

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

Profesor Patrocinante: Mg. Alexander Opazo Vega
Comisión Examinadora: Mg. Gilda Espinoza
Mg. Ángela Salinas



***“ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE
UNIONES HÍBRIDAS EN UNA COLUMNA
PREFABRICADA DE HORMIGÓN ARMADO”***

Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para obtener el
Título de Ingeniero Civil

**RICARDO ANDRÉS CISTERNA MARCHANT
VICENTE GASPAR JARA CRUA**

Concepción, Marzo de 2016

Dedicatoria:

Se termina este largo proceso educativo, el cual me llenó de conocimientos y valores, para lograr ser una mejor persona tanto en lo profesional como en lo personal.

Que no daría por que estuvieses aún conmigo para darte un abrazo y un beso, sé que desde el cielo siempre estas acompañándome e iluminando todos mis pasos, eres mi ángel y mi ejemplo a seguir te amo infinitamente mamita linda gracias por todo lo que me entregaste, vives cada día en mi corazón y recuerdos.

Ricardo Cisterna Marchant

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres Carlos y Roser, que me apoyaron durante toda mi formación académica. A mi segunda madre Sandra, por acogerme en su hogar durante todos estos años, a mis amigos y compañeros que estuvieron a mi lado durante esas interminables noches de estudio y a todas las personas que me apoyaron en este proceso de formación universitaria.

Vicente Jara Crua

Agradecer a mis padres María y Luis, por enseñarme a caminar, a leer, a tener una infancia feliz, a luchar por mis sueños, gracias por entregarme todo su apoyo y amor todos estos años, hacerles saber que sin ustedes nada de esto hubiese sido posible.

Conjuntamente, agradecemos a nuestro profesor guía Alexander Opazo, por su tiempo y dedicación.

Por último, agradecemos al cuerpo de docentes y funcionarios del departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, por los conocimientos y serviciabilidad brindada a lo largo de estos años.

Gracias a mis hermanos Cesar y Susan por los lindos sobrinos que me dieron y por su apoyo incondicional.

Gracias a toda mi familia que siempre estuvo presente y fue un pilar fundamental en este camino, a mis amigos de incontables historias y recuerdos que siempre estarán en memoria y corazón.

Ricardo Cisterna Marchant

Gracias

NOMENCLATURA

$A_{pt} = A_{ps} =$ Área de los cables post-tensados, cm^2

$A_s =$ Área de las barras de acero dúctil en tracción, cm^2

$A'_s =$ Área de las barras de acero dúctil en compresión, cm^2

$b =$ Ancho de la columna, cm

$d' =$ Distancia desde las barras de acero dúctil en compresión hasta el extremo comprimido de la fibra, cm

$d =$ Distancia desde las barras de acero dúctil en tracción hasta el extremo comprimido de la fibra, cm

$E_p =$ Modulo de elasticidad de los cables post-tensados, kg/cm^2

$f_{py} =$ Tensión de fluencia de los cables post-tensados, kg/cm^2

$f_{sy} = f_y =$ Tensión de fluencia del acero dúctil, kg/cm^2

$f'_c =$ Resistencia a la compresión del hormigón, kg/cm^2

$f_{pi} =$ Tensión inicial en los cables post-tensados, kg/cm^2

$f_{prs} =$ Tensión de los cables post-tensados cuando la tensión en el acero dúctil es f_u ,
 kg/cm^2

$f_u =$ Tensión de rotura del acero especial, kg/cm^2

$F_{pt} =$ Fuerza en los cables post-tensados, Kg

$F_{st} =$ Fuerza en las barras de acero dúctil en tracción, Kg

$F_{sc} =$ Fuerza en las barras de acero dúctil en compresión, Kg

$h =$ Altura de la columna, cm

$l_{pu} =$ Longitud sin adherencia de los cables post-tensados, cm

$M_{cap} =$ Capacidad total de momento de la unión híbrida con respecto a la posición de la fuerza resultante de compresión en el hormigón., T/m

$M_{pt} = M_{prs} =$ Resistencia a momento proporcionado por los cables post-tensados, T/m

$M_{st} =$ Resistencia a momento proporcionado por las barras de acero dúctil en tracción, T/m

$M_{sc} =$ Resistencia a momento proporcionado por las barras de acero dúctil en compresión,
 T/m

$M_s =$ Resistencia a momento proporcionado por las barras de acero dúctil, T/m

$M_{pr} =$ Resistencia a momento probable de la unión híbrida, T/m

α = Distancia desde la posición de la fuerza de compresión resultante en el hormigón hasta el extremo comprimido de la fibra dividido por h , **cm**

$\beta_1 * c$ = Profundidad del bloque de tensiones, **cm**

ζ = Distancia desde las barras de acero dúctil en tracción hasta el extremo comprimido de la fibra dividido por h , **cm**

η = Profundidad del eje neutro dividido por h , **cm**

θ = Rotación de la interface de la unión híbrida.

θ_f = Rotación ultima en la interface de la unión híbrida.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	10
1.1. Objetivos de la investigación	12
<i>1.1.1. Objetivo general</i>	12
<i>1.1.2. Objetivos específicos</i>	12
2. ASPECTOS CLAVES DE LAS UNIONES HÍBRIDAS	13
2.1 Uniones híbridas	13
2.2. Modelación numérica del comportamiento mecánico de uniones híbridas	14
2.2. Método para estimar teóricamente las envolventes momento rotación de uniones híbridas	15
3. MATERIALES Y MÉTODOS	18
3.1. Caracterización de la columna de estudio	18
3.2. Ensayo realizado en terreno	19
3.3. Obtención de envolvente momento-rotación de la unión híbrida	20
<i>3.3.1. Obtención de envolventes por método PRESSSS modificado</i>	20
3.4. Modelación de la columna con unión híbrida	22
<i>3.4.1. Modelo de la columna con unión híbrida</i>	22
3.5. Tipo de análisis	23
<i>3.5.1. Análisis Pushover</i>	24
4. RESULTADOS DEL ANÁLISIS TEÓRICO EXPERIMENTAL	25
4.1. Resultados del ensayo prueba de carga de columna	25
4.2. Resultados del análisis PRESSSS modificado	26
4.3. Resultados de modelación de la columna con unión híbrida	27
4.4. Resultados de la comparación teórico experimental de la unión híbrida	28
4.5. Discusión de resultados	29
5. CONCLUSIONES	30
5.1. Comentarios	31
5.2. Futuras líneas de investigación	31
6. BIBLIOGRAFÍA	32
7. ANEXOS	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquemas de unión híbrida y sus componentes	13
Figura 2: Esquemas de funcionamiento de las uniones híbridas, (a) modelo físico y analítico, (b) ecuaciones constitutivas representativas (Pampanin, 2001)	14
Figura 3: Esquema de sección de la columna (Celik y Sritharan, 2004)	15
Figura 4: Fuerzas internas que actúan en la unión híbrida (adaptadas de Celik y Sritharan, 2004)	16
Figura 5: Detalles constructivos, (a) columna y componentes, (b) cortes y detalles transversales (adaptadas de planos constructivos CITEC UBB)	18
Figura 6: Disposición inicial de la columna y sistemas de apoyo (CITEC UBB)	19
Figura 7: Esquema del ensayo realizado en terreno (CITEC UBB)	19
Figura 8: Diagrama de flujo procedimiento de análisis PRESSS modificado (Celik y Sritharan, 2004)	21
Figura 9: Modelo de elementos finitos de la columna con unión híbrida	22
Figura 10: Propiedad Multi-Linear Takeda Plastic para deformación uniaxial (adaptada de Takeda, Sozen y Nielsen, 1970)	23
Figura 11: Análisis Pushover, (a) carga eje z positivo, (b) carga eje z negativo	24
Figura 12: Curva de carga vertical versus desplazamiento relativo vertical	25
Figura 13: Envolventes momento-rotación de la unión híbrida	26
Figura 14: Ciclos de carga y descarga obtenidos de la modelación no lineal	27
Figura 15: Comparación de las curvas teóricas y experimentales	28

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Valor de las propiedades de sección y materiales	20
Tabla 2: Valor de las propiedades hormigón H40	22
Tabla 3: Desplazamientos considerados en el análisis Pushover	24

ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UNIONES HÍBRIDAS EN UNA COLUMNA PREFABRICADA DE HORMIGÓN ARMADO

Autores: Ricardo Cisterna Marchant

Vicente Jara Crua

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

Correo Electrónico: rcister@alumnos.ubiobio.cl

vgjara@alumnos.ubiobio.cl

Profesor Patrocinante: Alexander Opazo Vega

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

Correo Electrónico: aopazove@ubiobio.cl

RESUMEN

Dentro de las tipologías constructivas más utilizadas en estructuras industriales, destacan los pórticos prefabricados de hormigón armado. No obstante, diversas investigaciones han demostrado que este tipo de estructuras pueden quedar con daños y deformaciones remanentes, luego de eventos sísmicos importantes. Para controlar estos daños se desarrolló el concepto de uniones híbridas, donde se combinan propiedades de auto-centrado y disipación de energía, a partir del uso de cables post-tensados sin adherencia y barras longitudinales de acero dúctil no pretensadas. El sistema de uniones híbridas se ha utilizado anteriormente en otros países, sin embargo, en Chile aún no se ha validado su comportamiento para un elemento real construido. Es por ello, que el propósito de este trabajo es analizar el comportamiento teórico-experimental de una columna con uniones híbridas. A través de modelaciones numéricas se simulará el ensayo prueba de carga a columna realizado por CITEC UBB, y así obtener teóricamente la respuesta de la unión híbrida. Al comparar estas respuestas teóricas y experimentales de la unión, se observó que las curvas teóricas disipan mayor energía que las experimentales. Esto podría deberse principalmente a los métodos de análisis empleados y a parámetros constructivos.

Palabras Claves: Unión híbrida, cables post-tensados, acero dúctil, disipación de energía.

5500 Palabras Texto + 14 Figuras/Tablas*250 + 5 Figuras*500 = 11.500 Palabras aprox.

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS FROM HYBRID JOINT IN PRECAST COLUMN REINFORCED CONCRETE

Authors: Ricardo Cisterna Marchant

Vicente Jara Crua

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío Bío

Email: rcister@alumnos.ubiobio.cl

vgjara@alumnos.ubiobio.cl

Professor Sponsor: Alexander Opazo Vega

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío Bío

Email: aopazove@ubiobio.cl

ABSTRACT

Precast reinforced gantries stand out within constructive typology in industrial structures. Nevertheless, diverse studies have shown this kind of structures can get seriously damaged and with remaining deformation afterwards important seismic events. In order to control these damages, the concept of Hybrid Joints was developed, where auto-centring and power dissipation get combined from the use of Post-Tensioned Tendons without adhesion and non prestressed Mild Steel longitudinal bars. The Hybrid Joints system has been used in some countries; however, its performance on a real constructed element has not been validated in Chile. Due to this fact, the purpose of this research was to analyse the theoretical and experimental performance of a column with Hybrid Joints. The column load test was simulated through numerical modelling by CITEC UBB in order to theoretically get the response of the Hybrid Joint. By comparing these theoretical and experimental responses, it was found that theoretical curves dissipate more energy than the experimental ones, which could mainly be due to the methods of analysis used and to constructive parameters.

Keywords: Hybrid Joint, Post-Tensioned Tendons, Mild Steel, Power Dissipation.

1. INTRODUCCIÓN

La normativa vigente para el diseño sísmico de estructuras industriales en Chile, establece como objetivos la protección de la vida y continuidad de operación en la industria. El cumplimiento de estas exigencias no garantiza la ausencia de daño estructural frente a un evento sísmico importante. Este escenario ha generado disputas legales entre los inversionistas, empresas constructoras y consultoras de ingeniería estructural, debido a las diferentes expectativas que tienen en términos de desempeño y daño estructural.

Dentro de las tipologías constructivas más utilizadas en estructuras industriales, destacan los pórticos prefabricados de hormigón armado. Su rapidez de montaje, costos competitivos, excelente resistencia al fuego, y versatilidad arquitectónica, la han establecido como una alternativa válida frente a otras soluciones. No obstante, diversas investigaciones teóricas y de campo, han demostrado que este tipo de estructuras pueden quedar con daños y deformaciones remanentes, luego de eventos sísmicos importantes. Esta situación se evidencia aún más, cuando estos proyectos son fundados en suelos blandos, aumentando la probabilidad de tener que incurrir en disputas legales y gastos adicionales de reparación y rehabilitación estructural. Los daños típicos en estas estructuras se concentran en las bases y en las conexiones con otros elementos estructurales de las columnas prefabricadas, debido a la fuerte demanda de inelástica en la sección transversal. Estos daños son bastante indeseables, pues impiden la continuidad de operación de la industria e incluso pueden llevar al colapso de ella.

Con la evidencia antes mencionada, en los últimos 15 años se han llevado a cabo una serie de iniciativas, destinadas a generar técnicas de diseño para “controlar el daño” en estructuras prefabricadas de hormigón armado (Pampanin, 2005). Una de las primeras iniciativas, fue un sistema de uniones dúctiles denominado PRESSS (Precast Seismic Structural System), ensayado en la Universidad de California (Priestley, 1991; Priestley 1996, Priestley et al., 1999), con cables post-tensados desprovistos de adherencia.

