Porasz (1989), propuesta para hormigones de alta resistencia. Carreira y Kuang-Han (1985), propusieron diferentes parámetros para hormigones normales.

**Collins y Porasz (1989)**

$$k = 1.0, r = 0.8 + \frac{f_c(MPa)}{17} \text{ para } 0 \leq \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \leq 1$$

$$k = 0.67 + \frac{f_c(MPa)}{67}, r = 0.8 + \frac{f_c(MPa)}{17} \text{ para } 1 < \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0}$$

**Carreira y Kuang-Han (1985)**

$$k = 1.0, r = 1.55 + \left(\frac{f_c(MPa)}{32.4}\right)^3 \text{ para } 0 \leq \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0}$$

En la Figura 2.6 se realiza la comparación para el hormigón H25, mientras que en la Figura 2.7 se hace para el H30.

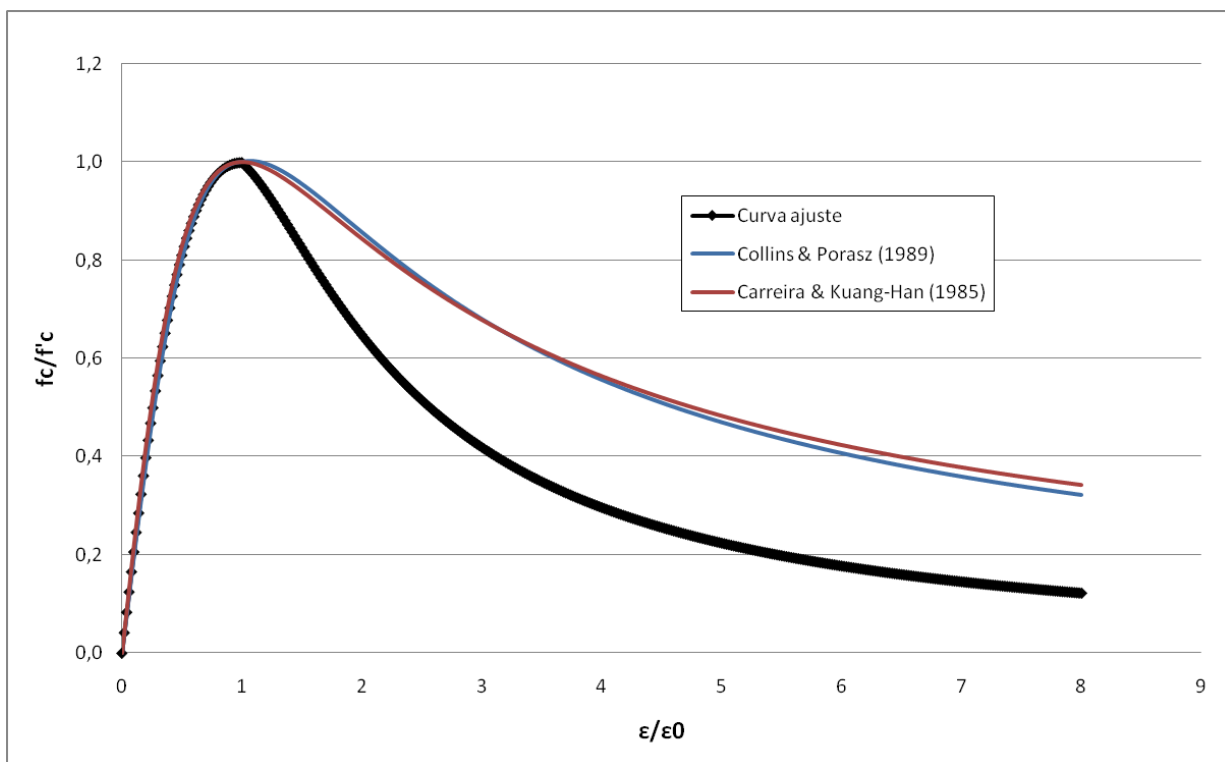


Figura 2.6 - Comparación para H25

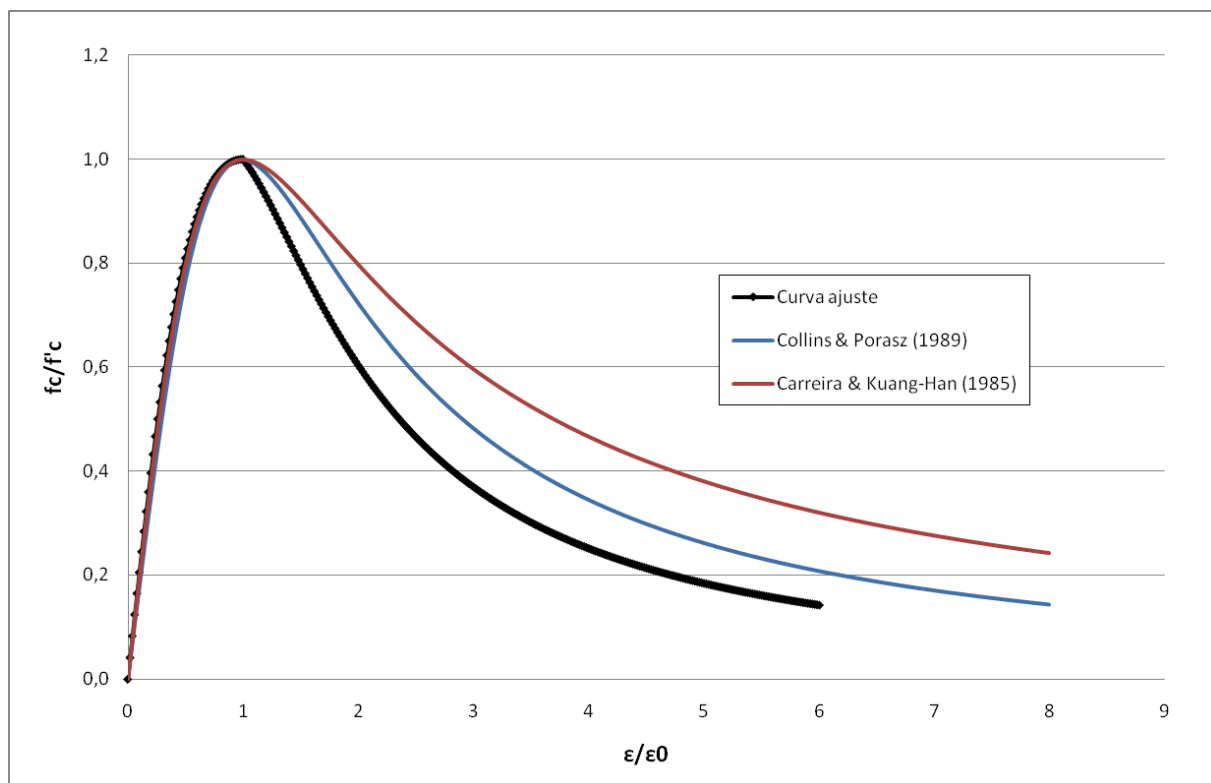


Figura 2.7 - Comparación para H30

Observando las Figura 2.6 y 2.7, se establece que los hormigones ensayados para la determinación de la ley constitutiva, presentan una degradación mayor que los modelos propuestos por la literatura. Para el hormigón H25, la degradación es alrededor de un 25% mayor al 80% de la capacidad, mientras que para un H30 la degradación sigue siendo mayor, pero presenta una concordancia mayor con lo propuesto por Collins y Porasz.

### 2.2.2 Ensayos Acero a Tracción

Los ensayos de barras de acero a tracción, fueron realizadas por el IDIEM según los requerimientos exigidos en las normas chilenas. Se realizaron ensayos para los diferentes diámetros y calidades de acero que se utilizaron en los ensayos de los elementos de borde muro.

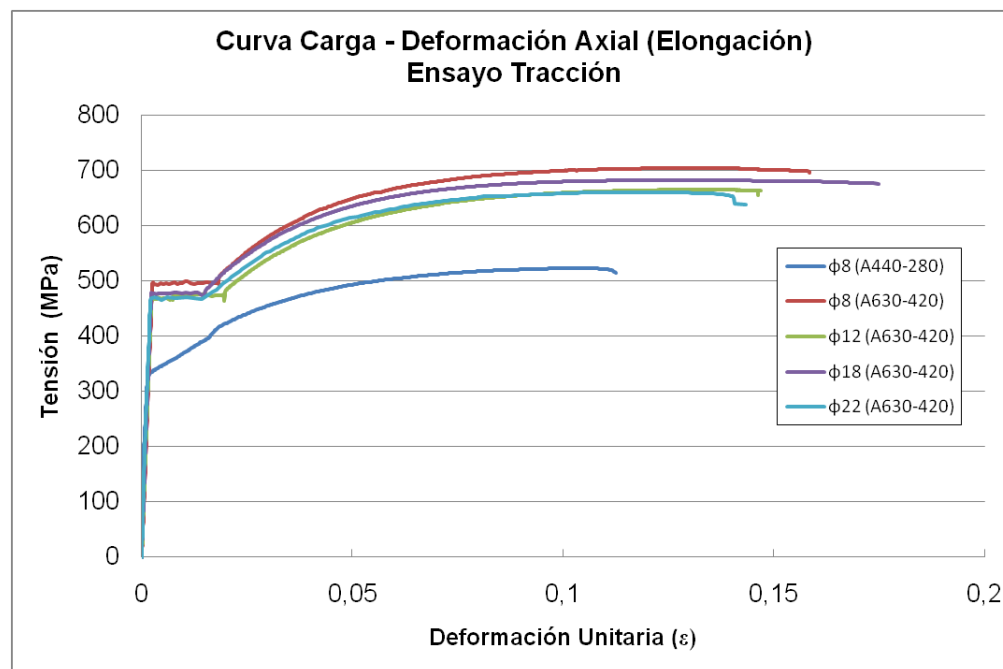


Figura 2.8 - Comportamiento tracción barras ensayadas

Dentro de los ensayos realizados, se determinó extraer los valores más relevantes de los diámetros y calidades que se desea conocer, es decir,  $\Phi 8$  de calidad A440-280 y A630-420 y  $\Phi 18$  de calidad A630-420. Las barras de diámetro 8 mm serán utilizadas en los estribos y las de 18 mm en las barras longitudinales, de las probetas de borde muro.

En la Tabla 2.3 se muestran solo las tensiones de fluencia de las barras  $\Phi 8$  de calidad A440-280 y A630-420, ya que sólo este dato es necesario en los estribos, mientras que en la Tabla 2.4 se detallan todos los valores relevantes de la curva en tracción de las barras  $\Phi 18$  de calidad A630-420.

Tabla 2.3 - $f_y$  de barras  $\Phi 8$ , A440-280 y A630-420

<i>Fluencia A440-280 [MPa]</i>	<i>Fluencia A630-440 [MPa]</i>
330	495

Tabla 2.4-Valores  $\Phi 12$  A630-420

<b><math>f_y</math> [Mpa]</b>	477
<b><math>\epsilon_y</math></b>	0,0024
<b>Es [Mpa]</b>	200000
<b>esh</b>	0,0151
<b>fu [Mpa]</b>	682
<b>eu</b>	0,1227

Puesto que para poder modelar el comportamiento de los elementos de borde muro, solo es necesario conocer el comportamiento completo de las barras longitudinales, es decir, tanto la parte lineal elástica como la de endurecimiento, se utilizó el modelo mostrado en Dhakal y Maekawa (2002), que consiste en un rango elástico, seguido por un plató de fluencia y una zona endurecimiento. En el documento no se especifica el comportamiento posterior al llegar a la capacidad mayor, por lo que se consideró un valor constante igual a  $f_u$ . En la Figura 2.9 se muestra un esquema del acero en tracción. En ella se observa a que parte de la curva corresponden cada uno de los valores mostrados en la Tabla 2.4.



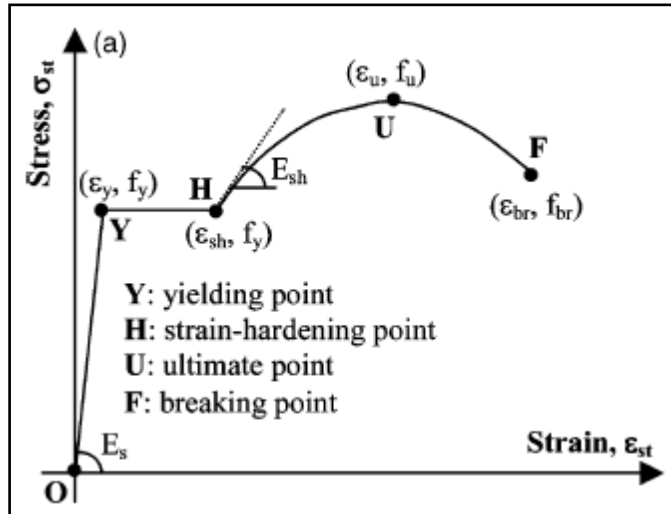


Figura 2.9-Esquema comportamiento acero en tracción (Dhakal y Maekawa, 2002)

$$f_t = \begin{cases} E_s \varepsilon_t & \text{si } \varepsilon_t < \varepsilon_y \\ f_y & \text{si } \varepsilon_y < \varepsilon_t \leq \varepsilon_{sh} \\ f_u + (f_y - f_u) \left( \frac{\varepsilon_u - \varepsilon_t}{\varepsilon_u - \varepsilon_{sh}} \right)^P & \text{si } \varepsilon_{sh} < \varepsilon_t \leq \varepsilon_u \end{cases} \quad (2.2)$$

Donde:

$$P = E_{sh} \left( \frac{\varepsilon_u - \varepsilon_{sh}}{f_u - f_y} \right)$$

Ahora bien, según los ensayos de barra realizados por IDIEM, se observó que la expresión para representar el parámetro P no lograba ajustar la curva a las ensayados, por lo que se ajustó el valor tal que las curvas tuvieran un igual comportamiento. Este valor es **P=4**. Como sólo se desea el comportamiento en tracción completo de las barras  $\Phi 18$  (A630-420), en la Figura 2.10 se muestra la comparación de los ensayos con el modelo descrito.

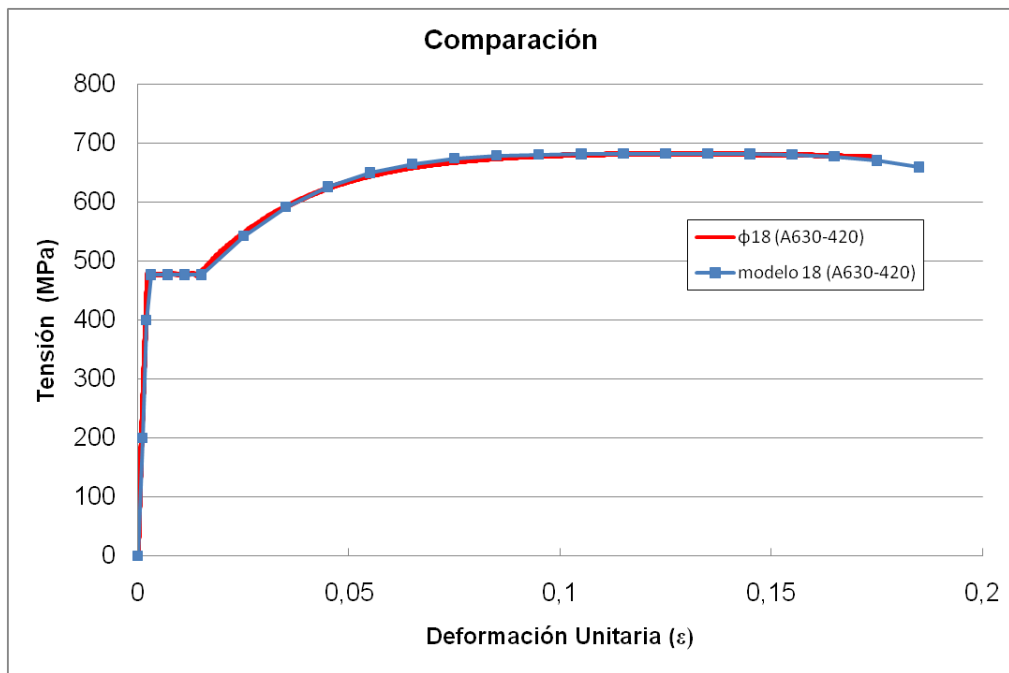


Figura 2.10 -Comparación ensayo con modelo de Dhakal y Maekawa (2002)

## Capitulo 3: **DESCRIPCIÓN ELEMENTOS DE BORDE MURO CONFINADOS**

Para efecto de representar, parcialmente, la respuesta de extremos de muros en compresión, se ensayaron probetas a escala de elementos de borde de muro de hormigón armado. Las probetas presentan diferentes configuraciones, de manera de establecer comparaciones entre cada una de ellas.

Para acotar y lograr generar las longitudes de desarrollo de las barras longitudinales, se establece una zona central de la probeta donde se espera ocurra el mayor daño. En dicha zona central, se modifican las diferentes configuraciones, manteniendo un confinamiento constante fuera de ella (en los extremos).

En este capítulo se describen cada una de las 24 probetas, de las que sólo se ensayaron 10 para efecto de esta memoria, detallando el tipo de ensayo, la instrumentación a utilizar, el montaje y el proceso constructivo. Además, a manera de tener modelos de comparación de resultados, se generan las respuestas esperadas de cada una de las probetas, para luego contrastarlas con los resultados experimentales obtenidos.

### **3.1 Descripción Modelos**

Mediante la utilización de modelos analíticos del comportamiento del hormigón no confinado, confinado y del acero, se quiere obtener un comportamiento esperado de cada una de las probetas, para así luego compararlo con los resultados experimentales. En esta sección se describe el comportamiento en compresión y medio ciclo de tracción-compresión para el hormigón y el acero.

#### **3.1.1 Hormigón a Compresión**

En esta sección se describirá el comportamiento del hormigón y acero, en un estado de carga de compresión pura, mostrando cada uno de los modelos de la literatura que se desean comparar.

### 3.1.1.1 Hormigón no Confinado

El modelo para el hormigón no confinado, será el obtenido con los ensayos de las probetas cilíndricas, descrito en la sección 2.2. En la Figura 3.1, se muestra el comportamiento tensión-deformación del hormigón no confinado.

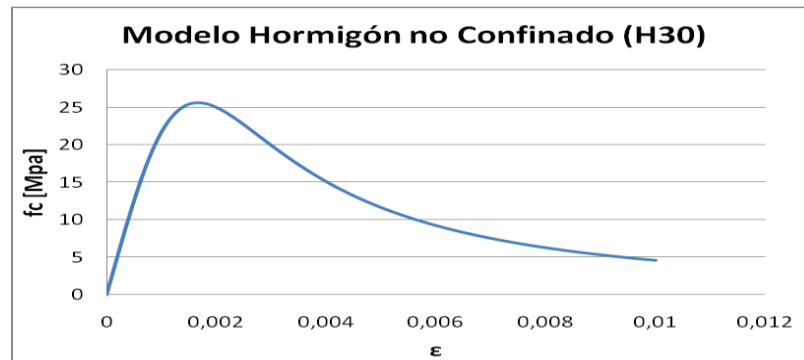


Figura 3.1-Modelo hormigón no confinado de calidad H30

### 3.1.1.2 Hormigón Confinado

Se consideraron tres modelos para el hormigón confinado, los cuales presentan formas y ciertas consideraciones diferentes, de manera de poder tener contraste entre modelos que difieran. Además, sólo se mostrará la aplicación de los modelos para secciones rectangulares.

El confinamiento del hormigón se logra mediante el armado de éste en la dirección transversal, utilizando estribos y/o ganchos. En términos generales, los modelos consideran una presión lateral de confinamiento otorgada por estos elementos, lo que demoran la expansión del hormigón, mejorando su capacidad de carga y deformación.

#### 3.1.1.2.1 Mander, Priestley y Park (1988)

La relación entre tensión y deformación, propuesta por Mander et. al. 1988 para definir el comportamiento del hormigón confinado, se basa en la ecuación presentada por Popovics (1973). La siguiente ecuación describe la relación entre la tensión y la deformación asociada a ésta.

$$f_{cc}(\varepsilon_{cc}) = \frac{f'_{cc} r \left( \frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon'_{cc}} \right)}{r - 1 + \left( \frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon'_{cc}} \right)^r} \quad (3.1)$$

Donde:

$$\varepsilon'_{cc} = \varepsilon'_{c0} \left[ 1 + 5 \left( \frac{f'_{cc}}{f'_{c0}} - 1 \right) \right]$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}}$$

$$E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\varepsilon'_{cc}}$$

Donde  $f'_{cc}$  y  $\varepsilon'_{cc}$  corresponden a la capacidad máxima del hormigón confinado y la deformación asociada a ésta, respectivamente,  $f'_{c0}$  y  $\varepsilon'_{c0}$  son la capacidad máxima del hormigón no confinado y la deformación asociada a ésta y  $E_c$  es el módulo de elasticidad del hormigón no confinado (sección 2.2.1.1).

Para calcular la capacidad máxima del hormigón confinado, éste modelo considera una zona central efectiva de confinamiento, y da expresiones para poder calcularla. En particular asume un confinamiento efectivo en la altura y en la sección con formas parabólicas con ángulos iniciales de 45° como se observa en la Figura 3.2. En ella se observa, esquemáticamente, el núcleo efectivo de confinamiento y que considera la dimensión del núcleo total entre los centros de los estribos.

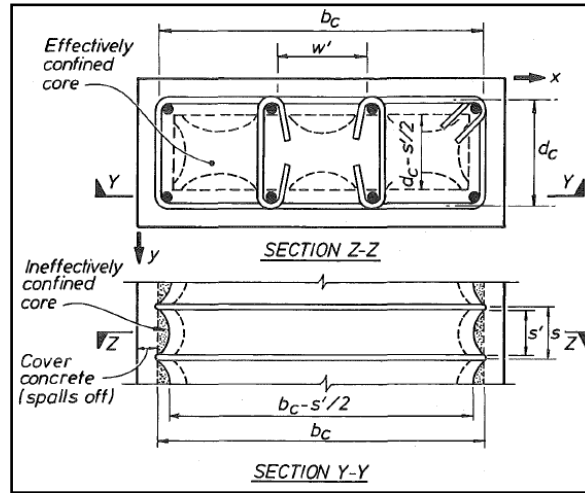


Figura 3.2- Núcleo efectivo de confinamiento en secciones rectangulares (Mander et. al., 1988)

Por lo tanto, el área efectiva de confinamiento, se obtiene descontando el área de las parábolas contenidas en la zona de inefectividad del hormigón confinado. Así, para una parábola, el área inefectiva corresponde a  $(w'_i)^2/6$ , donde  $(w'_i)$  es la  $i$ -ésima distancia libre entre barras longitudinales amarradas.

Ahora, si incorporamos la influencia de las áreas inefectivas en elevación (Figura 3.2), el área efectiva de confinamiento tiene la siguiente expresión,

$$A_e = \left( b_c d_c - \sum_{i=1}^n \frac{(w'_i)^2}{6} \right) \left( 1 - \frac{s'}{2b_c} \right) \left( 1 - \frac{s'}{2d_c} \right) \quad (3.2)$$

Donde,  $b_c$  y  $d_c$  son las dimensiones del núcleo entre los ejes centrales de los estribos en la dirección  $x$  e  $y$ , respectivamente ( $b_c \geq d_c$ ) y  $n$  es el número total de barras longitudinales amarradas.

El modelo define el coeficiente de efectividad del confinamiento como la razón entre el área efectiva de confinamiento y el área total del núcleo del hormigón, descontando al área de las barras longitudinales, resultando en,

$$k_e = \frac{A_e}{(b_c d_c - A_{long})}$$

$$= \frac{\left(1 - \sum_{i=1}^n \frac{(w'_i)^2}{6b_c d_c}\right) \left(1 - \frac{s'}{2b_c}\right) \left(1 - \frac{s'}{2d_c}\right)}{(1 - \rho_{cc})} \quad (3. \text{¡ Error! Marcador no definido.})$$

Definiendo  $A_{sx}$  y  $A_{sy}$  como la armadura de los estribos en la dirección x e y, respectivamente, las tensiones laterales efectivas se expresan de la siguiente forma ( $f_{yh}$  corresponde a la tensión de fluencia de la armadura transversal).

$$f'_{lx} = k_e \frac{A_{sx}}{sb_c} f_{yh} = k_e \rho_x f_{yh} \quad (3.4)$$

$$f'_{ly} = k_e \frac{A_{sy}}{sd_c} f_{yh} = k_e \rho_y f_{yh} \quad (3.5)$$

La capacidad máxima del hormigón confinado viene dada por,

$$f'_{cc} = f'_{c0} \left[ 1 + A\bar{x} \left( 0,1 + \frac{0,9}{1 + B\bar{x}} \right) \right] \quad (3.6)$$

Donde:

$$\bar{r} = \frac{f'_{lx}}{f'_{ly}}$$

$$\bar{x} = \frac{f'_{lx} + f'_{ly}}{2f'_{c0}}$$

$$A = 6,8886 - (0,6069 + 17,275\bar{r})e^{-4,989\bar{r}}$$

$$B = \frac{4,5}{\frac{5}{A}(0,9849 - 0,6306e^{-3,8939\bar{r}}) - 0,1} - 5$$

A modo de ejemplo, en la Figura 3.3 se ilustra la implementación del modelo propuesto para un confinamiento tipo A, con un espaciamiento de 100 mm y en una sección de 180 mm de ancho por 300mm de largo.

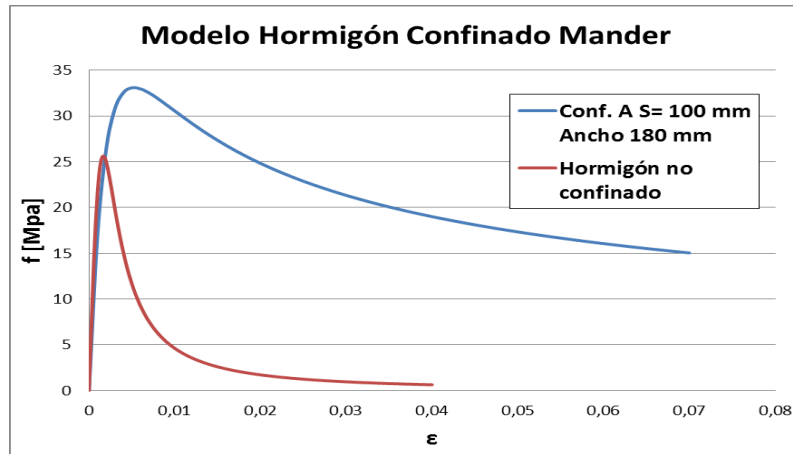


Figura 3.3-Ejemplo modelo Mander para confinamiento tipo A

### 3.1.1.2.2 *Saatcioglu y Razvi (1992)*

El modelo propuesto por estos autores, consiste en un tramo inicial ascendente con forma parabólica hasta el peak de la capacidad, seguido de un descenso lineal hasta una capacidad residual de 20% de la resistencia máxima. Se base, al igual que el anterior, en el cálculo de la presión lateral de confinamiento generada por la armadura transversal, lo que resulta en un aumento en la capacidad y ductilidad del material. En la Figura 3.4 se muestra un esquema del modelo.

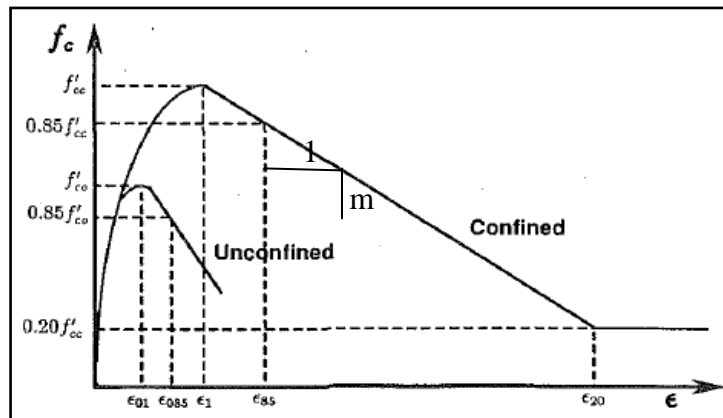


Figura 3.4- Forma estándar modelo hormigón confinado Saatcioglu y Razvi (Saatcioglu y Razvi. 1992)



La curva ascendente queda descrita por la expresión,

$$f_{cc}(\varepsilon_{cc}) = f'_{cc} \left[ 2 \left( \frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon'_{cc}} \right) - \left( \frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon'_{cc}} \right)^2 \right]^{1/(1+2K)} \quad (3.7)$$

Donde,  $f'_{cc}$  y  $\varepsilon'_{cc}$  corresponden a la tensión máxima del hormigón confinado y la deformación asociada a ésta, respectivamente. K es una constante que depende del nivel de confinamiento dado.

El modelo propuesto por Saatcioglu y Razvi(1992), al igual que el de Mander et. al. 1988, establece una presión equivalente lateral de confinamiento para secciones rectangulares, puesto que al tener estribos y ganchos no circulares, las distribuciones de tensiones, tanto en la sección como en altura, tienden a no ser uniformes. En la Figura 3.5 se muestra una ilustración de cómo se pueden distribuir las tensiones en los estribos.

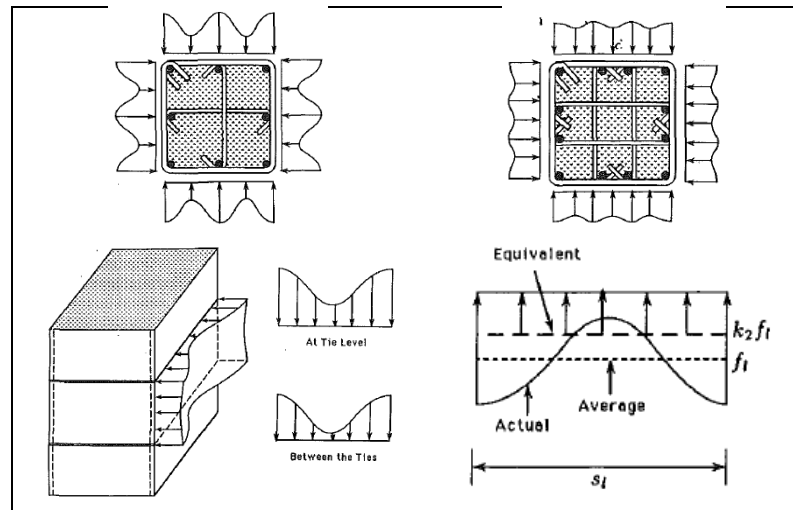


Figura 3.5- Ilustración de la distribución de tensiones de confinamiento (Saatcioglu y Razvi 1992)

Como se observa en la Figura 3.5, y producto que se tiene una rigidez mayor, en los bordes de los estribos y en las barras que se encuentran amarradas con ganchos, se generan mayores tensiones, mientras que en los centros de los vanos entre barras las tensiones disminuyen considerablemente producto que el estribo entre esos apoyos es más flexible. Lo mismo se puede

observar entre los espaciamientos en altura de los estribos, donde la presión de confinamiento entre apoyos es menor que en éstos.

La capacidad de hormigón confinado  $f'_{cc}$  queda definida por la expresión,

$$f'_{cc} = f'_{c0} + k_1 f_{le} \quad (3.1 \text{ Error! Marcador no definido.})$$

Donde  $f'_{c0}$  corresponde a la capacidad máxima del hormigón no confinado,

$$f_{le} = \frac{b_{cx} f_{lex} + b_{cy} f_{ley}}{b_{cx} + b_{cy}} \quad (3.9)$$

$$k_1 = 6,7(f_{le})^{-0,17} \quad (3.10)$$

Y  $b_{ci}$  como la distancia centro a centro de estribos en la dirección  $i$  (x o y) y  $A_{si}$  como la armadura transversal total en la dirección  $i$  (x o y).

Por lo tanto, solo bastaría con definir los parámetros  $f_{lex}$  y  $f_{ley}$ , que corresponden a las tensiones equivalentes de confinamiento en cada una de las direcciones ortogonales de la sección (x e y). Las siguientes expresiones serán definidas con un sub índice “i”, que podrá representar una de las direcciones ortogonales, x o y.

$$f_{lei} = k_{2i} f_{li} \quad (3.1 \text{ Error! Marcador no definido.})$$

Donde:

$$f_{li} = \frac{A_{si} f_y}{S b_{ci}}$$

$$k_{2i} = 0,26 \sqrt{\left(\frac{b_{ci}}{S}\right) \left(\frac{b_{ci}}{S_{li}}\right) \left(\frac{1}{f_{li}}\right)}$$

S corresponde al espaciamiento ente estribos, y  $S_{li}$ , la distancia entre dos barras amarradas en la sección.

Por otro lado, la deformación al máximo de capacidad del hormigón confinado es definida como,

$$\varepsilon'_{cc} = \varepsilon'_{c0}(1 + 5K) \quad (3. \text{¡Error! Marcador no definido.})$$

Donde  $\varepsilon'_{c0}$  corresponde a la deformación unitaria asociada a la capacidad máxima del hormigón no confinado (alrededor de 0,002) y:

$$K = \frac{k_1 f_{le}}{f'_{c0}}$$

La brecha descendente es definida mediante una recta, la cual se determina a partir del cálculo de la deformación asociada a un decaimiento del 15%. La siguiente expresión define la deformación asociada cuando ya se ha llegado a un 15% de degradación de la capacidad del hormigón confinado.

$$\varepsilon_{85} = 260\rho\varepsilon'_{cc} + \varepsilon_{085} \quad (3.13)$$

Donde  $\varepsilon_{085}$  corresponde a la deformación del hormigón no confinado cuando la capacidad de éste ya ha degradado un 15%, y:

$$\rho = \frac{A_{sx} + A_{sy}}{S(b_{cx} + b_{cy})}$$

Considerando un descenso lineal con tensión residual al 20% $f'_{cc}$ , la deformación queda definida por,

$$\varepsilon_{20} = \frac{0,2f'_{cc} - n}{m} \quad (3.14)$$

Donde,

$$m = \frac{f'_{cc} - 0,85f'_{cc}}{\varepsilon'_{cc} - \varepsilon_{85}}$$

$$n = f'_{cc} - m\varepsilon'_{cc}$$

A modo de ejemplo, en la Figura 3.6 se ilustra la implementación del modelo propuesto por Saatcioglu y Razvi para un confinamiento tipo A (Figura 3.23), con un espaciamiento de 100 mm y en una sección de 180 mm de ancho por 300 de largo.

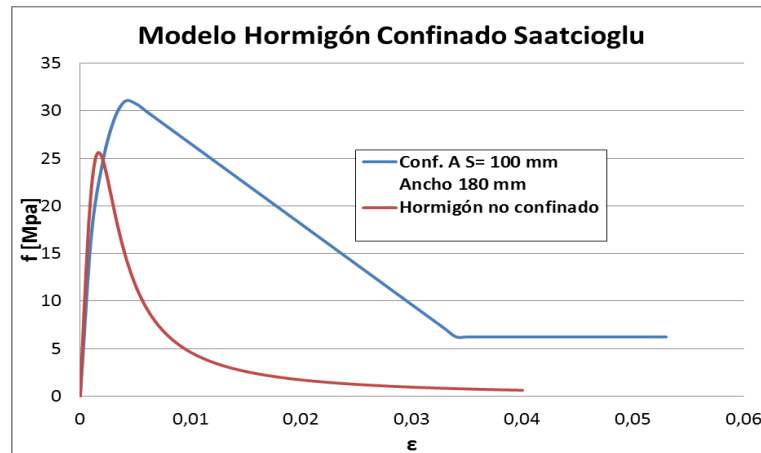


Figura 3.6-Ejemplo modelo Saatcioglu y Razvi para confinamiento tipo A

### 3.1.1.2.3 Legeron y Paultre (2003)

Este nuevo modelo presenta un confinamiento basado en la compatibilidad de deformaciones y en el equilibrio de fuerzas transversales. Este modelo fue desarrollado para hormigón armado con acero de alta resistencia. Este modelo, a diferencia de los otros, no considera como una hipótesis inicial, que la armadura transversal fluya cuando el hormigón confinado llegue a su peak de capacidad, sino que el nivel de tensión que desarrollen dependerá del nivel de confinamiento que se le dé a la sección.

Este modelo consta de una curva ascendente con la forma propuesta por Popovics (1973), al igual que el propuesto por Mander et. al, pero con una curva descendente que corresponde a una modificación de lo propuesto por Fafitis and Shah(1985). Este modelo queda representado por las siguientes expresiones.

$$f_{cc}(\varepsilon_{cc}) = \begin{cases} f'_{cc} \left[ \frac{k(\varepsilon_{cc}/\varepsilon'_{cc})}{k-1 + (\varepsilon_{cc}/\varepsilon'_{cc})^k} \right] & \text{si } \varepsilon_{cc} \leq \varepsilon'_{cc} \\ f'_{cc} \exp(k_1(\varepsilon_{cc} - \varepsilon'_{cc})^{k_2}) & \text{si } \varepsilon_{cc} > \varepsilon'_{cc} \end{cases} \quad (3.15)$$

Donde:

$$k = \frac{E_c}{E_c - (f'_{cc}/\varepsilon'_{cc})}$$

$$k_1 = \frac{\ln(0,5)}{(\varepsilon_{cc50} - \varepsilon'_{cc})^{k_2}}$$

$$k_2 = 1 + 25 \left( \rho_{se} \frac{fy}{f'_c} \right)^2$$

Los parámetros  $k$ ,  $k_1$  y  $k_2$  controlan la forma de la curva ascendente y descendente respectivamente.  $E_c$  es el módulo de elasticidad del hormigón no confinado el cual tiene el valor presentado en la sección 2.2.2.  $f'_{cc}$ ,  $\varepsilon'_{cc}$  y  $\varepsilon_{cc50}$  corresponden al peak de capacidad, la deformación asociada a él y la deformación luego de un 50% de degradación del hormigón confinado, respectivamente.

Al igual que para el modelo propuesto por Mander, el cálculo de la capacidad máxima de éste, se determina con el coeficiente de efectividad de confinamiento.

$$k_e = \frac{A_e}{(b_x b_y - A_{long})} = \frac{\left(1 - \sum_{i=1}^n \frac{(w'_i)^2}{6b_x b_y}\right) \left(1 - \frac{s'}{2b_x}\right) \left(1 - \frac{s'}{2b_y}\right)}{(1 - \rho_{cc})} \quad (3.16)$$

$$f_{le} = \rho_{se} f_h \text{ con } \rho_{se} = \left(\frac{k_e}{S}\right) \left(\frac{A_{sx} + A_{sy}}{b_x + b_y}\right) \quad (3.17)$$

Donde  $f_h$  corresponde a la tensión que presentan los estribos en el peak de capacidad, que está relacionado con el nivel de carga axial del hormigón confinado y el módulo de poisson de éste.  $f_{le}$  es la presión efectiva de confinamiento. La relación de compatibilidad de deformaciones transversales propuesta por Legeron y Paultre es la que se muestra en la siguiente expresión. Con dicha deformación eventualmente se puede calcular la tensión de la armadura transversal considerando que el comportamiento del acero, es elasto-plástico perfecto.

$$\varepsilon_h = \nu_{cc} \varepsilon_{cc} - \frac{(1 - \nu_{cc}) f_{le}}{E_{cc}} \quad (3.18)$$

Mediante la expresión anterior, el cálculo de la tensión en la armadura transversal se debe realizar mediante un proceso iterativo. Por esto los autores de este modelo establecieron expresiones simplificadas que logran determinar  $f_h$ , calibrado experimentalmente. De esta manera, el cálculo de la tensión en la armadura transversal queda determinado por,

$$f_h = \begin{cases} fy & si \kappa \leq 10 \\ \frac{0,25f'_c}{\rho_{se}(\kappa - 10)} \geq 0,43\varepsilon'_c E_s \neq fy & si \kappa > 10 \end{cases} \quad (3.19)$$

Donde:

$$\kappa = \frac{f'_c}{\rho_{se} E_s \varepsilon'_c}$$

Luego, el peak el hormigón confinado, la deformación asociada a él y la deformación al 50% de degradación, quedan determinados por las siguientes expresiones.

$$f'_{cc} = f'_c \left( 1 + 2,4 \left( \frac{f_{le}}{f'_c} \right)^{0,7} \right) \quad (3.20)$$

$$\varepsilon'_{cc} = \varepsilon'_c \left( 1 + 35 \left( \frac{f_{le}}{f'_c} \right)^{1,2} \right) \quad (3.21)$$

$$\varepsilon_{cc50} = \varepsilon_{c50u} \left( 1 + 60 \left( \rho_{se} \frac{f_y}{f'_c} \right) \right) \quad (3.22)$$

La Figura 3.7 muestra un esquema del modelo.

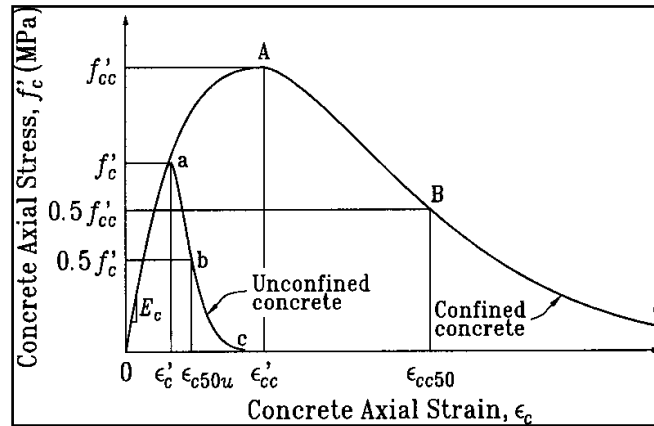


Figura 3.7 - Esquema relación tensión – deformación hormigón confinado y no confinado (Legeron y Paultre, 2003)

A modo de ejemplo, en la Figura 3.8 se ilustra la implementación del modelo propuesto por Legeron y Paultre para un confinamiento tipo A (Figura 3.23), con un espaciamiento de 100 mm y en una sección de 180 mm de ancho por 300 mm de largo.

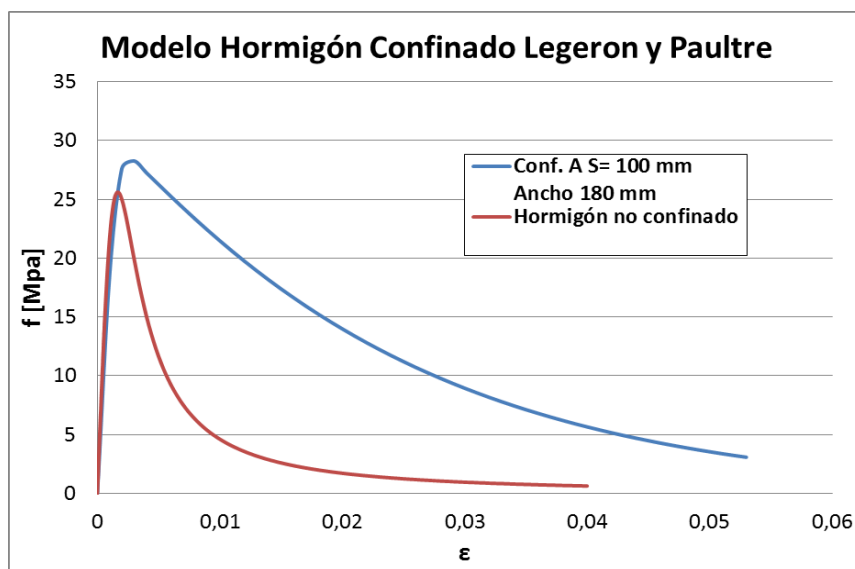


Figura 3.8-Ejemplo modelo Legeron y Paultre para confinamiento tipo A

### 3.1.2 Hormigón a Tracción-Compresión

En esta sección, se describe el comportamiento para un estado de carga de medio ciclo de tracción-compresión. Se detalla un modelo de cierre de grietas que luego se acopla con el comportamiento estándar del hormigón.

