



UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

ESTUDIO DE LAS RECOMENDACIONES Y DESARROLLO DE ALGORITMO DE POSPROCESAMIENTO PARA LA MODELACIÓN NO LINEAL OBJETIVA DE MUROS ESBELTOS DE HORMIGÓN ARMADO EMPLEANDO EL ELEMENTO MVLEM-3D

Memoria de Título presentada por

Marcelo Alejandro Ortiz Ávila

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Claudio Sepúlveda

Julio de 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título; ☐ Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: ESTUDIO DE LAS RECOMENDACIONES Y DESARROLLO DE ALGORITMO DE POSPROCESAMIENTO PARA LA MODELACIÓN NO LINEAL OBJETIVA DE MUROS ESBELTOS DE HORMIGÓN ARMADO EMPLEANDO EL ELEMENTO MVLEM-3D

Nombre del candidato(a): Marcelo Alejandro Ortiz Ávila

Carrera / Grado: Ingeniería Civil

Campus: Santiago San Joaquín ; **Departamento:** Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Claudio Ignacio Sepúlveda Contreras, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

☒ El trabajo **NO** contiene información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

☐ 6 meses; ☐ 12 meses; ☐ 2 años; ☐ 3 años; ☐ 5 años; ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 01/08/2025

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 01/08/2025

; Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Tabla de Contenidos

Resumen.....	1
1. Introducción.....	1
1.1. Planteamiento del Problema y Motivación.....	1
1.2. Hipótesis	3
1.3. Objetivos.....	3
1.3.1. Objetivo General	3
1.3.2. Objetivos Específicos.....	3
2. Marco Teórico.....	4
2.1. Análisis No Lineal	4
2.1.1. Comportamiento de Muros Esbeltos.....	4
2.1.2. Tipos de Modelos Analíticos	4
2.1.3. Modelación de las Propiedades Mecánicas de los Materiales	6
2.1.4. Objetividad a Nivel Local	12
2.2. Diseño de Muro Esbelto de Hormigón Armado	13
2.2.1. Provisiones para el Diseño por Resistencia	13
2.2.2. Provisiones para el Detallamiento Especial	15
3. Parte I: Estudio de la Objetividad Global de la Modelación	16
3.1. Caso de Estudio 1: Probetas de Muros Ensayadas a Deformación Controlada	16
3.1.1. Data Experimental Usada para el Desarrollo de los Modelos	16
3.1.2. Calibración de los Modelos.....	17
3.1.3. Resultados y Discusión	20
3.2. Caso de Estudio 2: Eje de Muro Sometido a Registro Sísmico	25
3.2.1. Descripción de la Edificación	25
3.2.2. Calibración de Modelos	27
3.2.3. Resultados y Discusión	30
4. Parte II: Estudio de la Objetividad Local de la Modelación.....	34
4.1. Algoritmo de Posprocesamiento Propuesto	34
4.1.1. Posprocesamiento del Perfil de Curvatura	34
4.1.2. Posprocesamiento del Estado de EEDD en las Fibras	35
4.2. Resultados y Discusión	36
4.2.1. Caso de Estudio 1: Probetas de Muros Ensayadas a Deformación Controlada	36
4.2.2. Caso de Estudio 2: Eje de Muro Sometido a Registro Sísmico	38
5. Conclusiones.....	39
Referencias.....	40
Apéndice.....	42

ESTUDIO DE LAS RECOMENDACIONES Y DESARROLLO DE ALGORITMO DE POSPROCESAMIENTO PARA LA MODELACIÓN NO LINEAL OBJETIVA DE MUROS ESBELTOS DE HORMIGÓN ARMADO EMPLEANDO EL ELEMENTO MVLEM-3D

Marcelo Ortiz¹, Claudio Sepúlveda².

Resumen

Se presenta una metodología para la modelación no lineal objetiva de muros esbeltos de hormigón armado de sección transversal rectangular mediante el macroelemento MVLEM-3D. La investigación se estructura en dos fases: en primer lugar, se aplican recomendaciones de la literatura para lograr una modelación objetiva a nivel global mediante la regularización de los modelos de comportamiento del hormigón y del acero; en segundo lugar, se desarrolla y evalúa un algoritmo de posprocesamiento que permite obtener una estimación objetiva de la respuesta a nivel local. Los resultados demuestran que la regularización de las curvas constitutivas influye significativamente en la estimación de la respuesta cíclica, la deriva de piso y la capacidad última de los muros, de modo que los modelos regularizados reproducen con mayor precisión los resultados empíricos. Asimismo, el algoritmo de posprocesamiento propuesto posibilita, a partir de un modelo con mallado de referencia, aproximar de forma muy precisa los resultados que se obtendrían de una modelación con un mayor número de elementos. De este modo, se valida la hipótesis de que es posible recuperar la objetividad a nivel local siempre que la modelación sea objetiva a nivel global.

Durante el desarrollo de la investigación se implementan tres interfaces gráficas en Jupyter Notebook para facilitar la modelación no lineal. La primera interfaz obtiene la relación empírica propuesta por Mander (1988) [1], que cuantifica la proporción entre la resistencia a la compresión confinada y no confinada (f_{cc}'/f_c'). La segunda se dedica a la regularización de los modelos de comportamiento en OpenSees, en función de la energía de aplastamiento del hormigón. La tercera define secciones basadas en fibras en OpenSees para la modelación de elementos de acople. Las aplicaciones desarrolladas se encuentran disponibles en los repositorios indicados en el apéndice.

Palabras clave: Análisis No Lineal; Regularización; Muro de Hormigón Armado; MVLEM-3D.

1. Introducción

1.1. Planteamiento del Problema y Motivación

El diseño sísmico basado en desempeño requiere explicitar criterios de aceptación para la respuesta sísmica de una estructura conforme al nivel de riesgo que se esté dispuesto a asumir [2]. Así luego, para ciertos niveles de desempeño, se vuelve necesario el desarrollo de modelos refinados capaces de describir la no linealidad de los componentes estructurales que conforman la edificación.

¹ Candidato a Ingeniero Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, Santiago.

² Profesor Asistente, Depto. de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María, Santiago.

En la literatura se presentan diversos enfoques para la modelación no lineal de muros de hormigón armado [3], los cuales se pueden dividir en dos grupos: (1) Enfoques de micromodelado, por ejemplo, mediante elementos tipo shell que pueden estimar en detalle las respuestas locales y los modos de falla complejos [4–6], y (2) enfoques de macromodelado, que frecuentemente se basan en fibras y pueden predecir con precisión el comportamiento general de los elementos esbeltos [7–9].

En lo específico, la presente investigación se centra en el modelado de muros esbeltos de hormigón armado, los cuales presentan una respuesta dominada principalmente por el comportamiento flexo axial, por sobre el mecanismo a corte [10,11]. En virtud de ello, en este estudio se selecciona el macroelemento MVLEM-3D, el cual ha demostrado ser computacionalmente eficiente y versátil para la modelación de diferentes geometrías de muros [12].

La modelación no lineal debe permitir la predicción precisa y objetiva tanto de la respuesta global como local del elemento durante la falla [13], entendiéndose como "objetiva" a la cualidad de ser poco sensible a las diferentes alternativas de modelación disponibles. Sin embargo, diversos autores han observado que la estimación de la respuesta global, a partir de modelos no lineales, presenta sensibilidad al mallado [14–17] al utilizar diferentes formulaciones de elementos (*viga columna*, *shell*, *solidos*), para la modelación de diferentes elementos de hormigón armado (*vigas*, *columnas*, *muros*) [18].

Ante esta problemática, varios estudios han propuesto la "regularización" de la relación esfuerzo-deformación del material, para lograr una modelación objetiva de la respuesta global [14,16,17,19]. En esencia, el procedimiento consiste en ajustar las curvas constitutivas tanto del hormigón como del acero, acorde a las energías de aplastamiento del hormigón (G_f) y endurecimiento del acero (G_s).

No obstante, a pesar de que la predicción de la respuesta global empleando la regularización es objetiva, la curvatura y deformación unitaria estimadas a nivel local, resultan muy sensible al mallado seleccionado [13]. En atención a lo anterior, para recuperar la objetividad a nivel local, se han propuesto procedimientos de posprocesamiento de los resultados [14]. Sin embargo, la extrapolación de estos procedimientos al macroelemento MVLEM-3D enfrenta restricciones significativas, particularmente en la caracterización de estados previos a la falla y en la respuesta ante cargas cíclicas.

En consecuencia, la presente memoria de título se subdivide en dos etapas: (1) Evaluar las recomendaciones presentes en la literatura para la modelación no lineal objetiva de la respuesta a nivel global, aplicadas al macroelemento MVLEM-3D; y (2) proponer, desarrollar y evaluar un algoritmo de posprocesamiento de los resultados, para recuperar una predicción objetiva de la respuesta a nivel local.

Para la primera etapa, se desarrolla una interfaz gráfica de usuario que permite la rápida definición, calibración y regularización, de diversos modelos de comportamiento disponibles en OpenSeesPy. Para la segunda etapa, se describe e implementa el algoritmo de posprocesamiento propuesto, y se evalúa su efectividad ante distintas condiciones de carga.

Con el propósito de evaluar el desempeño tanto de las recomendaciones como del algoritmo propuesto, se desarrollan modelos no lineales para probetas de muros ensayadas en condiciones de laboratorio, que presentan modos de falla controlados a flexión [11,20,21]. Adicionalmente, se estudia el comportamiento del algoritmo propuesto ante solicitaciones sísmicas mediante la modelación de un eje de muro perteneciente a una edificación habitacional, con características representativas de la realidad nacional [22].

Finalmente, se evalúa la objetividad de la modelación a nivel global y local comparando los resultados obtenidos con distintos niveles de mallado. Además, se examina la eficiencia y aplicabilidad del algoritmo de posprocesamiento propuesto. Los resultados demuestran que la regularización de los modelos de comportamiento resulta esencial para lograr una modelación global objetiva, mientras que la objetividad local se reconstruye eficazmente mediante el algoritmo de posprocesamiento propuesto.

1.2. Hipótesis

En el contexto de la modelación no lineal de muros esbeltos de hormigón armado mediante el macroelemento MVLEM-3D, se plantea la hipótesis de que, al alcanzar la objetividad global mediante la regularización de las curvas constitutivas de los materiales, es posible recuperar la objetividad de la respuesta local en cada instante y a lo largo de toda la altura utilizando un algoritmo de posprocesamiento.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Desarrollar e implementar una metodología para la modelación no lineal objetiva de muros esbeltos de hormigón armado empleando el macroelemento MVLEM-3D de OpenSeesPy, incorporando las recomendaciones propuestas en la literatura y un algoritmo de posprocesamiento innovador, para obtener predicciones objetivas tanto a nivel global como local, ante condiciones de desplazamiento controlado y registro sísmico (*Coquimbo 2015*).

1.3.2. Objetivos Específicos

1. Implementar y evaluar el desempeño de las recomendaciones propuestas en la literatura, para la modelación no lineal de muros esbeltos de hormigón armado empleando el macroelemento MVLEM-3D.
2. Desarrollar e implementar en Python un algoritmo de posprocesamiento para obtener una estimación objetiva de la respuesta a nivel local, para el macroelemento MVLEM-3D.
3. Evaluar el desempeño de la propuesta de posprocesamiento para: (1) Probetas de muro ensayadas en condiciones de laboratorio. (2) Modelos de muro a escala real, preservando las características más representativas presentes en las edificaciones nacionales, ante a un registro sísmico (*Coquimbo 2015*).

2. Marco Teórico

2.1. Análisis No Lineal

El análisis no lineal es una herramienta fundamental en la ingeniería estructural para simular y evaluar el comportamiento de edificios y otras estructuras ante eventos extremos como sismos y explosiones [23]. Se distinguen dos métodos principales: el análisis sísmico no lineal estático y el dinámico, siendo este último el preferido para evaluar el desempeño sísmico y desarrollar mejoras constructivas [23]. La presente investigación se centra en el análisis sísmico no lineal dinámico aplicado a muros esbeltos de hormigón armado.

2.1.1. Comportamiento de Muros Esbeltos

Los muros de hormigón armado se emplean para resistir las cargas laterales generadas por sismos y vientos. Se caracterizan por su alta rigidez y capacidad para soportar cargas de servicio, y pueden ser diseñados con detallamiento que les confiera la ductilidad necesaria ante cargas sísmicas de intensidad. Además, su versatilidad permite adoptar diversas configuraciones geométricas para satisfacer los requisitos arquitectónicos. La presente investigación se enfoca en el análisis de muros con sección rectangular y esbeltos.

La modelación no lineal debe describir con precisión los mecanismos de falla de los muros controlados a la flexión. Los mecanismos de falla de los muros (Birely [24]; Whitman [25]) se producen por: (1) Aplastamiento simultáneo del hormigón y pandeo de la armadura longitudinal en la región extrema a compresión del muro (fallo por compresión-pandeo); (2) Rotura de la armadura longitudinal previamente pandeada (fallo por pandeo-rotura); o (3) Aplastamiento del hormigón en una gran parte de la región de compresión, debido a las demandas combinadas de las cargas de flexión y corte. [23]

2.1.2. Tipos de Modelos Analíticos

El comportamiento no lineal de muros de hormigón armado controlados a la flexión puede ser simulado con diversos modelos analíticos. La Figura 1 ilustra los modelos más utilizados. Entre ellos, los identificados como a, b y d son los más comúnmente empleados, dado que están disponibles en software comerciales y de investigación, y ofrecen un equilibrio óptimo entre eficiencia computacional, robustez numérica, precisión en la simulación cíclica y capacidades de modelado geométrico [23].

Los modelos con plasticidad concentrada representan la inelasticidad en puntos o zonas específicas, simplificando el comportamiento mediante elementos como resortes. En contraste, los modelos con plasticidad distribuida consideran la relación esfuerzo-deformación de forma continua a lo largo del elemento, permitiendo captar de manera más detallada fenómenos complejos como el agrietamiento incluso cuando no se tiene certeza de dónde aparecerá. El principal reto de los elementos con plasticidad distribuida es calibrar correctamente los modelos, ajustando las propiedades de los materiales y el tipo de elemento en base a la estructura a modelar.

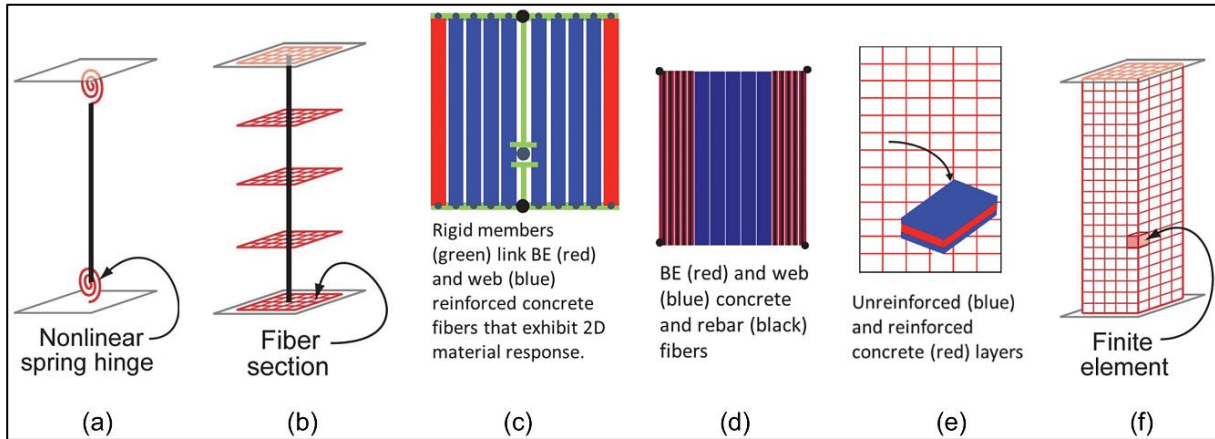


Figura 1: Idealizaciones de los modelos utilizados para simular la respuesta no lineal.

Fuente: National Institute of Standards and Technology, NIST (2017) [23]

2.1.2.1. Modelo Analítico MVLEM-3D

El modelo MVLEM-3D es un elemento tridimensional de cuatro nodos con 24 GL para el análisis no lineal de muros de hormigón armado sometidos a flexión y cargas multidireccionales. El modelo es una extensión del modelo MVLEM (Multiple-Vertical-Line-Element-Model) bidimensional de dos nodos propuesto por Vulcano [26].

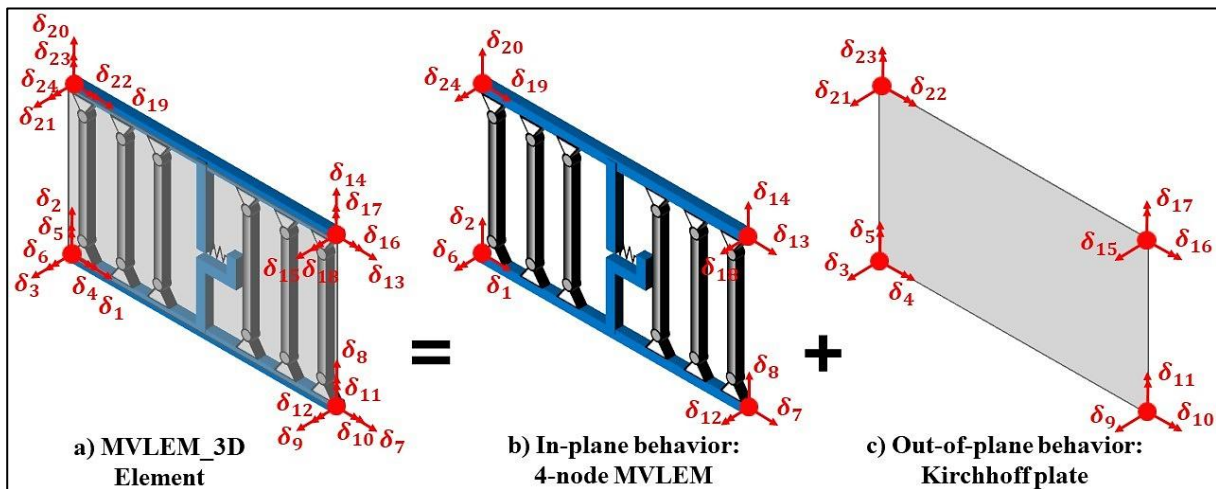


Figura 2: Grados de libertad del elemento MVLEM-3D.

Fuente: Kolozvari (2021) [12]

El MVLEM básico se amplía a una formulación de modelo tridimensional mediante: (1) Aplicando una transformación geométrica de los grados de libertad del elemento en el plano interior que lo convierte en una formulación de elemento de cuatro nodos; (2) Incorporando un comportamiento elástico lineal fuera del plano basado en la teoría de placas de Kirchhoff. Los comportamientos en el plano y fuera del plano del elemento se encuentran desacoplados. [12]

2.1.3. Modelación de las Propiedades Mecánicas de los Materiales

El modelo analítico MVLEM-3D utiliza modelos uniaxiales de comportamiento de los materiales para predecir la respuesta flexo axial y de corte de un muro. La biblioteca OpenSees ofrece numerosos modelos para simular el comportamiento uniaxial del acero y del hormigón. La calibración de estos ha sido objeto de debate, ya que se ha evidenciado que el tamaño del mallado influye en los resultados de la modelación una vez iniciada la pérdida de resistencia del hormigón [14–17]. A continuación, se introduce el fenómeno de localización y no-objetividad en la modelación no lineal, así como las técnicas de regularización del material para mitigarlo.

2.1.3.1. Fenómeno de Localización y No-Objetividad en la Modelación No Lineal

La localización es la concentración de las deformaciones inelásticas en una zona específica de un elemento estructural. En materiales con rama postpico de ablandamiento—como el hormigón en compresión—este fenómeno se activa cuando la curva σ - ϵ desciende al superar su resistencia máxima, provocando una rápida disminución de la rigidez local y la formación de una ‘zona frágil’, mientras que el resto de la sección permanece mayormente elástica. En elementos *displacement-based*, la localización concentra la inelasticidad en un único elemento de la malla, mientras que en elementos *force-based* se ubica en una sola sección, generalmente en el extremo donde el momento es máximo, cuyo largo de influencia depende de la distancia entre los puntos de integración.

Cuando se trabaja con elementos finitos, la respuesta del modelo debería converger a una única solución a medida que se refina el mallado. Sin embargo, cuando existe localización de deformaciones, la respuesta del modelo siempre se mantiene variando a medida que se refina el mallado, lo que lo convierte en una modelación "no-objetiva". Para contrarrestar esta dependencia con el mallado o cantidad de puntos de integración, se aplican técnicas de "regularización" basadas en la energía de aplastamiento del material.

La necesidad de aplicar la regularización del material se ilustra claramente en el ejemplo presentado por Coleman et al. [14]. En un ensayo de compresión uniaxial a desplazamiento controlado, un cilindro de hormigón exhibe dos regiones diferenciadas. En la región A, el material muestra daños mínimos y aún no alcanza su resistencia máxima; en contraste, la región B experimenta un deterioro considerable. En esta región, el deterioro se inicia mediante fisuración axial y progresa hasta formar una banda de deslizamiento que ocasiona una rápida degradación de la rigidez. [14]

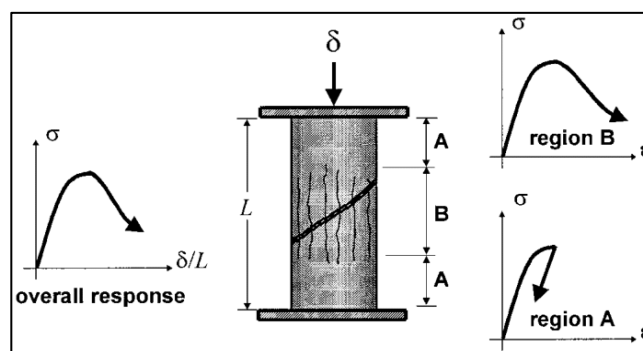


Figura 3: Ensayo de compresión uniaxial a desplazamiento controlado.

Fuente: Coleman (2001) [14]

En la región B, la curva σ - ϵ transita a la rama de ablandamiento, caracterizada por una reducción de la carga junto a un incremento en la deformación. Cuando esta zona alcanza su resistencia máxima y comienza su descarga producto del ablandamiento del material, el hormigón en la región A descarga de forma elástica para mantener el equilibrio.

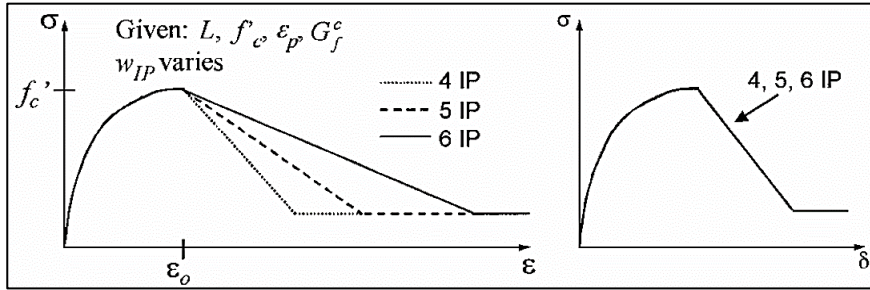


Figura 4: Curvas de esfuerzo-deformación con energía de fractura constante.

Fuente: Coleman (2001) [14]

Estos hallazgos evidencian que el daño se localiza y que la respuesta fundamental del material queda descrita mediante la relación σ - δ , en lugar de σ - ϵ . Por ello, resulta necesario aplicar técnicas de regularización basadas en la energía de aplastamiento del hormigón (G_f) para garantizar una representación coherente de la relación σ - δ , independientemente la longitud característica del elemento (L_{cr} , para elementos *displacement-based*) o del largo de influencia de la sección (L_{IP} , para elementos *force-based*) empleado en la modelación. En consecuencia, la energía de aplastamiento del hormigón (G_f), se define según la expresión ec. (1).

$$G_f = \int \sigma du_i \quad \Rightarrow \quad G_f = L_{IP} \int \sigma d\epsilon_i \quad \Rightarrow \quad G_f / L_{IP} = \int \sigma d\epsilon_i \quad \text{ec. (1)}$$

$u_i = L_{IP} \cdot \epsilon_i$

En la literatura se reportan inicialmente valores constantes para la energía de aplastamiento del hormigón no confinado (G_{fc}), tal como indican Jansen y Shah [27] (ec. (2)) y Nakamura y Higai [28] (ec. (3)). Posteriormente, Pugh et al. [17] evalúan valores de G_{fc} en ensayos de probetas de muro y proponen una expresión dependiente de la resistencia cilíndrica f'_c (ec. (4)). Esta última expresión, recomendada por el NIST [23], se utiliza en la presente investigación para regularizar el hormigón no confinado.

$$G_{fc} = 0.143 \left[\frac{\text{kip}}{\text{in}} \right] \quad \text{ec. (2)} \quad G_{fc} = 0.457 \left[\frac{\text{kip}}{\text{in}} \right] \quad \text{ec. (3)}$$

$$G_{fc} = 2 \cdot f'_c \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}} \right] \quad \text{en donde } f'_c \text{ en [MPa]} \quad \text{ec. (4)}$$

De forma análoga, para la energía de aplastamiento del hormigón confinado (G_{fcc}), Pugh et al. [17] proponen la expresión presentada en la ec. (8), la cual depende únicamente del valor de G_{fc} del hormigón no confinado. Posteriormente, Lowes et al. [18] formulan una ecuación que incorpora la relación entre la resistencia a la compresión confinada y la no confinada (f'_{cc}/f'_c) para explicitar la incidencia del grado de confinamiento en el valor de G_{fcc} . Esta expresión se detalla en la ec. (9) y es la recomendada por el NIST [23].

$$G_{fcc} = 1.70 G_{fc} \quad \text{ec. (5)}$$

$$G_{fcc} = 5 \cdot (K - 0.85) G_{fc} \quad \text{en donde } K = f'_{cc}/f'_c \quad (\text{Mander (1988) [1]}) \quad \text{ec. (6)}$$

2.1.3.2. Modelación del Hormigón

Un modelo σ - ϵ para el hormigón debe cumplir las siguientes características: (1) Su pendiente en el origen debe ser E_c ; (2) Alcanzar un máximo en el punto (ϵ_{cc}, f'_{cc}) ; (3) Describir tanto la parte ascendente como la descendente de la curva; y (4) Controlar adecuadamente la rama descendente (ablandamiento). El control de dicha rama es fundamental, ya que su forma depende del grado de confinamiento, de la resistencia del concreto y del tamaño del elemento al regularizar el comportamiento [29]. En la presente investigación se emplean los modelos ConcreteCM y Concrete07 de OpenSees, ya que permiten calibrar todos estos parámetros. Se recomienda consultar la definición y los parámetros asociados de los modelos en Apéndice B: ConcreteCM y Apéndice C: Concrete07.

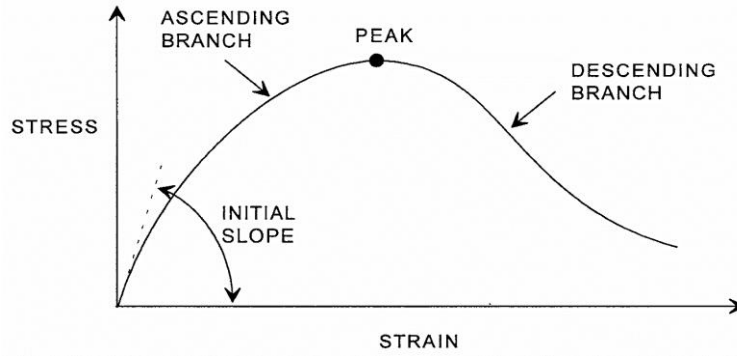


Figura 5: Características de la curva constitutiva del hormigón.

Fuente: Chang y Mander (1994) [29]

2.1.3.2.1. Calibración de la Rama Ascendente

La calibración de la rama ascendente del hormigón no confinado se sustenta en tres parámetros fundamentales: el módulo elástico E_c , la deformación ϵ_c y la resistencia cilíndrica a la compresión f'_c . Para determinar E_c se emplea la fórmula empírica propuesta por Pauw [30] y adoptada en el ACI318. Se asume que la máxima resistencia se alcanza a una deformación $\epsilon_c = 0.002$, mientras que f'_c varía según el grado del hormigón. Para modelos no lineales, f'_c se reduce mediante un factor de 0.85 para compensar la influencia del tamaño del elemento [31].

$$E_c = 15100\sqrt{f'_c} \left[\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right] \quad \text{ec. (7)}$$

De manera análoga, la rama ascendente del hormigón confinado se define mediante tres parámetros fundamentales: el módulo elástico E_{cc} , la deformación ϵ_{cc} y la resistencia a la compresión confinada f'_{cc} . Para determinar E_{cc} se utiliza la expresión propuesta por Chang y Mander [29]. El valor del máximo se estima a partir de las fórmulas de Mander et al. [1], las cuales cuantifican la relación f'_{cc}/f'_c en función de los esfuerzos de confinamiento. Finalmente, la deformación ϵ_{cc} se determina mediante la expresión ec. (9) propuesta por Mander et al. [1].

$$E_{cc} = 185000 \cdot f_c'^{3/8} \text{ [psi]} \quad \text{ec. (8)}$$

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} \cdot \left[1 + 5 \cdot \left(\frac{f'_{cc}}{f'_c} - 1 \right) \right] \quad \text{ec. (9)}$$

2.1.3.2.2. Calibración de la Rama de Ablandamiento

En la literatura se han propuesto dos enfoques para la calibración de la rama de ablandamiento. El método estándar se basa en la calibración de estos modelos utilizando datos experimentales medidos en probetas de hormigón, como los propuestos por Mander et al. [1] y por Saatcioglu y Razvi [31] (véase ‘Apéndice F: Calibración Método Estándar’). No obstante, la rigidez tangente negativa genera que las deformaciones se concentren siempre en solo un elemento, independiente del mallado utilizado. Esto produce que para dos mallados diferentes, la distribución de deformaciones también cambie, produciendo que el modelo se vuelva no-objetivo, al depender del número de elementos o secciones utilizadas en la modelación [14,17].

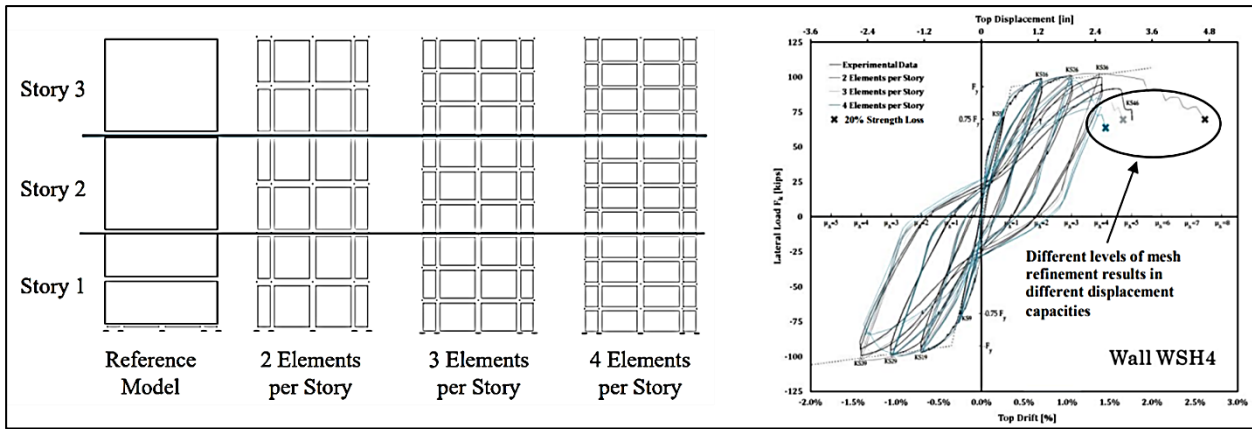


Figura 6: Respuesta carga-deformación medida y simulada con distintos elementos por piso. – Fuente: Lowes et al. (2016) [18]

El segundo enfoque, basado en la regularización de la rama de descarga del comportamiento del hormigón, supera esta limitación al ajustar las curvas constitutivas según la energía de aplastamiento del concreto (G_f) [14,18]. De esta manera, el efecto del tamaño del elemento en la respuesta del modelo se minimiza, generando una modelación objetiva y consistente.

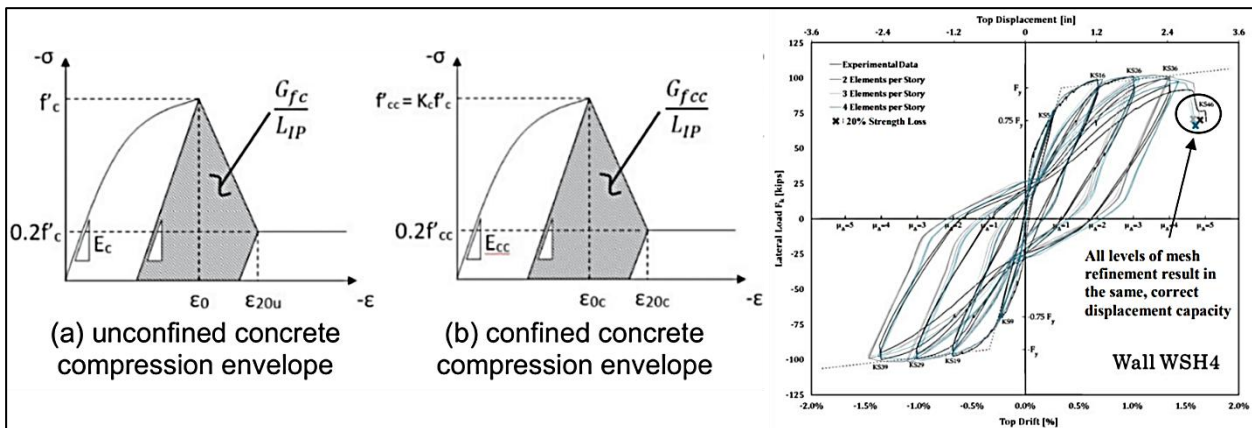


Figura 7: Regularización del hormigón con longitud dependiente del mallado. Respuesta carga-deformación medida y simulada – Fuentes: NIST (2017) [23] ; Lowes et al. (2016) [18]

2.1.3.2.3. Calibración del Comportamiento en Tracción

La calibración del comportamiento en tracción del hormigón se fundamenta en las leyes constitutivas formuladas por Belarbi y Hsu [32]. Este modelo se desarrolló a partir de ensayos en 17 paneles de hormigón armado sometidos a tensión pura y reforzados mediante barras de acero orientadas según la dirección de la carga.

Parámetros del modelo:

$$\varepsilon_{cr} = 0.00008 \quad \text{ec. (10)}$$

$$f_{cr} = 0.313\sqrt{f'_c} \text{ [MPa]} \quad \text{ec. (11)}$$

$$E_c = 3917\sqrt{f'_c} \text{ [MPa]} \quad \text{ec. (12)}$$

Curva constitutiva σ - ε :

$$\varepsilon_c \leq \varepsilon_{cr} \rightarrow \sigma_c = E_c \varepsilon_c \quad \text{ec. (13)}$$

$$\varepsilon_c > \varepsilon_{cr} \rightarrow \sigma_c = f_{cr} \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cr}} \right)^{0.4} \quad \text{ec. (14)}$$

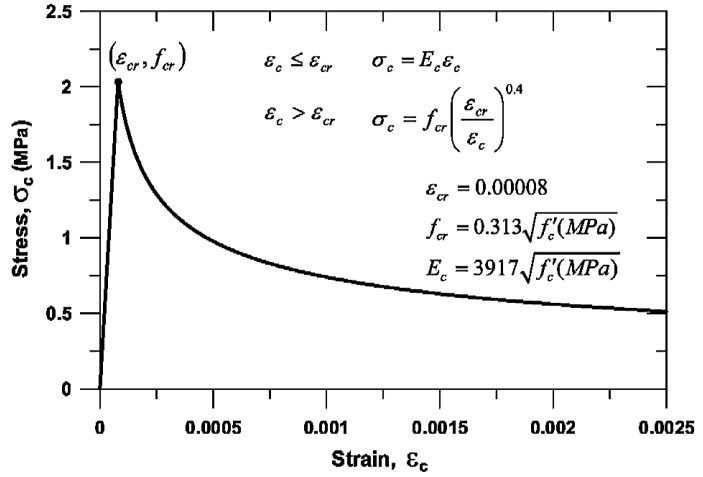


Figura 8: Modelo de hormigón en tensión.

Fuente: Massone et al. (2006) [33]

2.1.3.3. Modelación del Acero

Un modelo σ - ε para el acero debe reflejar con precisión las propiedades histeréticas y de fatiga del acero de refuerzo, dada su influencia en la respuesta global del elemento [29]. Para ello, el modelo utilizado en esta investigación posee las siguientes características: (1) Describe el comportamiento lineal elástico mediante el módulo de elasticidad del acero (E_s); (2) Reproduce el fenómeno del endurecimiento por deformación del acero $E_t = bE_o$; (3) Incorpora un parámetro de curvatura cíclica (R) que module la transición y reproduzca el efecto Bauschinger; y (4) Permite la calibración del endurecimiento isotrópico tanto en compresión como en tracción. En la presente investigación se utiliza el modelo *SteelMPF* de OpenSees, que implementa el modelo uniaxial propuesto por Menegotto y Pinto [34] y ampliado por Filippou et al. [35] para calibrar estos parámetros. Se recomienda consultar las definiciones y los parámetros asociados en el Apéndice D: *SteelMPF*. Análogamente, se emplea el modelo *MinMax* de OpenSees, para simular la pérdida de resistencia a la tracción cuando la deformación unitaria en tracción del acero supera el valor de ruptura, y para representar la pérdida de resistencia en compresión cuando la deformación unitaria en compresión alcanza el nivel que provoca una reducción del 80% en la resistencia del hormigón circundante.

2.1.3.3.1. Calibración del Comportamiento en Compresión

Pugh et al. [17] demostraron que, al ablandarse el hormigón en compresión y concentrarse las deformaciones, es necesario regularizar el comportamiento del acero para lograr una evaluación objetiva de la respuesta [13]. Las expresiones propuestas (ec. (15) y ec. (16)) definen la rama

plástica y la capacidad de deformación en función de la longitud característica (L_{cr}) del mallado, y de la longitud (L_{gage}) utilizada para medir las propiedades esfuerzo-deformación del acero, asumida en 200 mm. Estas expresiones han sido adoptadas por el NIST [23].

Parámetros de la regularización:

$$\varepsilon_{su}'' = \varepsilon_y + \left(\frac{L_{gage}}{L_{cr}} \right) (\varepsilon_{su} - \varepsilon_y) \quad \text{ec. (15)}$$

$$\begin{aligned} b'' &= \frac{f_u - f_y}{E_s \cdot (\varepsilon_{su}'' - \varepsilon_y)} \\ &= b \cdot \frac{(\varepsilon_{su} - \varepsilon_y)}{(\varepsilon_{su}'' - \varepsilon_y)} \end{aligned} \quad \text{ec. (16)}$$

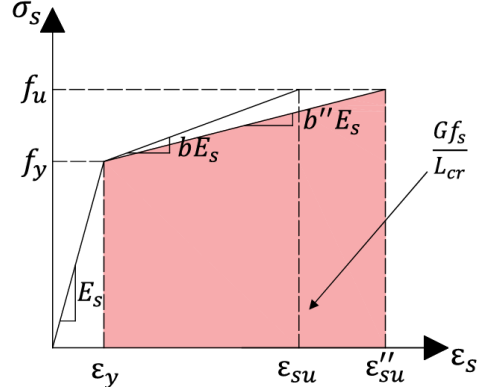


Figura 9: Modelo de acero en compresión.

Fuente: Pugh et al. (2015) [17]

2.1.3.3.2. Calibración del Comportamiento en Tracción

Tradicionalmente en el diseño de elementos de hormigón armado, se asume que la curva σ - ε de una barra de acero es elastoplástica perfecta, con una tensión de fluencia definida (f_y). Sin embargo, Belarbi y Hsu [32] demostraron que, cuando las barras se encuentran embebidas en hormigón, la relación σ - ε varía notoriamente, presentando una reducción en la tensión de fluencia, que se traduce en una tensión aparente (f_{na}) inferior. Además, los autores proponen una expresión para ajustar la pendiente de endurecimiento en tensión (b_p). En la presente investigación, se ajusta el comportamiento de las barras de acero refuerzo en tracción acorde a estas expresiones.

$$f_{na} = \left(0.43 + 0.5 \cdot \frac{f_{ya}}{f_y} \right) \cdot f_y \quad \text{ec. (17)}$$

$$b_p = \frac{E_{pa}}{E_s} \quad \text{ec. (18)}$$

En donde:

$$f_{cr} = 3.75 \sqrt{f_c' [\text{psi}]} \quad \text{ec. (19)}$$

$$E_p = b \cdot E_s \quad \text{ec. (20)}$$

$$f_{ya} = \left(1 - \frac{4}{\rho} \cdot \left(\frac{f_{cr}}{f_y} \right)^{1.5} \right) \cdot f_y \quad \text{ec. (21)}$$

$$E_{pa} = \left(3.3 - 2.5 \cdot \frac{f_{ya}}{f_y} \right) \cdot E_p \quad \text{ec. (22)}$$

2.1.3.4. Modelación del Comportamiento a Corte

Esta investigación se centra en la modelación de muros esbeltos controlados a flexión. Para ello, se utiliza el modelo ‘Elastic Uniaxial Material’ de OpenSees para representar el resorte horizontal de corte en el elemento MVLEM-3D. Con el fin de establecer una comparación directa entre los resultados del modelo y las respuestas a flexión medidas, se asignó a la rigidez del resorte de corte (K_s) un valor excepcionalmente elevado [36]. Se recomienda consultar la definición y los parámetros asociados al material en el Apéndice E: Elastic Uniaxial Material.

2.1.4. Objetividad a Nivel Local

Diversos autores han observado que, aunque la regularización del material permite una predicción objetiva de la respuesta global, la estimación local de la curvatura y la deformación unitaria resultan muy sensible al mallado seleccionado [13,14,18]. Para explicar este fenómeno, es fundamental considerar que la deriva total del muro depende de las rotaciones de las secciones de cada elemento, siendo la rotación inducida el producto de la curvatura de la sección por la dimensión a lo largo del eje longitudinal del elemento [23]. Al aumentar el número de elementos en el modelo, se reduce la longitud vertical asignada a la sección crítica, lo que disminuye tanto la rotación en esa zona como la deriva total del muro para una curvatura determinada. En consecuencia, para un mismo desplazamiento lateral a nivel de tope de muro, un mallado fino genera concentraciones de curvatura más marcadas [14].

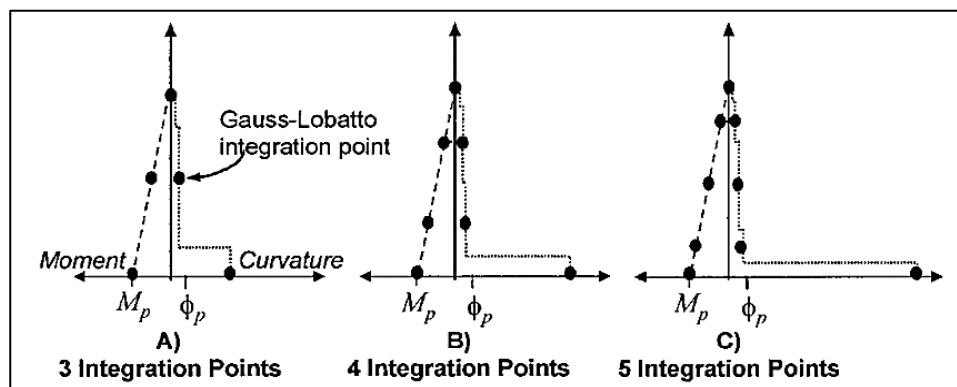


Figura 10: Perfil de momento y curvatura para un muro modelado con distintas densidades de mallado. Fuente: Coleman (2001) [14]

Para corregir la falta de objetividad a nivel local de elementos *displacement-based*, la literatura propone dos enfoques: (1) Ajustar la longitud del primer elemento (o punto de integración) para que su extensión coincida con la longitud de la rótula plástica; y (2) Implementar un algoritmo de posprocesamiento que recupere la objetividad local.

El problema con el enfoque (1) es que contraviene la práctica tradicional de definir un mallado de referencia, en el cual el primer nivel se modela con dos elementos, cada uno con una longitud equivalente a la mitad de la altura de piso. Además, ajustar el tamaño del elemento en cada muro de acuerdo con la dimensión de la rótula plástica complica la definición de elementos y materiales. Por último, especialmente en muros de hormigón armado, la definición de "*longitud de rótula plástica*" es más ambigua, existiendo más de un criterio, con una dispersión importante en los valores obtenidos. Por otro lado, el enfoque (2), basado en el procedimiento de posprocesamiento propuesto por Coleman [14], se limita a considerar únicamente el estado último, lo que impide describir la respuesta local previa a la falla. Además, ante solicitaciones cíclicas, el estado de esfuerzos en cada fibra depende de la historia de cargas a la que ha estado sometida, y dicho procedimiento no permite recuperar esa información, imposibilitando reconstruir la historia de esfuerzos y deformaciones en las fibras. Finalmente, el perfil de curvatura—suponiéndose lineal y con una concentración de rotación en la base—podría no representar adecuadamente el perfil de curvatura real en la altura.

2.2. Diseño de Muro Esbelto de Hormigón Armado

El presente capítulo aborda el diseño de muros esbeltos de hormigón armado, enfatizando la importancia de cumplir tanto con los requisitos de resistencia como con las especificaciones de detallamiento especial para asegurar un desempeño óptimo. Se revisan las principales provisiones de diseño aplicables a esta clase de elementos, conforme al marco regulatorio nacional vigente, basado en la normativa ACI318-08 [37] y en las especificaciones del DS60, Reglamento que Fija los Requisitos de Diseño y Cálculo para el Hormigón Armado.

2.2.1. Provisiones para el Diseño por Resistencia

Se revisan las provisiones para el diseño por resistencia de muros en voladizos. En general, la esbeltez es un parámetro fundamental que determina su comportamiento, en edificios altos ($M/Vd > 2$) predomina la falla por flexo axial, mientras que en edificios bajos ($M/Vd < 0.5$) la falla por corte es la más frecuente [38]. A continuación, se examinan las principales disposiciones relativas tanto al diseño flexo axial como al diseño a corte, aplicables a muros de hormigón armado.

2.2.1.1. Diseño a Flexo Axial

Los muros de hormigón armado presentan tres rangos de comportamiento en flexo axial: (1) Rango elástico: ocurre antes del agrietamiento, cuando el refuerzo longitudinal apenas contribuye; (2) Rango elástico post agrietamiento: el hormigón pierde capacidad a tensión en la zona agrietada, haciendo que el refuerzo asuma dicha función; y (3) Rango no lineal: se produce una disminución de la rigidez a medida que las grietas se amplían y se acercan a la zona en compresión [38].

Se distinguen tres tipos de falla: (1) Falla por compresión: se produce cuando el hormigón alcanza su deformación última antes de que el refuerzo en tensión fluya, resultando en una falla frágil y con baja absorción de energía; (2) Falla por tracción: ocurre cuando el refuerzo alcanza la fluencia antes de que el hormigón se aplaste, presentándose como una falla gradual y dúctil; y (3) Fractura del refuerzo: se manifiesta cuando el acero longitudinal se rompe debido a las grandes deformaciones en el lado traccionado, antes de que la zona en compresión del muro se aplaste [38]. Para el análisis seccional de la capacidad a flexo axial del muro, el cálculo de deformaciones, esfuerzos y resistencia se fundamenta en tres principios: (1) Equilibrio de fuerzas; (2) Compatibilidad de deformaciones, bajo la suposición de que las secciones transversales, inicialmente planas, permanecen planas; y (3) Leyes constitutivas de los materiales [38].

De los principios señalados, se deriva el diagrama de interacción asociado a las propiedades nominales, para posteriormente, aplicar los factores de reducción de resistencia establecidos en la sección 9.3.2 del ACI318-08. En base al diagrama de interacción de diseño, se verifica que las solicitaciones requeridas se ubiquen dentro de sus límites, cumpliendo el criterio de resistencia a flexo axial. Durante esta verificación, se debe tener en cuenta el límite máximo permitido para la carga axial, definido como ($P_{o_máx} = 0.35 f'_c A_g$), según el DS60.

Finalmente, se verifica la distribución del refuerzo a lo largo de la altura para garantizar que la menor resistencia relativa se ubique en la base, de modo que la sección crítica se genere únicamente en ese nivel. Además, se establece una cuantía mínima longitudinal de 0.0025 (18.10.2.1, ACI318-08) y se requiere que todos los muros se armen con al menos dos capas de armadura longitudinal (DS60, mod. Sección 21.9.2.2, ACI318-08).

2.2.1.2. Diseño a Corte

En general, considerando los requerimientos de ductilidad y disipación de energía, el corte no debe determinar la respuesta de los muros. La falla por corte es peligrosa, pues se presenta de forma frágil y con escasa capacidad de deformación no lineal. La respuesta a corte se caracteriza por un agrietamiento diagonal en el alma, que puede originarse directamente cuando la tensión principal de tracción supera la resistencia del material en el alma, o extenderse desde una grieta por flexión en el extremo del elemento, propagándose diagonalmente hacia el alma del muro [38].

En ambos casos, ya sea que el agrietamiento diagonal se origine directamente en el alma o se propague desde una grieta por flexión, el fenómeno se describe en términos de tensiones principales, siendo los parámetros de mayor influencia: (1) La resistencia a la tracción del hormigón; (2) El esfuerzo axial; y (3) La esbeltez. En este rango, el aporte del refuerzo es despreciable, según evidencia experimental. Las expresiones establecidas en el ACI318-08 para describir la resistencia al corte del hormigón V_c se derivan de este análisis de las tensiones principales. El código asume que la resistencia aportada por el hormigón equivale a aquella que inicia el agrietamiento diagonal [38].

$$V_c = 0.53\sqrt{f'_c}bd \quad \text{ec. (23)}$$

$$V_c = 0.88\sqrt{f'_c}hd + \frac{N_u d}{4L_w} \quad \text{ec. (25)}$$

$$V_c = \left[0.16\sqrt{f'_c} + \frac{L_w \left(0.33\sqrt{f'_c} + \frac{0.2N_u}{L_w b} \right)}{\frac{M_u}{V_u} - \frac{L_w}{2}} \right] bd \quad \text{ec. (24)}$$

Posterior a la generación del agrietamiento diagonal, el mecanismo de transferencia de corte del muro se compone de: (1) La fuerza de corte en la cabeza de compresión; (2) El efecto de trabazón de los agregados entre ambas caras de la grieta; (3) Las fuerzas axiales en el refuerzo transversal; y (4) La fuerza de corte por efecto tarugo en el refuerzo transversal [38].

El código ACI318-08 asume que la resistencia a corte derivada de estos mecanismos, se expresa como la suma del aporte de la resistencia del concreto, V_c , correspondiente al inicio del agrietamiento diagonal, y de V_s , asociada a la fuerza axial que asume el refuerzo transversal. Además, el código limita el aporte de V_s a un máximo de 4 veces V_c para evitar falla frágil (21.9.4) y establece una cuantía mínima de 0.0025 para el refuerzo transversal (21.9.2.1).

$$V_s = \rho_{yt}f_ybd$$

$$\text{ec. (26)}$$

$$V_n = V_c + V_s$$

$$\text{ec. (27)}$$

Estudios experimentales indican que las ecuaciones del código son conservadoras, al obtenerse razones experimentales/nominales de la resistencia a corte de aproximadamente 1.13 en muros que fallan en corte y flexión, y de 1.52 en aquellos que fallan únicamente en corte [39], lo que confirma la tendencia conservadora de la normativa.

2.2.2. Provisiones para el Detallamiento Especial

El diseño de un muro estructural de hormigón armado exige dotar al elemento de la ductilidad y capacidad de deformación necesarias, para garantizar una respuesta dúctil frente a sismos severos sin una pérdida significativa de la resistencia. Esta capacidad se logra mediante un detallamiento especial [38]. A continuación, se analizan las principales disposiciones que rigen dicho detallamiento conforme al marco normativo nacional vigente.