La demanda inelástica se adapta dentro de la conexión, a través de la abertura y cierre de un espacio existente, en un movimiento del tipo balanceo. Como resultado, se logró una configuración que puede desarrollar desplazamientos inelásticos, limitando el daño estructural y asegurando una capacidad auto-centrante completa. El comportamiento de la unión es esencialmente no lineal elástico, con una reducida capacidad de disipación de energía.

Como mejora al sistema PRESSS (Stanton et al., 1997) desarrollaron el concepto de uniones híbridas, donde combinaron las propiedades de auto-centrado y disipación de energía, a partir del uso de cables post-tensados sin adherencia y barras longitudinales de acero dúctil no pretensadas. Bajo acciones sísmicas de intensidad moderada, el clásico mecanismo de rotula plástica, es reemplazado por un mecanismo de balanceo controlado en la interface crítica, sin daño en el elemento estructural. Mientras los cables post-tensados proveen acciones restitutivas auto-centrantes, las barras de acero dúctiles actúan como disipadores de energía absorbiendo el impacto de las cargas sísmicas. Adicionalmente, para prevenir fracturas prematuras de estas barras de acero dúctiles, se les otorga una pequeña longitud sin adherencia en las cercanías de la unión híbrida, a través de una vaina.

El sistema de uniones híbridas se ha utilizado anteriormente en otros países, principalmente en puentes o estructuras portuarias, donde no existen elementos no estructurales que puedan dañarse a grandes deformaciones. En Chile, la empresa de Prefabricados Estructurales S.A. construyó bajo esta técnica, la Planta Papel Tissue perteneciente a la Papelera y Forestal Concepción (PFC). En diciembre del año 2014, la empresa JMS Ingenieros Consultores Ltda encargó al Laboratorio del Área de Ingeniería Estructural del Centro de Investigación Tecnológica de la Construcción de la Universidad del Bío-Bío (CITEC UBB) la realización de un ensayo de prueba de carga a una columna con uniones híbridas pertenecientes a este proyecto. Si bien las uniones híbridas son posibles de implementar en el país, aun no se ha validado su comportamiento para un elemento real construido. Es por esto, que el objetivo de esta investigación, es analizar la respuesta de uniones híbridas, de un proyecto industrial de pórticos prefabricados de hormigón armado, fundado sobre estratos profundos de suelos blandos.

A través de los ensayos en terreno disponibles y la calibración de modelos numéricos que permitan predecir nuevas condiciones de utilización, en el software SAP2000 (CSI, 2009), se obtendrán las respuestas teóricas y experimentales de la columna con uniones híbridas. Finalmente, se comentan los factores que afectaron los resultados y las eventuales ventajas comparativas en términos de control de daño. De esta forma, se pretende contribuir a la difusión de este sistema innovativo en zonas de alta sismicidad.

1.1. Objetivos de la investigación

1.1.1. Objetivo general

- Analizar la respuesta de unión híbrida en una columna de hormigón prefabricado, comparando su comportamiento teórico y experimental.

1.1.2. Objetivos específicos

- Sintetizar el estado del arte de la utilización de uniones híbridas en estructuras de hormigón prefabricado.
- Analizar los resultados del ensayo de prueba de carga a columna con uniones híbridas realizado por CITEC UBB.
- Seleccionar un método de análisis que permita predecir teóricamente, el comportamiento de una unión híbrida construida en Chile.
- Efectuar una modelación numérica que represente el comportamiento de uniones híbridas en una columna de hormigón prefabricado, en el software SAP2000.
- Comparar el comportamiento teórico-experimental de uniones híbridas en una columna de hormigón prefabricado.

2. ASPECTOS CLAVES DE LAS UNIONES HÍBRIDAS

El propósito de este capítulo es describir en detalle la base del problema tratado, así como las ecuaciones, ilustraciones y términos a utilizar. Además, se añade el aporte de otros autores que fueron de ayuda para la realización de este trabajo.

2.1 Uniones híbridas

El sistema de uniones híbridas consiste en la combinación de dos tipos de acero, que con distintas propiedades y modos de funcionamiento trabajan conjuntamente en favor de mantener al marco de una estructura sin sufrir daños. Esto gracias a que los esfuerzos internos de la estructura se dirigen hacia los puntos de conexión, donde se encuentra este sistema, el que actúa como punto de disipación de energía.

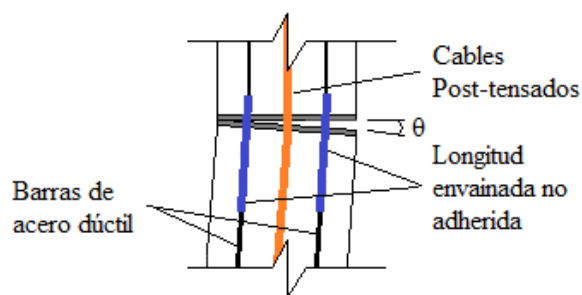


Figura 1: Esquemas de unión híbrida y sus componentes

Como se muestra en la Figura 1, el primer componente de la unión híbrida son los cables post-tensados que van insertos a lo largo de todo el marco. El cual actúa como fuerza restauradora cerrando la abertura. Al cerrarse la unión, debido al efecto de los cables post-tensado, la estructura vuelve a la posición inicial quedando sin deformaciones remanentes. El otro componente son las barras de acero dúctil, que van insertas en la parte superior e inferior de la columna, que tienen una longitud envainada no adherida la cual es capaz de fluir con lo cual se obtendrá disipación de energía por histéresis.

2.2. Modelación numérica del comportamiento mecánico de uniones híbridas

Para simular el comportamiento bajo cargas cíclicas Pampanin (2001) propuso utilizar dos resortes rotacionales en paralelo, que representan el aporte del acero dúctil y de los cables post-tensados. Para las barras de acero dúctil se emplea una ley bilineal inelástica, y para los cables post-tensados una ley bilineal elástica. Combinando ambos aportes se obtiene una curva momento-rotación similar a las medidas experimentalmente por Pampanin et al. (2001). En la Figura 2 (a) se muestra un esquema del modelo físico y analítico considerado.

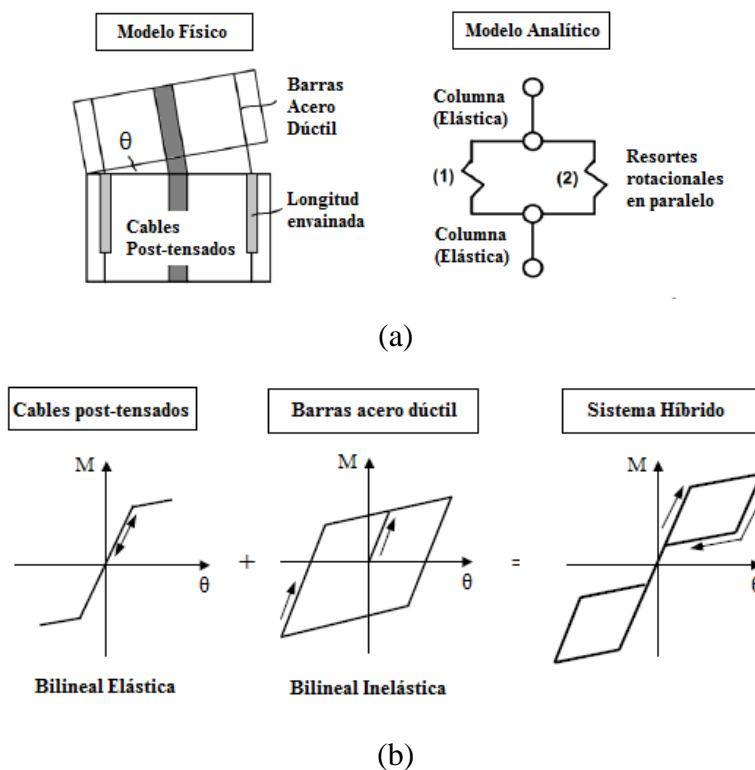


Figura 2: Esquemas de funcionamiento de las uniones híbridas, (a) modelo físico y analítico, (b) ecuaciones constitutivas representativas (Pampanin, 2001)

Estas curvas momento-rotación, son descritas por un comportamiento histerético con “forma de bandera”. Durante un movimiento sísmico, el suelo transmite energía a la estructura a través de su base. Parte de esa energía es almacenada temporalmente en la estructura en forma de energía cinética y de deformación. El resto se disipa por amortiguamiento y deformación inelástica, esta última correspondiente a la energía disipada por la histéresis.

Al disipar energía de esta forma los materiales que componen a la estructura, se agrietan y fluyen lo que genera una respuesta inmediata a cargas menores. Se muestra en la Figura 2 (b) un esquema que indica la forma que toma la relación fuerza-deformación en un ciclo carga-descarga.

2.2. Método para estimar teóricamente las envolventes momento rotación de uniones híbridas

Dentro de los diversos métodos que existe para determinar las envolventes momento-rotación de la unión híbrida, destaca el propuesto por Celik y Sritharan (2004). El método de análisis PRESSS modificado proporciona un procedimiento para obtener las envolventes momento-rotación de la unión híbrida, con parámetros adaptables a la columna construida en Chile. Estas envolventes se requieren para caracterizar los materiales que componen a la unión híbrida. En la Figura 3 se muestran las dimensiones de sección de la columna usada en el análisis PRESSS modificado.

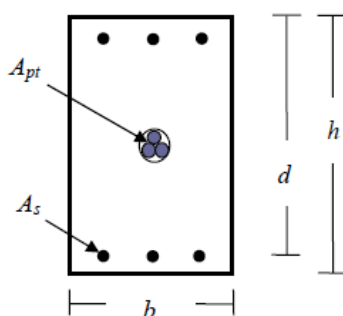


Figura 3: Esquema de sección de la columna (Celik y Sritharan, 2004)

Donde:

A_{pt} : Área de los cables post-tensados.

A_s : Área de las barras de acero dúctil en compresión o tracción.

h : Altura de la columna.

b : Ancho de la columna.

d : Distancia desde las barras de acero dúctil en tracción hasta el extremo comprimido de la fibra.

El momento resistente aportado por los cables post-tensados, barras de acero dúctil en compresión y tracción se determinan a partir de la posición de la fuerza de compresión resultante en el hormigón, detalladas desde las ecuaciones (1) hasta (3) respectivamente. La capacidad total de momento de la unión híbrida, corresponde a la suma de todos los componentes anteriores y está dada por la ecuación (4). En la Figura 4 se muestra un esquema de las fuerzas internas que actúan en la unión híbrida.

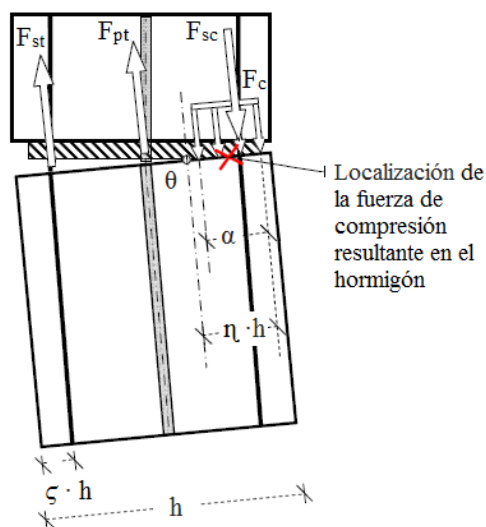


Figura 4: Fuerzas internas que actúan en la unión híbrida (adaptadas de Celik y Sritharan, 2004)

$$M_{pt} = F_{pt} * (0.5 - \alpha) * h \quad \text{Ec. (1)}$$

$$M_{st} = F_{st} * (1 - \alpha - \zeta) * h \quad \text{Ec. (2)}$$

$$M_{sc} = F_{sc} * (\alpha - \zeta) * h \quad \text{Ec. (3)}$$

$$M_{cap} = M_{pt} + M_{st} + M_{sc} \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde:

α : Distancia desde la posición de la fuerza de compresión resultante en el hormigón hasta el extremo comprimido de la fibra dividido *por* h .

ζ : Distancia desde las barras de acero dúctil en tracción hasta el extremo comprimido de la fibra dividido por h .

η : Profundidad del eje neutro dividido por h .

F_{pt} : Fuerza en los cables post-tensados.

F_{st} : Fuerza en las barras de acero dúctil en tracción.

F_{sc} : Fuerza en las barras de acero dúctil en compresión.

M_{pt} : Resistencia a momento proporcionado por los cables post-tensados.

M_{st} : Resistencia a momento proporcionado por las barras de acero dúctil en tracción.

M_{sc} : Resistencia a momento proporcionado por las barras de acero dúctil en compresión.

M_{cap} : Capacidad total de momento de la unión híbrida con respecto a la posición de la fuerza resultante de compresión en el hormigón.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

En el siguiente capítulo se presenta la columna con uniones híbridas y la forma en la cual es ensayada. Posteriormente se describe el método utilizado para la obtención de las envolventes momento-rotación. Y finalmente se exponen las variables a considerar en el modelo de elementos finitos, y la forma en que se realiza el análisis.