Producto que se desea describir el comportamiento de medio ciclo de tracción-compresión, se debe tener primero el detalle del modelo del hormigón en tracción. La forma de la curva está basada en la ecuación de Popovics (1973), pero modificada por la ecuación de Tsai que es más general y flexible (Chang & Mander, 1994). La deformación de rotura a tracción es  $\varepsilon_r = 0.00008$  (Belardi & Thomas, 1994) y la tensión asociada  $f_r [MPa] = 0.33\sqrt{f_c [MPa]}$  (Collins & Mitchell, 1991). El valor de la rigidez es el obtenido en los ensayos de compresión ( $E_c = 4810\sqrt{f_c [MPa]}$ ). La curva queda definida como,

$$f_t(\varepsilon_t) = f_r \left[ \frac{n \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_r}}{\left( 1 + \left( n - \frac{r_t}{r_t-1} \right) \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_r} + \frac{\left( \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_r} \right)^{r_t}}{r_t-1} \right)} \right] \quad (3.23)$$

$$n = E_c \left( \frac{\varepsilon_r}{f_r} \right)$$

El valor  $r_t$  fue considerado igual a 1.5, siendo éste el que otorga la forma a la curva descendente. En la Figura 3.9 se muestra el modelo del hormigón traccionado, en la cual se puede apreciar que su comportamiento es totalmente frágil y de muy baja resistencia y capacidad de deformación. Además, es necesario mencionar que la tracción será considerada negativa para el modelo de cierre de grietas del hormigón.





curvas mostradas (representadas con 1, 2 y 3 entre círculos). Para la representación de las curvas, se establece una ecuación de forma común, con variación de parámetros según el tramo.

$$f_c(\varepsilon_c) = f_I + (\varepsilon_c - \varepsilon_I)[E_I + A|\varepsilon_c - \varepsilon_I|^R] \quad (3.24)$$

Donde:

$$E_{sec} = \frac{f_F - f_I}{\varepsilon_F - \varepsilon_I}$$

$$R = \frac{E_F - E_{sec}}{E_{sec} - E_I}$$

$$A = \frac{E_{sec} - E_I}{|\varepsilon_F - \varepsilon_I|^R}$$

En las expresiones anteriores, los parámetros con sub índice “I” corresponden a los valores iniciales y los con “F” a los finales, de la curva que se está describiendo, siendo éstos los valores que se cambian según en qué tramo se esté. Los puntos  $(\varepsilon_{un}^+, f_{un}^+)$  y  $(\varepsilon_{un}^-, f_{un}^-)$  son conocidos. El primero corresponde al nivel de deformación en tracción al que se desea llegar, 1% o 2% con su tensión asociada, mientras que el segundo corresponde a un valor escogido a priori considerando alrededor de un 75% de la deformación en la máxima tensión a compresión,  $\varepsilon_{un}^- = 0.0016$  y  $f_{un}^- = f_c(\varepsilon_{un}^-)$  (será para un hormigón no confinado o confinado, según sea el caso analizado).

A continuación, se muestran los valores iniciales y finales de cada tramo (1, 2 y 3) para lograr aplicar la formula de tensión deformación.

Tabla 3.1 - Valores iniciales y finales para cada curva.

Curva (1)	Curva (2)	Curva (3)
$\varepsilon_I = \varepsilon_{un}^+$	$\varepsilon_I = \varepsilon_{PL}^+$	$\varepsilon_I = \varepsilon_{un}^-$
$f_I = f_{un}^+$	$f_I$	$f_I = f_{un}^-$
$E_I = E_c$	$= 0$	$E_I = E_{new}^-$
$\varepsilon_F = \varepsilon_{PL}^+$	$E_I = E_{PL}^+$	$\varepsilon_F = \varepsilon'_c$ (confinado o no según sea el caso)
$f_F = 0$	$\varepsilon_F = \varepsilon_{un}^-$	$f_F = f'_c$ (confinado o no según sea el caso)
$E_F = E_{PL}^+$	$f_F = f_{un}^-$	$E_F = 0$
	$E_F = E_{new}^-$	

Finalmente, las siguientes expresiones definen los parámetros para describir cada curva como los muestra la Tabla 3.1.

$$E_{sec}^+ = E_c \left( \frac{\left| \frac{f_{un}^+}{E_c \varepsilon_r} \right| + 0,67}{\left| \frac{\varepsilon_{un}^+}{\varepsilon_r} \right| + 0,67} \right) \quad E_{sec}^- = E_c \left( \frac{\left| \frac{f_{un}^-}{E_c \varepsilon_c'} \right| + 0,57}{\left| \frac{\varepsilon_{un}^-}{\varepsilon_c'} \right| + 0,57} \right)$$

$$E_{PL}^+ = \frac{E_c}{\left| \frac{\varepsilon_{un}^+}{\varepsilon_r} \right|^{1,1} + 1} \quad \varepsilon_{PL}^- = \varepsilon_{un}^- - \frac{f_{un}^-}{E_{sec}^-}$$

$$\varepsilon_{PL}^+ = \varepsilon_{un}^+ - \frac{f_{un}^+}{E_{sec}^+} \quad E_{new}^- = \frac{f_{un}^-}{\varepsilon_{un}^- - \varepsilon_{PL}^-}$$

En la Figura 3.11, se muestra un ejemplo del modelo de cierre de grietas implementado para un confinamiento tipo A (Figura 3.23) con el cual se acoplan las curvas de tracción y compresión. En ella se puede notar que el comportamiento en tracción del hormigón es casi despreciable en comparación con el de compresión.

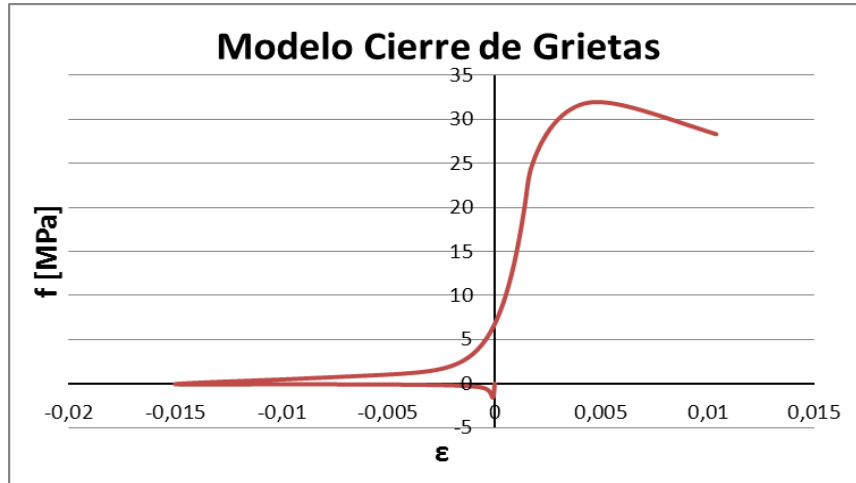


Figura 3.11 - Modelo tracción-compresión para confinamiento tipo A

### 3.1.3 Acero

El acero al ser sometido a cargas axiales de compresión, en general no presenta un comportamiento igual a cuando está sometido a tensiones de tracción. Esto se debe tanto a un

efecto de asimetría en ambas direcciones al usar medidas de ingeniería tanto para determinar las tensiones y deformaciones (basadas en largo y área transversal de la barra inicial, que van cambiando con la deformación), como la presencia del pandeo de barras. Se utilizarán dos modelos para el acero, uno paramétrico (Dhaka y Maekawa, 2002) y otro de modelación directa (Massone y Moroder, 2009).

### **3.1.3.1 Dhaka y Maekawa (2002)**

El modelo a compresión propuesto por estos autores, consiste en un rango inicial lineal elástico, seguido por un modelo no lineal de pandeo. Para generar el modelo, los autores realizaron una serie de ensayos de barras de acero, variando la tensión de fluencia y la relación entre el largo y el diámetro de la barra.

Según los autores, hay diversos datos en relación con el comportamiento medio de compresión de las barras de refuerzo. Algunos de ellos son: la relación tensión-deformación en compresión puede ser descrita completamente por la relación  $\sqrt{f_y}L/D$ ; la envolvente de compresión se encuentra por debajo de la envolvente de tensión cuando se grafican juntos; la tendencia de la degradación en compresión depende del valor de  $\sqrt{f_y}L/D$  y de la tensión en tracción; independiente de  $\sqrt{f_y}L/D$ , el rango de degradación posterior a la primera etapa, presenta un comportamiento descendiente con una pendiente constante igual a 0.02Es; y la relación de tensión deformación, luego de llegar al 20% de la tensión de fluencia, permanece constante en ese valor.

En la Figura 3.12 se muestra un esquema de la relación tensión-deformación a compresión. En ella se observa un punto intermedio  $(\epsilon_i, f_i)$ . Además, se establece una pendiente constante a partir de este punto igual al 2% de la rigidez inicial del acero, hasta un valor constante de la tensión igual al 20% de la tensión de fluencia.

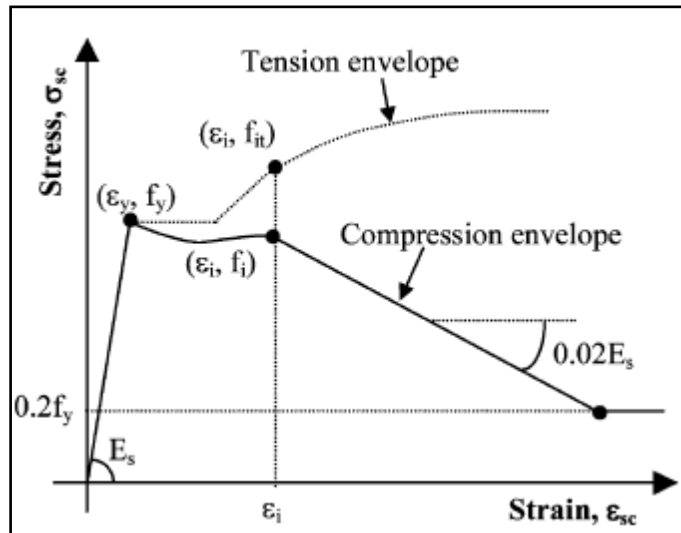


Figura 3.12- Esquema comportamiento monotónico de la envolvente de compresión (Dhakar y Maekawa 2002)

La relación tensión-deformación a compresión, estará representada por el sub índice “sc”, mientras que para representar la tensión y deformación a tracción se utilizará un sub índice “t”. Así,

$$\sigma_{sc} = \begin{cases} E_s \varepsilon_{sc} & \text{si } \varepsilon_{sc} \leq \varepsilon_y \\ \sigma_t \left( 1 - \left( 1 - \frac{f_i}{f_{it}} \right) \left( \frac{\varepsilon_{sc} - \varepsilon_y}{\varepsilon_i - \varepsilon_y} \right) \right) & \text{si } \varepsilon_y < \varepsilon_{sc} \leq \varepsilon_i \\ f_i - 0.02E_s(\varepsilon_{sc} - \varepsilon_i) & \text{si } \sigma_{sc} \geq 0.2f_y \text{ para } \varepsilon_{sc} > \varepsilon_i \end{cases} \quad (3.25)$$

Donde,  $\sigma_t$  y  $f_i$  son las tensiones de la envolvente de tracción asociada a la deformación  $\varepsilon_{sc}$  (deformación actual) y  $\varepsilon_i$  (deformación en el punto intermedio), respectivamente. En la expresión anterior, se puede notar que la tensión de compresión, asociada a una deformación entre  $\varepsilon_y$  y  $\varepsilon_i$ , es normalizada por la tensión de tracción asociada a dicha deformación. Esta normalización permite que la envolvente de compresión, en el rango de deformaciones descrito, mantenga la forma de la curva en tracción.

La generación del punto intermedio en la envolvente de compresión, puede ser correlacionada con la expresión  $\sqrt{f_y}L/D$  a través de las siguientes ecuaciones.

$$\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_y} = 55 - 2.3 \sqrt{\frac{f_y}{100}} \cdot \frac{L}{D}; \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_y} \text{ debe ser mayor o igual a } 7 \quad (3.26)$$

$$= \alpha \left( 1.1 - 0.016 \sqrt{\frac{f_y}{100}} \cdot \frac{L}{D} \right); \frac{f_i}{f_{it}} \text{ debe ser mayor o igual que } 0.2 \quad (3. \text{ ; Error! Marcador no definido.})$$

Comparaciones entre envolventes de compresión en aceros elasto-plástico perfecto y con endurecimiento lineal, revelan que la normalización de la deformación en el punto intermedio ( $\varepsilon_i/\varepsilon_y$ ) no es afectada entre cada tipo de endurecimiento, no así la normalización de la tensión ( $f_i/f_{it}$ ). Por esto, se incluye el factor “ $\alpha$ ” en la expresión de la tensión, teniendo un valor de 0.75 para elasto-plástico perfecto y 1 para un endurecimiento lineal. Así,  $\alpha$  toma valores entre ellos, que para casos intermedios queda representado por la siguiente expresión.

$$\alpha = 0.75 + \frac{\varepsilon_u - \varepsilon_{sh}}{300\varepsilon_y}; \alpha \leq \frac{f_u}{1.5f_y} \text{ y } 0.75 \leq \alpha \leq 1 \quad (3.28)$$

Donde  $\varepsilon_u$ ,  $\varepsilon_{sh}$  y  $f_u$ , son las deformaciones en el peak del endurecimiento, al comienzo del endurecimiento y la tensión máxima en el acero a tracción, respectivamente.

Como en las probetas a ensayar, solo se tienen tres diferentes relaciones entre largo y diámetro de barras, considerando un empotramiento perfecto en los extremos con los estribos (100 mm/18 mm = 5.6; 150 mm/18 mm = 8.3; 400 mm/18 mm = 22.2), se generaron estos tres modelos del acero a compresión, los cuales se muestran en la Figura 3.13, asociado al modelo a tracción de Dhakal y Maekawa (2002).

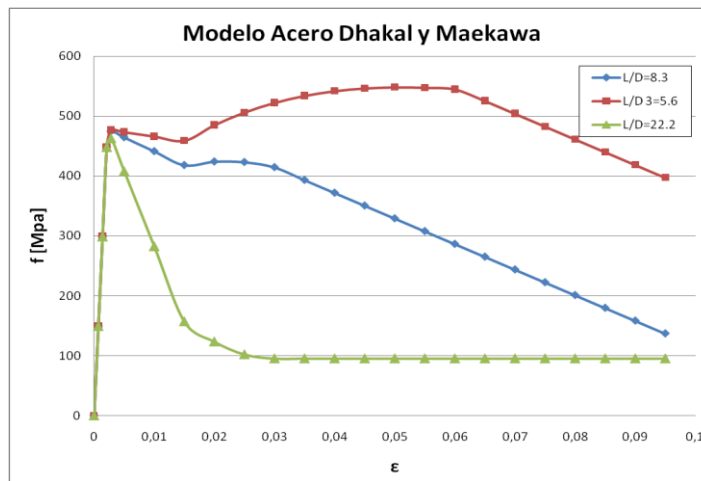


Figura 3.13-Modelo acero propuesto por Dhakal y Maekawa

Ahora, el modelo cíclico mostrado en este documento, corresponde al de Giuffre-Menegotto-Pinto con modificaciones relacionadas con el pandeo de las barras. El modelo original establece una curva suave de transición que une el punto de origen (que en este caso es el 1% o 2% en tracción) con el punto objetivo. La Figura 3.14 muestra la ilustración de la curva de transición original, también se presentan la nomenclatura de los parámetros utilizados.

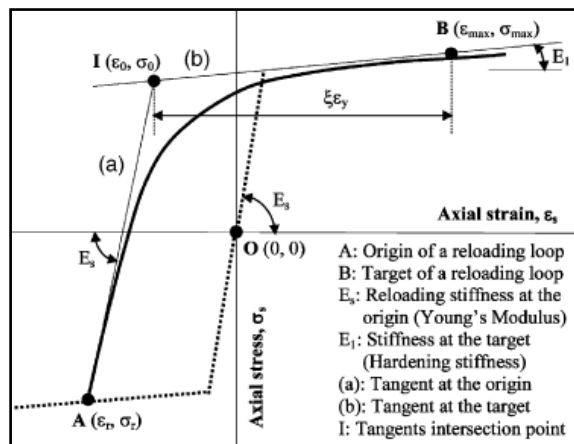


Figura 3.14-Curva transición modelo original Giuffre-Menegotto-Pinto (Dhakal y Maekawa, 2002)

Las expresiones que representan la curva de transición original son las siguientes, en donde el punto  $(\varepsilon_{max}, \sigma_{max})$  corresponde al punto objetivo del ciclo, que para motivos de nuestro trabajo corresponde a una deformación del 10% y una tensión, obtenida de la envolvente de

compresión, asociada a ella que dependerá de la relación entre largo y diámetro. Para  $L/D=22.2 \Rightarrow \sigma_{max} = 95.4 [MPa]$ ,  $L/D=8.3 \Rightarrow \sigma_{max} = 115.7 [MPa]$  y  $L/D=5.6 \Rightarrow \sigma_{max} = 375.8 [MPa]$ .

$$\sigma_{eq} = b\varepsilon_{eq} + \frac{(1-b)\varepsilon_{eq}}{(1 + \varepsilon_{eq}^R)^{1/R}} \quad (3.29)$$

$$\varepsilon_{eq} = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_r}{\varepsilon_0 - \varepsilon_r} ; \quad \sigma_{eq} = \frac{\sigma_s - \sigma_r}{\sigma_0 - \sigma_r}$$

$$R = R_0 - \frac{a_1 \xi}{a_2 + \xi}$$

$$\xi = \frac{\varepsilon_{max} - \varepsilon_0}{\varepsilon_y}$$

En las ecuaciones anteriores,  $b$ , en el modelo original, corresponde a la razón entre la pendiente de la recta tangente, de la curva, al punto objetivo y la rigidez inicial del acero en tracción. El punto  $(\varepsilon_0, \sigma_0)$  es la intersección (punto I en la Figura 3.14) de las rectas (a) y (b) con las dos pendientes, respectivamente;  $(\varepsilon_r, \sigma_r)$  es el origen de la curva, es decir, el 1% o 2%;  $R$  corresponde a un parámetro relacionado con la forma que la curva de transición toma; y  $\xi$  corresponde a la deformación entre los puntos  $(\varepsilon_0, \sigma_0)$  y  $(\varepsilon_{max}, \sigma_{max})$ , normalizada con respecto a la deformación de fluencia.

Los valores de  $R_0$ ,  $a_1$  y  $a_2$  fueron determinados experimentalmente por los autores, esto deja abierta la posibilidad a que éstos puedan tomar valores diferentes a los propuestos. Los valores entregados por los autores para dichas constantes son los siguientes:  $R_0 = 20$ ,  $a_1 = 18.5$  y  $a_2 = 0.15$ .

Ahora para poder determinar el punto de intersección  $(\varepsilon_0, \sigma_0)$ , es necesario conocer las pendientes de las rectas (a) y (b) para poder interseccionarlas. En el modelo modificado la pendiente de la recta (a) es diferente al modulo de Young del acero, teniendo un valor menor a medida que la máxima deformación plástica crece, en este término se está introduciendo el efecto que puede tener la pre-tracción de la barra, más allá de la fluencia. Mientras que la pendiente de la recta (b) es posible determinarla considerando que la recta del punto objetivo pasa por la fluencia del acero en tracción (Figura 3.14). La pendiente de la recta (a) corresponderá a  $E_u$  y la de la recta (b) será  $E_l$ .





Las Figura 3.16 y Figura 3.17 representan la respuesta de las barras para una pre-tracción de 1% y 2%, respectivamente. En ellas se observa que la degradación no es muy diferente para cada relación de aspecto, lo cual se debe a que las tensiones máximas consideradas para cada una de ellas, no presentan valores que difieren mucho, lo que ocasiona que tanto las pendientes de degradación y los valores finales sean similares.

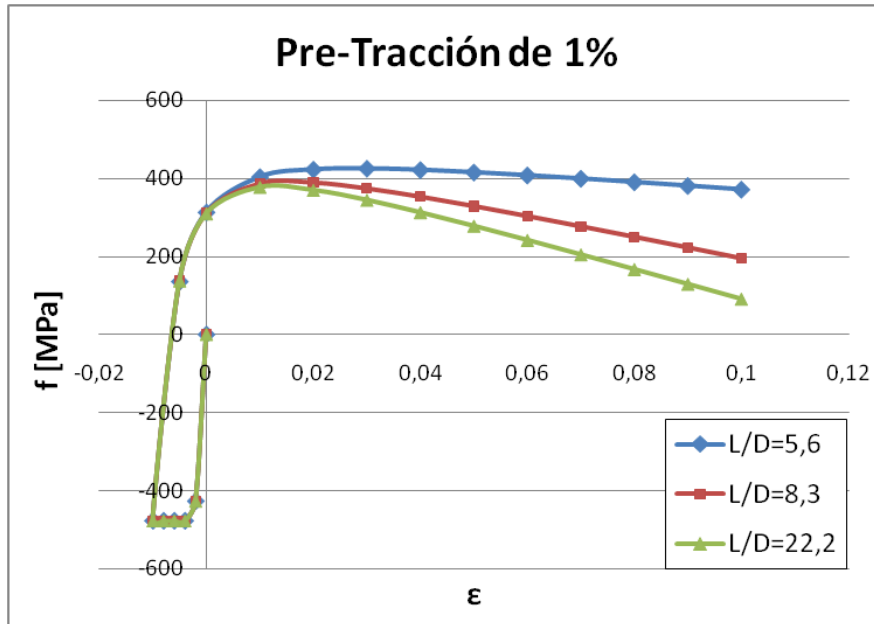


Figura 3.16-Modelo Dhakal y Maekawa tracción-compresión con 1% de pre-tracción

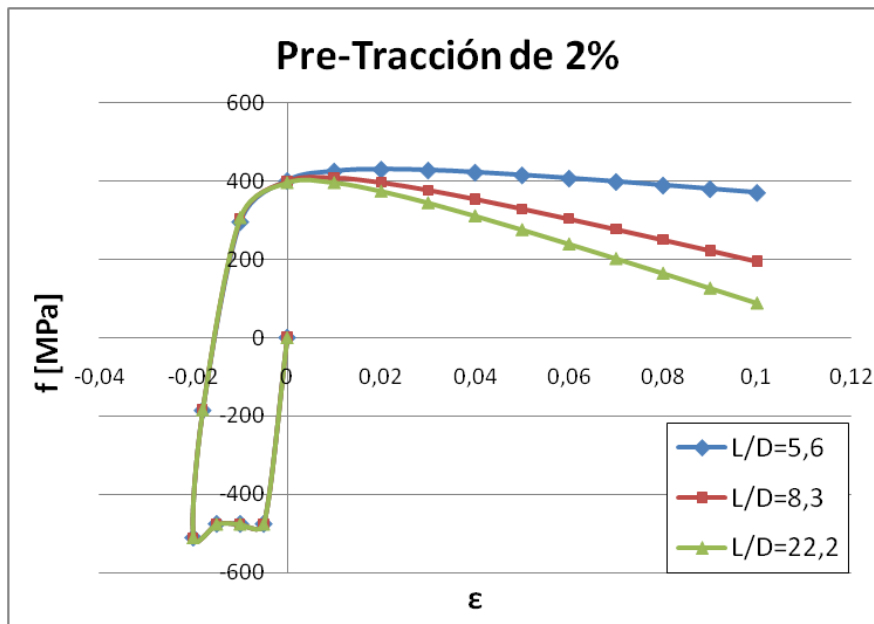


Figura 3.17-Modelo Dhakal y Maekawa tracción-compresión con 2% de pre-tracción

### 3.1.3.2 Massone y Moroder (2009)

El modelo representa el comportamiento de una barra en compresión monotónica libre de restricciones en su longitud, en la cual se concentran las deformaciones en cuatro rótulas plásticas ubicadas simétricamente en la posición de los máximos momentos (Figura 3.18). El modelo considera una barra longitudinal fija en sus extremos, salvo el desplazamiento vertical en el extremo superior, además de una imperfección inicial en el centro de la barra.

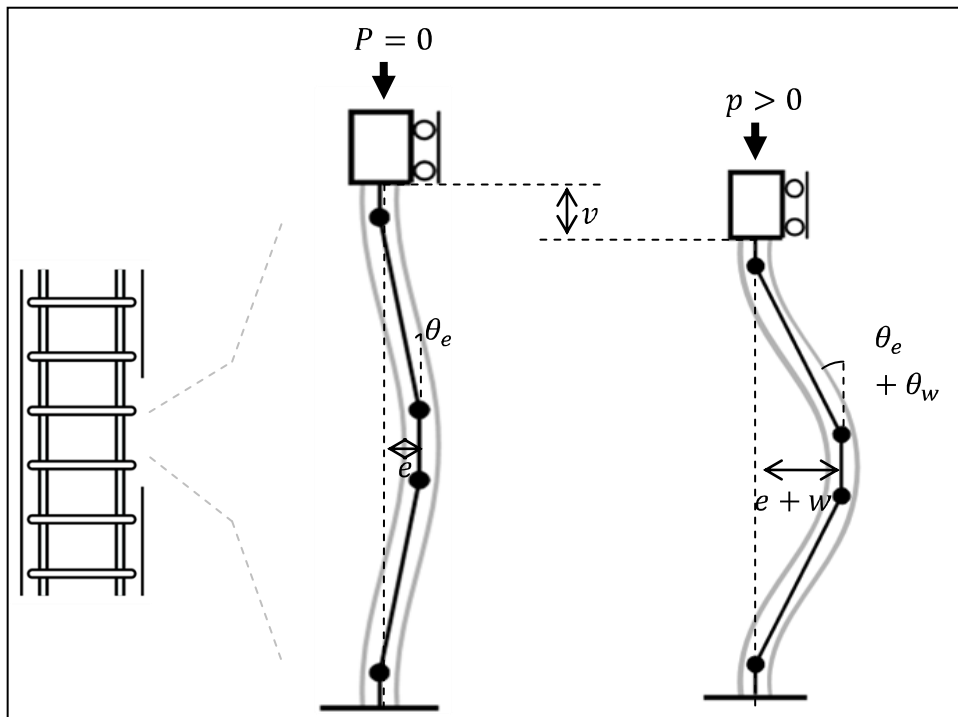


Figura 3.18-Modelamiento de pandeo con imperfección inicial (Massone y Moroder, 2009)

Para llegar a la respuesta de la barra de acero, se debe iterar sobre la curvatura hasta llegar al equilibrio del sistema considerando las tensiones de cada una de las fibras en las rótulas. La ley constitutiva del acero en tracción es la propuesta en Mander et. al. (1984) éste no se describe en más detalle, puesto que no se utilizará explícitamente, si no que a través del modelo de plasticidad concentrada. El comportamiento a compresión utilizado en este modelo, se obtiene a partir del de tracción, pero utilizando coordenadas verdaderas, es decir, considerar el cambio de la sección de la barra a medida que se llega a deformaciones considerables.

Las fuerzas internas en la rótula quedan determinadas por su deformación axial  $\varepsilon$ , y su curvatura,  $\phi$ . La sección es discretizada en una cantidad finita de fibras (20) deformables axialmente, donde para cada fibra su deformación  $\varepsilon_i$  corresponde a  $\varepsilon_i = \varepsilon + \phi x_i$  asumiendo la hipótesis de Bernoulli.

Luego de llegar a la convergencia del modelo, se obtienen los resultados para las tres relaciones de aspectos (Figura 3.19)

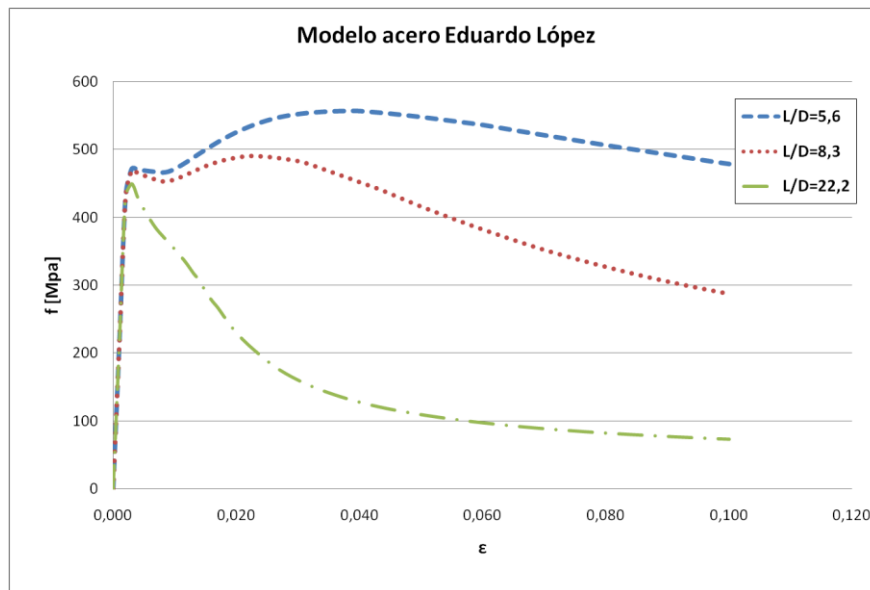


Figura 3.19-Modelo plasticidad concentrada acero a compresión

Finalmente, para el modelamiento cíclico del acero se consideran etapas de carga y recarga, manteniendo, en un principio, las curvas monotónicas de tracción y compresión del acero. Luego de eso, estando fuera del rango lineal elástico, la curva va desde un punto de descarga a un punto final siguiendo una curva denominada A (Figura 3.20). Esta curva, corresponde a una transición entre los puntos de descarga/recarga, considerando el efecto de Bauschinger. Dicha curva puede ser representada por la siguiente expresión.

$$\sigma_s = \sigma_0 + E_0(\varepsilon_s - \varepsilon_0) \left[ Q + \frac{(1-Q)}{\left(1 + \left(E_0 \left(\frac{\varepsilon_s - \varepsilon_0}{\sigma_f - \sigma_0}\right)\right)^R\right)^{1/R}} \right] \quad (3.34)$$

Donde:

$$Q = \frac{(E_{sec}/E_0 - a)}{1 - a}$$

$$E_{sec} = \frac{\sigma_f - \sigma_0}{\varepsilon_f - \varepsilon_0}$$

$$a = \frac{1}{(1 + (E_0/E_{sec})^R)^{1/R}}$$

R corresponde al parámetro que representa el efecto Bauschinger,  $E_0$  es el módulo inicial de carga/descarga,  $\varepsilon_0$  y  $\sigma_0$  son la deformación y tensión al inicial de la curva A y  $\varepsilon_f$  y  $\sigma_f$  son las finales. Los valores de  $E_0$  y  $R$  en Massone&Moroder (2009), originalmente obtenidos de Mander et al. (1984), fueron modificados por Lacaze (2009) para mejorar la respuesta cíclica, siendo  $E_0 = E_s(1 - \Delta\varepsilon)$ ,  $R = 14\varepsilon_y^{1/3}(1 - 14\Delta\varepsilon)$  para la etapa de descarga y  $R = 20\varepsilon_y^{1/3}(1 - 18\Delta\varepsilon)$  para la de recarga, donde  $\Delta\varepsilon = |\varepsilon_f - \varepsilon_0|/2$ .

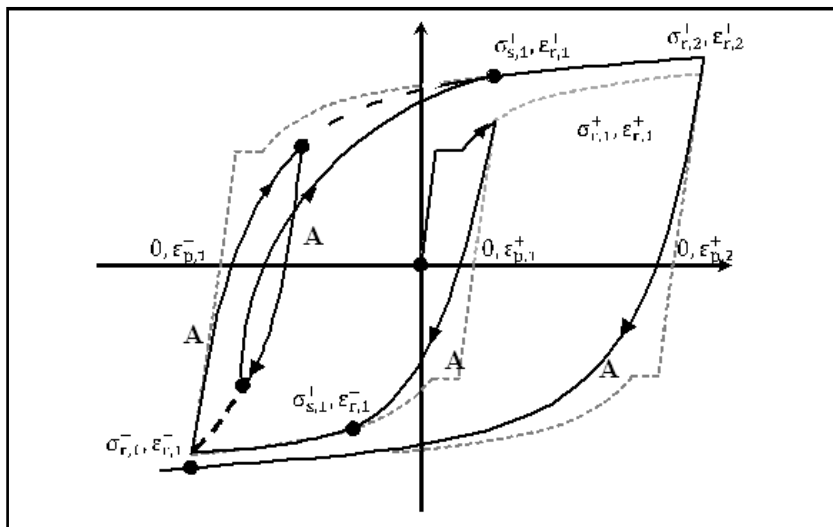


Figura 3.20 - Modelo de acero cíclico de Massone y Moroder (2009) y modificación de Lacaze (2009) (Massone y Moroder, 2009)

En el modelo final, Lacaze (2009), el ajuste del primer ciclo se determinó de manera experimental, obteniendo que el punto final de la curva A corresponde al punto de deformación contraria con un valor absoluto igual al inicial (Figura 3.20). Luego, en los siguientes ciclos, los puntos de inicio y fin corresponden a los de fin e inicio, respectivamente, de la fase anterior.

En las Figura 3.21 y Figura 3.22 se muestra el comportamiento de las barras de acero para una pre-tracción inicial de 1% y 2%, respectivamente. En ellas se observa que para la mayor relación de aspecto, la degradación de la capacidad comienza antes y es bastante más pronunciada que para las otras relaciones. Además, las tensiones de compresión alcanzadas por cada una de las curvas, presentan valores mayores a las del modelo de Dhakal y Maekawa (2002).

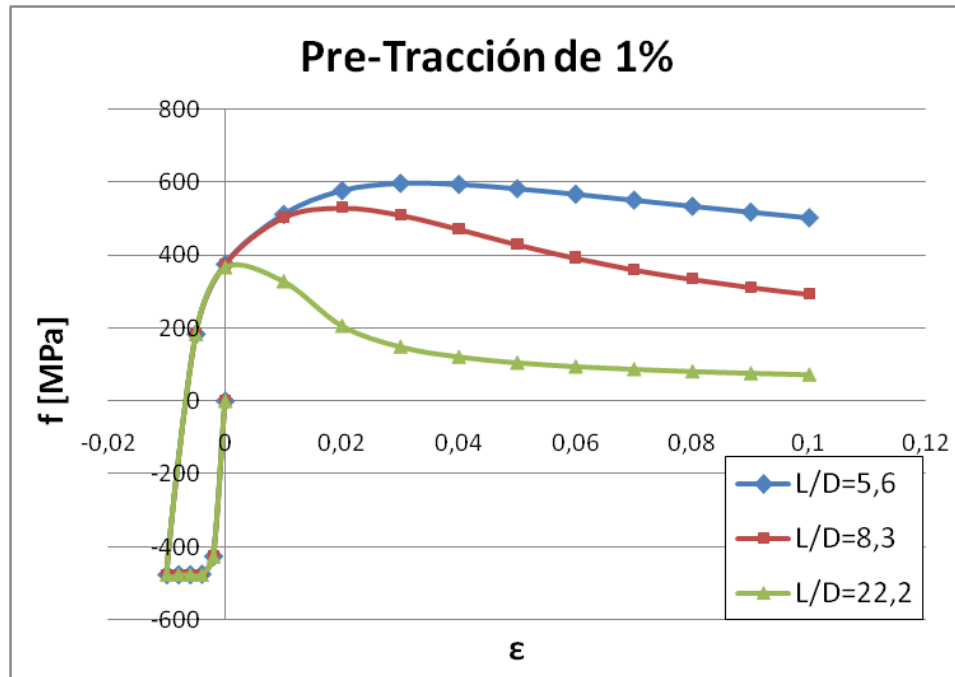


Figura 3.21-Modelo plasticidad concentrada, pre-tracción de 1%

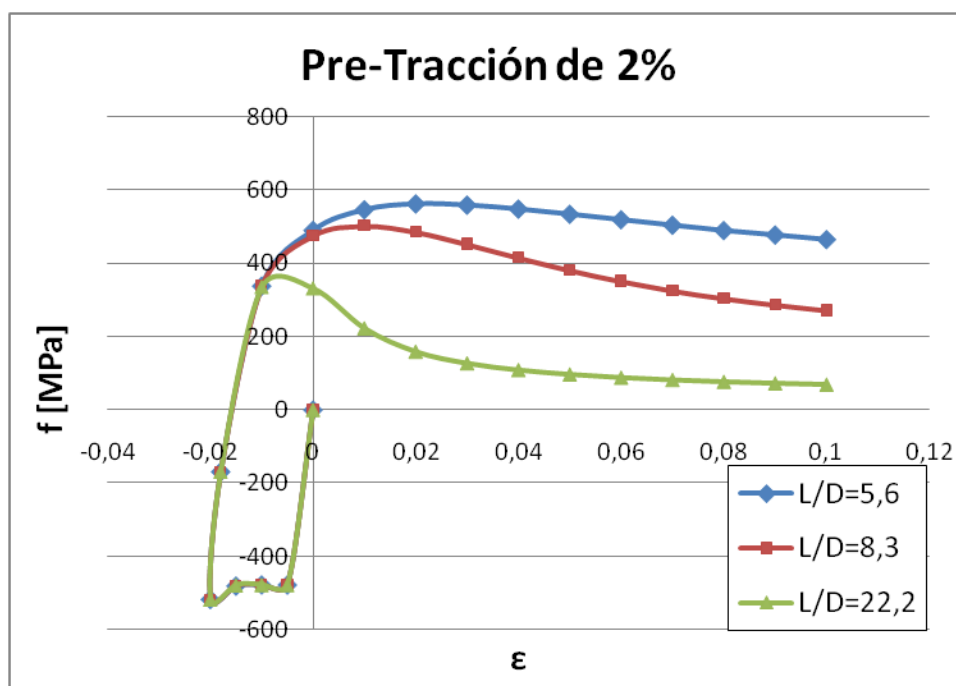


Figura 3.22-Modelo plasticidad concentrada, pre-tracción de 2%

### 3.2 Matriz de Ensayos

Las 24 probetas fueron construidas para ser ensayadas mediante dos tipos de ensayos: uno corresponde a un ensayo de compresión pura y el otro a uno donde se genera una pre-tracción previa a la aplicación de la carga axial de compresión, para representar acciones sísmicas que traccionan el elemento de borde de muro previo a la compresión mayor.

En la Tabla 3.2 se muestra la matriz de ensayo, con el detalle de cada una de las probetas. La nomenclatura de las probetas es la siguiente: THxxxTxCxyWxxx (TH (altura) xxx centímetros, T (pre-tracción) x% alargamiento, C (confinamiento) tipo x espaciamiento y milímetros, W (ancho) xxx milímetros).

Tabla 3.2 - Matriz de ensayo

Probeta	Altura [m]	Pre-tracción [%]	Tipo confinamiento	Ancho [mm]	Nomenclatura
1	1	0	0	130	TH100T0C0W130
2	1	0	0	180	TH100T0C0W180
3	1	0	0	250	TH100T0C0W250
4	1	0	A (S=100 mm)	130	TH100T0CA100W130

<b>Probeta</b>	<b>Altura [m]</b>	<b>Pre-tracción [%]</b>	<b>Tipo confinamiento</b>	<b>Ancho [mm]</b>	<b>Nomenclatura</b>
<b>5</b>	1	0	A (S=100 mm)	180	TH100T0CA100W180
<b>6</b>	1	0	A (S=100 mm)	250	TH100T0CA100W250
<b>7</b>	1	1	0	180	TH100T1C0W180
<b>8</b>	1	2	0	180	TH100T2C0W180
<b>9</b>	1,6	2	0	180	TH160T1C0W180*
<b>10</b>	1	2	A (S=100 mm)	180	TH100T2CA100W180
<b>11</b>	1,6	2	A (S=100 mm)	180	TH160T2CA100W180*
<b>12</b>	1,6	0	A (S=100 mm)	180	TH160T0CA100W180*
<b>13</b>	1	0	A (S=150 mm)	180	TH100T0CA150W180
<b>14</b>	1	0	M (S=150 mm)	180	TH100T0CM150W180
<b>15</b>	1	0	M (S=100 mm)	180	TH100T0CM100W180
<b>16</b>	1	2	A (S=150 mm)	180	TH100T2CA150W180
<b>17</b>	1	2	M (S=150 mm)	180	TH100T2CM150W180
<b>18</b>	1	2	M (S=100 mm)	180	TH100T2CM100W180
<b>19</b>	1	2	A (S=100 mm)	180	TH100T2CA100W180*
<b>20</b>	1	2	A2 (S=100 mm)	180	TH100T2CA2100W180
<b>21</b>	1	2	D1 (S=100 mm)	180	TH100T2CD1100W180
<b>22</b>	1	2	D2 (S=100 mm)	180	TH100T2CD2100W180
<b>23</b>	1	2	E1 (S=100 mm)	180	TH100T2CE1100W180
<b>24</b>	1	2	E2 (S=100 mm)	180	TH100T2CE2100W180

Las probetas ensayadas corresponden a las que, en la Tabla 3.2, muestran un valor 0 en el porcentaje de pre-tracción.

En la Figura 3.23 se muestra el detalle del tipo de confinamiento descrito en la tabla de matriz de ensayos.



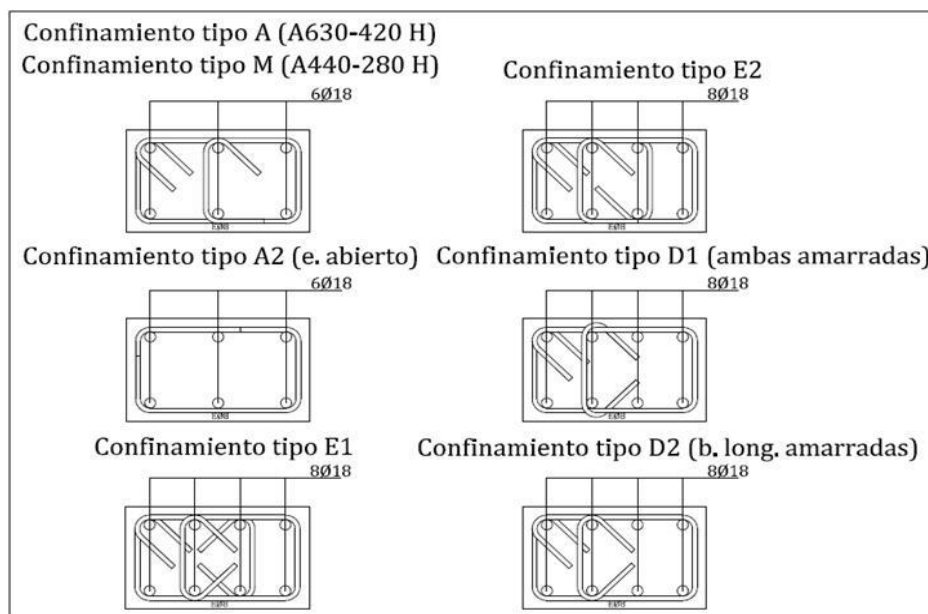


Figura 3.23 - *Detalle confinamientos zona central*

### 3.3 Descripción de Probetas

Las probetas constan de 2 zonas, una zona central donde se busca generar la falla, concentrando el daño, y una zona externa donde se aplican las cargas. Así, los confinamientos mostrados en la Figura 3.23 son los dispuestos en la zona central de la probeta, mientras que en los extremos se da un confinamiento mayor, generado tanto por el armado, en algunos casos, como por el menor espaciamiento en otros (Anexo A).

Las probetas constan de un largo de 300 mm y un ancho variable para representar el efecto de confinamiento en pequeños espesores. Los anchos son 130, 180 y 250 mm, donde el espesor de 180 mm es el más común, representando a muros de espesor aproximado de 200 mm si se considera que existe un escalamiento del elemento de borde de aproximadamente 10%. Las probetas tienen 6 barras longitudinales de 18 mm, salvo en los casos en que se desea estudiar otros efectos de confinamiento, donde se aumentan a 8 barras. En la Figura 3.24 se muestra la disposición de la armadura transversal en las probetas de altura de 1 m y 1.6 m, sin pre-tracción, mientras que en la Figura 3.25 se muestran las probetas de 1 m de altura sometidas a una pre-tracción y, finalmente, en la Figura 3.26 el caso de las probetas de 1.6 m de altura, también sometidas a una pre-tracción.