2.2.2.1. Diseño de Elemento de Borde

Para verificar que la capacidad de deformación no lineal del muro sea adecuada para satisfacer la demanda sísmica, se debe determinar el desplazamiento de diseño (δ_u) conforme a las disposiciones establecidas en la NCh433 de 1996 mod. 2012: Diseño Sísmico de Edificios. La capacidad de deformación de un muro esbelto se determina principalmente por el desplazamiento inducido por la flexión, derivado de la deformación de sus secciones a lo largo de la altura. Dicho desplazamiento se calcula sumando las componentes elástica y plástica [38].

$$\delta_u = \delta_y + \delta_p = \frac{1}{3} \phi_y h^2 + (\phi_u - \phi_y) \left(h - \frac{\ell_p}{2} \right) \ell_p \quad \text{ec. (28)}$$

Los términos de curvatura (ϕ_u , ϕ_y) se determinan en función de las características de la sección crítica, definida en la sección 2.2 del DS60 como la zona del muro en la que se espera la incursión inelástica cíclica. Por otro lado, la longitud de la rótula plástica (ℓ_p), de acuerdo con la práctica tradicional, se asume igual a $0.5l_w$. Tanto el DS60 como el ACI318-08 proporcionan expresiones derivadas de esta formulación para la verificación de la capacidad mínima de curvatura (21.9.5.4).

$$\phi_u = \frac{2\delta_u}{H_t l_w} = \frac{\varepsilon_c}{c} \leq \frac{0.008}{c} \quad \text{ec. (29)}$$

$$\phi_u = \frac{\delta_u - \delta_e}{\ell_p \left(H_t - \frac{\ell_p}{2} \right)} + \phi_e = \frac{\varepsilon_c}{c} \leq \frac{0.008}{c} \quad \text{ec. (30)}$$

Si la capacidad de deformación no se cumple, el código permite aumentar el límite de la deformación en el hormigón de 0.003 a 0.008, lo que implica la utilización de elementos de borde. La necesidad de estos elementos se verifica en la sección 21.9.6.2 en base a la ec. (31). De forma análoga, si se requieren elementos de borde, se proporcionan expresiones para determinar la longitud a confinar según la sección 21.9.6.4 (ver ec. (32)).

$$c \geq \frac{l_w}{600 \left(\frac{\delta'_u}{h'_w} \right)} \quad \text{ec. (31)} \quad \frac{c_c}{l_w} = \frac{c}{l_w} - \frac{l_w}{600 \left(\frac{\delta'_u}{h'_w} \right)} \quad \text{ec. (32)}$$

3. Parte I: Estudio de la Objetividad Global de la Modelación

Con el fin de mitigar la sensibilidad del mallado en la respuesta global, se adoptan recomendaciones de la literatura que regularizan las curvas constitutivas de los materiales [17,18,23]. Para evaluar la eficacia de estas sugerencias, se desarrollan modelos no lineales a partir de probetas de muros ensayadas a desplazamiento controlado. Asimismo, se modela un eje de muro de una edificación habitacional prototipo, representativa de la realidad nacional, sometida a un registro sísmico.

3.1. Caso de Estudio 1: Probetas de Muros Ensayadas a Deformación Controlada

Siguiendo el enfoque propuesto por Lowes et al. [18], se evalúa la respuesta de modelos no lineales desarrollados a partir de cuatro probetas de muros rectangulares, que exhiben un comportamiento controlado a la flexión. Este conjunto se selecciona por incluir diversas condiciones de confinamiento en los elementos de borde y por contar con información detallada sobre parámetros mecánicos, solicitaciones y respuestas registradas durante la experimentación. El detallamiento del refuerzo de las probetas de muro se presenta en Apéndice G: Detallamiento de Probetas de Muro.

3.1.1. Data Experimental Usada para el Desarrollo de los Modelos

La Tabla 1 muestra las probetas de muros y los parámetros de diseño relevantes para esta investigación. Mientras que la Tabla 2 provee parámetros de demanda y respuesta asociados a las probetas de muro. Antecedentes adicionales se pueden consultar en las referencias listadas en la Tabla 1. Para conocer la nomenclatura utilizada, consulte el Apéndice H: Abreviaturas.

Tabla 1: Probetas de muro ensayadas y modeladas – Parámetros de diseño.

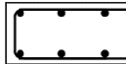
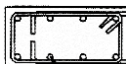
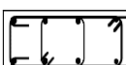
ID MURO	Referencia	l_w [mm]	$\frac{l_w}{t_w}$	$\frac{M}{Vl_w}$	f'_c [MPa]	$f_{y_{be}}$ [MPa]	ρ_{be} [%]	Número de Pisos Estimado	Detallamiento de Elemento de Borde
WSH4	[20]	2000	13.3	2.28	40.9	576.0	N/A	3	
RW1	[40]	1219	12	3.13	31.6	434.5	2.95	4	
RW2	[40]	1219	12	3.13	42.8	434.5	2.95	4	
WSH6	[20]	2000	13.3	2.26	45.6	576.0	1.74	3	

Tabla 2: Probetas de muro ensayadas y modeladas – Parámetros de demanda y respuesta.

ID MURO	$\frac{N}{A_g f'_c}$ [%]	$\frac{V_b}{A_{cv} \sqrt{f'_c}}$	$\frac{V_b}{V_n}$	$\frac{M_b}{M_n}$	Δ_y [%]	Δ_u [%]	Tipo de Falla
WSH4	6.0	2.8	13.3	1.06	0.29	1.60	CB
RW1	10.0	2.6	12	1.07	0.48	2.26	CB
RW2	7.0	2.7	12	1.16	0.55	-	-
WSH6	10.8	3.6	13.3	1.11	0.31	2.04	CB

3.1.2. Calibración de los Modelos

Para cada probeta de muro se desarrollan diez modelos no lineales. La mitad se calibra mediante el método estándar para definir los parámetros del material, mientras que la otra mitad se ajusta empleando técnicas de regularización. Durante el análisis se consideran cinco niveles de mallado, incluyendo un modelo de referencia representativo de la práctica tradicional —con un elemento por piso en altura y dos en la rótula plástica—, así como variantes con mayor densidad que incorporan 3, 4, 5 y 6 elementos por piso. El número de pisos asociado a cada probeta se estima asumiendo que la altura de cada nivel equivale a diez veces el espesor del muro, conforme a relaciones espesor-altura observadas en la práctica nacional [22].

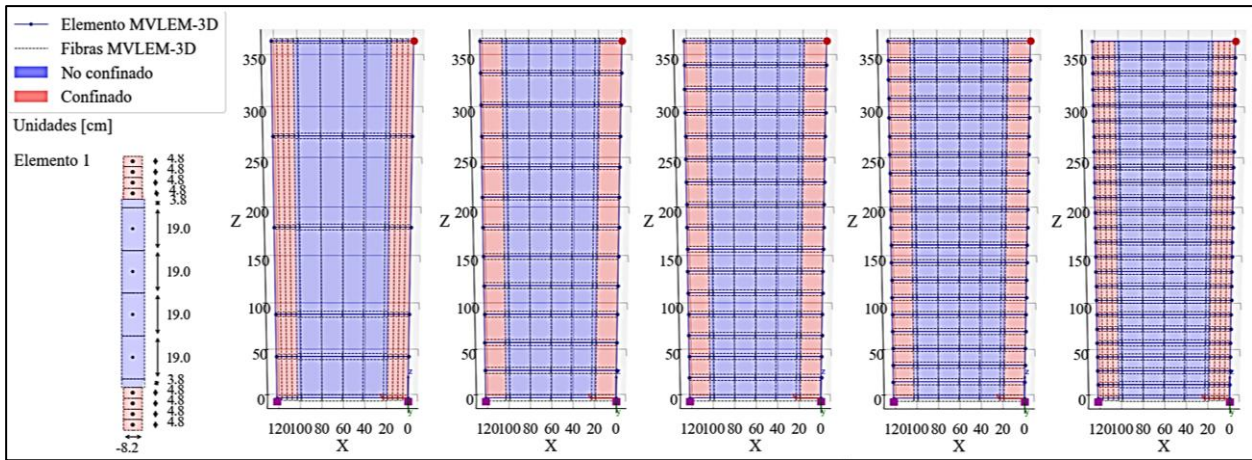


Figura 11: Mallado vertical utilizado para evaluar la objetividad del modelo RW1. Se presenta el mallado de referencia, junto con variantes de 3, 4, 5 y 6 elementos por piso.

3.1.2.1. Calibración del Hormigón

La relación esfuerzo-deformación del hormigón, definida mediante el modelo ConcreteCM, se desarrolla conforme a lo indicado en la sección ‘2.1.3.2 Modelación del Hormigón’. El comportamiento en compresión se representa mediante dos ramas: ascendente y ablandamiento. La rama ascendente se calibra con las expresiones del módulo elástico propuestas por Pauw [30] para el hormigón no confinado (ec. (7)) y por Chang y Mander [29] para el hormigón confinado (ec. (8)). Se asume una deformación máxima de $\epsilon_c = 0.002$ para el hormigón no confinado y, para el hormigón confinado, se utiliza la expresión de Mander et al. [1] (ec. (9)). La rama de ablandamiento se modela según el método empleado: con el método estándar, la curva se calibra para que la pendiente de ablandamiento se ajuste al modelo analítico de Saatcioglu y Razvi [31], mientras que para el comportamiento regularizado se ajusta en función de la energía de aplastamiento del hormigón (G_f) (ec. (4) y ec. (6)). Finalmente, el comportamiento en tracción se calibra para que la curva se adecúe al modelo analítico propuesto por Belarbi y Hsu [32].

La Tabla 3 presenta los parámetros del modelo constitutivo del hormigón para el muro RW1, tanto para el mallado de referencia como para la configuración que utiliza seis elementos por piso. La Figura 12 muestra las curvas constitutivas del hormigón no confinado y confinado correspondientes

a todos los niveles de mallado. El Apéndice I: ‘Parámetros de Modelación de Probetas’, detalla los parámetros empleados en la definición de materiales para los demás niveles de mallado y para los otros muros.

Tabla 3: Parámetros de modelación de muro RW1 – Comportamiento del hormigón.

Hormigón No Confinado - ConcreteCM				Hormigón Confinado - ConcreteCM			
Método:	Estándar	Regularizado		Método:	Estándar	Regularizado	
Mallado:	Todos	Ref.	6 Ele.	Mallado:	Todos	Ref.	6 Ele.
f'_c [MPa]	26.84	26.84	26.84	f'_{cc} [MPa]	31.34	31.34	31.34
ε_c	0.002	0.002	0.002	ε_{cc}	0.00368	0.00368	0.00368
E_c [MPa]	24520.9	24520.9	24520.9	E_{cc} [MPa]	28317.0	28317.0	28317.0
r_c	2.055	4	2.055	r_c	7	8	7
x_{cr}^-	1.2	1.123	1.076	x_{cr}^-	1.023	1.1137	1.047
f_t [MPa]	1.62	1.62	1.62	f_t [MPa]	1.62	1.62	1.62
ε_t	0.00008	0.00008	0.00008	ε_t	0.00008	0.00008	0.00008
r_t	1.2	1.2	1.2	r_t	1.3	1.3	1.3
x_{cr}^+	1000	1000	1000	x_{cr}^+	1000	1000	1000
GapClose	0	0	0	GapClose	0	0	0

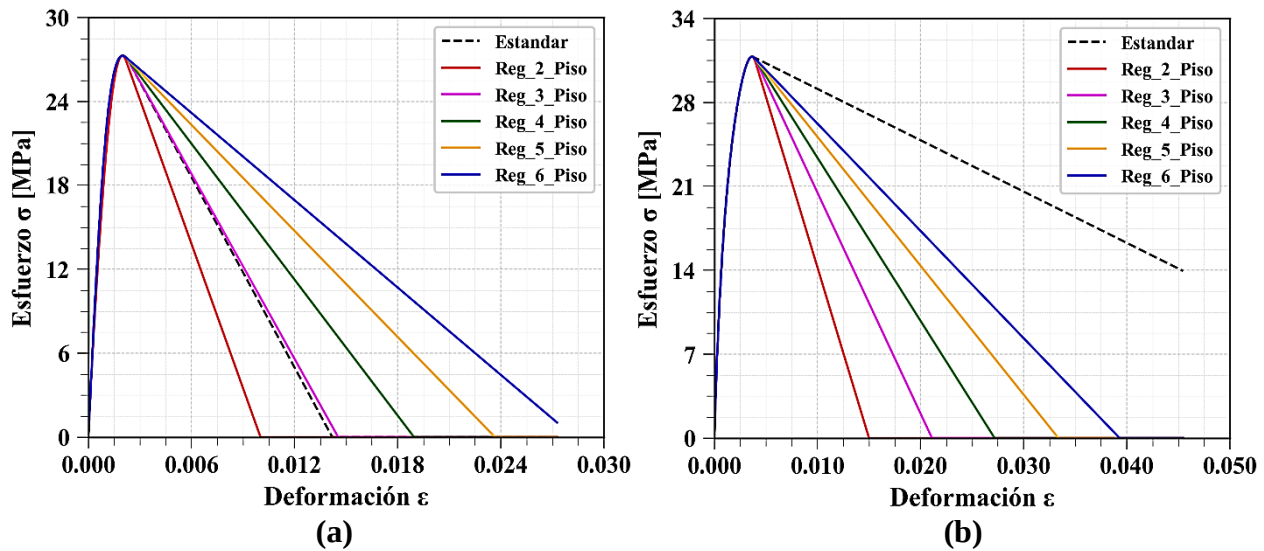


Figura 12: Modelo constitutivo del hormigón no confinado (a) y confinado (b) - Muro RW1.

3.1.2.2. Calibración del Acero

La relación esfuerzo-deformación del refuerzo de acero, definida mediante el modelo SteelMPF, se desarrolla conforme a lo indicado en la sección ‘2.1.3.3 Modelación del Acero’. El comportamiento en compresión se regulariza utilizando las expresiones propuestas por Pugh et al. [17] (ec. (15) y ec. (16)), mientras que el comportamiento en tracción se ajusta al modelo analítico presentado por Belarbi y Hsu [32]. Los parámetros que describen la degradación cíclica de la rigidez de las barras se calibran con valores de $R_0 = 20$, $c_{R1} = 0.925$ y $c_{R2} = 0.15$, tal como se propuso originalmente por Menegotto y Pinto [34].

La Tabla 4 presenta los parámetros del modelo constitutivo del acero para tanto el mallado de referencia como para el que utiliza seis elementos por piso en el muro RW1. La Figura 13 muestra las curvas constitutivas del acero del alma y del elemento de borde correspondiente a todos los niveles de mallado. El Apéndice I: ‘Parámetros de Modelación de Probetas’, detalla los parámetros empleados en la definición de materiales para los demás niveles de mallado y para los otros muros.

Tabla 4: Parámetros de modelación de muro RW1 – Comportamiento del acero.

Acero de Alma - SteelMPF				Acero de Elemento de Borde - SteelMPF			
Método:	Estándar	Regularizado		Método:	Estándar	Regularizado	
Mallado:	Todos	Ref.	6 Ele.	Mallado:	Todos	Ref.	6 Ele.
f_{yp} [MPa]	358.75	358.75	358.75	f_{yp} [MPa]	397.23	397.23	397.23
f_{yn} [MPa]	434.5	434.5	434.5	f_{yn} [MPa]	434.5	434.5	434.5
E_0 [MPa]	200000	200000	200000	E_0 [MPa]	200000	200000	200000
b_p	0.01297	0.01297	0.01297	b_p	0.00978	0.00978	0.00978
b_n	0.00896	0.02048	0.00683	b_n	0.01115	0.02548	0.00849
R_0	20	20	20	R_0	20	20	20
c_{R1}	0.925	0.925	0.925	c_{R1}	0.925	0.925	0.925
c_{R2}	0.0015	0.0015	0.0015	c_{R2}	0.0015	0.0015	0.0015

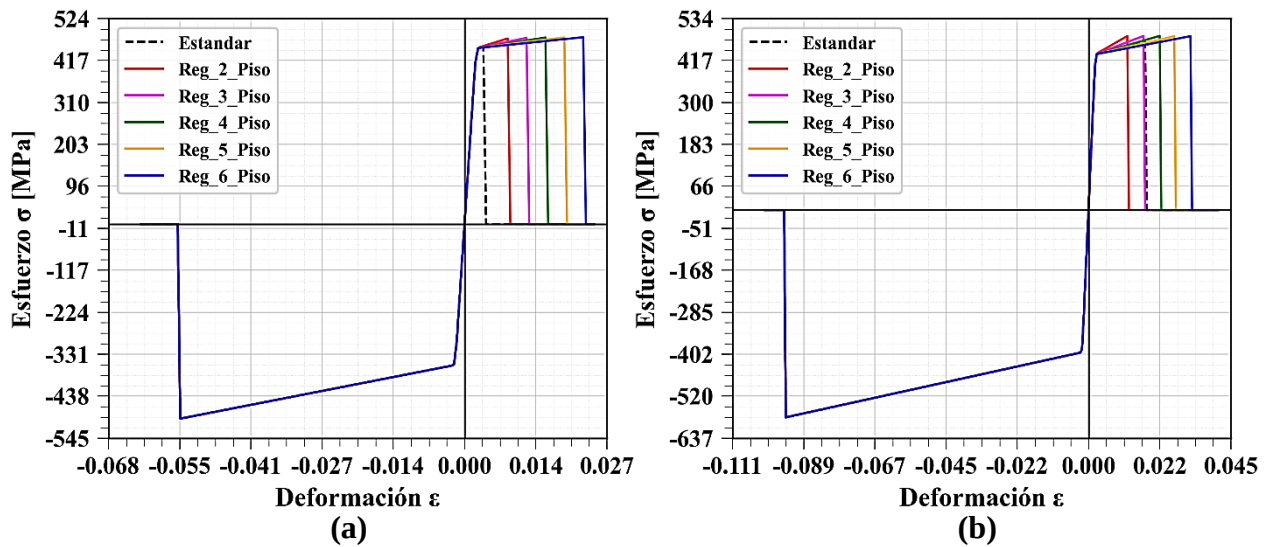


Figura 13: Modelo constitutivo del acero de alma (a) y elemento de borde (b) - Muro RW1.

3.1.2.3. Definición de solicitación

Las probetas de muro se someten a ensayos de desplazamiento controlado. Las rutinas predefinidas para el muro RW1 se presentan en la Tabla 5 y la Figura 14. El Apéndice J: ‘Solicitaciones a Desplazamiento Controlado’, detalla las historias de desplazamiento aplicadas a las demás probetas. En general, las rutinas de deriva por piso se ajustan para inducir la no linealidad y el posterior colapso de las probetas.

Tabla 5: Derivas de piso aplicadas.

Muro RW1	
Número de Ciclo	Drift
1 y 2	0.10
3 y 4	0.25
5 y 6	0.50
7 y 8	0.75
9 y 10	1.00
11 y 12	1.50
13 y 14	2.00

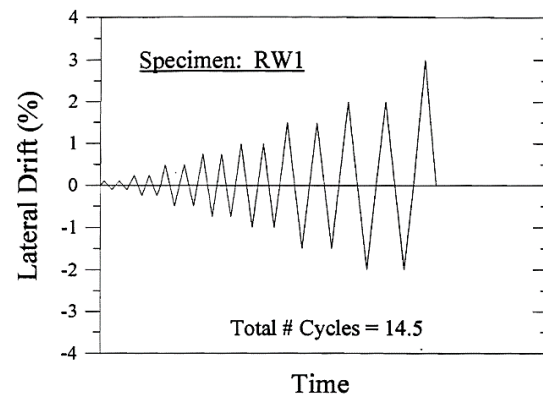


Figura 14: Derivas de piso aplicadas.
Fuente: Thomsen y Wallace (1995) [40]

3.1.3. Resultados y Discusión

A continuación, se exponen los resultados obtenidos de las modelaciones no lineales de probetas de muro ensayadas en laboratorio. Se contrastan los resultados de la modelación —que incluyen la historia de la carga lateral del actuador, la fuerza lateral máxima aplicada, el desplazamiento que marca la primera fluencia y el desplazamiento asociado al colapso— con los datos empíricos registrados durante los ensayos. Posteriormente, se discute la efectividad de las técnicas de regularización frente al método estándar para calibrar el comportamiento de los materiales y se evalúa su impacto en la respuesta global. Además, se analiza el comportamiento local, evidenciándose problemas de localización de las deformaciones al variar el tamaño del mallado.

3.1.3.1. Respuesta Global

Inicialmente se presentan las gráficas de fuerza de corte frente a la deriva de piso obtenidas mediante la modelación no lineal. Para facilitar el análisis, la Figura 15 exhibe exclusivamente los resultados correspondientes a la probeta RW1, seleccionada como caso representativo. Cabe destacar que el comportamiento observado en el muro RW1 se replica en las demás probetas, cuyos resultados se encuentran en el Apéndice K: ‘Resultados de Probetas de Muro’. A continuación, se analizan y discuten en detalle las dos gráficas presentadas en la Figura 15.

La gráfica **(a)** destaca la respuesta obtenida con la calibración estándar, evidenciando una marcada dependencia del mallado al inicio de la pérdida de capacidad lateral. En contraste, la gráfica **(b)** muestra que la aplicación de técnicas de regularización permite una modelación más objetiva, reflejada en la uniformidad de la deriva de piso que origina la pérdida de resistencia lateral, sin importar el mallado empleado. Cabe destacar que, en el modelo regularizado, aunque la respuesta presenta cierta variabilidad tras el 3% de deriva, se observa un cambio de tendencia a partir de aproximadamente el 2.2% de deriva; en cambio, en el caso no regularizado la curva se mantiene suave y exhibe cambios pronunciados en distintos niveles de desplazamiento. Al comparar con los datos experimentales, se confirma que, cerca del 2.2% de deriva, ocurre un cambio en la respuesta, lo cual resulta consistente con los modelos regularizados. Finalmente, se aprecian leves discrepancias en la representación de la respuesta histerética durante los ciclos previos a la falla.

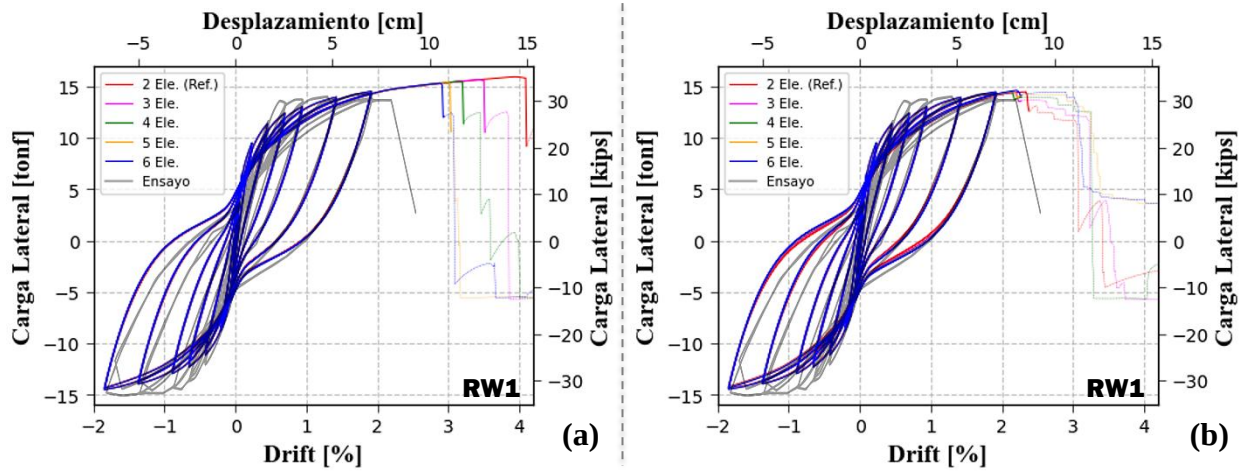


**Figura 15: Carga lateral vs Deriva de piso – Muro RW1.
Modelo de comportamiento estándar (a) y regularizado (b).**

El comportamiento anterior se replica en las demás probetas de muro, como muestra la Figura 16.

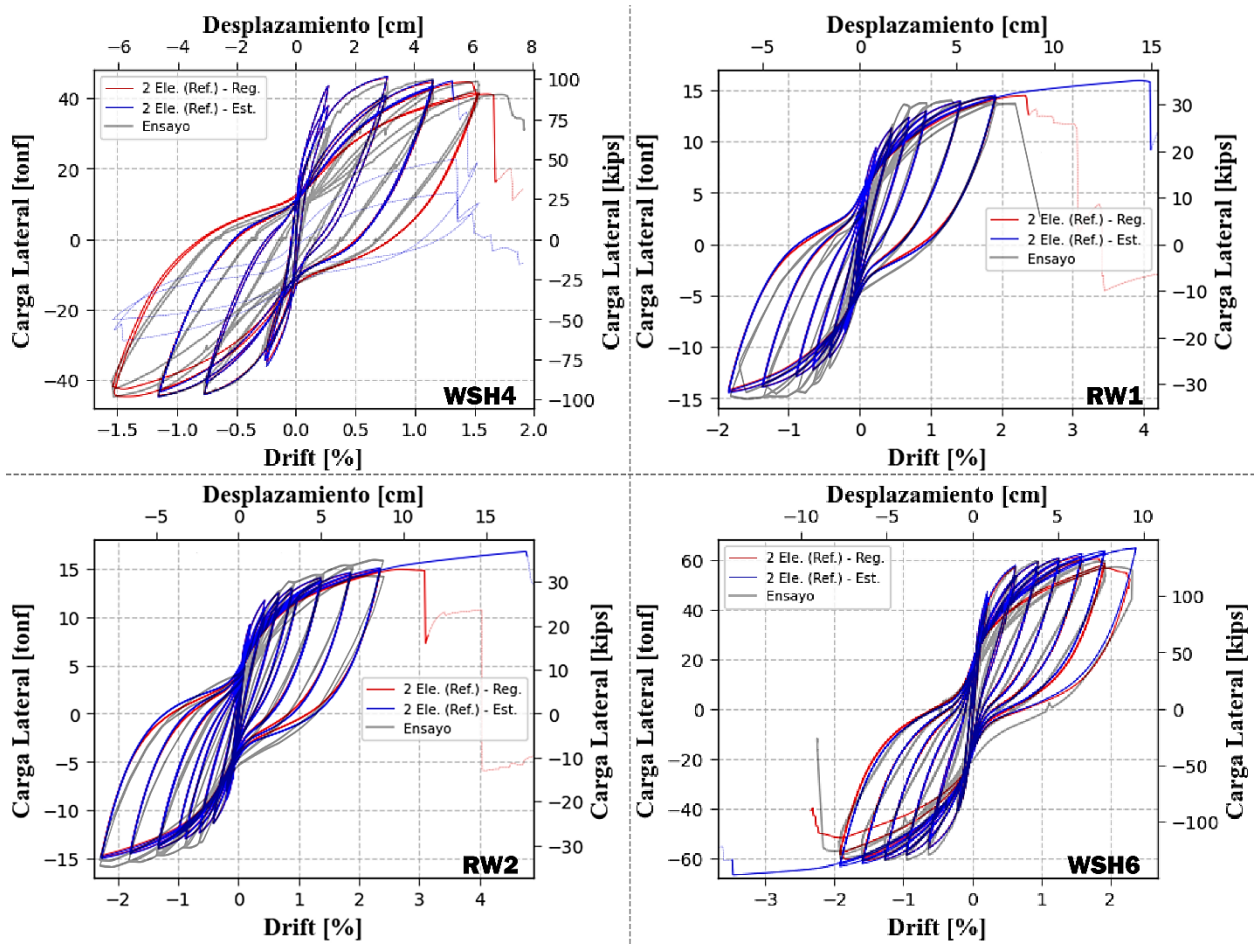


Figura 16: Carga lateral vs Deriva de piso.

La Tabla 6 resume los resultados de las simulaciones con mallado de referencia, contrastados con los datos experimentales. Se analizan tres parámetros clave: (1) la capacidad de carga lateral máxima ($V_{\max}$); (2) la deriva de piso en que se produce la primera pérdida de resistencia por el daño (Δ_1), definida como una disminución de 0.1 tonf o más en la carga lateral, al aumentar el desplazamiento lateral inducido; y (3) la deriva de piso asociada a la capacidad última (Δ_u), entendida como el desplazamiento en que la capacidad de carga lateral del muro se reduce al 80% de su valor máximo.

Tabla 6: Razón de las cantidades de respuesta simuladas respecto a las medidas.
Mallado con dos elementos por piso (M. Referencia).

ID Muro	Comportamiento Estándar			Comportamiento Regularizado		
	$\frac{V_{\max \text{ sim}}}{V_{\max}}$	$\frac{\Delta_1 \text{ sim}}{\Delta_1}$	$\frac{\Delta_u \text{ sim}}{\Delta_u}$	$\frac{V_{\max \text{ sim}}}{V_{\max}}$	$\frac{\Delta_1 \text{ sim}}{\Delta_1}$	$\frac{\Delta_u \text{ sim}}{\Delta_u}$
WSH4	1.02	0.74	0.76	1.01	0.93	0.92
RW1	1.07	1.87	1.82	0.97	1.08	1.22
RW2	1.03	N/A	N/A	0.92	N/A	N/A
WSH6	1.10	-1.53	1.75	1.00	0.99	1.03
Promedio	1.05	0.36	1.44	0.98	1.00	1.05

La Figura 16 y la Tabla 6 demuestran que, con un mallado de referencia (dos elementos por piso), la regularización aproxima con mayor precisión los resultados experimentales. Mientras que la Figura 17 y Figura 18, muestran las relaciones de los parámetros clave ($V_{\max}$, Δ_1 y Δ_u) frente a los datos experimentales para los demás niveles de mallado.

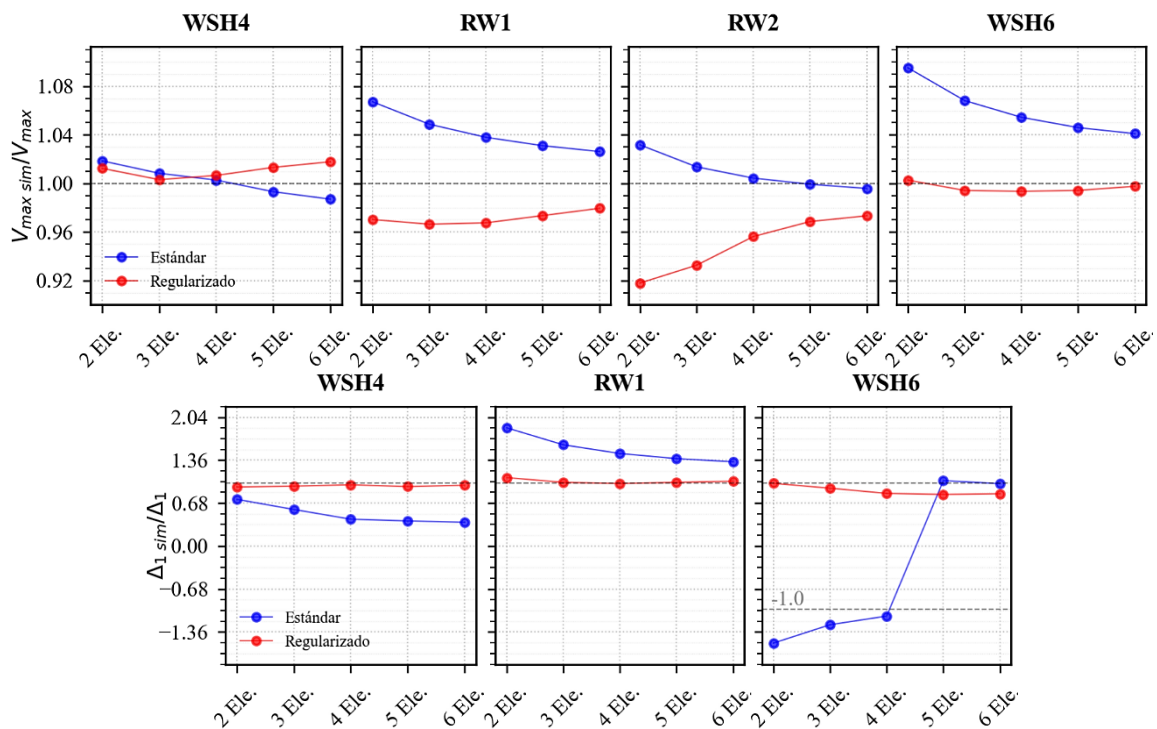


Figura 17: Razón de las cantidades de respuesta simuladas respecto a las medidas (1/2).

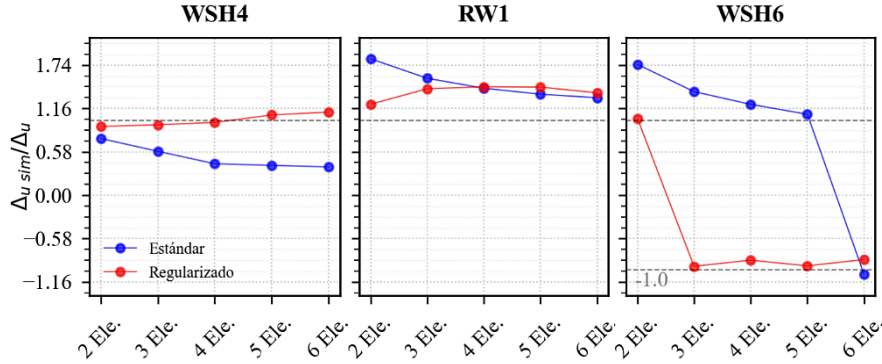


Figura 18: Razón de las cantidades de respuesta simuladas respecto a las medidas (2/2).

Las gráficas revelan que: (1) la capacidad máxima de carga lateral (V_{max}) obtenida mediante regularización es ligeramente inferior a los valores experimentales, mientras que el método estándar la sobreestima; (2) la deriva de piso correspondiente a la primera pérdida de resistencia por daño (Δ_1) coincide con precisión gracias a la regularización y apenas varía con el grado de discretización; y (3) la deriva asociada a la capacidad última (Δ_u) se reproduce fielmente empleando la regularización y un mallado de referencia (dos elementos por piso), dado que las expresiones se calibraron para ese nivel de discretización.

En el muro WSH6, las razones asociadas a Δ_1 y Δ_u adquieren valores negativos próximos a -1.0 para mallados de alta densidad. Esto ocurre porque, en el penúltimo ciclo, el muro está al borde del colapso y comienza la degradación de su resistencia, pero el protocolo experimental ordena iniciar la descarga justo tras alcanzar esa deformación. Al aumentar el número de elementos, las simulaciones concentran aún más las deformaciones en ese punto crítico, lo que se refleja en las gráficas al mostrar este caso límite.

En conjunto, estos hallazgos indican que las formulaciones propuestas para la regularización del hormigón no confinado, confinado y del acero en compresión reestablecen la objetividad de la respuesta global, lo que concuerda con las observaciones de Lowes, Pugh y Pozo [13,17,18]. De la información presentada en la Tabla 6 y en la Figura 16 se extraen las siguientes conclusiones:

(1) Al aplicar las recomendaciones de la literatura para el modelado no lineal de muros controlados a la flexión, se obtiene una simulación precisa tanto de la resistencia como de la capacidad de desplazamiento.

(2) Los resultados de este estudio muestran una notable concordancia con los reportados por Lowes [18]. Las diferencias se atribuyen a: (i) que la modelación se realiza en OpenSees utilizando el elemento MVLEM-3D; (ii) a la incorporación de las expresiones de Pugh [17] para regularizar el comportamiento del acero; y (iii) al uso del modelo de Belarbi y Hsu [32] para describir la respuesta en tracción del hormigón y el acero.

(3) A diferencia de estudios que emplean el modelo uniaxial Concrete02, regularizado según Pugh [17], esta investigación utiliza ConcreteCM, cuya calibración se realiza mediante un proceso iterativo en una interfaz gráfica. Concrete02 fija ϵ_o automáticamente como $2f'_c/E_c$, lo que obliga a sacrificar la fidelidad del módulo elástico o de la deformación unitaria máxima; en cambio, ConcreteCM permite ajustar de forma independiente E_c y ϵ_o , conservando la precisión en ambos.

Respecto a las discrepancias con los resultados experimentales, los modelos asumen rigidez infinita en corte y, por ello, sobreestiman la rigidez global en comparación con los resultados experimentales; esta sobreestimación se atenúa parcialmente al omitir el recubrimiento en los elementos de borde, cuya ausencia reduce la rigidez de la sección.

3.1.3.2. Respuesta Local

La Figura 19 presenta la respuesta local de modelos regularizados para las diferentes probetas de muro, mostrando el perfil de curvaturas en la altura asociado a la deriva de piso máxima de cada ciclo. En general, se observa que, a pesar de que la respuesta global queda menos sensible al mallado, a nivel local sigue existiendo una sensibilidad importante, lo cual concuerda con lo reportado por otros autores [13,14,18]. La sección ‘2.1.4 Objetividad a Nivel Local’ detalla este fenómeno y resalta la necesidad de un algoritmo de posprocesamiento para obtener una estimación objetiva de la respuesta local.

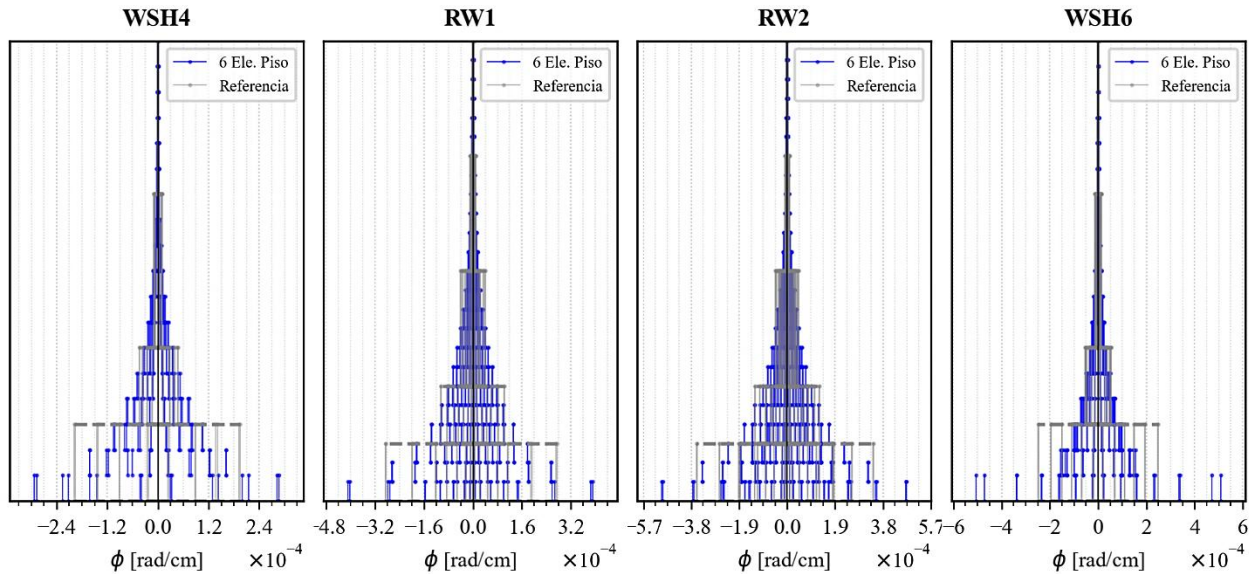


Figura 19: Envolvente de curvatura para máximos de deriva de piso en cada ciclo.

La Tabla 7 resume los valores de curvatura medidos a nivel de base para la deriva de piso máxima de cada ciclo para el muro RW1.

Tabla 7: Valores de curvatura a nivel de base para máximos de deriva de piso en cada ciclo.

Muro RW1		Ciclo Inicial						Ciclo Repetido					
Número de Ciclo	Drift	Dirección (+)			Dirección (-)			Dirección (+)			Dirección (-)		
		ϕ_{Ref}	$\phi_{6 \text{ Ele. Piso}}$	Error [%]	ϕ_{Ref}	$\phi_{6 \text{ Ele. Piso}}$	Error [%]	ϕ_{Ref}	$\phi_{6 \text{ Ele. Piso}}$	Error [%]	ϕ_{Ref}	$\phi_{6 \text{ Ele. Piso}}$	Error [%]
1 y 2	0.10	-8.48E-06	-9.34E-06	10.1	5.85E-06	6.29E-06	7.6	-8.47E-06	-9.32E-06	10.0	6.00E-06	6.35E-06	5.8
3 y 4	0.25	-2.34E-05	-2.70E-05	15.5	2.14E-05	2.47E-05	15.4	-2.41E-05	-2.82E-05	16.8	2.14E-05	2.47E-05	15.6
5 y 6	0.50	-5.21E-05	-6.32E-05	21.3	4.79E-05	5.71E-05	19.2	-5.29E-05	-6.40E-05	21.1	4.85E-05	5.79E-05	19.4
7 y 8	0.75	-8.63E-05	-1.08E-04	25.2	8.01E-05	1.00E-04	25.5	-8.63E-05	-1.07E-04	23.6	8.00E-05	9.90E-05	23.7
9 y 10	1.00	-1.22E-04	-1.58E-04	29.5	1.14E-04	1.48E-04	29.0	-1.21E-04	-1.55E-04	28.4	1.13E-04	1.44E-04	27.3
11 y 12	1.50	-2.00E-04	-2.78E-04	39.0	1.92E-04	2.66E-04	38.4	-1.98E-04	-2.72E-04	37.3	1.89E-04	2.59E-04	36.7
13 y 14	2.00	-2.87E-04	-4.10E-04	43.0	2.75E-04	3.92E-04	42.6	-2.84E-04	-4.03E-04	41.7	2.72E-04	3.84E-04	41.3
Promedio				26.2			25.4			25.6			24.3

El detalle de los valores correspondientes a otros muros se encuentra en el ‘Apéndice L: Curvatura a Nivel de Base de Probetas’. Los resultados evidencian que la discrepancia en la curvatura de las modelaciones aumenta conforme se intensifica el nivel de no linealidad inducida.

3.2. Caso de Estudio 2: Eje de Muro Sometido a Registro Sísmico

Se define la geometría y el diseño del refuerzo en un eje de muro de un edificio habitacional prototipo, representativo de la realidad nacional. Se calibran los parámetros del material de los modelos no lineales acorde a dos enfoques: uno mediante un procedimiento estándar y otro aplicando técnicas de regularización. Posteriormente, se analiza el impacto de la regularización sobre la objetividad de la modelación al someter el eje a un registro sísmico.

3.2.1. Descripción de la Edificación

El edificio habitacional prototipo se estructura en base a los siguientes criterios: (1) Se clasifica como un edificio de rigidez común ($40 < H_o/T_n < 70$), conforme a la clasificación propuesta por Guendelman et al. [42]. (2) Su altura garantiza que el comportamiento del muro esté dominado por la flexión ($M/Vd > 2$). (3) Las dimensiones de los muros en planta se encuentran dentro de los rangos observados por Navarro (2023): espesor de $24.4 \text{ cm} \pm 8 \text{ cm}$ y densidad de muro entre 1% y 8% de la superficie en planta. (4) Se cumple la deriva máxima de piso establecida en la NCh433 ($\Delta \leq 0.002 [-]$). (5) Se adoptan parámetros mecánicos tradicionales de la práctica nacional, se utiliza hormigón de calidad G25 y acero de refuerzo A630-420H.

Tabla 8: Propiedades geométricas y dinámicas del edificio habitacional.

Propiedad	Valor	Propiedad	Valor
Número de pisos	14	Tipo de suelo	D
Altura entre pisos	2.6 [m]	Zona sísmica	3
Largo de planta	55.8 [m]	Período (Dir. Y)	0.586 [s]
Ancho de planta	13.2 [m]	Peso de estructura	13112 [tonf]
Espesor de losa	15 [cm]	Corte basal (Dir. Y)	1652 [tonf]
Ancho colaborante	3.6 [m]	H_o/T_n	67.9

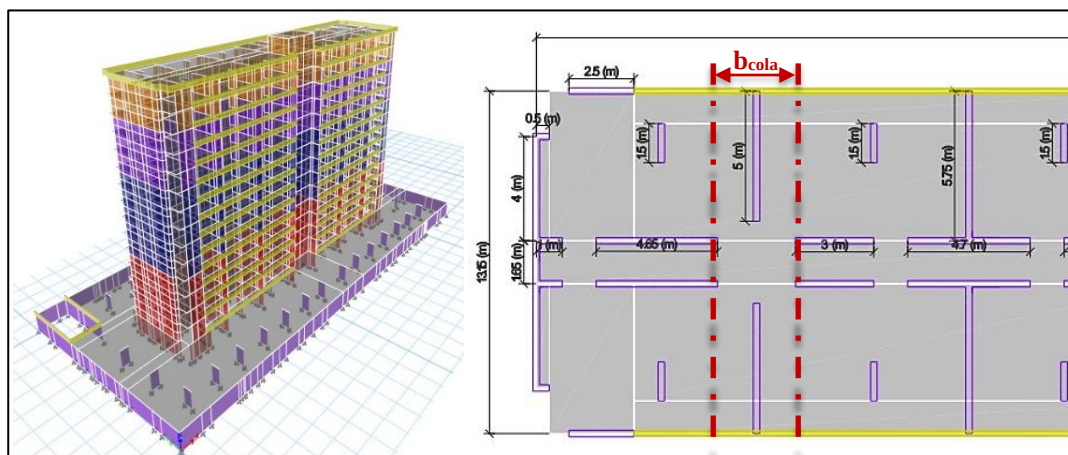


Figura 20: Edificio habitacional prototipo y eje de muro en estudio.

El detalle de la geometría de la edificación se presenta en el Apéndice M: ‘Edificio Habitacional Prototipo’. Se consideran cargas gravitacionales de 200, 500 y 300 kgf/m² para departamentos, pasillos y balcones, respectivamente, junto con una carga adicional de 100 kgf/m² por peso propio.

3.2.1.1. Diseño de Eje de Muro

Mediante un proceso iterativo se determina una configuración de acero refuerzo que satisface los criterios de resistencia y desplazamiento del muro. La Figura 21 ilustra el detalle del refuerzo en la sección transversal del muro de 30 cm, empleado en los niveles CPS01 a CP04.

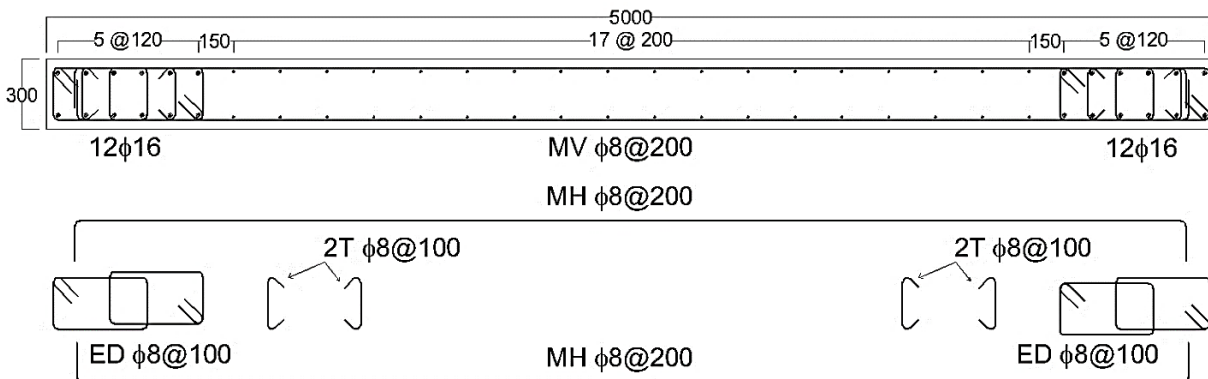


Figura 21: Sección transversal del muro de 30 cm (niveles CPS01-CP04).

La Figura 22 muestra el diagrama de interacción y momento-curvatura de un muro de 30 cm, ubicado a nivel de base. Se verifica la resistencia a flexo axial según lo estipulado en ‘2.2.1.1 Diseño a Flexo Axial’, obteniendo las solicitaciones mediante las combinaciones de carga definidas en la NCh3171. El diagrama momento-curvatura, que incluye curvas para cargas axiales de 0, 160, 320, 480 y 640 [tonf], evidencia que el muro en general se vuelve más frágil al aumentar la carga.

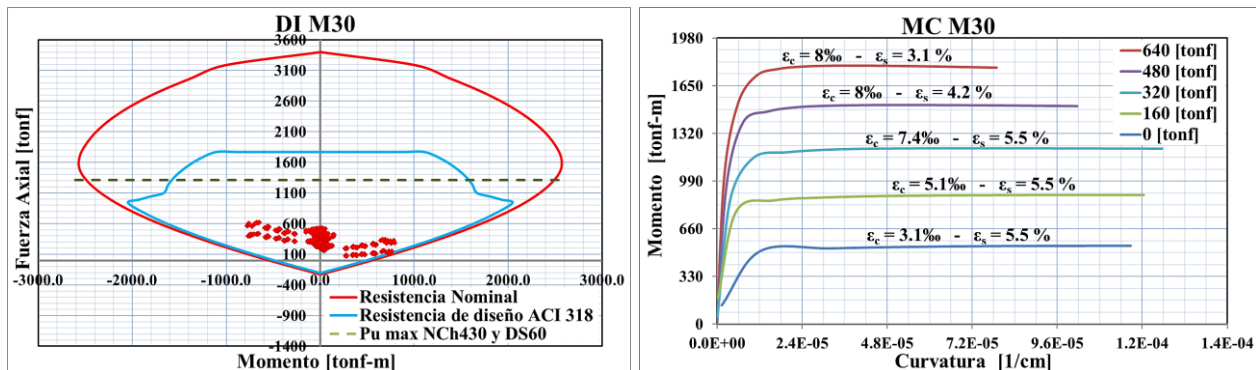


Figura 22: Diagramas de interacción y momento-curvatura del muro de 30 cm de espesor.

El Apéndice N: Diseño a Flexo Axial de Muros presenta el detallamiento de las secciones en la altura y sus resultados. Tras verificar el criterio de resistencia, se evalúa la demanda de desplazamiento del muro conforme al apartado 5.9.5 de la NCh433 de 1996 mod. 2012, comprobándose su cumplimiento.

$$\delta_u = 1.3S_{de}(T_{ag}) = 24.1 \text{ [cm]} < \delta_{u.muro} = \frac{1}{3}\phi_e h^2 + (\phi_u - \phi_y)\left(h - \frac{\ell_p}{2}\right)\ell_p = 54.0 \text{ [cm]}$$

3.2.2. Calibración de Modelos

Se desarrollan cuatro modelos no lineales para el eje de muro. La mitad se calibra con el método estándar para definir los parámetros del material, mientras que la otra se ajusta mediante técnicas de regularización. La Figura 23 presenta el mallado vertical empleado, que incluye el mallado de referencia, la variante de 4 elementos por piso y la discretización de la sección mediante fibras.

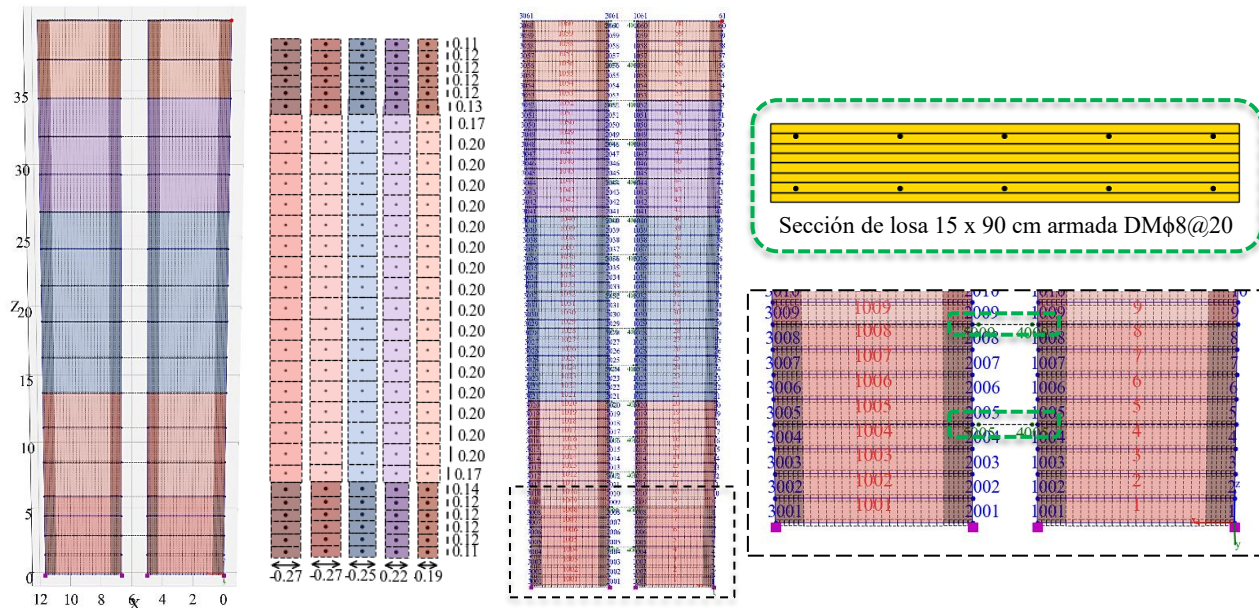


Figura 23: Mallado vertical empleado para evaluar la objetividad del eje de muro.

El eje de muro consta de dos muros rectangulares esbeltos acoplados mediante la losa del sistema de piso de la edificación. Para fines de modelación, el acople se representa mediante un elemento ‘dispBeamColumn’ de OpenSees, con dimensiones de 15 cm x 90 cm. La Figura 23 exhibe la disposición del elemento de acople en la altura, su sección transversal y el refuerzo de acero.