3.1. Caracterización de la columna de estudio

La columna con uniones híbridas pertenece a una nave industrial, conformada por pórticos prefabricados de hormigón armado, emplazada en una zona costera de alta sismicidad y fundada en un suelo blando. En la Figura 5 se muestran los detalles constructivos de la columna con uniones híbridas.

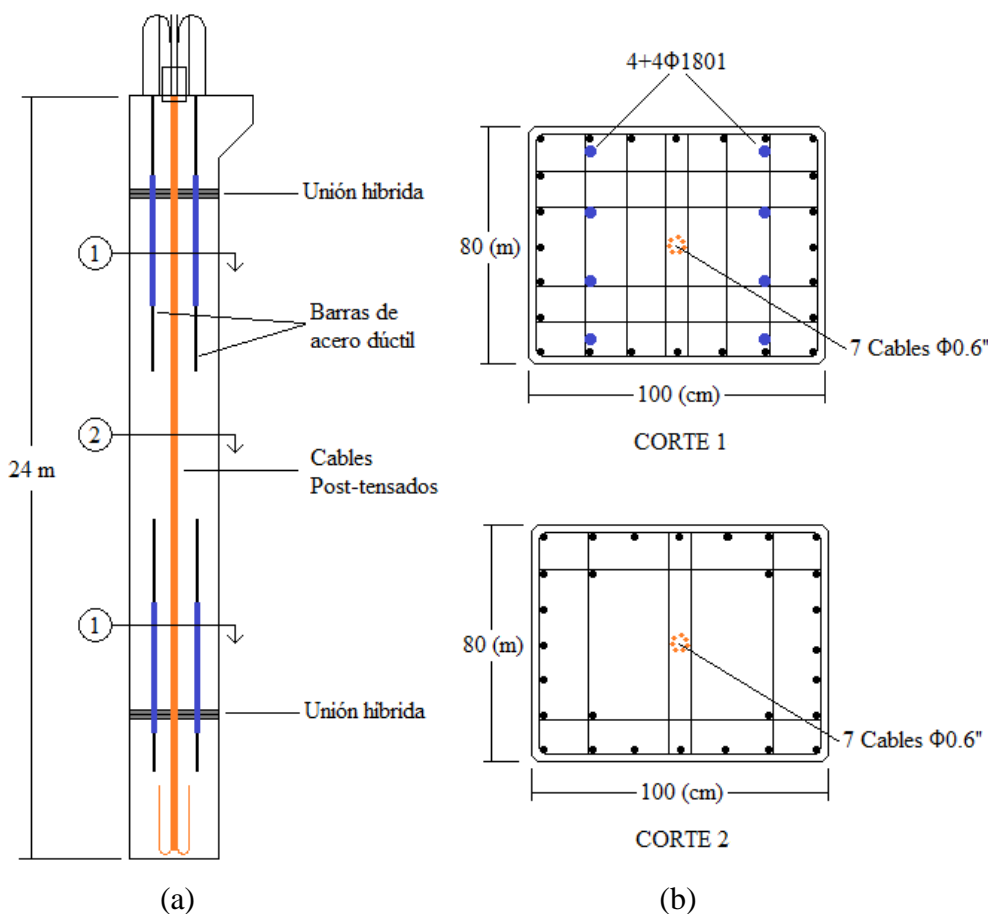


Figura 5: Detalles constructivos, (a) columna y componentes, (b) cortes y detalles transversales (adaptadas de planos constructivos CITEC UBB)

3.2. Ensayo de prueba de carga a columna con uniones híbridas

La columna fue donada por la empresa Prefabricados Estructurales S.A para fines de investigación, y se entregó en posición horizontal con el sistema de apoyos mostrado en la Figura 6. El ensayo se realizó según el protocolo definido por el CITEC UBB. Cabe mencionar que la columna solo presentaba operativos 7 de sus 8 cables post-tensados.



Figura 6: Disposición inicial de la columna y sistemas de apoyo (CITEC UBB)

La prueba consistió en aplicar un set de cargas verticales en el extremo de un tramo de la columna que estaba en voladizo, de tal manera de monitorear el comportamiento de una de las uniones híbridas auto-centrantes (CITEC UBB, 2014). La secuencia correspondió a 5 ciclos de carga-descarga: 4(T), 8(T), 12(T), 16(T) y 20(T). En la Figura 7 se muestra un esquema de la columna con la disposición del pistón de carga y los medidores de desplazamientos.

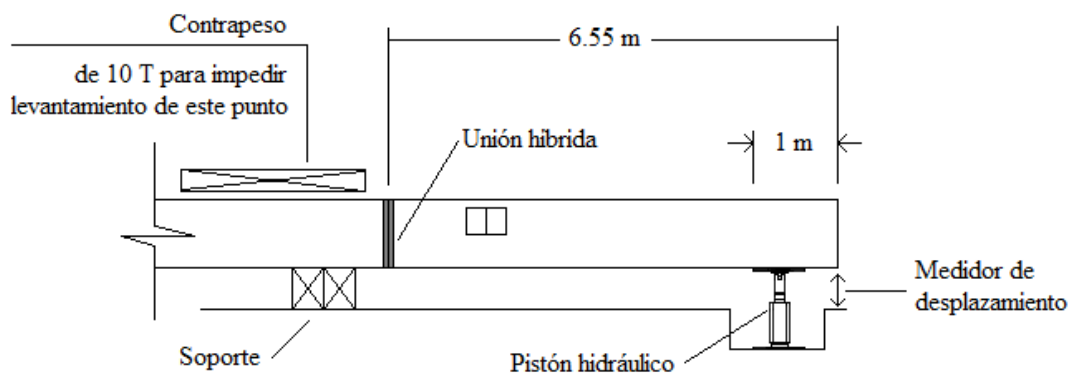


Figura 7: Esquema del ensayo realizado en terreno (CITEC UBB)

3.3. Obtención de envolvente momento-rotación de la unión híbrida

Se estudió la tesis de grado “Daños en edificios de hormigón armado y su relación con el suelo-terremoto de Chile 2010” (Thiers, 2014: 96 - 98) la cual presenta un capítulo específico relacionado con uniones híbridas, en el cual se menciona un procedimiento para obtener las envolventes momento-rotación de la unión híbrida, correspondiente a una columna de características similares a la columna de estudio.

3.3.1. Obtención de envolventes por método PRESSS modificado

Para obtener las envolventes de la relación momento-rotación de la unión híbrida se utilizó el método PRESSS modificado descrito por Celik y Sritharan (2004). Para aplicar este método se escribió en el software especializado en cálculos de ingeniería Mathcad (PTC, 2013), el programa “Modified PRESSS Analysis v.6.1” (Celik y Sritharan, 2004: 205-210). En el anexo A se muestra el script del programa desarrollado.

a) Parámetros de entrada

Se ingresaron como parámetros de entrada en el programa “Modified PRESSS Analysis v.6.1”, las propiedades de sección y materiales referentes a la unión híbrida. En la Tabla N°1 se muestran los valores ingresados.

Tabla 1: Valor de las propiedades de sección y materiales

Propiedades Sección	Valor	Propiedades Materiales	Valor
h (cm)	100	E_p (kg/cm ²)	2.038.902
b (cm)	80	f_{py} (kg/cm ²)	17.432
d' (cm)	20	f_{sy} (kg/cm ²)	4.200
A_{pt} (cm ²)	12,8	f_c (kg/cm ²)	350
A_s (cm ²)	10	f_{pi} (kg/cm ²)	7.489
I_{pu} (m)	2,54		

b) Diagrama de flujo

Para comprender el procedimiento de obtención de las envolventes momento-rotación de la unión híbrida, se ilustra en la Figura 8 un diagrama de flujo del método de análisis PRESSS modificado. Los valores de los parámetros que intervienen en este flujo se obtienen de la Tabla 1.

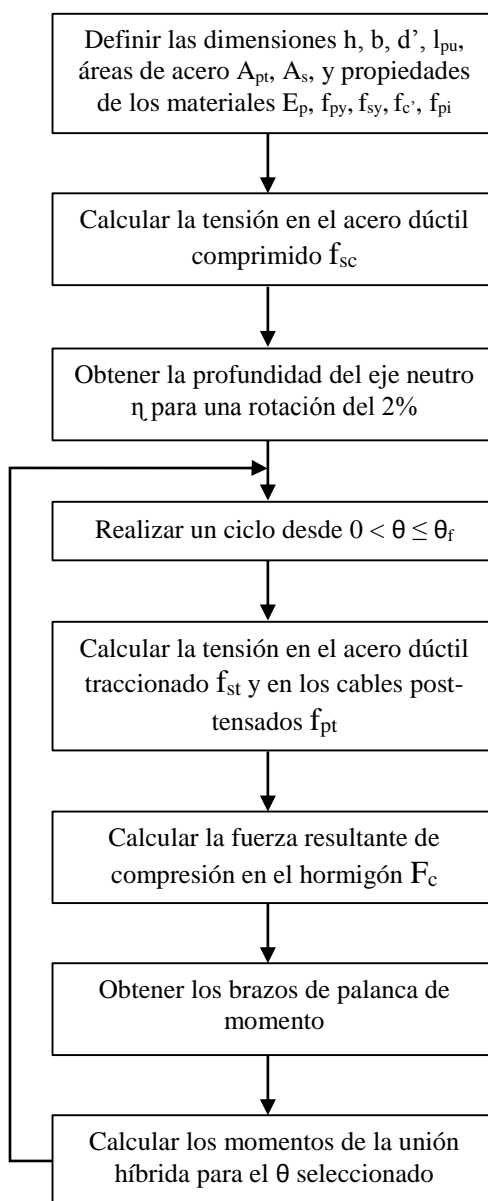


Figura 8: Diagrama de flujo procedimiento de análisis PRESSS modificado (Celik y Sritharan, 2004)

3.4. Modelación de la columna con unión híbrida

Se realizó una modelación numérica de la columna con uniones híbridas. El análisis se hizo con el programa SAP2000 (CSI, 2009). SAP2000 es un software comercial de elementos finitos diseñado especialmente para la realización de análisis estructural.

3.4.1. Modelo de la columna con unión híbrida

El modelo de la Figura 9 representa la estructura física de la columna con unión híbrida que se muestra en la Figura 7. En el modelo, el sistema estructural se divide en elementos que representan a la columna, unión híbrida y apoyos. Las dimensiones de la columna fueron 80 (cm) de ancho por 100 (cm) de alto por 6,55 (m) de largo.

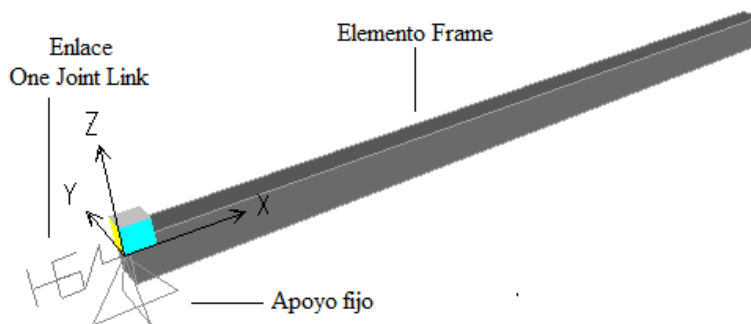


Figura 9: Modelo de elementos finitos de la columna con unión híbrida

a) Modelación de la columna

La columna se modeló como un elemento tipo Frame, con propiedades de hormigón H40. En la Tabla 2 se muestran las propiedades ingresadas.

Tabla 2: Valor de las propiedades hormigón H40

Propiedad	Valor
Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	350
Módulo de Elasticidad (kg/cm ²)	282.495
Densidad (T/m ³)	2,5

b) Modelación de la unión híbrida

La unión híbrida se modeló a través del enlace One Joint Link, con propiedades Multi-Linear Elastic para modelar a los cables post-tensados, los cuales presentan un comportamiento no lineal elástico y propiedad Multi-Linear Takeda Plastic para el acero dúctil, debido a la incursión de este material en el rango no lineal, con presencia de disipación de energía. Esta propiedad, utiliza la degradación histerética del lazo basado en el modelo de Takeda, como se describe en Takeda, Sozen y Nielsen (1970). En particular, cuando la descarga cruza el eje horizontal, sigue una trayectoria secante hasta el inicio de la curva fuerza-deformación en dirección opuesta a la carga, como se muestra en la Figura 10.

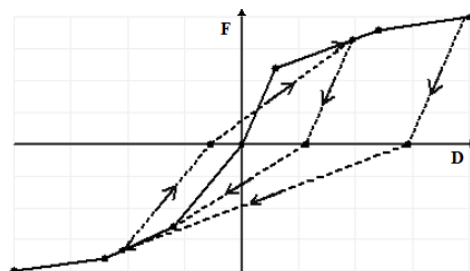


Figura 10: Propiedad Multi-Linear Takeda Plastic para deformación uniaxial (adaptada de Takeda, Sozen y Nielsen, 1970)

El enlace One Joint Link, se compone de seis resortes internos independientes (U1, U2, U3, R1, R2 y R3), utilizados para representar la unión entre elementos. Se activa únicamente R3 en ambos casos, que representa el giro a lo largo del eje local 3 (eje Y en la Figura 9). Las envolventes momento-rotación ingresadas en este modelo se muestran en el anexo A.