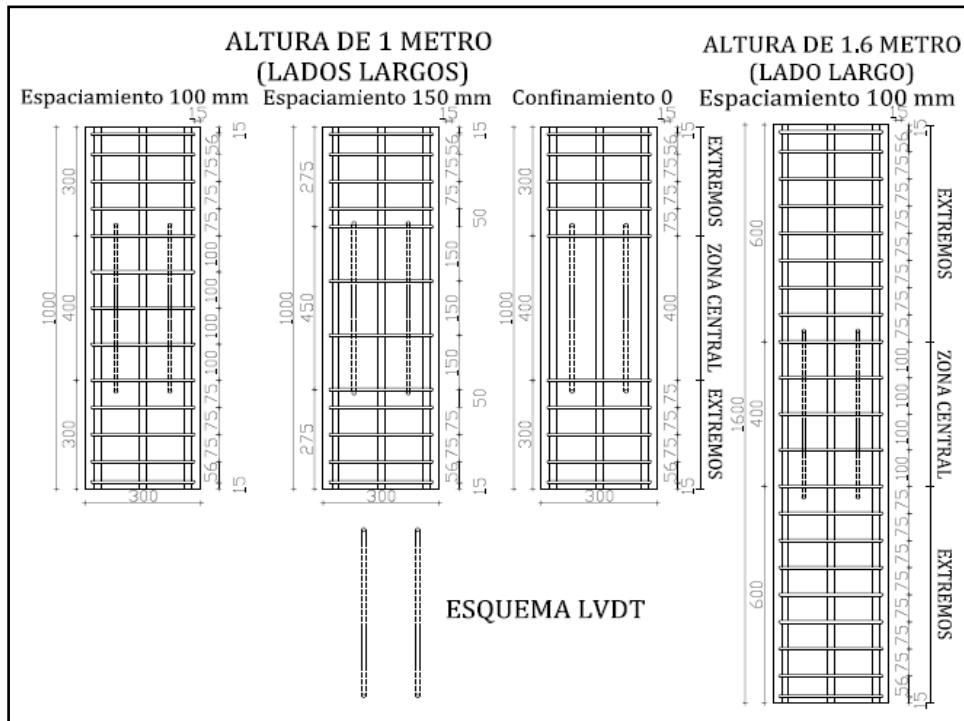


Figura 3.24 - Distribución armadura transversal probetas sin pre tracción (barras cortadas)

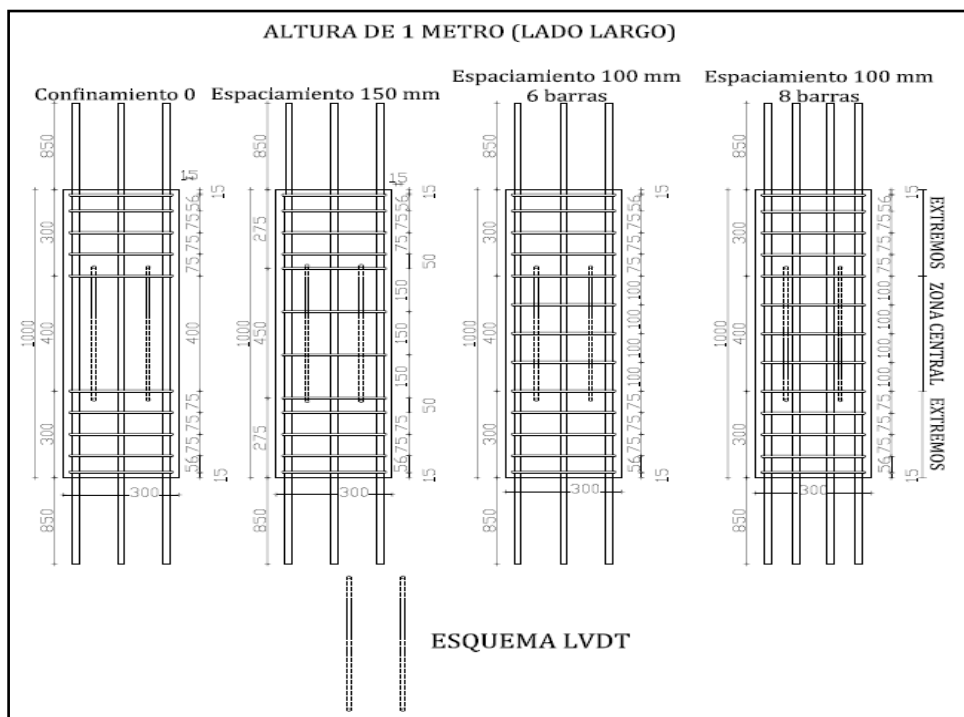


Figura 3.25 - Distribución armadura transversal probetas con pre tracción de 1 m (barras pasadas)

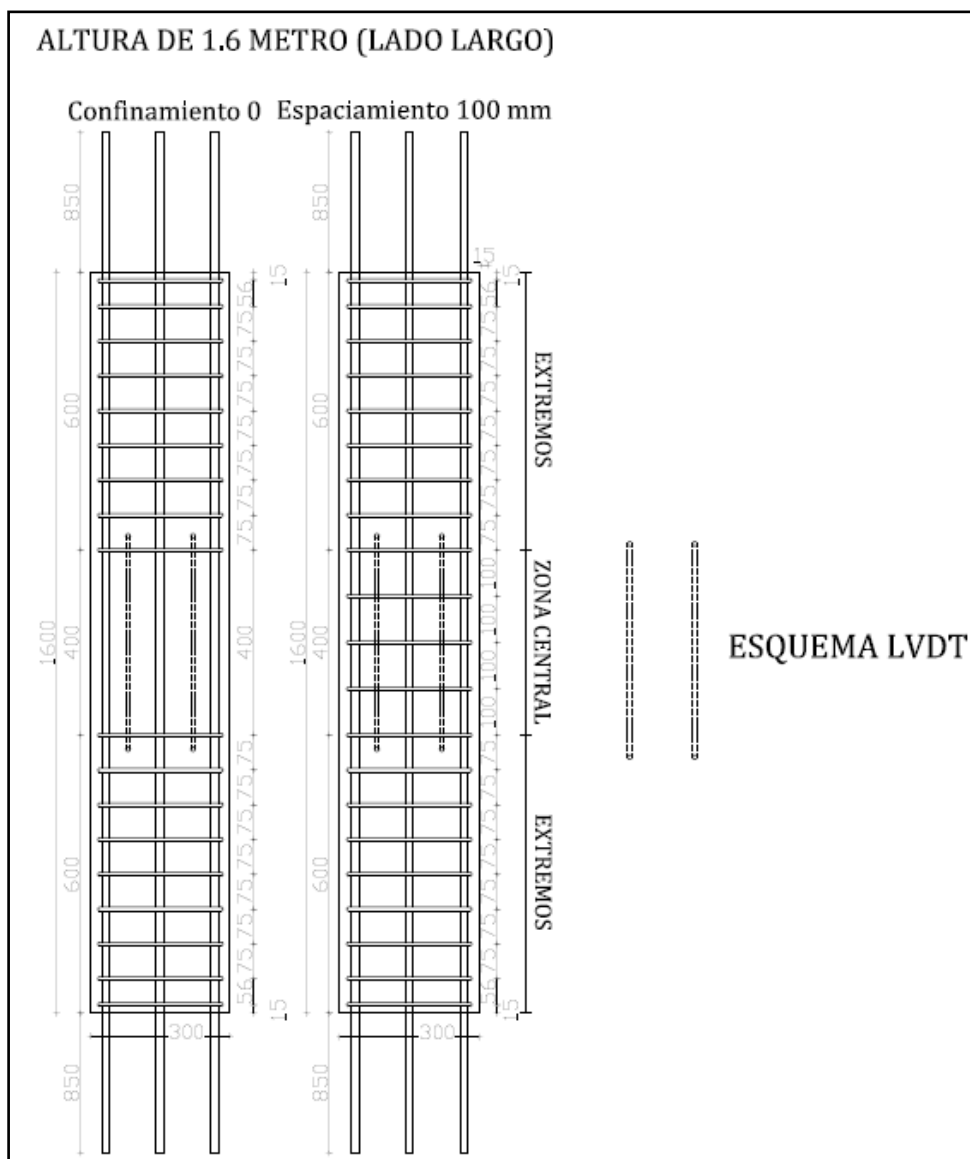


Figura 3.26 - Distribución armadura transversal probetas con pre tracción de 1.6 m (barras pasadas)

En las probetas con 6 barras longitudinales, el confinamiento utilizado en los extremos, tienen la forma del confinamiento tipo A. En las probetas con 8 barras longitudinales, el confinamiento utilizado en los extremos es de un estribo cerrado exterior más un estribo cerrado interior (Figura 3.27). Ésta última disposición se decidió utilizar para facilitar el armado de las probetas con 8 barras. Confinamiento A corresponde a un confinamiento según ACI 318-08 cuando se utiliza un espaciamiento de 100 mm. Se ha considerado un espaciamiento de 150 mm para estudiar el impacto de un confinamiento menor, así como estribos de menor fluencia (A440-280H) para el caso de confinamiento M, ya que esta disminución del 50% en la resistencia del acero puede compararse con el aumento del 50% del espaciamiento. Confinamiento A2 trata de

representar el tipo de terminación de barras transversales en muros que no fueron ancladas al núcleo de hormigón, sino que se doblaron en L o C en 90 grados. Confinamiento D1 y D2 intentan comparar el efecto de sostener tanto la barra horizontal como longitudinal versus la restricción al pandeo que se le otorga a la barra al sólo trabar la barra longitudinal. Finalmente, con el confinamiento tipo E1 y E2 se intenta observar las diferencias que puedan entregar ganchos con doblez de 135 grados en ambos extremos o con uno de ellos en 90 grados.

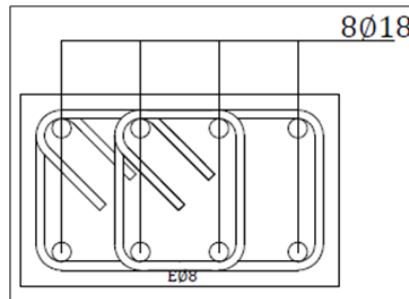


Figura 3.27 - Confinamiento en extremo de probetas de 8 barras longitudinales

Para realizar los ensayos con un esfuerzo de tracción previo, que puede traducirse en 0%, 1% ó 2% de alargamiento, es necesario tener un elemento de reacción. En este caso éste será reutilizable, por lo que sólo se consideran 4 vigas de reacción, para el total de 24 probetas a ensayar: 2 para las probetas con 6 barras longitudinales y 2 para probetas con 8 barras. En las Figura 3.28 y Figura 3.29 se muestra la estructuración que tiene dicho elemento de reacción para las probetas de 6 y 8 barras longitudinales, respectivamente. Los elementos achurados corresponden a tubos de PVC que deben disponerse como ductos para que las barras longitudinales pasen a través de ellos y se anclen al otro extremo.

En el Anexo A se muestra el detalle de cada una de las probetas, que corresponde a los planos a utilizar para la fabricación ellas.

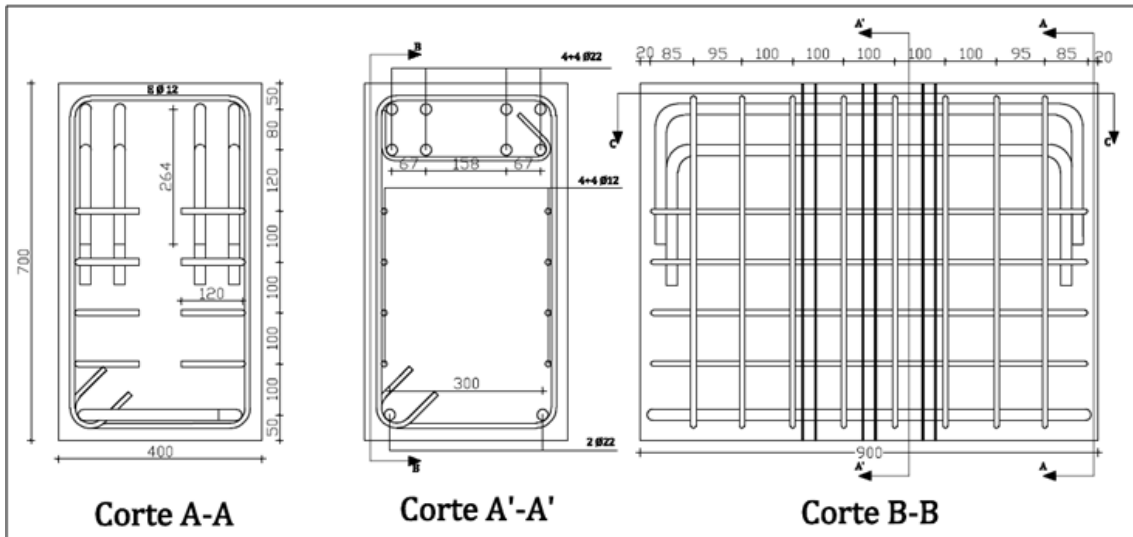


Figura 3.28 - Pedestal de reacción para probetas de 6 barras longitudinales

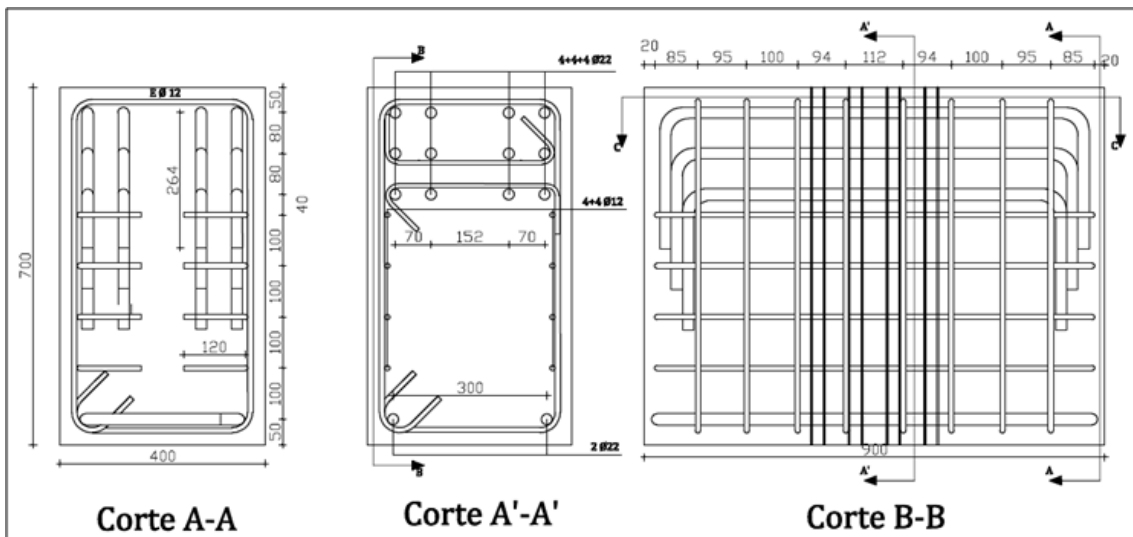


Figura 3.29 - Pedestal de reacción para probetas de 8 barras longitudinales

### 3.4 Montaje e Instrumentación

Para obtener la curva carga deformación de cada probeta, se dispuso un sistema de instrumentación de 8 LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*). 4 midiendo la deformación en la zona central, en ambas caras larga, de manera de caracterizar el ascenso de la curva y 4 externos a la probeta, midiendo la deformación total de la probeta completa, para así describir la parte descendente de la curva y el posible giro de la sección. Este tipo de sistema de

instrumentación, al igual que para los cilindros de hormigón no confinado, se utilizó puesto que luego de llegar al peak de la capacidad, y producto de la inestabilidad fuera del plano, la instrumentación de la zona central puede registrar deformaciones que no permitirían obtener el comportamiento completo de la probeta.

Además se utilizaron sensores *Strain Gauges* en barras longitudinales y en estribos para determinar el nivel de deformaciones que se generaban en ellos mientras se van aumentando las deformaciones axiales en las probetas. Estos se instalaron sobre diferentes barras de acero en la probeta. Se ubican cuatro sobre las barras longitudinales, justo donde termina la zona central, dispuestos 2 en cada una de las capas en posiciones opuestas, y 3 sobre las barras de los estribos: dos en un estribo de la zona central, en el lado largo y en el lado corto, y uno en un estribo de la zona extrema, sólo en el lado largo (Figura 3.30).

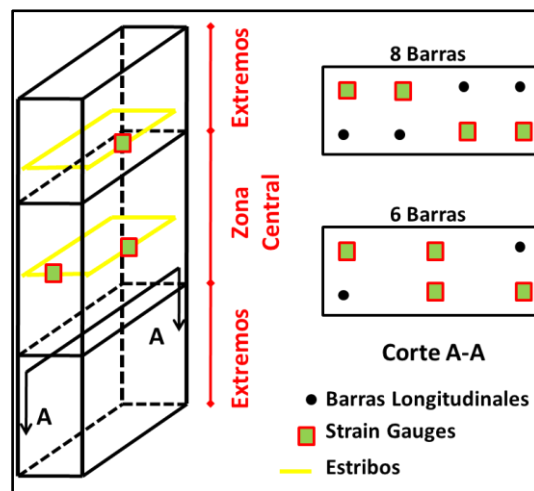


Figura 3.30 - Esquema de ubicación de *Strain Gauges* en probetas

Adicionalmente se utilizaron 4 LVDT para medir la expansión del hormigón perimetral. Lo anterior queda ejemplificado con el esquema que se muestra en la Figura 3.31.

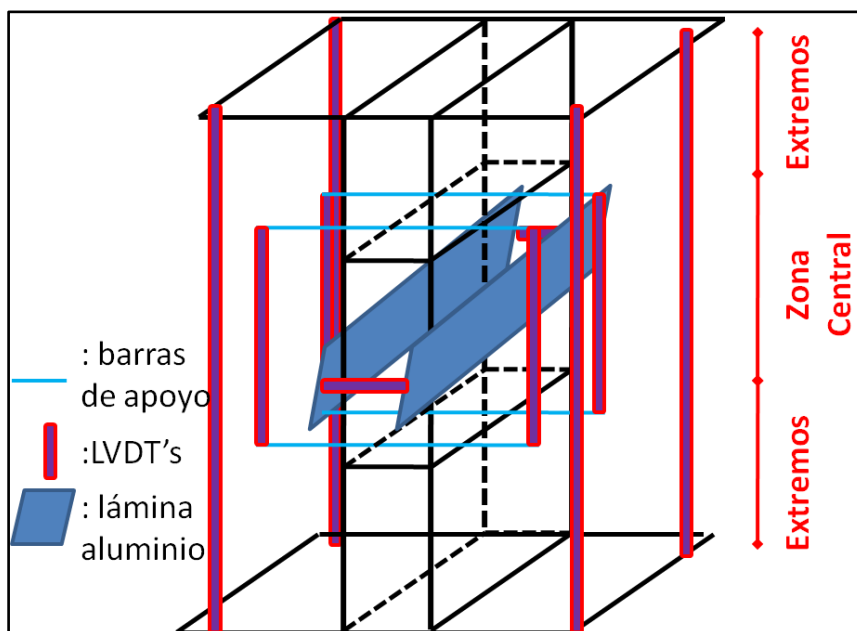


Figura 3.31 - Esquema de disposición de los LVDT

En términos del montaje, las probetas se disponen sobre la máquina de 500 ton encargada de aplicar las fuerzas de compresión, dejando en la parte inferior la zona de instrumentación de los Strain Gauges de las barras longitudinales y, por ende, en la parte superior queda el estribo del extremo de la probeta.

### 3.5 Proceso Constructivo

Como ya se mencionó anteriormente, las probetas de borde de muro presentan diferentes configuraciones, pero mantienen una instrumentación estándar de Strain Gauges en las barras de acero y LVDT en el exterior. Así el proceso constructivo completo de las probetas está dividido en una parte de instrumentación y otra en el armado y posterior hormigonado de ellas.

La instrumentación de las barras longitudinales y estribos con Strain Gauges, fue realizada por el IDIEM, mediante sus estándares ya probados, utilizando los de una longitud de 40 mm. Para la instalación sobre las barras de acero, se debe realizar una preparación de la superficie de manera de lograr la adherencia necesaria del Strain Gauges al acero. Para esto primero se rebajan los resaltes con un esmeril angular hasta que se tenga la barra lisa, luego se prosigue con el pulido hasta dejar una superficie completamente brillante (superficie espejo). Ya con la superficie preparada, se realiza el montaje del instrumento sobre ella mediante al adhesivo que éste tiene

(Figura 3.32a). Con el Strain Gauges ya pegado, se le sueldan los conductores en uno de sus extremos fijándolos mediante un sistema de sujeción (Figura 3.32b). Finalmente, para proteger el instrumento y asegurar su buen funcionamiento, se le agrega una capa de silicona sobre él, cubriendo todo ello con una guincha metálica a lo largo de toda la longitud de uso (Figura 3.32c).

Se instalaron 4 Strain Gauges sobre las barras longitudinales y 3 sobre los estribos (excepto en las probetas 1, 2, 3, 7, 8 y 9 donde sólo se instaló un Strain Gauge en el estribo externo) en cada una de las probetas, obteniendo un total de 156 Strain Gauges.

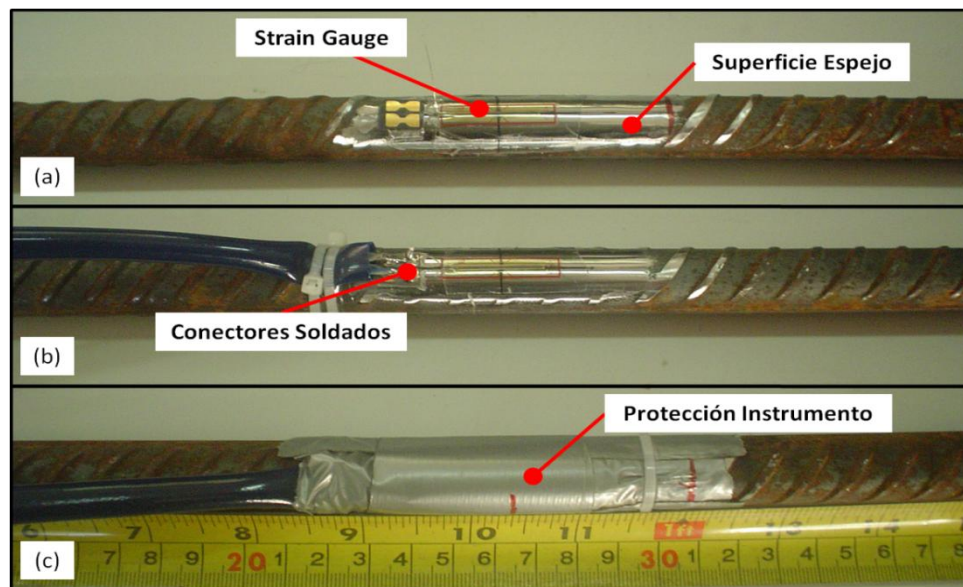


Figura 3.32- Procedimiento montaje Strain Gauges en barras longitudinales (a) Strain Gauge pegado sobre superficie espejo (b) Conectores soldado a Strain Gauge (c) Situación final

Luego de tener todos los Strain Gauges instalados, se procedió con el armado de cada una de las probetas (casquillos). Éste se realizó con un procedimiento estándar, utilizando alambre negro para amarrar los estribos a las barras longitudinales. Cabe mencionar que producto que los Strain Gauges utilizados en las barras longitudinales presentan una dimensión mayor a lo previsto, el espaciamiento entre los estribos en los extremos de los Strain Gauges es mayor al presentado en los planos de construcción. De todas maneras, esto no influye en la respuesta esperada, ya que, se encuentra en la zona externa donde se establece un confinamiento mayor.

Producto de los diferentes traslados de las barras de refuerzos y estribos, se extravió un estribo y un gancho de calidad A440-280H de la probeta Nro. 17, teniendo que reemplazarlo por



un acero de igual calidad pero de otra colada que no presenta el mismo comportamiento mostrado en la Figura 2.8, pero se utilizarán los valores de esa calidad de acero para su modelación.

Teniendo todos los estribos doblados y las barras longitudinales dimensionadas, se agruparon según la probeta a la cual pertenecerían. Luego, el armado se realizó disponiendo de forma horizontal las barras longitudinales, pasando a través de ellas los estribos y ganchos, procurando dejar alternados en la altura los dobleces. Con todos los estribos y ganchos puestos, se procedía con el amarre de estos a las barras longitudinales según el espaciamiento detallado en los planos de construcción.

En la Figura 3.33 se muestra un ejemplo del armado de tres probetas con los diferentes espaciamientos considerados en la zona central.

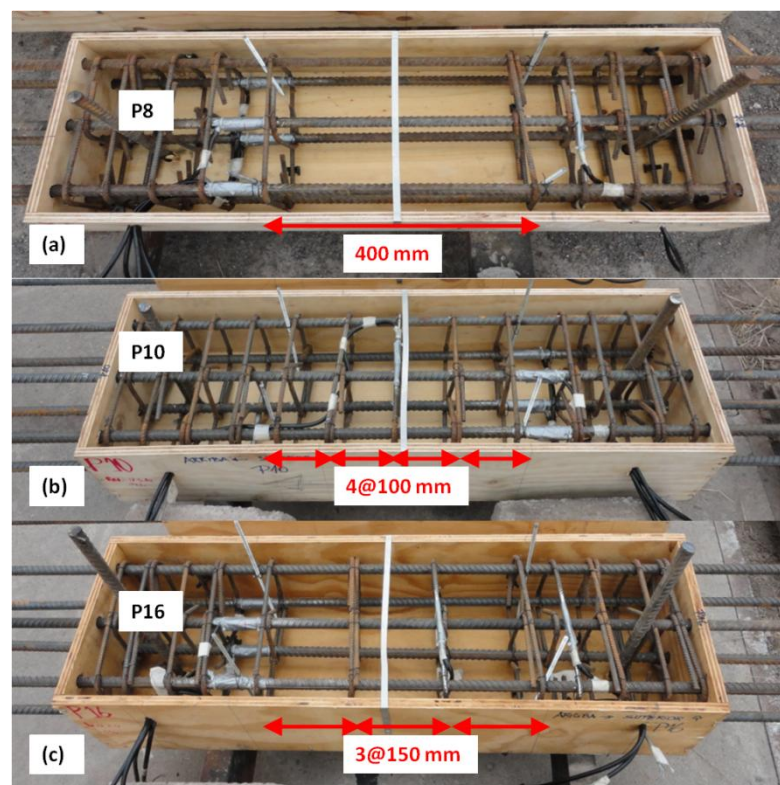


Figura 3.33 - Ejemplo diferentes espaciamientos (a) Confinamiento 0 (b)  $S=100$  mm  
(c)  $S=150$  mm

Ya con cada uno de los casquillos armados, se procedió a disponerlos dentro de los moldajes de maderas dimensionados. Este proceso corresponde al más delicado y que requiere de

labores detalladas, porque fue necesario hacer diferentes perforaciones en el moldaje. Estas se hicieron para pasar las barras longitudinales en las probetas con pre-tracción (Figura 3.34a), los conectores de los Strain Gauges (Figura 3.34b), las barras de aluminio para apoyar los LVDT (Figura 3.34c) y barras de acero  $\Phi 18$  (Figura 3.34d) como sistema auxiliar para el movimiento de las probetas.

Se dispusieron cada uno de los moldajes con sus respectivos casquillos sobre superficies niveladas y preparadas para realizar el hormigonado. El hormigón utilizado corresponde a uno pre-mezclado, de capacidad H30 ( $f'c=25$  MPa), con tamaño máximo de áridos de 20 mm y un cono de 14 cm (que se redujo a 12 cm al momento del vaciamiento). El proceso de hormigonado fue realizado vaciando el hormigón en carretillas para luego, mediante el uso de palas, depositarlo dentro del moldaje. Para lograr la compacidad deseada y evitar la generación de nidos, se utilizó un vibrador estándar con una aguja de transmisión flexible de 3 m, el cual se introducía por alrededor de 20 a 30 segundo con un espaciamiento de 30 cm aproximadamente. El hormigonado fue realizado un día de lluvia por lo que la terminación de la superficie libre no fue lo esperado, preocupándose únicamente de dejar ras el hormigón. En la Figura 3.35 se muestra como ejemplo las probetas 9 y 11, 7 días luego del hormigonado que fue hecho el día 26 de mayo de 2012.

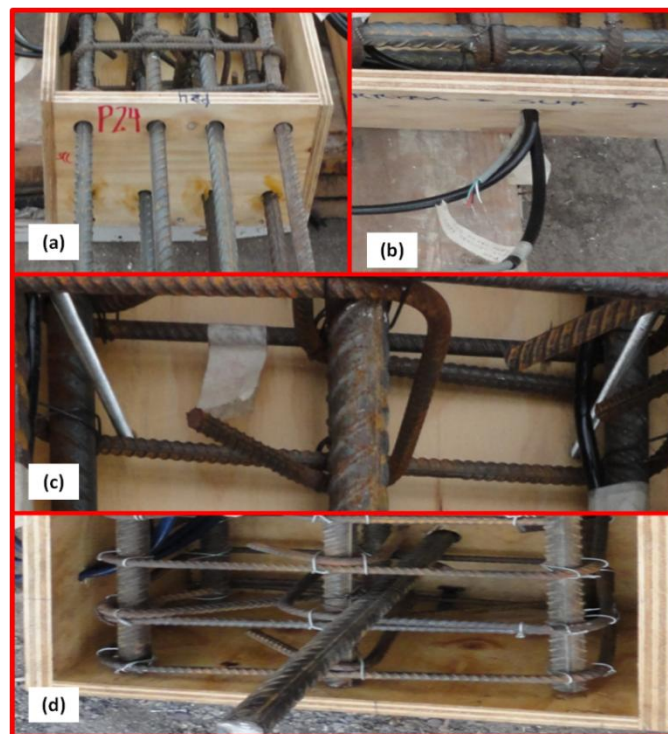


Figura 3.34 - (a) Barras pasadas para pre-tracción (b) Conectores Strain Gauges (c) Barras aluminio para LVDT (d) Barra  $\Phi 18$  auxiliar

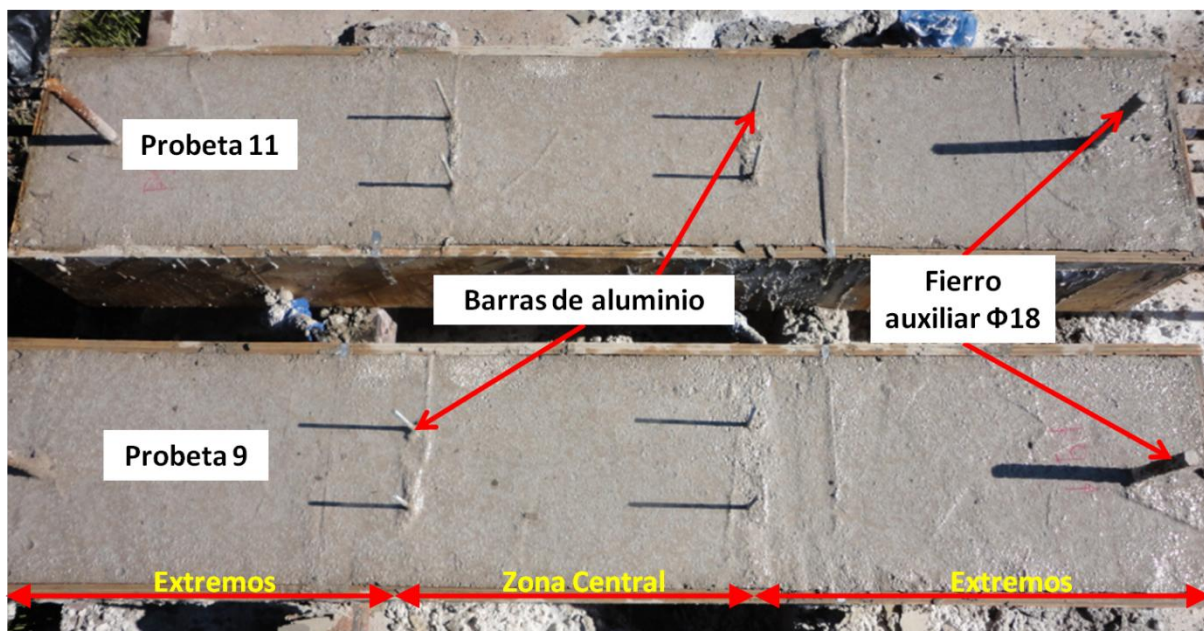


Figura 3.35 - Ejemplo probetas, 7 días luego del hormigonado

Finalmente el desmoldaje de las probetas se realizó, aproximadamente, 21 días después del hormigonado, notando que se logró la compacidad deseada, ya que sólo se observaron imperfecciones por pequeñas burbujas de aire. Además, se procuró verter agua sobre cada una de las probetas hormigonadas, de manera de lograr un mejor curado del elemento y evitar el agrietado excesivo de la superficie libre.

## Capítulo 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS

Luego de haber ensayado las 10 probetas de hormigón armado, sometidas a un esfuerzo de compresión pura, se generaron gráficos recopilando cada uno de los resultados de los sensores instalados. En este capítulo se mostrarán las comparaciones entre las probetas, tanto para el comportamiento carga deformación global, como para las deformaciones de los sensores internos y giro de la sección, para luego realizar un breve análisis según lo observado.

Con excepción de la probeta 12, todo el resto de las probetas fueron instrumentadas según lo descrito en la sección 3.4. Por esto, el comportamiento global de la probeta 12 será solo el obtenido con los sensores de desplazamiento ubicado en la zona central de la probeta. En este caso, no se puede generar la curva de carga versus giro de la sección, puesto que ésta se lograba mediante la instrumentación externa.

Para poder acoplar los resultados obtenidos con la instrumentación de la zona central y la externa, fue necesario ajustar las deformaciones de la probeta completa (instrumentación externa) a la zona de daño, mediante la estimación de la longitud de ésta. Esto es producto que cuando el elemento falla, las zonas donde no hay daño comienzan a descargar y las deformaciones se concentran en la longitud de daño. En la Figura 4.1 se muestra un esquema de lo que se consideró que ocurre en la sección luego de producida la falla.

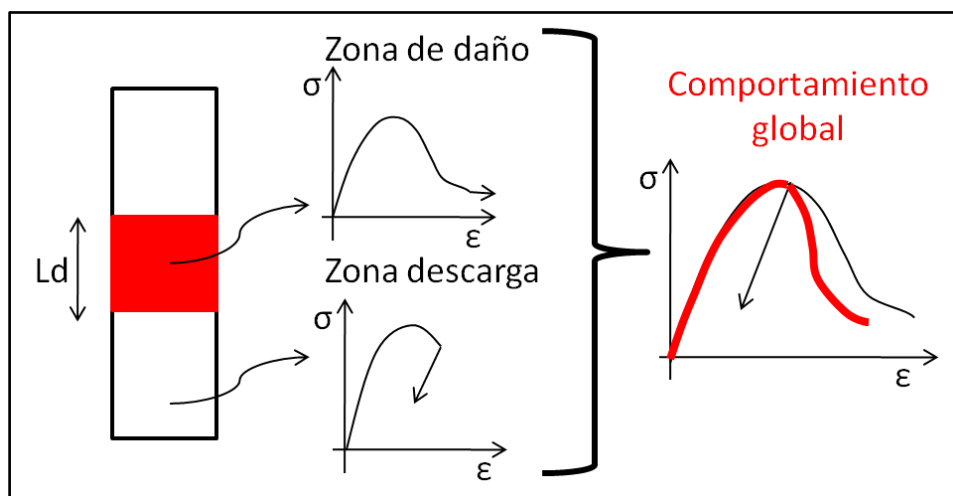


Figura 4.1-Esquema representativo comportamiento zona de daño y fuera de ella

El ajuste a la zona de daño se realizó considerando que la deformación total de la probeta, medida por la instrumentación externa, corresponde a la suma de las deformaciones fuera y dentro de la zona de daño. En las siguientes expresiones se muestra lo que se hizo para ajustar las deformaciones a la zona de daño, suponiendo una descarga lineal fuera de ella como lo muestra la Figura 4.1.

$$\delta_{total} = \delta_{daño} + \delta_{no\ daño} \quad (4.1)$$

$$\delta_{no\ daño} = \Delta\varepsilon \cdot L_{no\ daño} = \frac{\Delta\sigma}{\left(E_c \left(\frac{A_c}{A_g}\right) + E_s \left(\frac{A_s}{A_g}\right)\right)} \cdot L_{no\ daño}$$

$$L_{no\ daño} = L_{probeta} - L_{daño}$$

Luego,

$$\varepsilon_{daño} = \frac{\delta_{daño}}{L_{daño}} = \frac{1}{L_{daño}} \left[ \delta_{total} - \frac{\Delta\sigma}{\left(E_c \left(\frac{A_c}{A_g}\right) + E_s \left(\frac{A_s}{A_g}\right)\right)} \cdot L_{no\ daño} \right]$$

Según lo observado en los ensayos, la longitud de la zona de daño es un valor fijo para las probetas que va entre 35 a 40 cm, utilizando el mayor para el ajuste de la curva. La ubicación de ésta varía en los elementos que presentan confinamiento en la zona central, mientras que para las probetas que no tienen confinamiento, el daño es acotado al centro de ellas.

Luego, se generaron las curvas del comportamiento global de las probetas acoplando la curva ascendente, determinada con los LVDT de la zona central, con la curva descendente considerando el ajuste de las deformaciones a la zona de daño de la instrumentación externa. Esto fue necesario, porque los LVDT centrales pueden o no estar dentro de la zona de daño, por lo que sus registros, luego de la capacidad máxima, no siempre representan el comportamiento de dicha zona, mientras que la instrumentación externa registra la deformación total de la probeta (zona de daño y no daño), por lo que se tuvo que ajustar sus registros luego de la capacidad máxima.

## 4.1 Modelo de predicción escogido

Al haber obtenido las curvas del comportamiento de cada una de las probetas, se prosiguió con establecer cuál de los modelos descritos en la sección 3.1 era el que mejor se ajustaba a los resultados experimentales. Esta elección, se hizo calculando las diferencias, punto a punto, de tensión que presentaban cada uno de los modelos con respecto a los resultados, tanto en la curva completa como sólo en la máxima capacidad. La diferencia de tensión se realizó considerando la misma cantidad de punto en cada una de las probetas, hasta una deformación de 3% para el error total del comportamiento. Es importante mencionar que los modelos fueron generados considerando un valor de 40 [MPa] para la capacidad máxima del hormigón no confinado. Este valor se obtuvo de los ensayos de probetas cilíndricas obtenidas del hormigón utilizado en la construcción de los elementos de borde de muro.

En las probetas que tienen confinamiento en la zona central, el modelo establecido por Légeron y Paultre (2003) es el que mejor se ajusta, en términos del hormigón confinado, con excepción de la probeta 14 y 15, siendo el modelo propuesto por Mander et. al. (1988) el que presenta el menor error, y por ende, el que mejor representa el comportamiento. En la Figura 4.2 se muestra el error de cada modelo para cada probeta, apreciando lo antes mencionado.

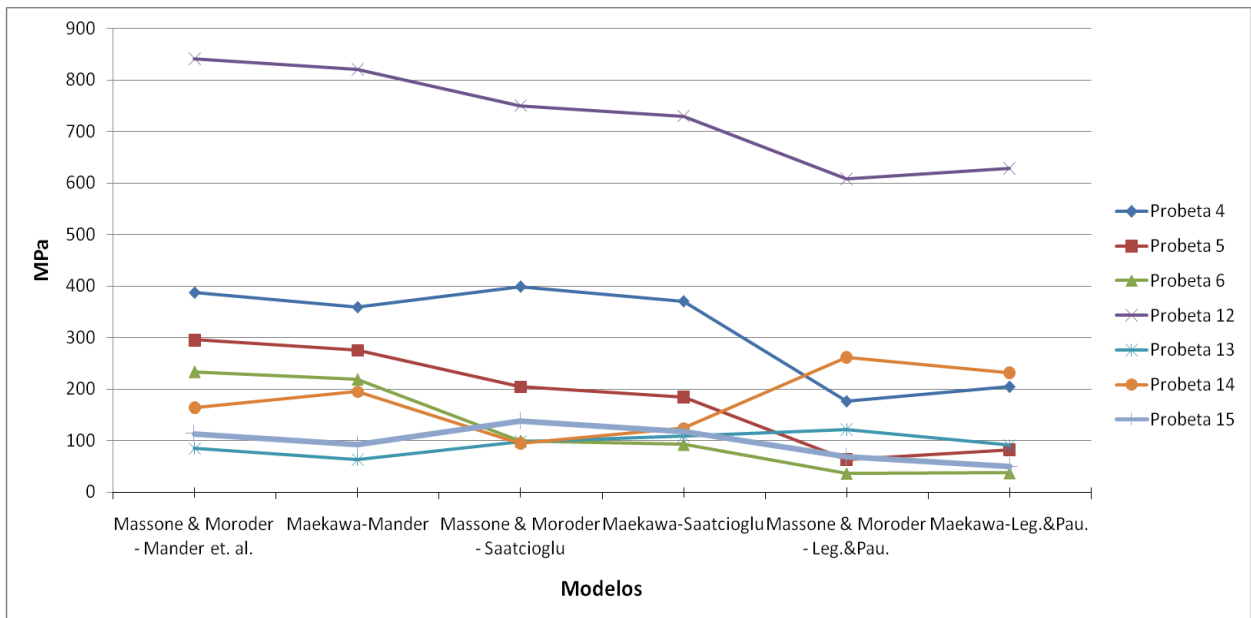


Figura 4.2- Error curva completa modelos por probeta

En la Figura 4.3 se muestra el error acumulado de cada uno de los modelos para las probetas con confinamiento. En ella se observa que el modelo de hormigón confinado que presenta el mejor ajuste corresponde al de Legeron y Paultre (2003) en conjunto con el del acero propuesto por Dhakal y Maekawa (2002), presentando solo una diferencia de 10 [MPa] con respecto al de Massone y Moroder (2009).

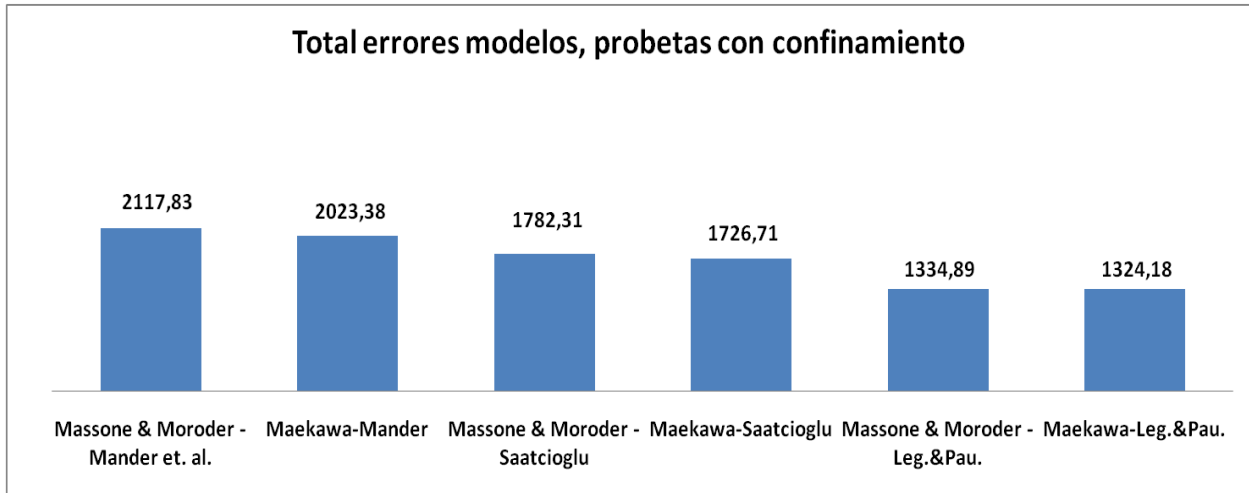


Figura 4.3 - *Error total modelos predictivos curva completa, en probetas con confinamiento*

Al realizar el cálculo de los errores en términos de la capacidad máxima de las probetas, se cumple una tendencia similar que al considerar la curva completa. En la Figura 4.4 se muestra el error de cada modelo en el peak de capacidad para cada probeta, mientras que en la Figura 4.5 la acumulación del error. En ellas se aprecia que es el modelo del hormigón confinado antes mencionado es el que se ajusta de mejor forma a los valores obtenidos en los ensayos, mientras que es el de Massone y Moroder (2009) el que hace lo propio para el acero.