3.2.2.1. Calibración del Hormigón

La relación σ - ϵ del hormigón, definida mediante el modelo Concrete07, se desarrolla según lo descrito en la sección ‘2.1.3.2 Modelación del Hormigón’. Las ramas ascendente, ablandamiento y tracción se calibran de forma similar a lo establecido en la sección ‘3.1.2.1 Calibración del Hormigón’ del Caso de Estudio 1. La Tabla 9 muestra los parámetros del modelo constitutivo del hormigón para las secciones de muro de 30 cm de espesor correspondientes a los pisos CPS01 y CP01, tanto para el mallado de referencia como para la configuración de 4 elementos por piso. Notar que los niveles CPS01 y CP01 tienen una altura de piso diferente. ($h_{base} = 300\text{ cm}$)

Por otra parte, la Figura 24 muestra las curvas constitutivas del hormigón no confinado y confinado correspondientes a los diferentes niveles de mallado. El Apéndice O: ‘Parámetros de Modelación de Eje de Muro’, detalla los parámetros de los materiales para las secciones restantes.

Tabla 9: Parámetros de modelación de sección M30A – Comportamiento del hormigón.

Hormigón No Confinado – Concrete07				Hormigón Confinado – Concrete07			
Método:	Estándar	Regularizado		Método:	Estándar	Regularizado	
Mallado:	Todos	Ref.	4 Ele.	Mallado:	Todos	Ref.	4 Ele.
f'_c [MPa]	20.84	20.84	20.84	f'_{cc} [MPa]	27.11	27.11	27.11
ε_c	0.002	0.002	0.002	ε_{cc}	0.00501	0.00501	0.00501
E_c [MPa]	23413.6	23413.6	23413.6	E_{cc} [MPa]	27371.2	27371.2	27371.2
f_t [MPa]	1.55	1.55	1.55	f_t [MPa]	1.55	1.55	1.55
ε_t	0.00008	0.00008	0.00008	ε_t	0.00008	0.00008	0.00008
x_{cr}^+	1.007	1.007	1.007	x_{cr}^+	1.0035	1.0035	1.0035
x_{cr}^-	1.085	1.056	1.028	x_{cr}^-	1.085	1.077	1.048
r	4.5	25.563	25.563	r_t	4	31.969	31.969

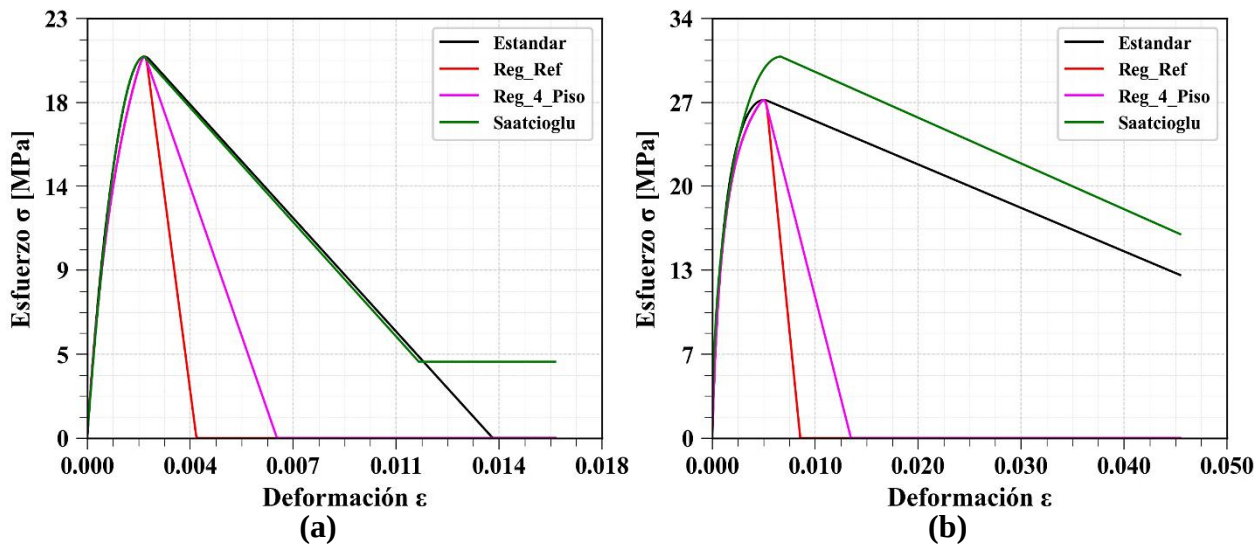


Figura 24: Modelo constitutivo del hormigón no confinado (a) y confinado (b) - Sección M30.

3.2.2.2. Calibración del Acero

La relación σ - ε del refuerzo de acero, definida mediante el modelo SteelMPF, se desarrolla según lo descrito en la sección ‘2.1.3.3 Modelación del Acero’. El comportamiento en compresión, tracción y cíclico se calibran de forma similar a lo establecido en la sección ‘3.1.2.2

Calibración del Acero’ del Caso de Estudio 1. La Tabla 10 muestra los parámetros del modelo constitutivo del acero para las secciones de muro de 30 cm de espesor correspondientes a los pisos CPS01 y CP01, tanto para el mallado de referencia como para la configuración de 4 elementos por piso.

Por otra parte, la Figura 25 muestra las curvas constitutivas del acero del alma y del elemento de borde correspondientes a los diferentes niveles de mallado. El Apéndice O: ‘Parámetros de Modelación de Eje de Muro’, detalla los parámetros empleados en la definición de materiales para las restantes secciones en la altura.

Tabla 10: Parámetros de modelación de sección M30A – Comportamiento del acero.

Acero de Alma - SteelMPF				Acero de Elemento de Borde - SteelMPF			
Método:	Estándar	Regularizado		Método:	Estándar	Regularizado	
Mallado:	Todos	Ref.	4 Ele.	Mallado:	Todos	Ref.	4 Ele.
f_{yp} [MPa]	270.64	270.64	270.64	f_{yp} [MPa]	369.16	369.16	369.16
f_{yn} [MPa]	411.88	411.88	411.88	f_{yn} [MPa]	411.88	411.88	411.88
E_0 [MPa]	200000	200000	200000	E_0 [MPa]	200000	200000	200000
b_p	0.02858	0.02858	0.02858	b_p	0.01279	0.01279	0.01279
b_n	0.0132	0.09901	0.04951	b_n	0.0132	0.09901	0.04951
R_0	20	20	20	R_0	20	20	20
c_{R1}	0.925	0.925	0.925	c_{R1}	0.925	0.925	0.925
c_{R2}	0.0015	0.0015	0.0015	c_{R2}	0.0015	0.0015	0.0015

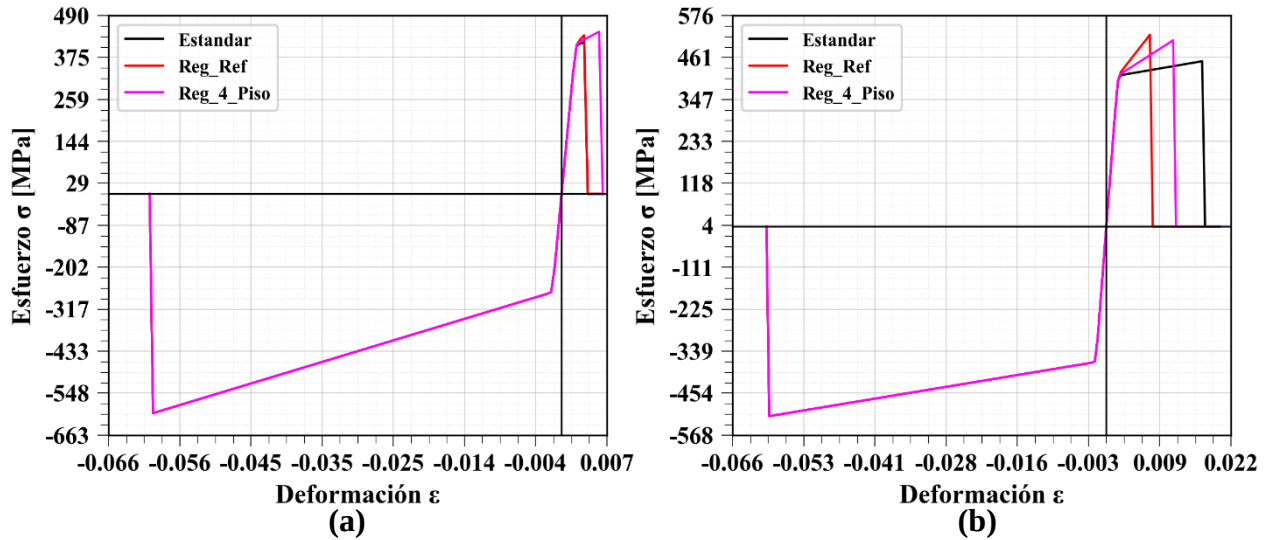


Figura 25: Modelo constitutivo del acero de alma (a) y elemento de borde (b)– Sección M30.

3.2.2.3. Modelo de Amortiguamiento

Para determinar la razón de amortiguamiento crítico del primer modo se siguieron las directrices de Cruz y Miranda [43]. Sus hallazgos indican que dicho valor decrece con la altura del edificio, siendo el factor predominante en su estimación cuando la interacción suelo-estructura se omite en el modelo. En este contexto, la ec. (33) relaciona la razón de amortiguamiento crítico con la altura, mientras que la ec. (34) define el amortiguamiento modal en función de la frecuencia de los modos superiores, asignándole un valor de $\gamma = 0.12$.

$$\xi = 0.21 \cdot H^{-0.47} \quad \text{ec. (33)} \quad \xi(f_n) = \xi_1 \left(1 + \gamma \left(\frac{f_n}{f_1} - 1 \right) \right) \quad \text{ec. (34)}$$

La ec. (34) se reformula en la expresión presentada en la ec. (35) la cual cuenta con un término constante y otro proporcional a la frecuencia. Para implementar el amortiguamiento en OpenSees se utilizan los comandos *modalDamping* y *rayleigh*. En este contexto, el comando *rayleigh* se usa

para asignar únicamente el amortiguamiento proporcional a la rigidez (ec. (36)) debido a su relación lineal con la frecuencia, mientras que *modalDamping* incorpora el valor constante (ec. (37)).

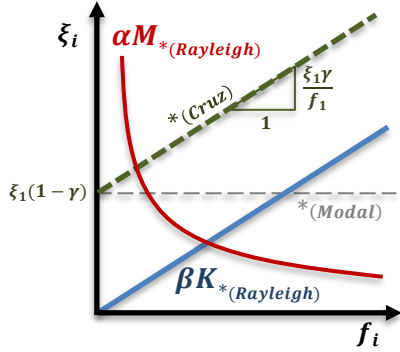


Figura 26: Modelo de amortiguamiento.

$$\xi(f_i) = \xi_1(1 - \gamma) + \frac{\xi_1\gamma}{f_1} f_i \quad \text{ec. (35)}$$

$$\begin{aligned} \text{Rayleigh: } \xi_i &= \frac{\alpha}{2\omega_i} + \frac{\beta\omega_i^2}{2\omega_i} \quad | \quad \alpha = 0 \\ \Rightarrow \xi_i^k &= \frac{\beta\omega_i}{2} = \beta\pi f_i \quad | \quad \text{Cruz: } \xi_i^k = \frac{\xi_1\gamma}{f_1} f_i \\ \Rightarrow \beta_{*Rayleigh} &= \frac{\xi_1\gamma}{\pi f_1} \quad \text{ec. (36)} \end{aligned}$$

$$\text{Modal: } \xi^{modal} = \xi_1(1 - \gamma) \quad \text{ec. (37)}$$

3.2.2.4. Descripción del Registro Sísmico

Se utiliza el registro sísmico del sismo de magnitud 8.4 ocurrido el 16 de septiembre de 2015 en Coquimbo, obtenido en la estación C230 (dirección HNE; ver en Apéndice P: ‘Registro Sísmico’ la ubicación respecto al epicentro). Se evalúa el comportamiento de los modelos desarrollados, sometiéndolos a este registro sísmico escalado.

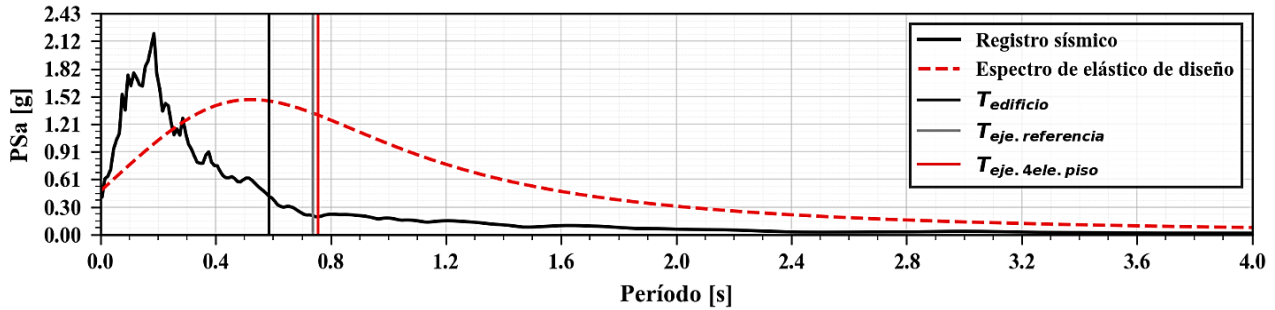


Figura 27: Espectro de respuesta de registro sísmico y espectro elástico de diseño (DS61).

El registro se escala con dos objetivos. En primer lugar, se incrementa su intensidad hasta inducir un nivel de no linealidad en las fibras extremas del hormigón que permita evaluar el efecto de la regularización sobre la respuesta previo al colapso. En segundo lugar, se determina el escalado crítico requerido para inducir el colapso de cada modelo. Para este análisis, se define el colapso como el instante en que la fibra interna del elemento de borde alcanza un esfuerzo residual o cuando se produce la fractura de la fibra extrema traccionada del acero de refuerzo longitudinal.

3.2.3. Resultados y Discusión

Se presentan los resultados de las modelaciones del eje de muro del edificio prototipo. La respuesta global se evalúa mediante un análisis pushover y un registro sísmico escalado. Además, se discute la problemática de la localización de las deformaciones ante dichas solicitaciones.

3.2.3.1. Análisis Pushover

Se estudia el comportamiento preliminar del eje de muro mediante un análisis pushover, aplicando un desplazamiento incremental en el tope para determinar la carga lateral requerida para cada nivel de desplazamiento. Se consideran dos configuraciones de mallado (de dos elementos (referencia) y de cuatro elementos por piso) y dos métodos de calibración del material (estándar y basado en técnicas de regularización). Los resultados presentados en la Figura 28 distinguen dos puntos críticos: el punto (A), que marca la primera pérdida de resistencia por el aplastamiento de la fibra extrema comprimida del hormigón, y el punto (B), donde se registra una pérdida significativa de resistencia por la ruptura de la fibra extrema del acero traccionado.

En el modelo calibrado con el método estándar, ambos puntos revelan una marcada sensibilidad al mallado, lo que concuerda con lo observado en el Caso de Estudio 1. En contraste, las curvas obtenidas mediante técnicas de regularización evidencian una respuesta objetiva, independiente del mallado empleado. En términos de rigidez, el modelo estándar exhibe un comportamiento más rígido al inicio de la pérdida de resistencia que el modelo regularizado. Se destaca también la alta ductilidad del muro, atribuida a la extensión del elemento de borde confinado, reflejada en una pendiente casi horizontal tras el inicio de la pérdida de resistencia.

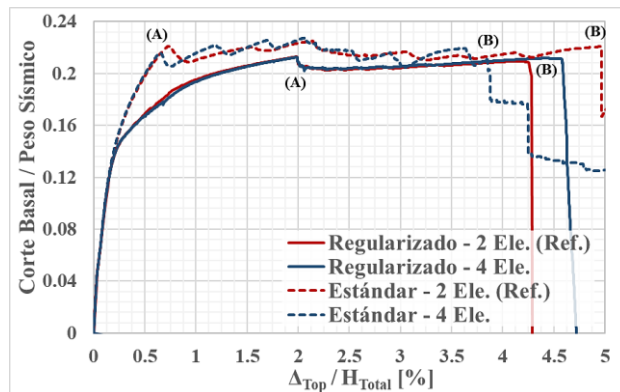


Figura 28: Análisis pushover de eje de muro.

Tabla 11: Resultados de análisis pushover.

Punto	Material	Mallado	V_B/W_s	Δ_T/H_T
(A)	Estándar	2 Ele. (Ref.)	0.221	0.73%
(A)	Estándar	4 Ele.	0.216	0.66%
(A)	Regularizado	2 Ele. (Ref.)	0.214	2.00%
(A)	Regularizado	4 Ele.	0.213	2.00%
(B)	Estándar	2 Ele. (Ref.)	0.221	4.97%
(B)	Estándar	4 Ele.	0.213	3.85%
(B)	Regularizado	2 Ele (Ref.)	0.209	4.26%
(B)	Regularizado	4 Ele.	0.21	4.58%

3.2.3.2. Análisis Sísmico

Se determina la fuente de masa del eje a partir del modelo del edificio desarrollado en ETABS. Se define un caso de carga para el peso sísmico ($L + 0.25D$) con el fin de identificar la carga gravitacional asumida por el eje de muro. Al comparar las propiedades dinámicas del eje con las del edificio, se observan discrepancias en los períodos fundamentales del primer modo de vibrar, siendo $T_{edificio} = 0.586$ s, $T_{mallado\ referencia} = 0.737$ s y $T_{mallado\ 4ele.piso} = 0.756$ s. Esta diferencia se atribuye a la influencia en la rigidez lateral de otras geometrías de muro en la planta sobre el comportamiento dinámico del edificio.

3.2.3.2.1. Respuesta Previa al Colapso

Los modelos se someten a un registro sísmico escalado hasta inducir un nivel de no linealidad en las fibras extremas del hormigón, que permita evaluar el efecto de la regularización sobre la respuesta previa al colapso. La Figura 29 presenta la envolvente de la respuesta en la altura, asociada a los distintos mallados y métodos de calibración, mientras que la Tabla 12 resume los valores medidos en la base y en el tope del muro. El Apéndice Q: ‘Resultados Eje de Muro’, desagrega los resultados presentados en la Figura 29 según el método de calibración, distinguiendo entre el método estándar y las técnicas de regularización.

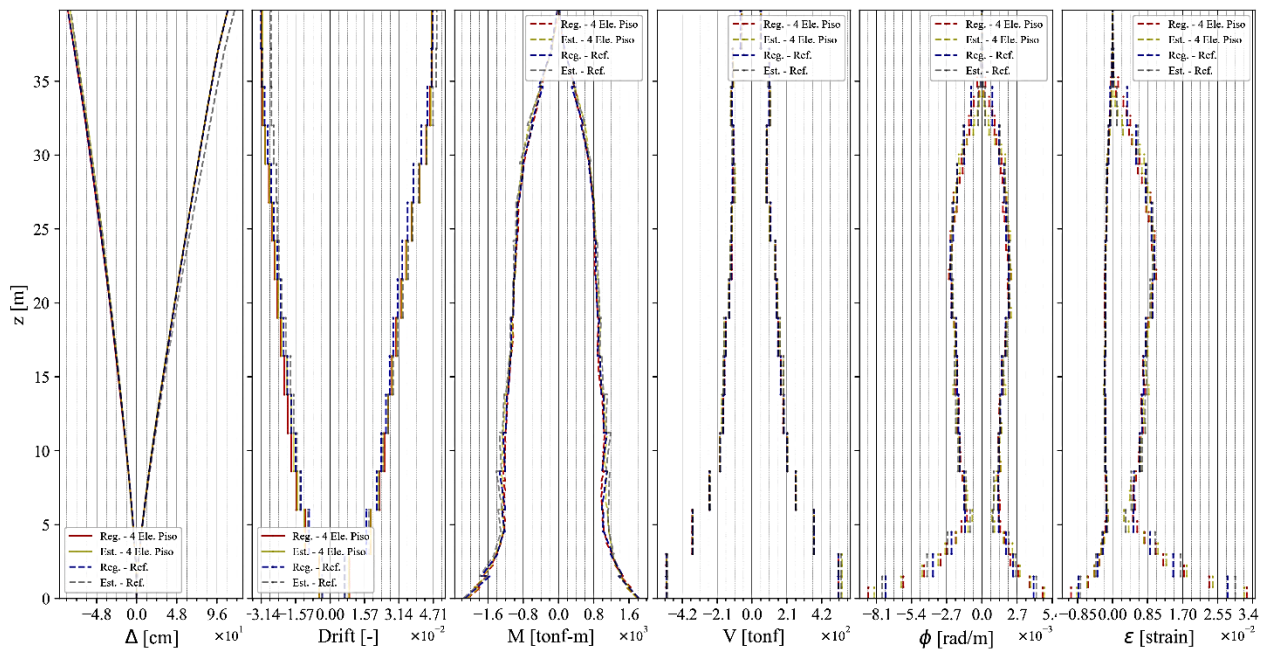


Figura 29: Resultados de eje de muro sometido a registro escalado a NCh433.

Tabla 12: Resultados de eje de muro sometido a registro sísmico en zonas críticas.

Respuesta	Sim.	Loc.	Env.	Comp. Estándar			Comp. Regularizado		
				Ref.	4 ele.	Error [%]	Ref.	4 ele.	Error [%]
Desplazamiento [cm]	Δ	Sup.	Max.	117.40	109.10	7.07	109.25	109.22	0.03
			Min.	-78.61	-79.61	-1.28	-82.16	-82.19	-0.04
Deriva de piso [%]	δ	Sup.	Max.	4.86	4.62	4.86	4.69	4.65	0.76
			Min.	-2.70	-3.16	-17.23	-3.16	-3.14	0.69
Momento [tonf-m]	M	Inf.	Max.	1824.02	1791.77	1.77	1829.41	1812.21	0.94
			Min.	-2160.26	-2078.75	3.77	-2130.27	-2069.95	2.83
Corte basal [tonf]	V	Inf.	Max.	534.66	540.47	-1.09	519.32	522.3	-0.57
			Min.	-512.01	-514.63	-0.51	-517.97	-516.53	0.28
Curvatura [rad/m] · 10 ⁻³	ϕ	Inf.	Max.	4.17	4.76	-14.11	3.96	4.68	-18.24
			Min.	-7.65	-8.27	-8.12	-7.4	-8.71	-17.8
Def. fibra extrema [%]	ε	Inf.	Max.	29.75	31.89	-7.2	27.9	32.53	-16.6
			Min.	-7.75	-8.66	-11.72	-8.3	-10.14	-22.09

La respuesta en altura mostrada en la Figura 29 evidencia una alta similitud en la envolvente precolapso, independientemente del método de calibración o del mallado empleado. Este hallazgo concuerda con lo observado en el Caso de Estudio I, donde la respuesta cíclica ante deformaciones moderadas fue prácticamente idéntica en modelos regularizados y no regularizados. La regularización afecta únicamente la respuesta posterior al máximo de resistencia, cuando el material se ablanda. Para el nivel de no linealidad precolapso aplicado, este efecto se concentra en las fibras más extremas, mientras que en el resto de la sección resulta mucho menor o inexistente.

Los datos de la Tabla 12 muestran las respuestas en las zonas críticas, donde se acentúan las discrepancias entre mallados y métodos de calibración. En los parámetros de respuesta global (desplazamiento, deriva de piso, momento y corte), los modelos regularizados muestran una sensibilidad mínima al mallado, con diferencias cercanas al 1%, mientras que la calibración estándar revela discrepancias de hasta un 17%. Esto demuestra la importancia de la regularización para lograr una modelación objetiva. Por otro lado, la respuesta local (curvatura y deformación en la fibra extrema) presenta diferencias de hasta un 22% entre niveles de mallado, lo que concuerda con el problema de localización de las deformaciones identificado en el Caso de Estudio I.

3.2.3.2.2. Respuesta Durante el Colapso

Los modelos se escalan hasta alcanzar una magnitud crítica que induce el colapso. Para este análisis, se define el colapso como el instante en que la fibra interna del elemento de borde alcanza un esfuerzo residual o se produce la fractura de la fibra extrema traccionada del acero de refuerzo longitudinal. La Tabla 13 presenta la ordenada espectral de pseudoaceleración asociada al sismo que induce el colapso para cada nivel de mallado y método de calibración.

Tabla 13: Ordenadas espectrales del espectro de pseudo aceleración al colapso.

Respuesta	Sim.	Unit.	Espectro Diseño Elá.	Comp. Estándar			Comp. Regularizado		
				Ref.	4 ele.	Error [%]	Ref.	4 ele.	Error [%]
Ordenada Espectral	PS _a	g	1.468	6.486	5.339	17.68	4.394	4.350	1.00

En relación con la objetividad de la modelación, se observa que, al emplear distintos niveles de mallado, la calibración mediante técnicas de regularización presenta un error del 1%, frente a un 17.7% del método estándar. Por otra parte, el método estándar muestra una mayor sobre resistencia, con un factor de escala respecto al valor de la NCh433 de 4.41 para el mallado de referencia, frente al factor de escala de 2.99 obtenidos mediante la regularización, lo que representa un incremento del 47.6%. (F.E. Estandar: 6.49 g / 1.47 g = 4.41; F.E. Regularizado: 4.39 g / 1.47 g = 4.41).

Respecto a la sobre resistencia observada, se debe considerar que el análisis seccional para el diseño del muro emplea un modelo de comportamiento del hormigón que no contempla el aumento en su resistencia ni incorpora el incremento del 8% en la deformación unitaria máxima aportado por el elemento de borde. El comportamiento del acero se modela como elastoplástico perfecto, mientras que el análisis no lineal integra el efecto del endurecimiento. Además, la aplicación de los factores de seguridad estipulados por el código hace razonable esperar cierto grado de sobre resistencia.

4. Parte II: Estudio de la Objetividad Local de la Modelación

Para reducir la sensibilidad del mallado en la respuesta local, se propone y evalúa un algoritmo de posprocesamiento que permita obtener una estimación objetiva de ésta. Para comprobar su eficacia, se analiza su desempeño en los dos casos de estudio presentados en el Capítulo 3.

4.1. Algoritmo de Posprocesamiento Propuesto

El algoritmo de posprocesamiento propuesto tiene como objetivo reproducir los efectos locales (curvatura y deformación unitaria) que se obtendrían con una modelación de mayor densidad de elementos. Para ello, se distinguen dos etapas: (1) el posprocesamiento del perfil de curvatura en altura y (2) la estimación del estado de esfuerzos y deformaciones en las fibras.

4.1.1. Posprocesamiento del Perfil de Curvatura

El algoritmo de posprocesamiento del perfil de curvatura en la altura se fundamenta en tres pilares: (1) el uso de la formulación del polinomio de Hermite para estimar un perfil suave de curvatura a lo largo del muro; (2) las observaciones sobre el centro de rotación del elemento MVLEM ($c = 0.4$) registradas por Vulcano [26]; y (3) la suposición de que el desplazamiento lateral en la altura del muro se debe principalmente a la flexión del elemento ($\partial\Delta = y\phi\partial y$), siendo el efecto del corte despreciable.

La Figura 30 resume el procedimiento del algoritmo de posprocesamiento del perfil de curvatura. Con fines ilustrativos, se muestra el perfil interpolado correspondiente a la probeta del muro RW1 del Caso de Estudio 1. El procedimiento se compone de las siguientes etapas: (1) se parte de los resultados del mallado de referencia (2 elementos); (2) se interpola un perfil de curvatura suave mediante el polinomio de Hermite; (3) se estima el perfil de curvatura que se obtendría con otra densidad de mallado en base a la interpolación; y (4) se contrasta el perfil interpolado con el obtenido mediante la modelación.

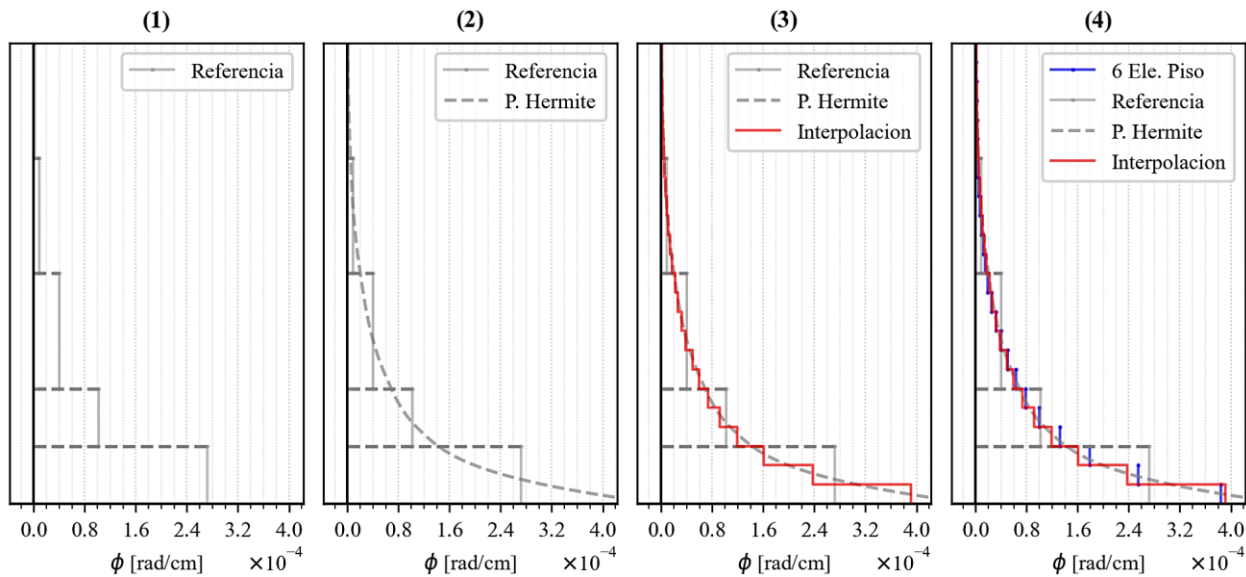


Figura 30: Resumen del algoritmo de posprocesamiento de curvatura (Muro RW1).

Para trazar un perfil de curvatura suave a lo largo de la altura, se define una serie de puntos de control a partir de los cuales se interpola la curva mediante el polinomio de Hermite. Cada punto se caracteriza por tres parámetros: h , ϕ , $\partial\phi/\partial h$. La determinación de estos parámetros se realiza siguiendo el procedimiento descrito en el diagrama de flujo de la Figura 31.

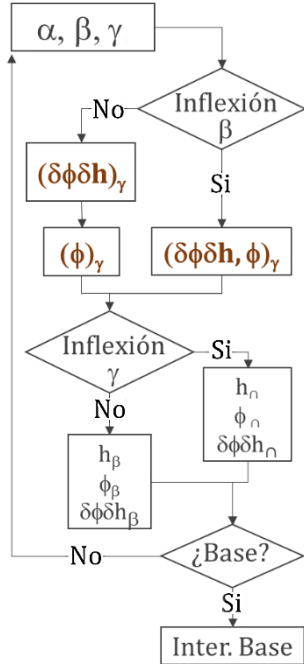


Figura 31: Algoritmo de posprocesamiento de curvatura.

El algoritmo comienza con la identificación de tres puntos clave: α , β y γ , definidos inicialmente como:

- α : En la iteración inicial, corresponde al punto ubicado en el tope del muro; mientras que, en iteraciones posteriores, se refiere al último punto donde se conoce el perfil suave de Hermite de la iteración anterior.
- β : Punto en el centro de rotación del elemento siguiente $(\phi_{MVLEM\ i+1}, 0.4 \cdot h_{i+1})$.
- γ : Punto en el centro de rotación del elemento subsiguiente $(\phi_{MVLEM\ i+2}, 0.4 \cdot h_{i+2})$.

Para el trazado de la curva mediante el polinomio de Hermite, cada uno de estos puntos se caracteriza por tres parámetros: h , ϕ , $\partial\phi/\partial h$. El procedimiento consiste en ajustar los parámetros del punto γ –estos son $(h_\gamma, \phi_\gamma, \partial\phi/\partial h_\gamma)$ – de manera que: (1) el desplazamiento en el tope del muro obtenido mediante la curva suave del polinomio de Hermite coincida con el desplazamiento medido con el mallado de referencia (ec. (38)); (2) La curva pase en las inmediaciones del punto β .

$$\delta_{top\ hermite} = \delta_{top\ MVLEM} \quad \text{ec. (38)}$$

En el Apéndice R: ‘Algoritmo de Posprocesamiento de Curvatura’, se detalla el procedimiento paso a paso para estimar el perfil de curvatura suave, complementado con un ejemplo gráfico. Una vez obtenido dicho perfil, se interpola el perfil suavizado utilizando el criterio expuesto en la ec. (38) para obtener la curvatura que se registraría en una modelación con mayor densidad de mallado, lo cual se ilustra en la tercera gráfica de la Figura 30.

4.1.2. Posprocesamiento del Estado de EEDD en las Fibras

El algoritmo de posprocesamiento del estado de esfuerzos y deformaciones en las fibras se fundamenta en tres pilares: (1) la cinemática, es decir, los grados de libertad que permite el elemento MVLEM; (2) la capacidad para interpolar la curvatura en la altura mediante el algoritmo descrito en el apartado ‘4.1.1 Posprocesamiento del Perfil de Curvatura’; y (3) el equilibrio de fuerzas en el muro.

La Figura 32 presenta el diagrama de flujo del procedimiento del algoritmo de posprocesamiento del estado de esfuerzos y deformaciones en las fibras. Con fines ilustrativos, se muestra la

determinación del estado de esfuerzos en un elemento de la probeta del muro RW1, correspondiente al Caso de Estudio 1. El procedimiento consta de las siguientes etapas: (1) se selecciona un elemento a lo largo de la altura del muro; (2) se descompone el estado de deformaciones del elemento en la superposición de la deformación axial promedio (representada en azul) y la deformación inducida por la curvatura de la sección (representada en rojo); (3) se calcula el estado de esfuerzos asociado a la curvatura utilizando el perfil interpolado; y (4) se itera la deformación axial promedio hasta alcanzar el equilibrio de fuerza axial en el elemento. Este procedimiento se repite a lo largo de la altura y en todos los instantes de la modelación.

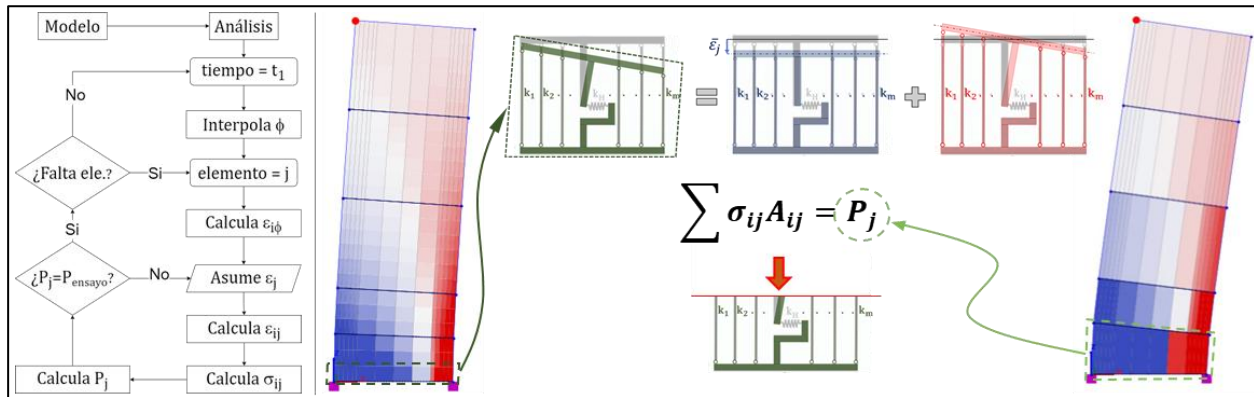


Figura 32: Resumen del algoritmo de posprocesamiento de EEDD en las fibras.

4.2. Resultados y Discusión

Se presentan los resultados de la aplicación de algoritmos de posprocesamiento sobre la respuesta local de los modelos. Se analiza el impacto de dichos algoritmos en las probetas de muro ensayadas en condiciones de deformación controlada y en el eje del muro sometido a registro sísmico. Finalmente, se discute y concluye acerca de su efectividad.

4.2.1. Caso de Estudio 1: Probetas de Muros Ensayadas a Deformación Controlada

La Figura 33 presenta la respuesta local de diversas probetas de muro, exhibiendo el perfil de curvaturas a lo largo de la altura, asociado a la deriva de piso máxima registrada en cada ciclo. En general, se observa que el procedimiento de posprocesamiento deriva de manera precisa la respuesta local que se obtendría empleando una mayor densidad de mallado durante la modelación. Este comportamiento se mantiene en todos los ciclos, independientemente del nivel de no linealidad en que se incurra.

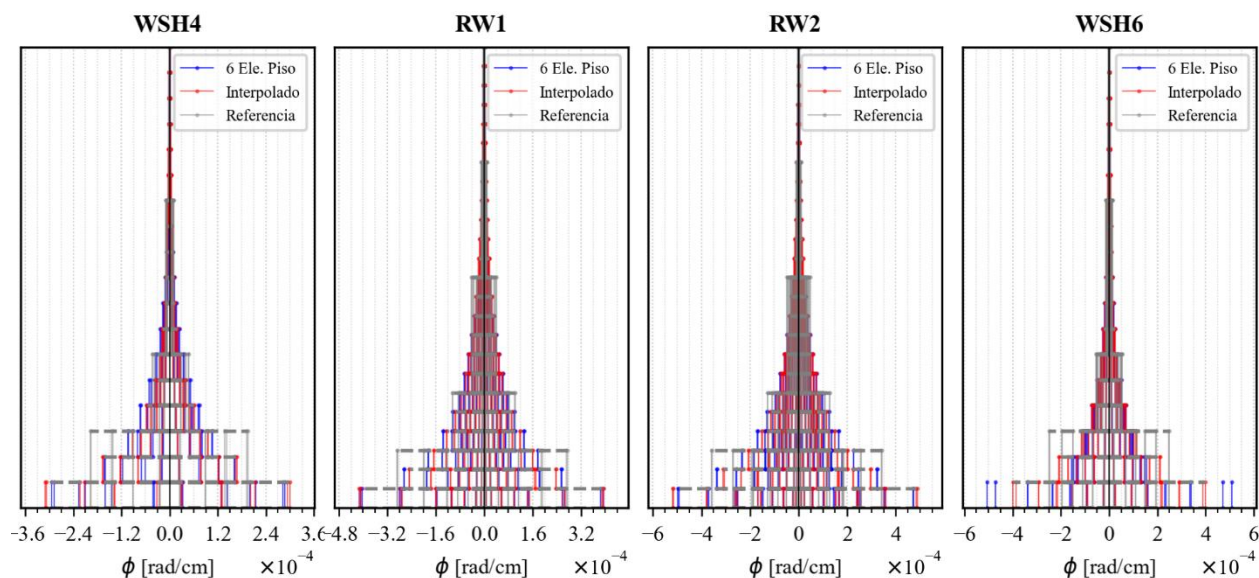


Figura 33: Envoltente de curvatura para máximos de deriva de piso en cada ciclo.

La Tabla 14 resume los valores de curvatura medidos a nivel de base para la deriva de piso máxima de cada ciclo. El detalle de los valores correspondientes a otros muros se encuentra en el ‘Apéndice S: Curvatura Interpolada a Nivel de Base de Probetas’. Los resultados evidencian que la discrepancia en la curvatura de las modelaciones se atenúa considerablemente empleando el algoritmo propuesto.

Tabla 14: Valores de curvatura a nivel de base para máximos de deriva de piso en cada ciclo. Muro RW1.

Muro RW1		Ciclo Inicial						Ciclo Repetido					
Número de Ciclo	Drift	Dirección (+)			Dirección (-)			Dirección (+)			Dirección (-)		
		$\phi_{Interp.}$	$\phi_{6 \text{ Ele. Piso}}$	Error [%]	$\phi_{Interp.}$	$\phi_{6 \text{ Ele. Piso}}$	Error [%]	$\phi_{Interp.}$	$\phi_{6 \text{ Ele. Piso}}$	Error [%]	$\phi_{Interp.}$	$\phi_{6 \text{ Ele. Piso}}$	Error [%]
1 y 2	0.10	-9.70E-06	-9.34E-06	-3.8	6.23E-06	6.29E-06	0.9	-9.47E-06	-9.32E-06	-1.6	6.73E-06	6.35E-06	-5.6
3 y 4	0.25	-2.57E-05	-2.70E-05	5.2	2.42E-05	2.47E-05	1.9	-2.75E-05	-2.82E-05	2.6	2.42E-05	2.47E-05	2.0
5 y 6	0.50	-6.49E-05	-6.32E-05	-2.6	5.69E-05	5.71E-05	0.2	-6.60E-05	-6.40E-05	-3.1	5.81E-05	5.79E-05	-0.3
7 y 8	0.75	-1.07E-04	-1.08E-04	0.7	9.92E-05	1.00E-04	1.3	-1.07E-04	-1.07E-04	0.1	9.80E-05	9.90E-05	1.0
9 y 10	1.00	-1.59E-04	-1.58E-04	-0.5	1.49E-04	1.48E-04	-1.1	-1.57E-04	-1.55E-04	-0.8	1.44E-04	1.44E-04	0.1
11 y 12	1.50	-2.76E-04	-2.78E-04	0.7	2.68E-04	2.66E-04	-0.6	-2.71E-04	-2.72E-04	0.4	2.59E-04	2.59E-04	0.0
13 y 14	2.00	-4.14E-04	-4.10E-04	-1.0	3.96E-04	3.92E-04	-0.9	-4.08E-04	-4.03E-04	-1.2	3.90E-04	3.84E-04	-1.3
Promedio				2.1			1.0			1.4			1.5

En el ‘Apéndice T: Video Algoritmo de Posprocesamiento de la Respuesta Local’, se muestra en detalle los resultados del algoritmo de posprocesamiento durante la modelación.

4.2.2. Caso de Estudio 2: Eje de Muro Sometido a Registro Sísmico

La Figura 34 ilustra la envolvente del perfil de curvatura a lo largo de la altura del eje del muro en estudio, evidenciando los valores máximos y mínimos registrados durante el sismo. Los valores obtenidos a partir del mallado de referencia, el modelo de cuatro elementos por piso y los resultados interpolados presentan una buena concordancia a lo largo de la altura; sin embargo, a nivel de base —donde se concentran los mayores niveles de no linealidad— se observan discrepancias más notables. En el ‘Apéndice T: Video Algoritmo de Posprocesamiento de la Respuesta Local’, se detallan en profundidad los resultados del algoritmo de posprocesamiento de la curvatura en el tiempo.

La Tabla 15 resume los valores de curvatura medidos a nivel de base, correspondientes a las envolventes máxima y mínima del perfil de curvatura. Se presentan los valores obtenidos para el modelo con mallado de cuatro elementos por piso, el mallado de referencia y los resultados derivados del procedimiento de posprocesamiento aplicado a este último. En general, se evidencia que el posprocesamiento reproduce con precisión la respuesta local que se obtendría al emplear un modelo con una mayor densidad de mallado, reduciendo el error de la curvatura máxima a 0.21 % y el de la curvatura mínima a 6.94 %.

Respecto a la eficiencia de los algoritmos de posprocesamiento, el posprocesamiento de la curvatura requiere únicamente fracciones de segundo por paso de análisis y puede aplicarse selectivamente en momentos críticos, como los instantes previos al colapso. En contraste, el posprocesamiento del estado de esfuerzos y deformaciones es considerablemente más exigente, ya que demora varios segundos por paso y requiere procesar la historia completa de las deformaciones en las fibras, lo que implica analizar todos los instantes previos de la modelación y resulta poco práctico. Por ello, su aplicación se reserva exclusivamente para el Caso de Estudio 1.

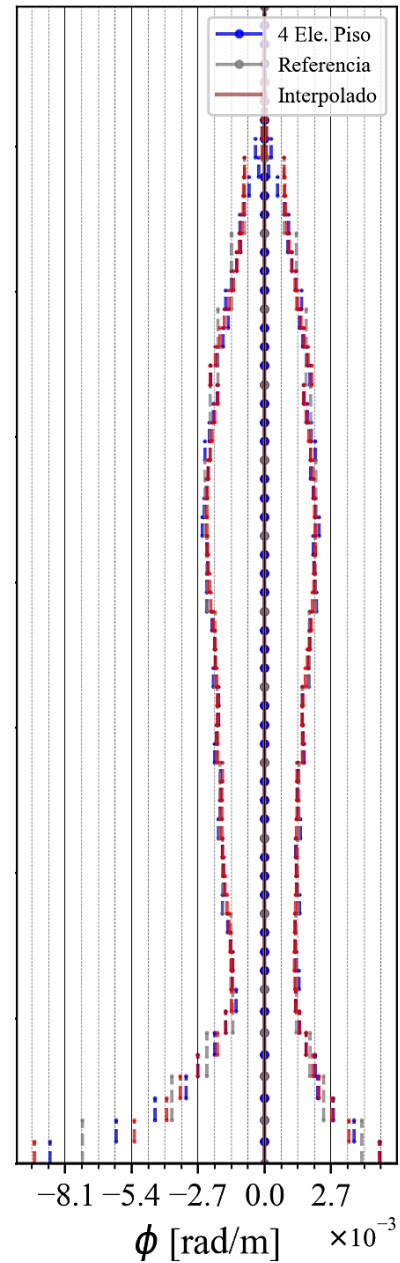


Figura 34: Envolvente de perfil de curvatura interpolado.

Tabla 15: Resultados de eje de muro sometido a registro sísmico a nivel de base.

Respuesta	Sim.	Loc.	Env.	Interp.	4 ele.	Error [%]	Ref.	4 ele.	Error [%]
Curvatura [rad/m] · 10 ⁻³	φ	Inf.	Max.	4.67	4.68	0.21	3.96	4.68	-18.24
			Min.	-9.36	-8.71	6.94	-7.4	-8.71	-17.8

5. Conclusiones

Del análisis de los resultados obtenidos en el Caso de Estudio 1 (Probetas de Muros Ensayadas a Deformación Controlada) y el Caso de Estudio 2 (Eje de Muro Sometido a Registro Sísmico), se evidencian dos conclusiones principales: (1) La aplicación de técnicas de regularización restituye la objetividad en la respuesta global de los muros esbeltos, superando las deficiencias inherentes a la calibración estándar. (2) El algoritmo de posprocesamiento propuesto replica con alta precisión la respuesta local a partir de un modelo con mallado de referencia, proporcionando estimaciones objetivas incluso en zonas de elevada no linealidad. A continuación, se presentan los antecedentes que sustentan ambas conclusiones.

Para el Caso de Estudio 1, al estudiar la respuesta a nivel global, se confirma que la aplicación de técnicas de regularización restituye la objetividad en la respuesta del muro, logrando una notable concordancia con los datos experimentales de las diversas probetas. Las modelaciones representan con precisión la resistencia lateral y la capacidad de desplazamiento, aunque tienden a subestimar el desplazamiento en el punto de fluencia, posiblemente debido a la formación de grietas por retracción. Se evidencian diferencias significativas entre la calibración estándar, que muestra alta sensibilidad al mallado, y el método regularizado, que ofrece una respuesta más objetiva e independiente del mallado.

Para el Caso de Estudio 2, el análisis pushover del eje de muro identifica dos puntos críticos: uno relacionado con el aplastamiento de la fibra comprimida del hormigón y otro vinculado a la ruptura de la fibra traccionada del acero. Se constata que los resultados obtenidos mediante la calibración estándar exhiben una marcada sensibilidad al mallado, mientras que la aplicación de técnicas de regularización produce una respuesta global objetiva e independiente de la densidad del mallado, reduciendo significativamente las discrepancias en los parámetros de carga lateral y deriva de piso.

Por otra parte, el análisis sísmico demuestra que la aplicación de técnicas de regularización permite obtener una respuesta dinámica más objetiva y precisa en los muros esbeltos. En la fase previa al colapso, los modelos regularizados exhiben parámetros globales prácticamente independientes del mallado—con diferencias de alrededor del 1% frente a hasta un 17% en la calibración estándar—mientras que las discrepancias en la respuesta local persisten. Durante el colapso, la técnica regularizada reduce significativamente la sobre resistencia, evidenciada por factor de escala un 47.6% menor.

El estudio de la objetividad local de la modelación demuestra que la aplicación de algoritmos de posprocesamiento permite reproducir con alta precisión la respuesta local de los muros, tanto en condiciones de deformación controlada como en situaciones sísmicas. En el Caso de Estudio 1, el algoritmo interpola de forma efectiva los perfiles de curvatura a lo largo de la altura, reduciendo significativamente las discrepancias en la curvatura de la base. En el Caso de Estudio 2, a pesar de observar mayores discrepancias en la zona de elevada no linealidad, el posprocesamiento logra replicar la respuesta que se obtendría con un mallado de mayor densidad, con errores mínimos en la curvatura máxima y mínima (0.21 % y 6.94 %, respectivamente). Además, se confirma que el posprocesamiento de la curvatura es eficiente, ya que requiere únicamente fracciones de segundo para estimar un paso de análisis, y puede aplicarse directamente en cualquier instante de interés.

Referencias

1. Mander JB, Priestley MJN, Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of structural engineering*. 1988;114(8):1804-1826.
2. Krawinkler H, Miranda E. Performance-based earthquake engineering. *Earthquake engineering: from engineering seismology to performance-based engineering*. 2004;9:1-9.
3. Pozo JD, Hube MA, Kurama YC. Quantification of variability in simulated seismic performance of RC wall buildings. *Eng Struct*. 2023;295:116872.
4. Kolozvari K, Biscombe L, Dashti F, et al. State-of-the-art in nonlinear finite element modeling of isolated planar reinforced concrete walls. *Eng Struct*. 2019;194:46-65.
5. Rojas F, Anderson JC, Massone LM. A nonlinear quadrilateral thin flat layered shell element for the modeling of reinforced concrete wall structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2019;17:6491-6513.
6. Belletti B, Scolari M, Vecchi F. PARC_CL 2.0 crack model for NLFEA of reinforced concrete structures under cyclic loadings. *Comput Struct*. 2017;191:165-179.
7. Kolozvari K, Arteta C, Fischinger M, et al. Comparative study of state-of-the-art macroscopic models for planar reinforced concrete walls. Published online 2018.
8. Pozo JD, Hube MA, Kurama YC. Quantitative assessment of nonlinear macro-models for global behavior and design of planar RC walls. *Eng Struct*. 2020;224:111190.
9. Spacone E, Filippou FC, Taucer FF. Fibre beam-column model for non-linear analysis of R/C frames: Part I. Formulation. *Earthq Eng Struct Dyn*. 1996;25(7):711-725.
10. Abdullah SA, Wallace JW. Drift capacity of reinforced concrete structural walls with special boundary elements. *ACI Struct J*. 2019;116(1):183.
11. Segura Jr CL, Wallace JW. Seismic performance limitations and detailing of slender reinforced concrete walls. *ACI Struct J*. 2018;115(3):849-859.
12. Kolozvari K, Kalbasi K, Orakcal K, Wallace J. Three-dimensional model for nonlinear analysis of slender flanged reinforced concrete walls. *Eng Struct*. 2021;236:112105.
13. Pozo JD, Hube MA, Kurama YC. Effect of material regularization in plastic hinge integration analysis of slender planar RC walls. *Eng Struct*. 2021;239:112302.
14. Coleman J, Spacone E. Localization issues in force-based frame elements. *Journal of Structural Engineering*. 2001;127(11):1257-1265.
15. Mohr DS. *Nonlinear Analysis and Performance Based Design Methods for Reinforced Concrete Coupled Shear Walls*. University of Washington Seattle, WA; 2007.
16. Chiaramonte MM. *An Analysis of Conventional and Improved Marginal Wharves*. University of Washington; 2011.
17. Pugh JS, Lowes LN, Lehman DE. Nonlinear line-element modeling of flexural reinforced concrete walls. *Eng Struct*. 2015;104:174-192.
18. Lowes LN, Lehman DE, Baker C, Lundeen CP. Recommendations for modeling the nonlinear response of slender reinforced concrete walls using PERFORM-3D. In: *2016 SEAOC Convention*. Maui, USA. ; 2016.
19. Vásquez JA, de la Llera JC, Hube MA. A regularized fiber element model for reinforced concrete shear walls. *Earthq Eng Struct Dyn*. 2016;45(13):2063-2083.
20. Dazio A, Beyer K, Bachmann H. Quasi-static cyclic tests and plastic hinge analysis of RC structural walls. *Eng Struct*. 2009;31(7):1556-1571.
21. Thomsen IV JH, Wallace JW. Displacement-based design of slender reinforced concrete structural walls—experimental verification. *Journal of structural engineering*. 2004;130(4):618-630.
22. Navarro R, Heresi P. *Modelo de Exposición de Edificios Sobre Cuatro Pisos En Viña Del Mar: Sector Población Vergara*. Universidad Técnica Federico Santa María; 2023. <https://repositorio.usm.cl/entities/tesis/091dcc4e-2d2e-4768-b9c8-500184dc40f8>
23. NIST. *Recommended Modeling Parameters and Acceptance Criteria for Nonlinear Analysis in Support of Seismic Evaluation, Retrofit, and Design*.; 2017. doi:10.6028/NIST.GCR.17-917-45
24. Birely AC. *Seismic Performance of Slender Reinforced Concrete Walls*. Ph.D. Dissertation. University of Washington, Department of Civil and Environmental Engineering; 2012.
25. Whitman Z. *Investigation of Seismic Failure Modes in Flexural Concrete Walls Using Finite*

- Element Analysis*. MS Thesis. University of Washington; 2015.
26. Vulcano A, Bertero V V, Colotti V, others. Analytical modeling of RC structural walls. In: *Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering*. Vol 6. ; 1988:41-46.
 27. Jansen DC, Shah SP. Effect of length on compressive strain softening of concrete. *J Eng Mech*. 1997;123(1):25-35.
 28. Nakamura H, Higai T. Compressive fracture energy and fracture zone length of concrete. *Modeling of inelastic behavior of RC structures under seismic loads*. Published online 2001:471.
 29. Chang GA, Mander JB. *Seismic Energy Based Fatigue Damage Analysis of Bridge Columns: Part I-Evaluation of Seismic Capacity*. National Center for Earthquake Engineering Research Buffalo, NY; 1994.
 30. Pauw A. *Static Modulus of Elasticity of Concrete as Affected by Density*. University of Missouri; 1960.
 31. Saatcioglu M, Razvi SR. Strength and ductility of confined concrete. *Journal of Structural engineering*. 1992;118(6):1590-1607.
 32. Belarbi A, Hsu TTC. Constitutive laws of concrete in tension and reinforcing bars stiffened by concrete. *Structural Journal*. 1994;91(4):465-474.
 33. Massone L, Orakcal K, Wallace J. Shear-flexure interaction for structural walls. In: *ACI Special Publication*. Vol 236. ; 2006:127-150.
 34. Menegotto M. Method of analysis for cyclically loaded RC plane frames including changes in geometry and non-elastic behavior of elements under combined normal force and bending. In: *Proc. of IABSE Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well Defined Repeated Loads*. ; 1973:15-22.
 35. Filippou FC, Popov EP, Bertero VV. Effects of bond deterioration on hysteretic behavior of reinforced concrete joints. Published online 1983.
 36. Orakcal K, Wallace JW, Conte JP. Flexural modeling of reinforced concrete walls-model attributes. *Structural Journal*. 2004;101(5):688-698.
 37. Committee ACI. Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary. In: ; 2008.
 38. Leiva G. Muros Estructurales - Hormigón Armado Avanzado (IPO428), 2021-2, USM. Published online 2021.
 39. Krollicki J, Maffei J, Calvi GM. Shear strength of reinforced concrete walls subjected to cyclic loading. *Journal of Earthquake Engineering*. 2011;15(S1):30-71.
 40. Thomsen IV JH. *Displacement Based Design of Reinforced Concrete Structural Walls: An Experimental Investigation of Walls with Rectangular and T-Shaped Cross-Sections*. Clarkson University; 1995.
 41. Palermo D. *Behaviour and Analysis of Reinforced Concrete Walls Subjected to Reversed Cyclic Loading*.; 2002.
 42. Lagos R, Kupfer M, Lindenberg J, et al. Seismic performance of high-rise concrete buildings in Chile. *International Journal of High-Rise Buildings*. 2012;1(3):181-194.
 43. Cruz C, Miranda E. Damping ratios of the first mode for the seismic analysis of buildings. *Journal of Structural Engineering*. 2021;147(1):4020300.
 44. Kolozvari K, Orakcal K, Wallace JW. Shear-flexure interaction modeling for reinforced concrete structural walls and columns under reversed cyclic loading. *Pacific Earthquake Engineering Research Center, Report No PEER-2015/12, University of California, Berkeley*. Published online 2015.