3.5. Tipo de análisis

Se realizó un análisis estático no lineal de carga incremental al modelo de la columna mostrada en la Figura 9. El método consiste en aplicar una carga vertical a la columna, la cual se incrementa monótonicamente hasta llegar a un desplazamiento máximo.

3.5.1. Análisis Pushover

Se aplicó una carga unitaria en la dirección del eje Z positivo como se muestra en la Figura 11 (a) hasta llegar a un desplazamiento especificado, luego partiendo del análisis anterior se aplica la misma carga unitaria, pero en dirección del eje Z negativo Figura 11 (b). La aplicación de la carga se ubica a 1 m del extremo derecho de la columna.

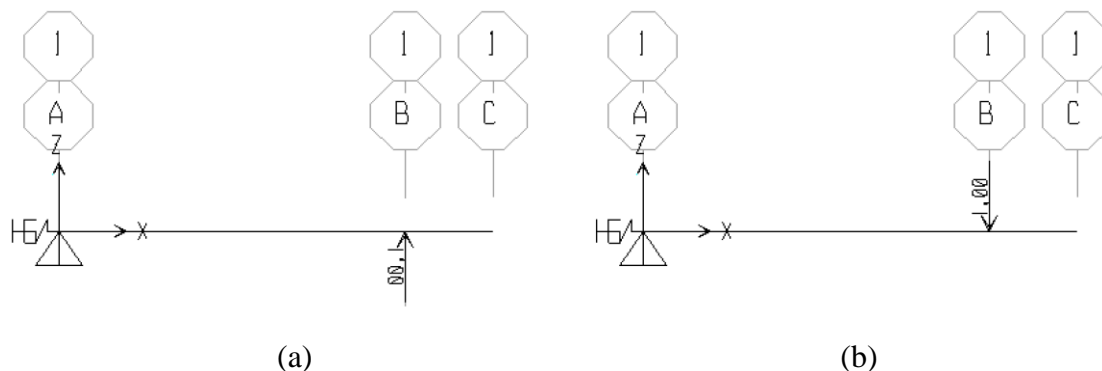


Figura 11: Análisis Pushover, (a) carga eje z positivo, (b) carga eje z negativo

El procedimiento descrito anteriormente corresponde a un ciclo de carga y descarga. Se realizaron 5 ciclos, en los cuales se monitorearon los desplazamientos máximos registrados en el ensayo en terreno. Estos desplazamientos fueron escogidos para simular el ensayo de prueba de carga a columna con uniones híbridas realizado por CITEC UBB. Los desplazamientos considerados en el análisis se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: Desplazamientos considerados en el análisis Pushover

N° de ciclo	Desplazamiento (mm)
1	1,7
2	4,5
3	9,7
4	32
5	92

4. RESULTADOS DEL ANÁLISIS TEÓRICO EXPERIMENTAL

En este capítulo se presentan los resultados del ensayo de prueba de carga, luego se exponen los resultados del análisis PRESSS modificado. Y finalmente, se comparan los resultados de la modelación numérica con los del ensayo experimental, y así evaluar su validez.

4.1. Resultados del ensayo prueba de carga de columna

En la Figura 12 se grafican los resultados para cada ciclo carga-descarga obtenida en el ensayo realizado por CITEC UBB, que relaciona a los desplazamientos verticales relativos de los extremos de la columna, con la carga vertical aplicada.

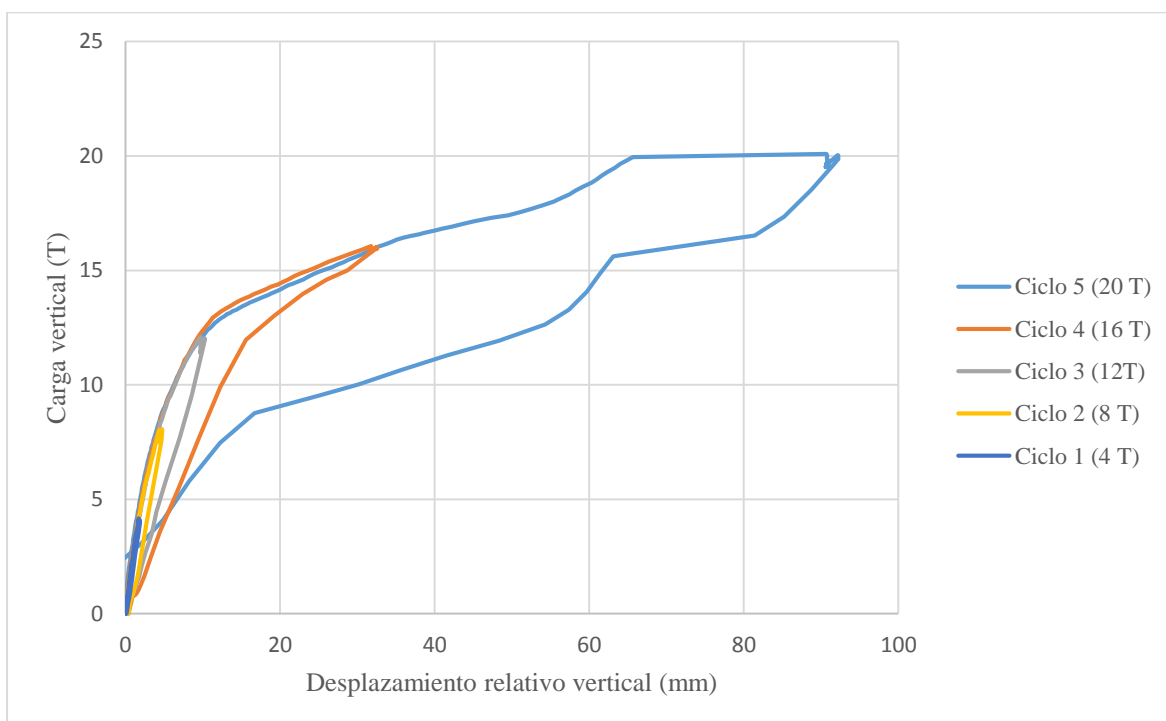


Figura 12: Curva de carga vertical versus desplazamiento relativo vertical

Del gráfico anterior, se aprecia que la unión híbrida trabajó como se esperaba, permitiendo rotaciones de distinta magnitud frente a los diferentes ciclos de carga-descarga inducidos. La unión híbrida mostró comportamientos histeréticos (tipo bandera) propio de los sistemas que mezclan propiedades auto-centrantes y de disipación de energía (CITEC UBB, 2014).

4.2. Resultados del análisis PRESSS modificado

En la Figura 13 se grafican las envolventes momento-rotación de la unión híbrida obtenidas con el método de análisis PRESSS modificado.

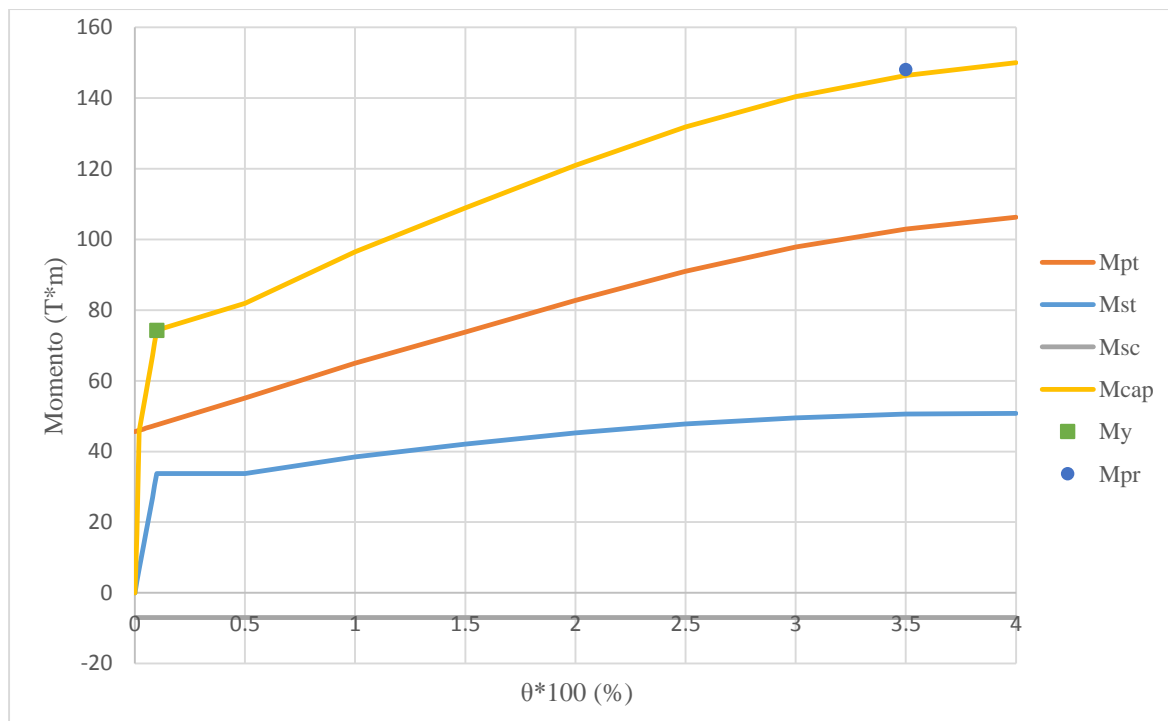


Figura 13: Envolventes momento-rotación de la unión híbrida

- Nota: M_{pt}: Momento proporcionado por los cables post-tensados.
 M_{st}: Momento proporcionado por el acero dúctil en tracción.
 M_{sc}: Momento proporcionado por el acero dúctil en compresión.
 M_{cap}: Capacidad total de momento de la unión híbrida con respecto a la posición de la fuerza resultante de compresión en el hormigón.
 M_y: Momento de fluencia de la unión híbrida.
 M_{pr}: Resistencia a momento probable ACI T1.2.

La capacidad total de la unión híbrida ronda las 150 (T·m) para una interfaz de rotación del 4%. El momento de fluencia de la unión híbrida corresponde a 74 (T·m). La resistencia a momento probable determinada por ACI T1.2, entrega un valor del orden de 148 (T·m) para una interfaz de rotación del 3,5%. En el anexo D se muestra el procedimiento para obtener el momento probable por el método ACI.

4.3. Resultados de la modelación numérica de la columna con uniones híbridas

Se muestra en la Figura 14 los resultados conseguidos de la modelación numérica realizada a la columna con uniones híbridas. Para cada ciclo de carga y descarga corresponde un desplazamiento máximo, estos desplazamientos fueron obtenidos del ensayo de prueba de carga realizado por el CITEC UBB. En el Anexo B se muestra el procedimiento calibración del modelo.

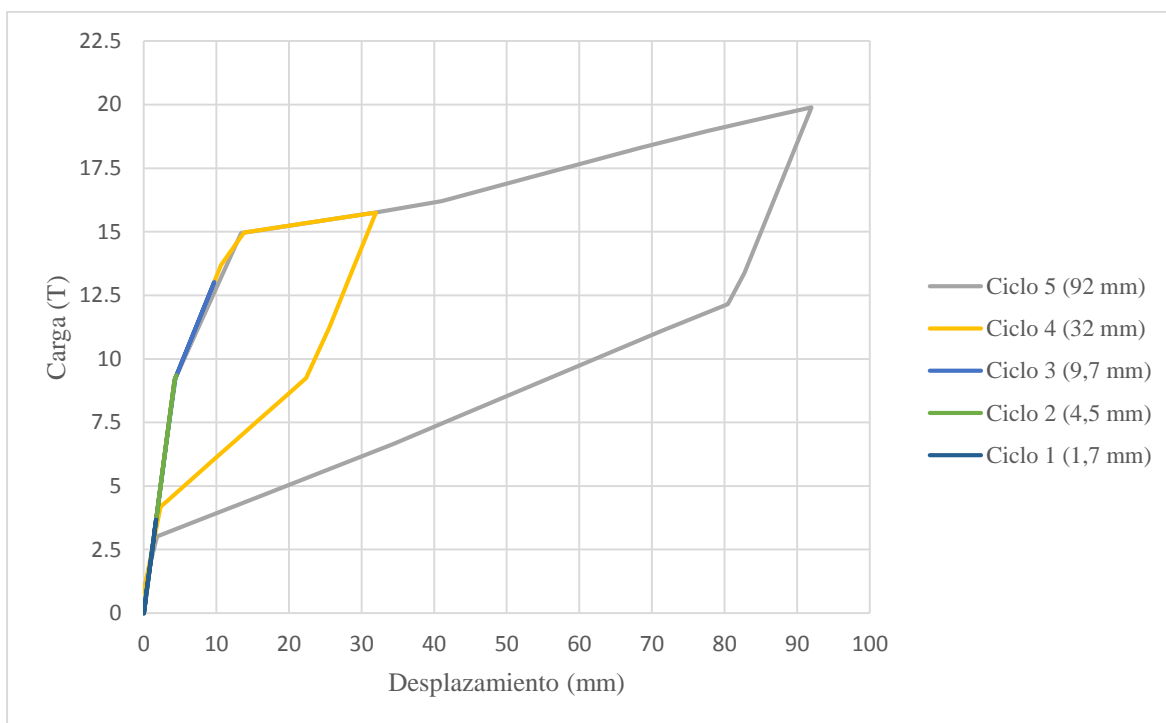


Figura 14: Ciclos de carga y descarga obtenidos de la modelación no lineal

Se observa que el comportamiento de la unión híbrida durante los primeros tres ciclos de carga y descarga se mantienen en el rango elástico. A partir del cuarto ciclo se aprecia la acción de los cables post-tensado, reestableciendo la unión a su posición inicial y el acero dúctil proporcionando una capacidad de disipación de energía. En el quinto y último ciclo se mantiene el efecto restituido de los cables post-tensados, pero con una mayor disipación de energía por parte de los aceros dúctiles.