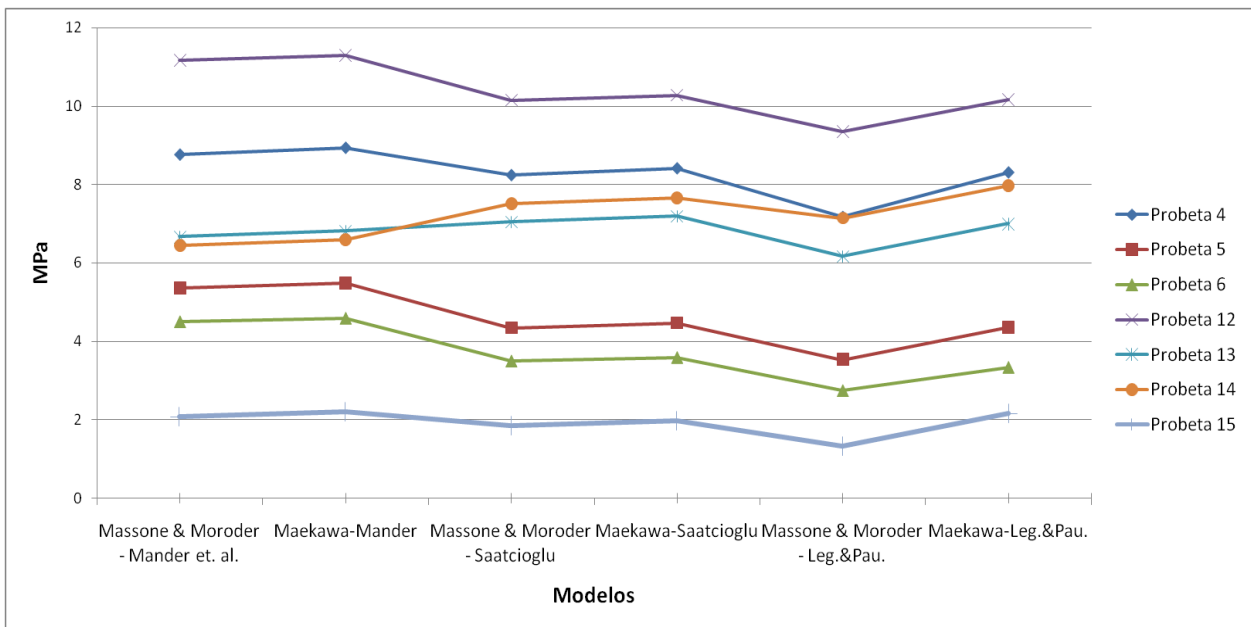


Figura 4.4- Error capacidad máxima por probeta

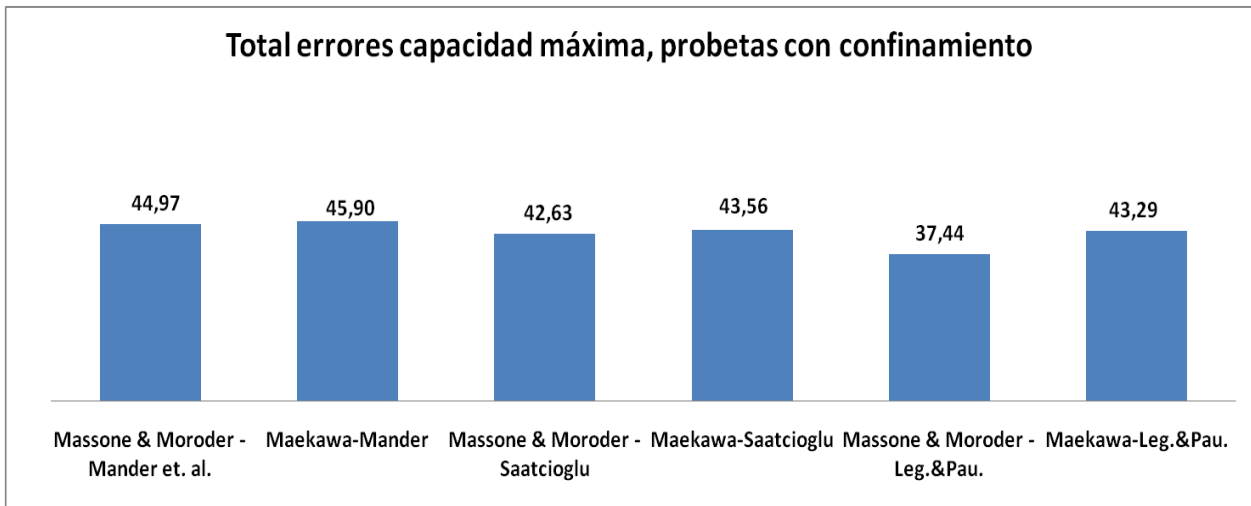


Figura 4.5- Error total modelos predictivos capacidad máxima, probetas confinadas

Por lo anterior, el modelo predictivo escogido para realizar las comparaciones del comportamiento global de las probetas corresponde al de Legeron y Paultre (2003) para el hormigón confinado y el de Massone y Moroder (2009) para el acero, producto que en conjunto son los modelos que menor error acumulan en términos de la capacidad máxima. Si bien el modelo escogido es el que menores errores presenta, los demás modelos no tuvieron un error drásticamente mayor en términos de la capacidad máxima, sino que al considerar la curva completa, es donde presentan mayores errores, producto de la diferencia en la degradación del elemento.



Ya con el modelo predictivo de mejor ajuste determinado, en la Tabla 4.1 se muestran los valores de las cargas máximas y las deformaciones asociadas a ellas, experimentales y del modelo, de cada una de las probetas. La deformación experimental asociada a la capacidad máxima, fue la obtenida con los LVDT ubicados en la zona central de la probeta, que son capaces de caracterizar el comportamiento antes de la falla del elemento.

Tabla 4.1 - *Capacidades y deformaciones ,experimentales y predictivas*

Probeta	$\epsilon$ peak experimental	$\sigma$ máx. experimental [Mpa]	$\epsilon$ peak modelo	$\sigma$ máx. modelo [Mpa]	$\epsilon$ mod/ $\epsilon$ exp	$\sigma$ mod/ $\sigma$ exp
1	0,0017	48,26	0,002	55,24	1,20	1,14
2	0,0022	50,47	0,002	51,00	0,90	1,01
3	0,0022	45,60	0,002	47,92	0,90	1,05
4	0,0019	49,18	0,002	55,89	1,05	1,14
5	0,0020	48,89	0,002	52,42	1,01	1,07
6	0,0021	47,71	0,002	49,71	0,97	1,04
12	0,0021	43,31	0,002	52,42	0,94	1,21
13	0,0023	45,54	0,002	51,64	0,88	1,13
14	0,0021	44,51	0,002	51,64	0,93	1,16
15	0,0024	51,32	0,002	52,42	0,85	1,02

De la Tabla 4.1, se aprecia que en las probetas que presentaban confinamiento las deformaciones a la máxima capacidad no presentan un aumento con respecto a las que no tienen confinamiento, lo que se puede deber a la influencia que tiene el giro en la respuesta global del elemento.

Excluyendo a la probeta 1, las deformaciones experimentales presentan variaciones menores al 15% con respecto a la predictiva, obteniendo valores superiores en la mayoría de los elementos. En términos de la capacidad máxima, sólo en las probetas 12 y 14 se obtuvo un valor menor en más de un 15%, sin superar en ninguna probeta la capacidad máxima predictiva.

En la Tabla 4.2 se muestra las fechas de hormigonado y ensayo de cada probeta, como también los días de maduración del hormigón.

Tabla 4.2 - *Días de maduración del hormigón*

Probeta	Fecha hormigonado	Fecha ensayo	Maduración aproximada (días)
1	26/05/2012	26/10/2012	150
2	26/05/2012	22/09/2012	116
3	26/05/2012	26/09/2012	120
4	26/05/2012	24/09/2012	118
5	26/05/2012	31/08/2012	95
6	26/05/2012	20/09/2012	114
12	26/05/2012	20/07/2012	54
13	26/05/2012	11/10/2012	135
14	26/05/2012	13/10/2012	137
15	26/05/2012	01/10/2012	125

## 4.2 Forma de falla observada

Producto de no restringir el giro en las probetas y por diferentes factores, las formas de falla de ellas no fue la misma para todas, comenzando las grietas en distintas zonas y propagándose hacia distintas direcciones. A pesar de esto, las fallas presentaron ciertas características representativas en todas las probetas. Así, en esta sección se realizará una descripción general, para luego detallar el lugar y forma de falla en cada una de las probetas.

En general, el comienzo de la falla comenzó luego de llegar a la máxima carga, comenzando con la pérdida del recubrimiento, para luego seguir con desprendimientos notorios de hormigón, dejando al descubierto las barras longitudinales, comenzando a pandearse entre estribos consecutivos. Ya al llegar a deformaciones mayores, se apreciaron deformaciones fuera del plano de la probeta, lo que generó un pandeo representativo del refuerzo longitudinales, el cual presentó una forma de S, tendiendo la parte inferior y superior de la falla a inclinarse hacia diferentes sentidos. A este nivel, el pandeo de las barras ocurrió abarcando más de dos estribos, notando que los ganchos centrales con un ángulo de 90° se abrieron por completo dejando sin restricción a las barras centrales. Esta descripción se muestra en la Figura 4.6, donde se presenta una secuencia de la falla.

En las probetas sin confinamiento en la zona central, la falla presentó aspectos diferentes. Ésta fue más frágil, ocurriendo el pandeo de las barras longitudinales poco después de llegar a la

capacidad del elemento, sin presentar una forma de S, sino un estándar entre los estribos externos, sin notar un giro en la sección y por ende, sin moverse en sentidos opuestos ambos extremos de la probeta. Una representación de los dos tipos de falles se muestra en la Figura 4.7.

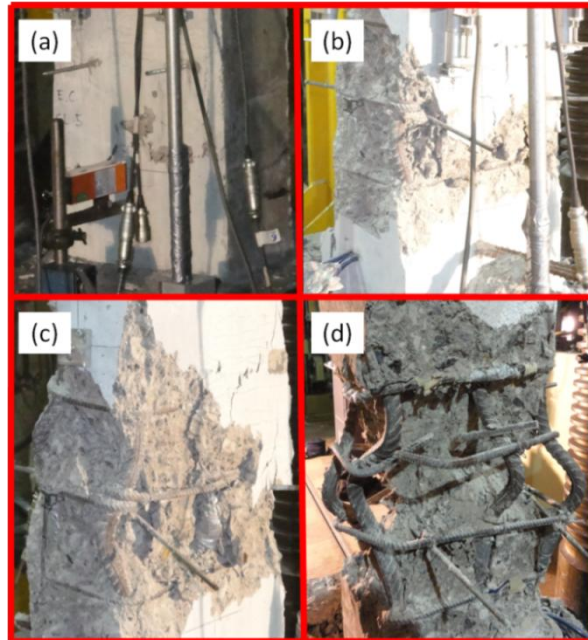


Figura 4.6- *Secuencia forma de falla (a) Desprendimiento hormigón perimetral (b) Desprendimiento notorio de hormigón y pandeo entre estribos (c) Pandeo en forma de S de barras longitudinales (d) Pandeo a través de más de dos estribos y abertura de ganchos*

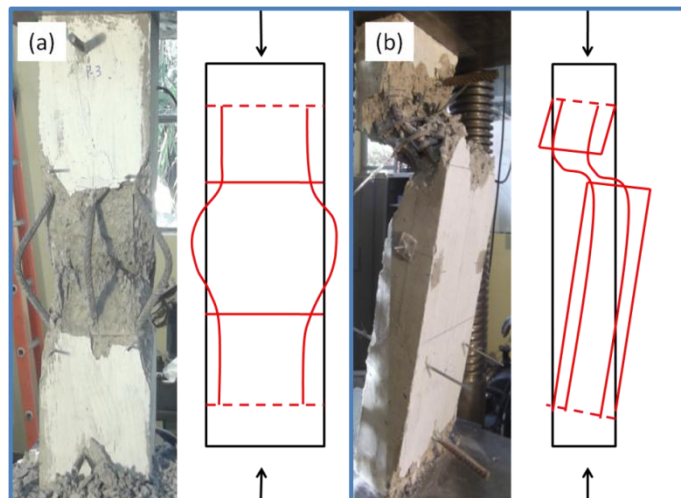


Figura 4.7 - *Esquema representativo forma de falla (a) Probetas no confinadas (b) Probetas confinadas*

Ya con la descripción general de falla ocurrida en los elementos, a continuación se detalla el lugar y forma de propagación en cada una de las probetas, mostrando una imagen marcando el lugar donde se ubicaron la instrumentación del acero.

- Probeta 1: La grietas comenzaron en el límite superior, entre la zona central y los extremos de la probeta, propagándose rápidamente hacia el centro. Luego se genera el pandeo de las barras longitudinales acotado en la parte central, entre estribos, teniendo algún daño fuera de la parte central, en la zona superior.

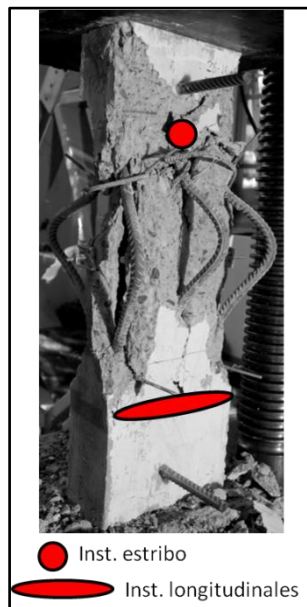


Figura 4.8- *Falla probeta 1*

- Probetas 2 y 3: La falla se concentró plenamente en la zona central, comenzando con un agrietamiento, dejando las barras longitudinales sin recubrimiento. Luego, se produce el pandeo local de ellas entre los estribos extremos, dejando el núcleo de hormigón sin sustento produciéndose una degradación brusca.

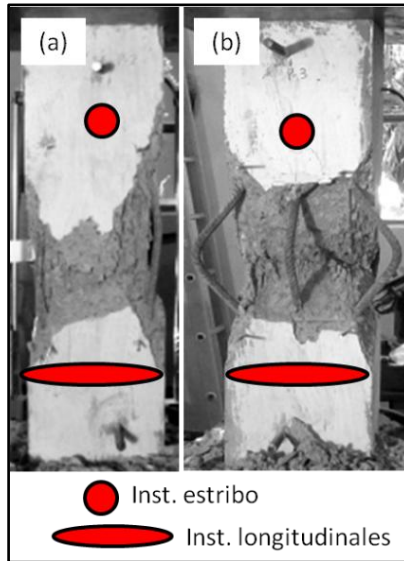


Figura 4.9 - (a) *Falla probeta 2* (b) *Falla probeta 3*

- Probeta 4: La falla en esta probeta comenzó en la parte superior de ella, donde estaba ubicado el estribo exterior instrumentado, propagándose hacia la zona central luego de llegar a su máxima capacidad, con una grieta diagonal, generando una falla en forma de cuña desde una cara hacia la otra. Por esto, se esperaría que el estribo exterior instrumentado mostrara grandes deformaciones durante todo el ensayo, mientras que las barras longitudinales descarguen luego del peak de carga.

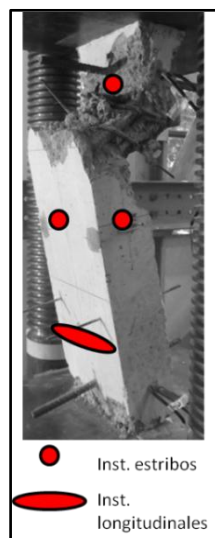


Figura 4.10- *Falla probeta 4*

- Probeta 5: Las grietas de la probeta comenzaron en la parte inferior, en la posición donde se encuentran instrumentadas las barras longitudinales, propagándose mediante una grieta diagonal hacia la zona central, abarcando una amplia zona de daño. De todas maneras, la concentración del daño fue en la zona inferior produciéndose la mayor cantidad de pandeo de barras longitudinales.

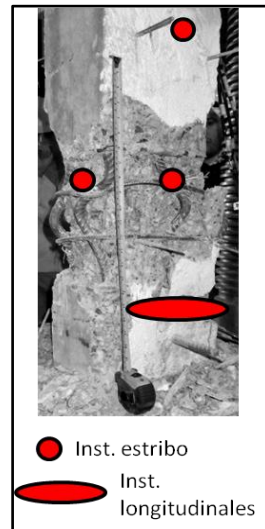


Figura 4.11- *Falla probeta 5*

- Probeta 6: La falla se propaga desde la zona exterior, en la ubicación del estribo instrumentado, hacia la parte central de la probeta teniendo una zona de daño algo mayor que en las probetas de sección menor. Se apreciaron ganchos y estribos que se abrieron con una alta degradación del elemento.

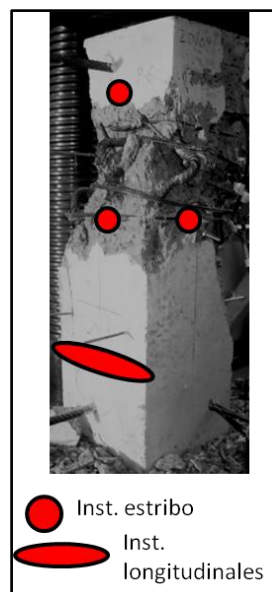


Figura 4.12- *Falla probeta 6*

- Probeta 12: Esta es la probeta más alta ensayada (1.6 m). La falla comenzó en la parte superior sin presentar una propagación clara hacia el centro, concentrándose el daño en la zona de transición entre el centro y extremo de la probeta.

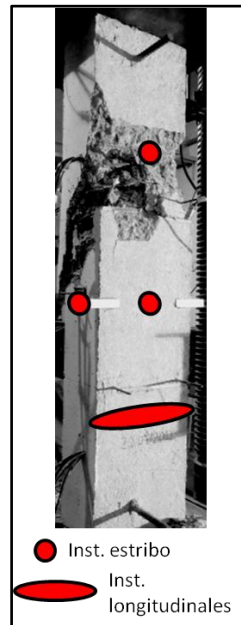


Figura 4.13- *Falla probeta 12*

- Probeta 13: La falla comienza en la zona central del elemento, propagándose levemente hacia una esquina inferior del elemento, para luego concentrarse plenamente en la parte inferior de la probeta. Por ello, el estribo exterior no debería generar grandes deformaciones.

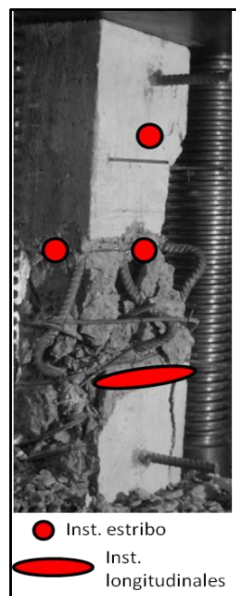


Figura 4.14- *Falla probeta 13*

- Probeta 14: Esta probeta comenzó su falla muy en el extremo de la zona exterior, casi en el límite de la placa de carga de la máquina. Luego se propaga hacia el centro, en la cara opuesta, estirándose los estribos exteriores hasta abrirse, al igual que los ganchos de esa zona.

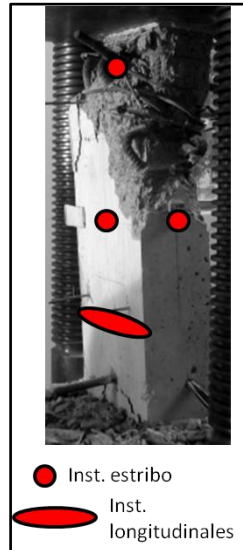


Figura 4.15- *Falla probeta 14*

- Probeta 15: En ésta probeta, la falla se concentra plenamente en la parte inferior, en el lugar donde están las barras longitudinales instrumentadas, sin presentar una propagación notoria hacia el centro. Las barras longitudinales se pandearon pronunciadamente, principalmente, entre estribos consecutivos, dejando estribos completamente abiertos hacia el final del ensayo.

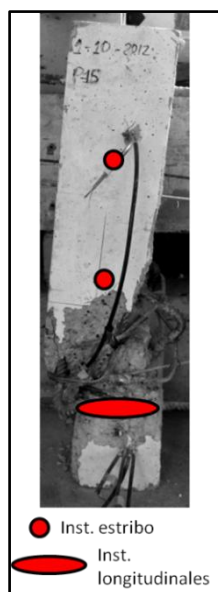


Figura 4.16- *Falla probeta 15*



### 4.3 Curvas tensión deformación

Con los ensayos de las 10 probetas, se generaron las comparaciones entre probetas con variables comparables, como el tipo de confinamiento, espaciamiento de estribos en zona central y la geometría de la sección. En la Figura 4.17 se muestra el comportamiento global de las probetas sin confinamiento, junto con el modelo predictivo escogido antes mencionado. En el Anexo E se muestran los otros modelos predictivos.

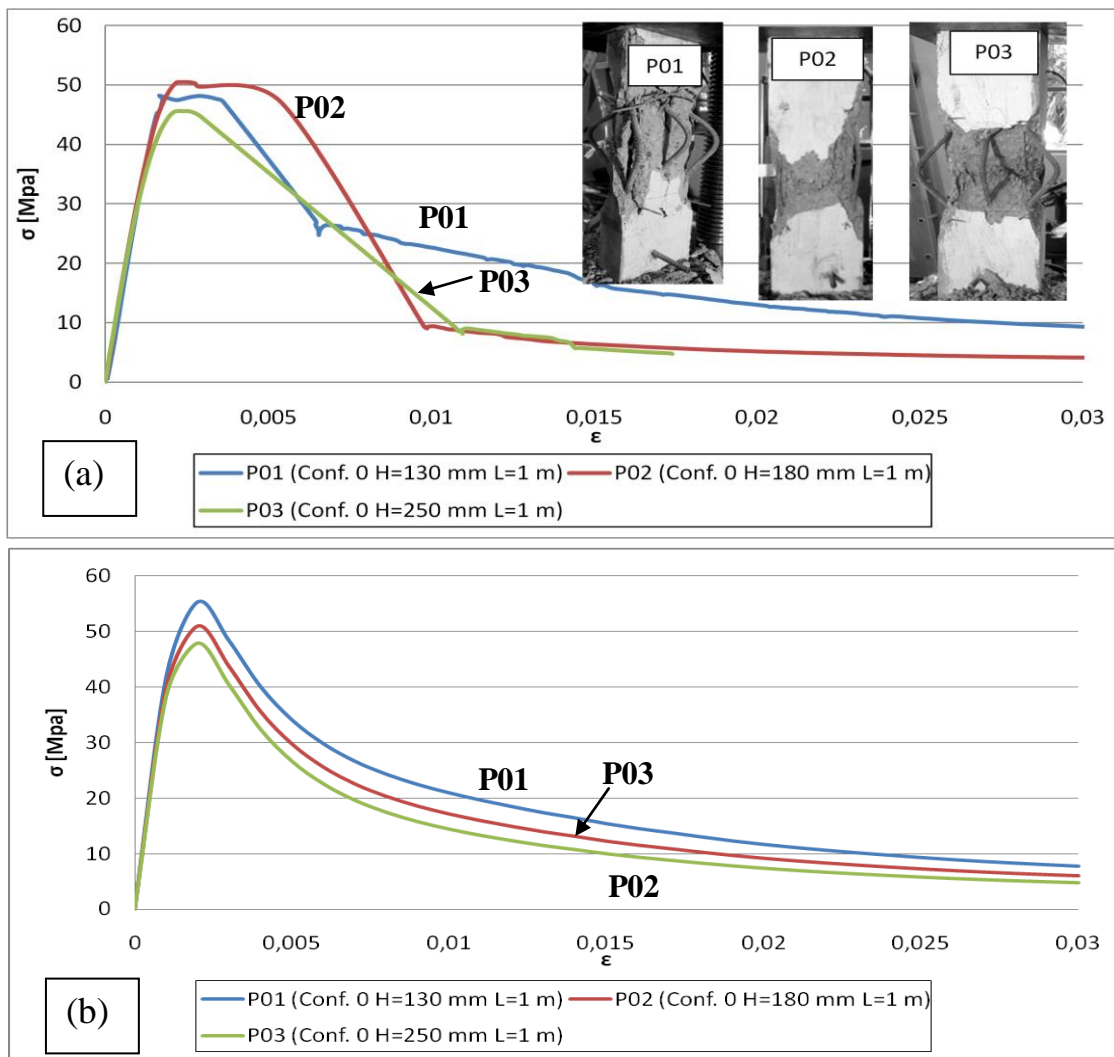
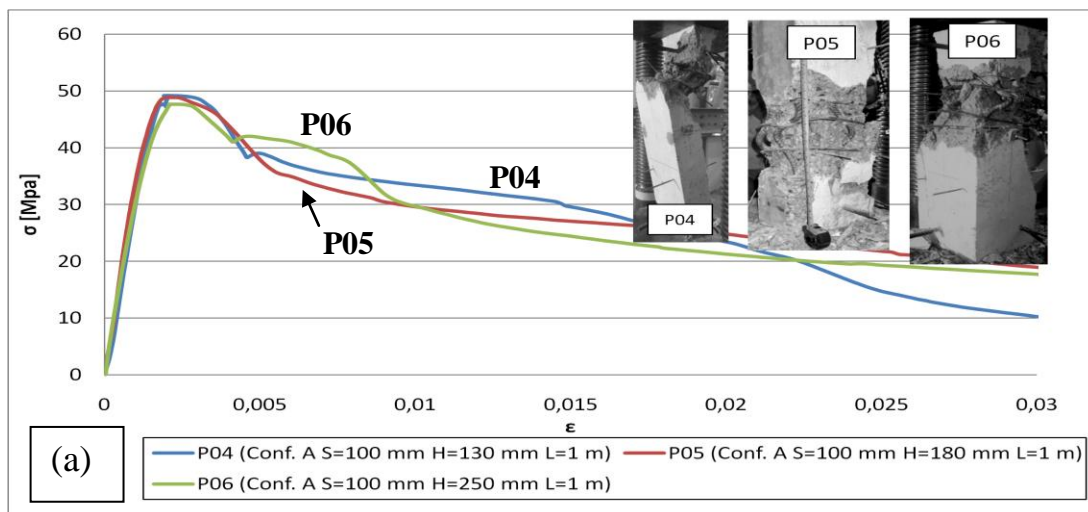


Figura 4.17-(a) Resultados probetas sin confinamiento de diferente sección (b) Predicción mejor ajuste

Primero se debe mencionar, que producto que las probetas no tienen confinamiento en la zona central, luego de llegar al peak de su capacidad, se produce una degradación muy brusca de ésta, sin tener registros entre ambos puntos en algunos casos. Por ello en las tres probetas se observa un descenso lineal de la capacidad, el cual puede no corresponder al comportamiento real del elemento. Esta degradación brusca se debe a que la relación de aspecto de las barras de acero en la zona central, es mayor a 20, pudiendo ocurrir un pandeo casi elástico del acero cercano a la fluencia del refuerzo, produciéndose una falla frágil, dejando al hormigón central sin capacidad de soporte. La forma de falla que presentaron las probetas, corresponde a un agrietamiento en la zona central propagándose rápidamente, sin mayores giros de la sección.

También se observa que no se ajusta el orden de las probetas en los peak de la capacidad, teniendo un comportamiento anómalo la probeta 2, generando 2 peak en su capacidad y siendo la que logra llegar a la mayor tensión. A pesar de esto, la degradación de las probetas 2 y 3 presenta un ajuste con la predicción, degradando un 50% cercano al cinco por mil de deformación, al igual que en el modelo. La probeta 1 presentó una degradación más paulatina y sobre la esperada según el modelo predictivo, esto se puede deber a que la falla no se concentró en su totalidad en la zona central, abarcando parte de la zona superior en donde si hay un confinamiento, permitiendo una degradación más prolongada.



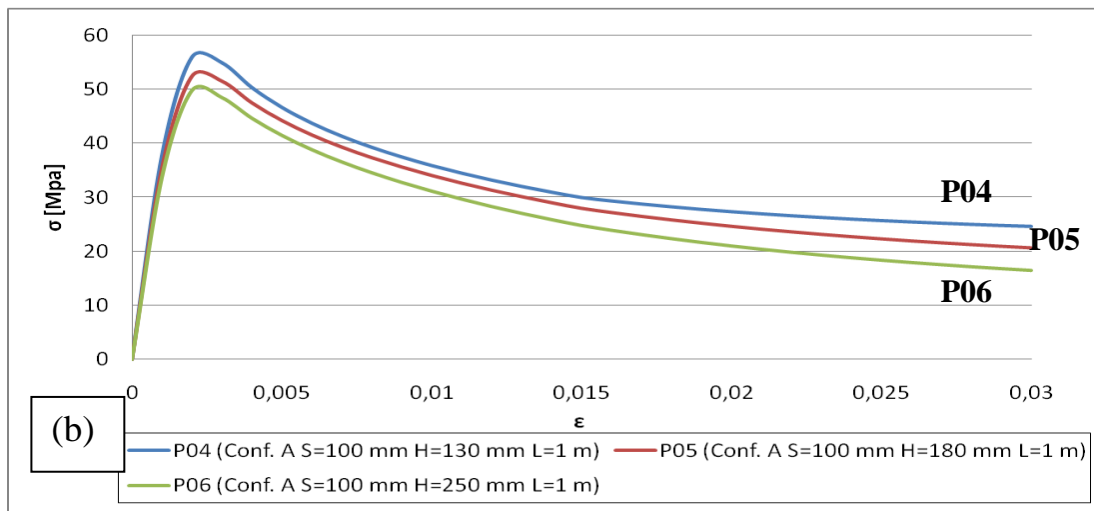


Figura 4.18- (a) Resultados probetas con confinamiento A de diferente sección (b) Predicción mejor ajuste

En la Figura 4.18 se observa que las tres probetas con igual confinamiento, pero con una sección distinta, llegan a un peak de tensión prácticamente igual, con cierta diferencia en la probeta 6 que presenta un valor levemente menor, lo que se condice con lo esperado, por la mayor sección que ésta tiene. A la vez, para secciones diferentes el confinamiento no presenta una influencia notoria en la degradación de la sección, presentando un comportamiento similar en la curva descendente, como también lo establece la predicción, en la cual las diferencias entre probetas son menores.

En la probeta 6 se aprecia un aumento en la capacidad luego de llegar al peak y comenzar la degradación, lo que puede deberse a cierto ajuste de la sección luego de agrietarse, logrando tomar más carga. A pesar de esto, las tres probetas presentan un buen ajuste con la predicción, llegando ambas, a una degradación de aproximadamente 50% con una deformación del 2%.

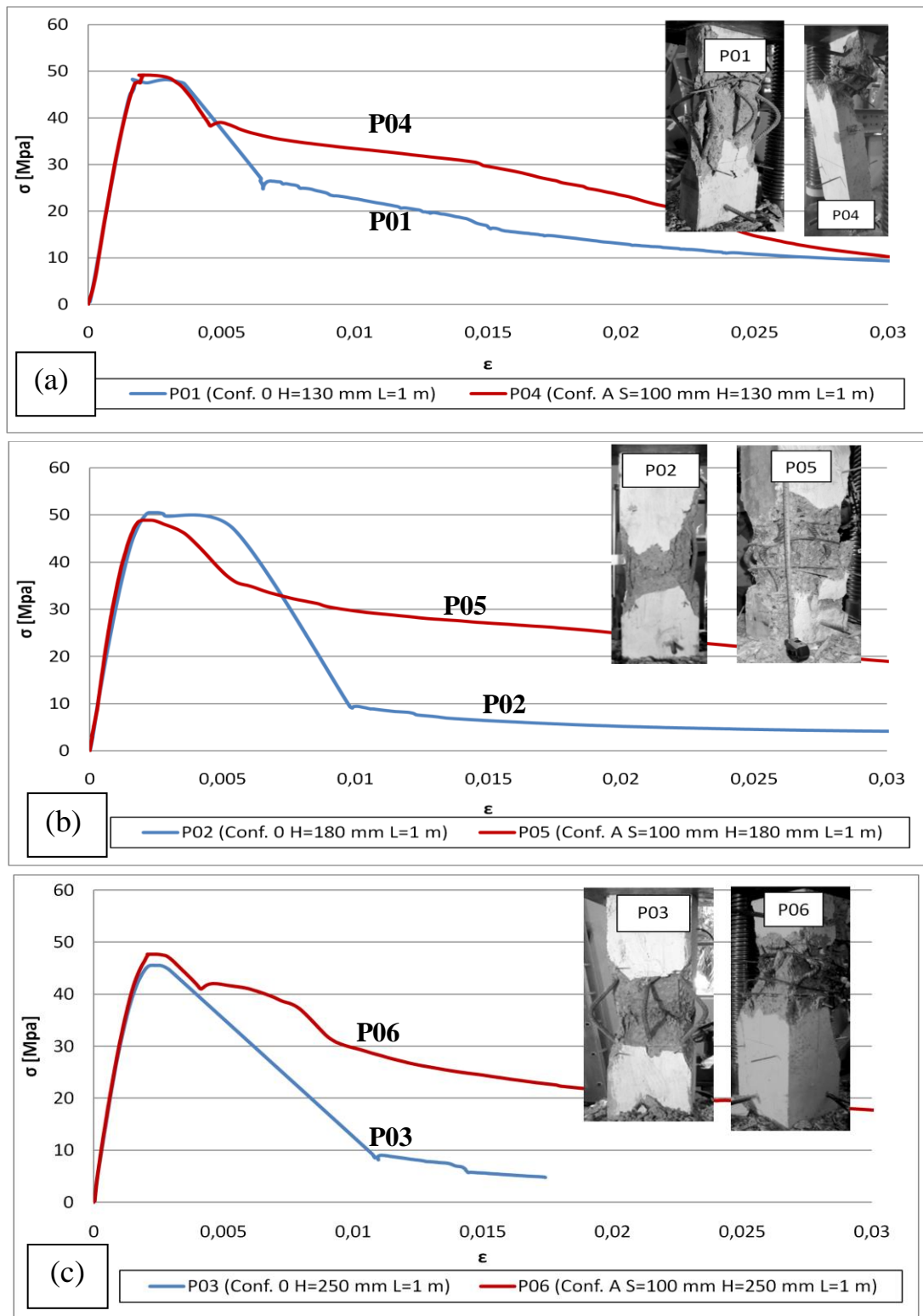


Figura 4.19-Comparaciones probetas confinadas y no confinadas de diferentes anchos (a) Ancho 130 mm (b) Ancho 180 mm (c) Ancho 250 mm

Observando la Figura 4.19 se establece que como era de esperar, las probetas que tienen confinamiento en la zona central presentan una capacidad de deformación mayor que las sin confinamiento. No obstante, no presentan un peak de capacidad de carga notoriamente superior, y por ende, tampoco un nivel de deformación asociado mayor. En la Figura 4.20 se presentan las predicciones de los ensayos mostrados en la Figura 4.19, en los cuales tampoco se observan capacidades visiblemente superiores en las probetas confinadas.

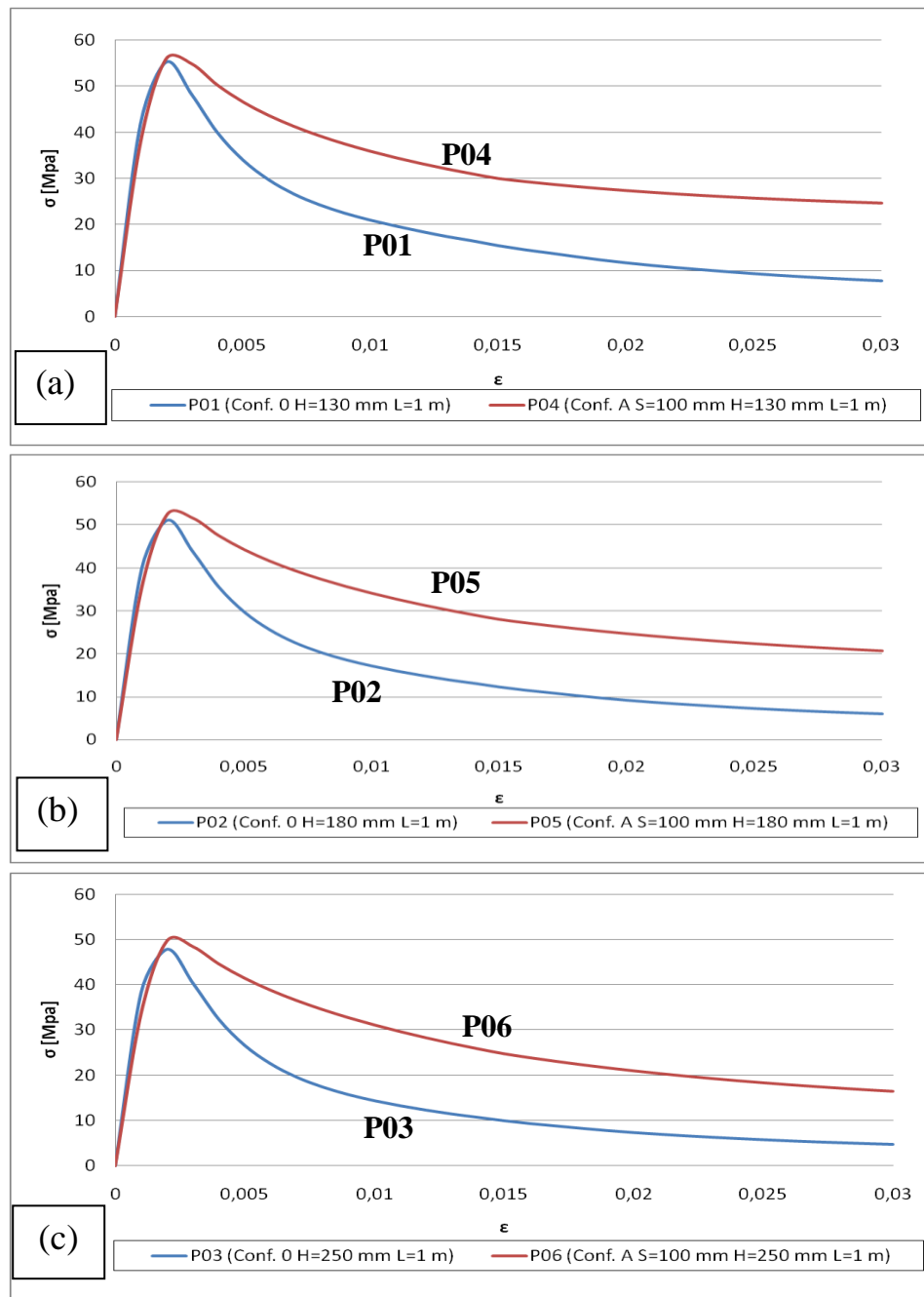


Figura 4.20- Predicción probetas confinadas y no confinadas de diferentes anchos (a) Ancho 130 mm (b) Ancho 180 mm (c) Ancho 250 mm

En las siguientes figuras se muestran las comparaciones de las otras variables en estudio, como el tipo de acero, espaciamiento en zona central y largo de la probeta. En la Figura 4.21 se comparan los resultados obtenidos en las probetas con diferentes espaciamientos en la zona central, pero con un acero de la misma calidad, siendo la (a) para un acero A630-420 y la (b) un A440-280.

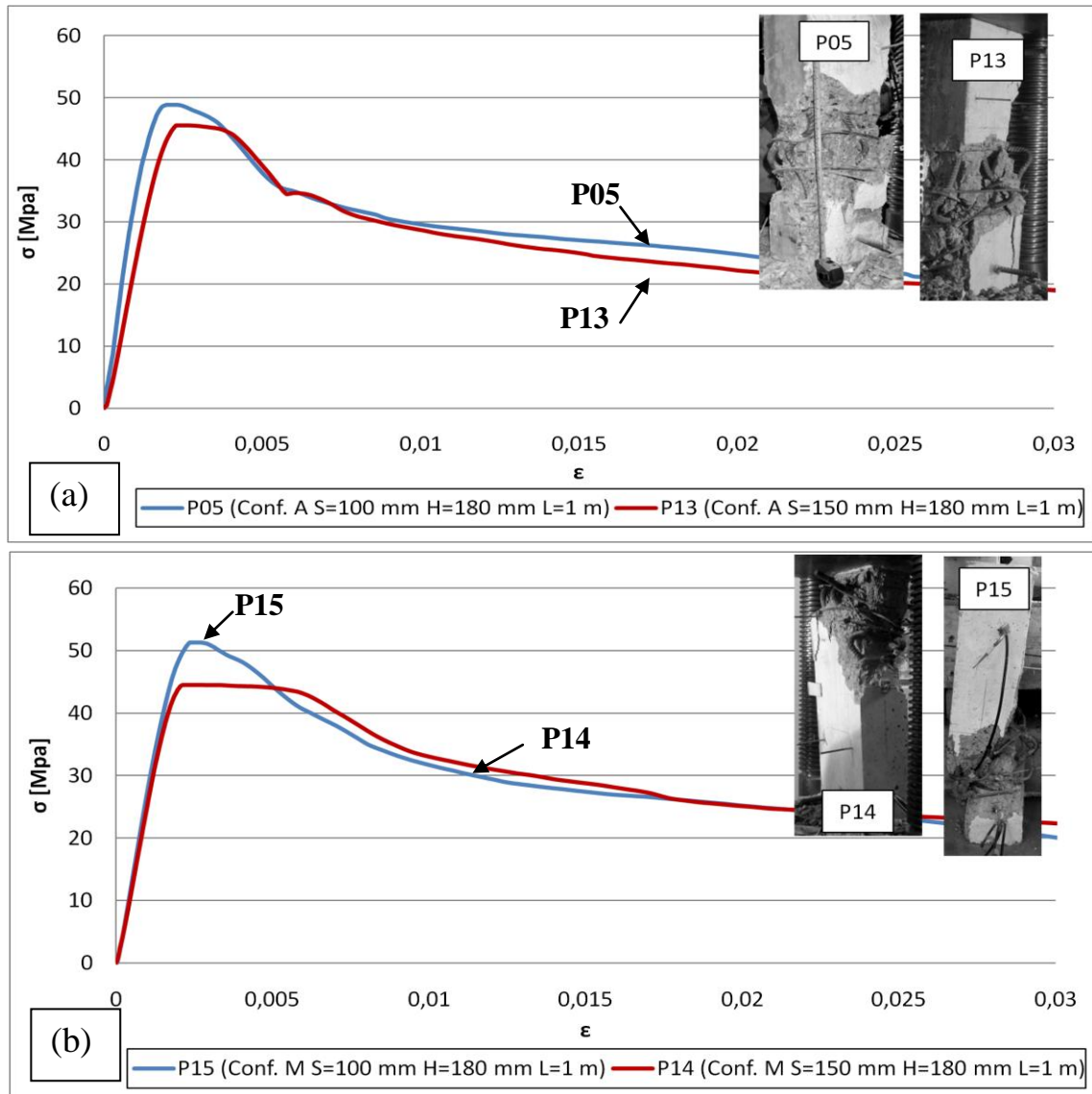
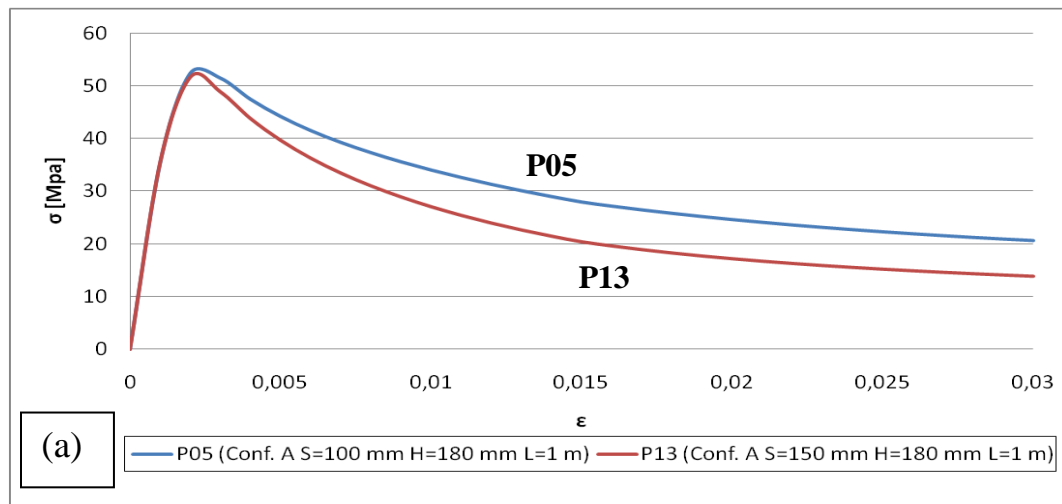


Figura 4.21-Resultados diferente espaciamiento zona central (a) Acero A630-420 (b) Acero A440-280

Primero se observa en la Figura 4.21a, que para las probetas con una calidad de acero A630-420, las rigideces iniciales difieren, presentando un mayor valor aquella probeta que tiene un menor espaciamiento. A la vez, la misma probeta logra llegar a una capacidad de carga mayor,

lo que era esperado por el mayor nivel de confinamiento de ésta al tener un menor espaciamiento de los estribos en la zona central. Ahora bien, en las probetas con otra calidad de acero, no se produce una diferencia en la rigidez del elemento, pero nuevamente la probeta con un espaciamiento menor llega a una capacidad de carga mayor. En la zona de degradación, en ambos casos, no existe diferencia entre ambas probetas, degradando de manera similar, lo que se puede deber a que la falla no se produce completamente en la zona central, abarcando estribos externos que presentan igual espaciamiento. A la vez la degradación para ambas calidades de acero es prácticamente igual, desprendiéndose que la diferencia en el acero no establece una mayor capacidad de deformación.

Observando la predicción de las probetas, mostrada en la Figura 4.22, y comparándolo con los resultados mostrados en la Figura 4.21, se puede notar que el comportamiento de las probetas luego del peak, presenta un comportamiento similar al que tiene una con un espaciamiento de 100 mm. Esto se explica porque en todas las probetas, la falla no se produjo 100% en la zona central, por lo que en la respuesta se vieron involucrados espaciamientos menores a 150 mm, generando una respuesta más semejante a la esperada con un espaciamiento menor. Por ejemplo, la probeta 14 a un nivel de deformación del 1% la tensión difiere en menos de un 5% que el valor predictivo de la probeta 15, que corresponde al valor esperado para un espaciamiento de 100 mm.