Apéndice

A continuación, se presenta la tabla de contenidos del apéndice, que reúne apartados con información técnica y complementaria que respalda el desarrollo de la investigación.

Apéndice A:	Interfaces Gráficas de Usuario.....	i
Apéndice B:	ConcreteCM.....	ii
Apéndice C:	Concrete07	iii
Apéndice D:	SteelMPF	iv
Apéndice E:	Elastic Uniaxial Material	v
Apéndice F:	Calibración Método Estándar	vi
Apéndice G:	Detallamiento de Probetas de Muro	vii
Apéndice H:	Abreviaturas	viii
Apéndice I:	Parámetros de Modelación de Probetas de Muro	ix
Apéndice J:	Solicitaciones a Desplazamiento Controlado	xvii
Apéndice K:	Resultados de Probetas de Muro	xix
Apéndice L:	Curvatura a Nivel de Base de Probetas.....	xxi
Apéndice M:	Edificio Habitacional Prototipo	xxiii
Apéndice N:	Diseño a Flexo Axial de Muros.....	xxvi
Apéndice O:	Parámetros de Modelación de Eje de Muro	xxix
Apéndice P:	Registro Sísmico	xxxvi
Apéndice Q:	Resultados Eje de Muro.....	xxxvii
Apéndice R:	Algoritmo de Posprocesamiento de Curvatura	xxxviii
Apéndice S:	Curvatura Interpolada a Nivel de Base de Probetas	lviii
Apéndice T:	Video Algoritmo de Posprocesamiento de la Respuesta Local	lx

Apéndice A: Interfaces Gráficas de Usuario

El apéndice reúne las interfaces gráficas de usuario (GUI) desarrolladas a lo largo de la investigación. Se incluyen las descripciones y enlaces a los repositorios desarrollados, estos son: *ChartMander1988*, *uniaxialMaterial* y *FiberSection*.

ChartMander1988	
ChartMander1988 es una herramienta de interfaz gráfica de usuario (GUI) diseñada para crear el ábaco de Mander (1988), que permite determinar la relación de confinamiento entre hormigón no confinado y confinado, según lo establecido en "<i>Theoretical Stress-Strain Model For Confined Concrete</i>", por J. B. Mander, M. J. N. Priestley y R. Park, 1988. https://github.com/MarceloX3/ChartMander1988.git	
uniaxialMaterial	
uniaxialMaterial es una herramienta de interfaz gráfica de usuario (GUI) diseñada para visualizar cómo cada parámetro afecta la definición de un material, regularizar el hormigón y comparar los modelos de comportamiento de OpenSees con los modelos analíticos. Facilita el proceso de aprendizaje en la definición y manejo de materiales, proporcionando una comprensión integral de su comportamiento en tensión, compresión y ante cargas cíclicas. https://github.com/MarceloX3/uniaxialMaterial.git	
FiberSection	
FiberSection es una herramienta de interfaz gráfica de usuario (GUI) diseñada para definir la geometría de secciones a partir de fibras en OpenSees. Inspirada en la función <code>plotSection</code> de MATLAB (D. Vamvatsikos) y en la función <code>plot_fiber_section</code> de la biblioteca Opsvis (S. Kokot), la aplicación permite la definición de patch y layer, e integra funcionalidades como replicar y definir recubrimientos en las secciones. https://github.com/MarceloX3/FiberSection.git	

Apéndice B: ConcreteCM

ConcreteCM [12], es un modelo constitutivo histerético uniaxial para el hormigón desarrollado por Chang y Mander [29]. Su definición en OpenSees, así como los parámetros a calibrar se detallan a continuación.

uniaxialMaterial('ConcreteCM', matTag, fpcc, epcc, Ec, rc, xcrn, ft, et, rt, xcrp, mon, '-GapClose', GapClose=0)	
matTag (int)	Etiqueta que identifica el material
fpcc (float)	Resistencia a la compresión (f'_c)
epcc (float)	Deformación a la resistencia en compresión (ϵ'_c)
Ec (float)	Módulo tangente inicial (E_c)
rc (float)	Parámetro de forma en la ecuación de Tsai definido para compresión (r_c)
xcrn (float)	Deformación crítica no dimensional en la envolvente de compresión (ϵ_{cr}^-), donde la curva comienza a seguir una línea recta
ft (float)	Resistencia a la tracción (f_t)
et (float)	Deformación a la resistencia a la tracción (ϵ_t)
rt (float)	Parámetro de forma en la ecuación de Tsai definido para tracción (r_t)
xcrp (float)	Deformación crítica no dimensional en la envolvente de tracción (ϵ_{cr}^+), donde la curva comienza a seguir una línea recta – se recomienda un valor elevado [p.ej., 10000] cuando se considera el efecto de la rigidez en tracción)
mon	Opcional, relación tensión-deformación monótona únicamente: mon=1 (invocado solo en FSAM), mon=0 (sin impacto en condiciones monótonas)
'-GapClose' (str)	Opcional, indica que el siguiente parámetro es GapClose
GapClose (float)	Opcional, GapClose = 0, cierre de brecha menos gradual (por defecto); GapClose = 1, cierre de brecha más gradual

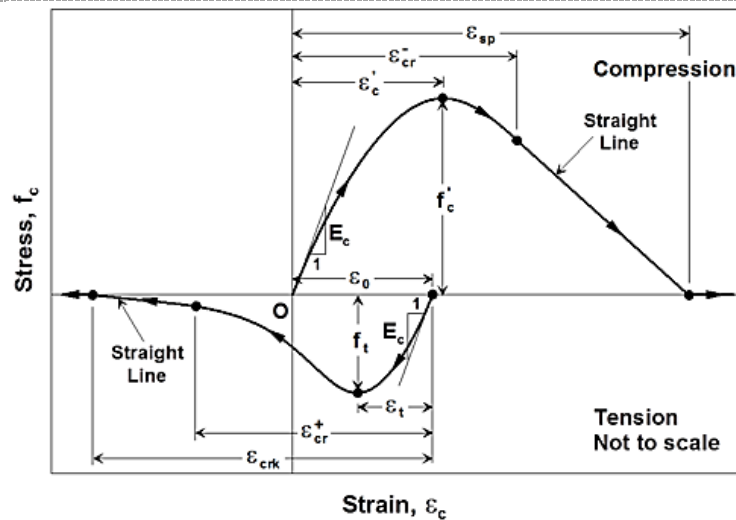


Figura 35: Parámetros de modelo ConcreteCM. Fuente: Documentación OpenSees.

Apéndice C: Concrete07

Concrete07 es una versión del modelo de concreto de Chang y Mander [29] con curvas de descarga y recarga simplificadas, en la que se ha eliminado el desplazamiento de la envolvente de tracción respecto al origen propuesto por los autores. Su definición en OpenSees, se detalla a continuación.

<code>uniaxialMaterial('Concrete07', <i>matTag</i>, <i>fc</i>, <i>epsc</i>, <i>Ec</i>, <i>ft</i>, <i>et</i>, <i>xp</i>, <i>xn</i>, <i>r</i>)</code>	
<i>matTag</i> (int)	Etiqueta que identifica el material
<i>fc</i> (float)	Resistencia a la compresión del concreto (la compresión es negativa)
<i>epsc</i> (float)	Deformación del concreto a la máxima resistencia a la compresión
<i>Ec</i> (float)	Módulo de elasticidad inicial del concreto
<i>ft</i> (float)	Resistencia a la tracción del concreto (la tracción es positiva)
<i>et</i> (float)	Deformación del concreto a la máxima resistencia a la tracción
<i>xp</i> (float)	Término adimensional que define la deformación a partir de la cual comienza la línea recta de descenso en tracción
<i>xn</i> (float)	Término adimensional que define la deformación a partir de la cual comienza la línea recta de descenso en compresión
<i>r</i> (float)	Parámetro que controla la rama descendente no lineal

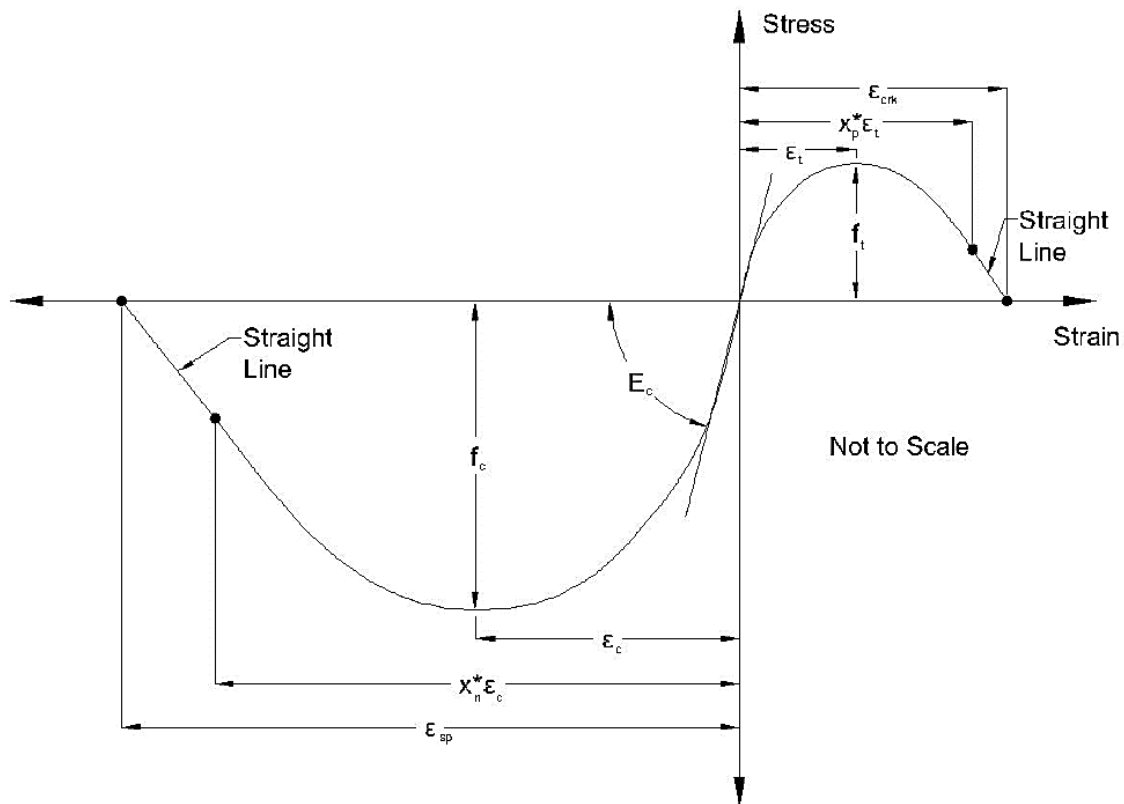


Figura 36: Parámetros de modelo Concrete07. Fuente: Documentación OpenSees.

Apéndice D: SteelMPF

SteelMPF [44], es un modelo constitutivo uniaxial no lineal histerético para el acero propuesto por Menegotto y Pinto (1973), y ampliado por Filippou et al. (1983) para incluir efectos de endurecimiento por deformación isotrópica. Su definición en OpenSees, se detalla a continuación.

uniaxialMaterial('SteelMPF', matTag, fyp, fyn, E0, bp, bn, *params, a1=0.0, a2=1.0, a3=0.0, a4=1.0)	
matTag (int)	Etiqueta que identifica el material
fyp (float)	Resistencia de fluencia en tracción (dirección de carga positiva)
fyn (float)	Resistencia de fluencia en compresión (dirección de carga negativa)
E0 (float)	Módulo tangente inicial
bp (float)	Relación de endurecimiento por deformación en tracción (dirección de carga positiva)
bn (float)	Relación de endurecimiento por deformación en compresión (dirección de carga negativa)
params (list (float))	Parámetros para controlar la transición de la rama elástica a la plástica. params = [R0, cR1, cR2]. Valores recomendados: R0 = 20, cR1 = 0.925, cR2 = 0.15 o cR2 = 0.0015
a1 (float)	Parámetro de endurecimiento isotrópico en compresión (opcional, valor por defecto = 0.0). Desplaza el envolvente de fluencia en compresión por una proporción de la resistencia de fluencia en compresión, tras una deformación plástica máxima en tracción de $a2(f_{yp}/E_0)$
a2 (float)	Parámetro de endurecimiento isotrópico en compresión (opcional, valor por defecto = 1.0)
a3 (float)	Parámetro de endurecimiento isotrópico en tracción (opcional, valor por defecto = 0.0). Desplaza el envolvente de fluencia en tracción por una proporción de la resistencia de fluencia en tracción, tras una deformación plástica máxima en compresión de $a3(f_{yn}/E_0)$
a4 (float)	Parámetro de endurecimiento isotrópico en tracción (opcional, valor por defecto = 1.0). Ver explicación de a3.

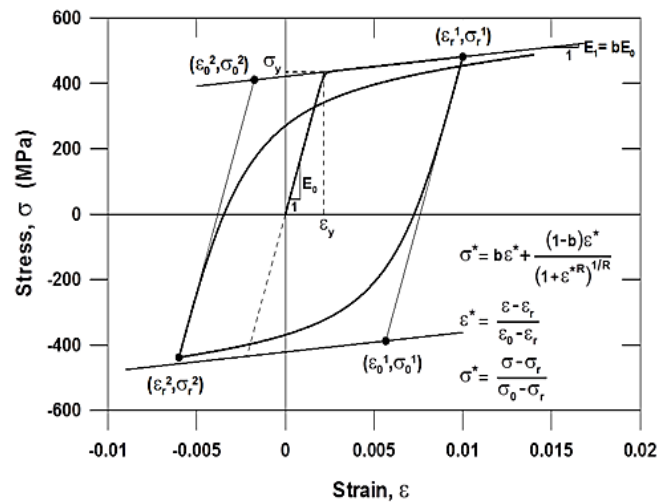


Figura 37: Parámetros de modelo SteelMPF. Fuente: Documentación OpenSees.

Apéndice E: Elastic Uniaxial Material

Elastic Uniaxial Material, se utiliza para definir un material uniaxial elástico. Su definición en OpenSees, se detalla a continuación.

uniaxialMaterial('Elastic', matTag, E, eta=0.0, Eneg=E)	
matTag (int)	etiqueta que identifica el material
E (float)	tangente
eta (float)	tangente de amortiguamiento (opcional, por defecto=0.0)
Eneg (float)	tangente en compresión (opcional, por defecto=E)

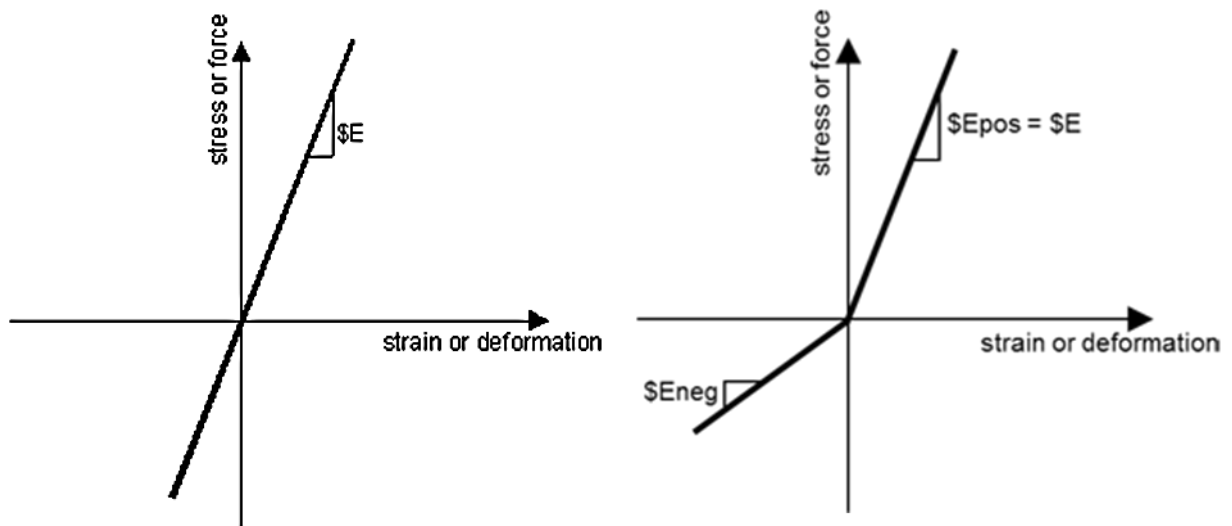


Figura 38: Parámetros de modelo Elastic. Fuente: Documentación OpenSees.

Apéndice F: Calibración Método Estándar

Orakcal (2004) [36] realizó la modelación no lineal de muros de secciones en T y rectangular utilizando el elemento MVLEM, siguiendo la calibración estándar de las propiedades mecánicas de los materiales. Para definir las propiedades constitutivas del hormigón, ajustó el comportamiento en la zona de ablandamiento (la región posterior al máximo de resistencia) de modo que la pendiente coincidiera con el modelo propuesto por Saatcioglu y Razvi (1992) [31]. De forma análoga, calibró los parámetros r y χ_{crt} del modelo de Chang y Mander (1994) [29] en el régimen de tracción, alineándolos con el modelo empírico propuesto por Belarbi y Hsu (1994) [32].

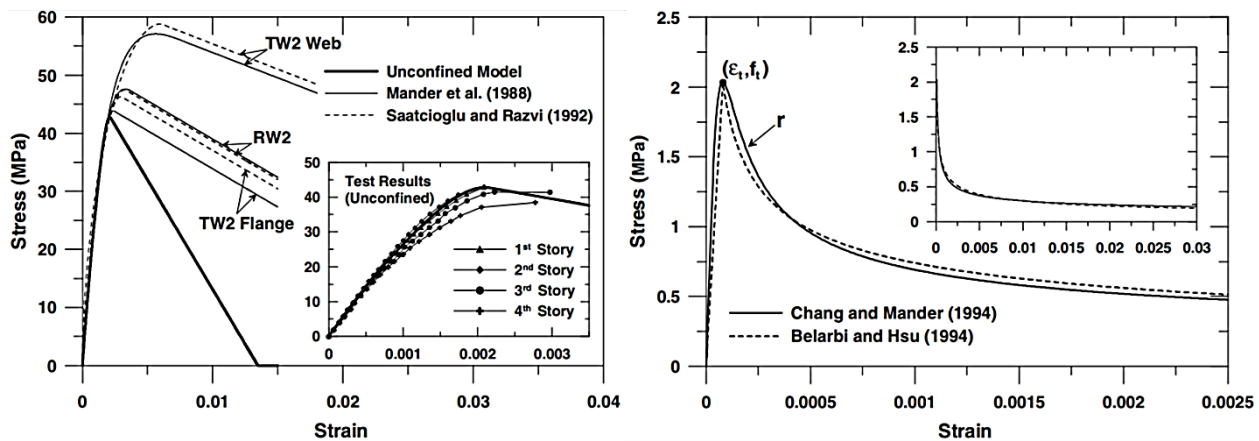


Figura 39: Calibración del modelo constitutivo del hormigón en compresión y tensión.

Fuente: Orakcal (2004) [36]

De forma análoga, el comportamiento de las barras de acero en tracción y compresión se describe mediante un modelo bilineal. En este enfoque, la rigidez inicial se ajusta conforme al módulo elástico del acero y la pendiente de la fase de endurecimiento se calibra a partir de mediciones empíricas obtenidas en ensayos de laboratorio.

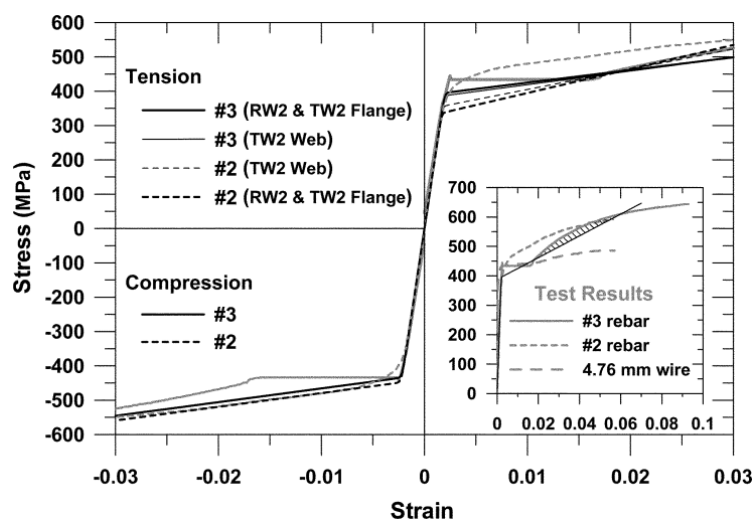
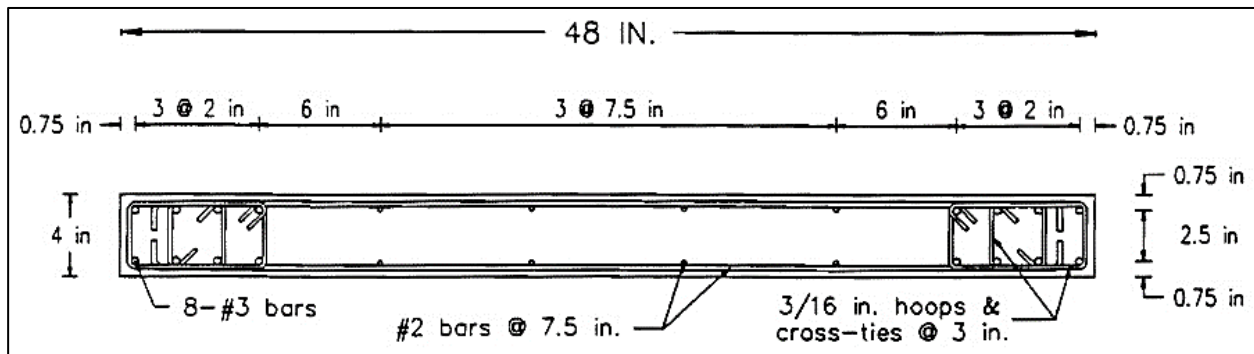


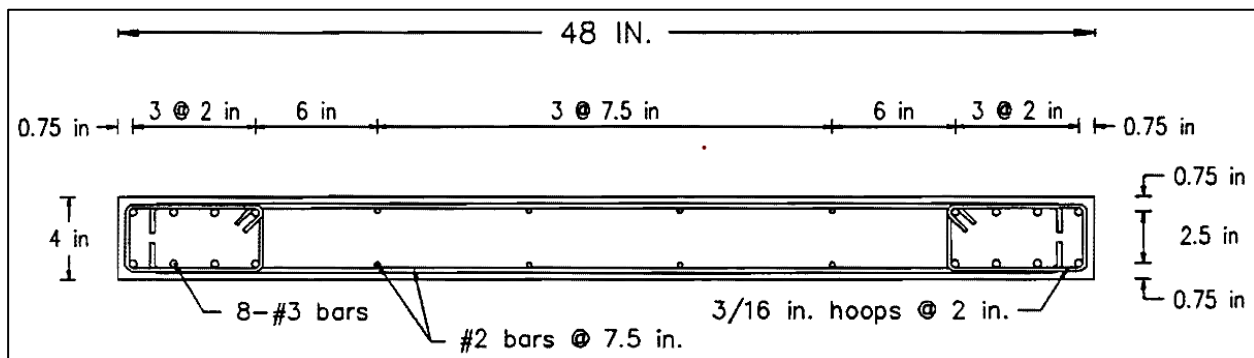
Figura 40: Calibración del modelo constitutivo del acero.

Fuente: Orakcal (2004) [36]

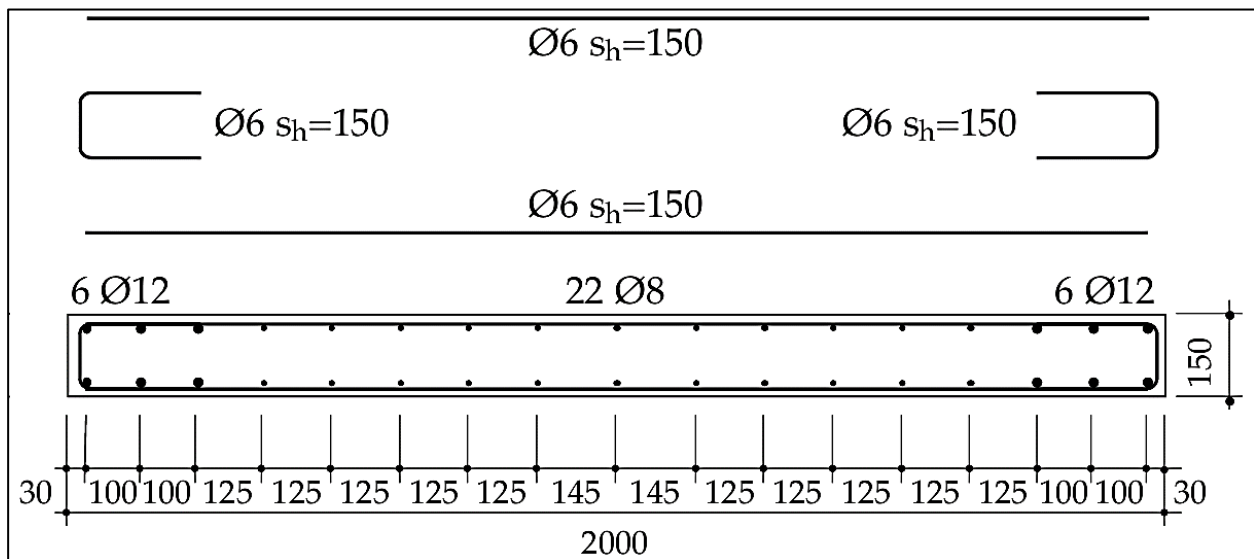
Apéndice G: Detallamiento de Probetas de Muro



Fuente: Thomsen y Wallace (1995) [40]



Fuente: Thomsen y Wallace (1995) [40]



Fuente: Dazio et al. (2009) [20]

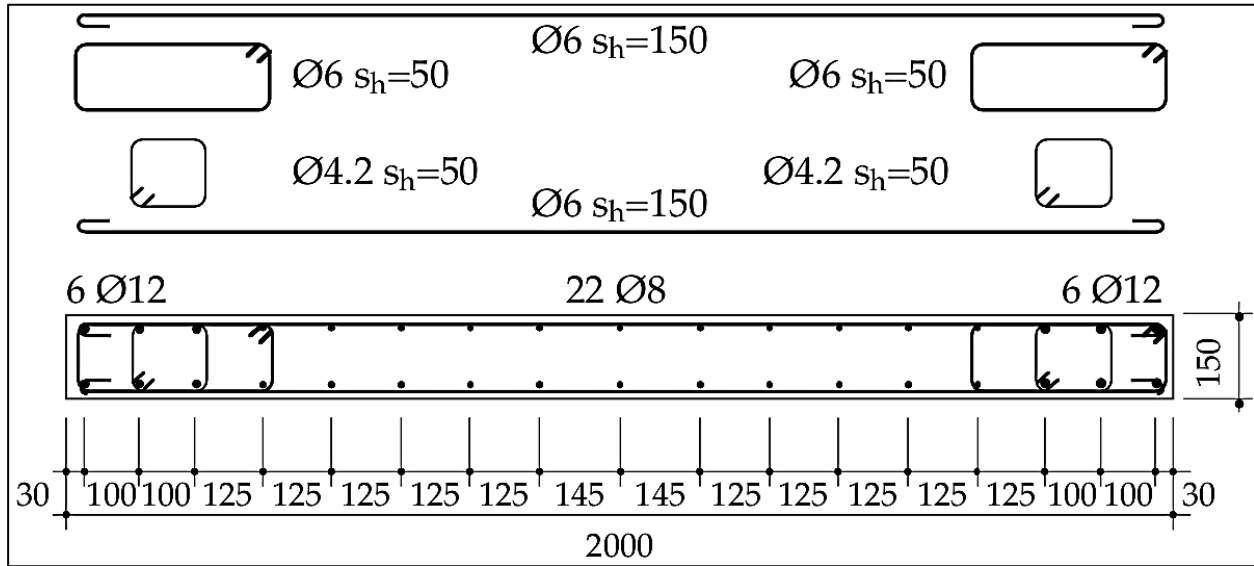


Figura 44: Detallamiento de la sección transversal de probeta WSH6.

Fuente: Dazio et al. (2009) [20]

Apéndice H: Abreviaturas

- l_w : Longitud en el plano del muro.
- l_w/t_w : Relación de aspecto transversal, donde t_w es el espesor del muro.
- $\frac{M}{Vl_w}$: Esbeltez del muro, donde M y V son el momento y corte desarrollados en la base del muro.
- f'_c : Resistencia cilíndrica a la compresión del hormigón.
- $f_{y_{be}}$: Esfuerzo de fluencia a la tracción del refuerzo longitudinal en el elemento de borde.
- ρ_{be} : Cuantía de confinamiento volumétrica del elemento de borde.
- $\frac{N}{A_g f'_c}$: Relación de carga axial, donde N es la carga axial en la base del muro, A_g es el área bruta del muro y f'_c es la resistencia cilíndrica a la compresión del hormigón.
- $\frac{V_b}{A_{cv} \sqrt{f'_c}}$: Esfuerzo de corte máximo, $v_{máx}$, donde V_b representa la máxima fuerza cortante en la base registrada durante el ensayo y A_{cv} es el área de corte, igual a la sección bruta.
- $\frac{V_b}{V_n}$: Razón de resistencia a corte, donde V_b es la máxima fuerza de corte en la base y V_n es la resistencia nominal a corte acorde al ACI 318-14.
- $\frac{M_b}{M_n}$: Razón de resistencia a flexión, donde M_b es el momento máximo en la base y M_n es la resistencia nominal a la flexión del muro, correspondiente a una deformación de compresión de 0.003 en la fibra extrema.
- Δ_y : Deriva de fluencia, definida por la primera fluencia del refuerzo longitudinal, determinada mediante un análisis seccional.
- Δ_u : Capacidad de deriva, definida como la deriva a la que la capacidad de carga lateral del muro se reduce al 80% de su valor máximo.

Apéndice I: Parámetros de Modelación de Probetas de Muro

Tabla 16: Parámetros del hormigón – Muro RW1 – Parte I

RW1 - Hormigón No Confinado - ConcreteCM						
Método:	Estándar		Regularizado			
Mallado:	Todos	Ref.	3 Ele.	4 Ele.	5 Ele.	6 Ele.
f'_c [MPa]	26.84	26.84	26.84	26.84	26.84	26.84
ε_c	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
E_c [MPa]	24520.9	24520.9	24520.9	24520.9	24520.9	24520.9
r_c	2.055	4	2.1	2.1	2.1	2.055
x_{cr}^-	1.2	1.123	1.192	1.128	1.095	1.076
f_t [MPa]	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62
ε_t	0.00008	0.00008	0.00008	0.00008	0.00008	0.00008
r_t	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
x_{cr}^+	1000	1000	1000	1000	1000	1000
GapClose	0	0	0	0	0	0

Tabla 17: Parámetros del hormigón – Muro RW1 – Parte II

RW1 - Hormigón Confinado - ConcreteCM						
Método:	Estándar		Regularizado			
Mallado:	Todos	Ref.	3 Ele.	4 Ele.	5 Ele.	6 Ele.
f'_{cc} [MPa]	31.34	31.34	31.34	31.34	31.34	31.34
ε_{cc}	0.00368	0.00368	-0.00368	-0.00368	-0.00368	0.00368
E_{cc} [MPa]	28317.0	28317.0	28317.0	28317.0	28317.0	28317.0
r_c	7	8	7.0	7.0	7.0	7
x_{cr}^-	1.023	1.1137	1.093	1.07	1.056	1.047
f_t [MPa]	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62
ε_t	0.00008	0.00008	0.00008	0.00008	0.00008	0.00008
r_t	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
x_{cr}^+	1000	1000	10000	10000	10000	1000
GapClose	0	0	0	0	0	0

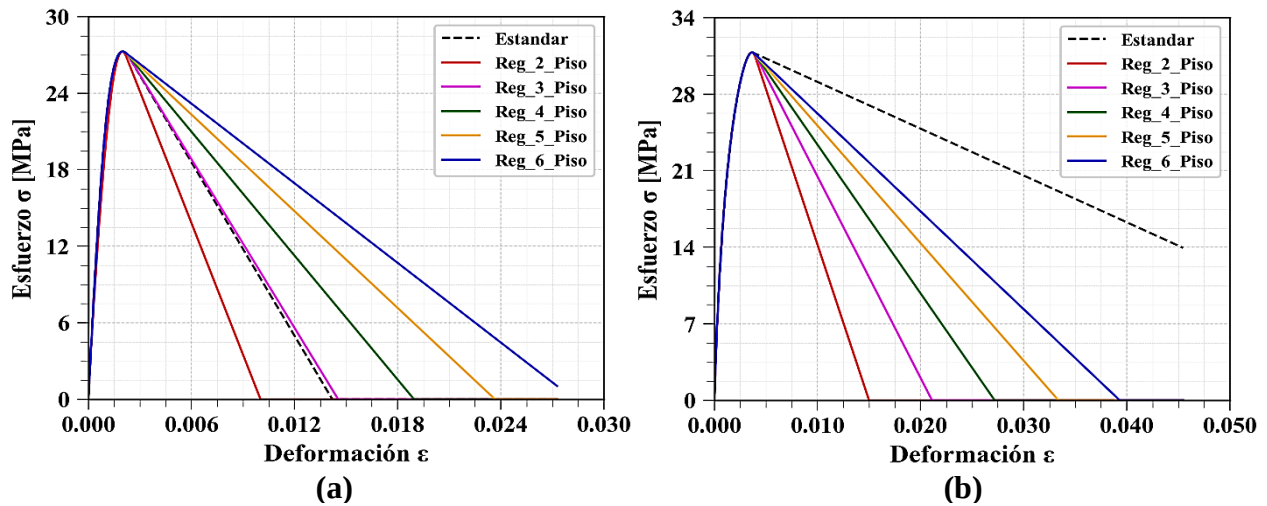


Figura 45: Modelo constitutivo del hormigón no confinado (a) y confinado (b) - Muro RW1.

Tabla 18: Parámetros del acero – Muro RW1 – Parte I

RW1 - Acero de Elemento de Borde - SteelMPF						
Método:	Estándar	Regularizado				
Mallado:	Todos	Ref.	3 Ele.	4 Ele.	5 Ele.	6 Ele.
f_{yp} [MPa]	397.23	397.23	397.23	397.23	397.23	397.23
f_{yn} [MPa]	434.5	434.5	434.5	434.5	434.5	434.5
E_0 [MPa]	200000	200000	200000	200000	200000	200000
b_p	0.00978	0.00978	0.00978	0.00978	0.00978	0.00978
b_n	0.01115	0.02548	0.01699	0.01274	0.01019	0.00849
R_0	20	20	20	20	20	20
c_{R1}	0.925	0.925	0.925	0.925	0.925	0.925
c_{R2}	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015

Tabla 19: Parámetros del acero – Muro RW1 – Parte II

RW1 - Acero de Alma - SteelMPF						
Método:	Estándar	Regularizado				
Mallado:	Todos	Ref.	3 Ele.	4 Ele.	5 Ele.	6 Ele.
f_{yp} [MPa]	358.75	358.75	358.75	358.75	358.75	358.75
f_{yn} [MPa]	434.5	434.5	434.5	434.5	434.5	434.5
E_0 [MPa]	200000	200000	200000	200000	200000	200000
b_p	0.01297	0.01297	0.01297	0.01297	0.01297	0.01297
b_n	0.00896	0.02048	0.01365	0.01024	0.00819	0.00683
R_0	20	20	20	20	20	20
c_{R1}	0.925	0.925	0.925	0.925	0.925	0.925
c_{R2}	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015

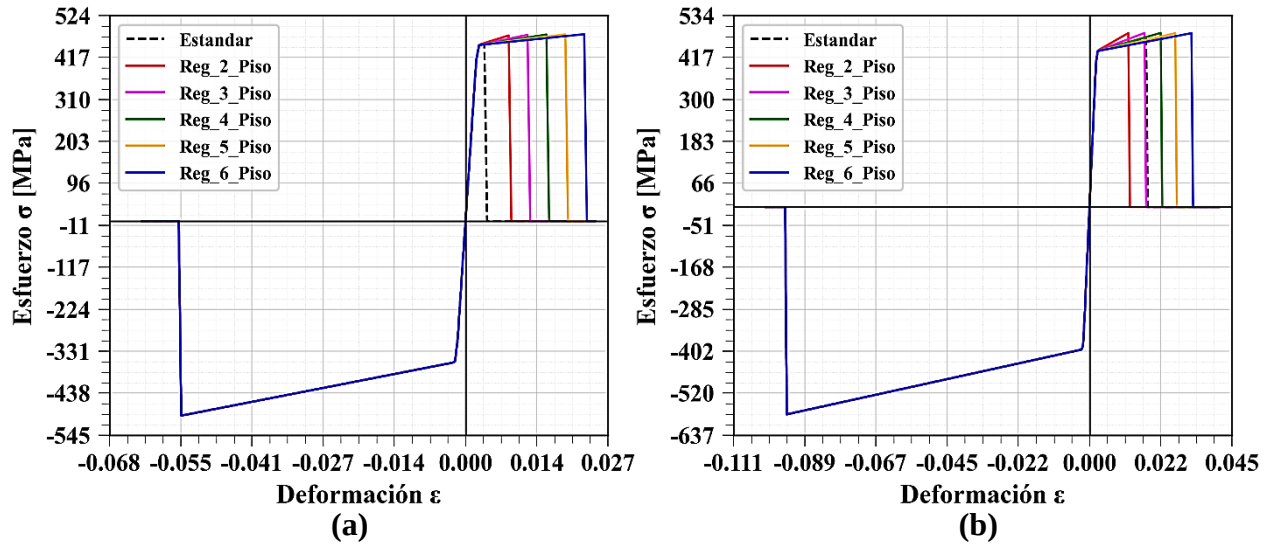


Figura 46: Modelo constitutivo del acero de alma (a) y elemento de borde (b) - Muro RW1.

Tabla 20: Parámetros del hormigón – Muro RW2 – Parte I

RW2 - Hormigón No Confinado - ConcreteCM						
Método:	Estándar		Regularizado			
Mallado:	Todos	Ref.	3 Ele.	4 Ele.	5 Ele.	6 Ele.
f'_c [MPa]	37.10	37.10	37.10	37.10	37.10	37.10
ε_c	-0.0020	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002
E_c [MPa]	28829.7	28829.7	28829.7	28829.7	28829.7	28829.7
r_c	3	2.7	4.0	4.0	4.0	4.0
x_{cr}^-	1.115	1.21	1.073	1.052	1.041	1.034
f_t [MPa]	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91
ε_t	0.00008	0.00008	0.00008	0.00008	0.00008	0.00008
r_t	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
x_{cr}^+	10000	10000	10000	10000	10000	10000
GapClose	0	0	0	0	0	0

Tabla 21: Parámetros del hormigón – Muro RW2 – Parte II

RW2 - Hormigón Confinado - ConcreteCM						
Método:	Estándar		Regularizado			
Mallado:	Todos	Ref.	3 Ele.	4 Ele.	5 Ele.	6 Ele.
f'_{cc} [MPa]	41.33	41.33	41.33	41.33	41.33	41.33
ε_{cc}	-0.0033	-0.0033	-0.0033	-0.0033	-0.0033	-0.0033
E_{cc} [MPa]	31972.4	31972.4	31972.4	31972.4	31972.4	31972.4
r_c	5	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
x_{cr}^-	1.021	1.116	1.076	1.0565	1.045	1.038
f_t [MPa]	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91
ε_t	0.00008	0.00008	0.00008	0.00008	0.00008	0.00008
r_t	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
x_{cr}^+	10000	10000	10000	10000	10000	10000
GapClose	0	0	0	0	0	0

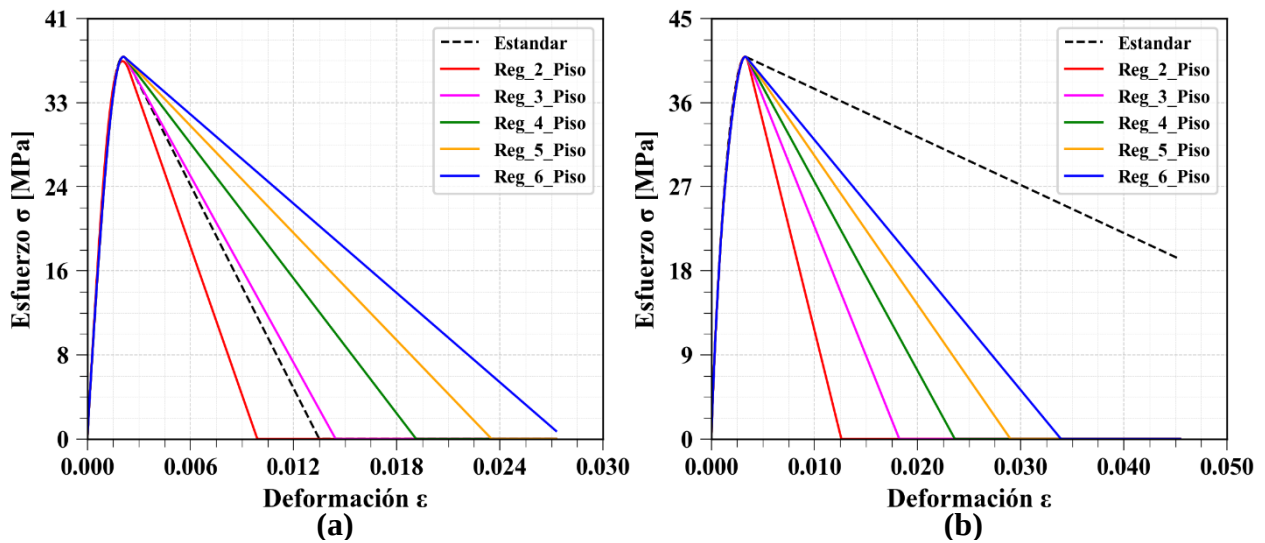


Figura 47: Modelo constitutivo del hormigón no confinado (a) y confinado (b) - Muro RW2.

Tabla 22: Parámetros del acero – Muro RW2 – Parte I

RW2 - Acero de Elemento de Borde - SteelMPF						
Método:	Estándar	Regularizado				
Mallado:	Todos	Ref.	3 Ele.	4 Ele.	5 Ele.	6 Ele.
f_{yp} [MPa]	395.37	395.37	395.37	395.37	395.37	395.37
f_{yn} [MPa]	434.37	434.37	434.37	434.37	434.37	434.37
E_0 [MPa]	200000.0	200000.0	200000.0	200000.0	200000.0	200000.0
b_p	0.01002	0.01002	0.01002	0.01002	0.01002	0.01002
b_n	0.01115	0.02548	0.01699	0.01274	0.01019	0.00849
R_0	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
c_{R1}	0.925	0.925	0.925	0.925	0.925	0.925
c_{R2}	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015

Tabla 23: Parámetros del acero – Muro RW2 – Parte II

RW2 - Acero de Alma - SteelMPF						
Método:	Estándar	Regularizado				
Mallado:	Todos	Ref.	3 Ele.	4 Ele.	5 Ele.	6 Ele.
f_{yp} [MPa]	342.80	342.80	342.80	342.80	342.80	342.80
f_{yn} [MPa]	448.16	448.16	448.16	448.16	448.16	448.16
E_0 [MPa]	200000.0	200000.0	200000.0	200000.0	200000.0	200000.0
b_p	0.01456	0.01456	0.01456	0.01456	0.01456	0.01456
b_n	0.00896	0.02048	0.01365	0.01024	0.00819	0.00683
R_0	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
c_{R1}	0.925	0.925	0.925	0.925	0.925	0.925
c_{R2}	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015

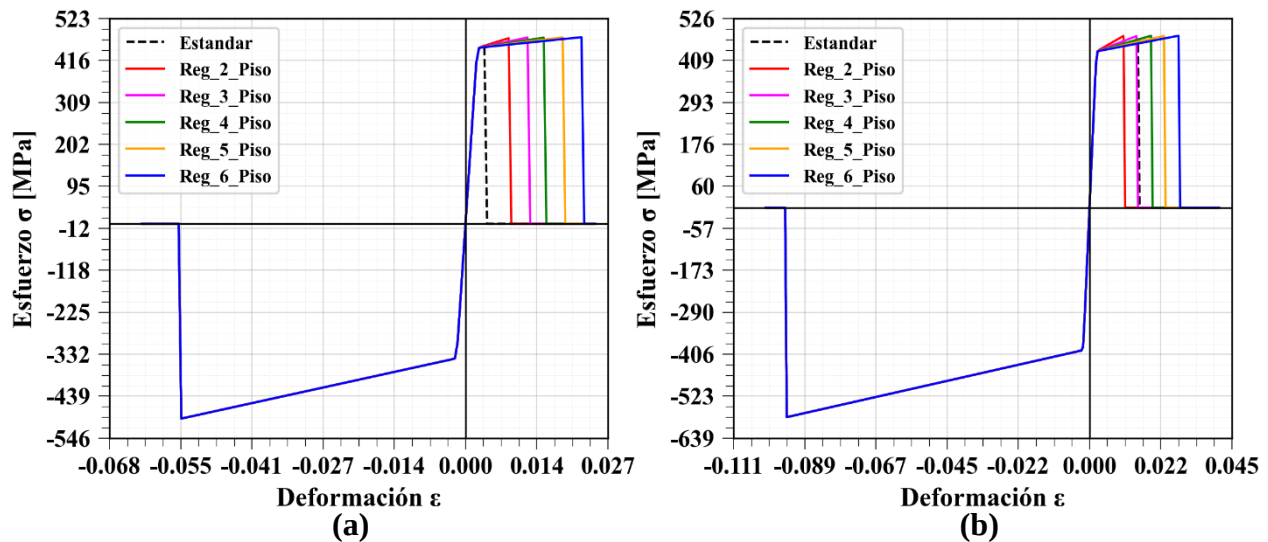


Figura 48: Modelo constitutivo del acero de alma (a) y elemento de borde (b) - Muro RW2.

Tabla 24: Parámetros del hormigón – Muro WSH4 – Parte I

WSH4 - Hormigón No Confinado - ConcreteCM						
Método:	Estándar		Regularizado			
Mallado:	Todos	Ref.	3 Ele.	4 Ele.	5 Ele.	6 Ele.
f'_c [MPa]	239.70	237.87	239.70	239.70	239.70	239.70
ε_c	-0.0020	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002
E_c [MPa]	192408.6	192408.6	192408.6	192408.6	192408.6	192408.6
r_c	3	3.3	5.0	5.0	5.0	5.0
x_{cr}^-	1.100	1.239	1.081	1.058	1.045	1.0375
f_t [MPa]	12.73	12.73	12.73	12.73	12.73	12.73
ε_t	0.00008	0.00008	0.00008	0.00008	0.00008	0.00008
r_t	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
x_{cr}^+	10000	10000	10000	10000	10000	10000
GapClose	0	0	0	0	0	0

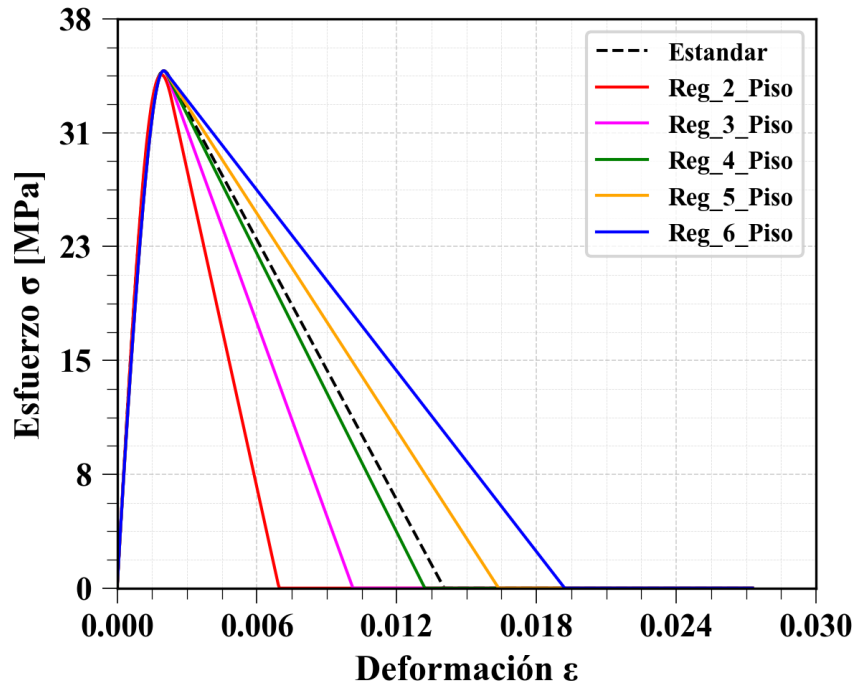


Figura 49: Modelo constitutivo del hormigón no confinado - Muro WSH4.