4.4. Resultados de la comparación teórico experimental de la unión híbrida

En la Figura 15 se muestra de color naranja las curvas experimentales que relacionan a los desplazamientos verticales relativos en el extremo de la columna, con la carga vertical aplicada obtenidas del ensayo de carga de carga a columna, de igualmente forma se muestra en color azul las curvas teóricas obtenidas de la modelación numérica. La comparación individual de cada ciclo de carga y descarga se muestra en el Anexo C.

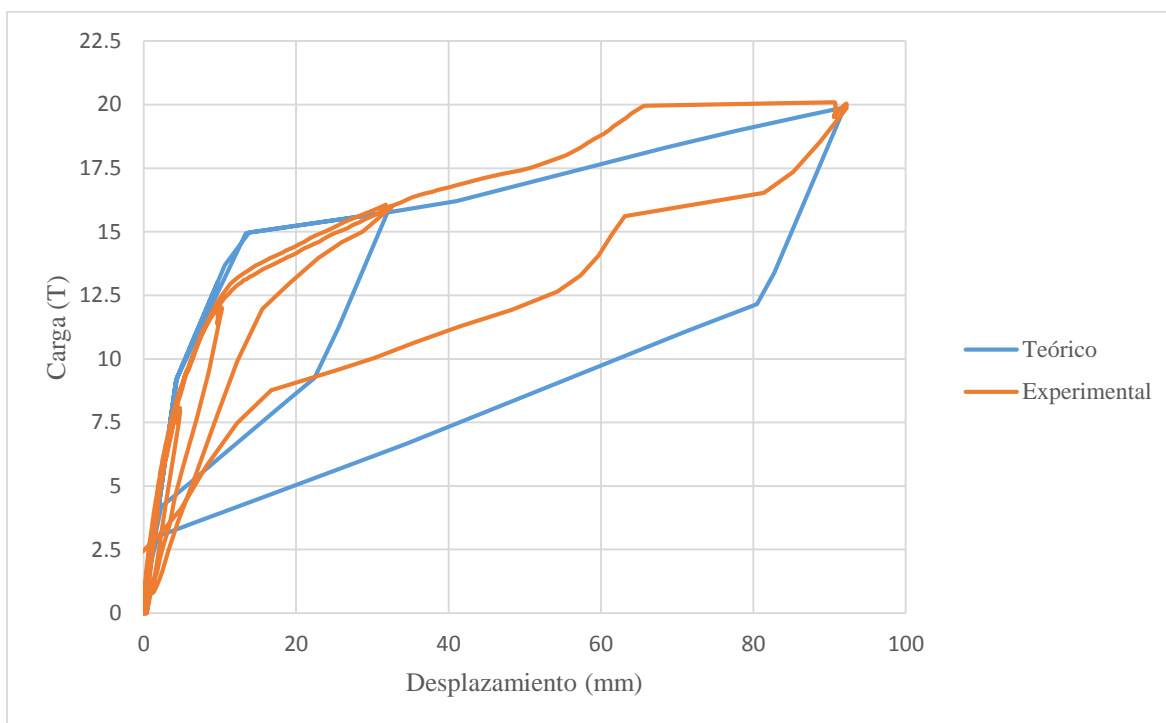


Figura 15: Comparación de las curvas teóricas y experimentales

Las curvas carga-desplazamiento del modelo tienen un área encerrada por sus lazos un 60% mayor que la mostrada en el ensayo. Se llegó a capacidades de carga similares con una diferencia del 5% respecto al ensayo en los ciclos carga-descarga analizado. Se observan pendientes similares en el rango elástico tanto para las curvas teóricas como experimentales, sin embargo, en el rango inelástico las pendientes mostraron leves diferencias.

4.5. Discusión de resultados

Se realizó un análisis teórico-experimental a una columna prefabricada de hormigón armado con sistema de uniones híbridas. Este análisis se ejecutó mediante una modelación numérica no lineal con el software especializado en el análisis de estructuras SAP2000. Se comparó las respuestas obtenidas del modelo numérico con las proporcionadas por el ensayo de prueba de carga a columna realizado por el CITEC UBB.

Los resultados muestran que la unión híbrida presenta comportamientos histeréticos típicos de los sistemas con propiedades auto-centrantes y de disipación de energía, permitiendo rotaciones de interface de distinta magnitud frente a los diferentes desplazamientos monitoreados en el análisis Pushover.

En el contexto antes mencionado, los resultados obtenidos en la modelación numérica son lógicos, debido a que el método de análisis PRESSS modificado utilizado para obtener las envolventes momento-rotación de la unión híbrida proveen un resultado similar a los análisis de la Monolithic Beam Analogy (MBA) descrito por Pampanin et al. (2001). También investigaciones anteriores, han demostrado que este método puede ser usado correctamente para realizar análisis de tipo Pushover a estructuras con sistemas de uniones híbridas (Celik y Sritharan, 2004).

Al comparar los resultados del análisis numérico con los del ensayo de prueba de carga a columna, se observa un comportamiento similar a los obtenidos por Celik y Sritharan en su investigación a sistemas con uniones híbridas, donde las envolventes momento-rotación del método propuesto presentan un comportamiento similar a los experimentos medidos.

5. CONCLUSIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones, comentarios y recomendaciones del análisis teórico-experimental realizado a una columna con uniones híbridas.

- En términos generales se logró modelar el comportamiento de la unión híbrida, obteniendo tendencias similares en los resultados teóricos y experimentales.
- Se seleccionó el método de análisis PRESSSS modificado debido a que los parámetros que emplea, son compatibles con la columna de estudio. Además, investigaciones anteriores han demostrado que este método puede ser usado para realizar el análisis Pushover a estructuras con sistemas híbridos.
- Frente a las cargas aplicadas, tanto las curvas modelación numérica como las del ensayo experimental, mostraron comportamientos histeréticos propios de los sistemas que mezclan propiedades auto-centrantes y de disipación de energía, permitiendo rotaciones de distinta magnitud frente a los diferentes ciclos de carga-descarga inducidos.
- Se determinó que la variable más influyente sobre la capacidad total de momento corresponde a la longitud sin adherencia de los cables post-tensado. Una disminución de 7 veces en su longitud, proporciona un aumento del 33% en la capacidad total de la unión híbrida.
- En el análisis estático no lineal de tipo Pushover, se optó por el método de los desplazamientos, debido a que se obtienen cargas con una diferencia del 5% respecto al ensayo, en cambio, en el método de las cargas se obtienen desplazamientos un 150% más grandes que los registrados en el ensayo, para las mismas cargas.
- El modelo representa de buena manera las pendientes en el rango elástico, en donde se obtienen pendientes similares a las del ensayo, sin embargo, en el rango inelástico las pendientes mostraron leves diferencias. También hay un 60% más área encerrada por las curvas del modelo, lo que implica una mayor disipación de energía.

- La mayor disipación de energía por parte de las curvas del modelo, podría deberse principalmente a la fuerte influencia en el tipo de histéresis utilizada, en donde al pasar del modelo basado en Kinematic al Takeda, se logró disminuir el área encerrada por las curvas en un 30%. Además, la columna durante el proceso de montaje pudo haber trabajado, con lo cual podría presentar una fatiga previa en su sistema híbrido.

5.1. Comentarios

- Si bien Celik y Sritharan definen a que corresponde la longitud sin adherencia de los cables post-tensado, no se ilustra claramente dentro de la unión híbrida, a que longitud corresponde.
- La columna no pudo seguir siendo cargada debido a la reducida capacidad de desplazamiento del pistón de carga. En donde, se llegó solo a un 75% de la capacidad total de la unión híbrida.

5.2. Futuras líneas de investigación

- En esta investigación se probaron los tipos de histéresis Multi-Linear Kinematic Plastic y Multi-Linear Takeda Plastic. Como futura línea de investigación se propone utilizar la propiedad histerética Multi-Linear Pivot Plastic para efectuar la modelación numérica de la columna con uniones híbridas. Este modelo es similar al Multi-Linear Takeda Plastic, pero con parámetros adicionales para controlar la degradación histerética de los lazos, como se describe en Dowell, Seible y Wilson (1998).

6. BIBLIOGRAFÍA

- ACI Innovative Task Group 1 and Collaborators. (2003). Special Hybrid Moment Frames Composed of Discretely Jointed Precast and Post-Tensioned Concrete Members (ACI T1.2-03) and Commentary (T1.2R-03). American Concrete Institute. Farmington Hills, Michigan.
- Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción. (2015). Ensayo Prueba de Carga a Columna. Universidad del Bío-Bío. Concepción, Chile.
- Celik, O., and Sritharan, S. (2004). An Evaluation of Seismic Design Guidelines Proposed for Precast Concrete Hybrid Frame Systems. Iowa State University. Ames, Iowa.
- Dowell, R. K., Seible, F. S. and Wilson, E. L. (1998). Pivot Hysteretic Model for Reinforced Concrete Members. *ACI Structural Journal*, 95, 607-617.
- Marcus, J., Thiers, R., y Opazo, A. (2015). Control del Daño Sísmico Estructural en Pórticos Prefabricados de Hormigón Armado a través de Uniones Híbridas Auto-Centrantes. Concepción, Chile.
- Priestley, M. N. (1996). The PRESSS Program: Current Status and Proposed Plans for Phase III. *PCI journal*, 41(2), 22-40.
- Pampanin, S., Priestley, M. J. N. and Sritharan, S. (2001). Analytical Modeling of Seismic Behaviour of Precast Concrete Frames Designed with Ductile Connection. *Journal of Earthquake Engineering*, 5(3), 329-367.
- Pampanin, S. (2005). Emerging Solutions for High Seismic Performance of Precast/Prestressed Concrete Buildings. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 3(2), 207-223.
- Stanton, J., Stone, W. C., and Cheok, G. S. (1997). A hybrid reinforced precast frame for seismic regions. *PCI journal*, 42(2), 20-32.
- Thiers, R. (2014). Daños en Edificios de Hormigón Armado y su Relación con el Suelo. Tesis de Título. Universidad Técnica Federico Santa María. Valparaíso, Chile.
- Takeda, T., Sozen M. A. and Nielsen, N. N. (1970). Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes. *Journal of Structural Engineering*, 96(12), 2257-2273.

7. ANEXOS

ÍNDICE GENERAL ANEXOS

ANEXO A	35
ANEXO B	40
ANEXO C	46
ANEXO D	51

ÍNDICE DE FIGURAS ANEXOS

Figura A1: Script del programa análisis PRESSS modificado	38
Figura A2: Envolventes momento-rotación adaptadas SAP2000	39
Figura B1: Curvas carga-deformación para el primer análisis numérico	41
Figura B2: Curvas carga-deformación para el segundo análisis numérico	42
Figura B3: Curvas carga-deformación para el tercer análisis numérico	43
Figura B4: Curvas carga-deformación para el cuarto análisis numérico	44
Figura B5: Curvas carga-deformación para el quinto análisis numérico	45
Figura C1: Primer ciclo de carga vertical versus desplazamiento relativo vertical	47
Figura C2: Segundo ciclo de carga vertical versus desplazamiento relativo vertical ..	48
Figura C3: Tercer ciclo de carga vertical versus desplazamiento relativo vertical	49
Figura C4: Cuarto ciclo de carga vertical versus desplazamiento relativo vertical	50
Figura D1: Fuerzas que actúan en la unión híbrida (adaptada de ACI T1.2)	52

ÍNDICE DE TABLAS ANEXOS

Tabla A1: Datos envolventes momento-rotación adaptadas SAP2000	39
---	----

ANEXO A
Procedimiento de análisis PRESSS Modificado

Procedimiento de análisis PRESSS Modificado

En este apéndice se muestra el script del programa PRESSS modificado desarrollado en el software Mathcad y las envolventes momento-rotación de uniones híbridas ingresadas en el software SAP2000.