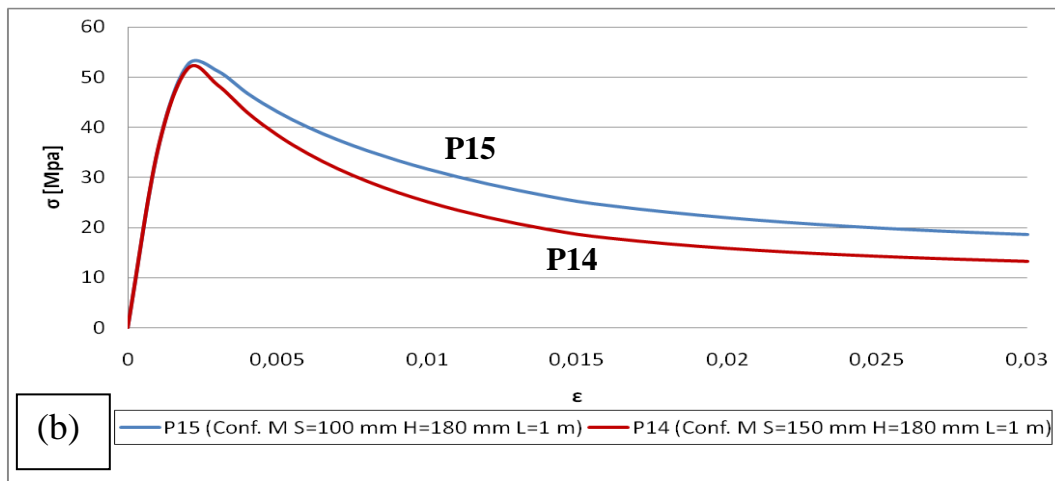


Figura 4.22- Predicción diferentes espaciamentos (a) Acero A630-420 (b) Acero A440-280

En la Figura 4.23 se muestran las comparaciones entre los resultados obtenidos para probetas con diferente calidad de acero, pero con un espaciamento en la zona central igual. En ella se observa, que la diferencia en la calidad del acero no influye en la capacidad de carga del elemento, presentando un leve aumento de este en la probeta 15, que estaba compuesta por el acero de menor capacidad. A pesar de esto la probeta 15 en la zona de degradación, presenta valores comparativos con la probeta 5, que estaba armada con un acero de mayor calidad, pero con el mismo espaciamento. Esto se puede deber a que la probeta 15 presentó una falla concentrada fuera de la zona central, es decir, en el lugar donde presentaba un acero de la misma calidad y espaciamento que la probeta 5. A la vez, como se mostrará más adelante, en general, los estribos no logran llegar a la fluencia en el peak de la capacidad, por lo que el nivel de confinamiento que se puede generar con calidades de acero diferentes no debería presentar valores extremadamente distintos en el peak de capacidad.



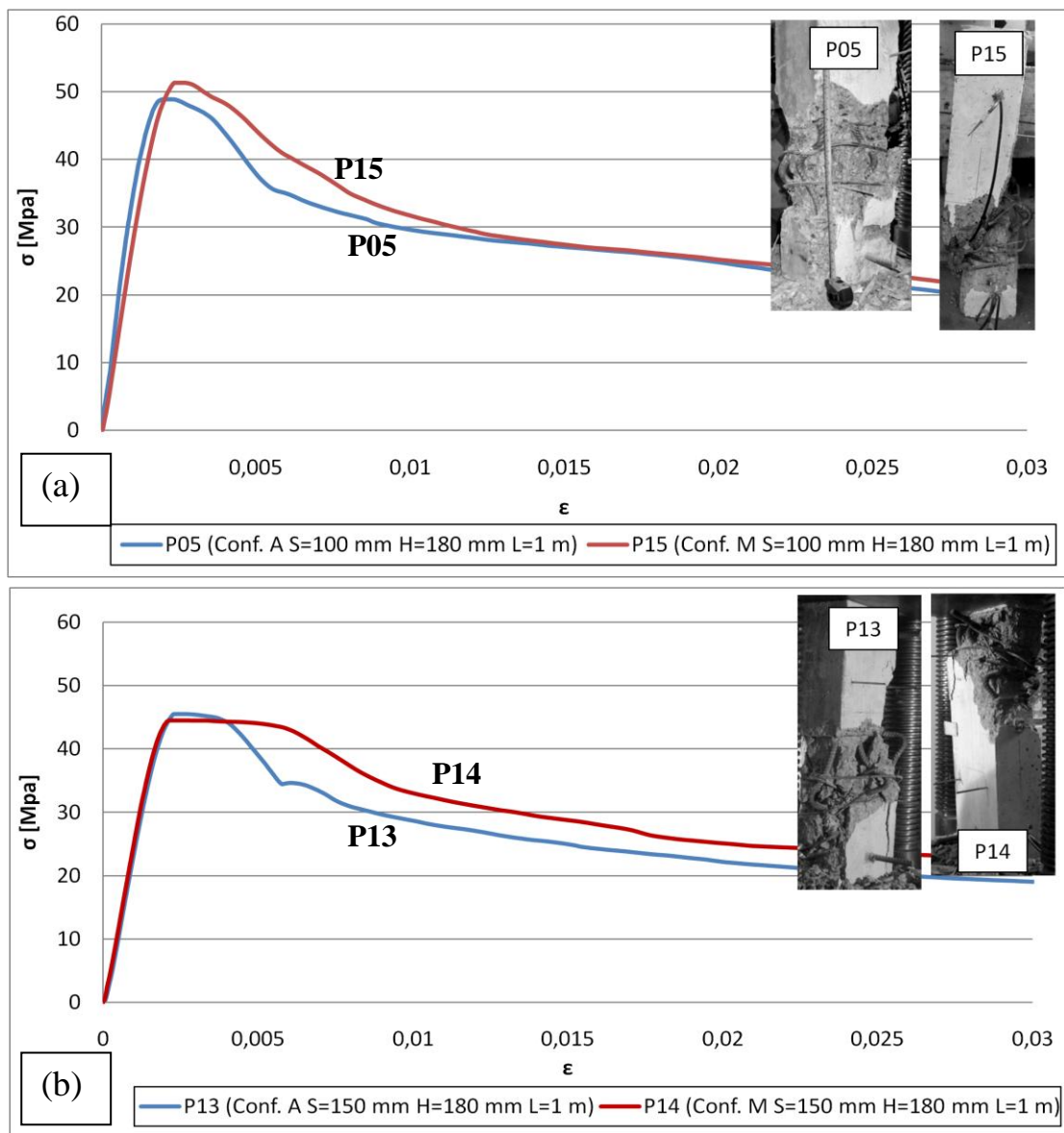


Figura 4.23 -Resultados diferentes tipo de acero con igual espaciamento (a)  $S=100\text{ mm}$  (b)  $S=150\text{ mm}$

Por otra parte, en la fotografía de la probeta 14 de la Figura 4.23, se aprecia que la falla se concentró en un extremo de la probeta, es decir, en la zona donde estaba armada con la calidad de acero A630-420 y con un espaciamento menor a 150 mm. Esto puede explicar que la degradación que presenta es menor que la de la probeta 13 la cual, observando su fotografía, falló en mayor medida en la zona central involucrando un acero de menor calidad y con un espaciamento mayor.

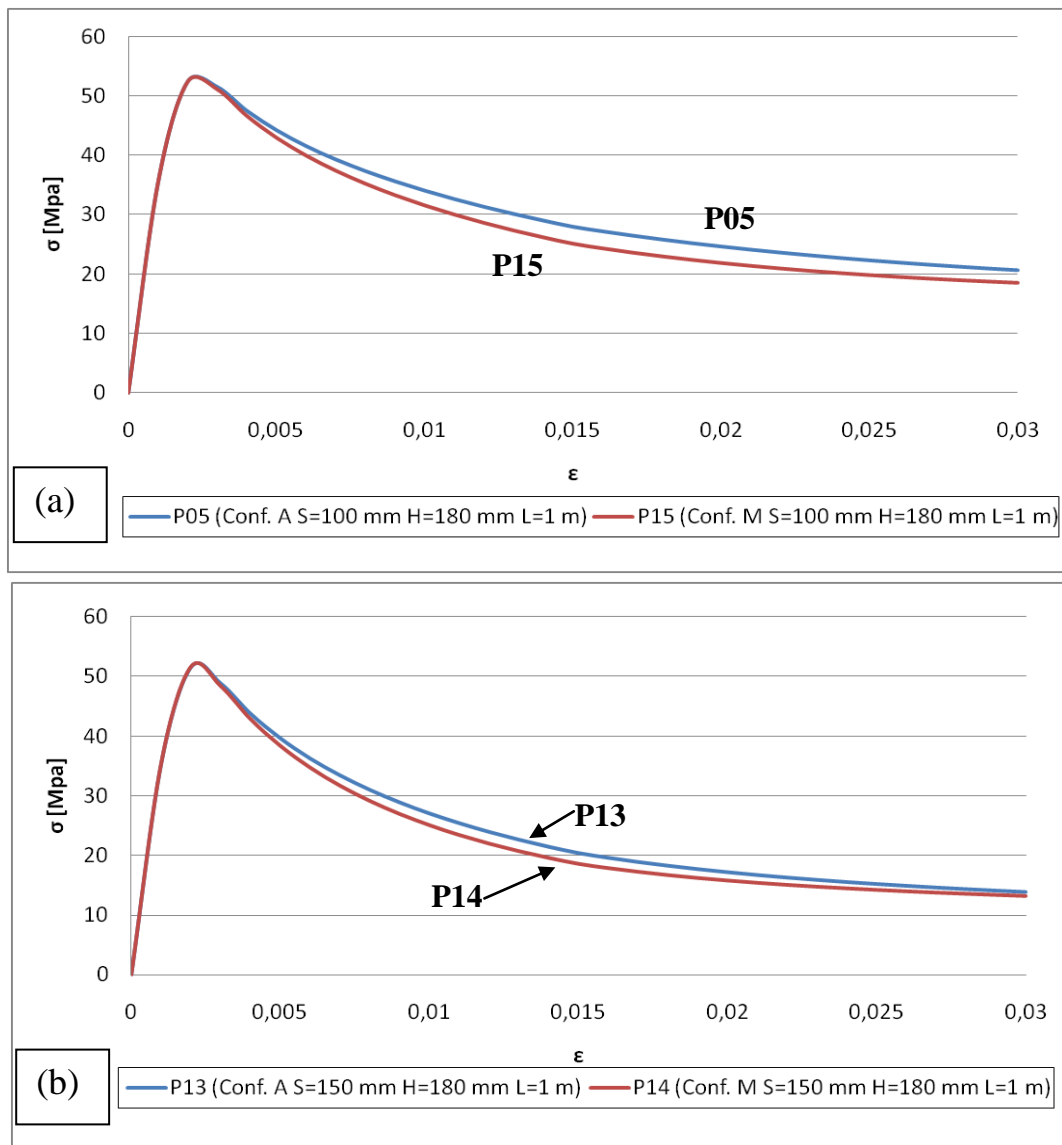


Figura 4.24 - Predicción *diferentes tipo de acero con igual espaciamiento* (a)  $S=100$  mm (b)  $S=150$  mm

Observando las predicciones (Figura 4.24) y los resultados de las probetas en la Figura 4.23 se puede corroborar el hecho de que la respuesta obtenida, para un espaciamiento de 150 mm, fue más semejante a la esperada para un espaciamiento menor y con un acero de mejor calidad, como se muestra en la Figura 4.24a, producto de la propagación de la falla fuera de la zona central. A la vez, se puede notar que el aumento en la calidad del acero no genera una respuesta con mayor capacidad de degradación, siendo prácticamente iguales los comportamientos para los diferentes aceros.

En la Figura 4.25 se muestra la comparación entre las probetas que presentan un 50% de diferencia en el espaciamiento y en la calidad de acero, que se esperaba que presentaran valores similares en su comportamiento producto del aumento en la calidad del acero y una disminución del confinamiento por un mayor espaciamiento.

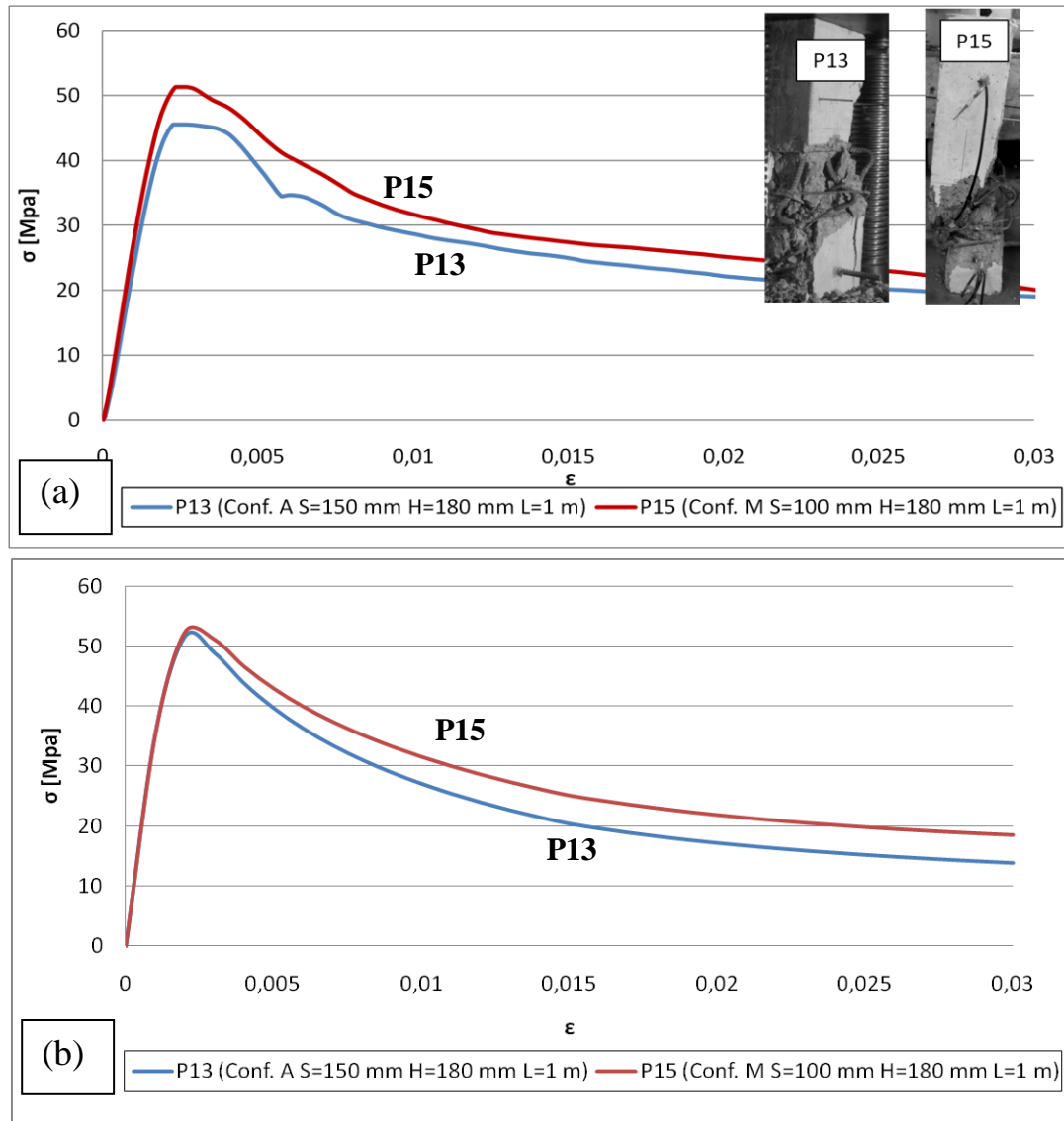


Figura 4.25 - Probetas con 50% de diferencia en acero y confinamiento (a) Resultados (b) Predicción

En términos del peak de capacidad, la probeta 15 presenta un valor mayor entre un 5 y 10% con respecto al valor de la probeta 13, mientras que un buen ajuste con la predicción. A pesar de esto, ambas probetas luego del peak tuvieron una degradación similar, manteniendo la diferencia inicial de la tensión. La probeta 15 presenta una degradación inicial brusca,

manteniendo una descarga controlada y con valores con menos de un 5% de diferencia con su predicción para deformaciones del 0.5, 1, 1.5 y 2%. Por último la probeta 13 tuvo una degradación diferente a la predicha, debiéndose esto, en parte, a que la falla no se produjo totalmente en el centro de la probeta, notando que presenta valores mayores que el comportamiento esperado.

Finalmente, en la Figura 4.26 se muestra el comportamiento de dos elementos con igual confinamiento en la zona central, pero de diferente longitud. En ella se observa que el elemento más esbelto (probeta 12) presentó una capacidad menor que la del elemento más corto, lo que se debe a que, al no restringir la deformación fuera del plano, la probeta de mayor longitud tiende a tener un mayor giro, lo que se traduce en una disminución de su capacidad máxima. También se aprecia que la probeta más esbelta, tuvo una rigidez inicial menor. En términos de la degradación no se puede comentar, ya que el registro mostrado de la probeta 12 es sólo el obtenido por los sensores de la zona central, y como la falla no se concentró en dicha zona no representa el comportamiento de degradación del elemento.

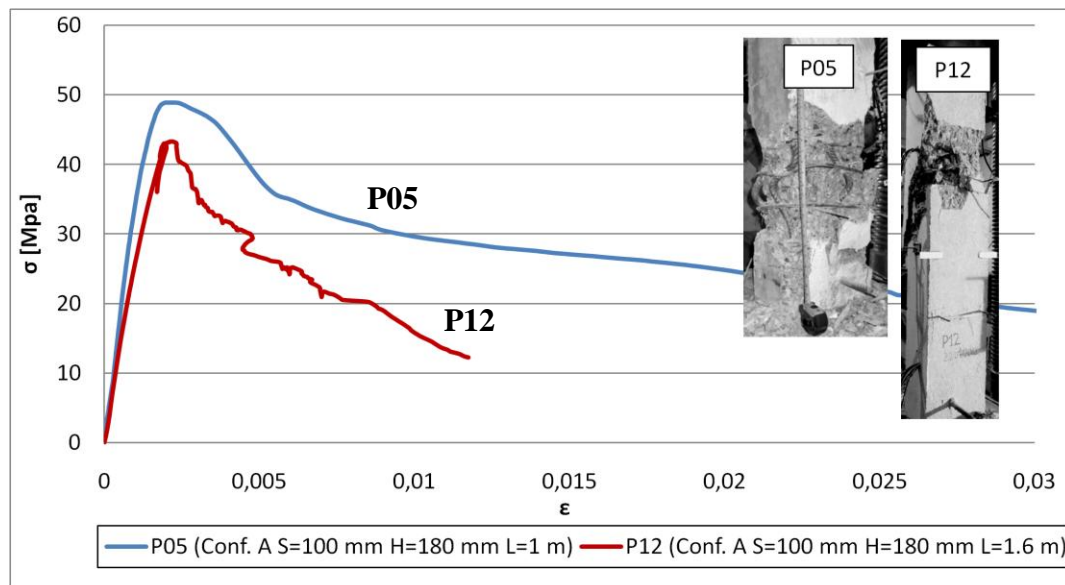


Figura 4.26- Comparación probetas de diferente longitud

Luego de presentar los resultados del comportamiento global de las probetas, se observó que a diferencia de las probetas sin confinamiento, la falla en las probetas con confinamiento no ocurre solo en la zona central de la probeta, sino que comienza en una de las caras propagándose hacia la otra, generando una falla diagonal que involucra, en la mayoría de los ensayos, parte de la zona central y extremos de la probeta (Figura 4.7b). Esta falla se debe a la posibilidad al giro

que tiene el elemento, ya que luego de perder el recubrimiento y comenzar el pandeo global de las barras, la probeta pierde restricción fuera del plano comenzando a pandearse, generando una falla en diagonal a través de la probeta (sección 4.2).

#### 4.4 Giro de la sección

Como se mencionó anteriormente, las probetas no se restringieron para el giro fuera del plano, por lo que se instrumentó de manera de poder registrar dicho giro y estimar su influencia sobre el comportamiento global del elemento. En esta sección se mostrarán las comparaciones más relevantes de los giros de las probetas, exceptuando la probeta 12, la cual no fue instrumentada con los sensores externos sin tener registros para calcular el giro de la sección. La totalidad de comparaciones, no mostradas en esta sección, se exponen en el Anexo B.

El giro se calculó como el promedio de la razón entre la deformación medida por los cuatro sensores externos y la distancia de estos al centro de la sección (Figura 4.27). La distancia al borde del elemento se estimó en 25 cm promedio, por lo que la distancia al centro del elemento será este valor más la mitad de la dimensión del lado corto del elemento (130, 180 o 250 mm).

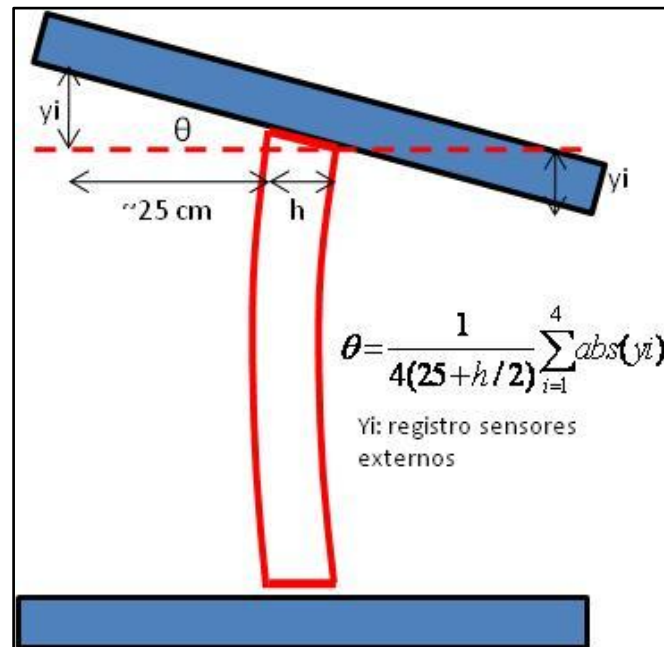


Figura 4.27- Esquema cálculo giro sección

En la Figura 4.12 se comparan los giros obtenidos para las probetas con y sin confinamiento, para distintos anchos de la sección. En ella se aprecia que las probetas sin confinamiento en la zona central presentan un giro menor que las que si tienen confinamiento, lo que, como se mencionó anteriormente, es lo esperado puesto que la falla es más frágil y luego de llegar al peak de capacidad se degrada muy rápidamente concentrándose el daño solo en el centro del elemento.

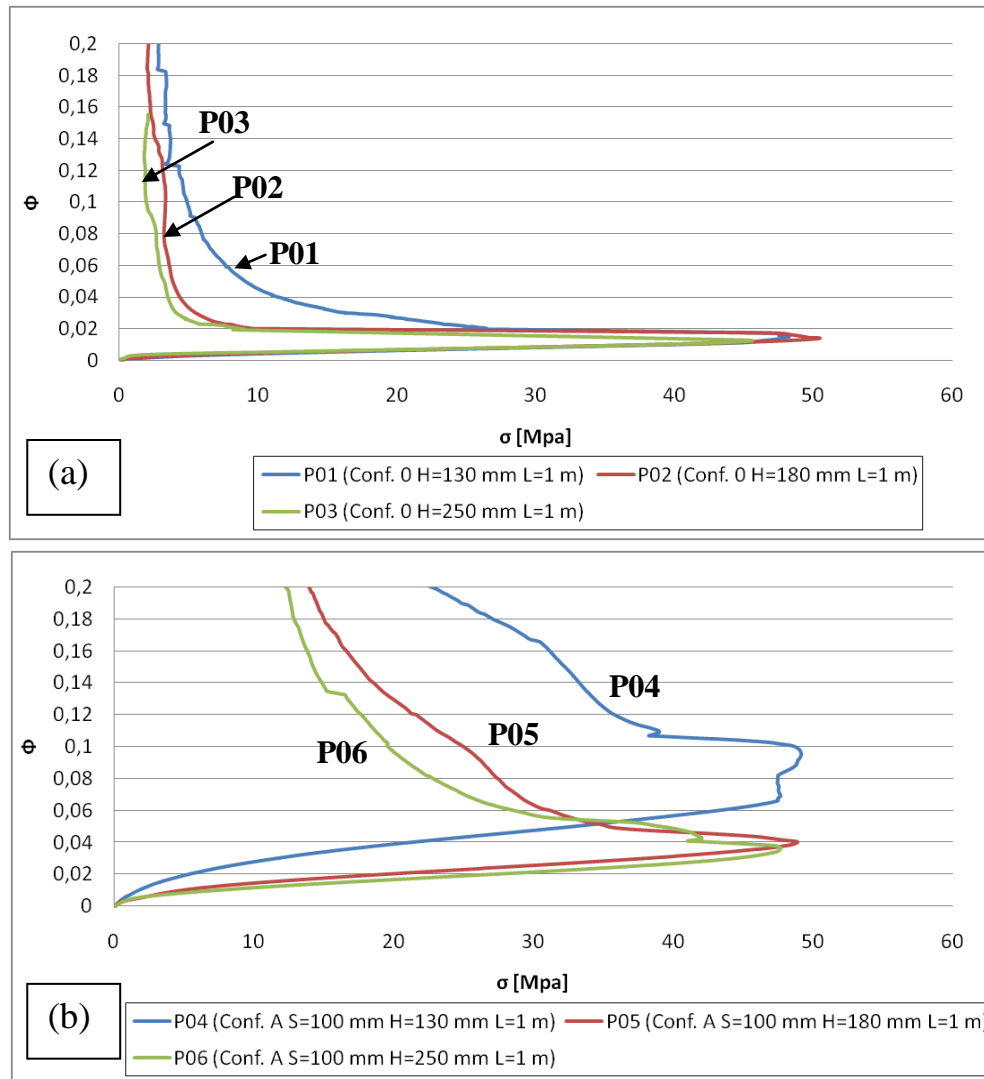


Figura 4.28 - Giro para diferentes anchos de sección (a) Probetas sin confinamiento (b) Probetas con confinamiento

En las probetas 2 y 3, luego del peak de capacidad, el giro presenta un valor prácticamente constante hasta una degradación de alrededor de 80%, mientras que la probeta 1 experimentó un aumento en el giro antes que en las otras probetas, probablemente producto de su menor sección.

A la vez, para las probetas con confinamiento se desprende, como era de esperar, que las con una sección más angosta tienden a presentar un giro mayor, notando que la probeta 4, la de menor sección, comenzó un giro pronunciado incluso antes de llegar al peak de su capacidad. Es importante mencionar que el giro inicial, antes de la máxima capacidad, de la sección puede quedar condicionado por la excentricidad accidental al montar la probeta en la máquina.

En la Figura 4.29 se muestra el giro de las probetas para las dos calidades de acero utilizadas y los dos espaciamientos de estribos en la zona central. En ella se observa, en primer lugar, que las probetas con un espaciamiento mayor tienden a presentar un giro mayor, tanto para un acero A630-420 como para un A440-280. Esta tendencia se puede decir que ocurre cuando se tiene una relación de aspecto de las barras longitudinales, tal que no incurran en un pandeo elástico, por esto es que las probetas sin confinamiento quedan excluidas de esta tendencia, siendo las que presentaron el menor giro.

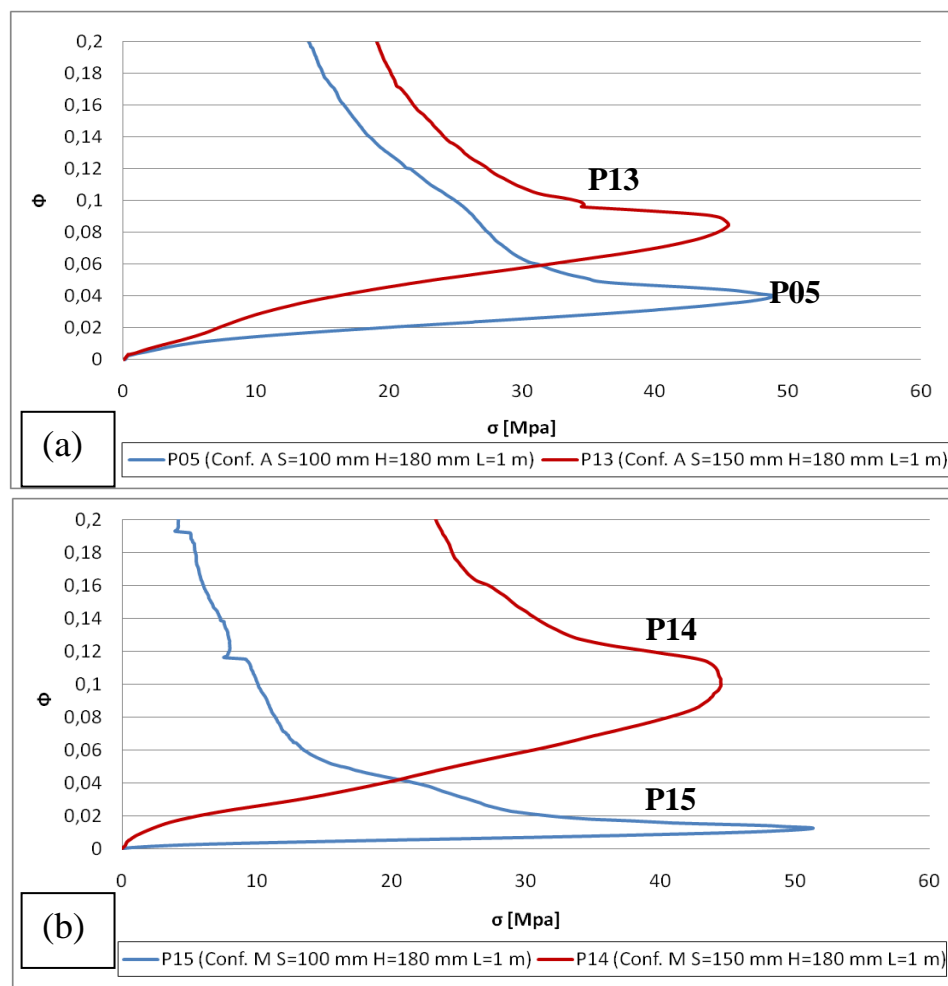


Figura 4.29- Comparación giro diferente espaciamiento (a) Acero A630-420 (b) Acero A440-280

Se aprecia que para ambas calidades de acero y en probetas que presentan confinamiento, las que llegaron a un mayor peak de tensión, son aquellas que muestran un menor valor en el giro de la sección, es decir, el giro está relacionado directamente con el comportamiento y la capacidad del elemento, siendo a mayor giro menor la capacidad de la sección. Esto queda aún más claro, notando que la probeta 15 corresponde a aquella que presentó la mayor capacidad y el menor giro de las probetas confinadas.

#### 4.5 Deformaciones estribos y barras longitudinales

Como se mencionó anteriormente, todas las probetas ensayadas fueron montadas sobre la máquina, dejando las barras longitudinales instrumentadas en la parte inferior y el estribo exterior en la parte superior. Se menciona esto, puesto que los resultados de las deformaciones de los estribos y barras longitudinales, sirvieron para observar la relación entre las deformaciones de las barras instrumentadas y la forma de falla descrita en la sección 4.2 de manera de validar que los registros de los sensores son coherentes con lo esperado. En la Tabla 4.3 se detallan las deformaciones, asociadas a la carga máxima, de los estribos y barras longitudinales.

Tabla 4.3 - *Deformaciones asociadas a la máxima capacidad en estribos y barras longitudinales*

Probeta	$\sigma$ máx. [Tonf]	Estribo exterior	Lado largo Est. Central	Lado corto Est. Central	Promedio barras longitudinales	Zona inicio de falla
		$\epsilon$ peak de carga	$\epsilon$ peak de carga	$\epsilon$ peak de carga	$\epsilon$ peak de carga	
1	48,26	0,001791	-	-	0,00248	Centro-superior
2	50,47	0,00076	-	-	0,0058	Centro
3	45,60	0,00068	-	-	0,0029	Centro
4	49,18	0,002799	0,000847	0,000232	0,0024	Superior
5	48,89	0,000615	0,000478	0,000443	0,0033	Inferior
6	47,71	0,002003	0,000406	0,001397	0,0061	Superior
12	43,31	0,001352	0,000666	0,000559	0,0022	Superior
13	45,54	0,001125	0,001057	0,000115	0,0024	Centro
14	44,51	0,001372	0,000668	0,000226	0,0025	Superior
15	51,32	0,00092	-*	0,00071	0,0051	Inferior

\*: Sensor con falla

Observando los valores de las probetas 1, 2 y 3, la probeta 1 es aquella que muestra la mayor deformación en el estribo exterior y la menor en las barras longitudinales. Esto se explica,



puesto que la falla comenzó en el límite de la zona central con la exterior en la parte superior, cercana al estribo exterior. En términos de las probetas con un ancho de 180 mm y con confinamiento (5, 12, 13, 14 y 15), se aprecia que las probetas 5 y 15 son las que muestran la mayor deformación de las barras longitudinales y la menor en los estribos exteriores, siendo ellas las que fallaron desde la zona inferior hacia el centro, lo que explicaría esta situación, ya que, al momento de llegar a la capacidad máxima las barras longitudinales presentaban deformaciones mayores producto del pandeo de ellas en esa zona, sin concordar con la deformación unitaria de la probeta. Por último las barras longitudinales del resto de las probetas llegaron a la fluencia en el peak de la capacidad, lo que se condice con la deformación global del elemento.

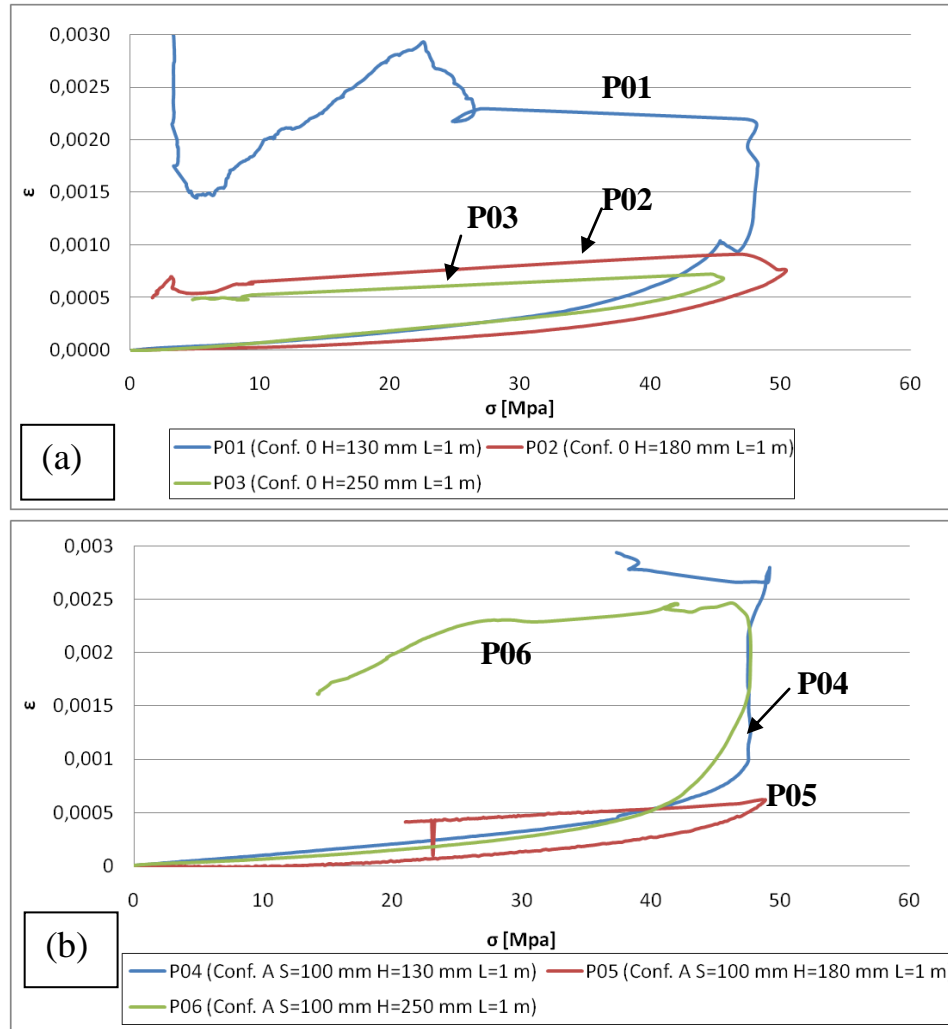
En la Tabla 4.4 se muestran los valores, calculados según lo propuesto por Legeron y Paultre (2003), de la tensión y deformación que deberían alcanzar los estribos centrales según el confinamiento que se le otorgó a cada probeta. En ella se aprecia que los estribos no alcanzan la fluencia para ninguno de los tipos de confinamiento de las probetas ensayadas. A la vez, el estribo de la probeta 6, la de mayor dimensión, presentaría la máxima tensión en el peak de capacidad, siendo el confinamiento proporcional al ancho de la sección, como también lo establece Mander et. al. (1988). Los valores esperados de deformaciones de los estribos, presentan cierta concordancia con los experimentales, pero no es posible relacionarlos en un 100%, producto de las variaciones en la zona de falla del elemento.

Tabla 4.4 -*Tensión y deformación estribos según modelo predictivo*

<b>Probeta</b>	<b>Def. Estribo (<math>\epsilon</math>)</b>	<b>Tensión Estribo [MPa]</b>
<b>4</b>	0.00071	141.5
<b>5</b>	0.00087	173.32
<b>6</b>	0.00093	185.8
<b>12</b>	0.00087	173.32
<b>13</b>	0.000613	122.6
<b>14</b>	0.000613	122.6
<b>15</b>	0.00087	173.32

Los valores antes mostrados permiten corroborar la forma de la falla inicial en el elemento, relacionando el nivel de deformaciones de las barras instrumentadas con la ubicación de ésta. Para poder interpretar la propagación de la falla a través de la deformación de las barras instrumentadas, es que se muestra en la Figura 4.30 las deformaciones en función de la tensión en el elemento. En la Figura 4.30a se aprecia que en la probeta 1 el estribo exterior, es el que tuvo una mayor deformación en el peak de capacidad, y luego sigue deformándose con la degradación

del elemento, lo que se condice con el hecho de que la probeta 2, fue la única de las no confinadas que tuvo un daño mayor en la zona exterior superior. En las probetas 2 y 3, como la falla no se concentró en la parte superior, luego de llegar al peak el estribo exterior comenzó a descargarse, producto de la concentración de todo el daño en la zona central.



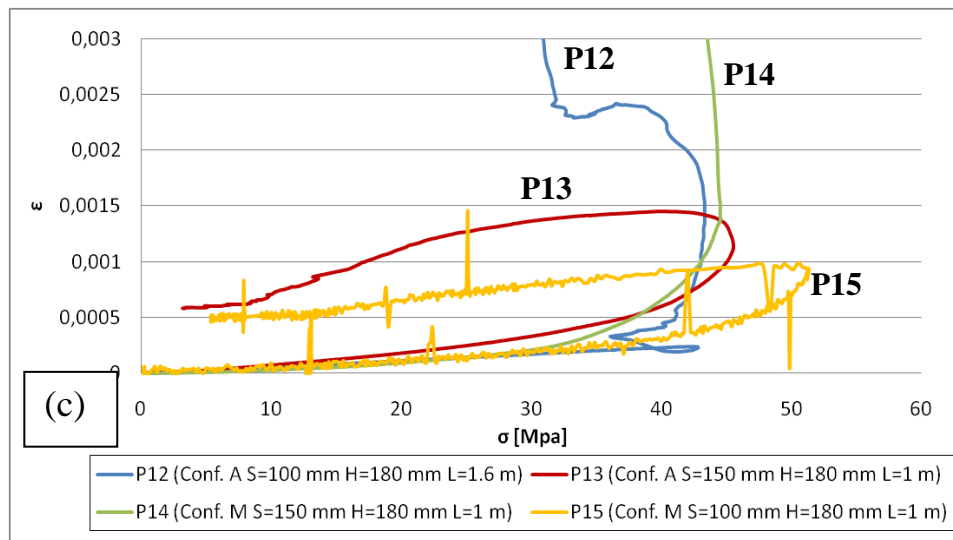
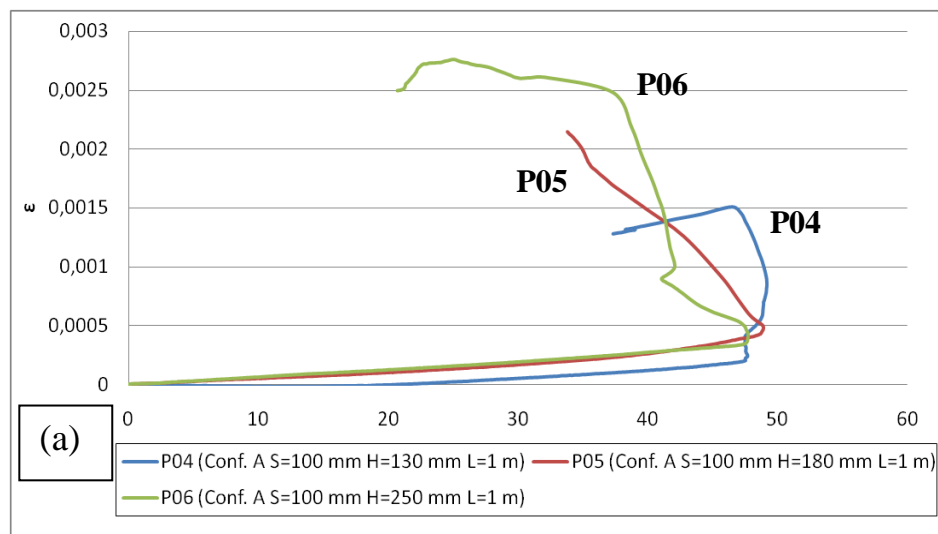


Figura 4.30 - *Deformaciones estribos exteriores (a) Probetas sin confinamiento (b) Diferentes secciones probetas confinadas (c) Diferentes calidades de acero*

De la Figura 4.30b se desprende que las probetas 4 y 6 tuvieron una forma de falla que comenzó en la parte superior y que luego se propagó hacia la zona central. Esto último también se aprecia en la Figura 4.31a, notando que el estribo en la zona central presenta un comportamiento opuesto al estribo externo, es decir, antes del peak de carga solo llegó a pequeñas deformaciones (menores a la mitad de la fluencia), comenzando a deformarse notoriamente luego del peak, a medida que la falla se propagaba hacia el centro.



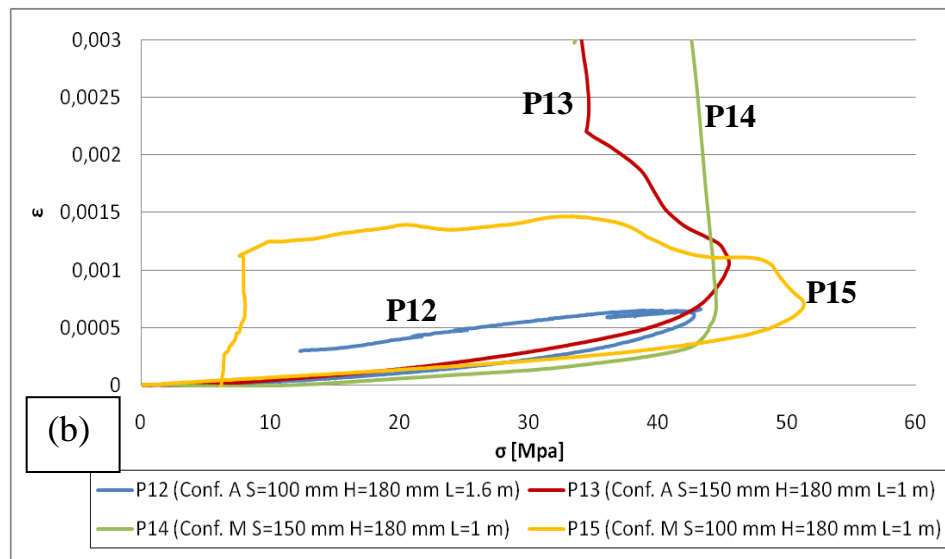


Figura 4.31- Deformaciones lado largo estribo central (a) Diferentes secciones probetas confinadas (b) Diferentes calidades de acero

En las Figura 4.30c y 4.31b se observa que ambos estribos instrumentados de la probeta 15 llegan a una deformación de uno por mil aproximadamente en el peak de capacidad, para luego comenzar a descargar en el estribo exterior, y mantener una deformación casi constante en el estribo central, lo que corrobora el hecho de que la falla se concentró casi en su totalidad en el límite inferior, entre la zona central y los extremos, sin mostrar la propagación observada en las demás probetas con confinamiento. La probeta 14 fue aquella que comenzó su falla en la parte superior y luego se propagó hacia la cara opuesta de la sección central, abarcando parte de la zona superior y central, es por ello que tanto el estribo exterior como el central muestran un aumento en las deformaciones luego de la capacidad máxima, corroborando la forma de falla observada.

Las deformaciones de las barras longitudinales, mostradas en la Figura 4.32, permiten corroborar que las probetas 1, 4, 12 y 14 comenzaron a fallar en la zona superior, puesto que luego de llegar a la capacidad máxima las deformaciones comenzaron a descargar, ya que no se encuentran dentro de la zona de daño. De igual manera, las deformaciones de las barras longitudinales de la probeta 15 muestran un ascenso en todo el ensayo, llegando a la mayor deformación de las 10 probetas ensayadas, siendo la que concentró, en casi su totalidad, la falla en la zona inferior. En el Anexo C se presentan las deformaciones en el lado corto del estribo de la zona central.