Tabla 25: Parámetros del acero – Muro WSH4 – Parte I

WSH4 - Acero de Elemento de Borde - SteelMPF						
Método:	Estándar	Regularizado				
Mallado:	Todos	Ref.	3 Ele.	4 Ele.	5 Ele.	6 Ele.
f_{yp} [MPa]	3612.67	3612.67	3612.67	3612.67	3612.67	3612.67
f_{yn} [MPa]	3971.38	3971.38	3971.38	3971.38	3971.38	3971.38
E_0 [MPa]	200000.0	200000.0	200000.0	200000.0	200000.0	200000.0
b_p	0.00637	0.00637	0.00637	0.00637	0.00637	0.00637
b_n	0.00706	0.02372	0.01581	0.01186	0.00949	0.00791
R_0	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
c_{R1}	0.925	0.925	0.925	0.925	0.925	0.925
c_{R2}	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015

Tabla 26: Parámetros del acero – Muro WSH4 – Parte II

WSH4 - Acero de Alma - SteelMPF						
Método:	Estándar	Regularizado				
Mallado:	Todos	Ref.	3 Ele.	4 Ele.	5 Ele.	6 Ele.
f_{yp} [MPa]	3471.66	3471.66	3471.66	3471.66	3471.66	3471.66
f_{yn} [MPa]	4024.47	4024.47	4024.47	4024.47	4024.47	4024.47
E_0 [MPa]	200000.0	200000.0	200000.0	200000.0	200000.0	200000.0
b_p	0.00983	0.00983	0.00983	0.00983	0.00983	0.00983
b_n	0.00865	0.02904	0.01936	0.01452	0.01162	0.00968
R_0	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
c_{R1}	0.925	0.925	0.925	0.925	0.925	0.925
c_{R2}	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015

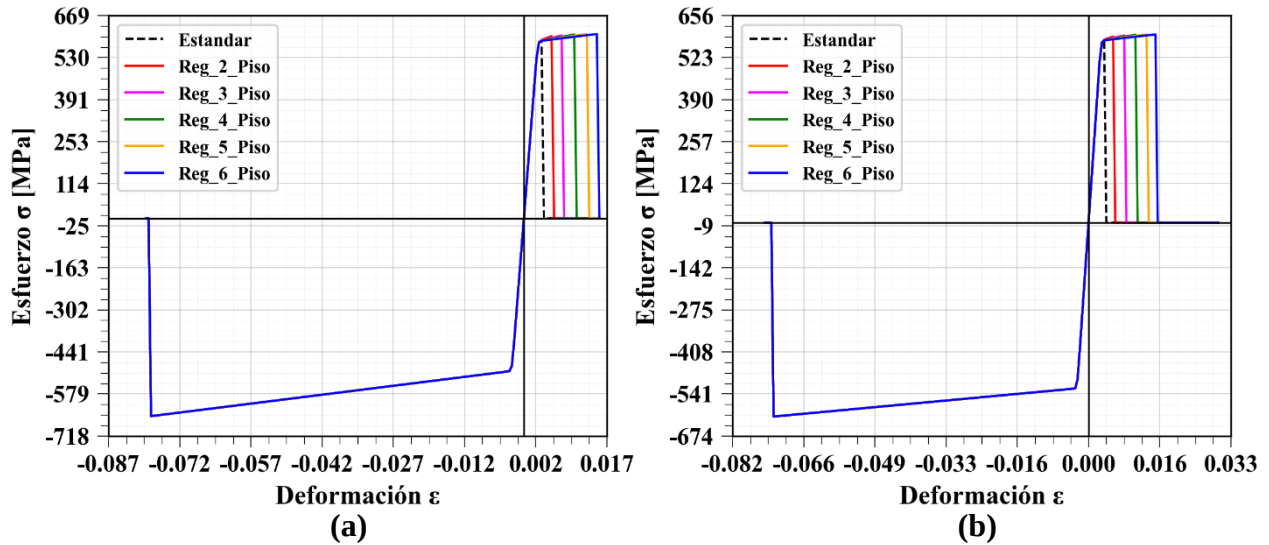


Figura 50: Modelo constitutivo del acero de alma (a) y elemento de borde (b) - Muro WSH4.

Tabla 27: Parámetros del hormigón – Muro WSH6 – Parte I

WSH6 - Hormigón No Confinado - ConcreteCM						
Método:	Estándar		Regularizado			
Mallado:	Todos	Ref.	3 Ele.	4 Ele.	5 Ele.	6 Ele.
f'_c [MPa]	267.24	263.03	266.83	267.24	267.24	267.24
ε_c	-0.0020	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002
E_c [MPa]	203163.3	203163.3	203163.3	203163.3	203163.3	203163.3
r_c	3	3.5	3.0	3.0	3.0	3.0
x_{cr}^-	1.150	1.295	1.198	1.138	1.102	1.084
f_t [MPa]	13.44	13.44	13.44	13.44	13.44	13.44
ε_t	0.00008	0.00008	0.00008	0.00008	0.00008	0.00008
r_t	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
x_{cr}^+	10000	10000	10000	10000	10000	10000
GapClose	0	0	0	0	0	0

Tabla 28: Parámetros del hormigón – Muro WSH6 – Parte II

WSH6 - Hormigón Confinado - ConcreteCM						
Método:	Estándar		Regularizado			
Mallado:	Todos	Ref.	3 Ele.	4 Ele.	5 Ele.	6 Ele.
f'_{cc} [MPa]	335.44	335.09	334.40	335.15	335.22	335.44
ε_{cc}	-0.00514	-0.00481	-0.00495	-0.00505	-0.00511	-0.00514
E_{cc} [MPa]	224083.1	224083.1	224083.1	224083.1	224083.1	224083.1
r_c	5	8.1	6.0	6.0	6.0	6.0
x_{cr}^-	1.023	1.181	1.191	1.146	1.119	1.1
f_t [MPa]	13.44	13.44	13.44	13.44	13.44	13.44
ε_t	0.00008	0.00008	0.00008	0.00008	0.00008	0.00008
r_t	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
x_{cr}^+	10000	10000	10000	10000	10000	10000
GapClose	0	0	0	0	0	0

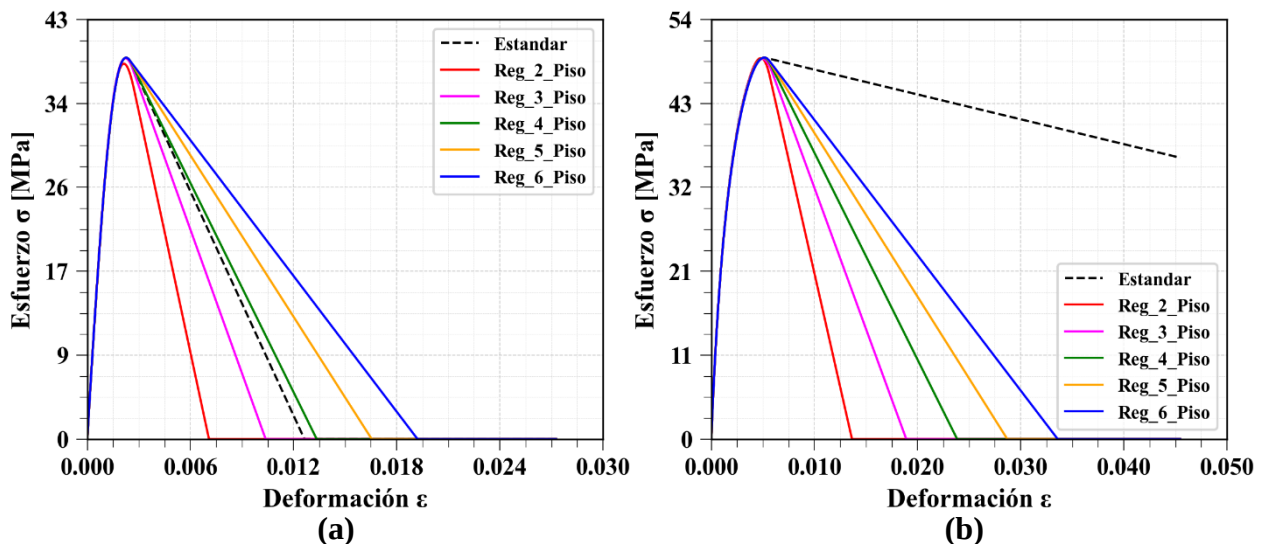


Figura 51: Modelo constitutivo del hormigón no confinado (a) y confinado (b) - Muro WSH6.

Tabla 29: Parámetros del acero – Muro WSH6 – Parte I

WSH6 - Acero de Elemento de Borde - SteelMPF						
Método:	Estándar	Regularizado				
Mallado:	Todos	Ref.	3 Ele.	4 Ele.	5 Ele.	6 Ele.
f_{yp} [MPa]	3597.90	3597.90	3597.90	3597.90	3597.90	3597.90
f_{yn} [MPa]	3971.38	3971.38	3971.38	3971.38	3971.38	3971.38
E_0 [MPa]	200000.0	200000.0	200000.0	200000.0	200000.0	200000.0
b_p	0.00650	0.00650	0.00650	0.00650	0.00650	0.00650
b_n	0.00706	0.02372	0.01581	0.01186	0.00949	0.00791
R_0	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
c_{R1}	0.925	0.925	0.925	0.925	0.925	0.925
c_{R2}	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015

Tabla 30: Parámetros del acero – Muro WSH6 – Parte II

WSH6 - Acero de Alma - SteelMPF						
Método:	Estándar	Regularizado				
Mallado:	Todos	Ref.	3 Ele.	4 Ele.	5 Ele.	6 Ele.
f_{yp} [MPa]	3500.85	3500.85	3500.85	3500.85	3500.85	3500.85
f_{yn} [MPa]	4024.47	4024.47	4024.47	4024.47	4024.47	4024.47
E_0 [MPa]	200000.0	200000.0	200000.0	200000.0	200000.0	200000.0
b_p	0.00983	0.00952	0.00952	0.00952	0.00952	0.00952
b_n	0.00865	0.02904	0.01936	0.01452	0.01162	0.00968
R_0	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
c_{R1}	0.925	0.925	0.925	0.925	0.925	0.925
c_{R2}	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015

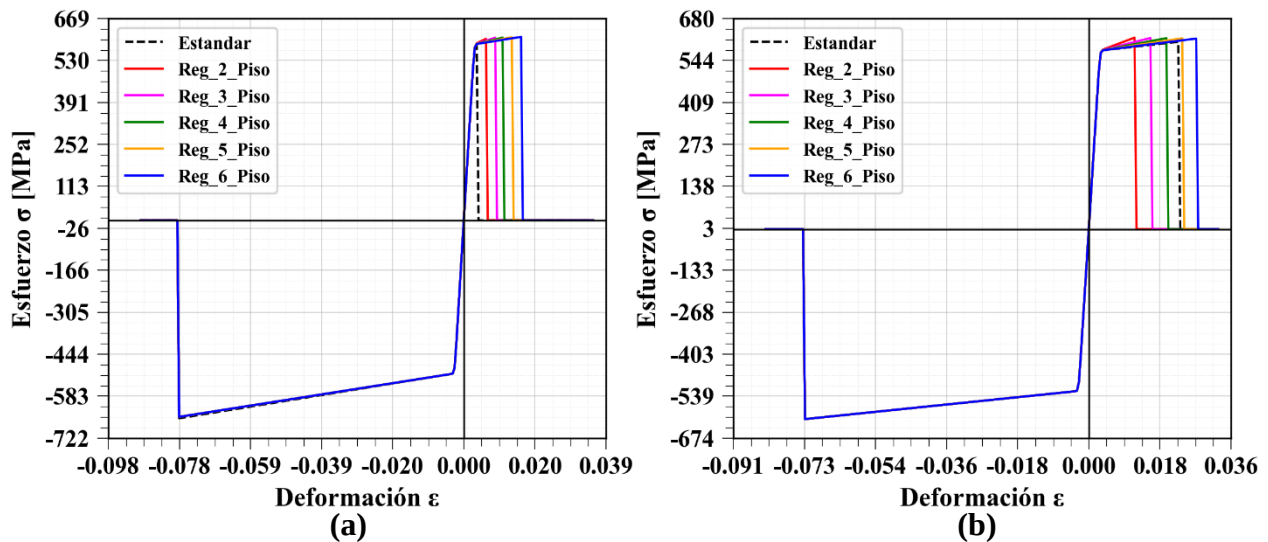


Figura 52: Modelo constitutivo del acero de alma (a) y elemento de borde (b) - Muro WSH4.

Apéndice J: Solicitaciones a Desplazamiento Controlado

A continuación, se presentan las rutinas preestablecidas de desplazamiento a aplicar en las probetas de muro. Las rutinas se ajustan para inducir la no linealidad y el colapso de los especímenes.

Muro RW1

Tabla 31: Detalle de derivas de piso aplicadas.

Muro RW1	
Número de Ciclo	Drift
1 y 2	0.10
3 y 4	0.25
5 y 6	0.50
7 y 8	0.75
9 y 10	1.00
11 y 12	1.50
13 y 14	2.00

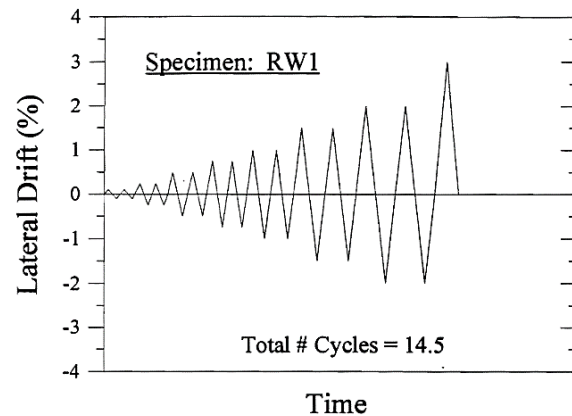


Figura 53: Derivas de piso aplicadas.
Fuente: Thomsen y Wallace (1995) [40]

Muro RW2

Tabla 32: Detalle de derivas de piso aplicadas.

Muro RW1	
Número de Ciclo	Drift
1 y 2	0.10
3 y 4	0.25
5 y 6	0.50
7 y 8	0.75
9 y 10	1.00
11 y 12	1.50
13 y 14	1.00
15 y 16	1.50
17 y 18	2.00

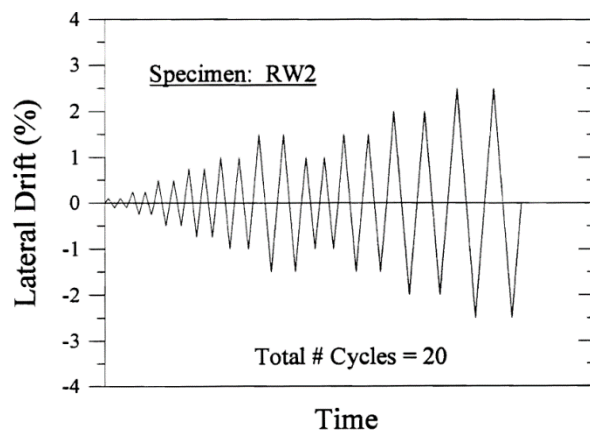


Figura 54: Derivas de piso aplicadas.
Fuente: Thomsen y Wallace (1995) [40]

Muros WSH4 - WSH6

Tabla 33: Detalle de derivas de piso aplicadas.

Muro WSH4	
Número de Ciclo	Drift
1 y 2	0.10
3 y 4	0.25
5 y 6	0.50
7 y 8	0.75

Tabla 34: Detalle de derivas de piso aplicadas.

Muro WSH6	
Número de Ciclo	Drift
1 y 2	0.10
3 y 4	0.25
5 y 6	0.50
7 y 8	0.75
9 y 10	1.00
11 y 12	1.50

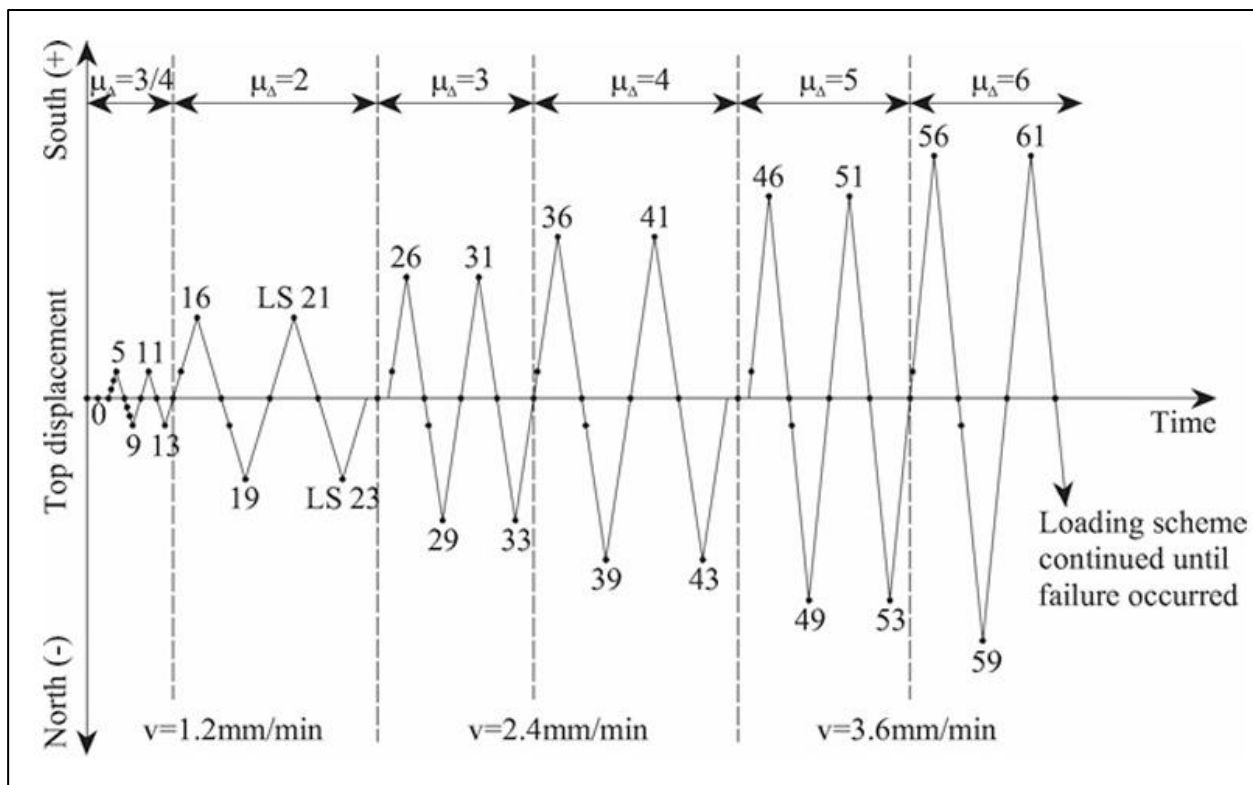


Figura 55: Derivas de piso aplicadas.

Fuente: Dazio et al. (2009) [20].

Apéndice K: Resultados de Probetas de Muro

Se presentan los resultados de los ensayos de deformación controlada y de las modelaciones no lineales. Para los resultados de las modelaciones, se distinguen los distintos niveles de mallado — de referencia y los que incorporan tres, cuatro, cinco y seis elementos por piso—, así como los resultados obtenidos según el método de calibración empleado, ya sea mediante el método estándar o a través de técnicas de regularización.

Modelo de Comportamiento Estándar

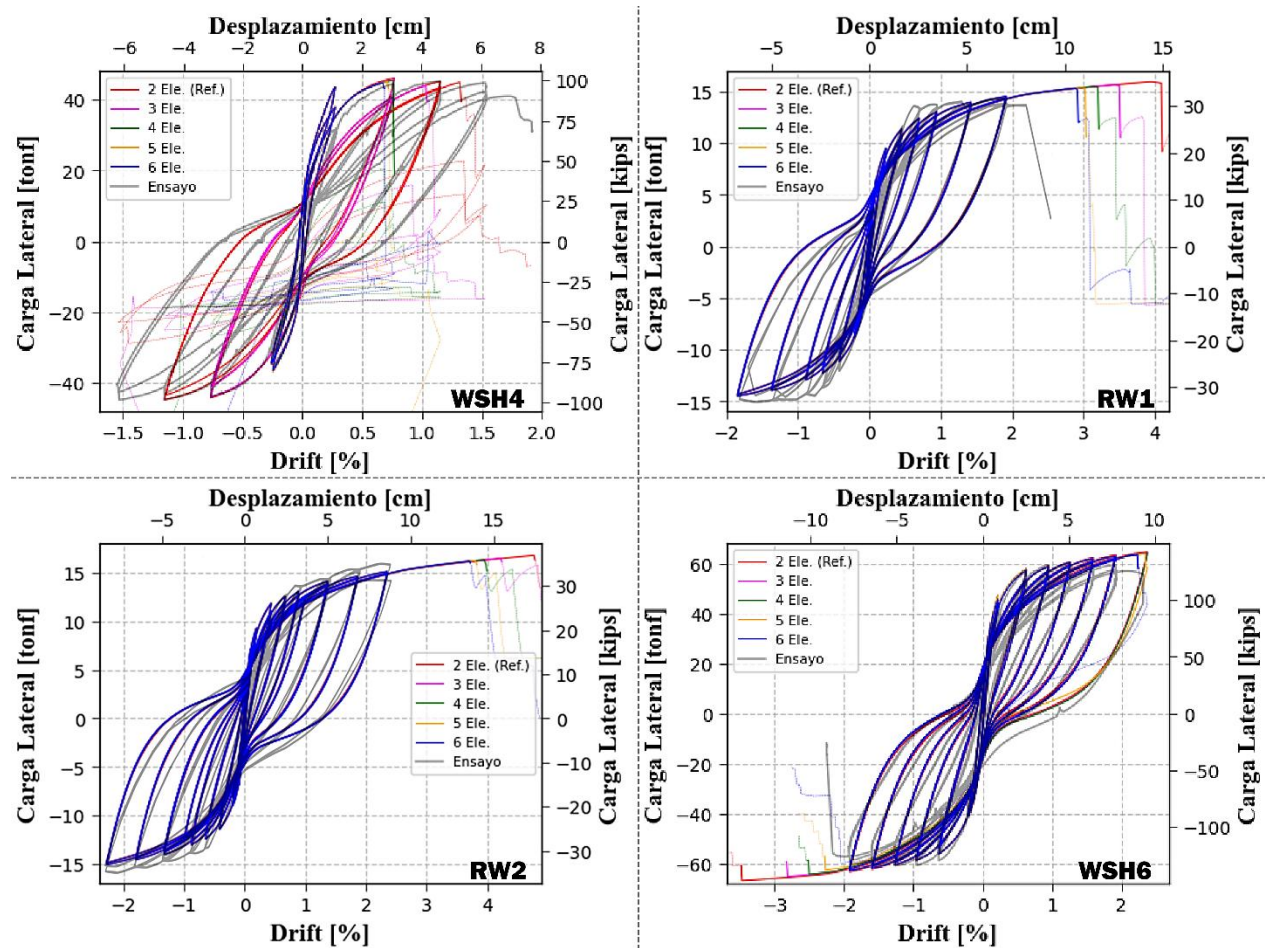


Figura 56: Carga lateral vs Deriva de piso – Modelo de comportamiento estándar.

Modelo de Comportamiento Regularizado

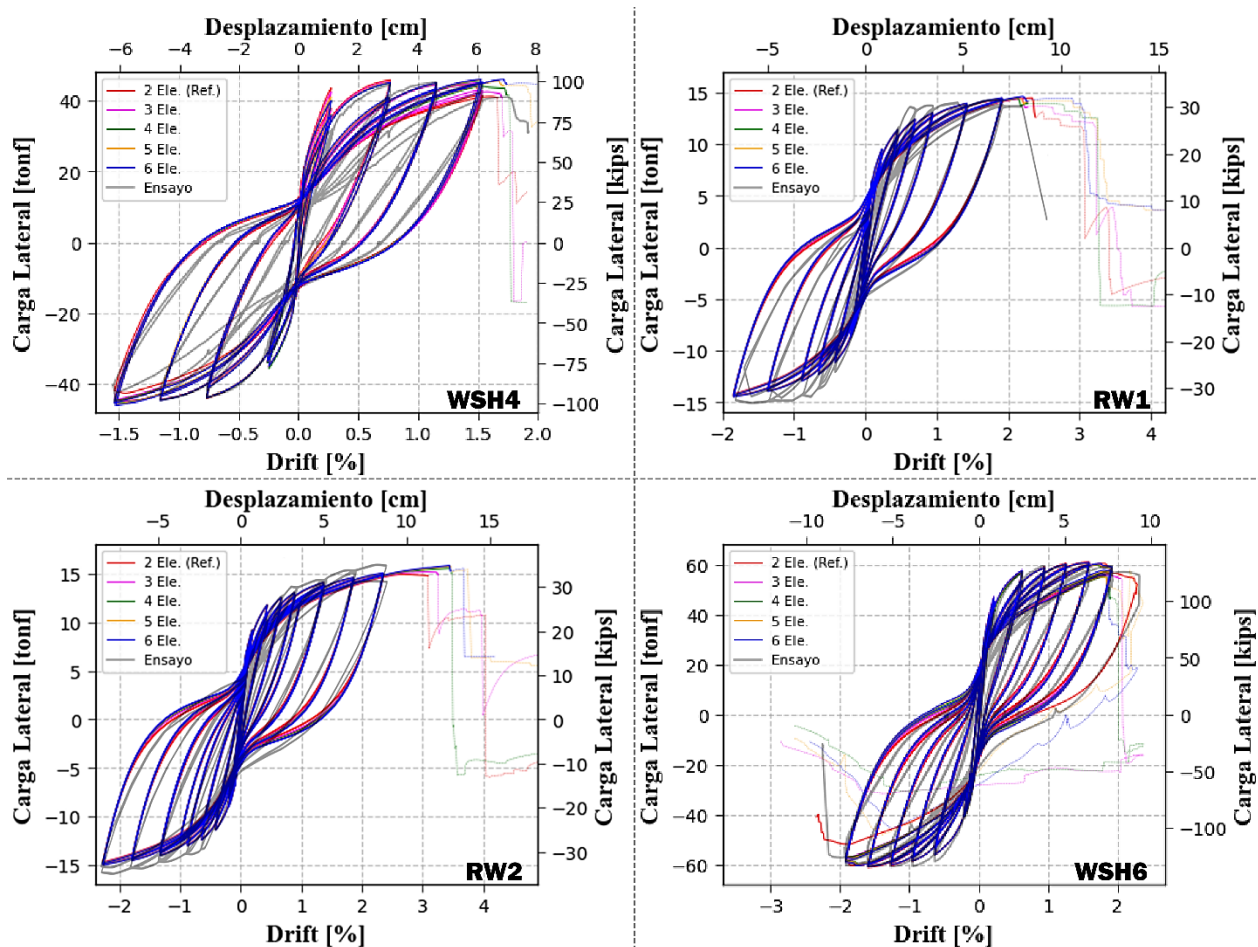


Figura 57: Carga lateral vs Deriva de piso – Modelo de comportamiento regularizado.

Apéndice L: Curvatura a Nivel de Base de Probetas

Se presentan los valores de curvatura registrados en la base, correspondientes a los máximos de deriva de piso en cada ciclo de carga. Estos valores se asocian a las diferentes probetas de muro en estudio e incluyen el error derivado del mallado empleado (referencia o 6 elementos por piso).

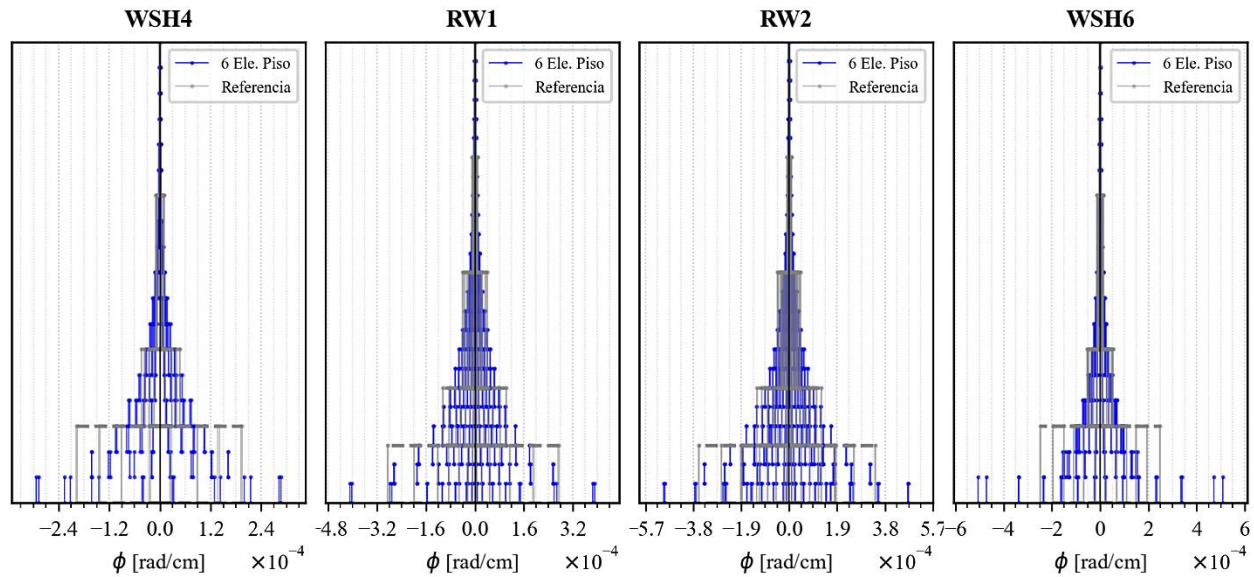


Figura 58: Envolvente de curvatura para máximos de deriva de piso en cada ciclo.

Tabla 35: Curvatura a nivel de base para máximos de deriva de piso en cada ciclo.

Muro WSH4.

Muro WSH4		Ciclo Inicial						Ciclo Repetido					
Número de Ciclo	Drift	Dirección (+)			Dirección (-)			Dirección (+)			Dirección (-)		
		φ _{Ref}	φ _{6 Ele. Piso}	Error [%]	φ _{Ref}	φ _{6 Ele. Piso}	Error [%]	φ _{Ref}	φ _{6 Ele. Piso}	Error [%]	φ _{Ref}	φ _{6 Ele. Piso}	Error [%]
1 y 2	0.25	-2.30E-05	-3.86E-05	67.9	2.42E-05	2.94E-05	21.7	-2.57E-05	-4.16E-05	62.0	2.60E-05	3.29E-05	26.5
3 y 4	0.75	-9.06E-05	-1.61E-04	77.7	8.96E-05	1.43E-04	59.7	-9.10E-05	-1.45E-04	59.1	8.83E-05	1.30E-04	46.8
5 y 6	1.15	-1.44E-04	-2.26E-04	56.9	1.42E-04	2.15E-04	51.7	-1.42E-04	-2.11E-04	48.9	1.37E-04	2.00E-04	46.0
7 y 8	1.50	-1.96E-04	-2.94E-04	50.2	1.92E-04	2.87E-04	49.8	-1.98E-04	-2.88E-04	45.1	1.95E-04	2.83E-04	45.2
Promedio				63.2			45.7			53.8			41.1

Tabla 36: Curvatura a nivel de base para máximos de deriva de piso en cada ciclo.

Muro RW1.

Muro RW1		Ciclo Inicial						Ciclo Repetido					
Número de Ciclo	Drift	Dirección (+)			Dirección (-)			Dirección (+)			Dirección (-)		
		φ _{Ref}	φ _{6 Ele. Piso}	Error [%]	φ _{Ref}	φ _{6 Ele. Piso}	Error [%]	φ _{Ref}	φ _{6 Ele. Piso}	Error [%]	φ _{Ref}	φ _{6 Ele. Piso}	Error [%]
1 y 2	0.10	-8.48E-06	-9.34E-06	10.1	5.85E-06	6.29E-06	7.6	-8.47E-06	-9.32E-06	10.0	6.00E-06	6.35E-06	5.8
3 y 4	0.25	-2.34E-05	-2.70E-05	15.5	2.14E-05	2.47E-05	15.4	-2.41E-05	-2.82E-05	16.8	2.14E-05	2.47E-05	15.6
5 y 6	0.50	-5.21E-05	-6.32E-05	21.3	4.79E-05	5.71E-05	19.2	-5.29E-05	-6.40E-05	21.1	4.85E-05	5.79E-05	19.4
7 y 8	0.75	-8.63E-05	-1.08E-04	25.2	8.01E-05	1.00E-04	25.5	-8.63E-05	-1.07E-04	23.6	8.00E-05	9.90E-05	23.7
9 y 10	1.00	-1.22E-04	-1.58E-04	29.5	1.14E-04	1.48E-04	29.0	-1.21E-04	-1.55E-04	28.4	1.13E-04	1.44E-04	27.3
11 y 12	1.50	-2.00E-04	-2.78E-04	39.0	1.92E-04	2.66E-04	38.4	-1.98E-04	-2.72E-04	37.3	1.89E-04	2.59E-04	36.7
13 y 14	2.00	-2.87E-04	-4.10E-04	43.0	2.75E-04	3.92E-04	42.6	-2.84E-04	-4.03E-04	41.7	2.72E-04	3.84E-04	41.3
Promedio				26.2			25.4			25.6			24.3

**Tabla 37: Curvatura a nivel de base para máximos de deriva de piso en cada ciclo.
Muro RW2.**

Muro RW2		Ciclo Inicial						Ciclo Repetido					
Número de Ciclo	Drift	Dirección (+)			Dirección (-)			Dirección (+)			Dirección (-)		
		ϕ_{Ref}	ϕ_6 Ele. Piso	Error [%]	ϕ_{Ref}	ϕ_6 Ele. Piso	Error [%]	ϕ_{Ref}	ϕ_6 Ele. Piso	Error [%]	ϕ_{Ref}	ϕ_6 Ele. Piso	Error [%]
1 y 2	0.10	-8.64E-06	-1.00E-05	16.4	8.96E-06	1.04E-05	16.7	-8.70E-06	-1.01E-05	15.7	9.00E-06	1.05E-05	16.4
3 y 4	0.25	-1.95E-05	-2.33E-05	19.2	2.07E-05	2.41E-05	16.4	-2.01E-05	-2.41E-05	19.6	2.08E-05	2.44E-05	17.1
5 y 6	0.50	-5.09E-05	-6.18E-05	21.5	4.72E-05	5.66E-05	19.9	-5.19E-05	-6.31E-05	21.5	4.80E-05	5.78E-05	20.4
7 y 8	0.75	-8.50E-05	-1.09E-04	27.8	8.15E-05	1.04E-04	27.1	-8.53E-05	-1.07E-04	26.0	8.15E-05	1.02E-04	24.9
9 y 10	1.00	-1.18E-04	-1.51E-04	27.8	1.16E-04	1.49E-04	27.8	-1.17E-04	-1.47E-04	26.2	1.15E-04	1.45E-04	25.8
11 y 12	1.50	-1.93E-04	-2.62E-04	35.8	1.87E-04	2.52E-04	35.0	-1.90E-04	-2.55E-04	34.4	1.83E-04	2.43E-04	33.3
13 y 14	1.00	-1.29E-04	-1.67E-04	30.1	1.28E-04	1.64E-04	28.6	-1.28E-04	-1.68E-04	31.2	1.28E-04	1.66E-04	30.0
15 y 16	1.50	-1.87E-04	-2.54E-04	35.6	1.81E-04	2.43E-04	34.6	-1.86E-04	-2.50E-04	34.6	1.79E-04	2.39E-04	33.6
17 y 18	2.00	-2.70E-04	-3.76E-04	38.9	2.57E-04	3.56E-04	38.3	-2.68E-04	-3.70E-04	38.2	2.54E-04	3.50E-04	37.7
19 y 20	2.50	-3.59E-04	-4.99E-04	38.9	3.42E-04	4.74E-04	38.6	-3.57E-04	-4.93E-04	38.1	3.40E-04	4.70E-04	38.4
Promedio		29.2			28.3			28.5			27.8		

**Tabla 38: Curvatura a nivel de base para máximos de deriva de piso en cada ciclo.
Muro WSH6.**

Muro WSH6		Ciclo Inicial						Ciclo Repetido					
Número de Ciclo	Drift	Dirección (+)			Dirección (-)			Dirección (+)			Dirección (-)		
		ϕ_{Ref}	ϕ_6 Ele. Piso	Error [%]	ϕ_{Ref}	ϕ_6 Ele. Piso	Error [%]	ϕ_{Ref}	ϕ_6 Ele. Piso	Error [%]	ϕ_{Ref}	ϕ_6 Ele. Piso	Error [%]
1 y 2	0.20	-1.95E-05	-2.08E-05	6.5	1.90E-05	2.25E-05	18.6	-2.12E-05	-2.41E-05	13.9	2.02E-05	2.39E-05	18.2
3 y 4	0.62	-6.68E-05	-9.21E-05	37.9	6.81E-05	9.25E-05	35.7	-6.85E-05	-9.44E-05	37.8	6.88E-05	9.25E-05	34.4
5 y 6	0.94	-1.10E-04	-1.63E-04	48.7	1.10E-04	1.62E-04	46.7	-1.09E-04	-1.59E-04	45.2	1.09E-04	1.57E-04	43.8
7 y 8	1.25	-1.50E-04	-2.36E-04	57.6	1.50E-04	2.36E-04	57.3	-1.49E-04	-2.32E-04	56.2	1.49E-04	2.32E-04	55.9
9 y 10	1.59	-1.96E-04	-3.38E-04	72.5	1.96E-04	3.39E-04	73.1	-1.95E-04	-3.37E-04	72.4	1.94E-04	3.34E-04	72.4
11 y 12	1.91	-2.46E-04	-4.70E-04	91.3	2.46E-04	4.72E-04	91.9	-2.50E-04	-5.07E-04	103.0	2.50E-04	5.09E-04	103.9
Promedio		52.4			53.9			54.7			54.8		

Apéndice M: Edificio Habitacional Prototipo

A continuación, se detalla la geometría de las plantas a lo largo de la altura del edificio habitacional prototipo. El modelo estructural lineal empleado para el diseño se implementa en ETABS.

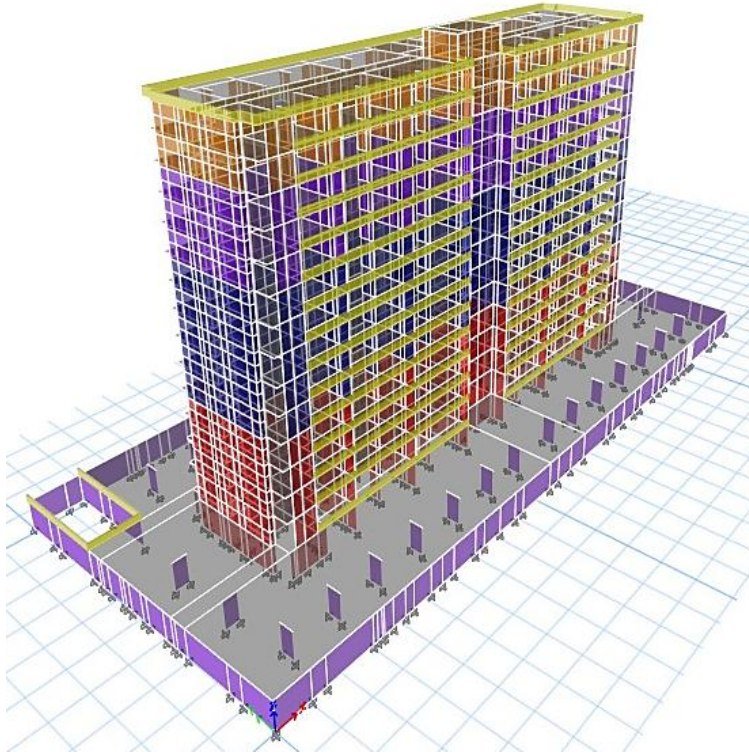


Figura 59: Vista isométrica del edificio habitacional prototipo.

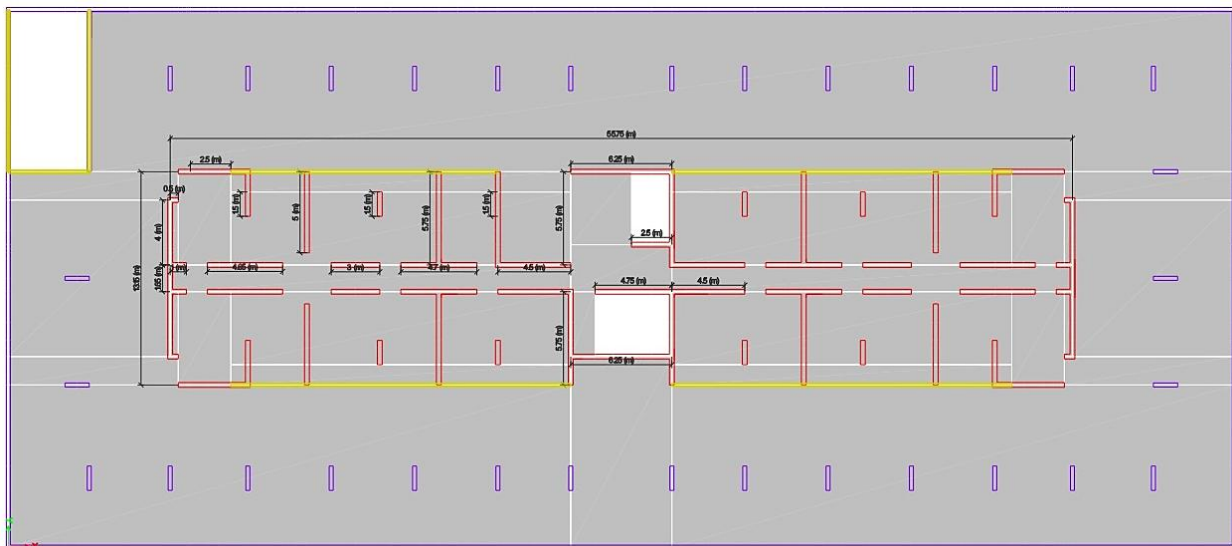


Figura 60: Planta CPS01 del edificio habitacional prototipo.

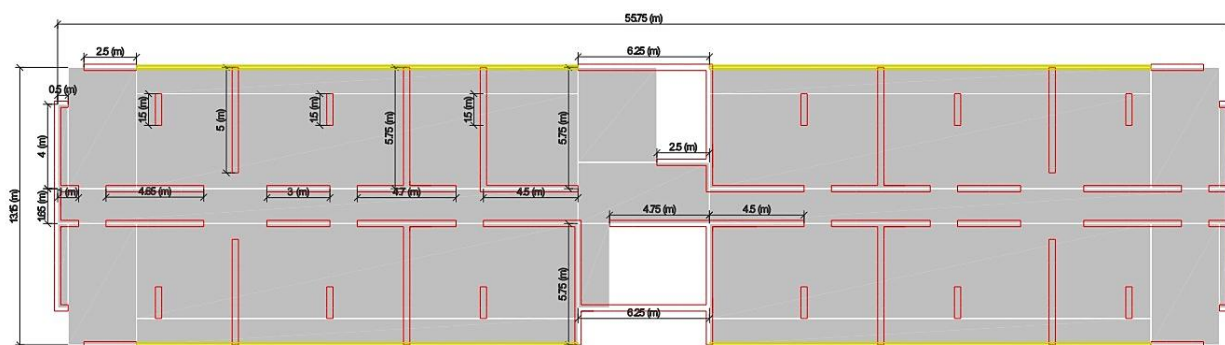


Figura 61: Planta CP01 del edificio habitacional, con muros de 30 cm de espesor.

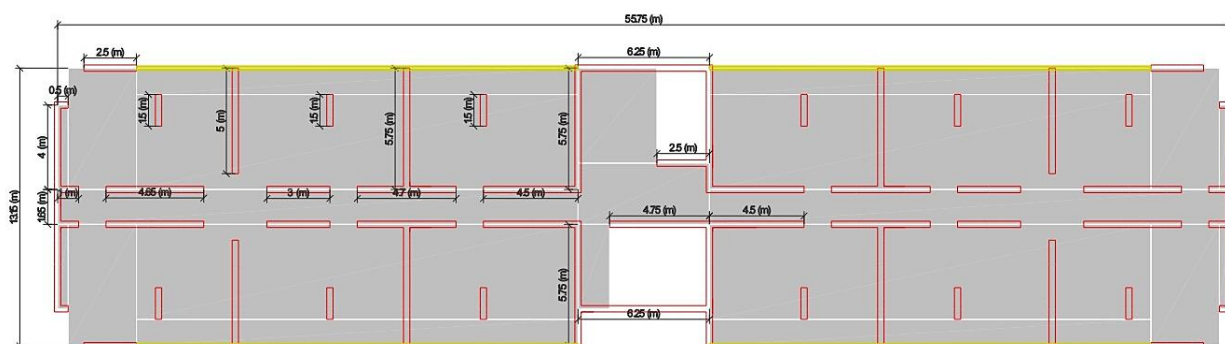


Figura 62: Plantas CP02 a CP04 del edificio habitacional, con muros de 30 cm de espesor.

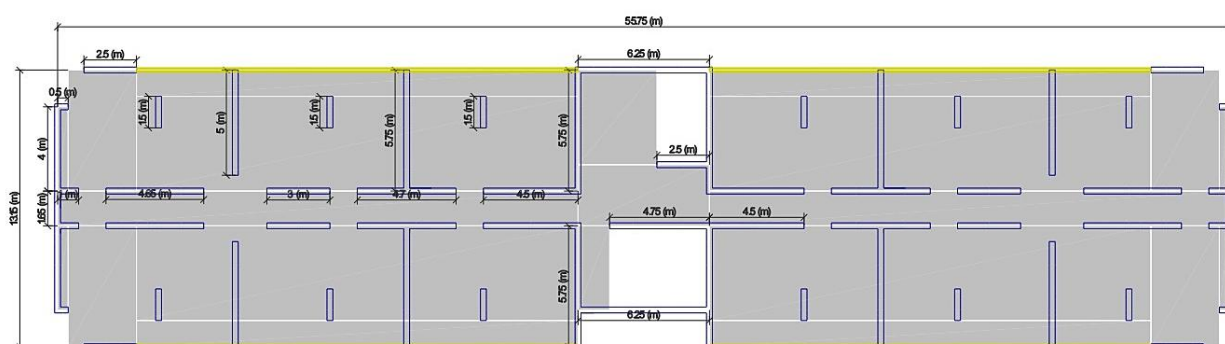


Figura 63: Plantas CP05 a CP09 del edificio habitacional, con muros de 28 cm de espesor.

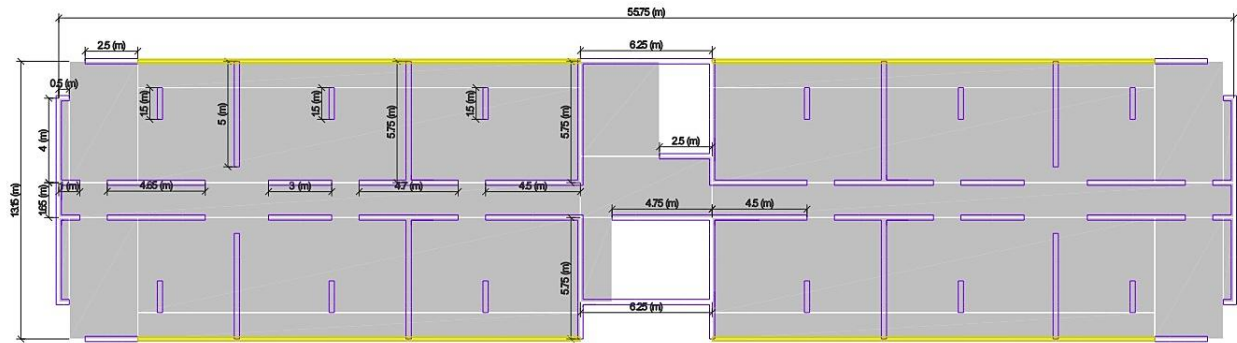


Figura 64: Plantas CP10 a CP12 del edificio habitacional, con muros de 25 cm de espesor.

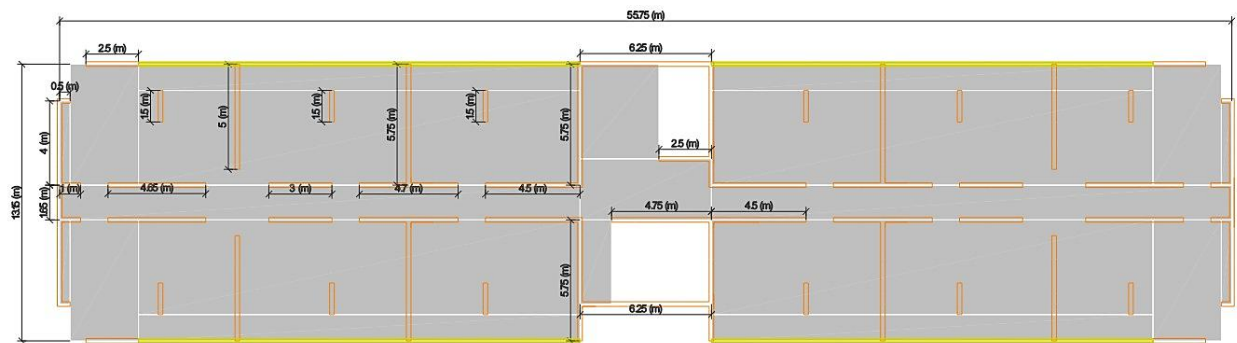


Figura 65: Planta CP13 del edificio habitacional, con muros de 22 cm de espesor.

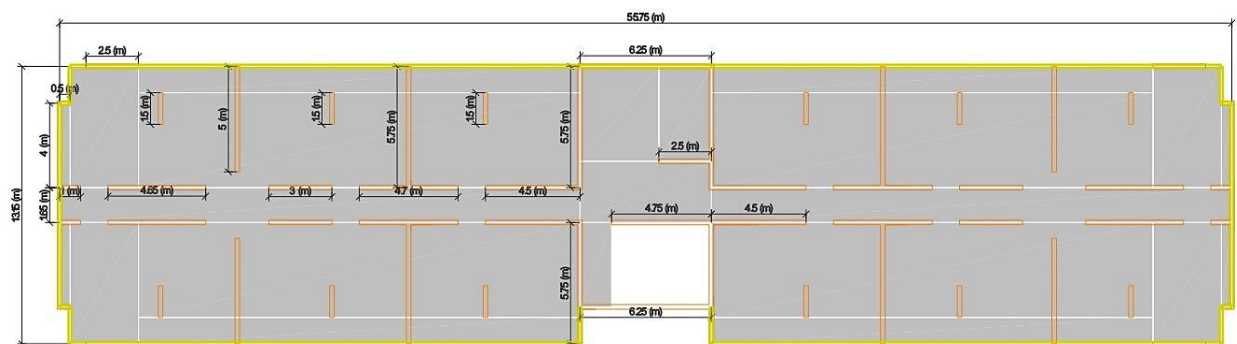


Figura 66: Planta CP14 del edificio habitacional, con muros de 22 cm de espesor.

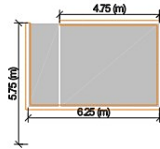


Figura 67: Planta Top del edificio habitacional, con muros de 22 cm de espesor.

Apéndice N: Diseño a Flexo Axial de Muros

Se presentan los diagramas de interacción y de momento-curvatura correspondientes a las secciones en la altura del eje de muro en estudio.

Muro de 30 cm de Espesor (M30)

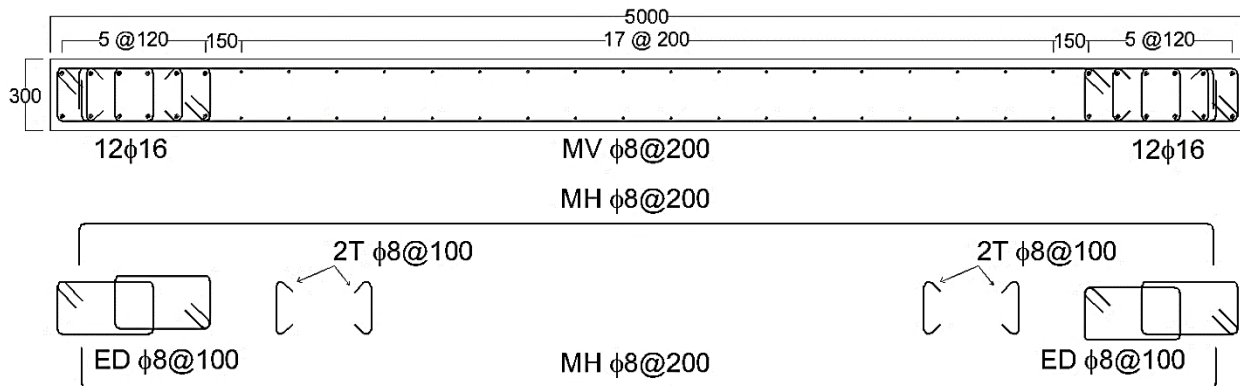


Figura 68: Sección transversal del muro de 30 cm (niveles CPS01-CP04).