<u>Section Properties:</u>	<u>Material Properties:</u>	<u>Others:</u>
$h := 39.37$	$E_p := 29000$	$\lambda_{sc} := 1.0$
$b := 31.496$	$f_{py} := 247.95$	$\lambda_{st}(\theta) := \begin{cases} \text{if } 0 \leq \theta < 0.001 \\ \lambda_{st} \leftarrow 1000 \cdot \theta \\ \text{if } 0.001 \leq \theta < 0.005 \\ \lambda_{st} \leftarrow 1 \\ \text{if } 0.005 \leq \theta \leq 0.04 \\ \lambda_{st} \leftarrow 0.84 + 34.4 \cdot \theta - 444.4 \cdot \theta^2 \end{cases}$
$d' := 7.87$	$f_{sy} := 59.74$	
$A_{pt} := 1.98$	$f'_c := 4.267$	$\beta_1 := 0.85 - 0.05 \cdot (f'_c - 4)$
$A_s := 1.578$	$f_{pi} := 106.5$	$\beta_1 = 0.837$
$l_{pu} := 100$		$\zeta := \frac{d'}{h}$

ANALYSIS

ORIGIN := 1

Neutral axis depth: (obtain at 2 percent interface rotation)

```

NA(θ, Apt, As) :=
    fsc ← λsc · fsy
    fst ← λst(θ) · fsy
    η ← 0
    ηcheck ← 1
    while ηcheck - η > 0.001
        η ← η + 0.001
        Δpt ← θ · (0.5 - η) · h
        εpt ←  $\frac{\Delta_{pt}}{l_{pu}} + \frac{f_{pi}}{E_p}$ 
        fpt ← εpt · Ep ·  $\left( 0.02 + \frac{0.98}{\left( 1 + \left( \frac{\varepsilon_{pt} \cdot E_p}{1.04 \cdot f_{py}} \right)^{8.36} \right)^{1/8.36}} \right)$ 
        Fpt ← Apt · fpt
        Fst ← As · fst
        Fsc ← As · fsc
        if η > ζ
            Fc ← Fpt + Fst - Fsc
        else
            Fc ← Fpt + Fst + Fsc
    a ← Fc
    
```

$$\begin{aligned} & 0.85 \cdot (1.6 \cdot f'_c) \cdot b \\ \eta_{check} & \leftarrow \frac{a}{\beta_1 \cdot h} \\ \eta & \cdot h \end{aligned}$$

$$c := NA(0.02, A_{pt}, A_s)$$

Hybrid Connection Analysis:

$$\begin{aligned} Hybrid(\theta, A_{pt}, A_s) & := \begin{aligned} & f_{sc} \leftarrow \lambda_{sc} \cdot f_{sy} \\ & f_{st} \leftarrow \lambda_{st}(\theta) \cdot f_{sy} \\ & \eta \leftarrow \frac{c}{h} \\ & \Delta_{pt} \leftarrow \theta \cdot (0.5 - \eta) \cdot h \\ & \varepsilon_{pt} \leftarrow \frac{\Delta_{pt}}{l_{pu}} + \frac{f_{pi}}{E_p} \\ & f_{pt} \leftarrow \varepsilon_{pt} \cdot E_p \cdot \left(0.02 + \frac{0.98}{\left(1 + \left(\frac{\varepsilon_{pt} \cdot E_p}{1.04 \cdot f_{py}} \right)^{8.36} \right)^{\frac{1}{8.36}}} \right) \\ & F_{pt} \leftarrow A_{pt} \cdot f_{pt} \\ & F_{st} \leftarrow A_s \cdot f_{st} \\ & F_{sc} \leftarrow A_s \cdot f_{sc} \\ & \text{if } \eta > \zeta \\ & \quad \left\| F_c \leftarrow F_{pt} + F_{st} - F_{sc} \right\| \\ & \text{else} \\ & \quad \left\| F_c \leftarrow F_{pt} + F_{st} + F_{sc} \right\| \\ & a \leftarrow c \cdot \beta_1 \\ & \alpha \leftarrow \frac{a}{2 \cdot h} \\ & M_{pt} \leftarrow F_{pt} \cdot (0.5 - \alpha) \cdot h \\ & M_{st} \leftarrow F_{st} \cdot (1 - \zeta - \alpha) \cdot h \\ & M_{sc} \leftarrow F_{sc} \cdot (\alpha - \zeta) \cdot h \\ & M_{cap} \leftarrow M_{pt} + M_{st} + M_{sc} \\ & \left[\begin{array}{l} \Delta_{pt} \\ f_{st} \\ F_{pt} \\ M_{pt} \\ M_{st} \\ M_{sc} \\ M_{cap} \end{array} \right] \end{aligned} \end{aligned}$$

Continuous Response Envelope:

```

Analysis := || for i ∈ 0, 1..400
|| | θi+1 ← 0.0001 · i
|| | Δpti+1 ← Hybrid(θi+1, Apt, As)1
|| | fsti+1 ← Hybrid(θi+1, Apt, As)2
|| | Fpti+1 ← Hybrid(θi+1, Apt, As)3
|| | Mpti+1 ← Hybrid(θi+1, Apt, As)4
|| | Msti+1 ← Hybrid(θi+1, Apt, As)5
|| | Msci+1 ← Hybrid(θi+1, Apt, As)6
|| | Mcapi+1 ← Hybrid(θi+1, Apt, As)7
|| | Mcap1 ← 0
|| | Mcap2 ←  $\frac{\left(\frac{f_{pt} \cdot A_{pt}}{b \cdot h}\right) \cdot \left(\frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3\right)}{\binom{h}{2}}$ 
|| | [ θ ]
|| | [ Δpt ]
|| | [ fst ]
|| | [ Fpt ]
|| | [ Mpt ]
|| | [ Mst ]
|| | [ Msc ]
|| | [ Mcap ]
||
θ := Analysis1      Mpt := Analysis5
Δpt := Analysis2  Mst := Analysis6
fst := Analysis3  Msc := Analysis7
Fpt := Analysis4  Mcap := Analysis8
Drift := 0.85 · θ + 4.08 · 10-6 · Mcap

```

Figura A1: Script del programa análisis PRESSS modificado

Nota: Unidades en el sistema Ingles.

Se muestra en la Figura A2 las envolventes momento-rotación adaptadas para ser ingresadas al modelo en SAP2000. Estas representan a cada componente de las uniones híbridas, se muestra de color naranja los cables post-tensados y de color azul las barras de acero dúctil en tracción.

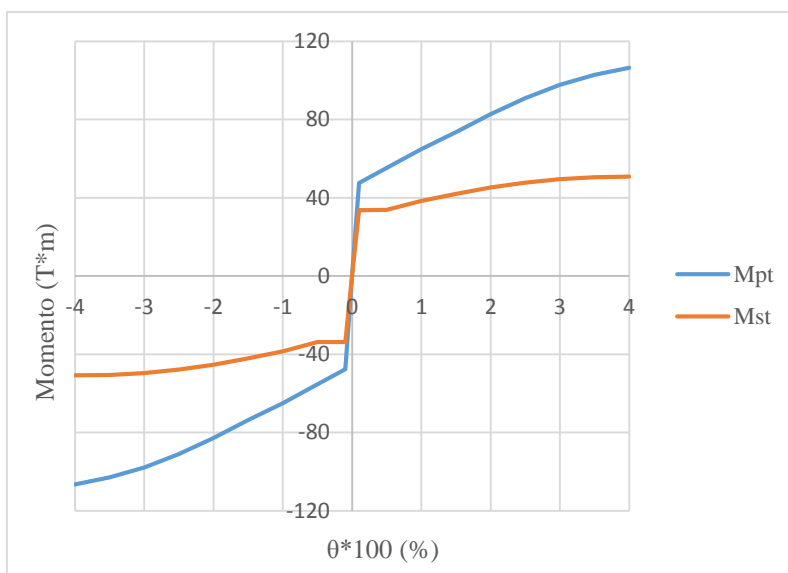


Figura A2: Envolventes momento-rotación adaptadas SAP2000

Tabla A1: Datos envolventes momento-rotación adaptadas SAP2000

θ	M_{pt} (T-m)	M_{st} (T-m)
-0.04	-57.468	-51.528
-0.035	-55.992	-51.276
-0.03	-54.636	-50.256
-0.025	-53.292	-48.48
-0.02	-51.948	-45.936
-0.015	-50.592	-42.636
-0.01	-49.38	-39.012
-0.005	-48.036	-34.272
-0.001	-46.956	-34.236
0	0	0
0.001	46.956	34.236
0.005	48.036	34.272
0.01	49.38	39.012
0.015	50.592	42.636
0.02	51.948	45.936
0.025	53.292	48.48
0.03	54.636	50.256
0.035	55.992	51.276
0.04	57.468	51.528

ANEXO B
Calibración del modelo

Calibración del modelo

Para calibrar el modelo, se realizó un primer análisis numérico con el método de las cargas, posteriormente los demás análisis se realizaron con el método de los desplazamientos y se fueron variando el tipo de histéresis y parámetros constructivos. Se muestra de color azul las curvas teóricas obtenidas por la modelación.

Primer análisis numérico

Se realizó la modelación numérica mediante el método de las cargas, utilizando la propiedad Multi-Linear kinematic Plastic, con una longitud de $l_{pu}=20$ (m) y partiendo del análisis del ciclo anterior.

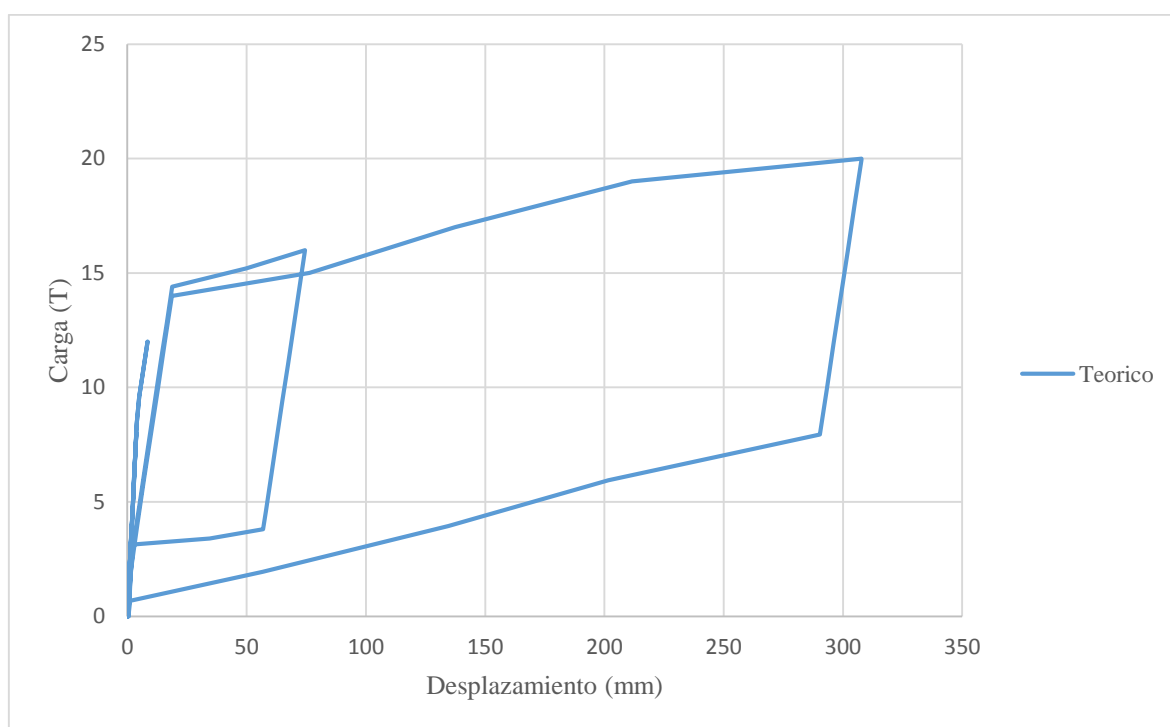


Figura B1: Curvas carga-deformación para el primer análisis numérico

Segundo análisis numérico

Se realizó la modelación numérica mediante el método de los desplazamientos, utilizando la propiedad Multi-Linear kinematic Plastic, con una longitud de $l_{pu}=20$ (m) y partiendo del análisis del ciclo anterior.