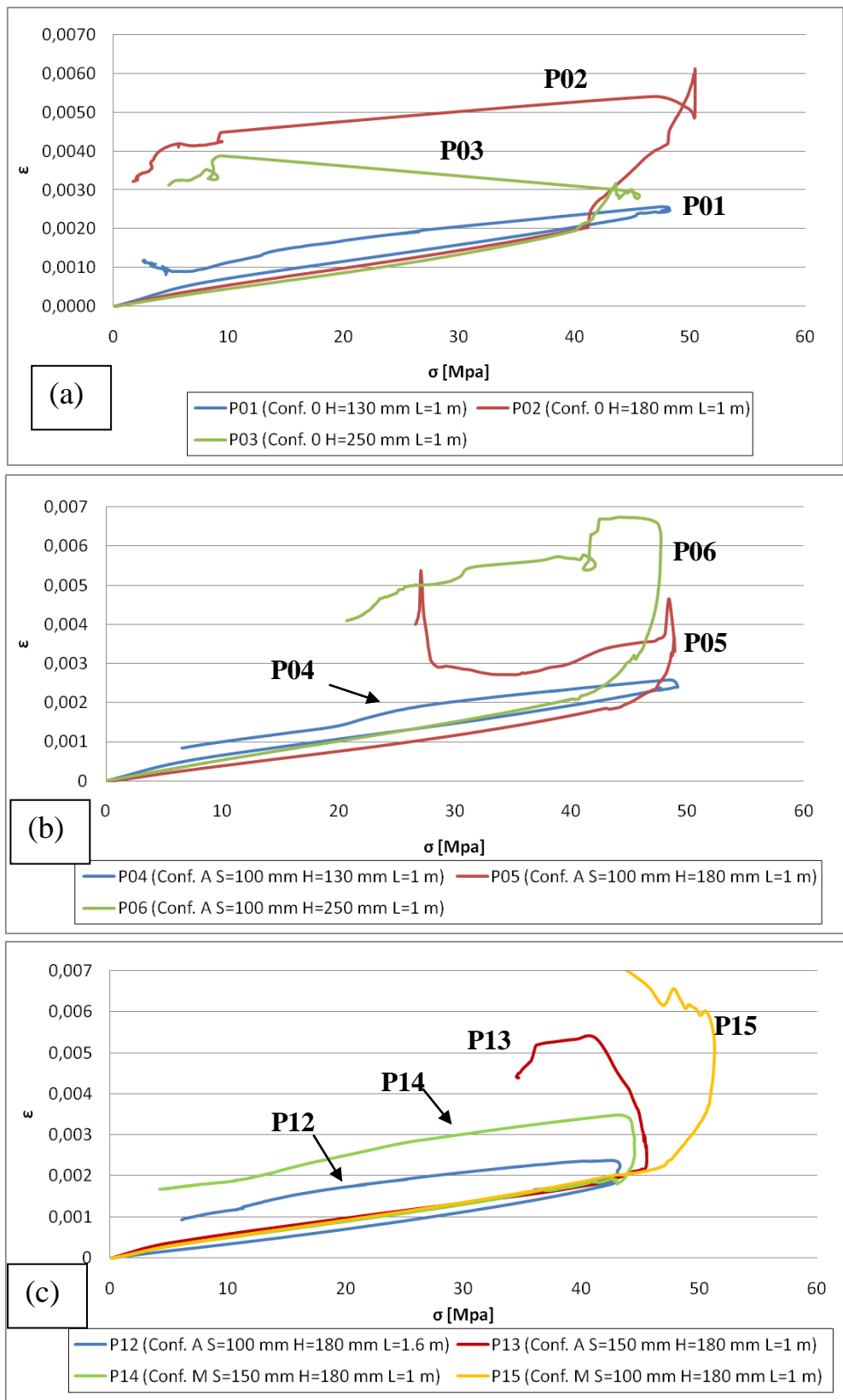


Figura 4.32 - Deformaciones media barras longitudinales (a) Probetas sin confinamiento (b) Diferentes secciones probetas confinadas (c) Diferentes calidades de acero

Ya con la presentación de los resultados experimentales obtenidos, es posible desprender algunos comentarios generales. El comportamiento global de los elementos, tuvo un buena ajuste con el modelo predictivo escogido, teniendo ciertas diferencias en los valores de la capacidad máxima, pero ajustándose en la zona de degradación. Es importante mencionar que el modelo predictivo considera un modelo de confinamiento con deformaciones planas y que abarcan un espaciamiento fijo de los estribos, pero los ensayos, producto de no restringir las deformaciones fuera del plano, presentaron una falla que no se produjo en una misma zona para todas las probetas, introduciendo diferentes variables en la respuesta global del elemento.

Las diferentes configuraciones de confinamiento, presentaron comportamientos distintos en variados puntos de la curva tensión versus deformación, pero a la vez tuvieron cierta concordancia en la zona de degradación, siendo, nuevamente, un factor muy relevante el lugar donde se concentró la falla.

El giro de la sección, mostrado en la sección 4.4, muestra que las probetas confinadas presentaron un giro antes de alcanzar la capacidad máxima, que a pesar de ser menor al que se produce luego de este punto, presenta valores considerables en algunas probetas. Esta situación pudo haber ocurrido por una cierta excentricidad al momento de montar la probeta o bien ser el reflejo de la influencia que tiene el confinar la sección sobre la tendencia al giro de la sección. Estas variables mencionadas, no fueron estudiadas en el trabajo experimental realizado, por lo que no es posible determinar la real importancia sobre el giro del elemento.

Finalmente, los resultados de las deformaciones de los estribos y barras longitudinales, permiten asegurar que la instrumentación interna (Strain Gauges) no presentó errores de medición, pudiendo confiar en los valores obtenidos.

## Capítulo 5: CONCLUSIONES

- 1) Mediante la instrumentación definida para los ensayos de los elementos de borde de muro, fue posible obtener la curva que representa el comportamiento global de éste. Dicha curva se generó acoplando un tramo ascendente, mediante la instrumentación de la zona central, y un tramo descendente, a través de un ajuste de los registros de deformaciones de la instrumentación externa (probeta completa).
- 2) Las probetas con secciones menores (130 mm de ancho) presentaron una tendencia mayor al giro, lo que se tradujo en una pequeña disminución en la capacidad de degradación a grandes deformaciones. A pesar que no se ensayaron varias secciones angostas, se concluye que a menor sección del elemento es menor la capacidad de éste, producto de un giro prematuro, que en la eventualidad de un sismo, puede llegar a ser un factor relevante en la respuesta.
- 3) Los elementos que no fueron confinados en la zona central, no llegaron a un nivel de carga notoriamente menor a los confinados, pero si presentaron una falla más frágil sin la capacidad de disipar energía mediante la deformación del elemento. Dentro de las probetas que fueron confinadas, pero con diferente espaciamiento en la zona central, se observó que se produce un leve aumento en la capacidad máxima cuando se dispone un espaciamiento menor en los estribos, siendo aquello un factor esperado dentro de las probetas confinadas.
- 4) Si bien solo se ensayó una probeta con una longitud mayor, se establece que la inestabilidad global provoca una falla prematura de la probeta, siendo la probeta 12, la de mayor altura, la que llegó a la menor carga máxima, a pesar de presentar un confinamiento tipo A en la zona central. Además, producto de la mayor longitud, luego de comenzar la falla y el pandeo global del elemento, la degradación es más pronunciada.
- 5) Las capacidades máximas observadas para cada probeta con secciones iguales no presentan valores considerablemente diferentes entre probetas con y sin confinamiento, de hecho la probeta 2 alcanzó un peak de capacidad mayor que la probeta 5. Esto puede ser explicado, ya que la probeta 2 presento un giro prácticamente nulo antes de comenzar la

degradación, mientras que la probeta 5 giró, lo que introduce distintas variables en la respuesta, afectando la capacidad generada por ella.

- 6) Se observó que las probetas que presentaban cierto confinamiento en la zona central, pero con un espaciamiento diferente (100 o 150 mm), presentaron una degradación prácticamente igual, lo que se explicaría por la posibilidad al giro de la sección involucrando diferentes espaciamientos la zona de falla. Cabe mencionar, que esto es para los espaciamientos mencionados, siendo siempre de mayor ayuda si se dispone una cantidad considerablemente mayor de estribos. También es importante notar que las respuestas globales obtenidas, presentan el factor del giro de la sección y el pandeo de ella, lo que afecta el comportamiento.
- 7) El giro de la sección, corresponde a un fenómeno influyente en la respuesta del elemento, condicionando la forma de falla y la degradación del hormigón confinado. Esto se puede desprender al observar el comportamiento de la probeta 15, la cual corresponde a la que presentó la mayor resistencia máxima, una degradación menos brusca y prolongada, como también a la vez, la que tuvo un giro menor que todas las probetas con confinamiento en la zona central. Es decir, que a menor giro de la sección la respuesta del elemento será mejor.
- 8) La respuesta de los elementos de borde de muro ensayados, presentó un mejor ajuste con el modelo de Legeron y Paultre, en el hormigón confinado, y Massone y Moroder, en el acero. El modelo de hormigón confinado mencionado, calcula el aumento de la capacidad estableciendo las deformaciones de los estribos de confinamiento cuando se llega a la máxima carga axial, siendo la principal diferencia con el modelo de Mander et. al. (1988), el cual asume la tensión de fluencia en los estribos. Es importante mencionar que el ajuste de la respuesta a dicho modelo, puede estar influenciado por el giro de la sección, pudiéndose obtener diferentes resultados restringiendo las deformaciones fuera del plano. De todas maneras, en la ocurrencia de un sismo, el elemento no presenta una restricción lateral al giro, por lo que, lo obtenido puede corresponder a un comportamiento que se asemeje más a la respuesta real de un elemento de borde de muro.
- 9) Al observar la falla de cada una de las probetas, se establece que los ganchos (trabas) con dobleces de 135°, por un lado, y 90°, por el otro, pierden toda efectividad a grandes deformaciones axiales, produciéndose la abertura por completo del lado recto, sin poder



restringir el pandeo de las barras longitudinales. Así, las modificaciones normativas realizadas luego del terremoto del 27 de febrero de 2010, en donde se establece, entre otras cosas, como obligatorio el uso de trabas cerradas, es decir, que tengan un gancho de 135° en ambos extremos, se hace totalmente necesario para asegurar un aumento en la ductilidad producto del confinamiento. A la vez, ubicar los estribos con un espaciamiento adecuado (máximo seis veces el diámetro de la barra longitudinal), permite retrasar el pandeo local de las barras longitudinales, manteniendo la integridad del núcleo de hormigón durante la eventualidad de un sismo.

- 10) En cada probeta, exceptuando las que no presentaban confinamiento en la zona central, se observó una longitud de falla de aproximadamente el doble de la menor dimensión de la sección, propagándose desde una cara hacia la opuesta (Takahashi et. al. 2012).
  
- 11) A pesar que no todos los estribos fueron instrumentados, en las probetas donde la falla comenzó donde si había uno, se observó que, con excepción de las probetas 4 y 6 que muestran una deformación mayor que la fluencia en los estribos exteriores, en general no alcanzan la deformación de fluencia en el peak de carga de la sección (Legeron et. al., 2003), de lo que se puede desprender que la calidad de acero que se utilice para el confinamiento no influye en la carga máxima de soporte, pero sí en la capacidad de deformación del elemento, lo cual al momento de un evento sísmico es lo que se busca generar. Por esto un acero de mayor calidad permite obtener mayores deformaciones.

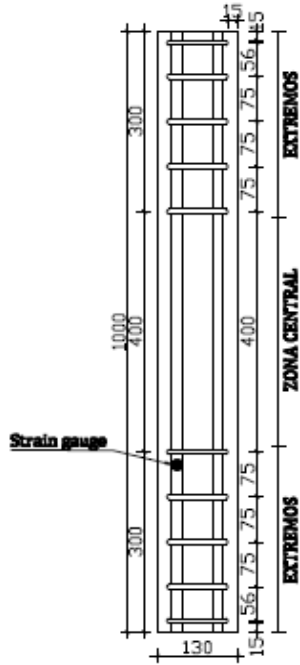
## Capitulo 6: REFERENCIAS

- **Leonardo M. Massone & Daniel Moroder.** “Buckling modeling of reinforcing bars with imperfections”, Engineering Structures, volumen 31, number 3, March 2009. 11p.
- **Rajesh Prasad Dhakal & Koichi Maekawa,** “Reinforcement Stability and Fracture of Cover Concrete in Reinforced Concrete Members”, Journal of Structural Engineering, volumen 24, October 2002. 14p.
- **J. B. Mander, M. J. N. Priestley & R. Park, Fellow ASCE.** “Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete”, Journal of Structural Engineering, Vol. 114, No. 8, August, 1988. 23p.
- **J. B. Mander, M. J. N. Priestley & R. Park, Fellow ASCE.** “Observer Stress-Strain Behavior of Confined Concrete”, Journal of Structural Engineering, Vol. 114, No. 8, August, 1988. 23p.
- **Murat Saatcioglu & Salim R. Razvi** “Strength and Ductility of Confined Concrete”, Journal of Structural Engineering, Vol. 118, No. 6, June, 1992. 20p.
- **Frédéric Légeron & Patrick Paultre** “Uniaxial Confinement Model for Normal- and High-Strength Concrete Columns” Journal of Structural Engineering, Vol. 119, No. 2, February, 2003. 12p.
- **G. A. Chang & J. B. Mander** “Seismic Energy Based Fatigue Damage Analysis of Bridge Columns: Part I – Evaluation of Seismic Capacity” Technical Report NCEER-94-0006, March 14, 1994. 202p.

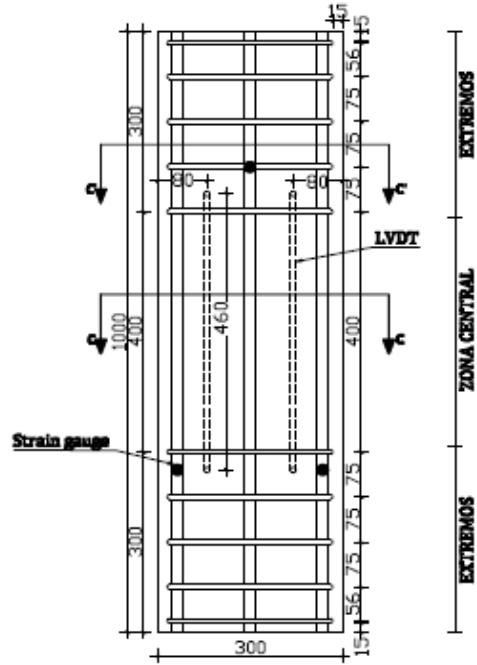
- **Daniel C. Jansen & Surendra P. Shah.** “Effect of Length on Compressive Strain Softening of Concrete”, Journal of Structural Engineering, Vol. 123, No. 1, January, 1997. 10p.
  
- **S. Takahashi, T. Ichinose, N. Izumi, Y. Sanada, S. Matsubara, H. Fukuyama & H. Suwada.** “Experimental Verificationon Flexural Drift Capacity of Reinforced Concrete Wall with Limited Confinement”, publicación de la décimo quinta conferencia mundial de ingeniería sísmica, Lisboa 2012. 10p.

# ANEXO A: PLANOS PROBETAS

## Probetas L=1000 mm confinamiento 0 en zona central

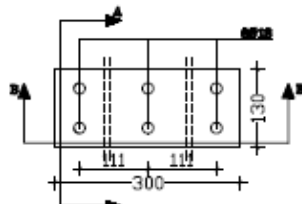


Corte A-A



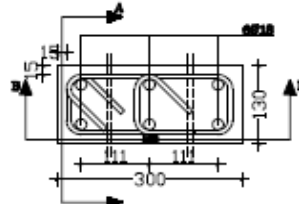
Corte B-B

### Zona central



Corte C-C

### Extremos



Corte C'-C'

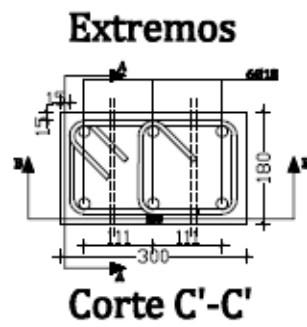
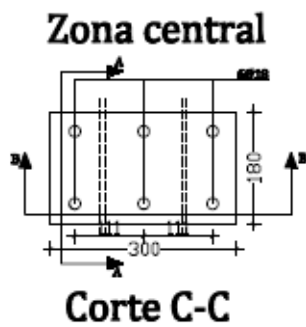
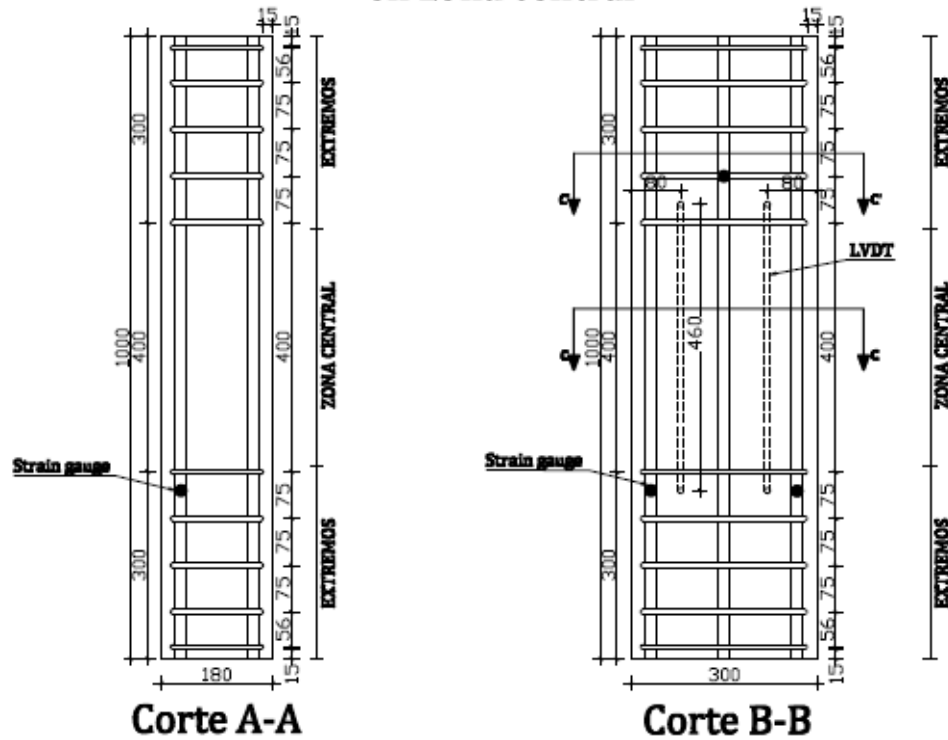
**HORMIGÓN ESTRUCTURAL H30  
ESTRIBOS Y GANCHOS A630-420 H**

Escala 1:10

Dimensiones en mm

PROBETA 1 de 24

## Probetas L=1000 mm confinamiento 0 en zona central



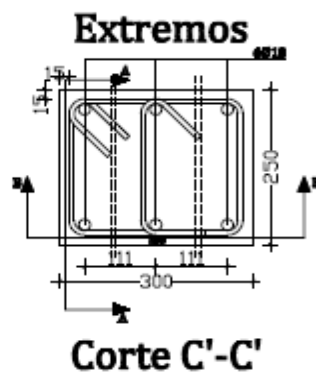
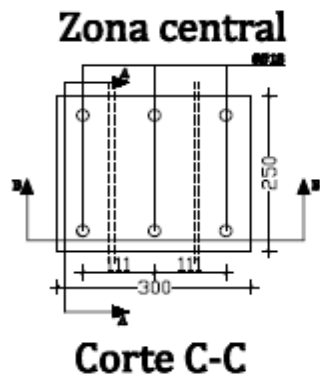
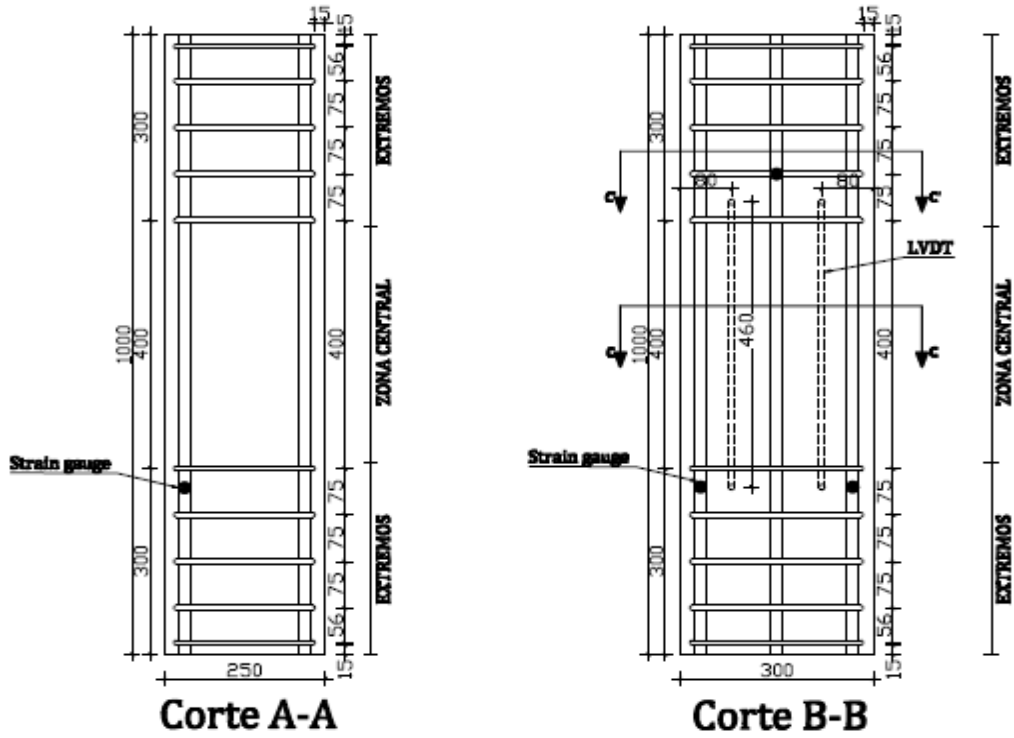
**HORMIGÓN ESTRUCTURAL H30  
ESTRIBOS Y GANCHOS A630-420 H**

**Escala 1:10**

**Dimensiones en mm**

**PROBETA 2 de 24**

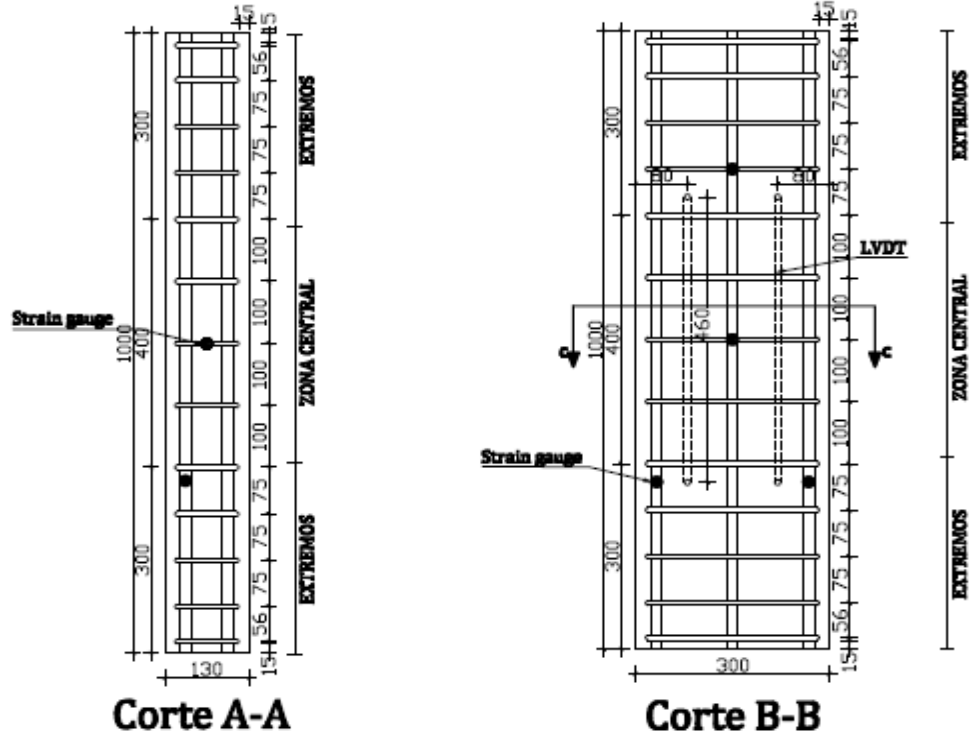
**Probetas L=1000 mm confinamiento 0  
en zona central**



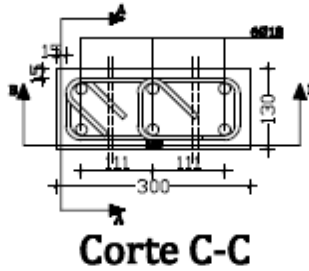
**HORMIGÓN ESTRUCTURAL H30  
ESTRIBOS Y GANCHOS A630-420 H**

<b>Escala 1:10</b>	<b>Dimensiones en mm</b>	<b>PROBETA 3 de 24</b>
--------------------	--------------------------	------------------------

**Probetas L=1000 mm S=100 mm  
en zona central**



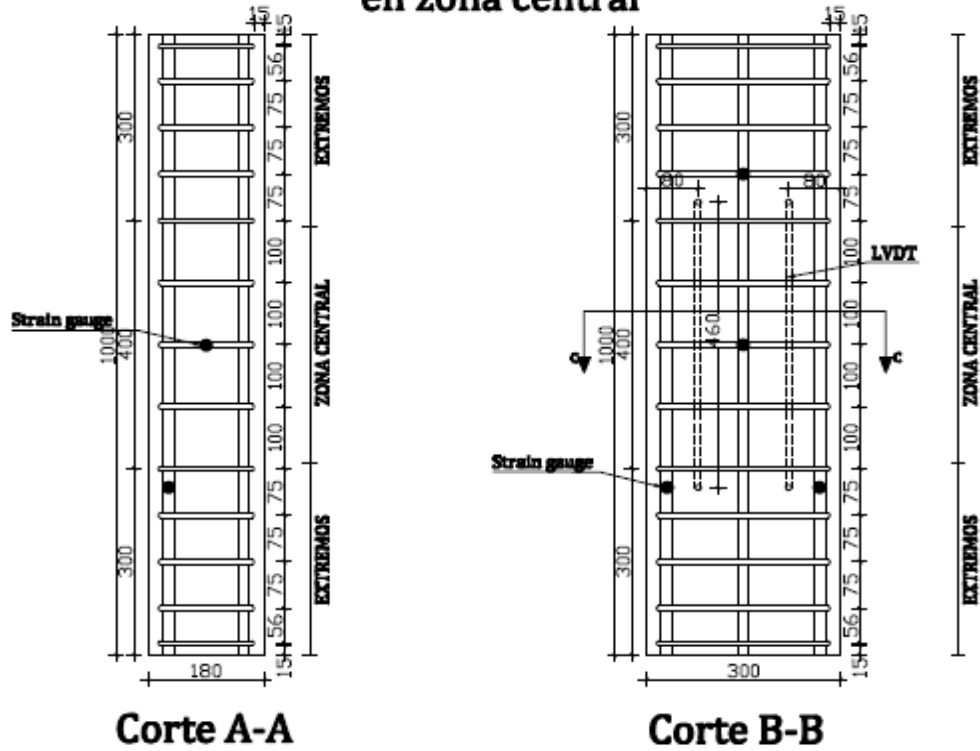
**Zona central y extremos**



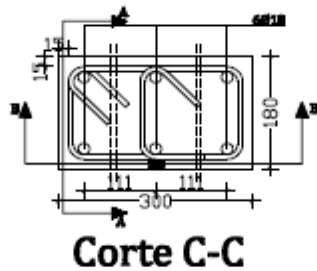
**HORMIGÓN ESTRUCTURAL H30  
ESTRIBOS Y GANCHOS A630-420 H**

Escala 1:10	Dimensiones en mm	PROBETA 4 de 24
-------------	-------------------	-----------------

**Probetas L=1000 mm S=100 mm  
en zona central**



**Zona central y extremos**

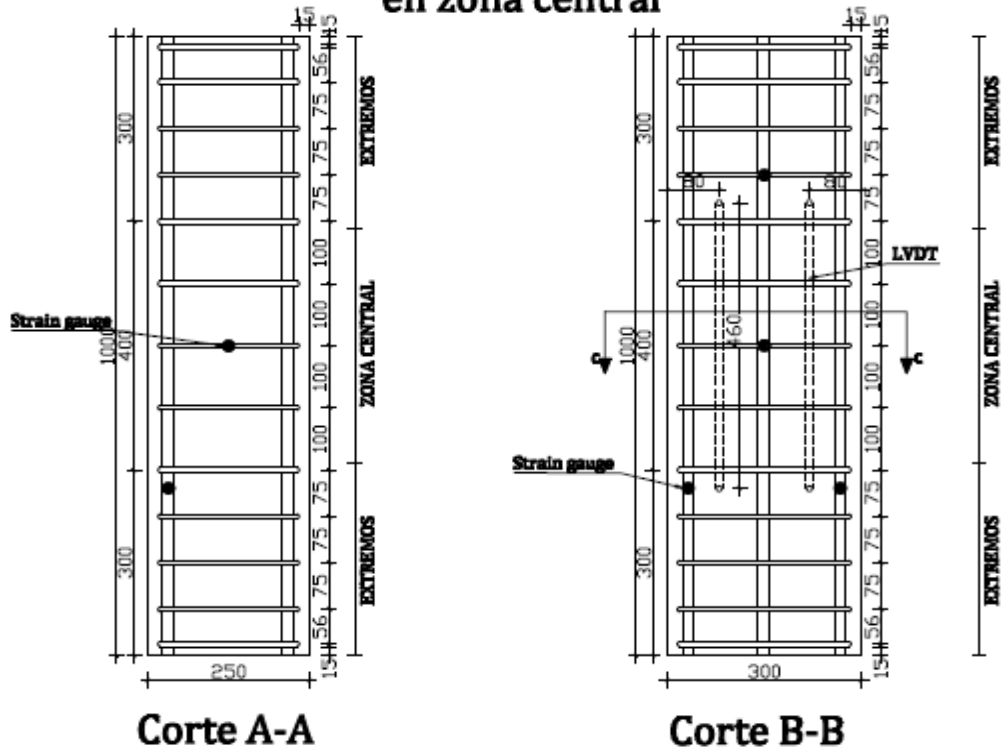


**HORMIGÓN ESTRUCTURAL H30  
ESTRIBOS Y GANCHOS A630-420 H**

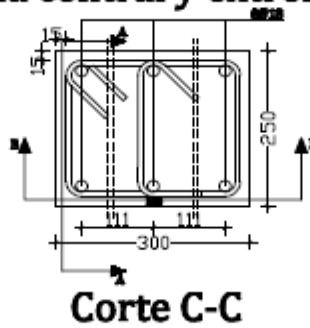
Escala 1:10	Dimensiones en mm	PROBETA 5 de 24
-------------	-------------------	-----------------



**Probetas L=1000 mm S=100 mm  
en zona central**



**Zona central y extremos**

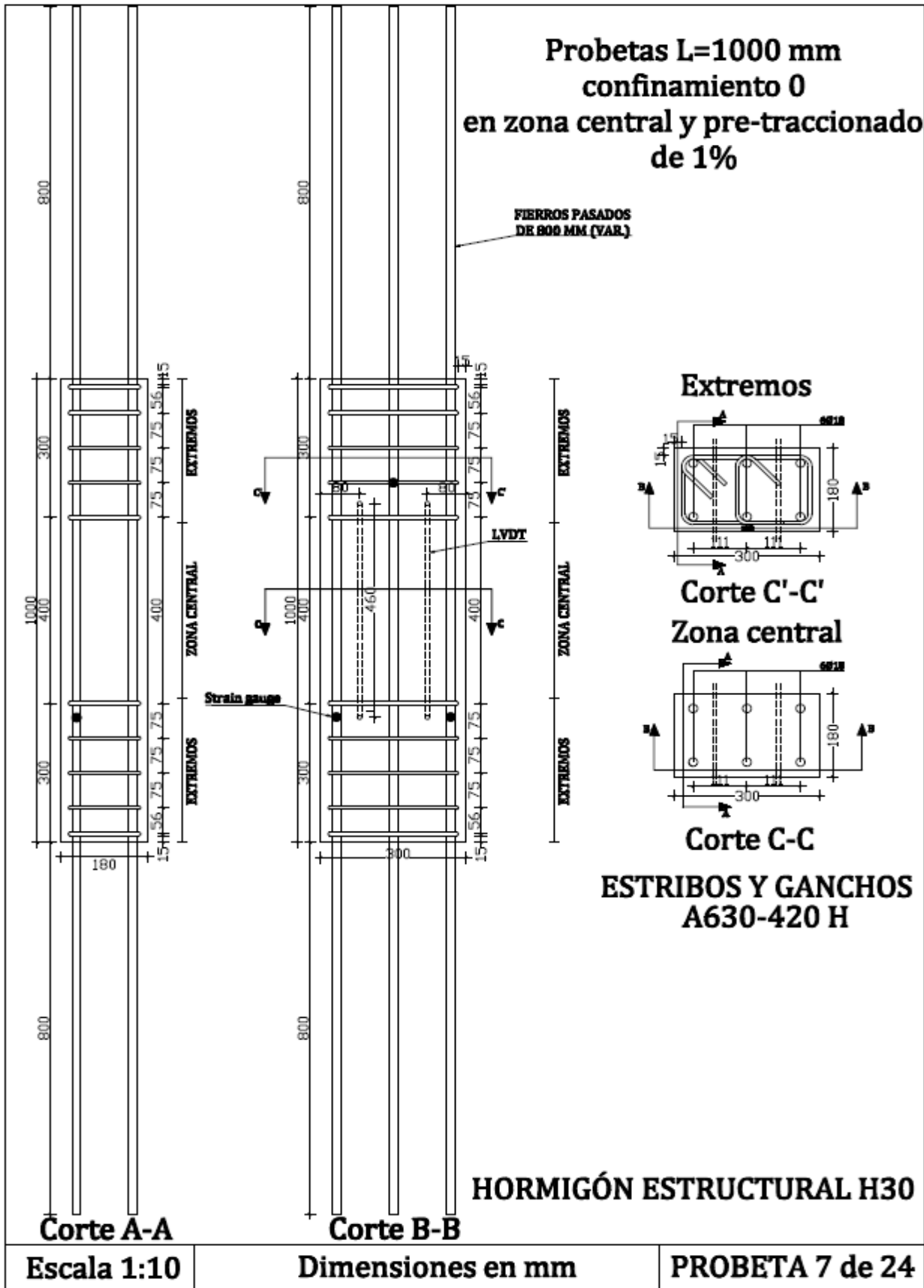


**HORMIGÓN ESTRUCTURAL H30  
ESTRIBOS Y GANCHOS A630-420 H**

Escala 1:10	Dimensiones en mm	PROBETA 6 de 24
-------------	-------------------	-----------------

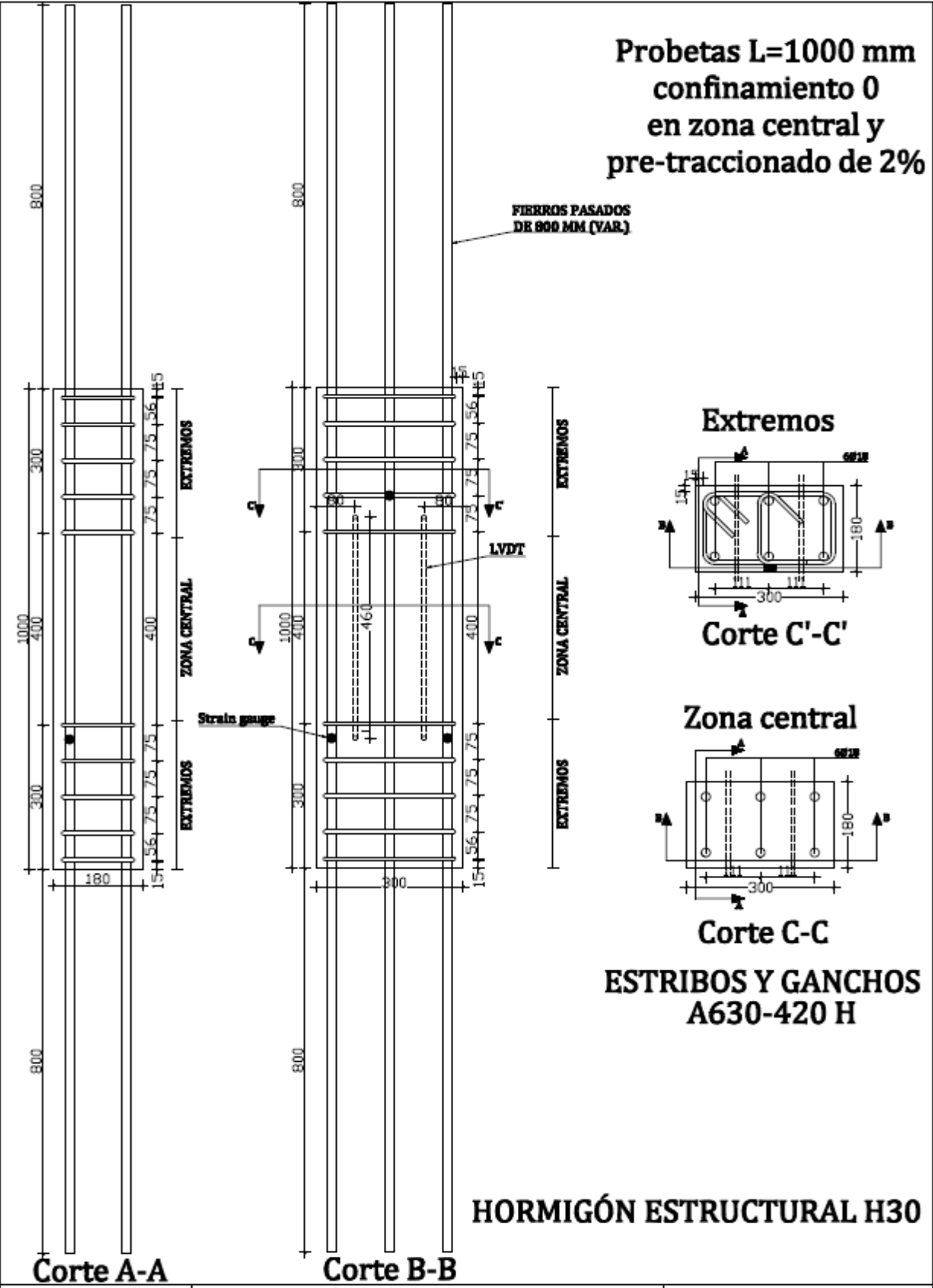
**Probetas L=1000 mm  
confinamiento 0  
en zona central y pre-traccionado  
de 1%**