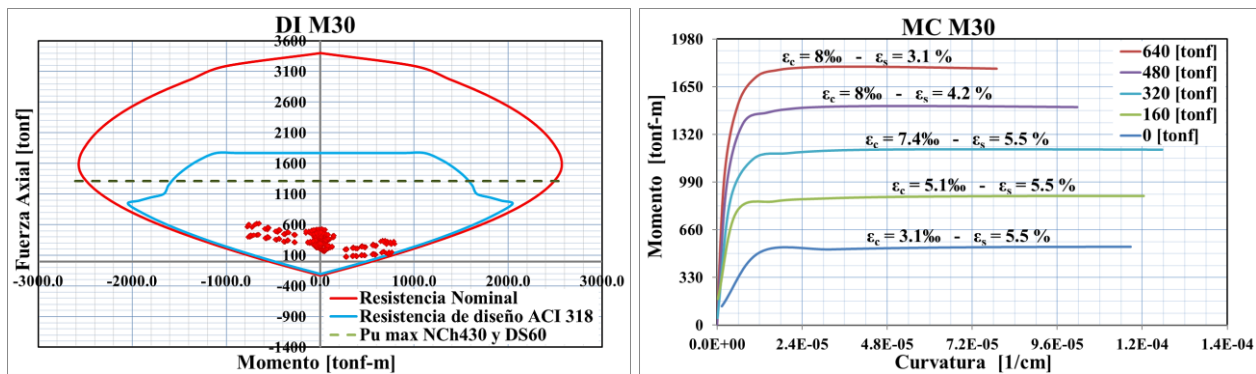


Figura 69: Diagramas de interacción y momento-curvatura del muro de 30 cm de espesor.

Muro de 28 cm de Espesor (M28)

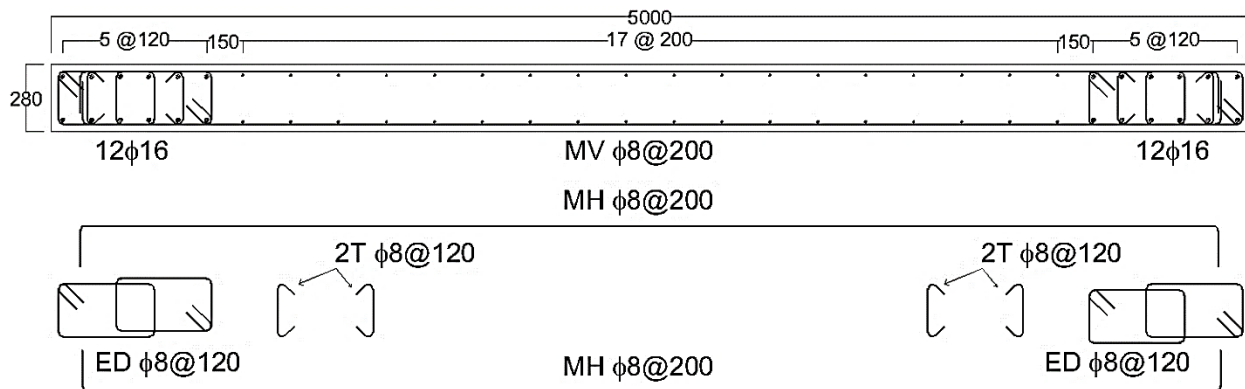


Figura 70: Sección transversal del muro de 28 cm (niveles CP05–CP09).

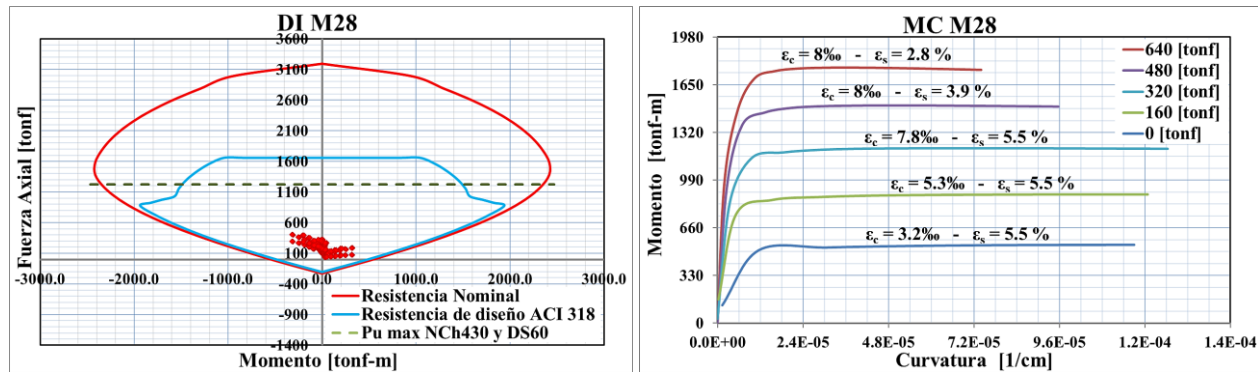


Figura 71: Diagramas de interacción y momento-curvatura del muro de 28 cm de espesor.

Muro de 25 cm de Espesor (M25)

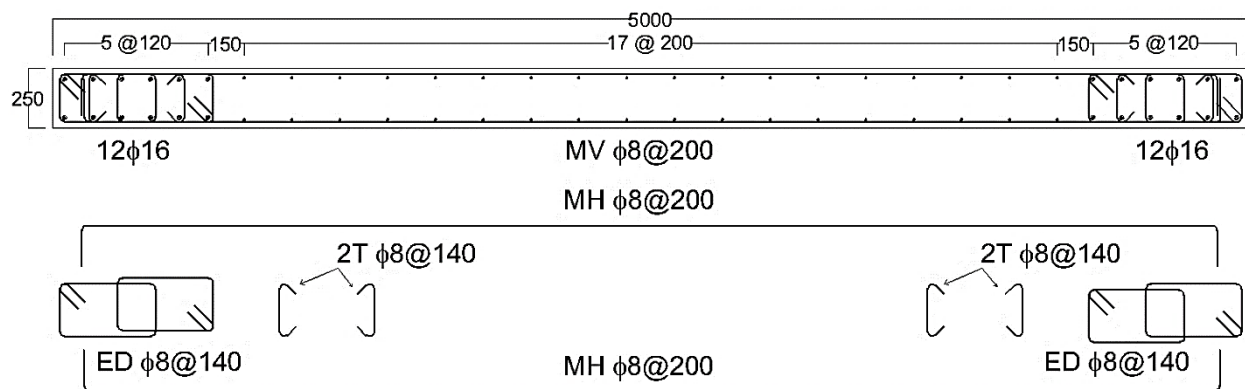


Figura 72: Sección transversal del muro de 25 cm (niveles CP10–CP12).

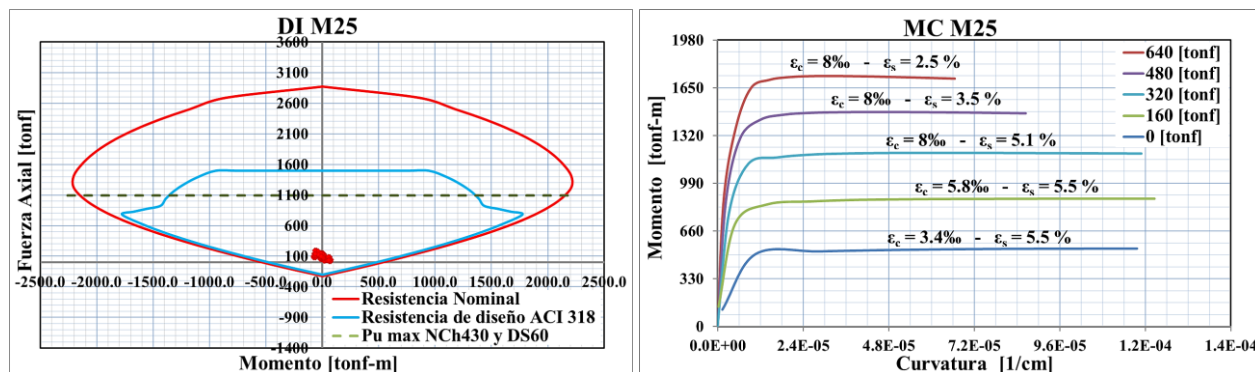


Figura 73: Diagramas de interacción y momento-curvatura del muro de 25 cm de espesor.

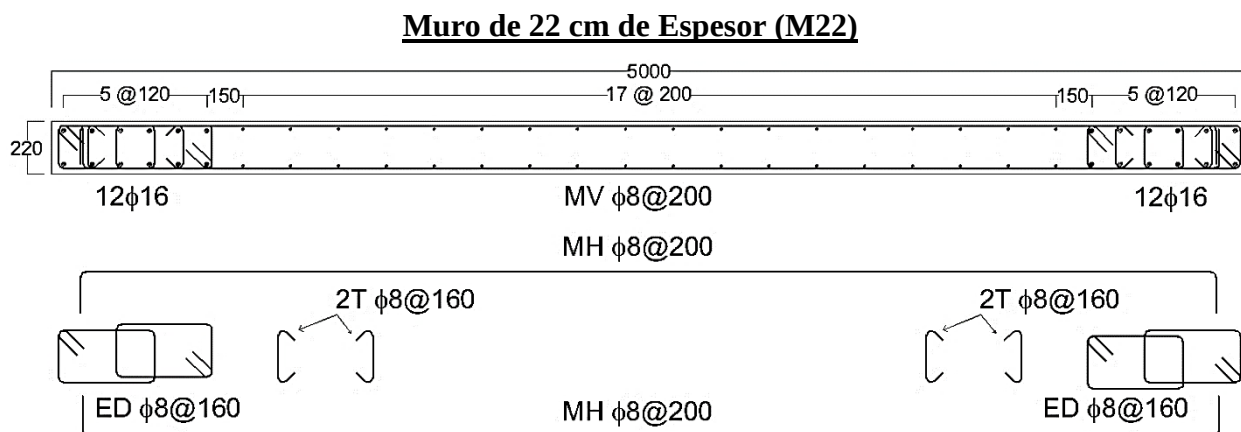


Figura 74: Sección transversal del muro de 22 cm (niveles CP13–CP14).

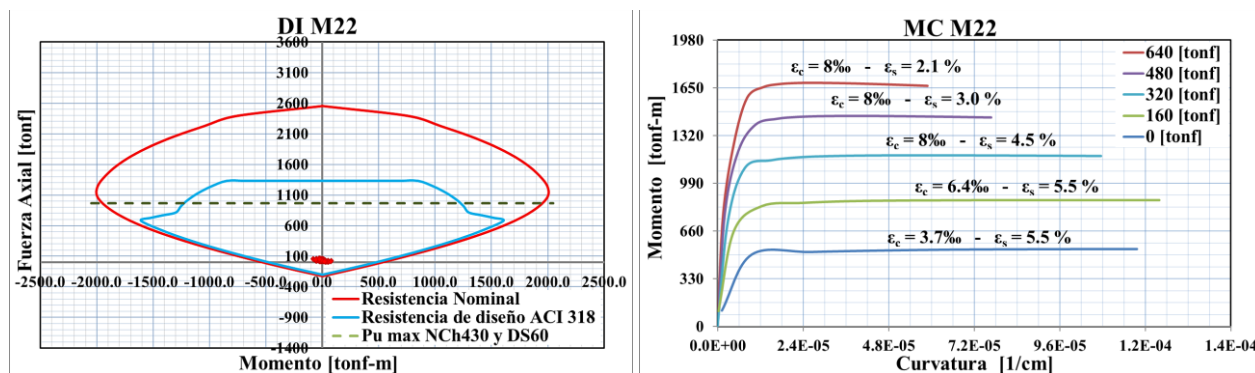


Figura 75: Diagramas de interacción y momento-curvatura del muro de 22 cm de espesor.

Apéndice O: Parámetros de Modelación de Eje de Muro

Se presentan los parámetros de modelación para las distintas secciones en la altura del eje de muro en estudio. El comportamiento del hormigón se define mediante el modelo uniaxial Concrete07, mientras que el del acero se describe mediante el modelo SteelMPF, ambos disponibles en la librería OpenSees.

Muro de 30 cm de Espesor – Pisos CPS01 y CP01 (M30 A)

Tabla 39: Parámetros de modelación de sección M30A – Comportamiento del hormigón.

Hormigón No Confinado – Concrete07				Hormigón Confinado – Concrete07			
Método:	Estándar	Regularizado		Método:	Estándar	Regularizado	
Mallado:	Todos	Ref.	4 Ele.	Mallado:	Todos	Ref.	4 Ele.
f'_c [MPa]	20.84	20.84	20.84	f'_{cc} [MPa]	27.11	27.11	27.11
ε_c	0.002	0.002	0.002	ε_{cc}	0.00501	0.00501	0.00501
E_c [MPa]	23413.6	23413.6	23413.6	E_{cc} [MPa]	27371.2	27371.2	27371.2
f_t [MPa]	1.55	1.55	1.55	f_t [MPa]	1.55	1.55	1.55
ε_t	0.00008	0.00008	0.00008	ε_t	0.00008	0.00008	0.00008
x_{cr}^+	1.007	1.007	1.007	x_{cr}^+	1.0035	1.0035	1.0035
x_{cr}^-	1.085	1.056	1.028	x_{cr}^-	1.085	1.077	1.048
r	4.5	25.563	25.563	r_t	4	31.969	31.969

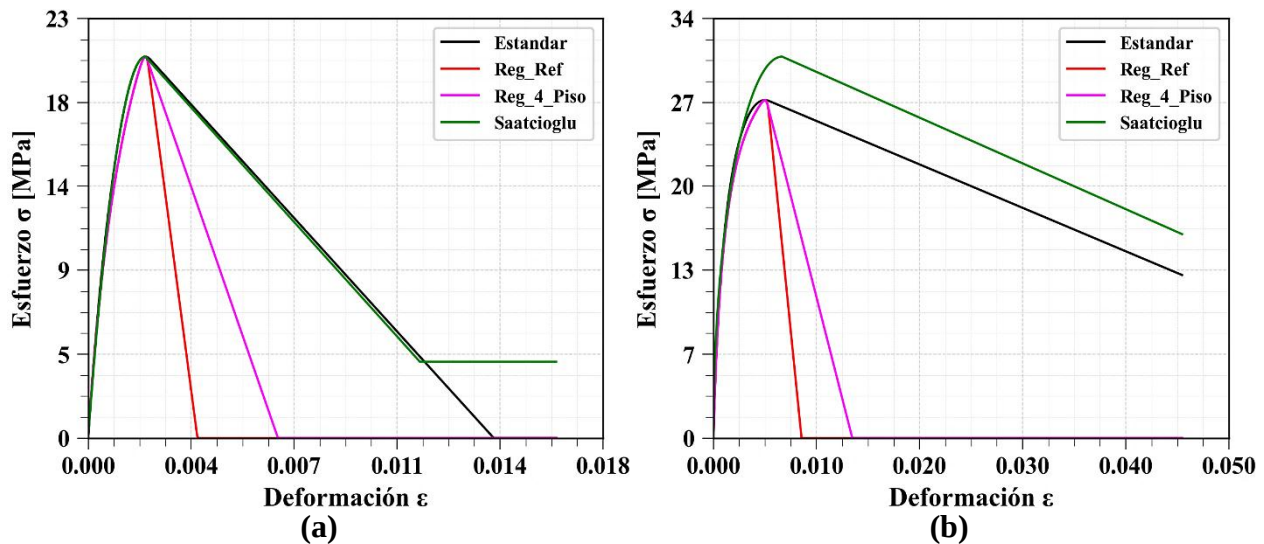


**Figura 76: Modelo constitutivo del hormigón no confinado (a) y confinado (b).
Sección M30 (A).**

Tabla 40: Parámetros de modelación de sección M30A – Comportamiento del acero.

Acero de Alma - SteelMPF				Acero de Elemento de Borde - SteelMPF			
Método:	Estándar	Regularizado		Método:	Estándar	Regularizado	
Mallado:	Todos	Ref.	4 Ele.	Mallado:	Todos	Ref.	4 Ele.
f_{yp} [MPa]	270.64	270.64	270.64	f_{yp} [MPa]	369.16	369.16	369.16
f_{yn} [MPa]	411.88	411.88	411.88	f_{yn} [MPa]	411.88	411.88	411.88
E_0 [MPa]	200000	200000	200000	E_0 [MPa]	200000	200000	200000
b_p	0.02858	0.02858	0.02858	b_p	0.01279	0.01279	0.01279
b_n	0.0132	0.09901	0.04951	b_n	0.0132	0.09901	0.04951
R_0	20	20	20	R_0	20	20	20
c_{R1}	0.925	0.925	0.925	c_{R1}	0.925	0.925	0.925
c_{R2}	0.0015	0.0015	0.0015	c_{R2}	0.0015	0.0015	0.0015

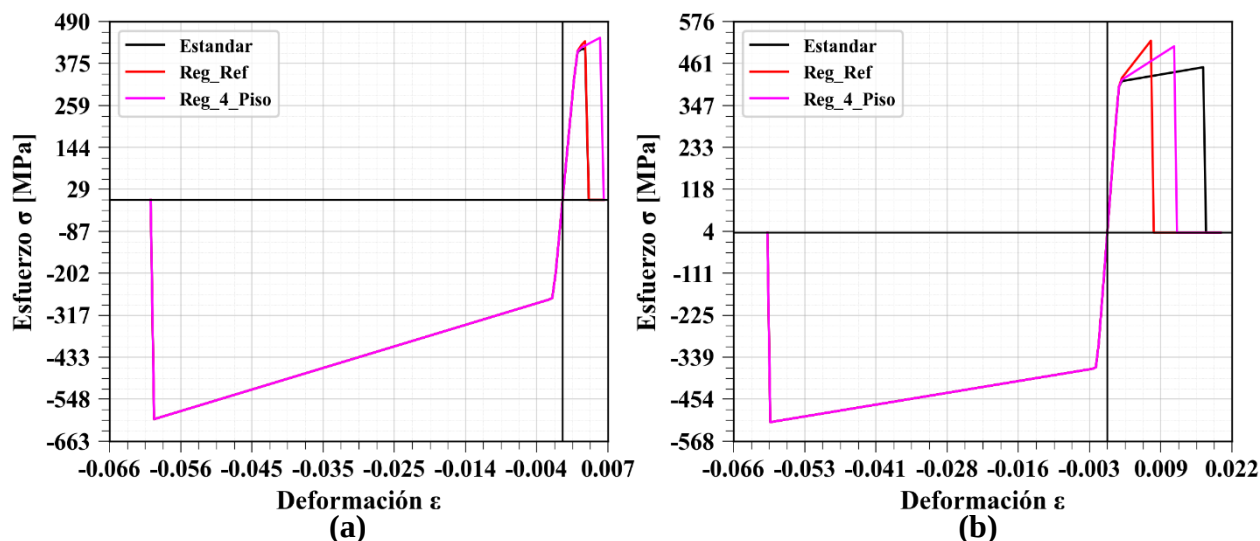


Figura 77: Modelo constitutivo del acero de alma (a) y elemento de borde (b). Sección M30 (A).

Muro de 30 cm de Espesor – Pisos CP02 - CP04 (M30 B)

Tabla 41: Parámetros de modelación de sección M30B – Comportamiento del hormigón.

Hormigón No Confinado – Concrete07				Hormigón Confinado – Concrete07			
Método:	Estándar	Regularizado		Método:	Estándar	Regularizado	
Mallado:	Todos	Ref.	4 Ele.	Mallado:	Todos	Ref.	4 Ele.
f'_c [MPa]	20.84	20.84	20.84	f'_{cc} [MPa]	27.11	27.11	27.11
ε_c	0.002	0.002	0.002	ε_{cc}	0.00501	0.00501	0.00501
E_c [MPa]	23413.6	23413.6	23413.6	E_{cc} [MPa]	27371.2	27371.2	27371.2
f_t [MPa]	1.55	1.55	1.55	f_t [MPa]	1.55	1.55	1.55
ε_t	0.00008	0.00008	0.00008	ε_t	0.00008	0.00008	0.00008
x_{cr}^+	1.007	1.007	1.007	x_{cr}^+	1.0035	1.0035	1.0035
x_{cr}^-	1.085	1.173	1.025	x_{cr}^-	1.085	1.174	1.043
r	4.5	25.563	25.563	r_t	4	31.969	31.969

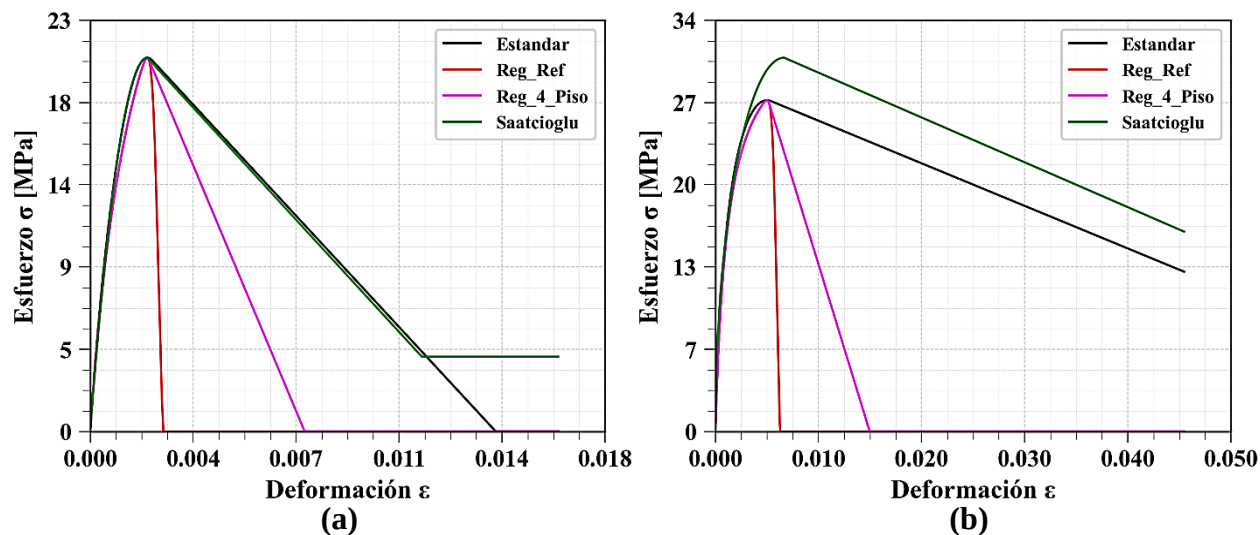


Figura 78: Modelo del hormigón no confinado (a) y confinado (b). Sección M30 (B).

Tabla 42: Parámetros de modelación de sección M30A – Comportamiento del acero.

Acero de Alma - SteelMPF				Acero de Elemento de Borde - SteelMPF			
Método:	Estándar	Regularizado		Método:	Estándar	Regularizado	
Mallado:	Todos	Ref.	4 Ele.	Mallado:	Todos	Ref.	4 Ele.
f_{yp} [MPa]	270.64	270.64	270.64	f_{yp} [MPa]	369.16	369.16	369.16
f_{yn} [MPa]	411.88	411.88	411.88	f_{yn} [MPa]	411.88	411.88	411.88
E_0 [MPa]	200000	200000	200000	E_0 [MPa]	200000	200000	200000
b_p	0.02858	0.02858	0.02858	b_p	0.01279	0.01279	0.01279
b_n	0.0132	0.17162	0.0429	b_n	0.0132	0.17162	0.0429
R_0	20	20	20	R_0	20	20	20
c_{R1}	0.925	0.925	0.925	c_{R1}	0.925	0.925	0.925
c_{R2}	0.0015	0.0015	0.0015	c_{R2}	0.0015	0.0015	0.0015

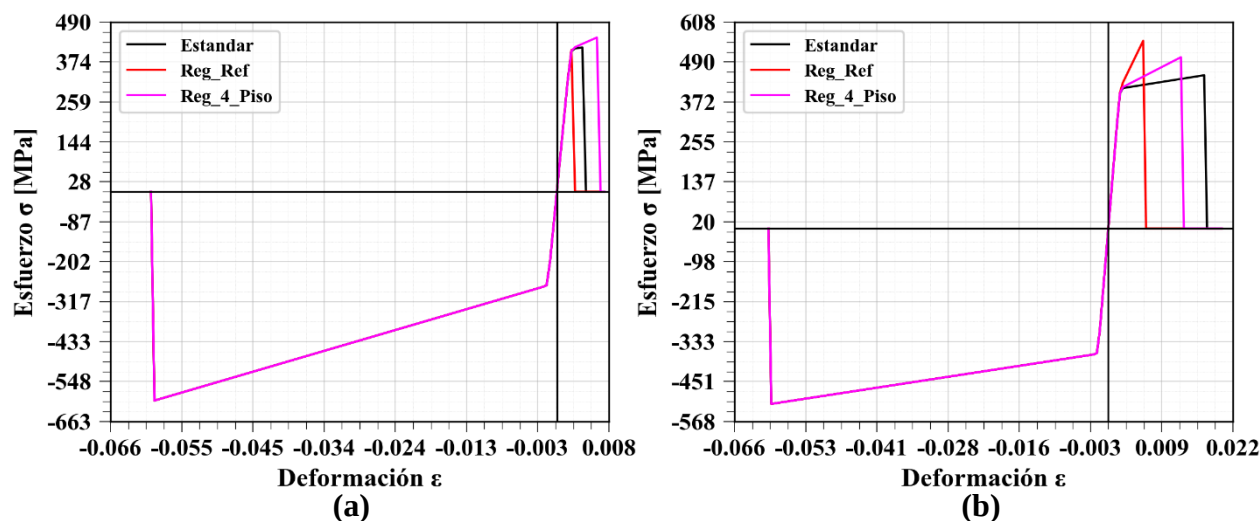


Figura 79: Modelo del acero de alma (a) y elemento de borde (b) – Sección M30 (B).

Muro de 28 cm de Espesor – Pisos CP05 - CP09 (M28)

Tabla 43: Parámetros de modelación de sección M28 – Comportamiento del hormigón.

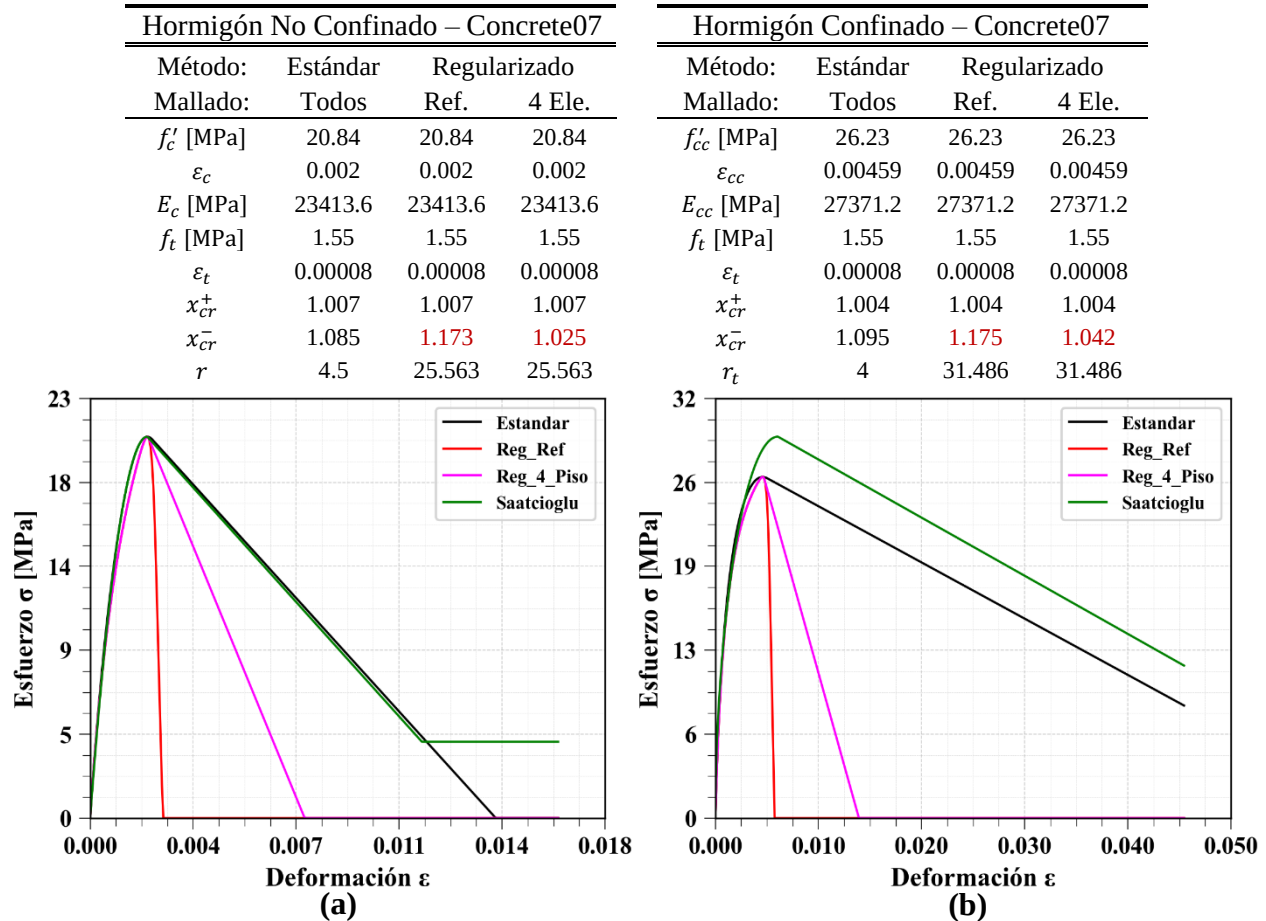


Figura 80: Modelo del hormigón no confinado (a) y confinado (b)– Sección M28.

Tabla 44: Parámetros de modelación de sección M28 – Comportamiento del acero.

Acero de Alma - SteelMPF				Acero de Elemento de Borde - SteelMPF			
Método:	Estándar	Regularizado		Método:	Estándar	Regularizado	
Mallado:	Todos	Ref.	4 Ele.	Mallado:	Todos	Ref.	4 Ele.
f_{yp} [MPa]	278.15	278.15	278.15	f_{yp} [MPa]	370.1	370.1	370.1
f_{yn} [MPa]	411.88	411.88	411.88	f_{yn} [MPa]	411.88	411.88	411.88
E_0 [MPa]	200000	200000	200000	E_0 [MPa]	200000	200000	200000
b_p	0.02274	0.02737	0.02737	b_p	0.01264	0.01264	0.01264
b_n	0.0132	0.17162	0.0429	b_n	0.0132	0.17162	0.0429
R_0	20	20	20	R_0	20	20	20
c_{R1}	0.925	0.925	0.925	c_{R1}	0.925	0.925	0.925
c_{R2}	0.0015	0.0015	0.0015	c_{R2}	0.0015	0.0015	0.0015

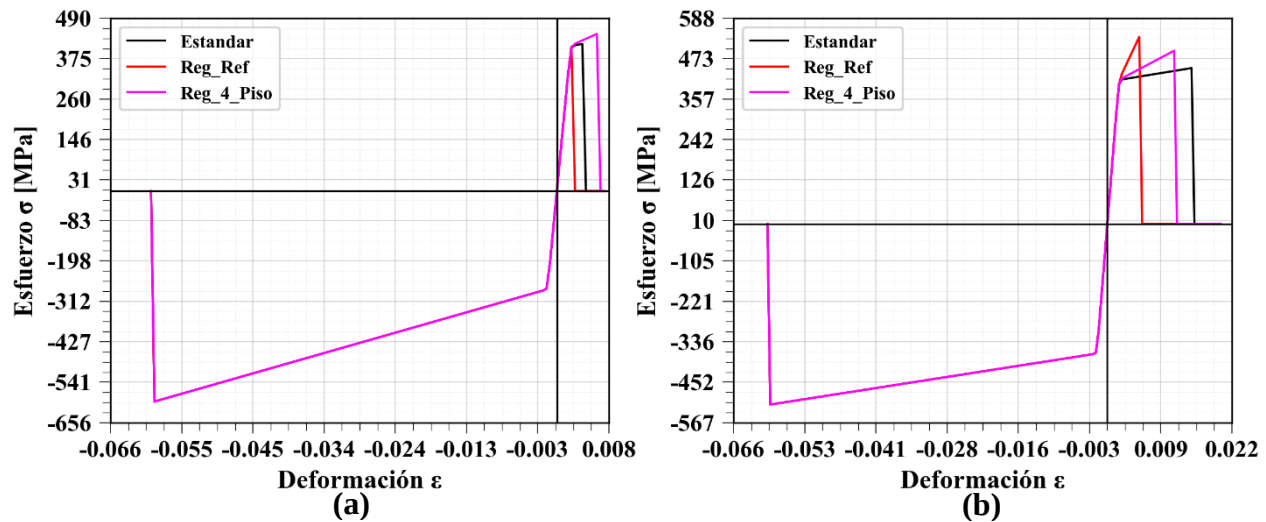


Figura 81: Modelo del acero de alma (a) y elemento de borde (b) – Sección M28.

Muro de 25 cm de Espesor – Pisos CP10 – CP12 (M25)

Tabla 45: Parámetros de modelación de sección M25 – Comportamiento del hormigón.

Hormigón No Confinado – Concrete07				Hormigón Confinado – Concrete07			
Método:	Estándar	Regularizado		Método:	Estándar	Regularizado	
Mallado:	Todos	Ref.	4 Ele.	Mallado:	Todos	Ref.	4 Ele.
f'_c [MPa]	20.84	20.84	20.84	f'_{cc} [MPa]	25.58	25.58	25.58
ε_c	0.002	0.002	0.002	ε_{cc}	0.00428	0.00428	0.00428
E_c [MPa]	23413.6	23413.6	23413.6	E_{cc} [MPa]	27371.2	27371.2	27371.2
f_t [MPa]	1.55	1.55	1.55	f_t [MPa]	1.55	1.55	1.55
ε_t	0.00008	0.00008	0.00008	ε_t	0.00008	0.00008	0.00008
x_{cr}^+	1.007	1.007	1.007	x_{cr}^+	1.0045	1.0045	1.0045
x_{cr}^-	1.085	1.173	1.025	x_{cr}^-	1.097	1.174	1.041
r	4.5	25.563	25.563	r_t	4	31.227	31.227

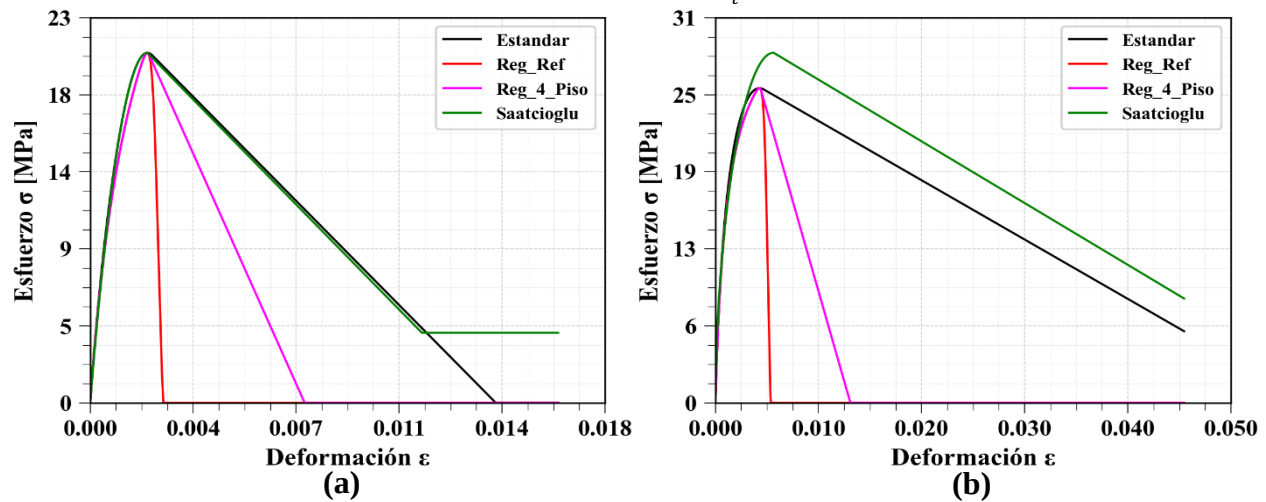


Figura 82: Modelo del hormigón no confinado (a) y confinado (b) – Sección M25.

Tabla 46: Parámetros de modelación de sección M25 – Comportamiento del acero.

Acero de Alma - SteelMPF				Acero de Elemento de Borde - SteelMPF			
Método:	Estándar	Regularizado		Método:	Estándar	Regularizado	
Mallado:	Todos	Ref.	4 Ele.	Mallado:	Todos	Ref.	4 Ele.
f_{yp} [MPa]	289.41	289.41	289.41	f_{yp} [MPa]	371.51	371.51	371.51
f_{yn} [MPa]	411.88	411.88	411.88	f_{yn} [MPa]	411.88	411.88	411.88
E_0 [MPa]	200000	200000	200000	E_0 [MPa]	200000	200000	200000
b_p	0.02557	0.02557	0.02557	b_p	0.01241	0.01241	0.01241
b_n	0.0132	0.17162	0.0429	b_n	0.0132	0.17162	0.0429
R_0	20	20	20	R_0	20	20	20
c_{R1}	0.925	0.925	0.925	c_{R1}	0.925	0.925	0.925
c_{R2}	0.0015	0.0015	0.0015	c_{R2}	0.0015	0.0015	0.0015

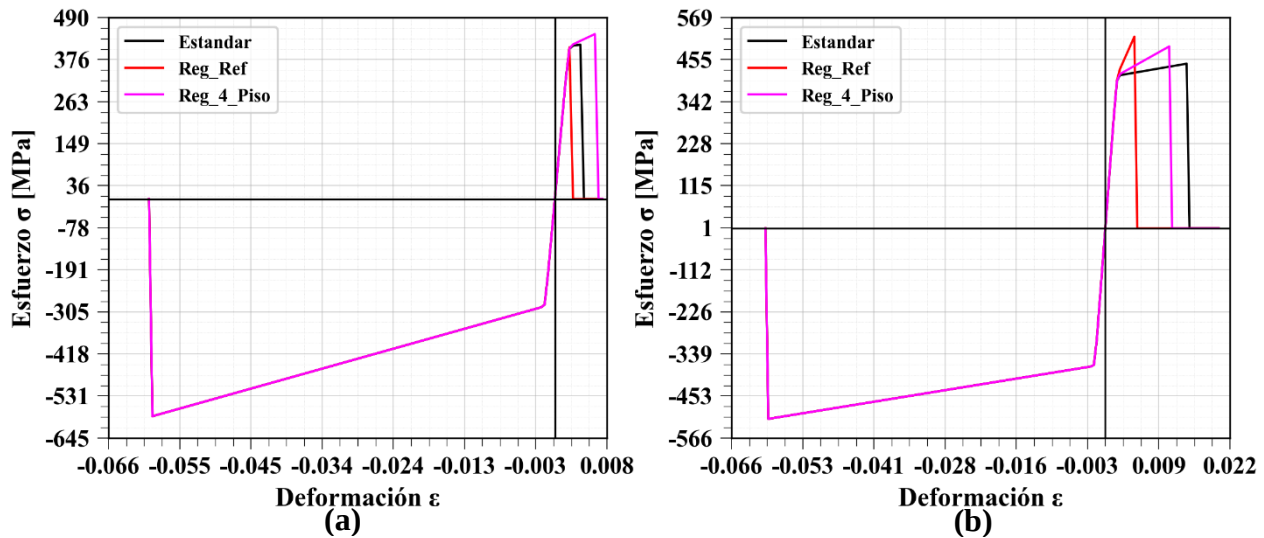


Figura 83: Modelo del acero de alma (a) y elemento de borde (b) – Sección M25.

Muro de 22 cm de Espesor – Pisos CP13 – CP14 (M22)

Tabla 47: Parámetros de modelación de sección M22 – Comportamiento del hormigón.

Hormigón No Confinado – Concrete07				Hormigón Confinado – Concrete07			
Método:	Estándar	Regularizado		Método:	Estándar	Regularizado	
Mallado:	Todos	Ref.	4 Ele.	Mallado:	Todos	Ref.	4 Ele.
f'_c [MPa]	20.84	20.84	20.84	f'_{cc} [MPa]	25.08	25.08	25.08
ε_c	0.002	0.002	0.002	ε_{cc}	0.00404	0.00404	0.00404
E_c [MPa]	23413.6	23413.6	23413.6	E_{cc} [MPa]	27371.2	27371.2	27371.2
f_t [MPa]	1.55	1.55	1.55	f_t [MPa]	1.55	1.55	1.55
ε_t	0.00008	0.00008	0.00008	ε_t	0.00008	0.00008	0.00008
x_{cr}^+	1.007	1.007	1.007	x_{cr}^+	1.005	1.005	1.005
x_{cr}^-	1.085	1.173	1.025	x_{cr}^-	1.095	1.174	1.04
r	4.5	25.563	25.563	r_t	4	31.005	31.005

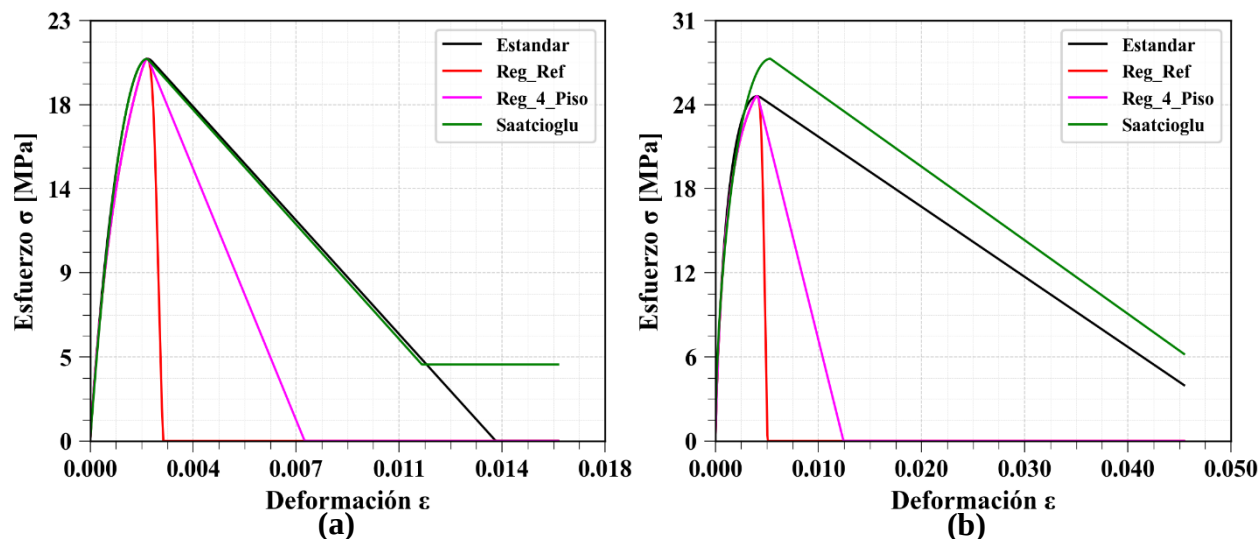


Figura 84: Modelo del hormigón no confinado (a) y confinado (b) – Sección M22.

Tabla 48: Parámetros de modelación de sección M22 – Comportamiento del acero.

Acero de Alma - SteelMPF				Acero de Elemento de Borde - SteelMPF			
Método:	Estándar	Regularizado		Método:	Estándar	Regularizado	
Mallado:	Todos	Ref.	4 Ele.	Mallado:	Todos	Ref.	4 Ele.
f_{yp} [MPa]	372.91	372.91	372.91	f_{yp} [MPa]	300.67	300.67	300.67
f_{yn} [MPa]	411.88	411.88	411.88	f_{yn} [MPa]	411.88	411.88	411.88
E_0 [MPa]	200000	200000	200000	E_0 [MPa]	200000	200000	200000
b_p	0.01219	0.01219	0.01219	b_p	0.02376	0.02376	0.02376
b_n	0.0132	0.17162	0.0429	b_n	0.0132	0.17162	0.0429
R_0	20	20	20	R_0	20	20	20
c_{R1}	0.925	0.925	0.925	c_{R1}	0.925	0.925	0.925
c_{R2}	0.0015	0.0015	0.0015	c_{R2}	0.0015	0.0015	0.0015

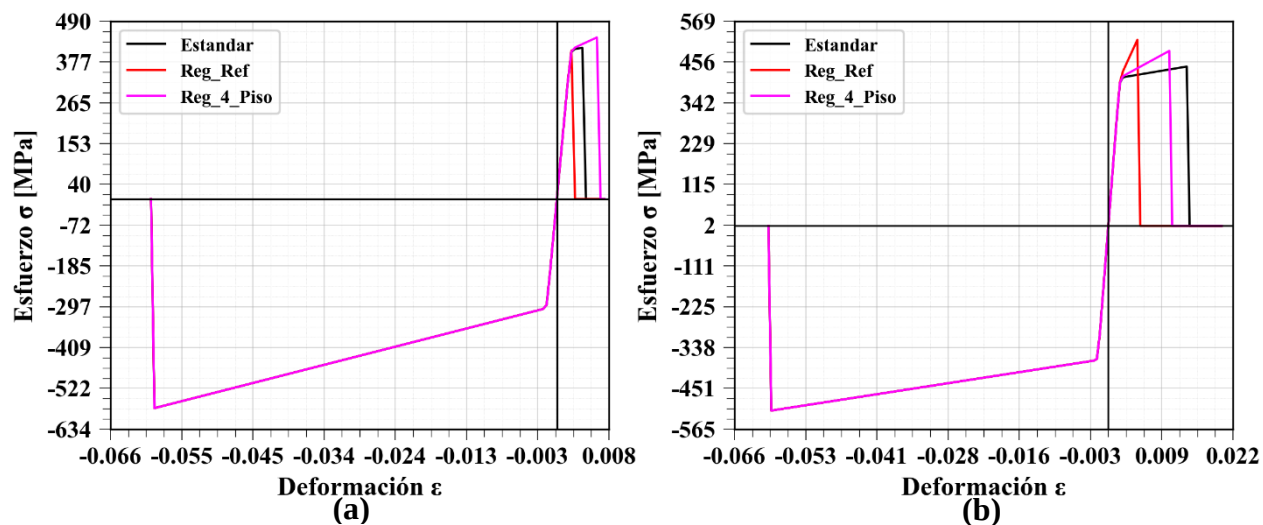


Figura 85: Modelo del acero de alma (a) y elemento de borde (b) – Sección M22.

Apéndice P: Registro Sísmico

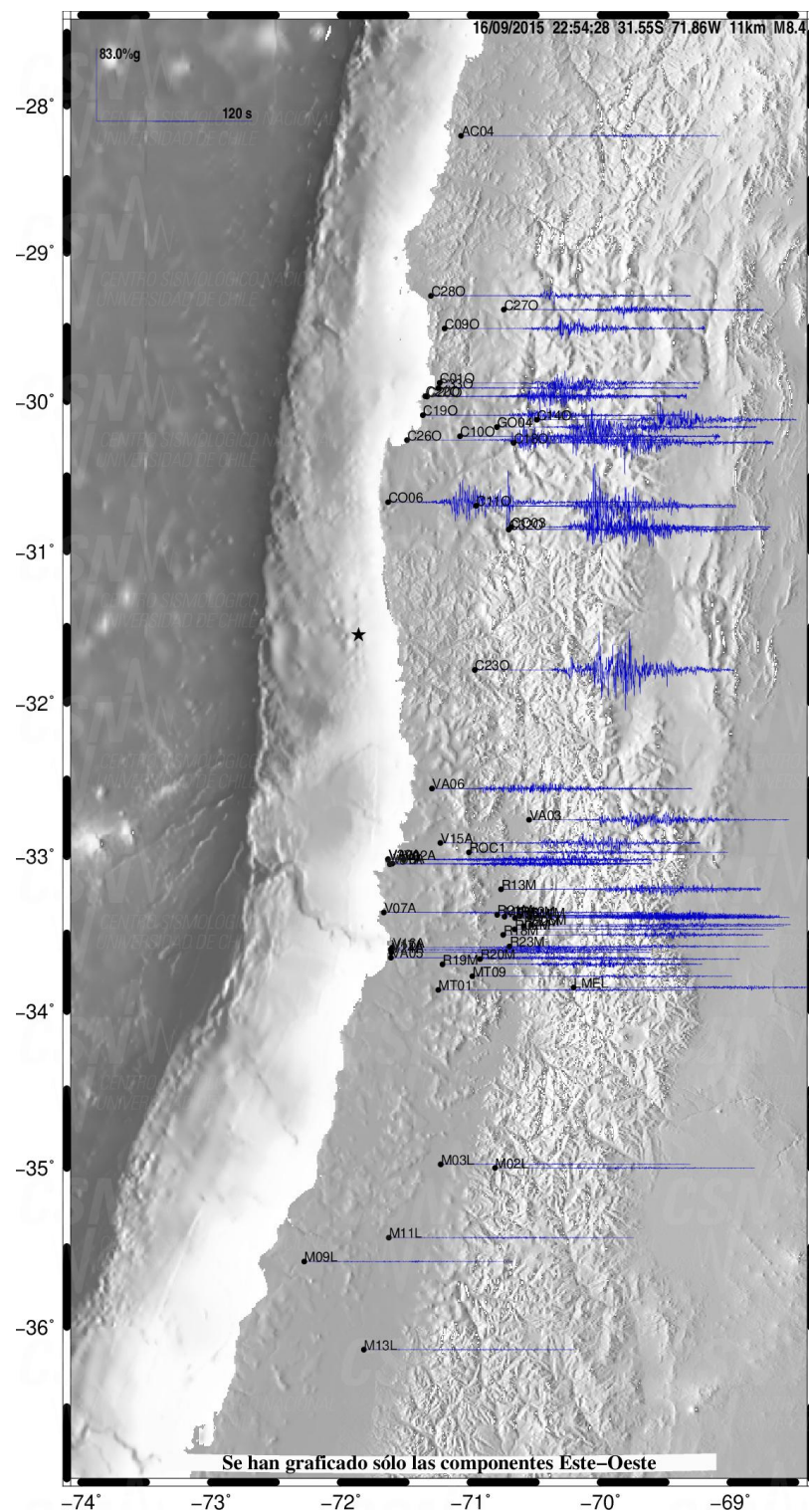


Figura 86: Registro sísmico Coquimbo (2015). Fuente: CSN Universidad de Chile.

Apéndice Q: Resultados Eje de Muro

Se presentan los resultados del eje de muro en estudio, obtenidos a partir de un registro sísmico escalado (escalado precolapso = 20), considerando cada calibración de los parámetros del material.

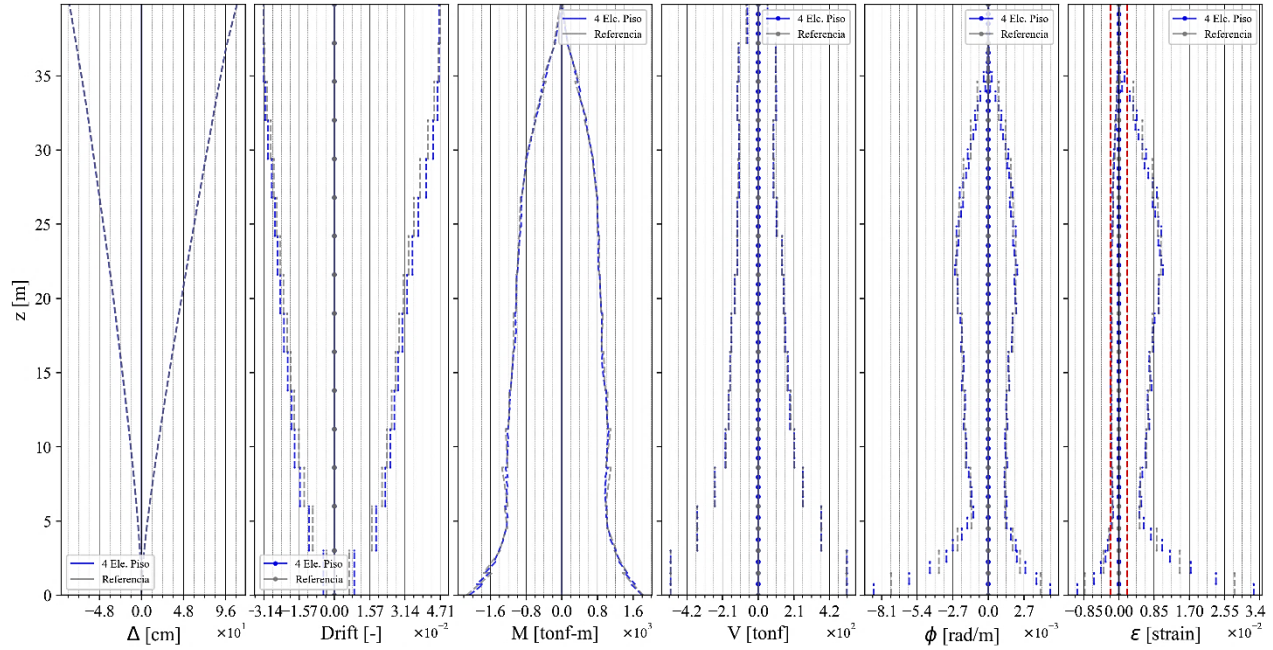


Figura 87: Resultados de eje de muro ante registro sísmico. Comportamiento regularizado.