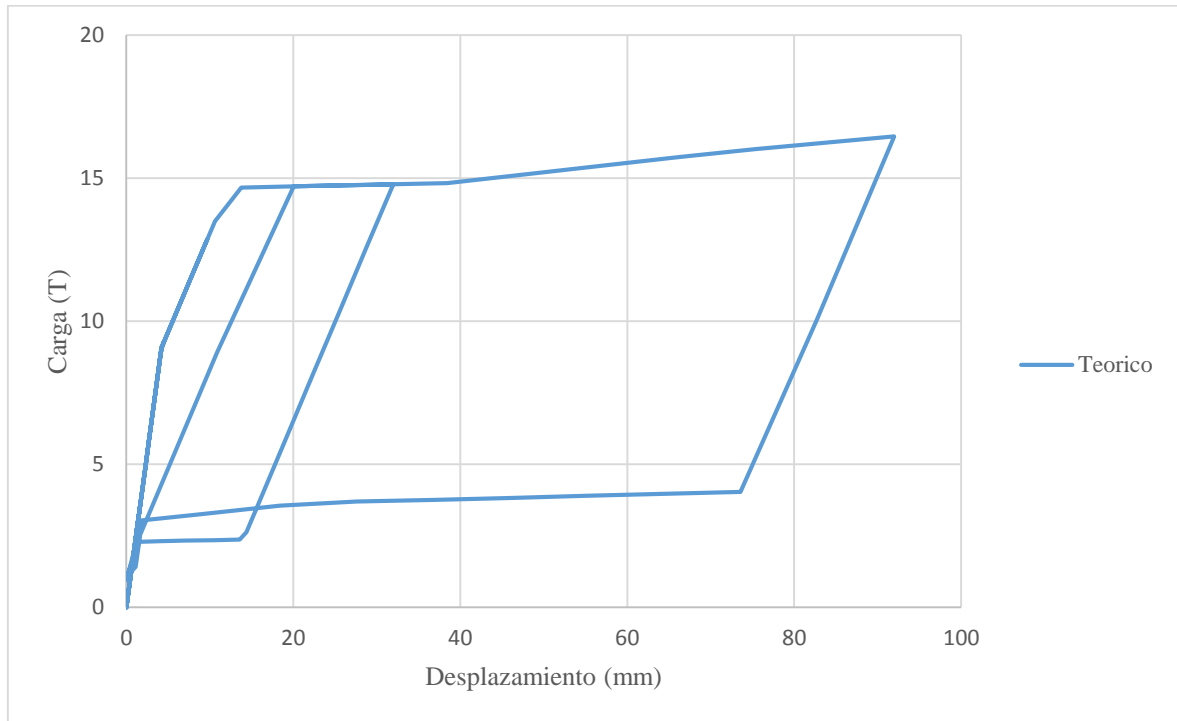


Figura B2: Curvas carga-deformación para el segundo análisis numérico

Tercer análisis numérico

Se realizó la modelación numérica mediante el método de los desplazamientos, utilizando la propiedad Multi-Linear kinematic Plastic, con una longitud de $l_{pu}=20$ (m) y sin continuar del análisis del ciclo anterior.

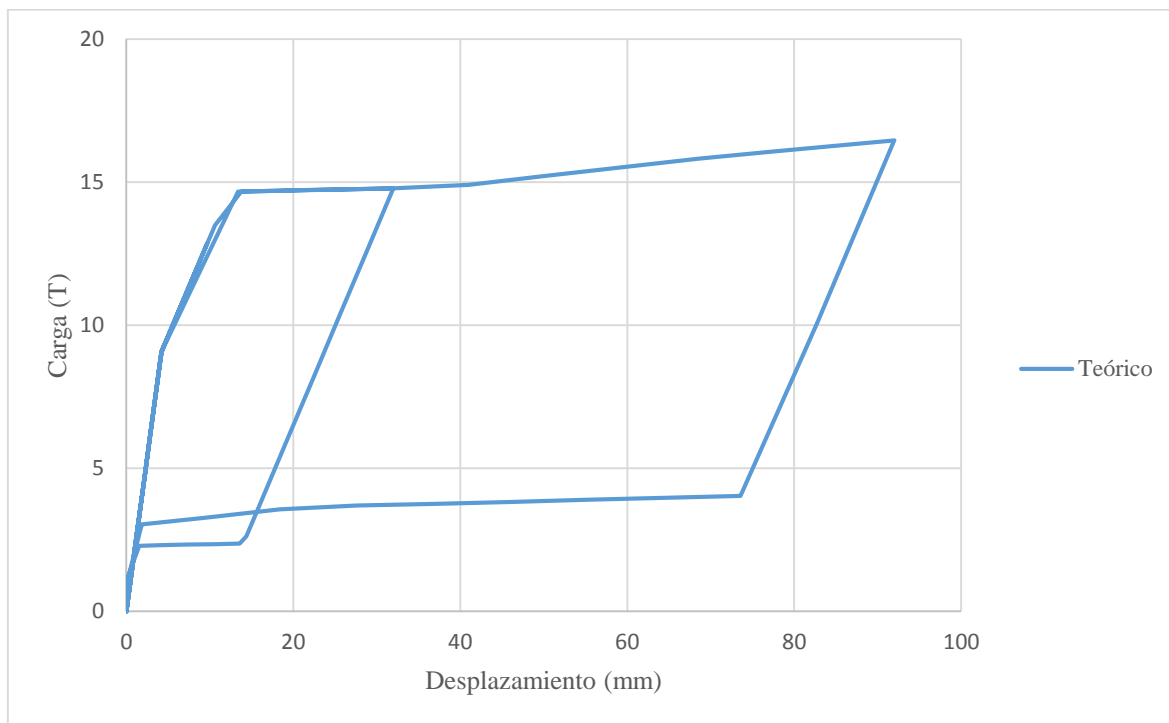


Figura B3: Curvas carga-deformación para el tercer análisis numérico

Cuarto análisis

Se realizó la modelación numérica mediante el método de los desplazamientos, utilizando la propiedad Multi-Linear Takeda Plastic, con una longitud de $L_{pu}=20$ (m) y sin continuar del análisis del ciclo anterior.

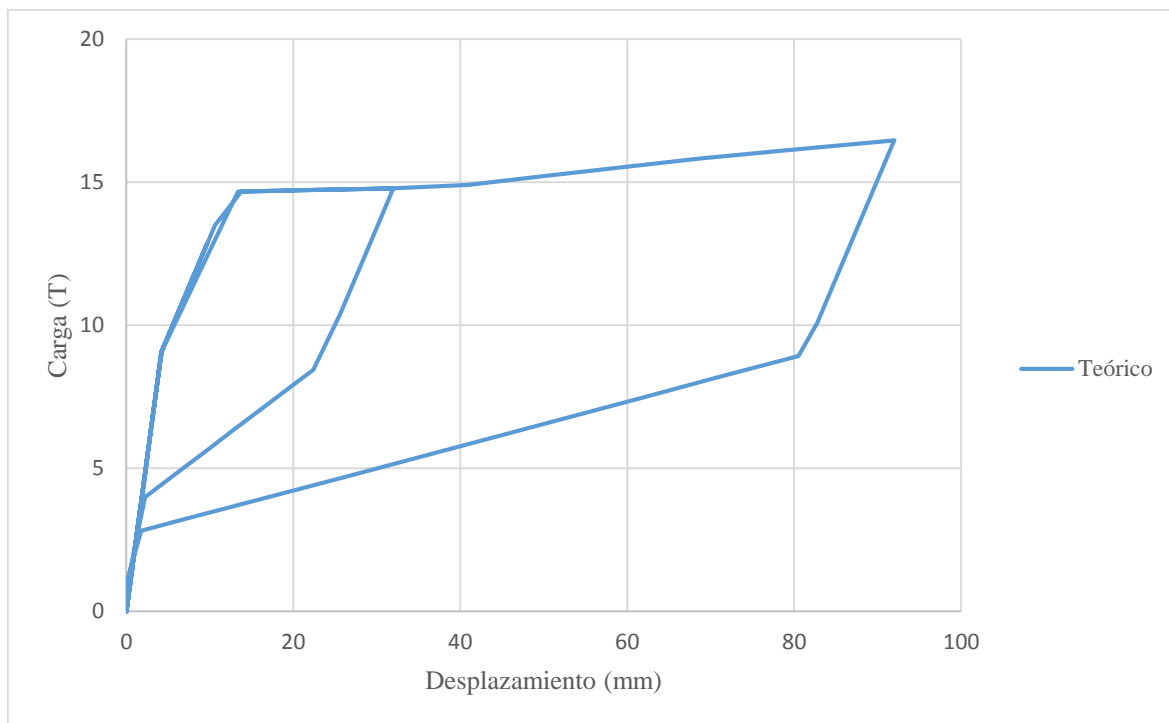


Figura B4: Curvas carga-deformación para el cuarto análisis numérico

Quinto análisis

Se realizó la modelación numérica mediante el método de los desplazamientos, utilizando la propiedad Multi-Linear Takeda Plastic, con una longitud de $L_{pu}=2,54$ (m) y sin continuar del análisis del ciclo anterior.

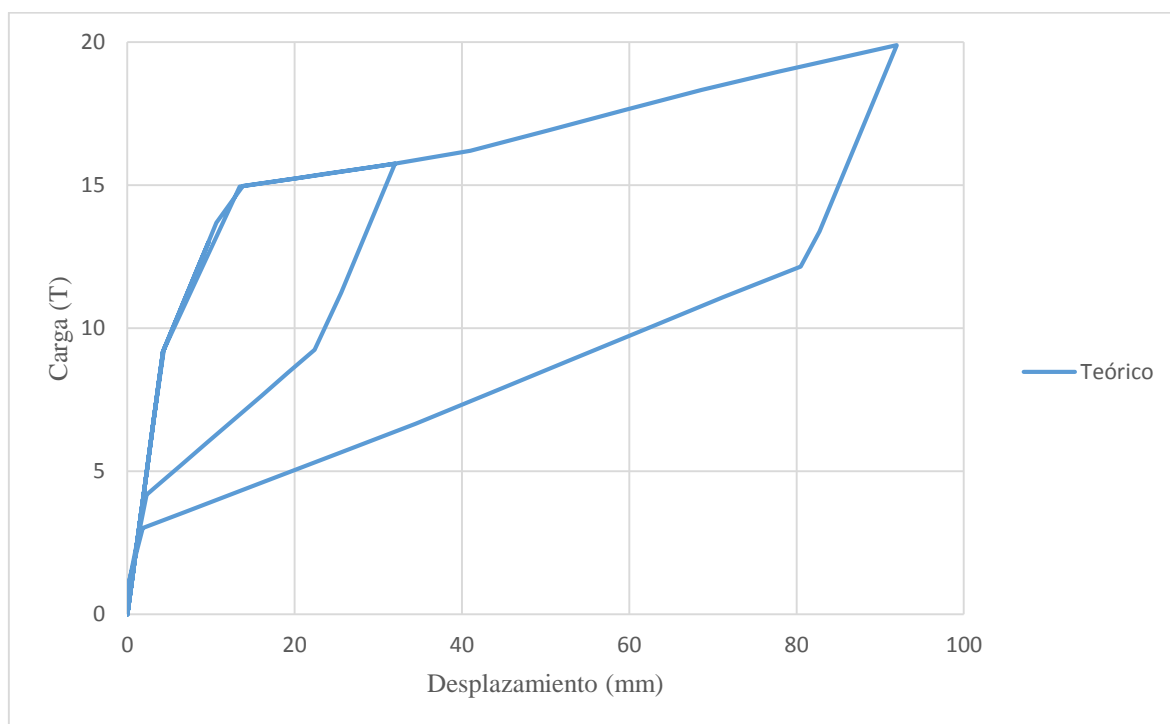


Figura B5: Curvas carga-deformación para el quinto análisis numérico

ANEXO C
Resultados teórico-experimental

Resultados teórico experimental

Se comparan las respuestas del ensayo realizado en terreno con las del análisis numérico no lineal para cada ciclo de carga y descarga. Se muestra de color naranja las curvas experimentales que relacionan a los desplazamientos verticales relativos en el extremo de la columna, con la carga vertical aplicada obtenidas del ensayo de carga de carga a columna, de igualmente forma se muestra en color azul las curvas teóricas obtenidas de la modelación numérica.

Primer ciclo

Se comparan las curvas teóricas para el desplazamiento monitoreado de 1,7 (mm), con las curvas experimentales para la carga inducida de 4 (T).

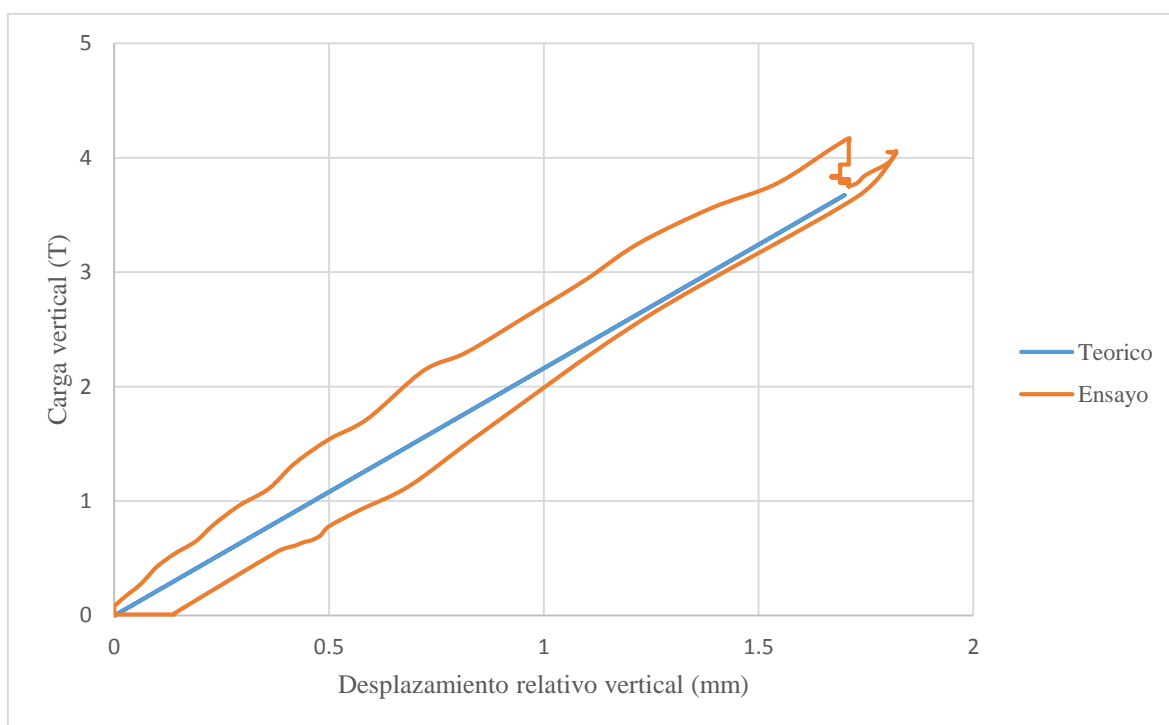


Figura C1: Primer ciclo de carga vertical versus desplazamiento relativo vertical

Segundo ciclo

Se comparan las curvas teóricas para el desplazamiento monitoreado de 4,5 (mm), con las curvas experimentales para la carga inducida de 8 (T).