**FIERROS PASADOS  
DE 800 MM (VAR.)**



**Probetas L=1000 mm  
confinamiento 0  
en zona central y  
pre-traccionado de 2%**

**FIERROS PASADOS  
DE 800 MM (VAR)**

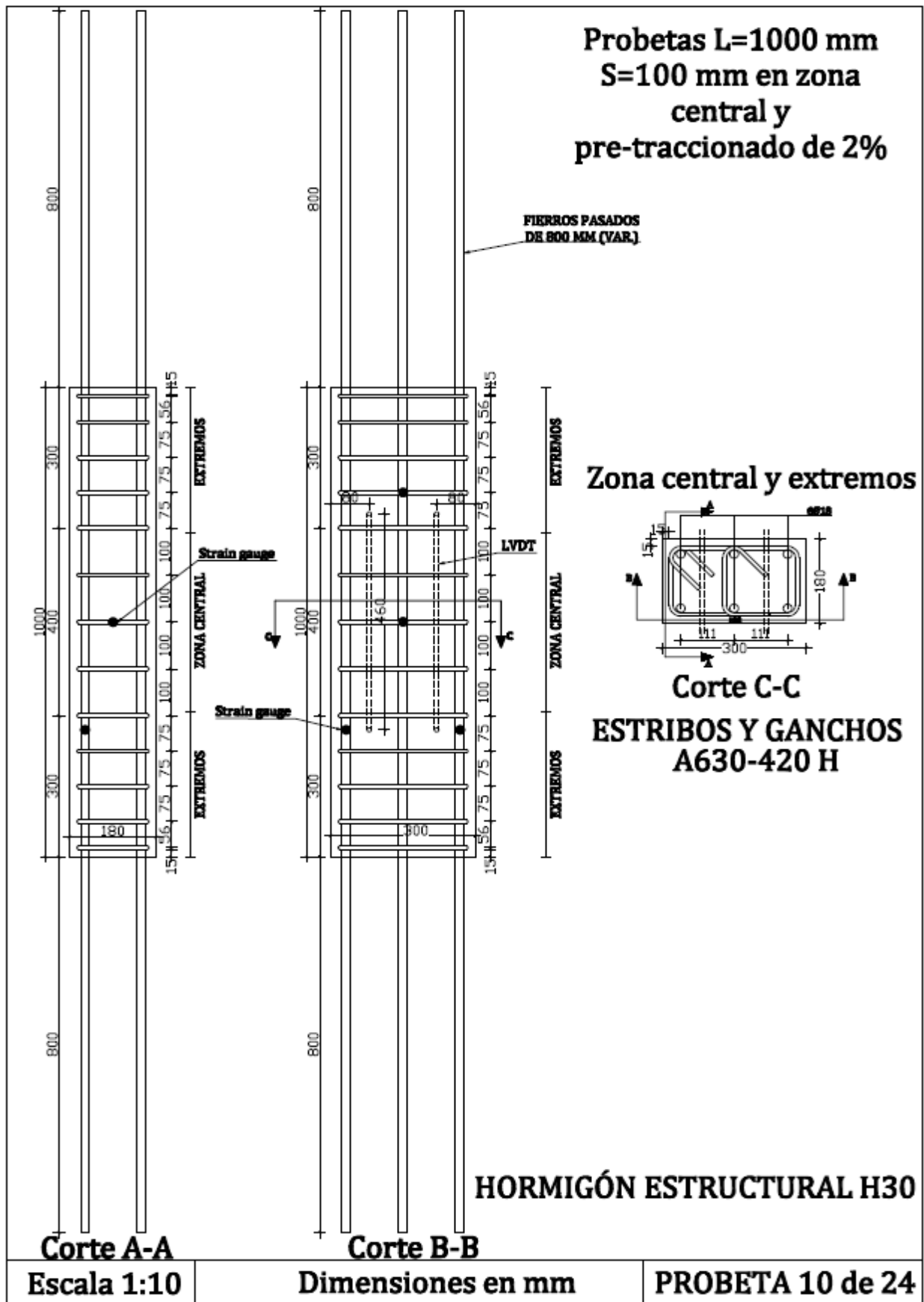


**Escala 1:10**

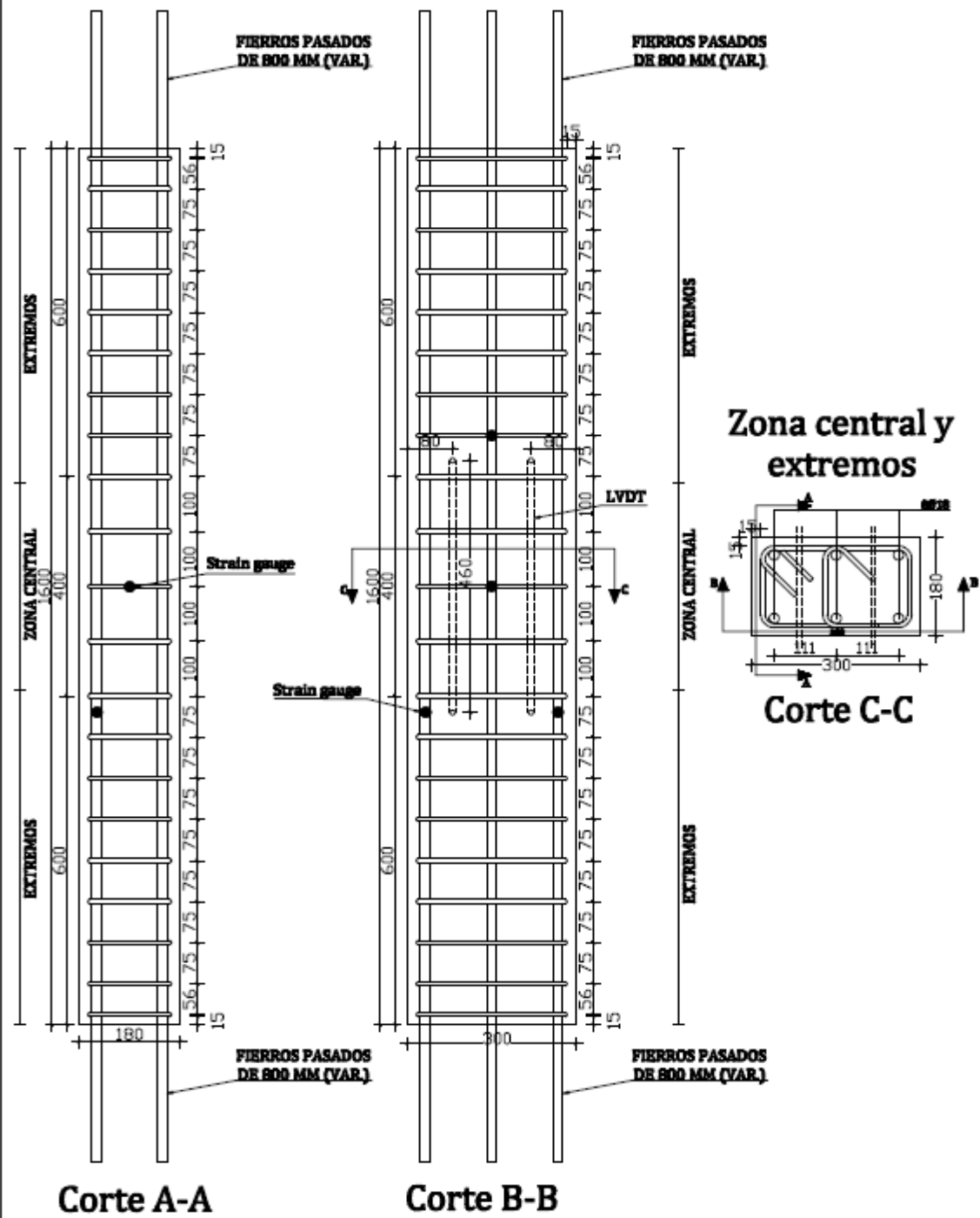
**Dimensiones en mm**

**PROBETA 8 de 24**





**Probetas L=1600 mm S=100 mm en zona central y pre-traccionado de 2% (sin sistema de restricción lateral)**



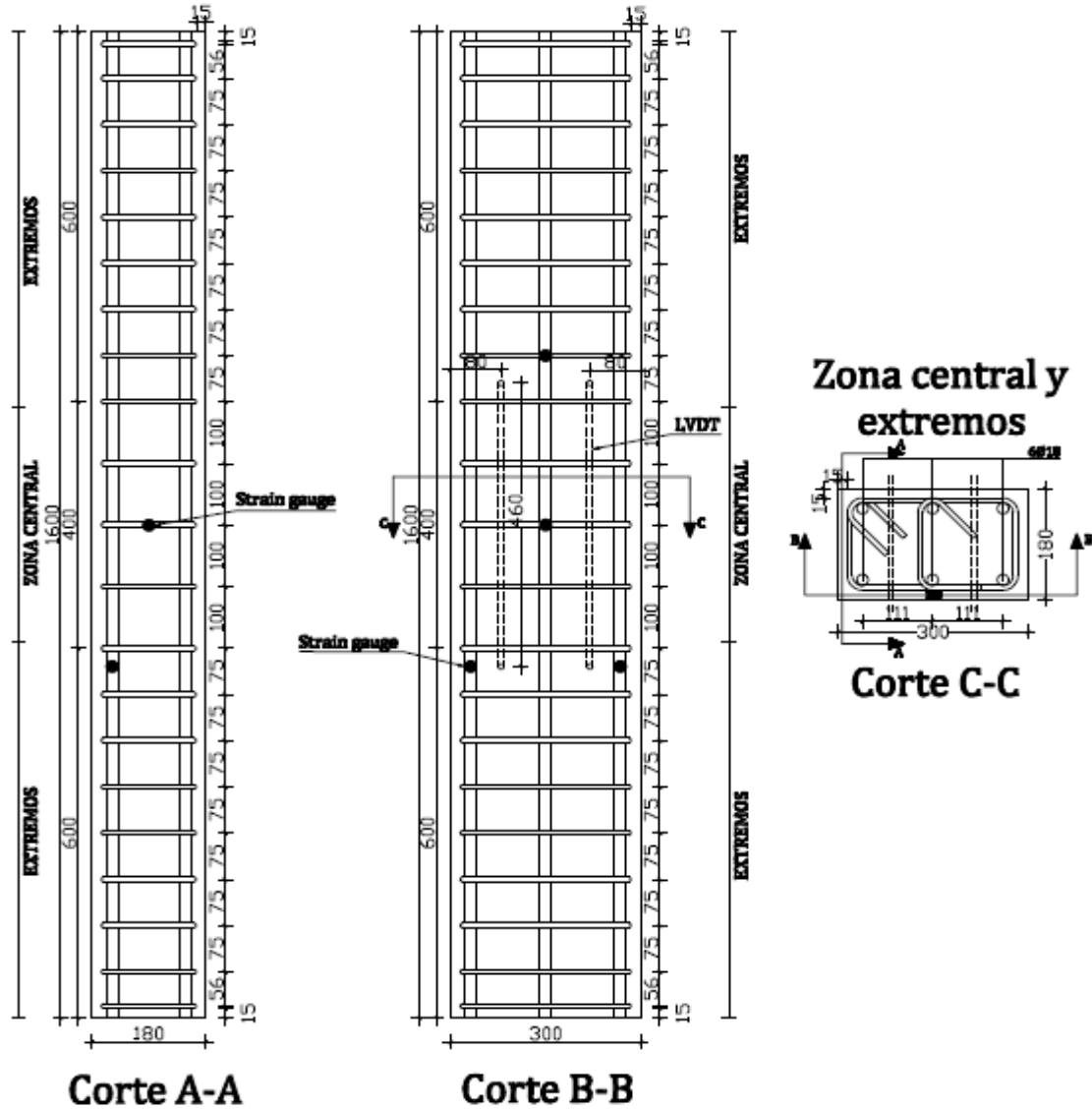
**HORMIGÓN ESTRUCTURAL H30  
ESTRIBOS Y GANCHOS A630-420 H**

**Escala 1:10**

**Dimensiones en mm**

**PROBETA 11 de 24**

**Probetas L=1600 mm S=100 mm en zona central  
y solo sometida a compresión (sin sistema de restricción lateral)**



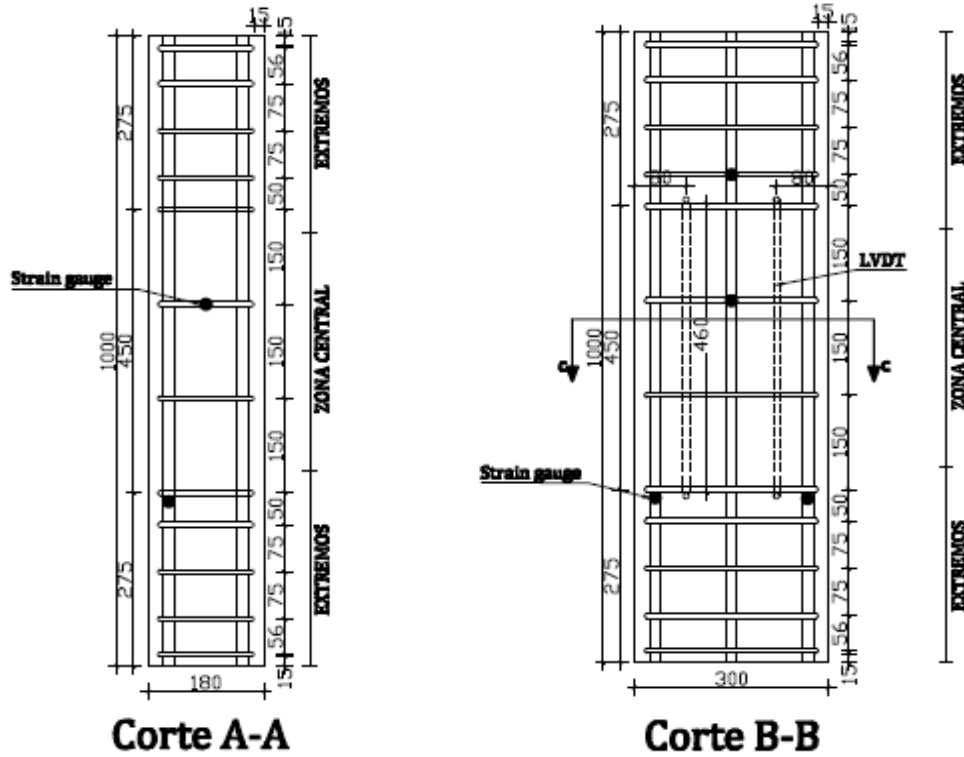
**HORMIGÓN ESTRUCTURAL H30  
ESTRIBOS Y GANCHOS A630-420 H**

**Escala 1:10**

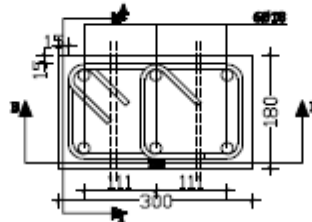
**Dimensiones en mm**

**PROBETA 12 de 24**

**Probetas L=1000 mm S=150 mm  
en zona central**



**Zona central y extremos**



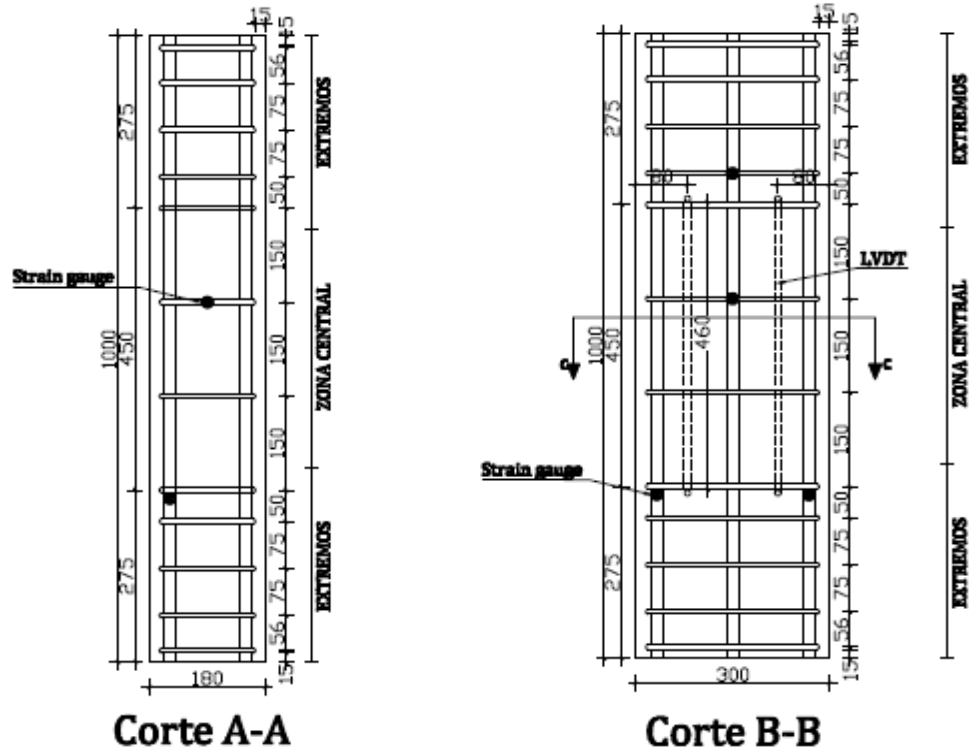
**Corte C-C**

**HORMIGÓN ESTRUCTURAL H30  
ESTRIBOS Y GANCHOS A630-420 H**

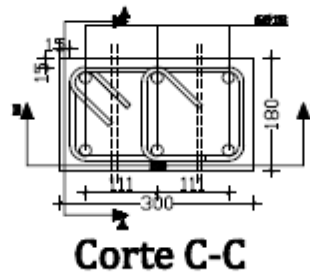
<b>Escala 1:10</b>	<b>Dimensiones en mm</b>	<b>PROBETA 13 de 24</b>
--------------------	--------------------------	-------------------------



**Probetas L=1000 mm S=150 mm  
en zona central**



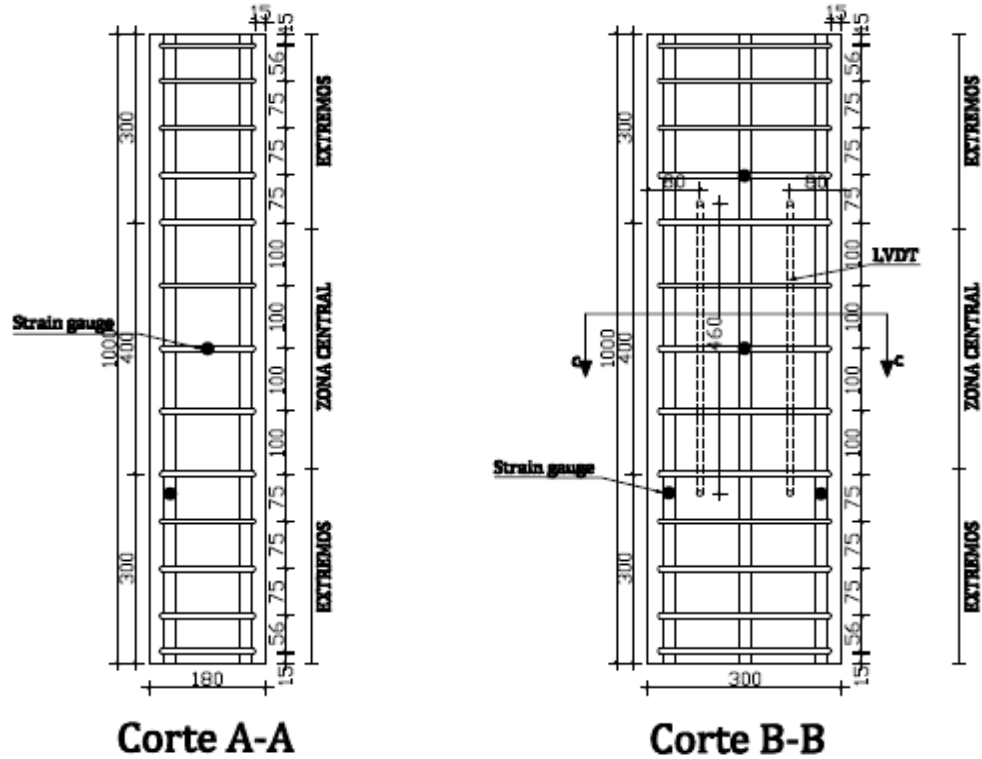
**Zona central y extremos**



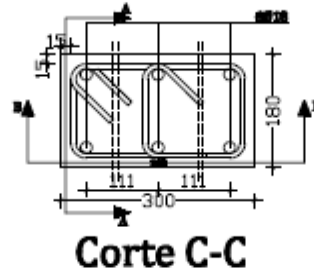
**HORMIGÓN ESTRUCTURAL H30  
ESTRIBOS Y GANCHOS ZONA CENTRAL A440-280 H  
ESTRIBOS Y GANCHOS EXTREMOS A630-420 H**

<b>Escala 1:10</b>	<b>Dimensiones en mm</b>	<b>PROBETA 14 de 24</b>
--------------------	--------------------------	-------------------------

**Probetas L=1000 mm S=100 mm  
en zona central**

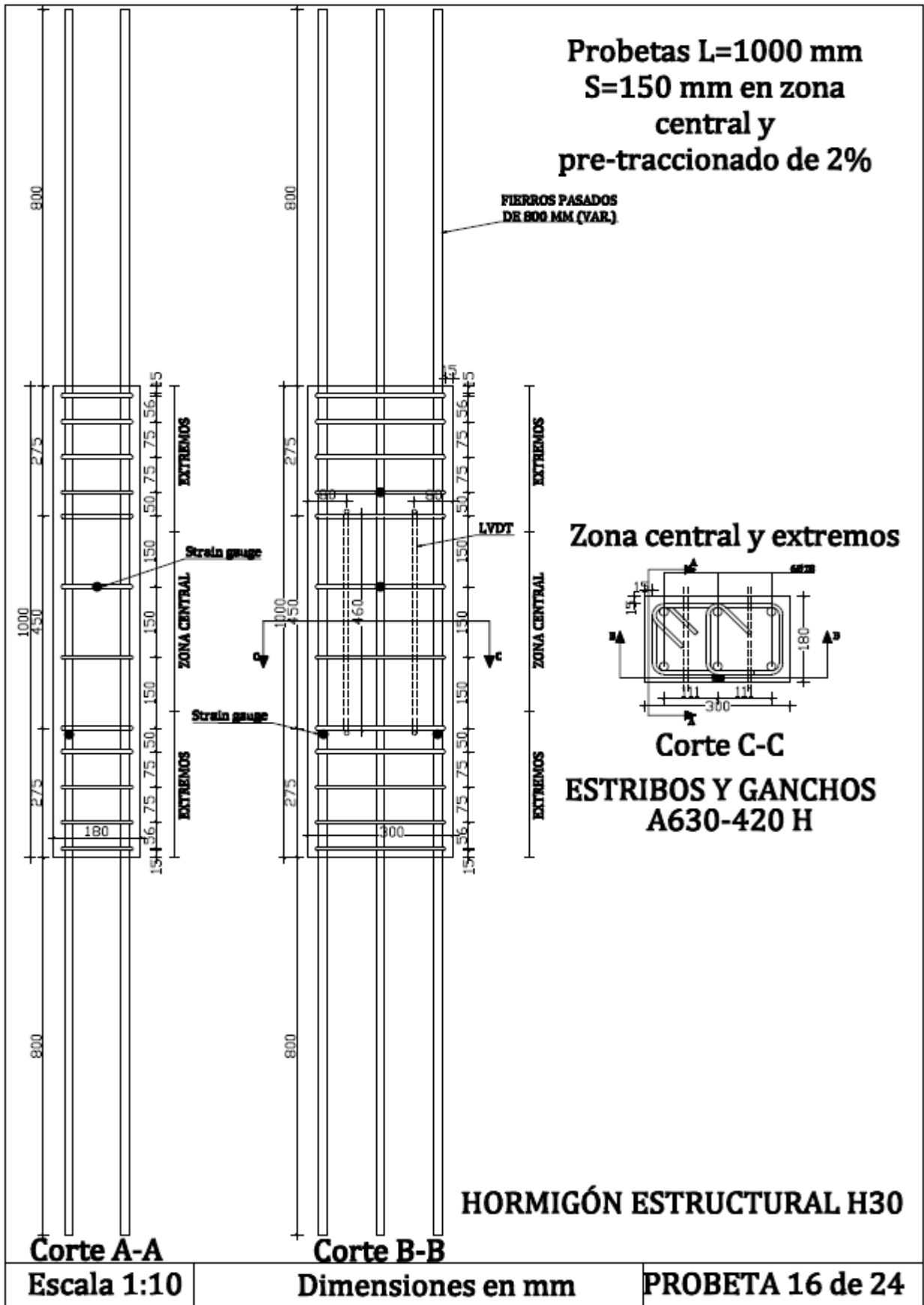


**Zona central y extremos**



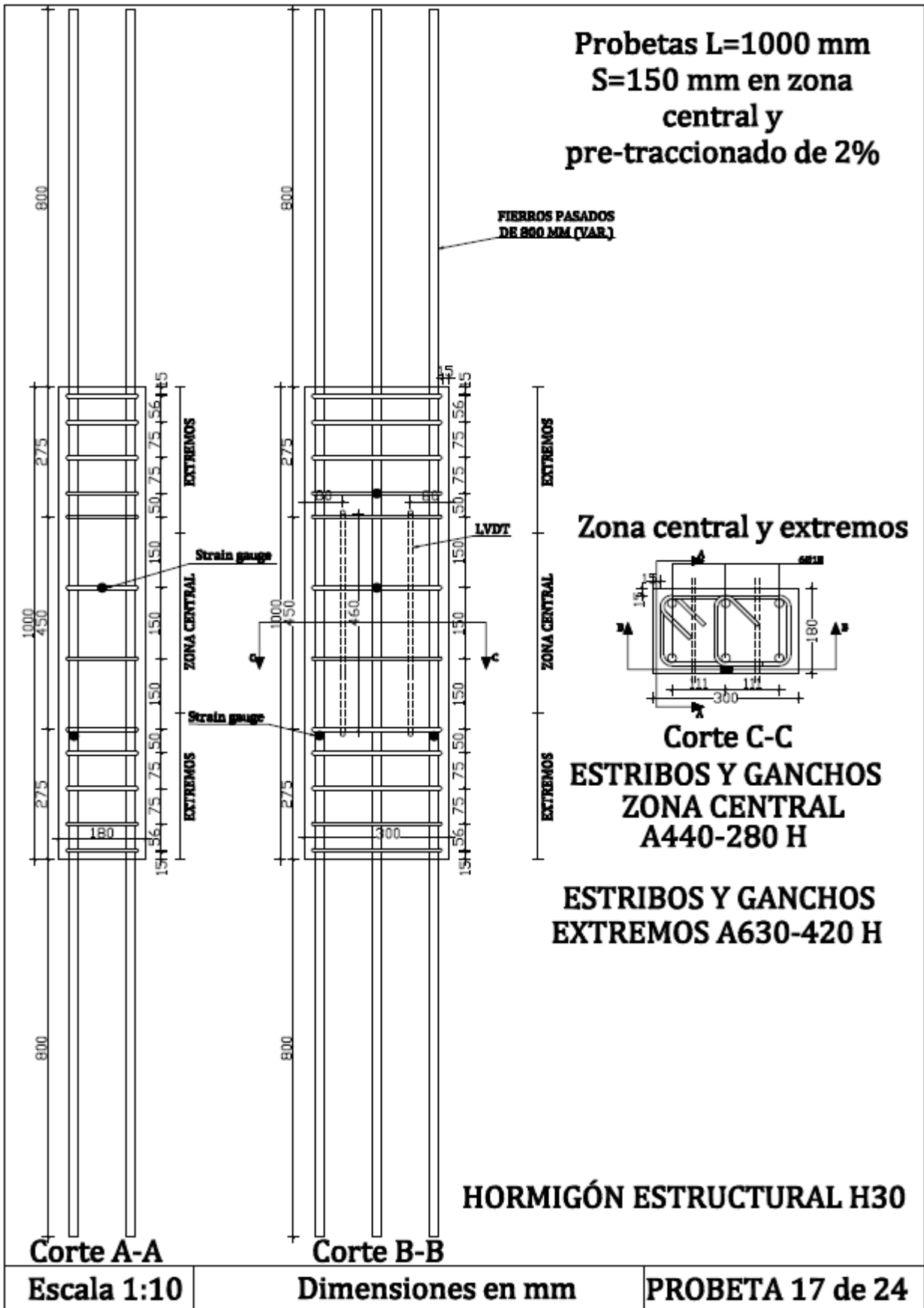
**HORMIGÓN ESTRUCTURAL H30  
ESTRIBOS Y GANCHOS ZONA CENTRAL A440-280 H  
ESTRIBOS Y GANCHOS EXTREMOS A630-420 H**

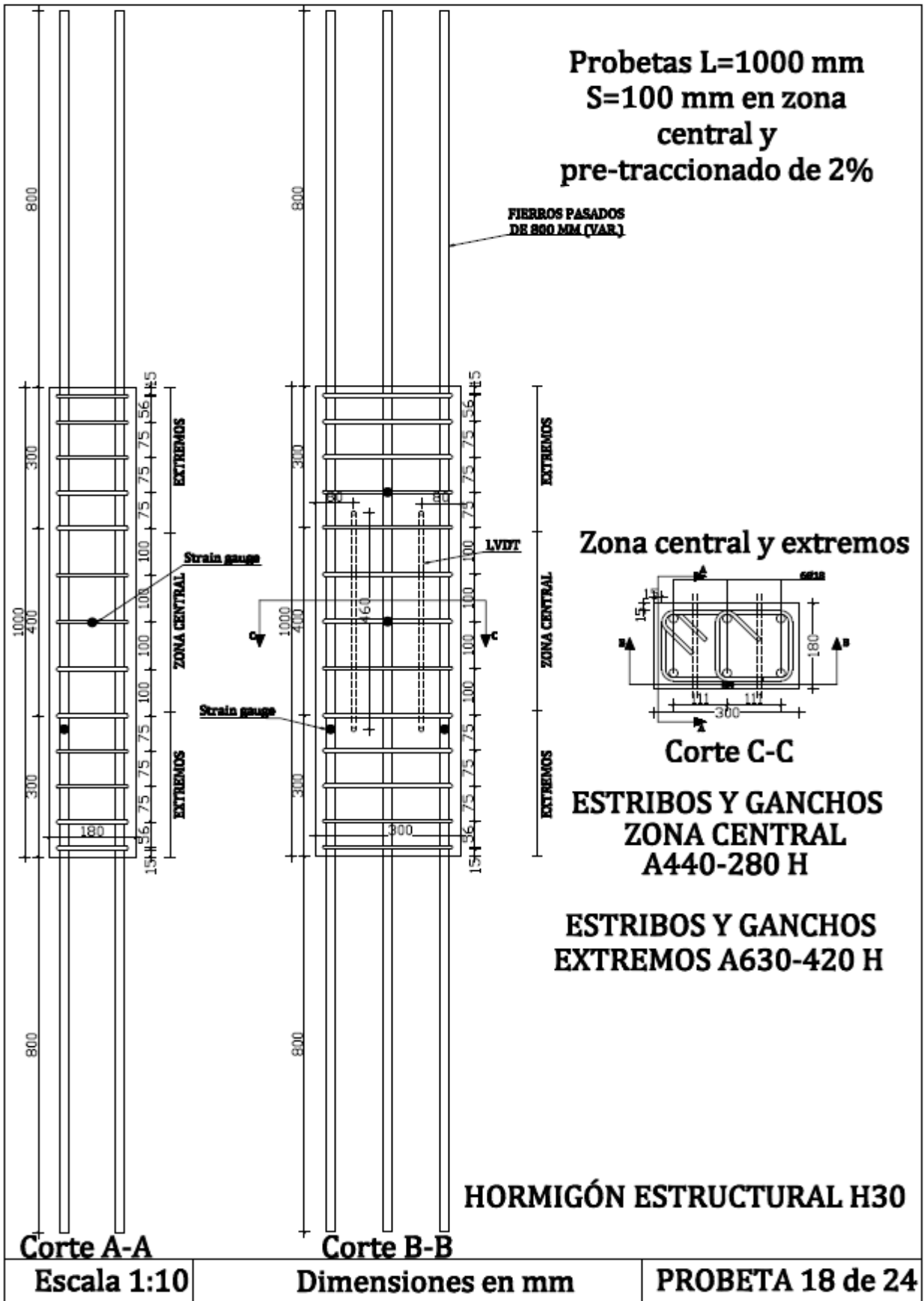
Escala 1:10	Dimensiones en mm	PROBETA 15 de 24
-------------	-------------------	------------------



**Probetas L=1000 mm  
S=150 mm en zona  
central y  
pre-traccionado de 2%**

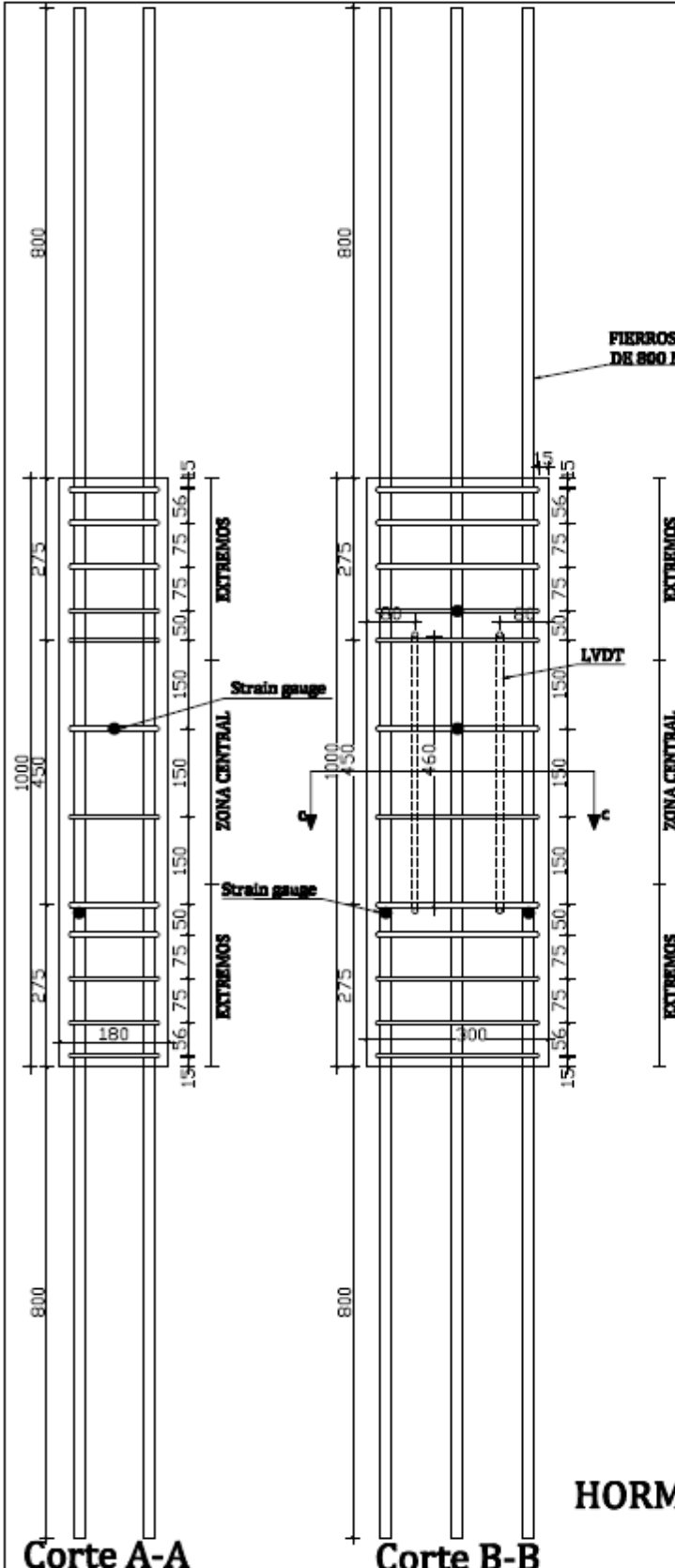
**FIERROS PASADOS  
DE 800 MM (VAR.)**



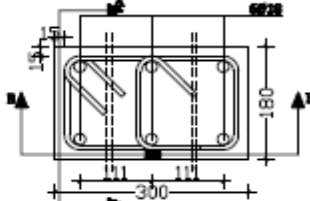


Probetas L=1000 mm  
 S=100 mm en zona  
 central y  
 pre-traccionado de 2%  
 (sin sistema de  
 restricción lateral)

FIERROS PASADOS  
 DE 800 MM (VAR.)



Zona central y extremos



Corte C-C

ESTRIBOS Y GANCHOS  
 A630-420 H

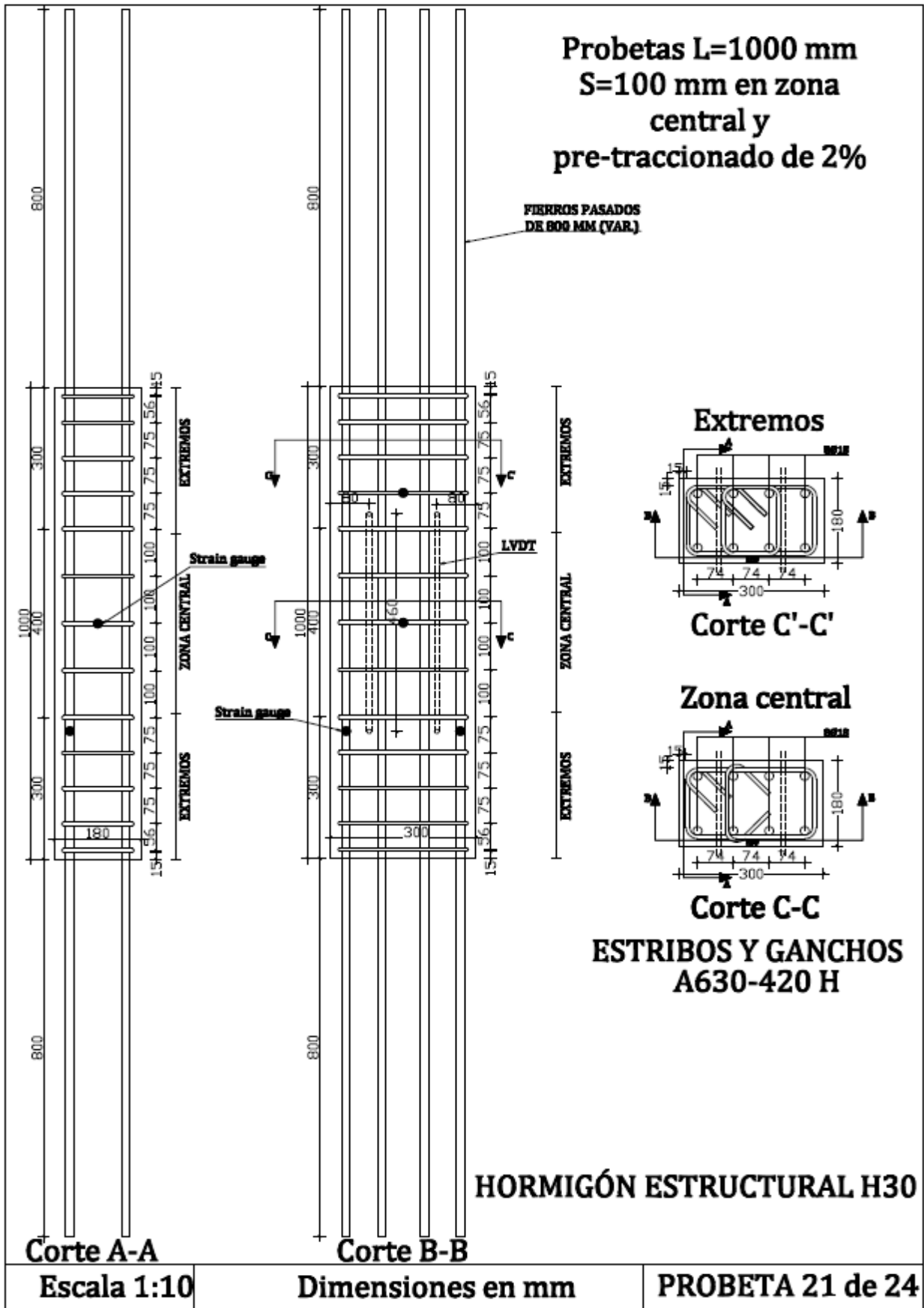
HORMIGÓN ESTRUCTURAL H30

Corte A-A

Corte B-B

Escala 1:10	Dimensiones en mm	PROBETA 19 de 24
-------------	-------------------	------------------

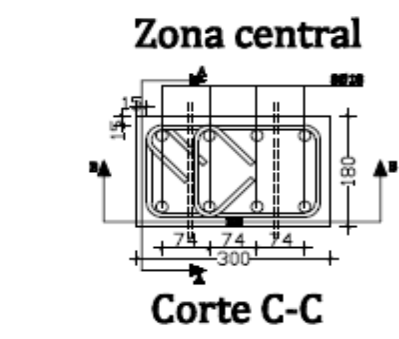
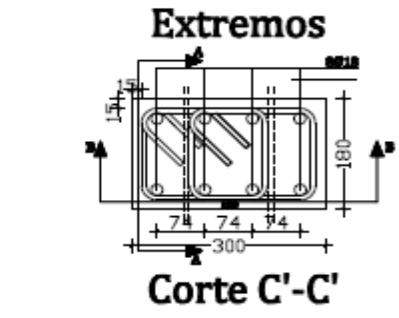
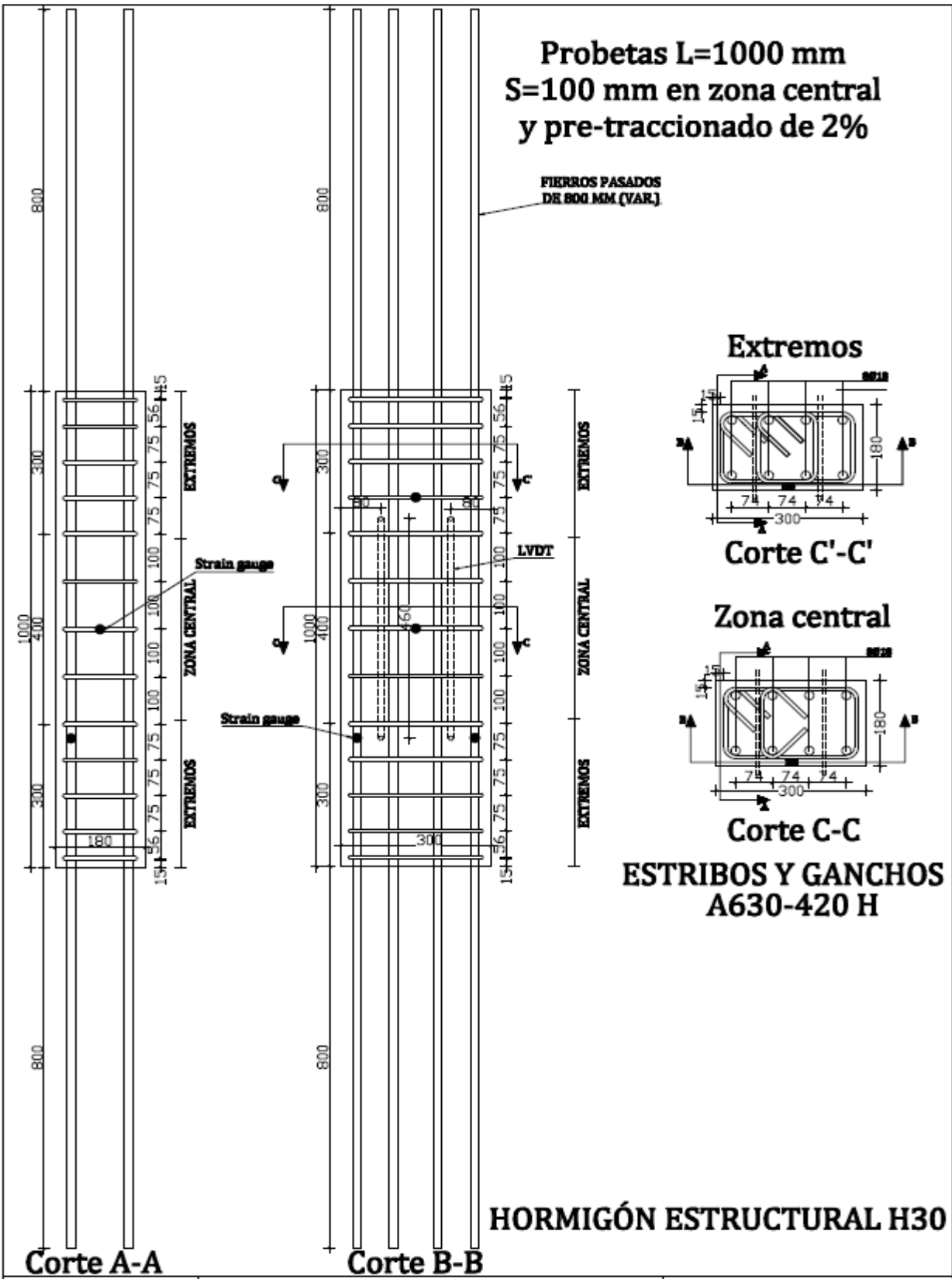






Probetas L=1000 mm  
S=100 mm en zona central  
y pre-traccionado de 2%

FIERROS PASADOS  
DE 800 MM (VAR.)