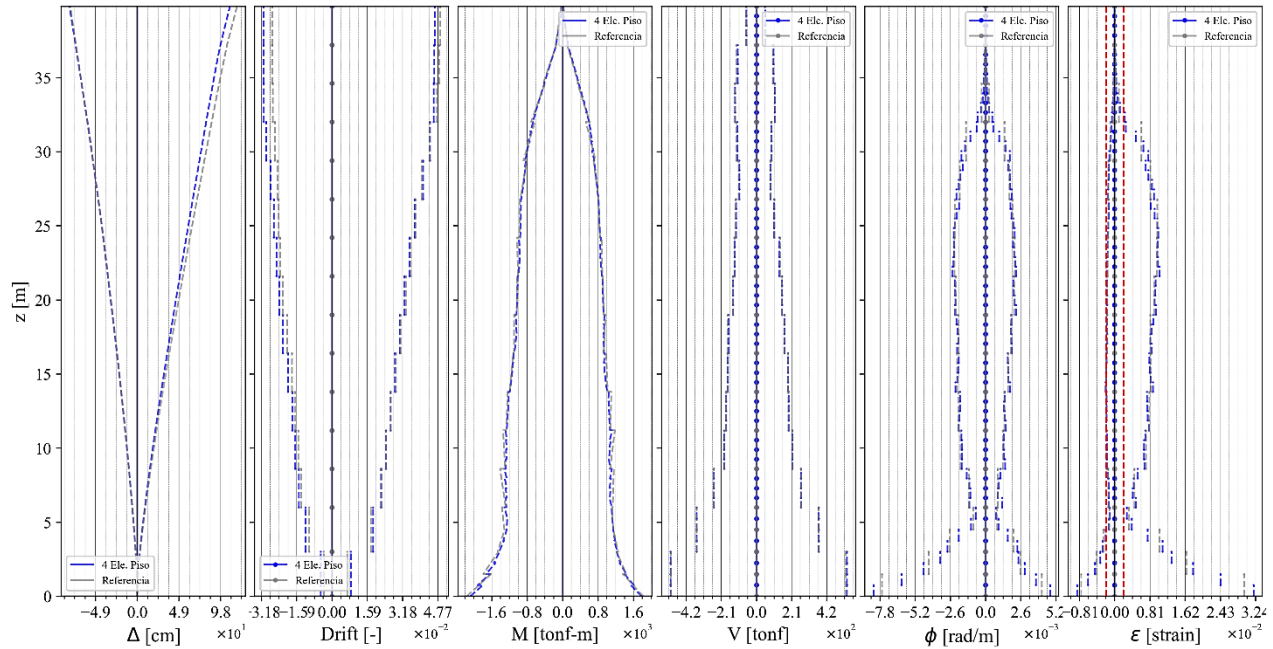
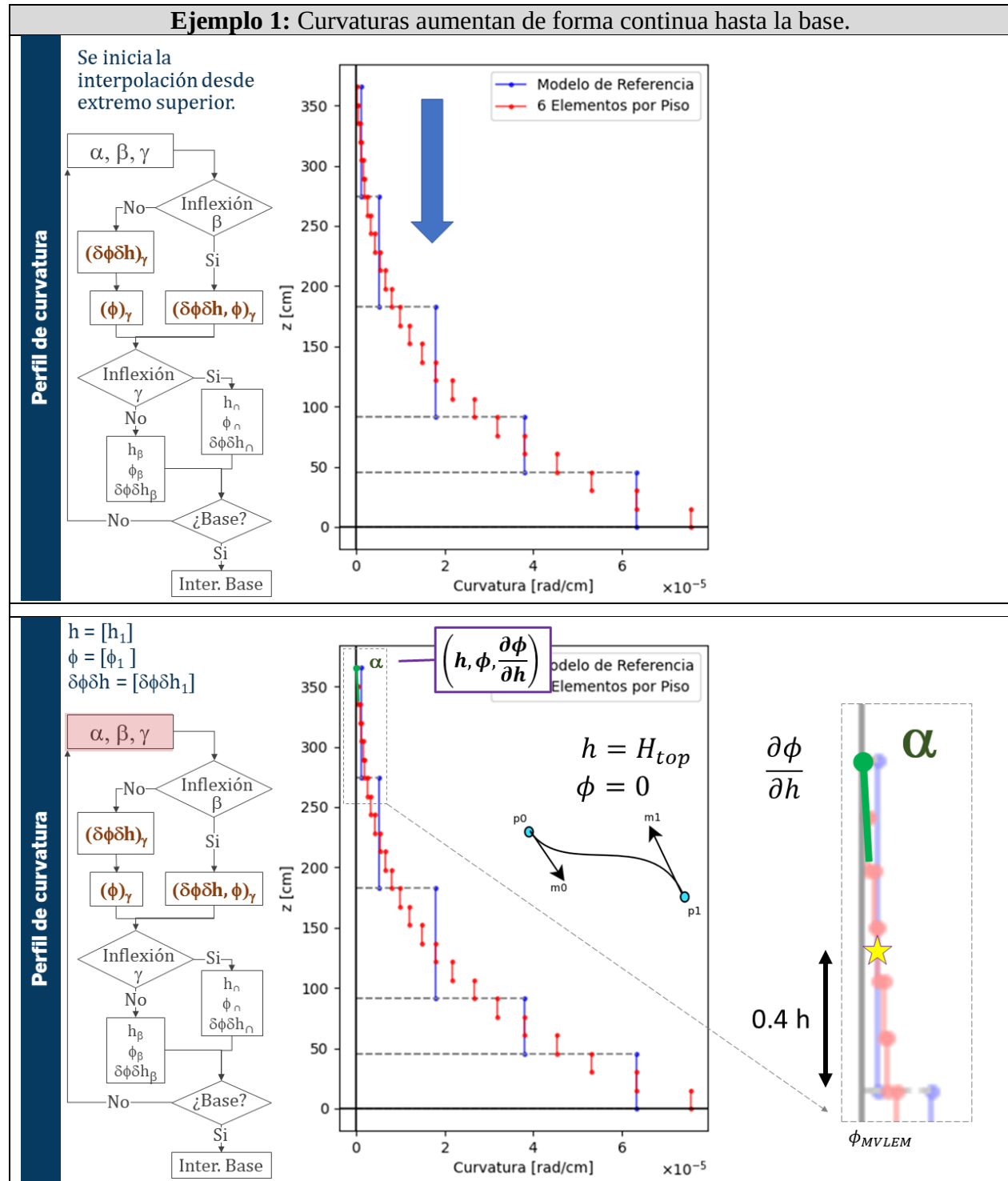


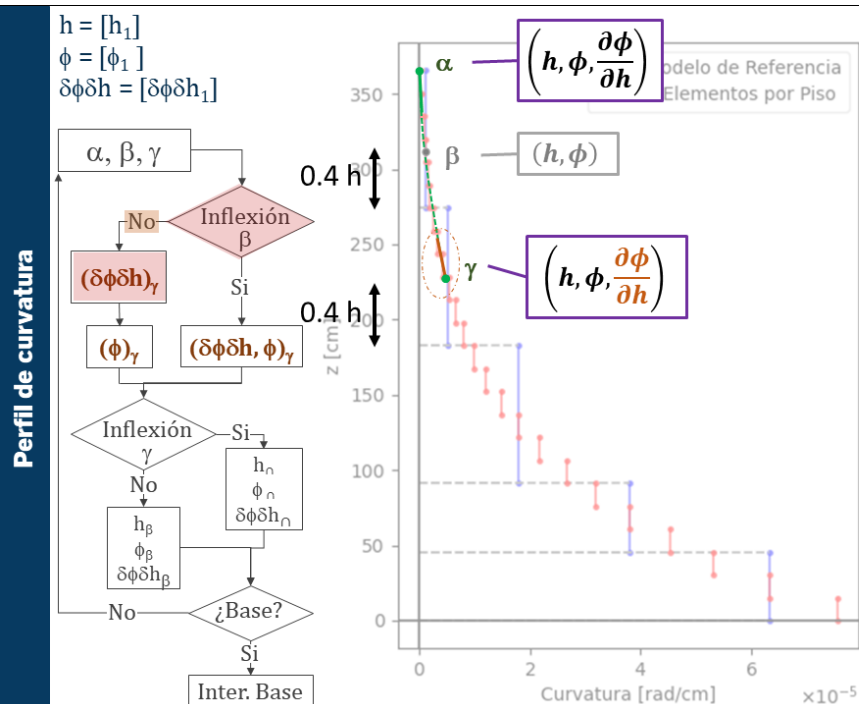
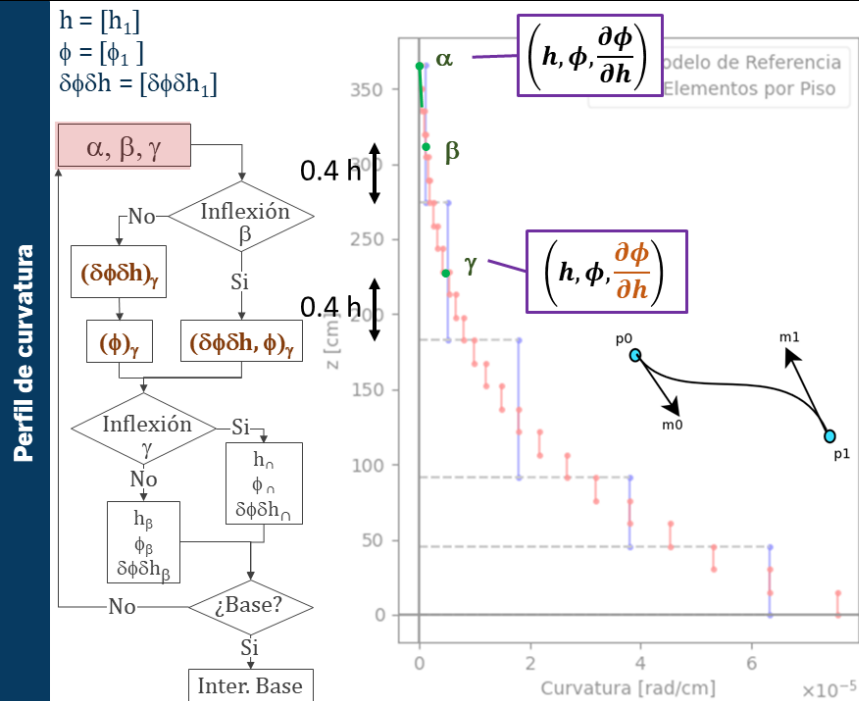
Figura 88: Resultados de eje de muro ante registro sísmico. Comportamiento estándar.

Apéndice R: Algoritmo de Posprocesamiento de Curvatura

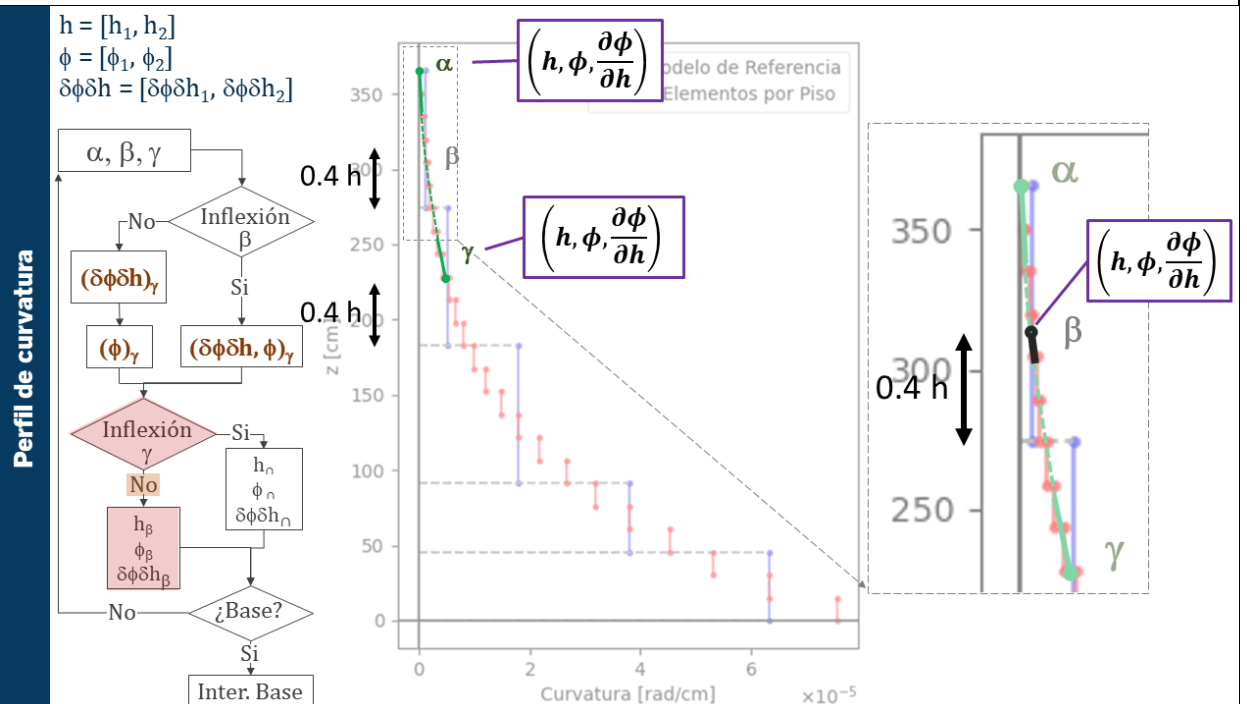
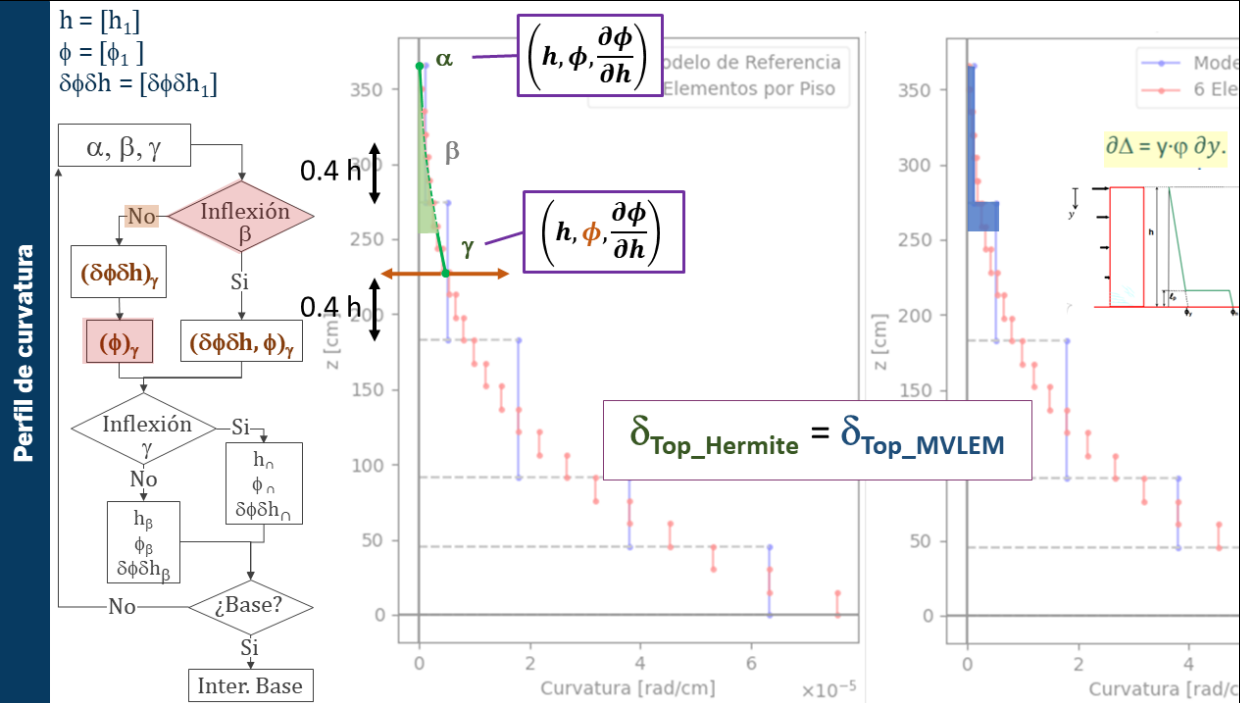
Se detalla el procedimiento de interpolación utilizado por el algoritmo de posprocesamiento para estimar la curvatura en la altura.



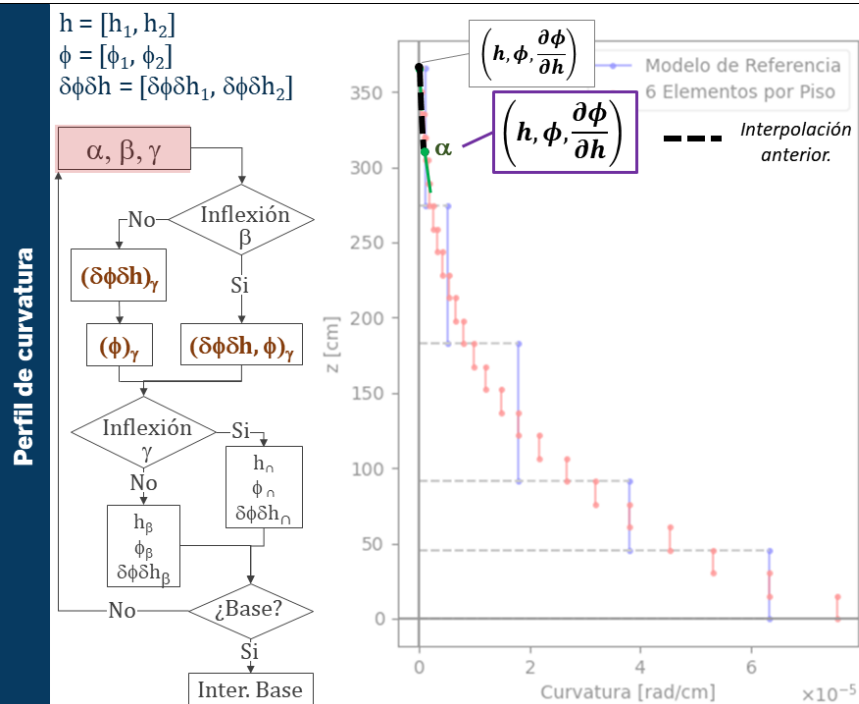
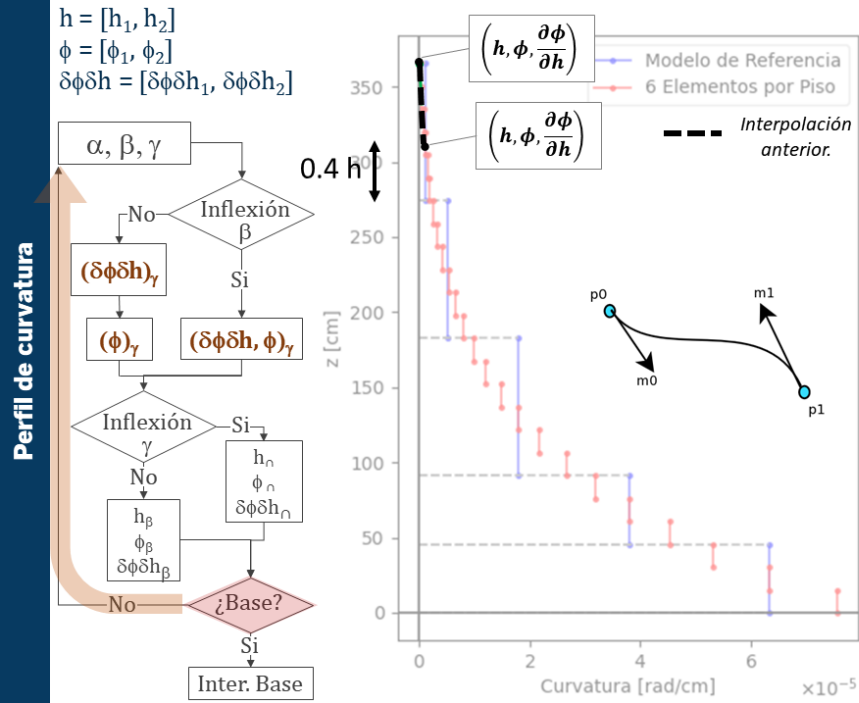
Ejemplo 1: Curvaturas aumentan de forma continua hasta la base. (Continuación)



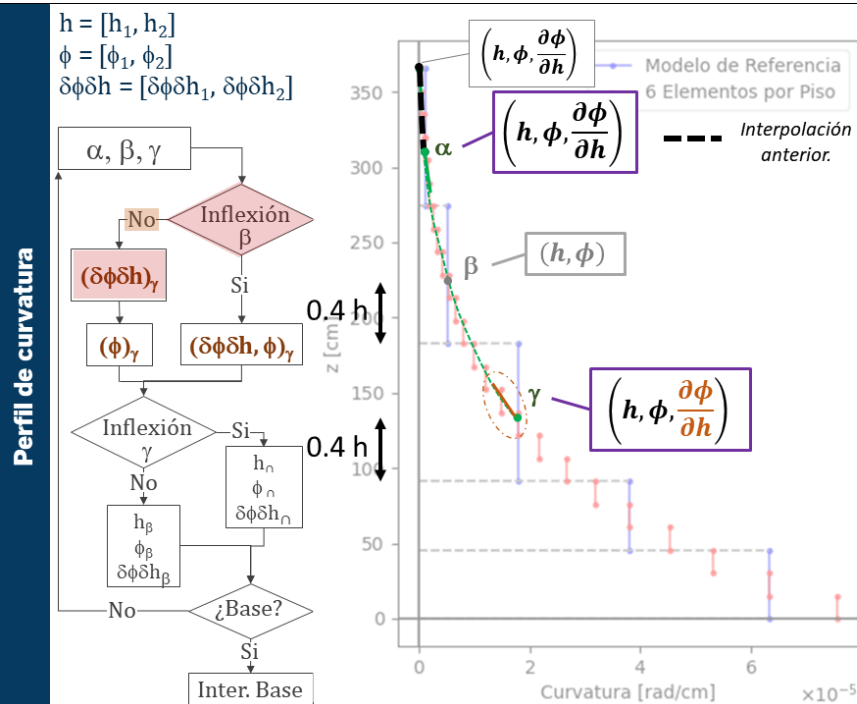
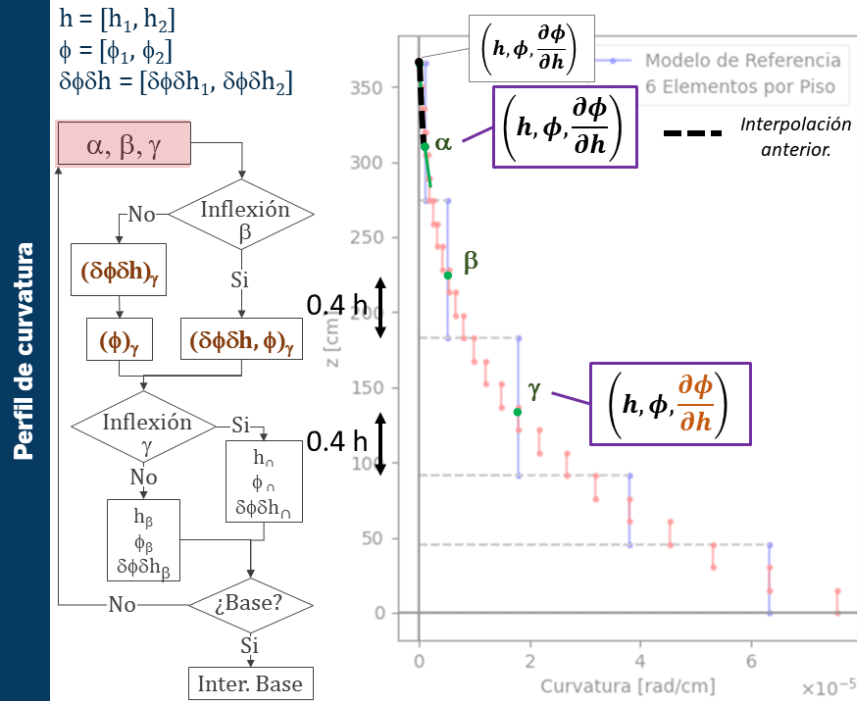
Ejemplo 1: Curvaturas aumentan de forma continua hasta la base. (Continuación)



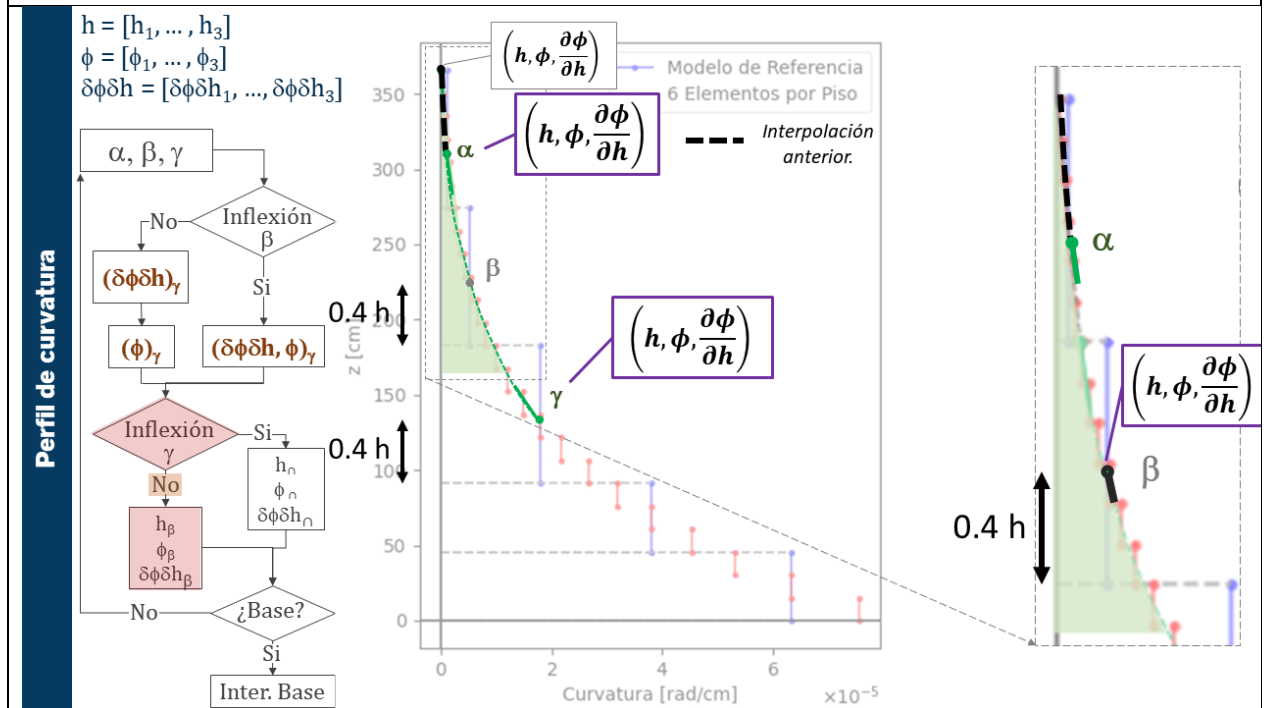
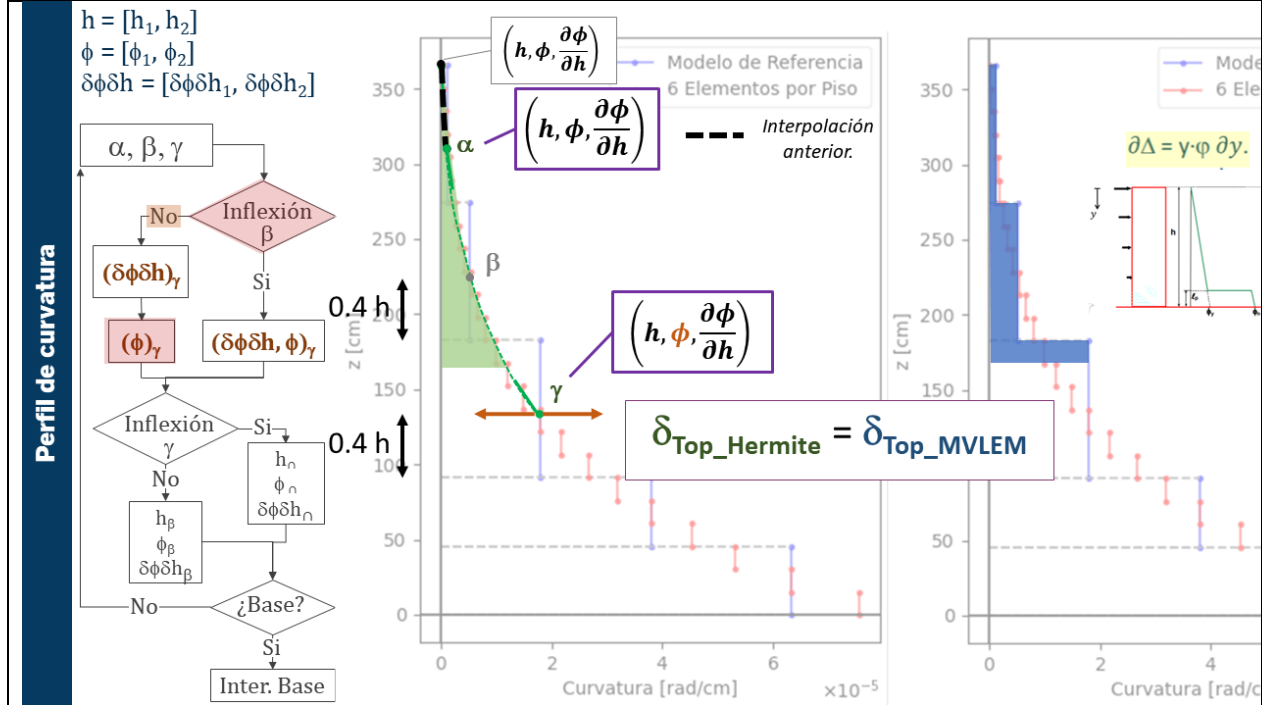
Ejemplo 1: Curvaturas aumentan de forma continua hasta la base. (Continuación)



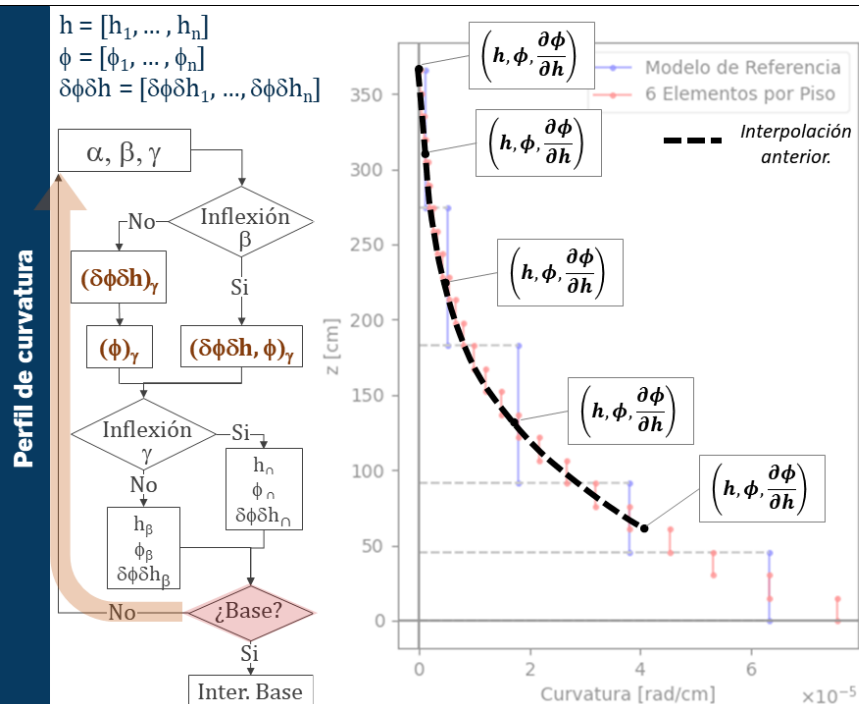
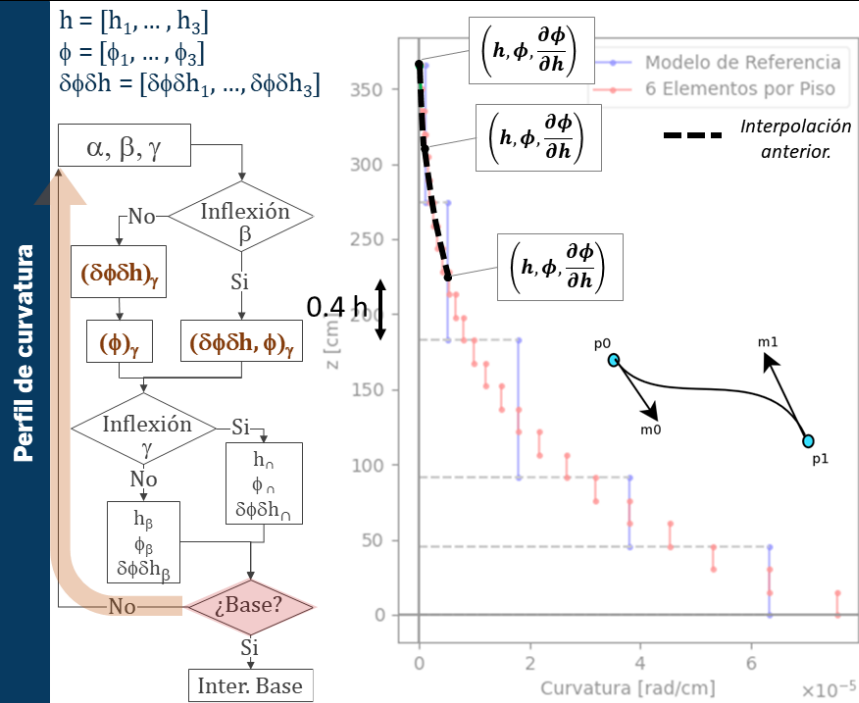
Ejemplo 1: Curvaturas aumentan de forma continua hasta la base. (Continuación)



Ejemplo 1: Curvaturas aumentan de forma continua hasta la base. (Continuación)



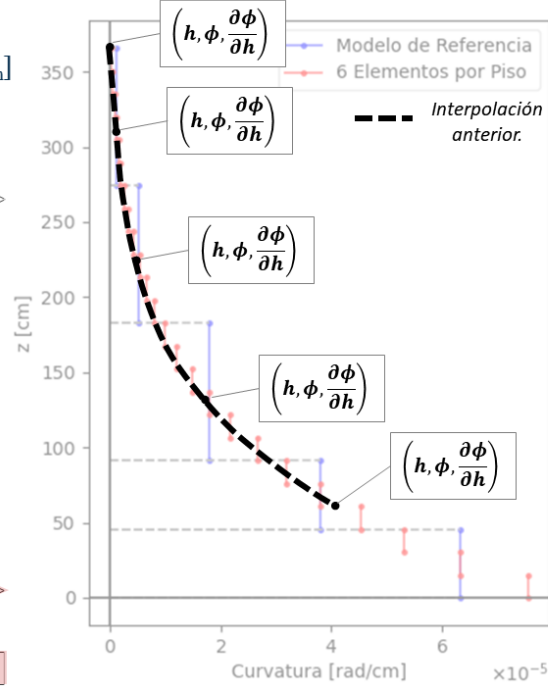
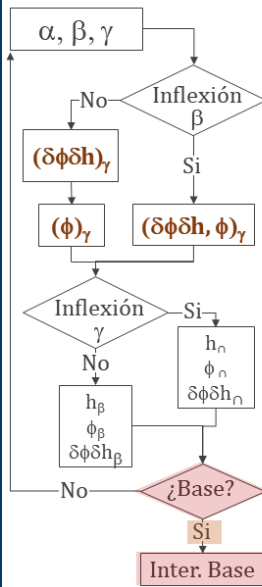
Ejemplo 1: Curvaturas aumentan de forma continua hasta la base. (Continuación)



Ejemplo 1: Curvaturas aumentan de forma continua hasta la base. (Continuación)

Perfil de curvatura

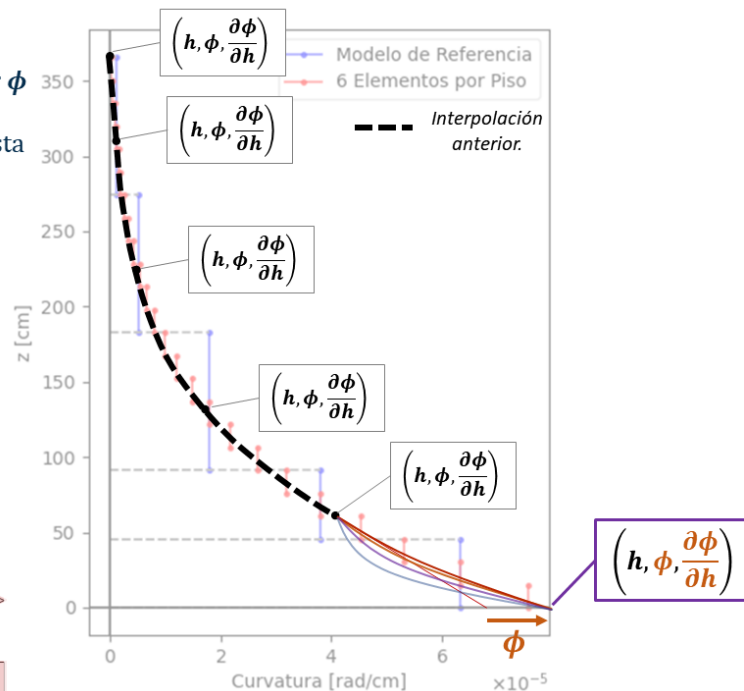
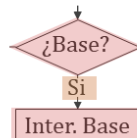
$h = [h_1, \dots, h_n]$
 $\phi = [\phi_1, \dots, \phi_n]$
 $\delta\phi\delta h = [\delta\phi\delta h_1, \dots, \delta\phi\delta h_n]$



Perfil de curvatura

A nivel de base.

1. Se impone un valor ϕ
2. Se itera $\partial\phi/\partial h$ hasta que la curva sea justo tangente a la recta.

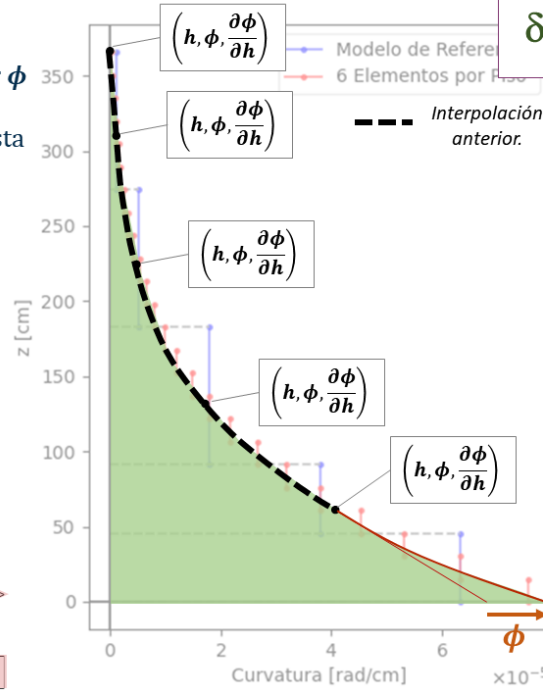
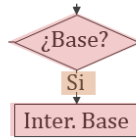


Ejemplo 1: Curvaturas aumentan de forma continua hasta la base. (Continuación)

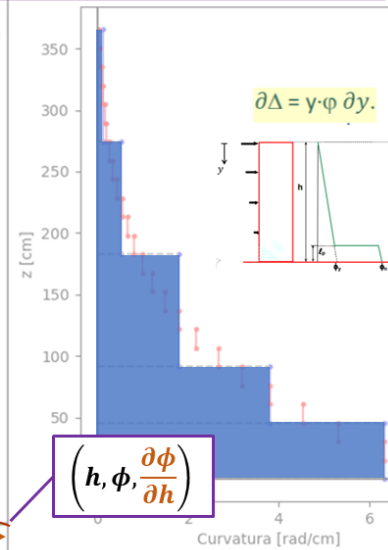
A nivel de base.

1. Se impone un valor ϕ
2. Se itera $\partial\phi/\partial h$ hasta que la curva sea justo tangente a la recta.
3. Se evalúa si el desplazamiento cumple.

Se repite el procedimiento.

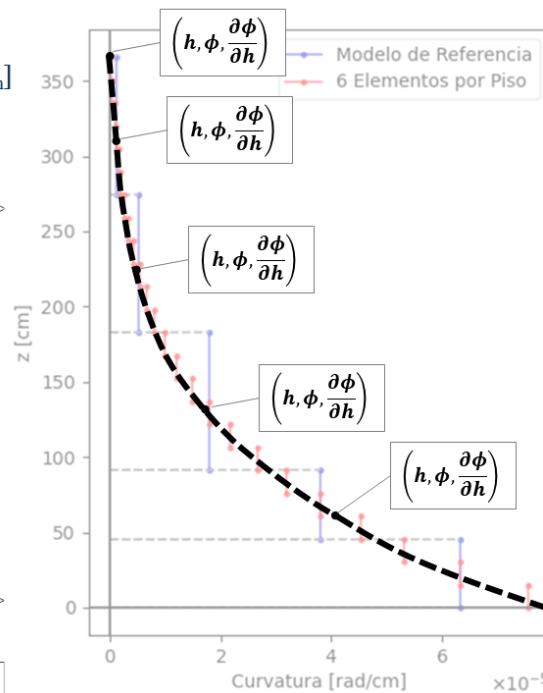
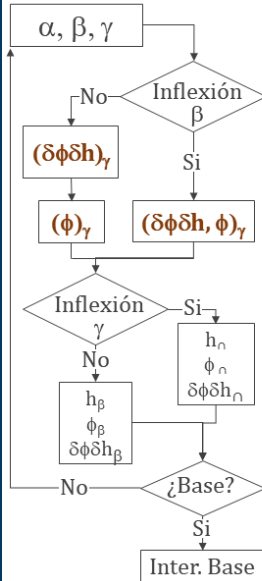


$$\delta_{\text{Top_Hermite}} = \delta_{\text{Top_MVLEM}}$$



Perfil de curvatura

$h = [h_1, \dots, h_n]$
 $\phi = [\phi_1, \dots, \phi_n]$
 $\delta\phi\delta h = [\delta\phi\delta h_1, \dots, \delta\phi\delta h_n]$



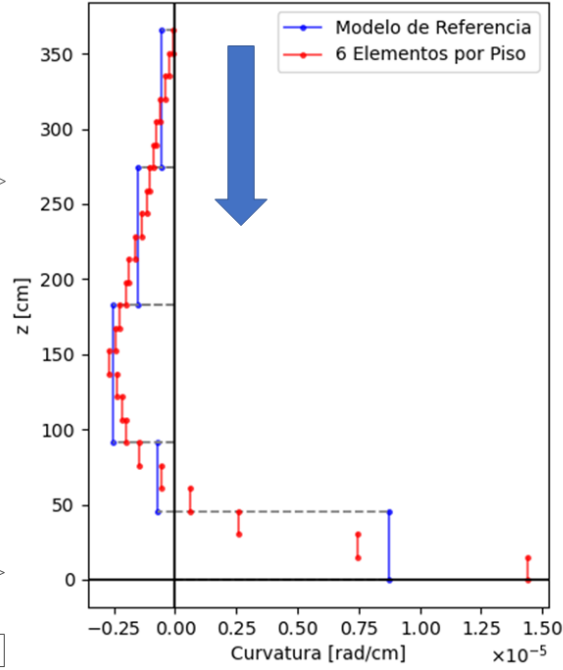
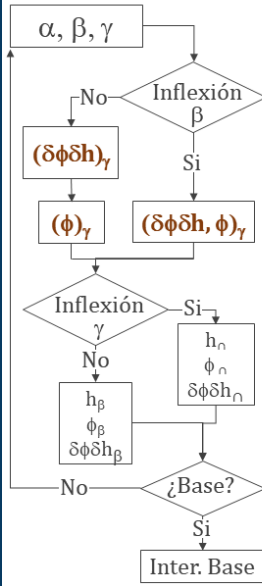
$$\left(h, \phi, \frac{\partial \phi}{\partial h}\right)$$

Perfil de curvatura

Ejemplo 2: Curvaturas presentan una inflexión en la altura.

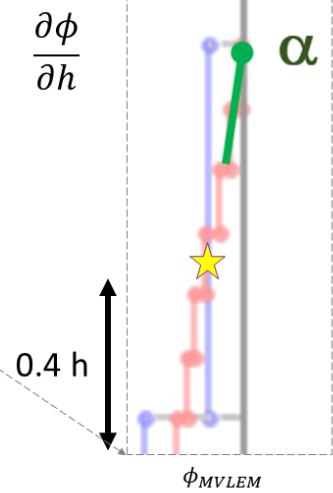
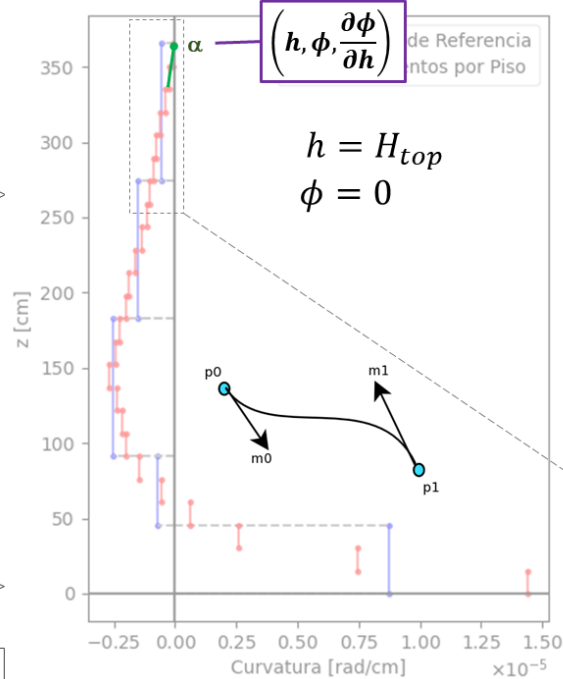
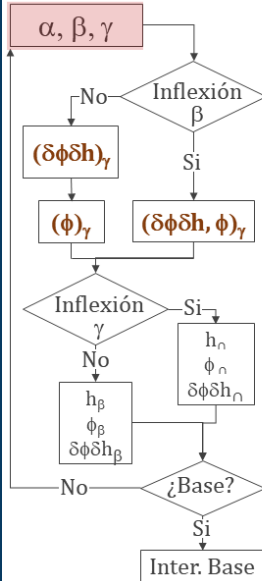
Perfil de curvatura

Se inicia la interpolación desde extremo superior.