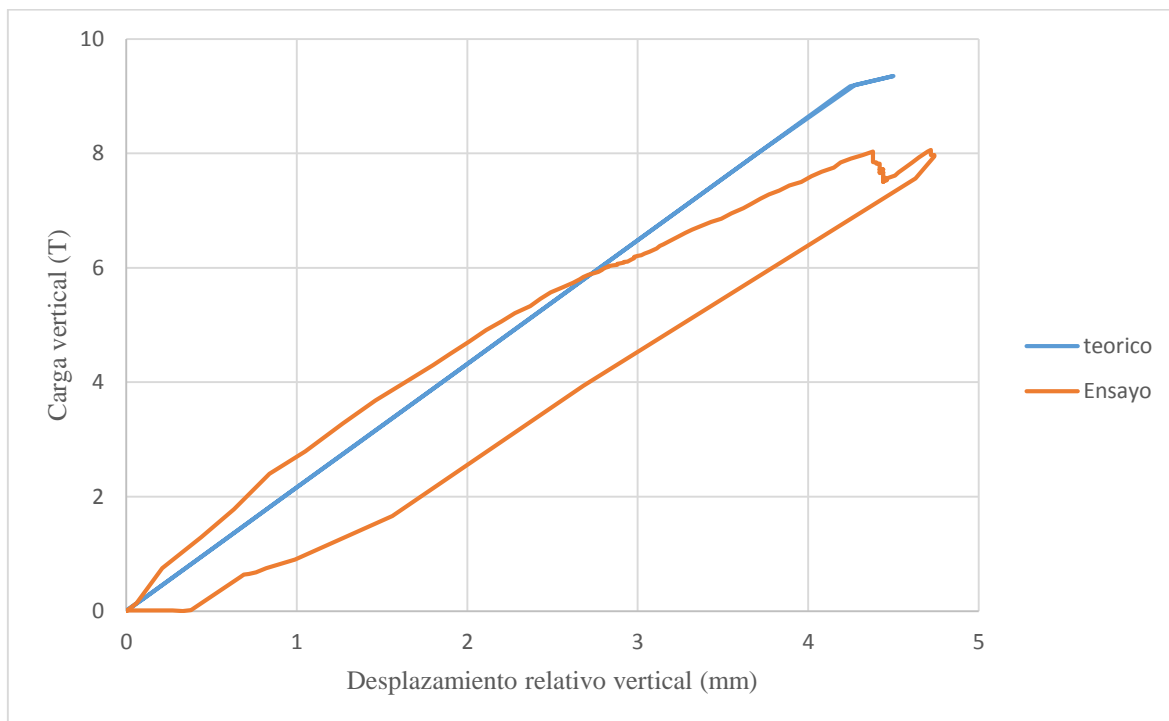


Figura C2: Segundo ciclo de carga vertical versus desplazamiento relativo vertical

Tercer ciclo

Se comparan las curvas teóricas para el desplazamiento monitoreado de 9,7 (mm), con las curvas experimentales para la carga inducida de 12 (T).

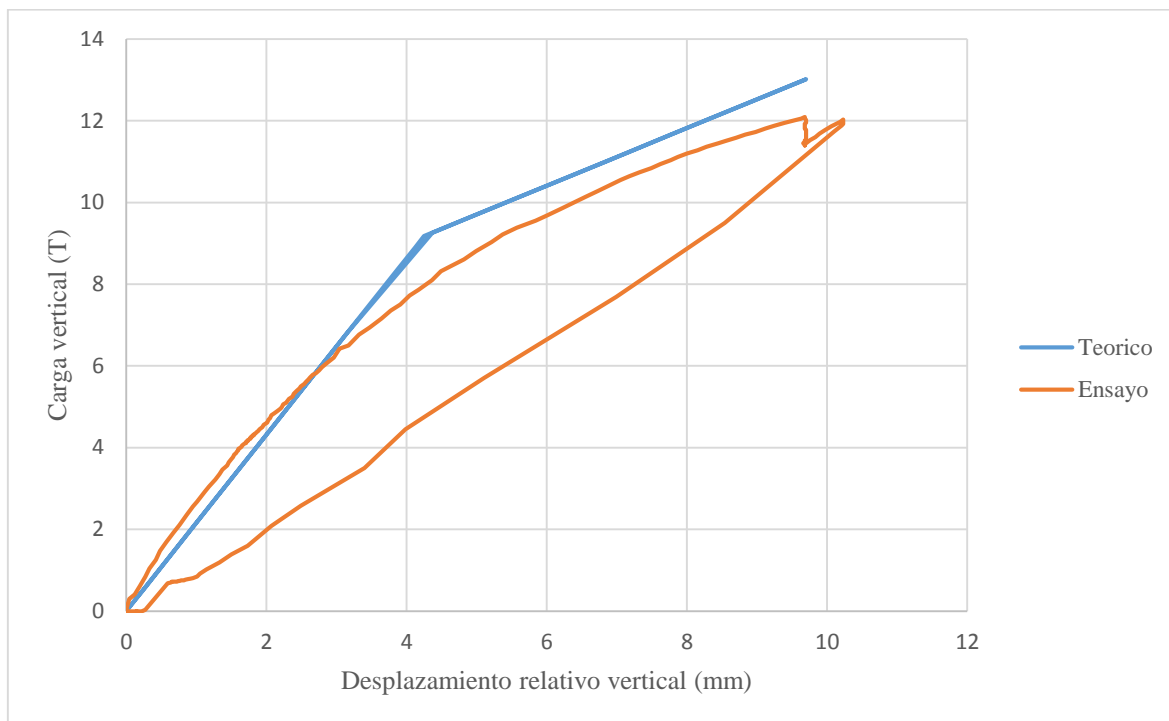


Figura C3: Tercer ciclo de carga vertical versus desplazamiento relativo vertical

Cuarto ciclo

Se comparan las curvas teóricas para el desplazamiento monitoreado de 32 (mm), con las curvas experimentales para la carga inducida de 16 (T).

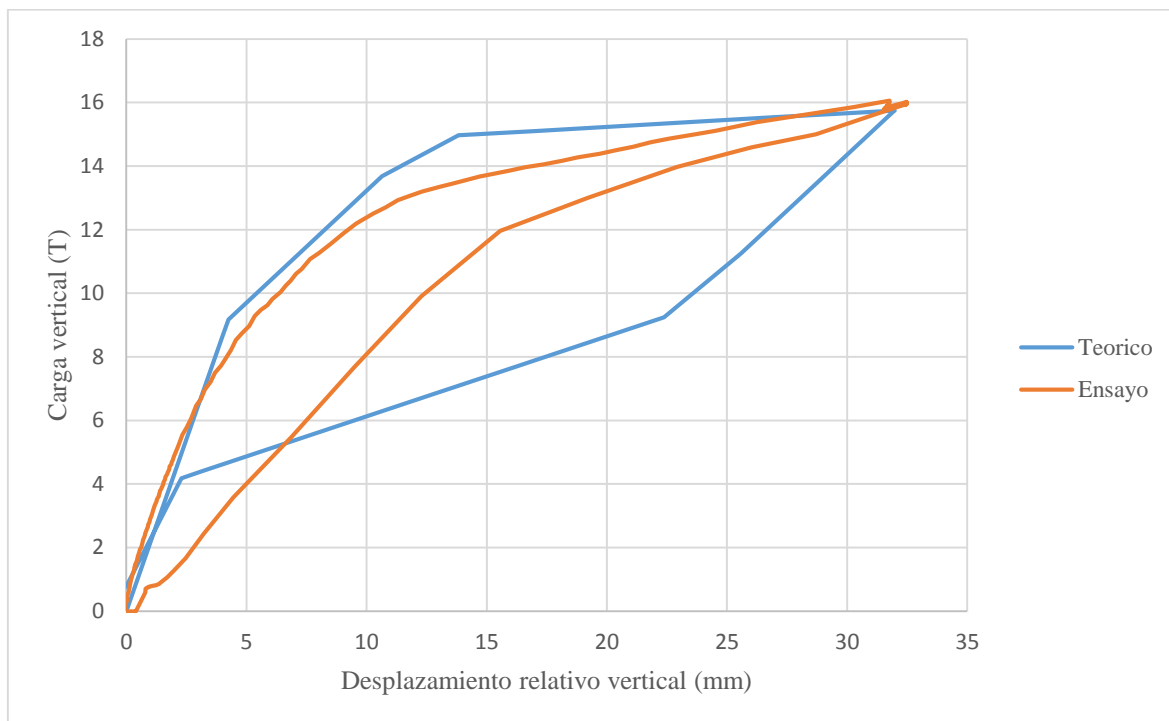


Figura C4: Cuarto ciclo de carga vertical versus desplazamiento relativo vertical

ANEXO D
Método de diseño ACI T1.2

Método de diseño ACI T1.2

El documento ACI T1.2 del Comité ACI Innovation Task Group 1, establece un procedimiento para determinar la resistencia a momento probable de la unión híbrida. Esta se calcula como se muestra en la ecuación (D3) y corresponde a la suma de las contribuciones de las barras de acero dúctil y los cables post-tensados, dadas por las ecuaciones (D1) y (D2) respectivamente. La profundidad del bloque de tensiones se determina a través de la ecuación (D4). En la Figura D1 se muestra un esquema de las fuerzas que actúan en la unión híbrida.

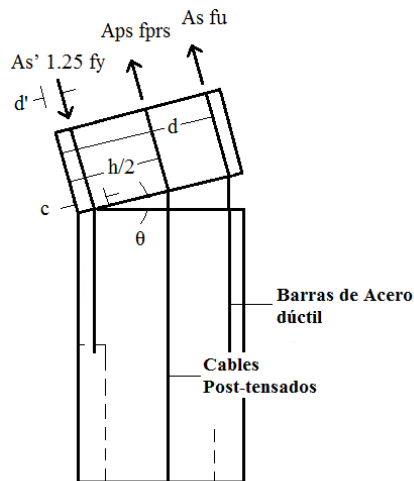


Figura D1: Fuerzas que actúan en la unión híbrida (adaptada de ACI T1.2)

$$M_s = A_s * f_u * \left(d - \frac{\beta_1 * c}{2} \right) - A_s' * 1.25 * f_y * \left(d' - \frac{\beta_1 * c}{2} \right) \quad \text{Ec. (D1)}$$

$$M_{prs} = A_{ps} * f_{prs} * \left(\frac{h - \beta_1 * c}{2} \right) \quad \text{Ec. (D2)}$$

$$M_{pr} = M_s + M_{prs} \quad \text{Ec. (D3)}$$

$$\beta_1 * c = \left[\frac{A_{ps} * f_{prs} + A_s * f_u - A_s' * 1.25 * f_y}{b * (0.85 * f'_c)} \right] \quad \text{Ec. (D4)}$$

Donde:

b : Ancho de la columna.

d : Distancia desde las barras de acero dúctil en tracción hasta el extremo comprimido de la fibra.

d' : Distancia desde las barras de acero dúctil en compresión hasta el extremo comprimido de la fibra.

h : Altura de la columna.

A_{ps} : Área de los cables post-tensados.

A_s : Área de las barras de acero dúctil en tracción.

A'_s : Área de las barras de acero dúctil en compresión.

f_{prs} : Tensión de los cables post-tensados cuando la tensión en el acero dúctil es f_u .

f_y : Tensión de fluencia del acero dúctil.

f_u : Tensión de rotura del acero especial.

$\beta_1 * c$: Profundidad del bloque de tensiones.

M_s : Resistencia a momento proporcionado por las barras de acero dúctil.

M_{prs} : Resistencia a momento proporcionado por los cables post-tensados.

M_{pr} : Resistencia a momento probable de la unión híbrida.