ESTRIBOS Y GANCHOS  
A630-420 H

HORMIGÓN ESTRUCTURAL H30

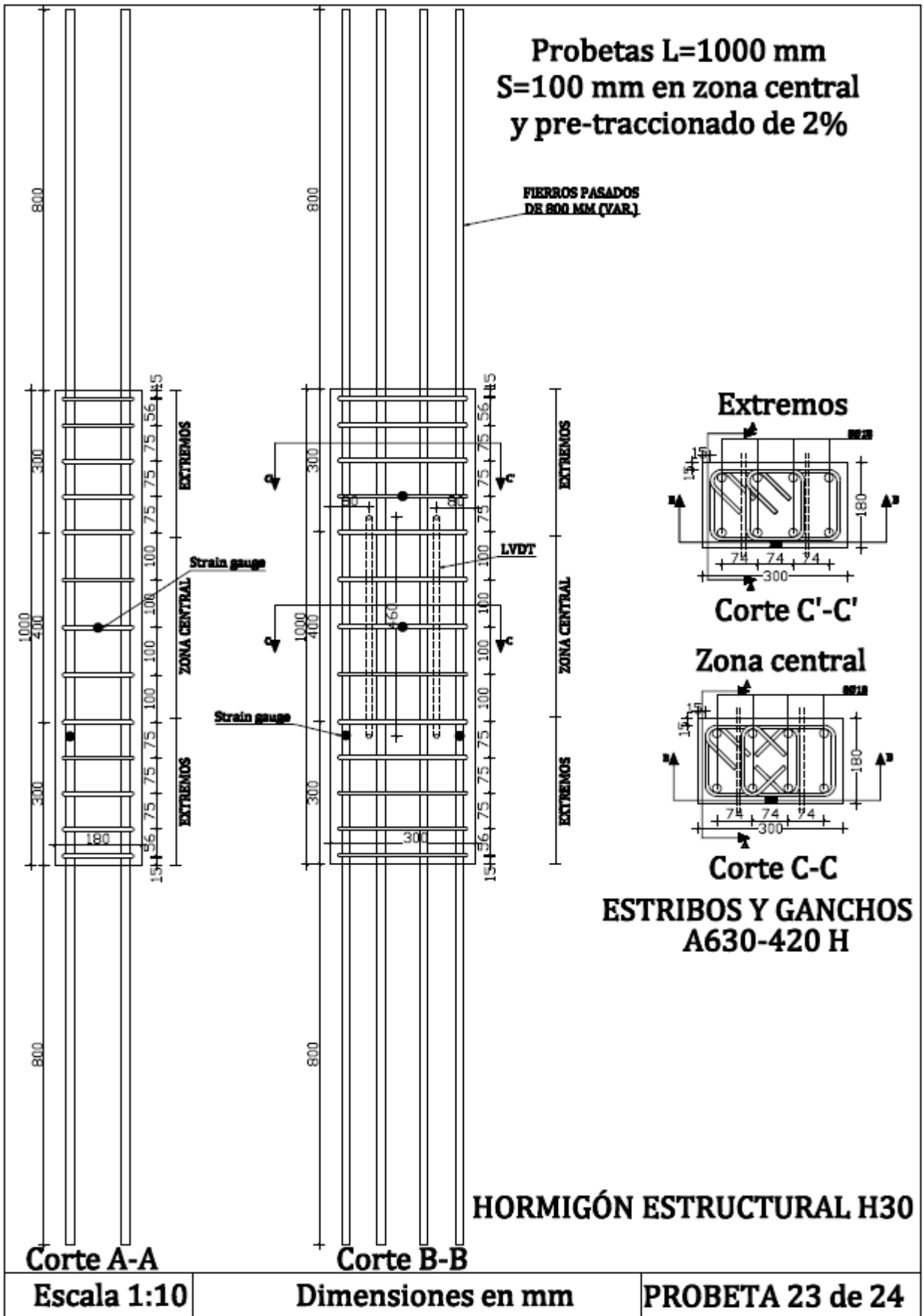
Corte A-A

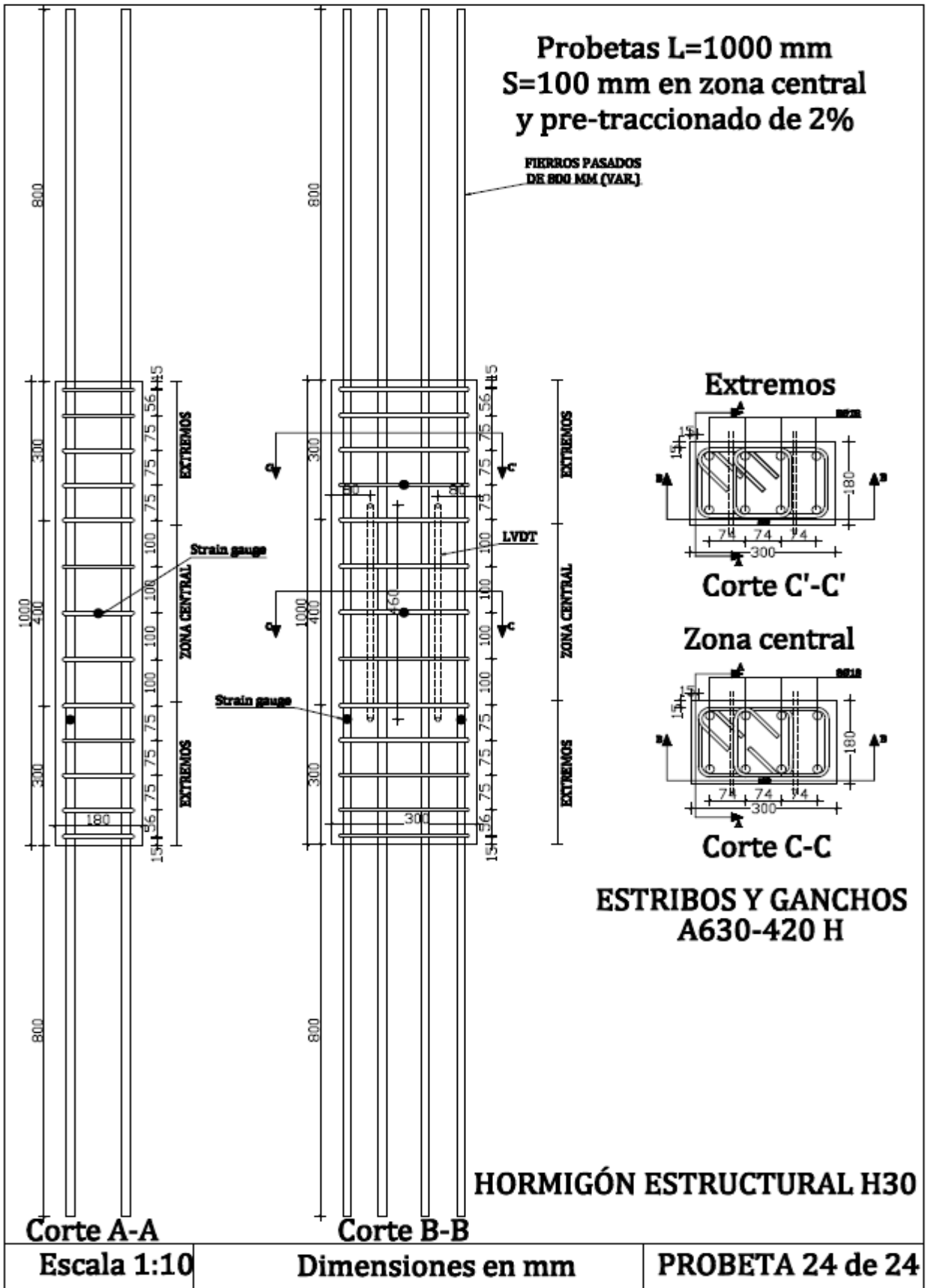
Corte B-B

Escala 1:10

Dimensiones en mm

PROBETA 22 de 24





## ANEXO C: COMPARACIONES GIRO PROBETAS

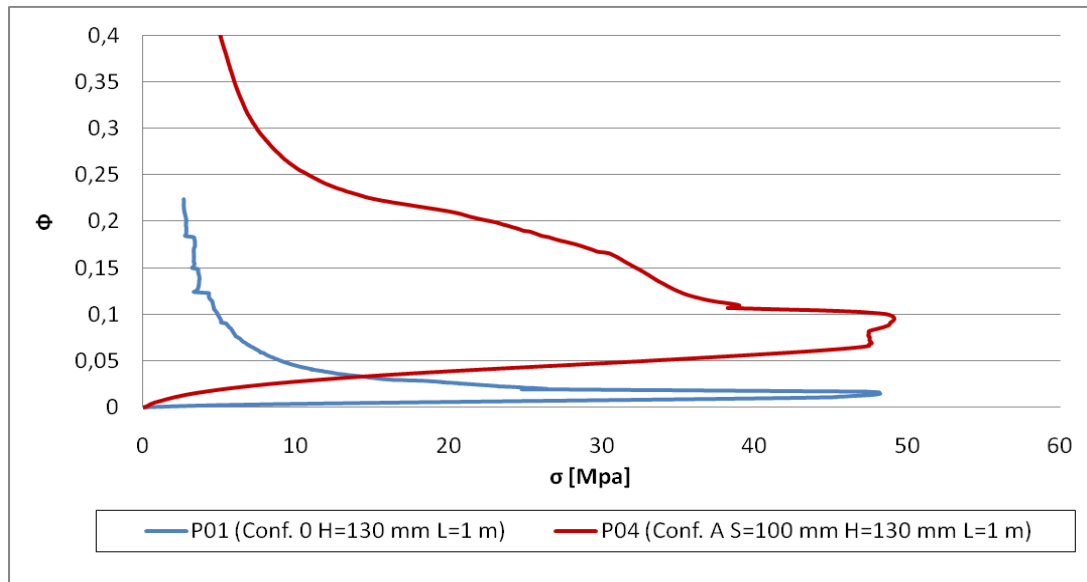


Figura B.1 - Comparación giro probetas con y sin confinamiento H=130 mm

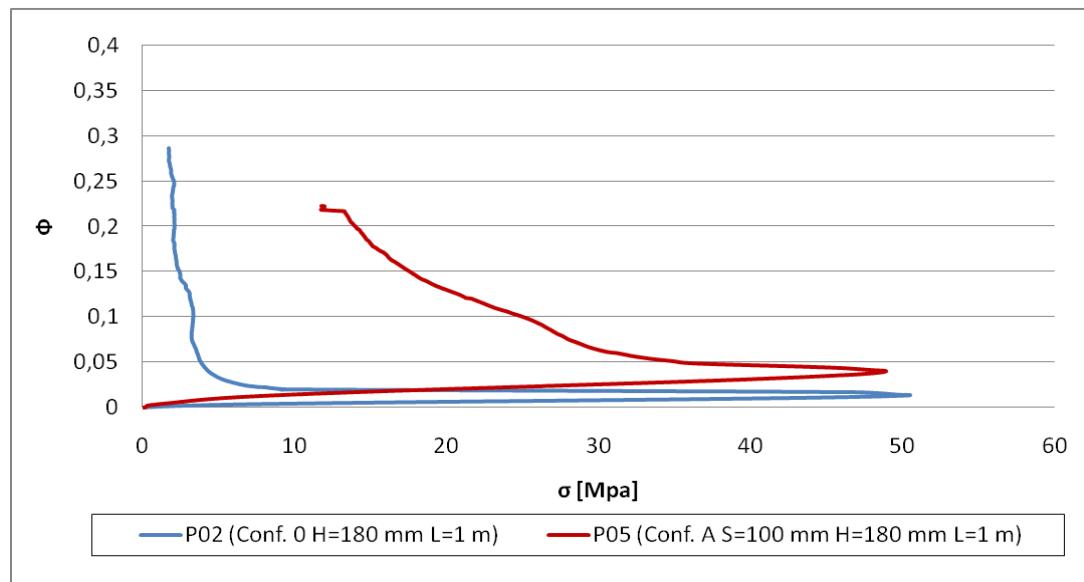


Figura B.2 - Comparación giro probetas con y sin confinamiento H=180 mm

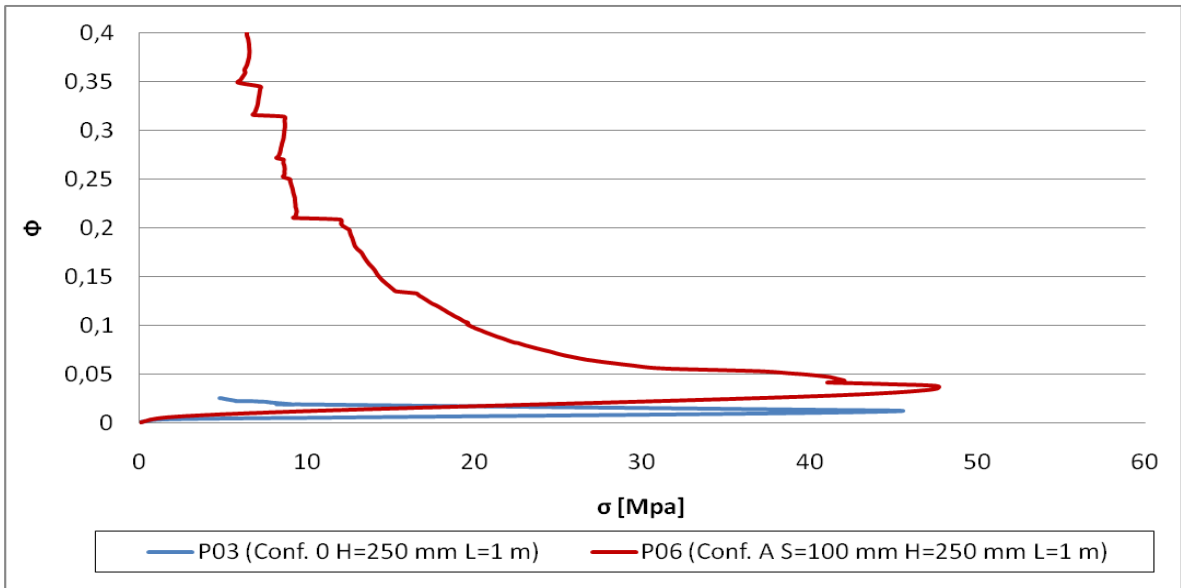


Figura B.3 - Comparación giro probetas con y sin confinamiento H=250 mm

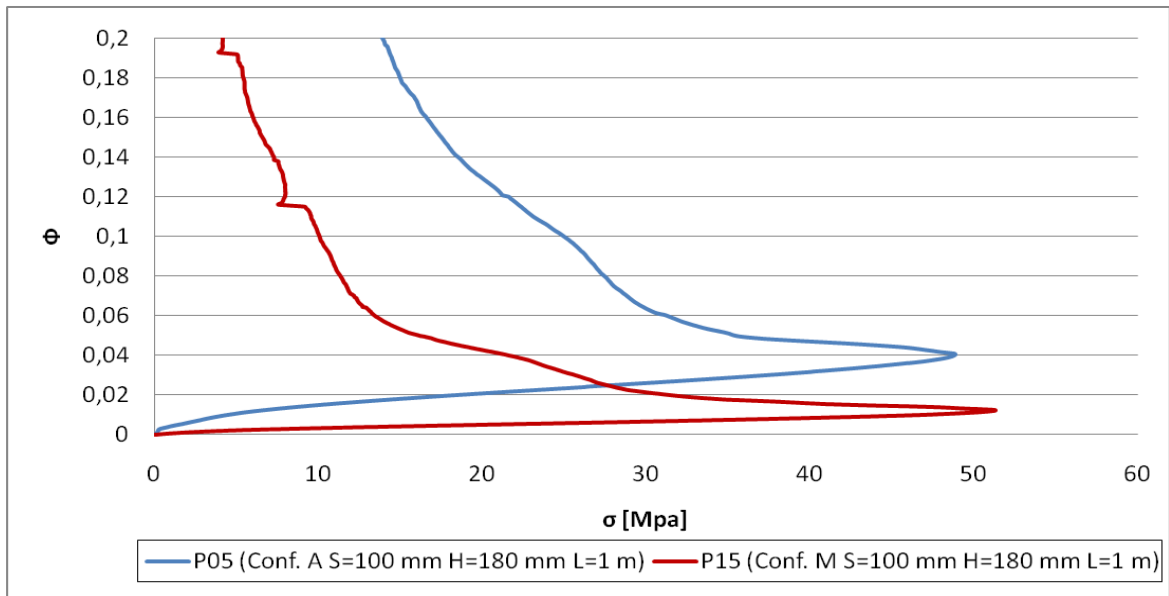


Figura B.4 - Comparación giro probetas con diferentes calidades de acero y S=100 mm

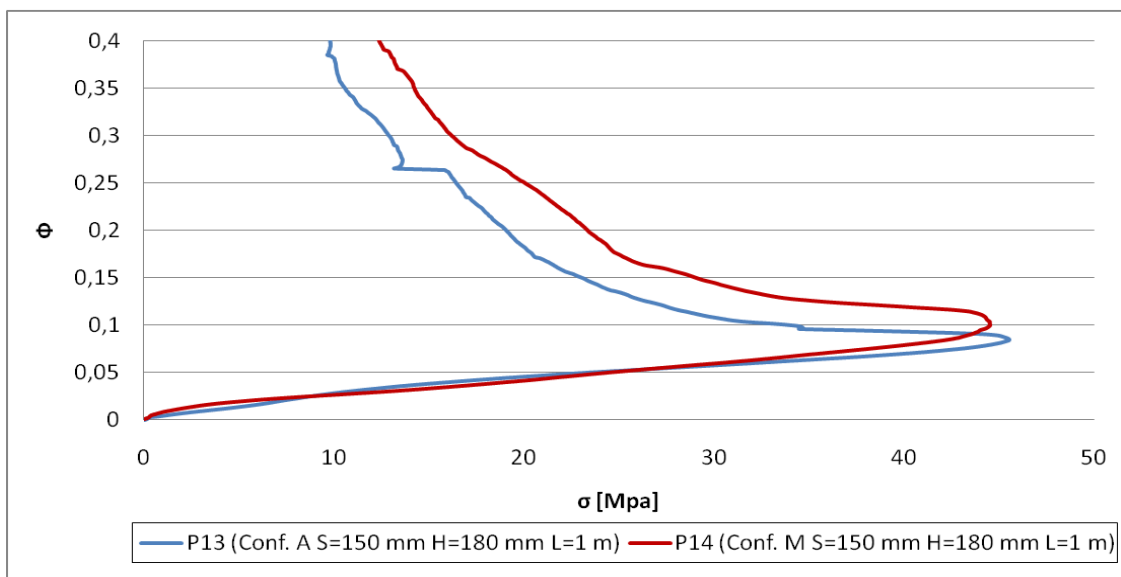


Figura B.5 - Comparación giro probetas con diferentes calidades de acero y  $S=150$  mm

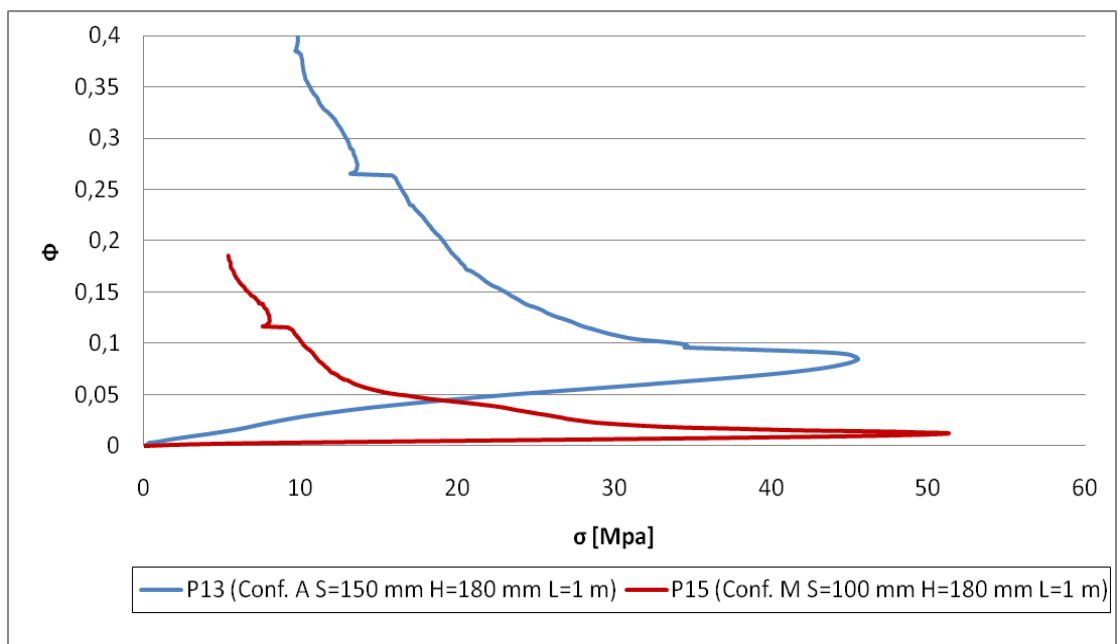


Figura B.6 - Comparación giro probetas con 50% de diferencia en calidad de acero y confinamiento

## ANEXO D: DEFORMACIONES LADO CORTO ESTRIBO CENTRAL

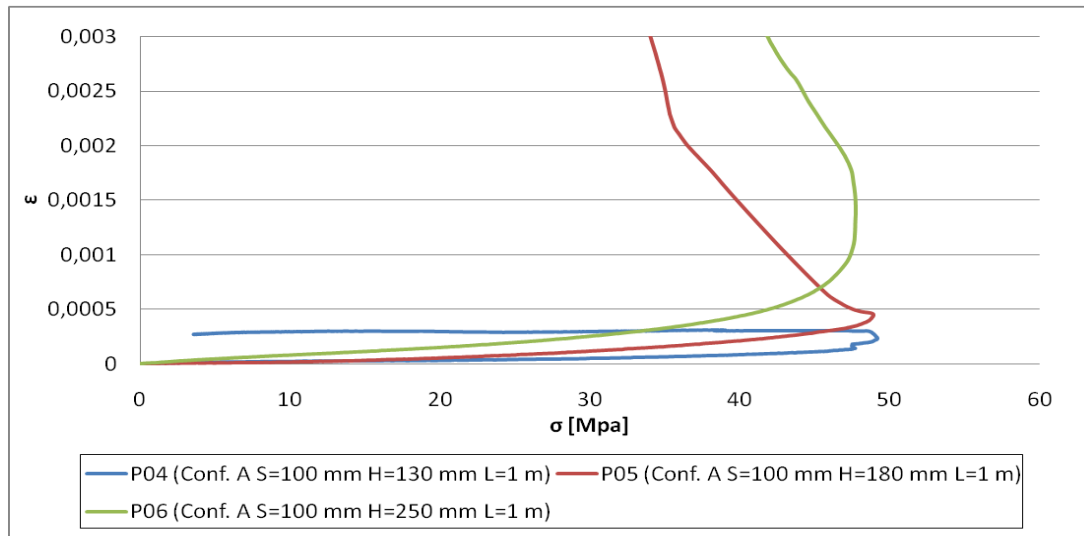


Figura C.1 -Comparación deformación estribo central lado corto probetas confinadas diferentes secciones

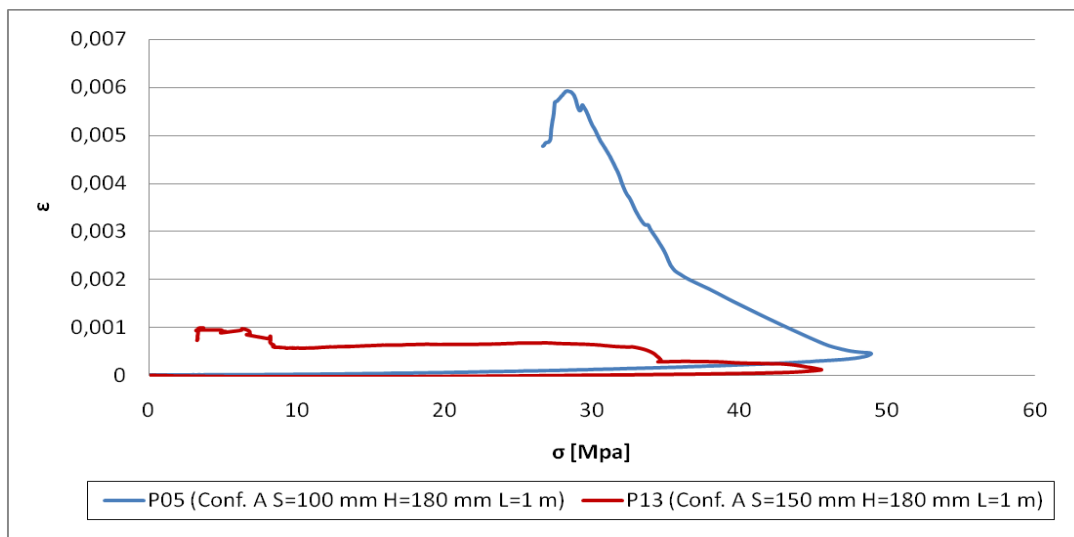


Figura C.2 –Comparación deformación estribo central lado corto acero A630-420 diferente espaciamiento

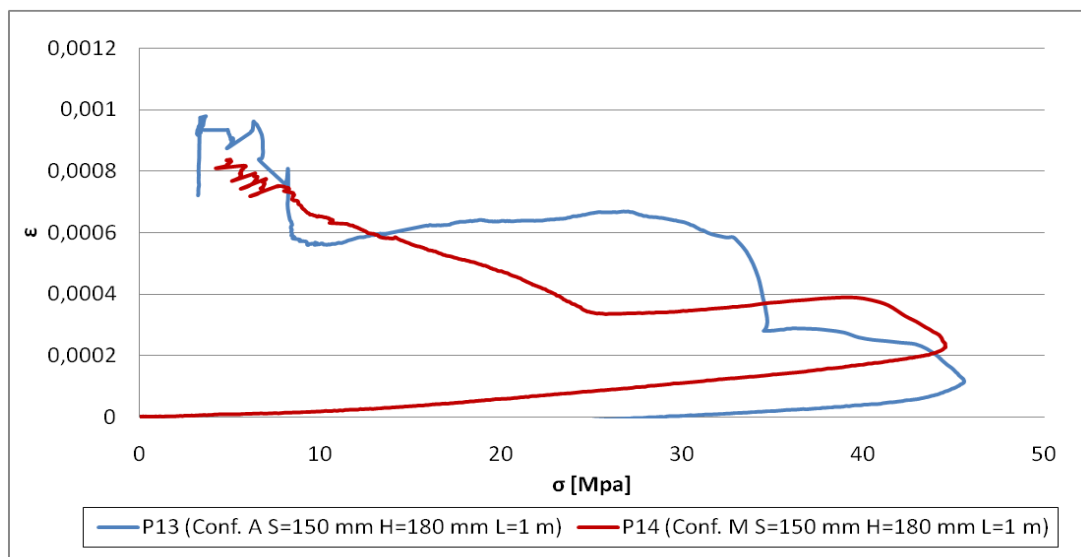


Figura C.3 –Comparación deformación estribo central lado corto diferentes aceros igual espaciamiento

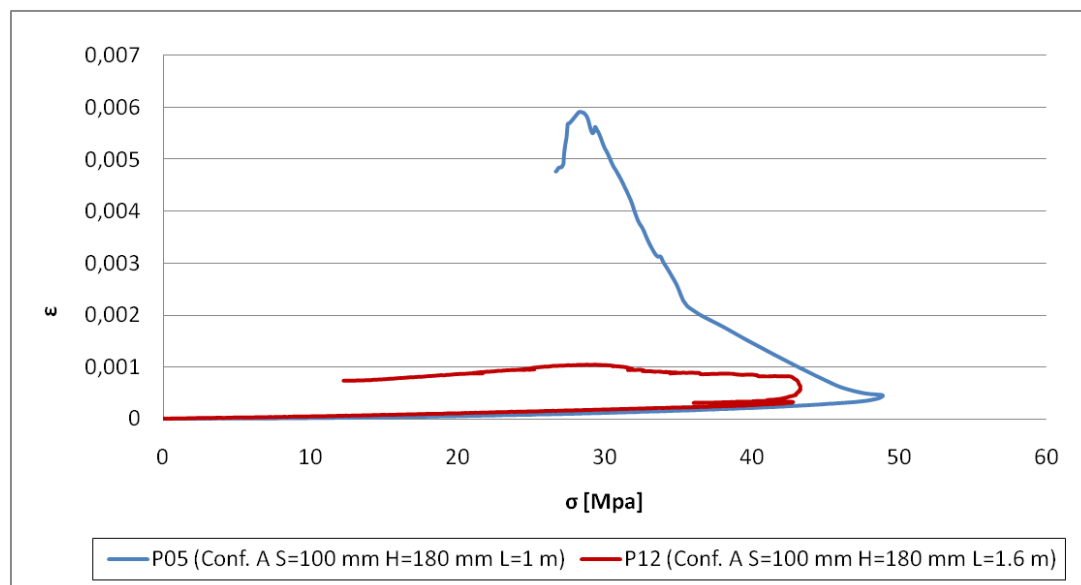


Figura C.4 –Comparación deformación estribo central lado corto diferente altura probeta



## ANEXO E: PREDICCIÓN MODELOS EXCLUIDOS

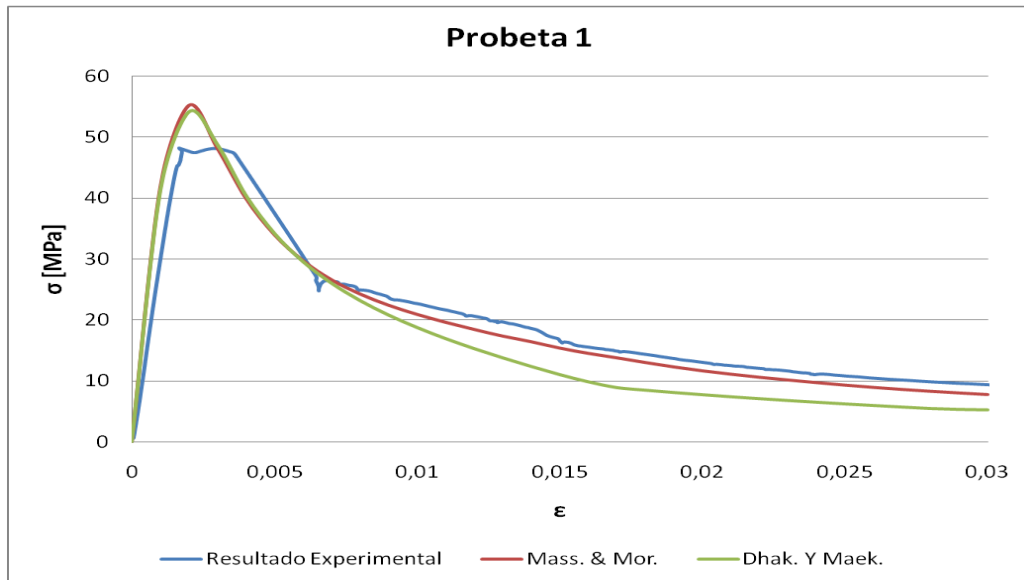


Figura E.1 - Resultado experimental y predicciones excluidas probeta 1

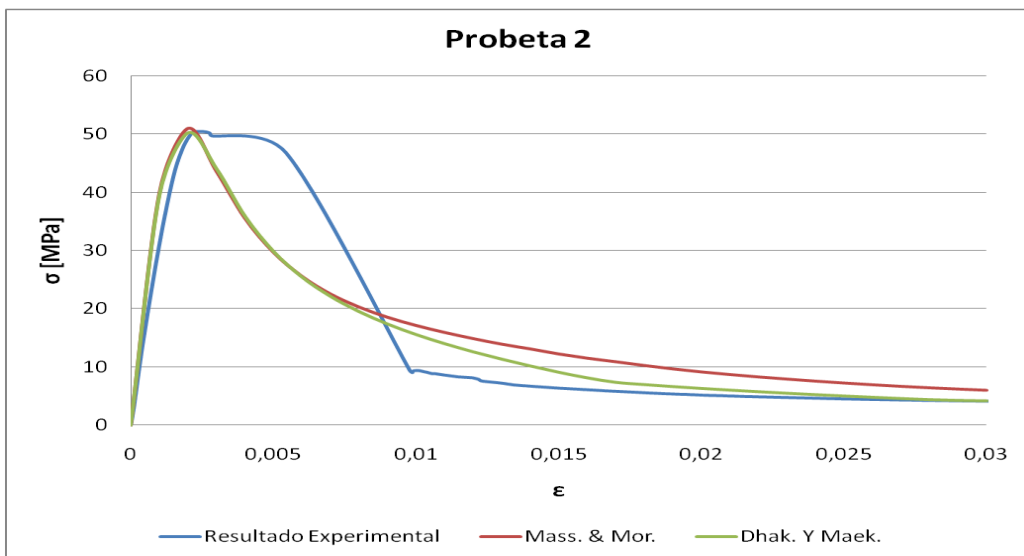


Figura E.2 - Resultado experimental y predicciones excluidas probeta 2

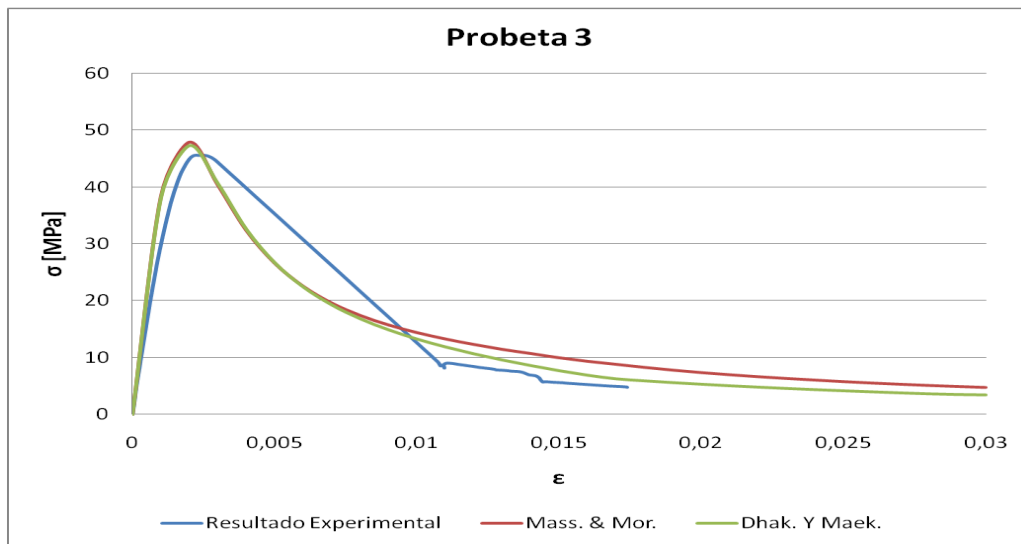


Figura E.3 - Resultado experimental y predicciones excluidas probeta 3

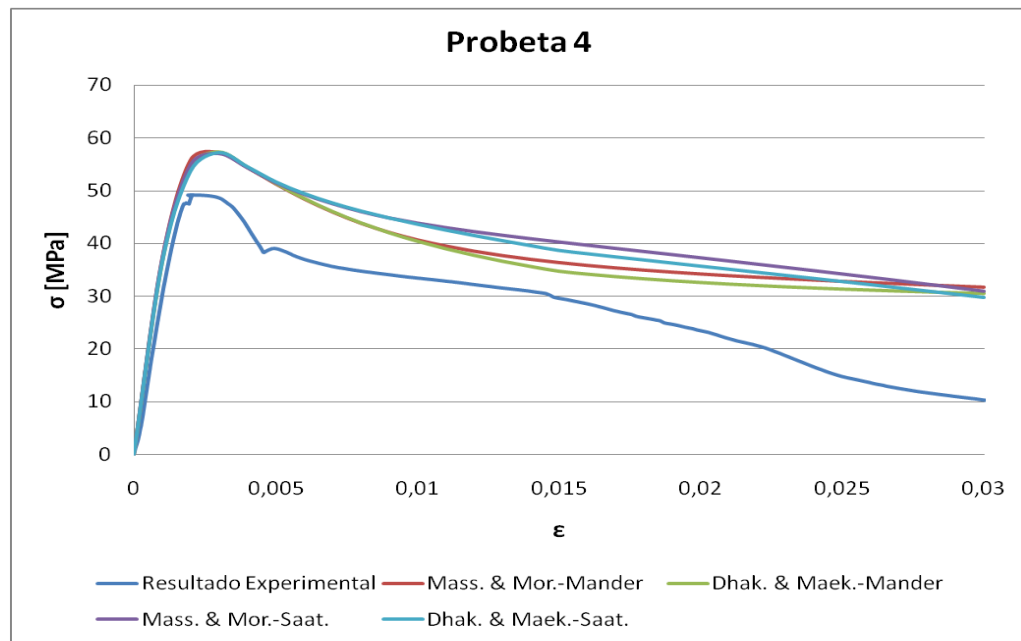


Figura E.4 - Resultado experimental y predicciones excluidas probeta 4

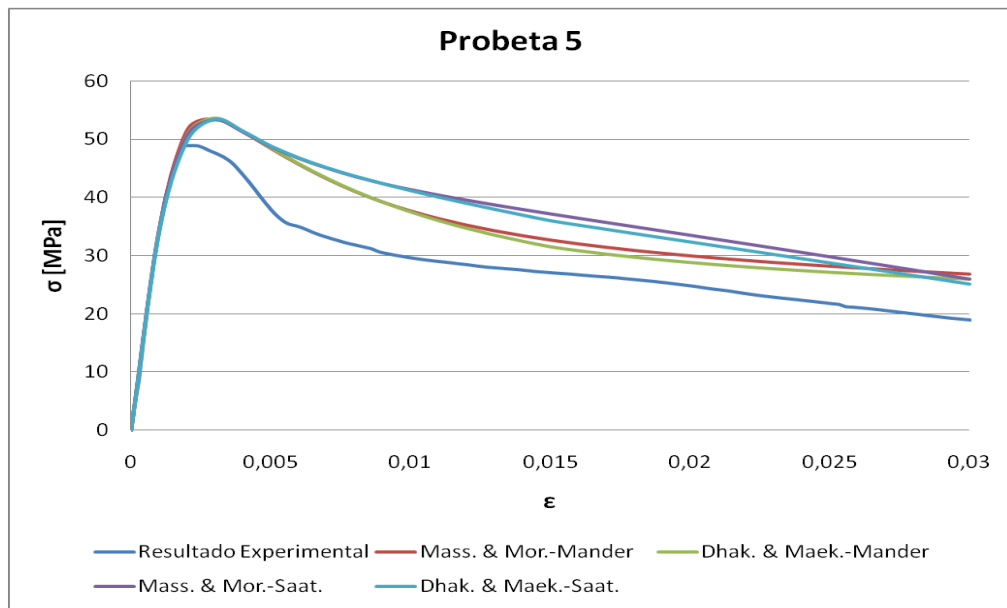


Figura E.5 - Resultado experimental y predicciones excluidas probeta 5

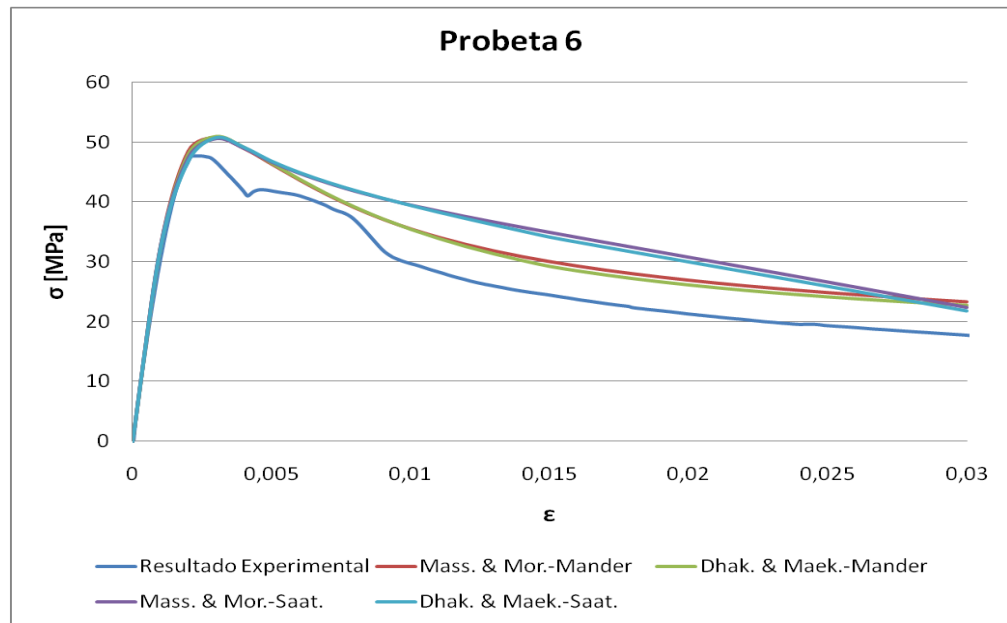


Figura E.6 - Resultado experimental y predicciones excluidas probeta 6

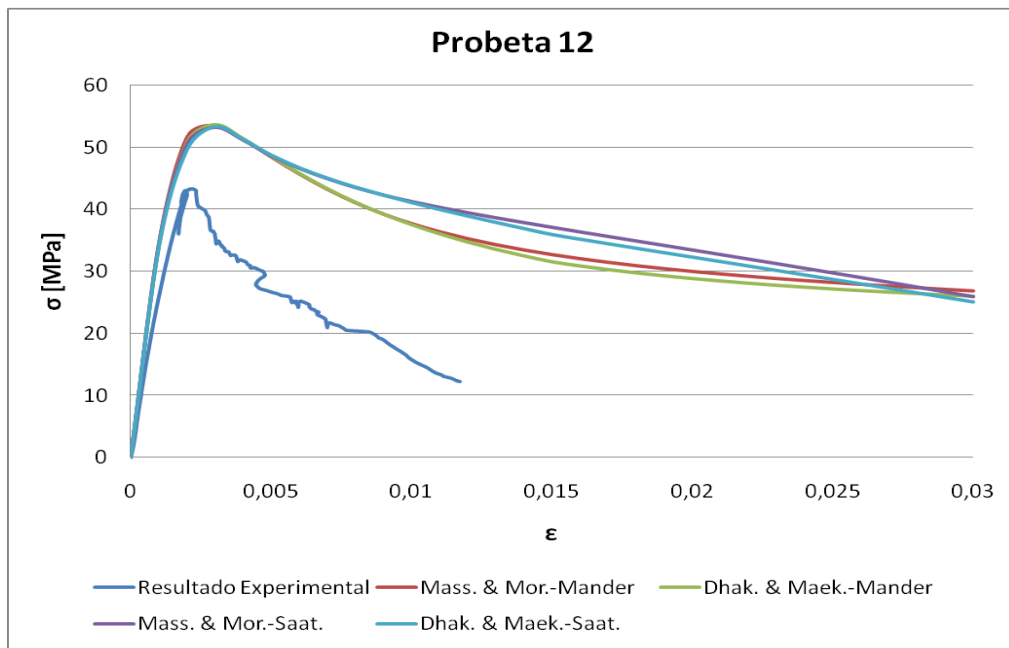


Figura E.7 - Resultado experimental y predicciones excluidas probeta 12

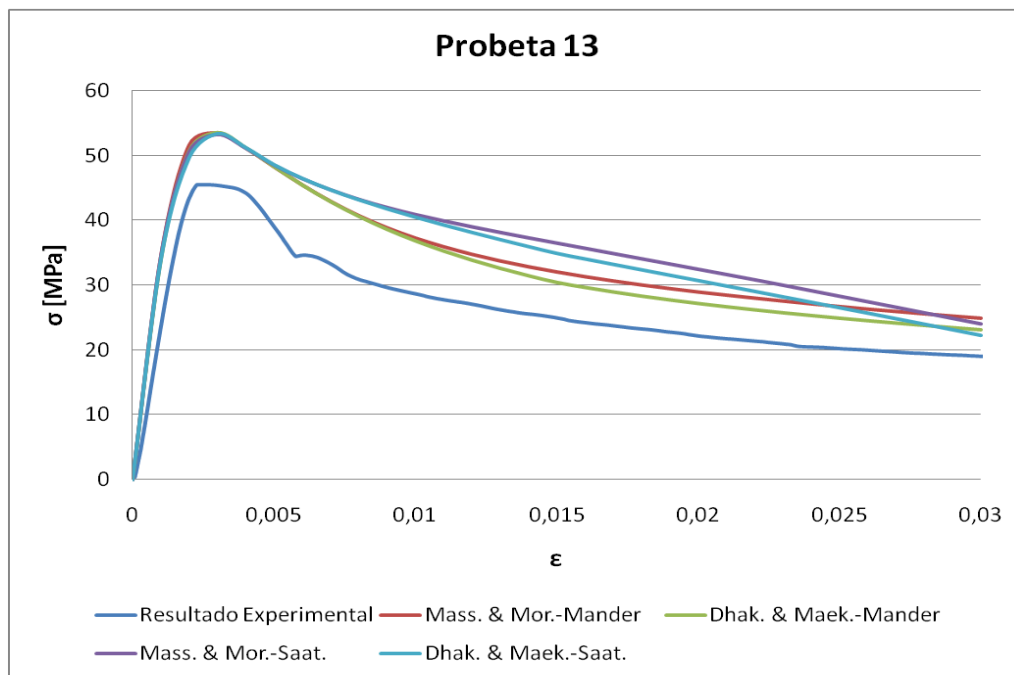


Figura E.8 - Resultado experimental y predicciones excluidas probeta 13

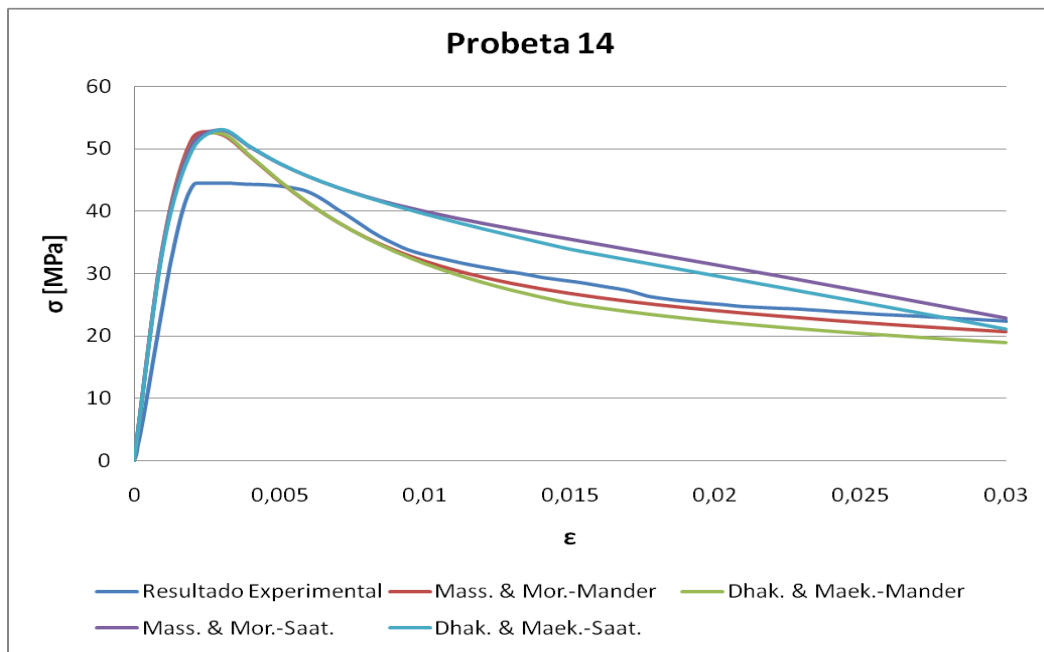


Figura E.9 - Resultado experimental y predicciones excluidas probeta14

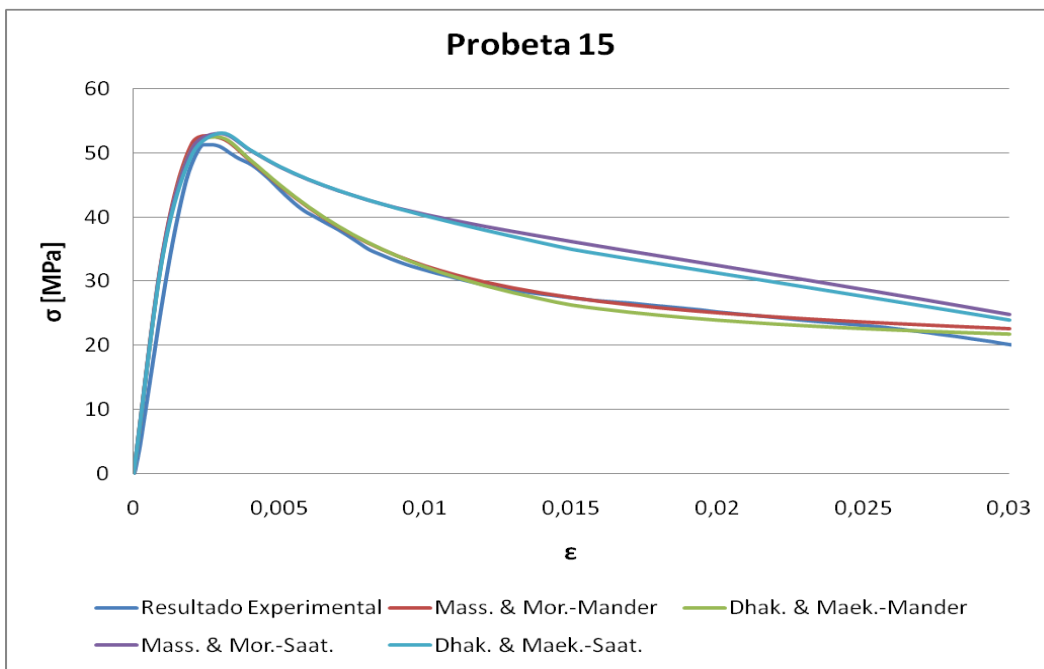


Figura E.10 - Resultado experimental y predicciones excluidas probeta 15