Perfil de curvatura

$h = [h_1]$
 $\phi = [\phi_1]$
 $\delta\phi\delta h = [\delta\phi\delta h_1]$



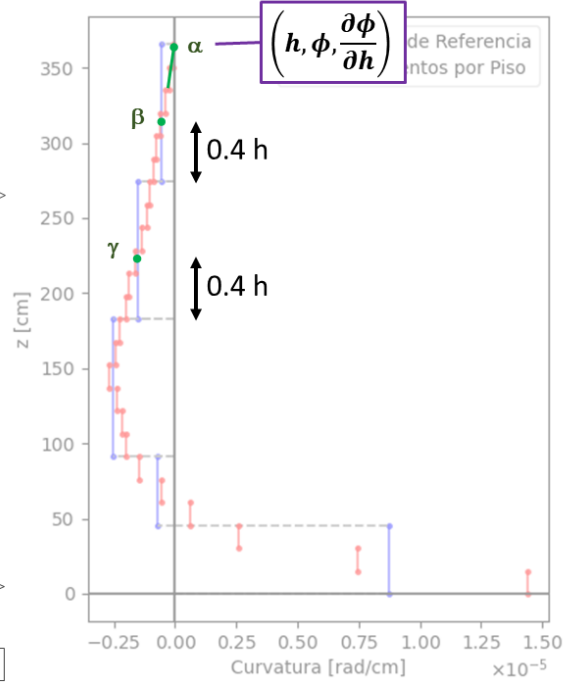
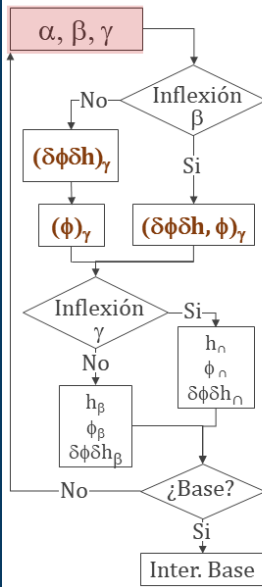
Ejemplo 2: Curvaturas presentan una inflexión en la altura. (Continuación)

Perfil de curvatura

$$h = [h_1]$$

$$\phi = [\phi_1]$$

$$\delta\phi\delta h = [\delta\phi\delta h_1]$$

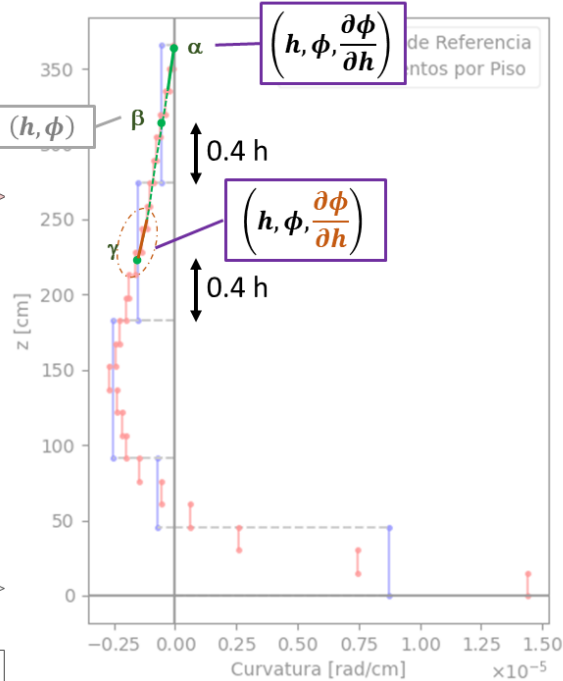
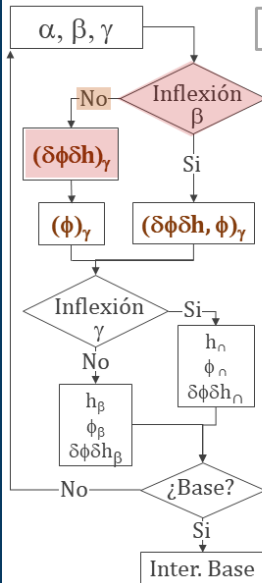


Perfil de curvatura

$$h = [h_1]$$

$$\phi = [\phi_1]$$

$$\delta\phi\delta h = [\delta\phi\delta h_1]$$



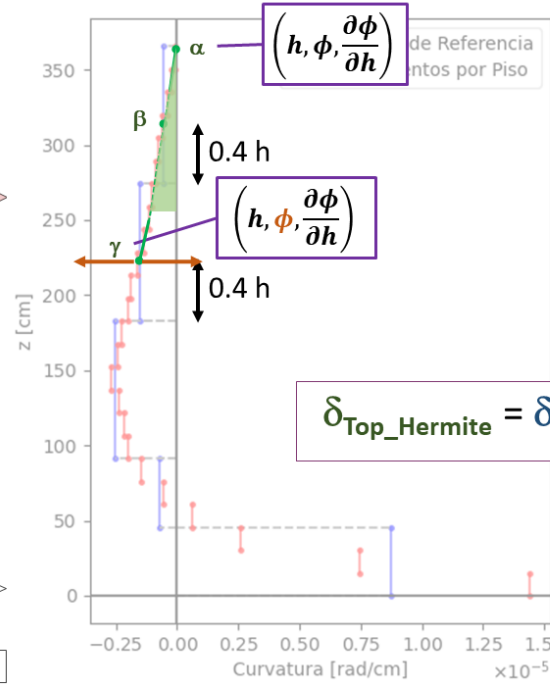
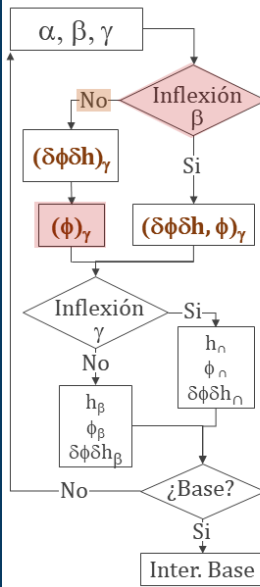
Ejemplo 2: Curvaturas presentan una inflexión en la altura. (Continuación)

Perfil de curvatura

$$h = [h_1, h_2]$$

$$\phi = [\phi_1, \phi_2]$$

$$\delta\phi\delta h = [\delta\phi\delta h_1, \delta\phi\delta h_2]$$

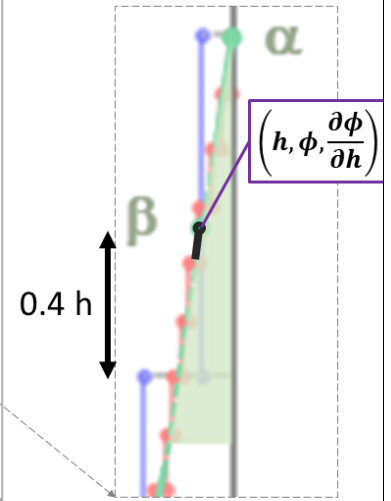
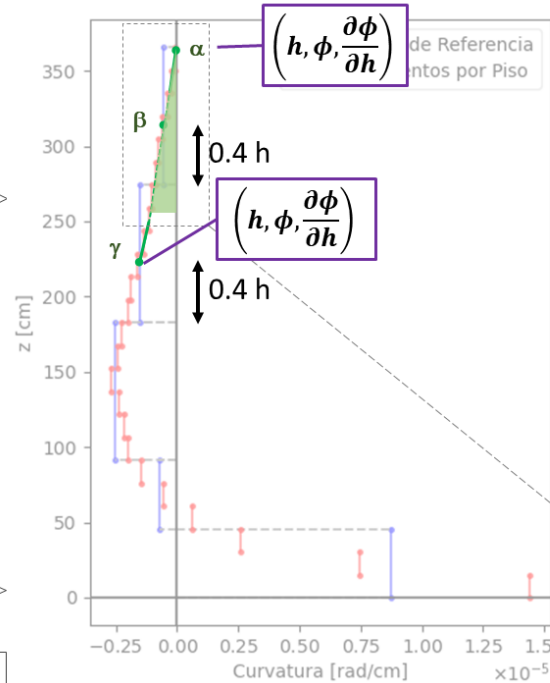
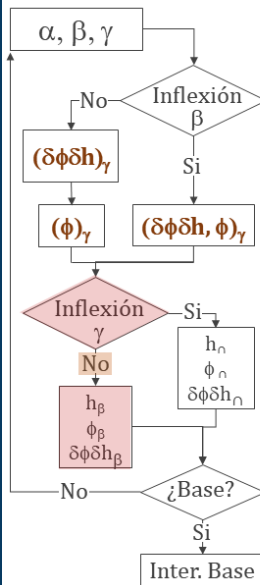


Perfil de curvatura

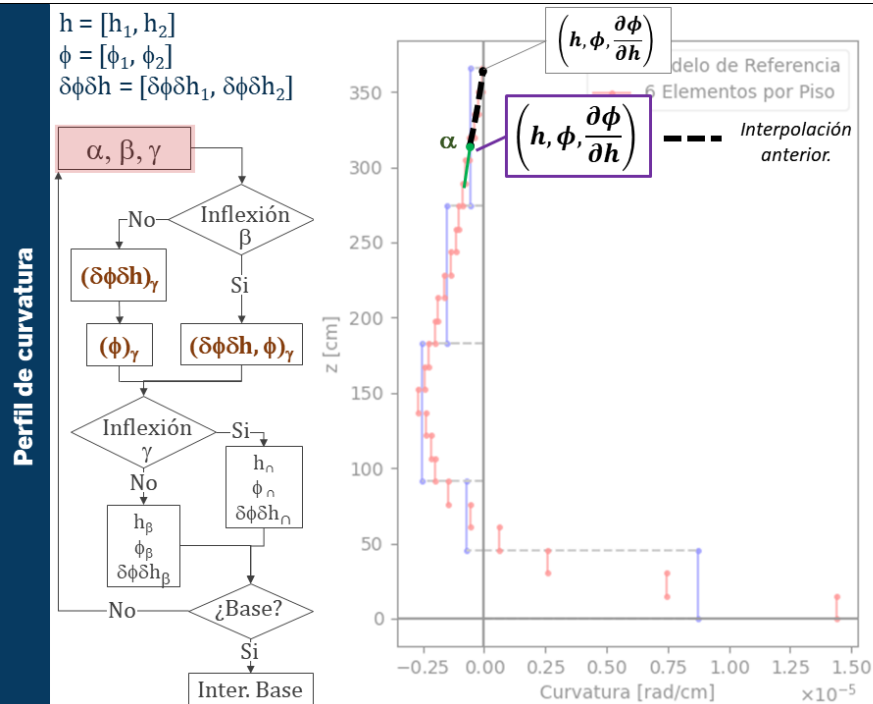
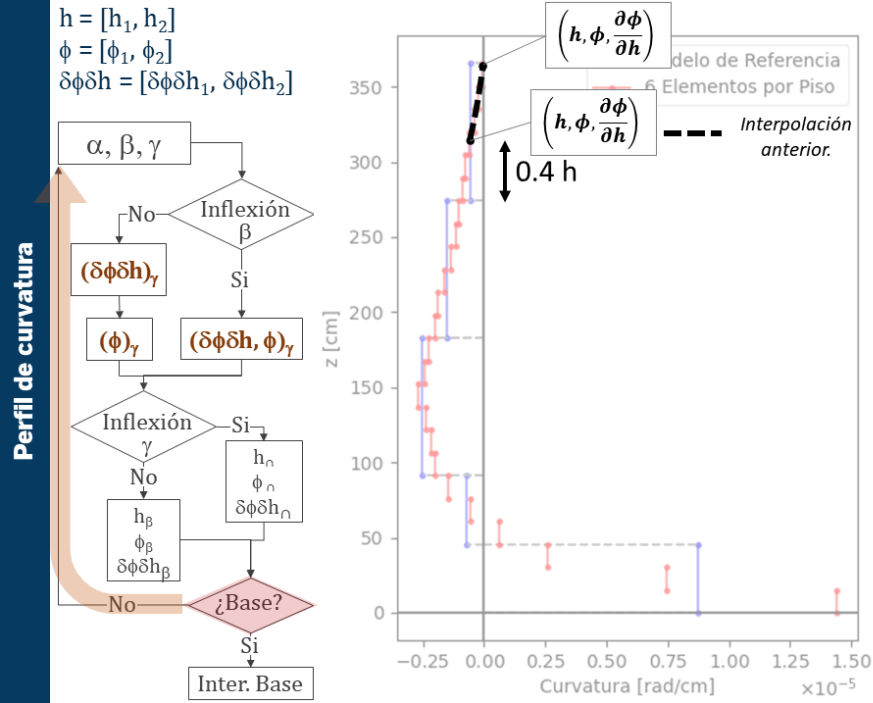
$$h = [h_1, h_2]$$

$$\phi = [\phi_1, \phi_2]$$

$$\delta\phi\delta h = [\delta\phi\delta h_1, \delta\phi\delta h_2]$$



Ejemplo 2: Curvaturas presentan una inflexión en la altura. (Continuación)



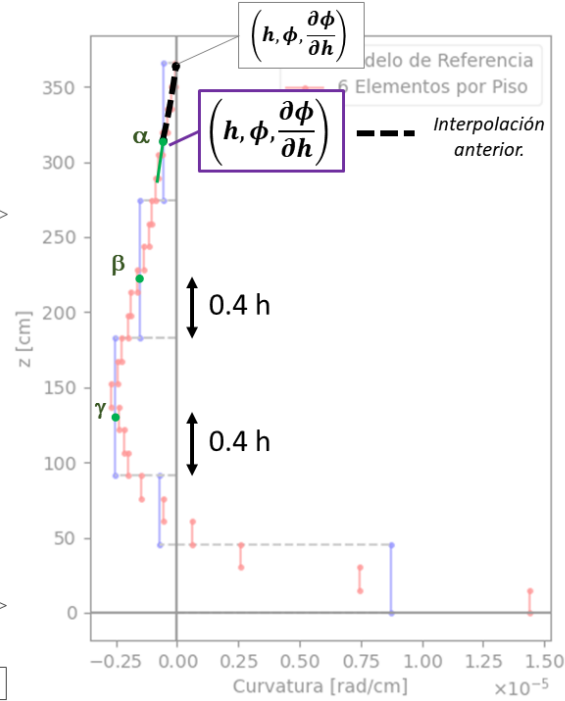
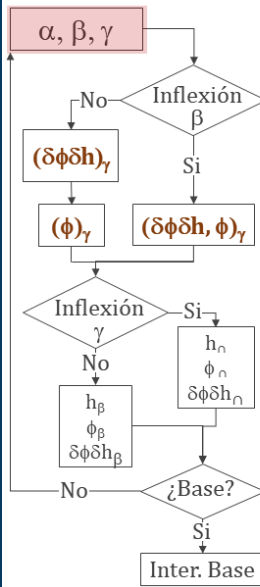
Ejemplo 2: Curvaturas presentan una inflexión en la altura. (Continuación)

Perfil de curvatura

$$h = [h_1, h_2]$$

$$\phi = [\phi_1, \phi_2]$$

$$\delta\phi\delta h = [\delta\phi\delta h_1, \delta\phi\delta h_2]$$

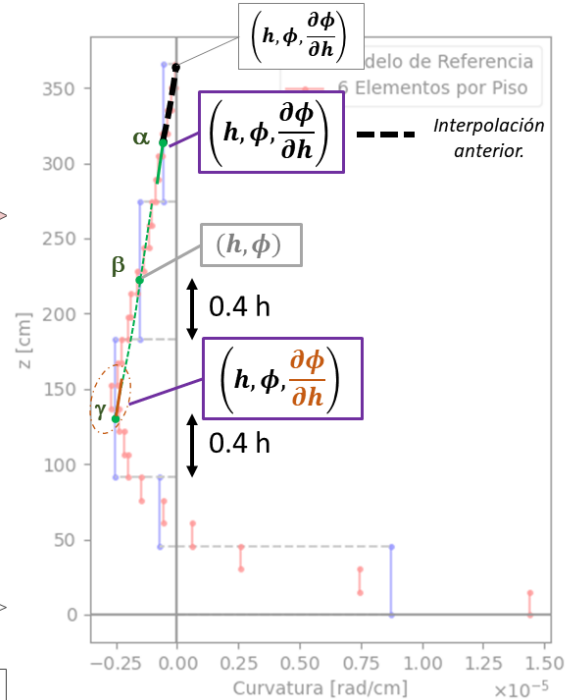
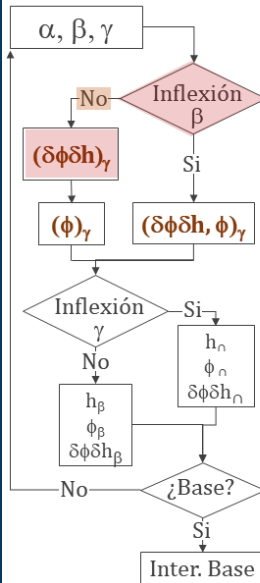


Perfil de curvatura

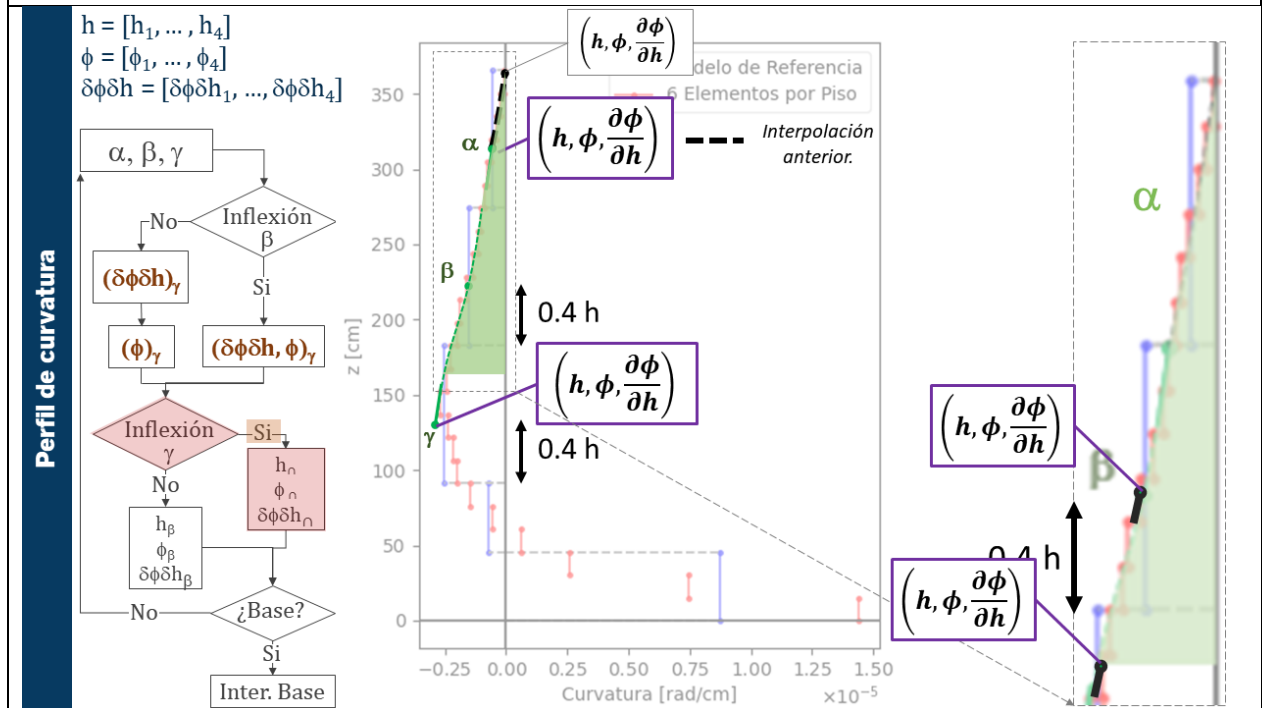
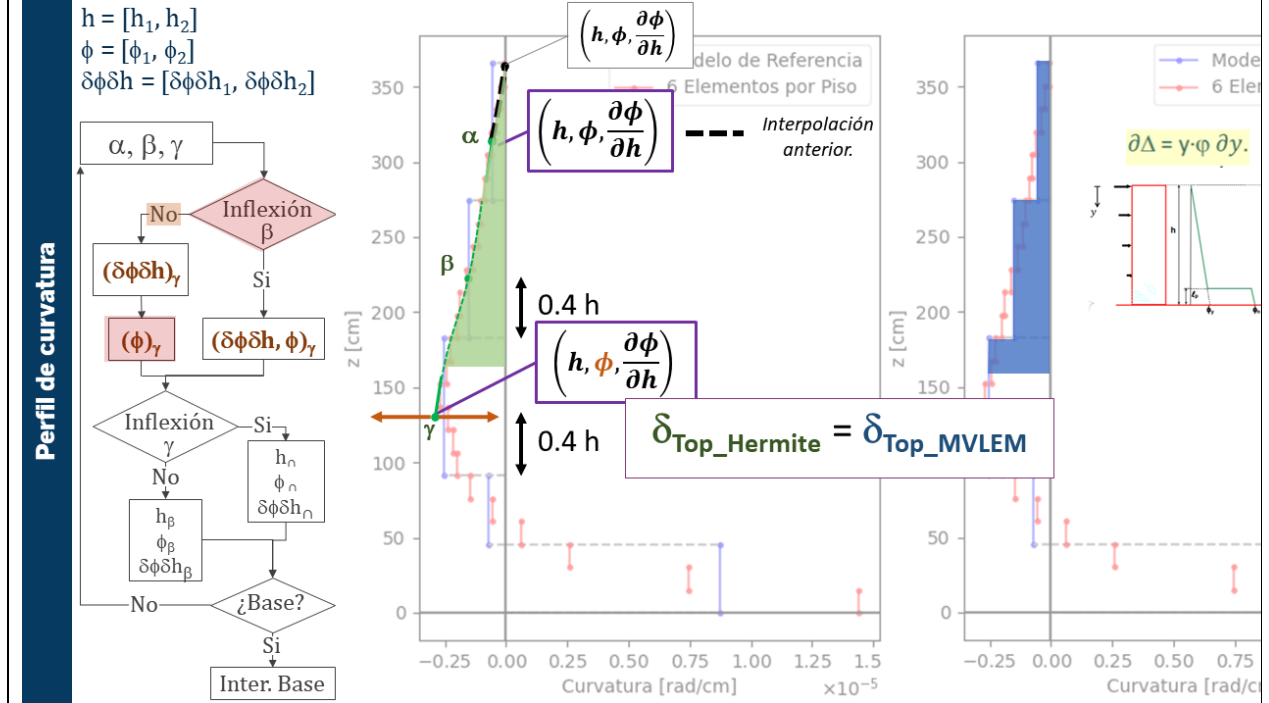
$$h = [h_1, h_2]$$

$$\phi = [\phi_1, \phi_2]$$

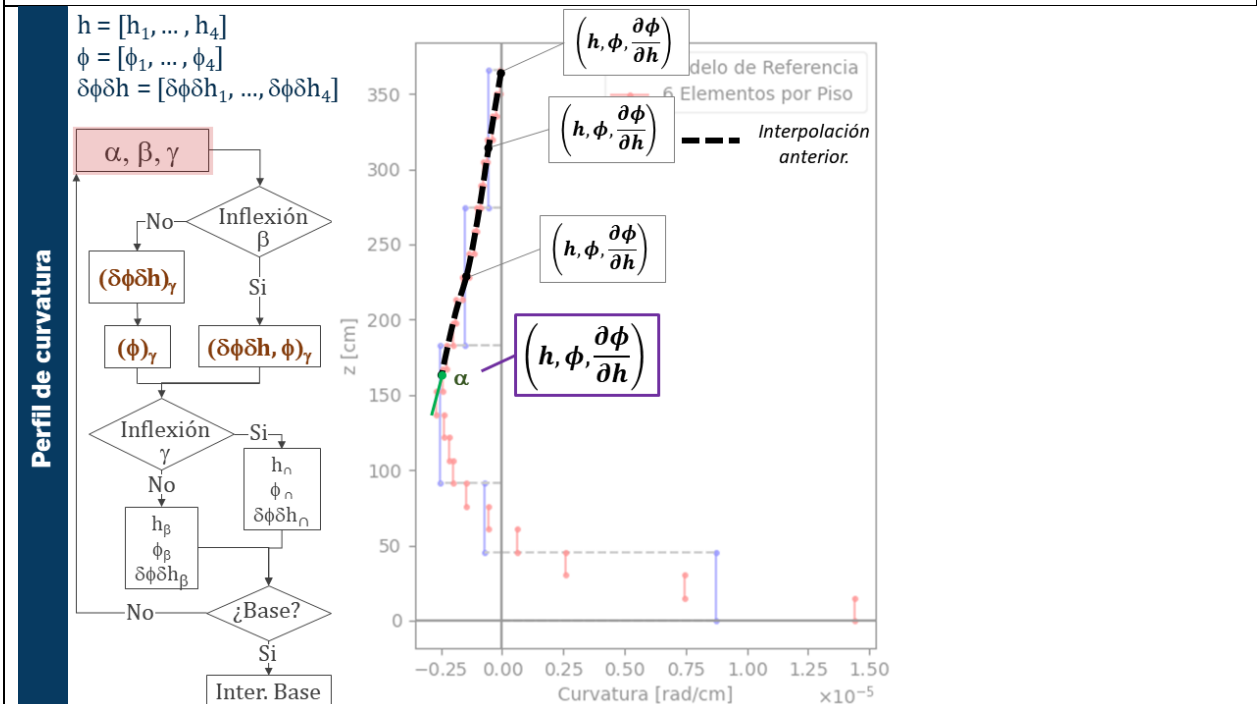
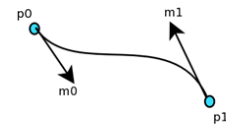
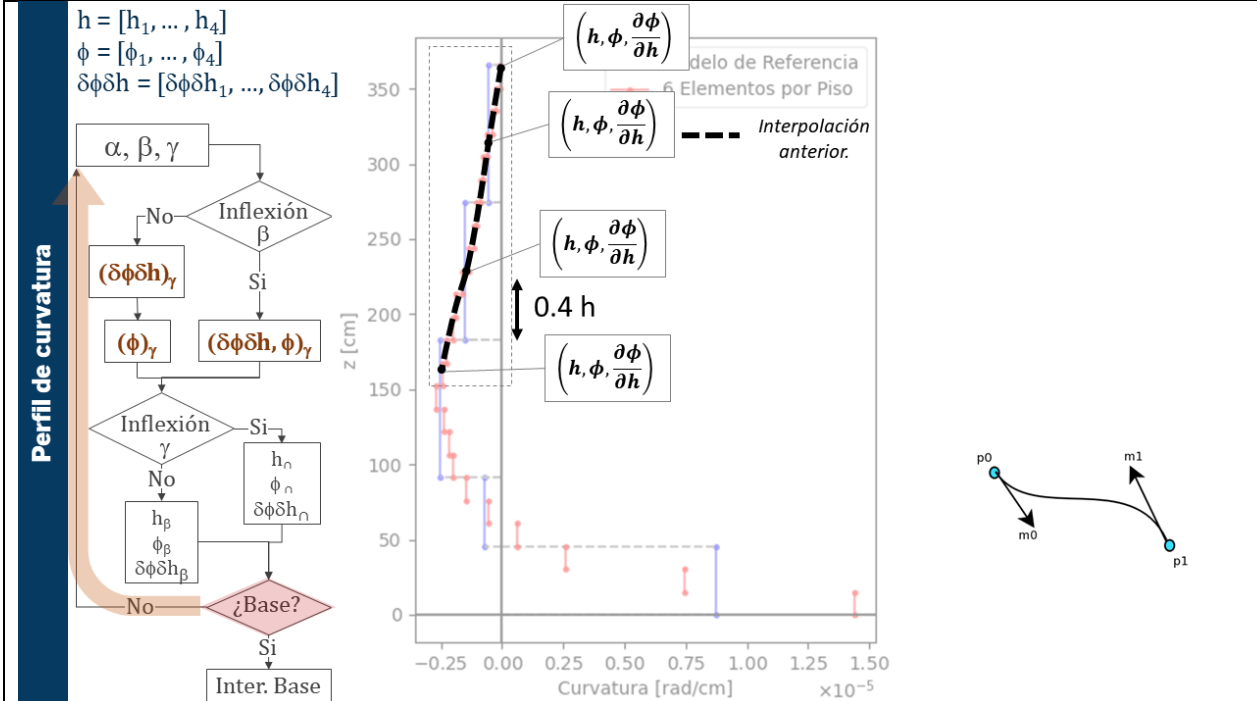
$$\delta\phi\delta h = [\delta\phi\delta h_1, \delta\phi\delta h_2]$$



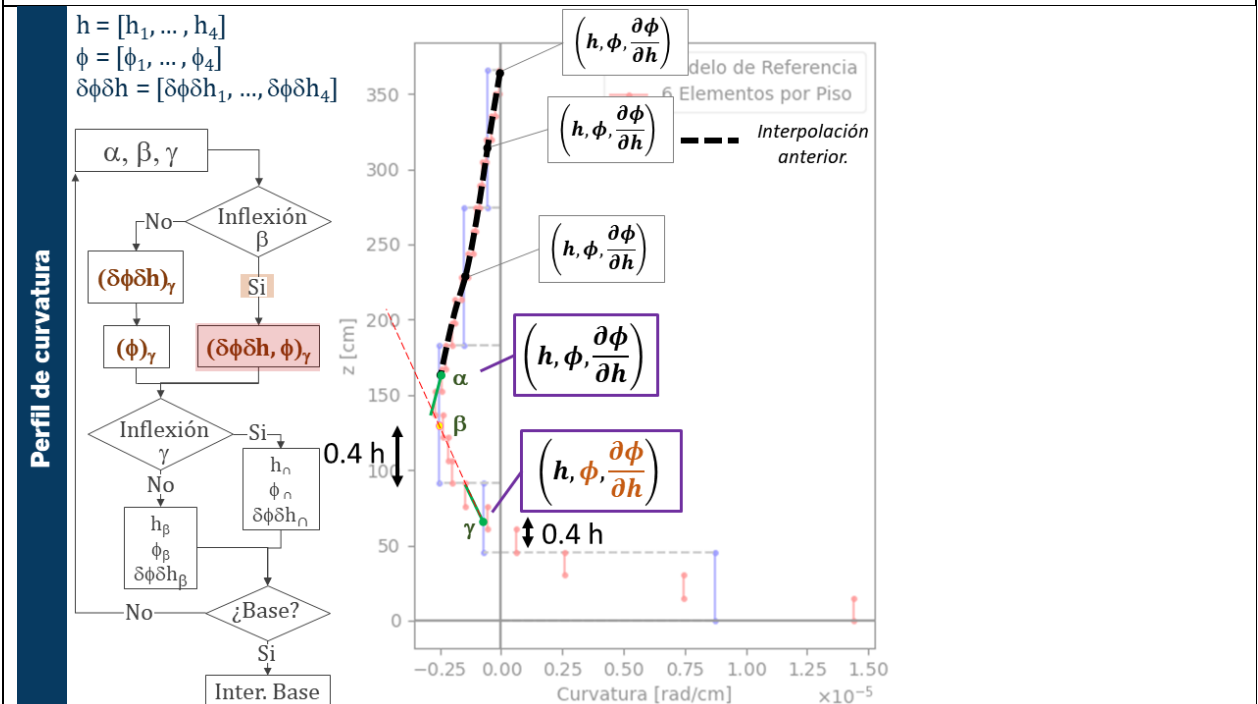
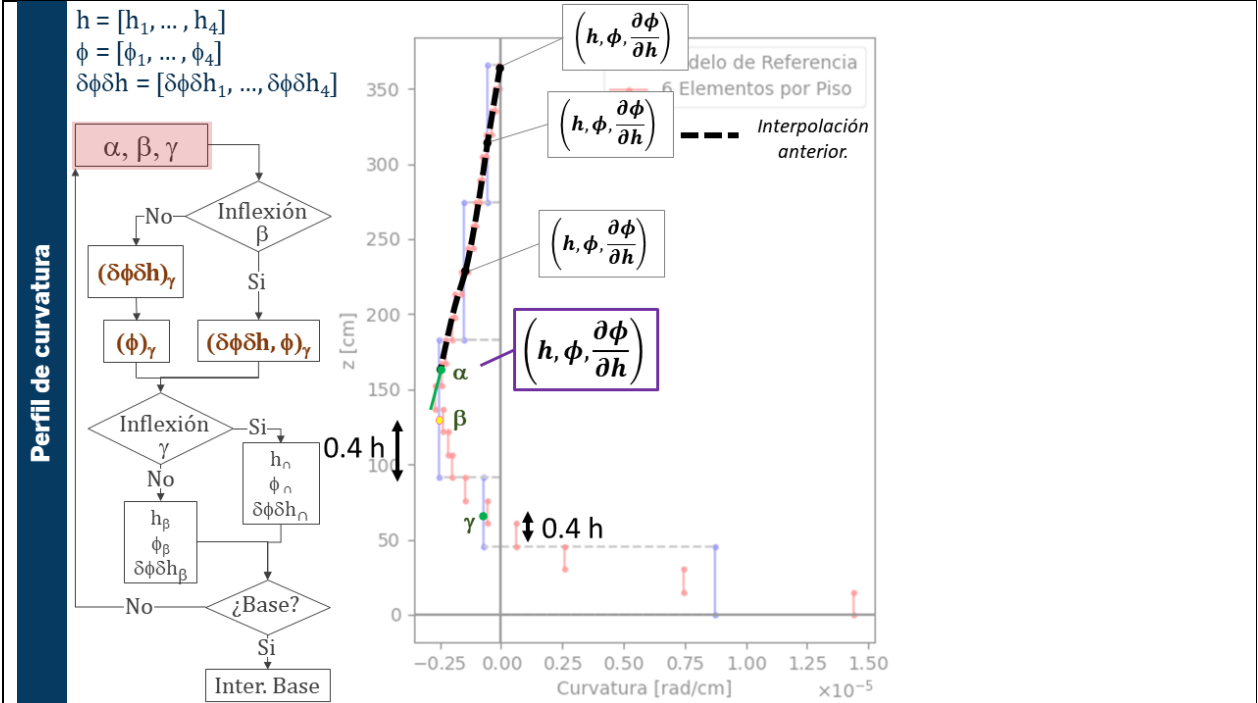
Ejemplo 2: Curvaturas presentan una inflexión en la altura. (Continuación)



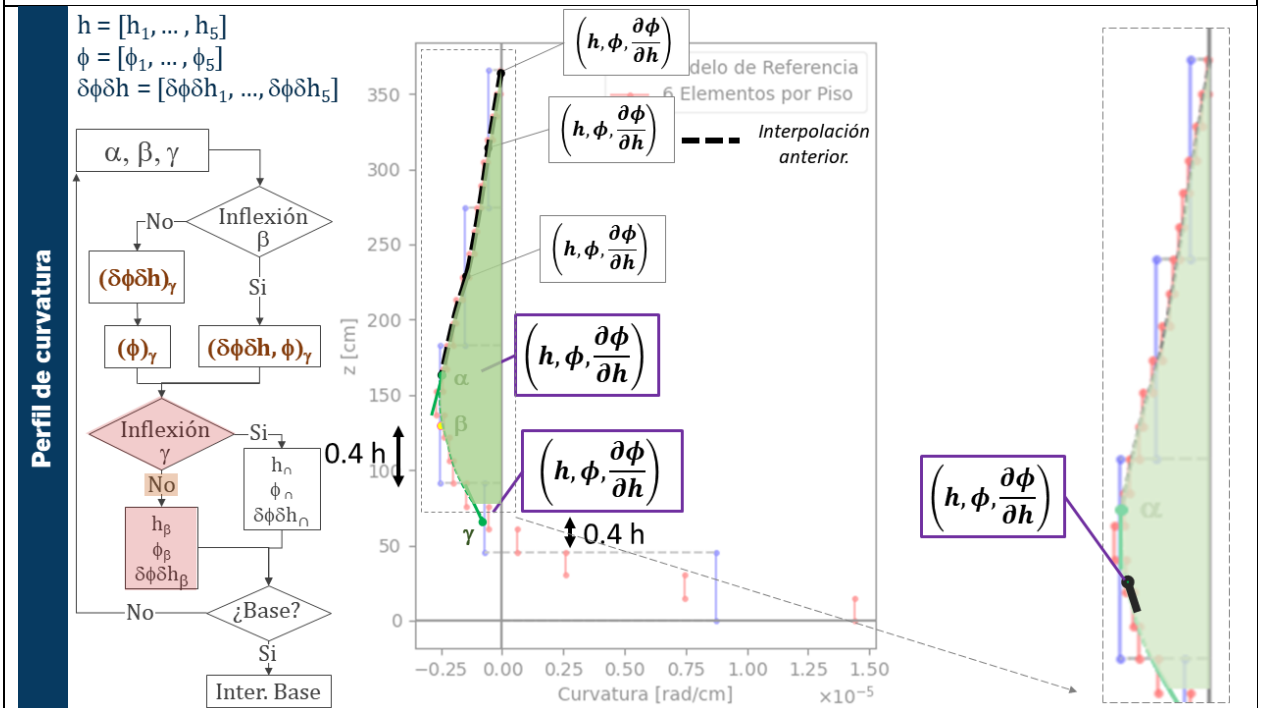
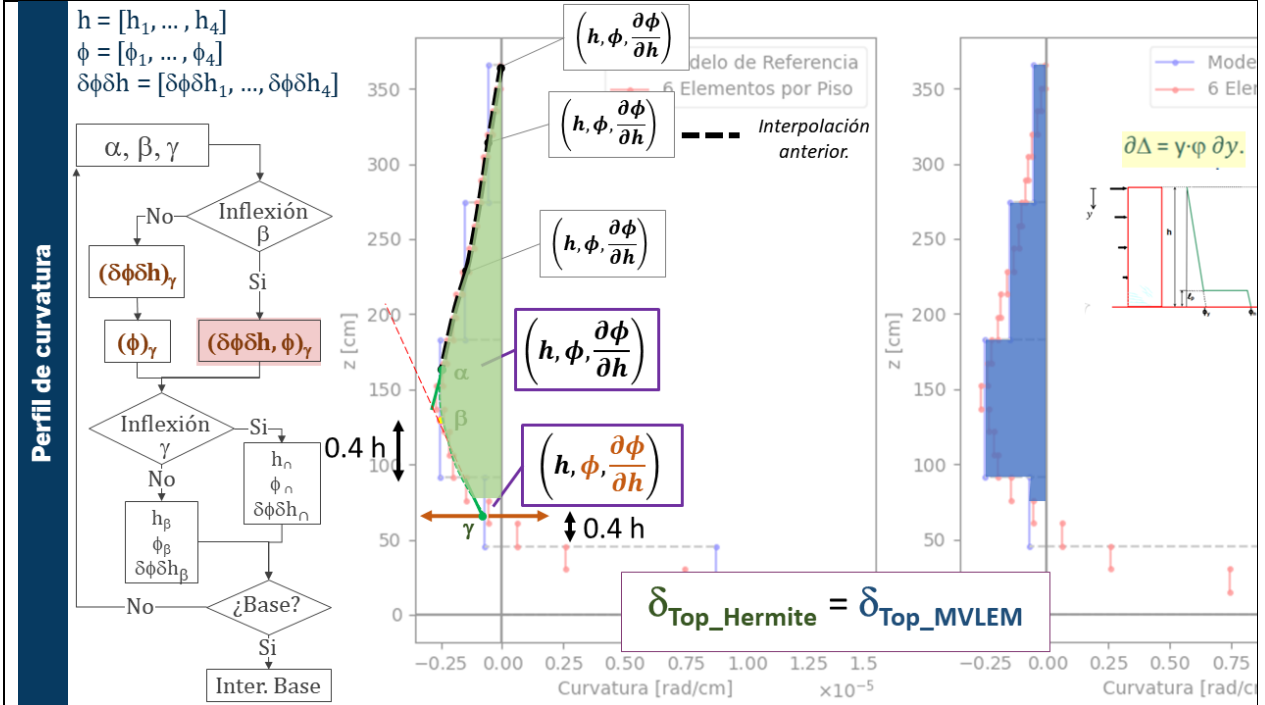
Ejemplo 2: Curvaturas presentan una inflexión en la altura. (Continuación)



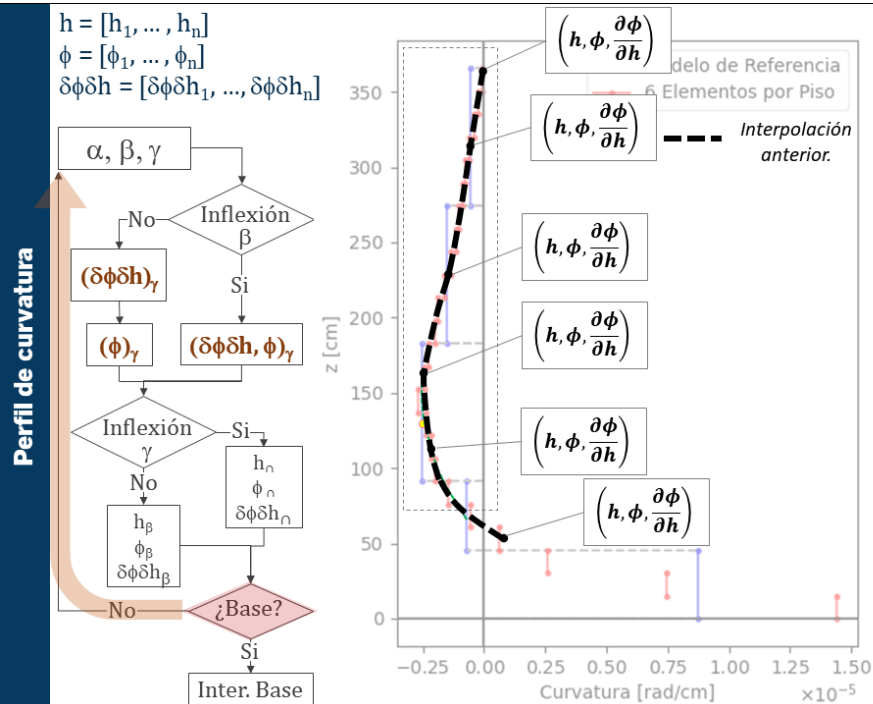
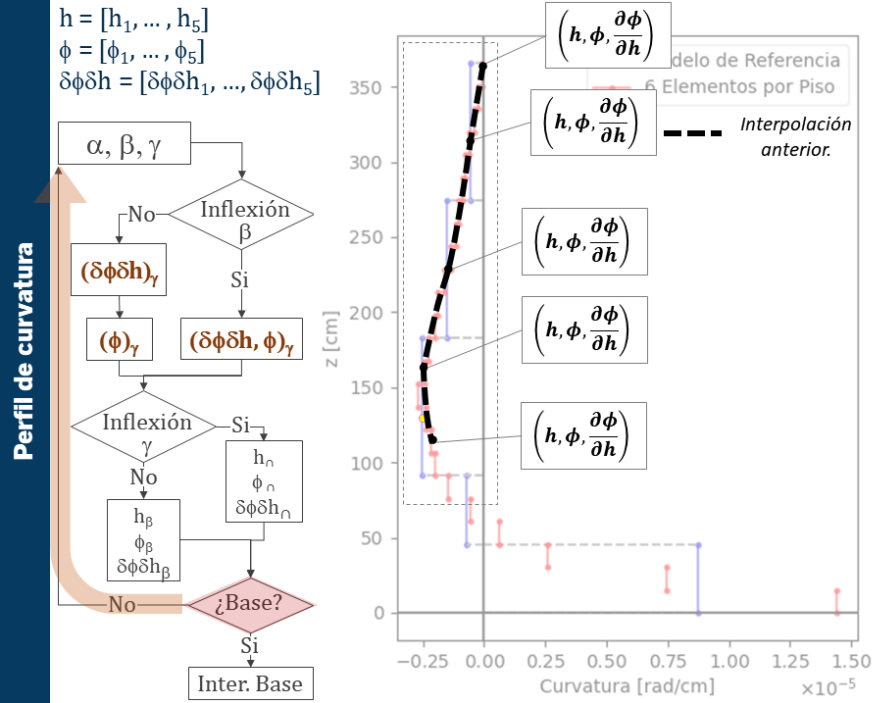
Ejemplo 2: Curvaturas presentan una inflexión en la altura. (Continuación)



Ejemplo 2: Curvaturas presentan una inflexión en la altura. (Continuación)



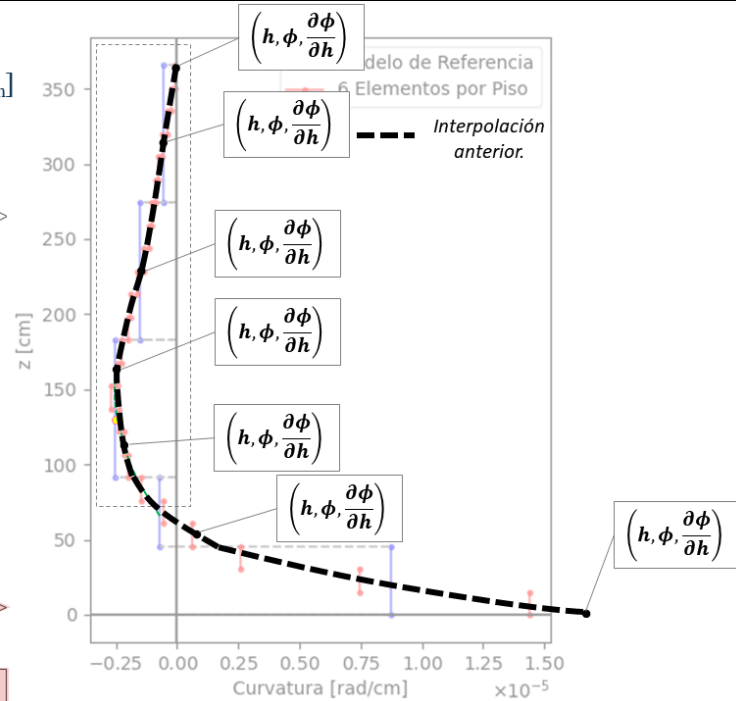
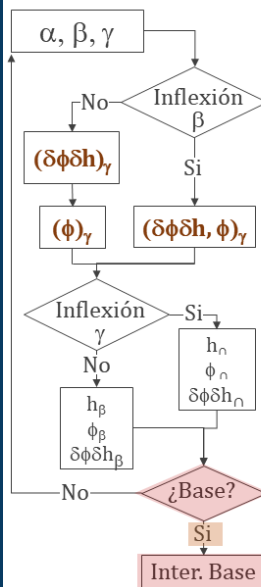
Ejemplo 2: Curvaturas presentan una inflexión en la altura. (Continuación)



Ejemplo 2: Curvaturas presentan una inflexión en la altura. (Continuación)

Perfil de curvatura

$h = [h_1, \dots, h_n]$
 $\phi = [\phi_1, \dots, \phi_n]$
 $\delta\phi\delta h = [\delta\phi\delta h_1, \dots, \delta\phi\delta h_n]$



Apéndice S: Curvatura Interpolada a Nivel de Base de Probetas

Se presentan los valores de curvatura registrados en la base, correspondientes a los máximos de deriva de piso en cada ciclo de carga. Estos valores se asocian a las diferentes probetas de muro en estudio e incluyen el error derivado del mallado empleado (referencia o 6 elementos por piso).

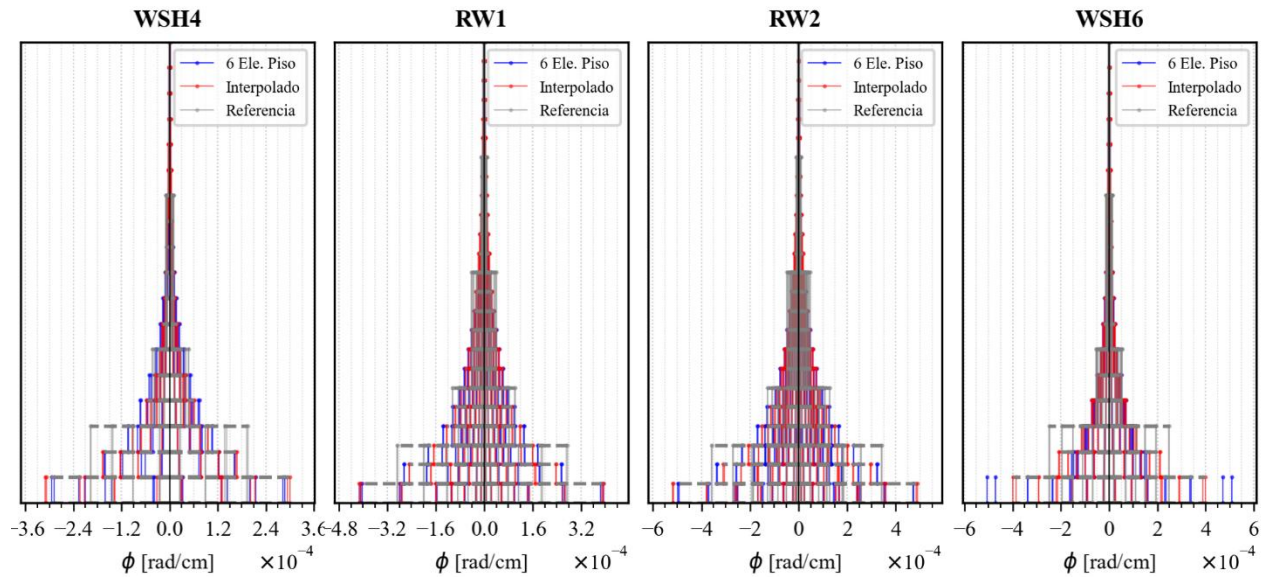


Figura 89: Envoltente de curvatura para máximos de deriva de piso en cada ciclo.

Tabla 49: Curvatura a nivel de base para máximos de deriva de piso en cada ciclo.
Muro WSH4.

Muro WSH4		Ciclo Inicial						Ciclo Repetido					
Número de Ciclo	Drift	Dirección (+)			Dirección (-)			Dirección (+)			Dirección (-)		
		$\phi_{\text{Interp.}}$	$\phi_6 \text{ Ele. Piso}$	Error [%]	$\phi_{\text{Interp.}}$	$\phi_6 \text{ Ele. Piso}$	Error [%]	$\phi_{\text{Interp.}}$	$\phi_6 \text{ Ele. Piso}$	Error [%]	$\phi_{\text{Interp.}}$	$\phi_6 \text{ Ele. Piso}$	Error [%]
1 y 2	0.25	-2.53E-05	-3.86E-05	52.5	2.76E-05	2.94E-05	6.6	-3.25E-05	-4.16E-05	28.3	3.06E-05	3.29E-05	7.6
3 y 4	0.75	-1.37E-04	-1.61E-04	17.8	1.30E-04	1.43E-04	9.8	-1.39E-04	-1.45E-04	4.5	1.27E-04	1.30E-04	2.1
5 y 6	1.15	-2.24E-04	-2.26E-04	0.9	2.13E-04	2.15E-04	1.1	-2.13E-04	-2.11E-04	-0.7	2.01E-04	2.00E-04	-0.4
7 y 8	1.50	-3.08E-04	-2.94E-04	-4.4	2.94E-04	2.87E-04	-2.3	-3.11E-04	-2.88E-04	-7.5	3.00E-04	2.83E-04	-6.0
Promedio				18.9			5.0			10.2			4.0

Tabla 50: Curvatura a nivel de base para máximos de deriva de piso en cada ciclo.
Muro RW1.

Muro RW1		Ciclo Inicial						Ciclo Repetido					
Número de Ciclo	Drift	Dirección (+)			Dirección (-)			Dirección (+)			Dirección (-)		
		$\phi_{\text{Interp.}}$	$\phi_6 \text{ Ele. Piso}$	Error [%]	$\phi_{\text{Interp.}}$	$\phi_6 \text{ Ele. Piso}$	Error [%]	$\phi_{\text{Interp.}}$	$\phi_6 \text{ Ele. Piso}$	Error [%]	$\phi_{\text{Interp.}}$	$\phi_6 \text{ Ele. Piso}$	Error [%]
1 y 2	0.10	-9.70E-06	-9.34E-06	-3.8	6.23E-06	6.29E-06	0.9	-9.47E-06	-9.32E-06	-1.6	6.73E-06	6.35E-06	-5.6
3 y 4	0.25	-2.57E-05	-2.70E-05	5.2	2.42E-05	2.47E-05	1.9	-2.75E-05	-2.82E-05	2.6	2.42E-05	2.47E-05	2.0
5 y 6	0.50	-6.49E-05	-6.32E-05	-2.6	5.69E-05	5.71E-05	0.2	-6.60E-05	-6.40E-05	-3.1	5.81E-05	5.79E-05	-0.3
7 y 8	0.75	-1.07E-04	-1.08E-04	0.7	9.92E-05	1.00E-04	1.3	-1.07E-04	-1.07E-04	0.1	9.80E-05	9.90E-05	1.0
9 y 10	1.00	-1.59E-04	-1.58E-04	-0.5	1.49E-04	1.48E-04	-1.1	-1.57E-04	-1.55E-04	-0.8	1.44E-04	1.44E-04	0.1
11 y 12	1.50	-2.76E-04	-2.78E-04	0.7	2.68E-04	2.66E-04	-0.6	-2.71E-04	-2.72E-04	0.4	2.59E-04	2.59E-04	0.0
13 y 14	2.00	-4.14E-04	-4.10E-04	-1.0	3.96E-04	3.92E-04	-0.9	-4.08E-04	-4.03E-04	-1.2	3.90E-04	3.84E-04	-1.3
Promedio				2.1			1.0			1.4			1.5

Tabla 51: Curvatura a nivel de base para máximos de deriva de piso en cada ciclo.
Muro RW2.

Muro RW2		Ciclo Inicial							Ciclo Repetido					
Número de Ciclo	Drift	Dirección (+)			Dirección (-)				Dirección (+)			Dirección (-)		
		$\phi_{\text{Interp.}}$	$\phi_6 \text{ Ele. Piso}$	Error [%]	$\phi_{\text{Interp.}}$	$\phi_6 \text{ Ele. Piso}$	Error [%]		$\phi_{\text{Interp.}}$	$\phi_6 \text{ Ele. Piso}$	Error [%]	$\phi_{\text{Interp.}}$	$\phi_6 \text{ Ele. Piso}$	Error [%]
1 y 2	0.10	-9.80E-06	-1.00E-05	2.5	1.05E-05	1.04E-05	-0.1		-9.84E-06	-1.01E-05	2.2	1.05E-05	1.05E-05	-0.4
3 y 4	0.25	-2.17E-05	-2.33E-05	7.4	2.42E-05	2.41E-05	-0.1		-2.31E-05	-2.41E-05	4.1	2.45E-05	2.44E-05	-0.2
5 y 6	0.50	-6.14E-05	-6.18E-05	0.7	5.58E-05	5.66E-05	1.4		-6.28E-05	-6.31E-05	0.5	5.74E-05	5.78E-05	0.6
7 y 8	0.75	-1.10E-04	-1.09E-04	-1.3	1.05E-04	1.04E-04	-1.5		-1.10E-04	-1.07E-04	-2.0	1.04E-04	1.02E-04	-2.5
9 y 10	1.00	-1.57E-04	-1.51E-04	-3.6	1.55E-04	1.49E-04	-3.7		-1.54E-04	-1.47E-04	-4.4	1.51E-04	1.45E-04	-4.0
11 y 12	1.50	-2.66E-04	-2.62E-04	-1.5	2.58E-04	2.52E-04	-2.3		-2.56E-04	-2.55E-04	-0.4	2.46E-04	2.43E-04	-1.0
13 y 14	1.00	-1.67E-04	-1.67E-04	0.1	1.66E-04	1.64E-04	-1.2		-1.68E-04	-1.68E-04	0.1	1.68E-04	1.66E-04	-1.2
15 y 16	1.50	-2.53E-04	-2.54E-04	0.2	2.43E-04	2.43E-04	0.0		-2.54E-04	-2.50E-04	-1.6	2.39E-04	2.39E-04	0.1
17 y 18	2.00	-3.80E-04	-3.76E-04	-1.1	3.59E-04	3.56E-04	-0.7		-3.79E-04	-3.70E-04	-2.2	3.50E-04	3.50E-04	0.1
19 y 20	2.50	-5.20E-04	-4.99E-04	-4.1	4.90E-04	4.74E-04	-3.3		-5.17E-04	-4.93E-04	-4.7	4.83E-04	4.70E-04	-2.7
Promedio				2.3			1.4				2.2			1.3

Tabla 52: Curvatura a nivel de base para máximos de deriva de piso en cada ciclo.
Muro WSH6.

Muro WSH6		Ciclo Inicial							Ciclo Repetido					
Número de Ciclo	Drift	Dirección (+)			Dirección (-)				Dirección (+)			Dirección (-)		
		$\phi_{\text{Interp.}}$	$\phi_6 \text{ Ele. Piso}$	Error [%]	$\phi_{\text{Interp.}}$	$\phi_6 \text{ Ele. Piso}$	Error [%]		$\phi_{\text{Interp.}}$	$\phi_6 \text{ Ele. Piso}$	Error [%]	$\phi_{\text{Interp.}}$	$\phi_6 \text{ Ele. Piso}$	Error [%]
1 y 2	0.20	-2.20E-05	-2.08E-05	-5.5	2.46E-05	2.25E-05	-8.4		-2.40E-05	-2.41E-05	0.6	2.60E-05	2.39E-05	-8.1
3 y 4	0.62	-8.77E-05	-9.21E-05	5.0	9.22E-05	9.25E-05	0.3		-9.26E-05	-9.44E-05	2.0	9.44E-05	9.25E-05	-1.9
5 y 6	0.94	-1.54E-04	-1.63E-04	6.0	1.58E-04	1.62E-04	2.0		-1.53E-04	-1.59E-04	3.4	1.53E-04	1.57E-04	2.7
7 y 8	1.25	-2.19E-04	-2.36E-04	7.8	2.19E-04	2.36E-04	7.8		-2.14E-04	-2.32E-04	8.6	2.13E-04	2.32E-04	8.5
9 y 10	1.59	-2.91E-04	-3.38E-04	16.2	2.91E-04	3.39E-04	16.5		-2.92E-04	-3.37E-04	15.5	2.88E-04	3.34E-04	15.9
11 y 12	1.91	-3.84E-04	-4.70E-04	22.4	3.88E-04	4.72E-04	21.6		-3.99E-04	-5.07E-04	27.1	3.98E-04	5.09E-04	27.8
Promedio				10.5			9.5				9.5			10.8

Apéndice T: Video Algoritmo de Posprocesamiento de la Respuesta Local

Muro RW1	
Interpolación de la curvatura y del estado de deformaciones a lo largo de la altura, empleando el algoritmo de posprocesamiento propuesto. Probeta de muro ensayada por Thomsen IV JH. <i>Displacement Based Design of Reinforced Concrete Structural Walls: An Experimental Investigation of Walls with Rectangular and T-Shaped Cross-Sections</i> . Clarkson University; 1995. https://youtu.be/5E8S-sGriX8	
Eje de muro perteneciente a edificación habitacional	
Algoritmo de posprocesamiento de la respuesta local - Eje de muro de edificación habitacional. Interpolación del perfil de curvatura en la altura, empleando el algoritmo de posprocesamiento propuesto. https://youtu.be/67tJmcOmJW4	