



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

Modelación numérica mediante elementos finitos del ensayo a escala real de subconjuntos cruciformes en marcos de acero

Memoria de Título presentada por

Valentina Ignacia Olivares Pérez

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Claudio Ignacio Sepúlveda Contreras

Agosto 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: "Modelación numérica mediante elementos finitos del ensayo a escala real de subconjuntos cruciformes en marcos de acero"

Nombre del candidato(a): Valentina Ignacia Olivares Pérez

Carrera / Grado: Ingeniería Civil

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

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Claudio Sepúlveda, 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: 31-07-2025

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 31-07-2025

; 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.



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

TITULO DE LA TESIS:

Modelación numérica mediante elementos finitos del ensayo a escala real de subconjuntos cruciformes en marcos de acero

AUTOR:

Valentina Ignacia Olivares Pérez

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de INGENIERIA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Nombre

Firma

Prof. Guía
Miembro 1 Comisión
Miembro 2 Comisión

Santiago, Chile, Agosto de 2025

MODELACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS DEL ENSAYO A ESCALA REAL DE SUBCONJUNTOS CRUCIFORMES EN MARCOS DE ACERO

Valentina Ignacia Olivares Pérez¹, Claudio Ignacio Sepúlveda Contreras²

¹ Universidad técnica Federico Santa María

Resumen

Esta memoria desarrolla un modelo numérico mediante elementos finitos para simular el comportamiento de una subestructura cruciforme de acero ensayados a escala real, basado en el estudio experimental de Sepulveda, Mosqueda, et al. (2024). El trabajo se centra en replicar los modos de pandeo local y global, así como el acortamiento axial, observados en los prototipos “A” y “B” bajo cargas cuasiestáticas. Se procesaron datos experimentales, corrigiendo inconsistencias mediante un código en MATLAB, para integrarlos como base de comparación para validar los modelos numéricos generados en SAP2000. Los resultados muestran que el modelo numérico captura adecuadamente el comportamiento global de los sistemas, evidenciando correlación en la forma general de las curvas de desplazamiento e histéresis, especialmente en niveles bajos de drift. No obstante, se observan discrepancias en amplitud del desplazamiento y en la degradación de rigidez a mayores niveles de deformación, atribuibles a simplificaciones en la modelación no lineal, como la representación idealizada del material o las condiciones de borde. A pesar de estas limitaciones, el estudio demuestra el potencial de los modelos numéricos para analizar escenarios complejos y extender el conocimiento sobre el comportamiento sísmico de estructuras de acero, aportando una herramienta eficaz para estudios futuros.

Palabras claves: modelación numérica, marcos de acero, pandeo.

1 Introducción

Durante el terremoto de Northridge en 1994 ocurrido en California, se registraron más de 100 fallas en las conexiones entre vigas y columnas en estructuras de acero (Miller, 1998). La mayoría de estos edificios se empleaban sistemas de marcos especiales de momento, los cuales se diseñan bajo el principio de “columna fuerte- viga débil” (Mahin, 1998; Miller, 1998). Como respuesta a estos daños, se impulsó el uso de columnas esbeltas y de secciones profundas en este tipo de sistemas estructurales (Chansuk P., 2021). Esta elección se basa en maximizar el momento de inercia de la sección, lo que conlleva a un diseño más rentable y eficiente, esto en parte por la reducción del peso de los elementos (Chansuk P., 2021). Sin embargo, estas columnas presentan una mayor susceptibilidad al pandeo local y global, así como también al acortamiento axial cuando están sometidas a fuerzas axiales elevadas y cargas laterales cíclicas (Chansuk P., 2021).

Diversos estudios han abordado el comportamiento sísmico de marcos especiales de momento con columnas de secciones profundas. Por ejemplo, Wu et al. (2018) investigaron los efectos del acortamiento axial mediante simulaciones numéricas, aunque sin validación experimental a nivel de sistema. Por otro lado, Elkady & Lignos (2017) realizaron ensayos experimentales centrados en la susceptibilidad al pandeo de las columnas, pero sin profundizar en la interacción entre estas y las vigas. En contraste, el estudio reciente de Sepulveda, Mosqueda, et al. (2024) entrega evidencia valiosa sobre la interacción viga-columna en marcos de acero, mediante la evaluación de una subestructura cruciforme sometida a ensayos cuasiestáticos e híbridos. Los datos obtenidos permiten una mejor comprensión del comportamiento estructural a escala real gracias al uso de metodologías experimentales avanzadas. Además, se incorporaron actualizaciones al modelo durante el ensayo, lo que permitió mejorar la simulación numérica de las rótulas plásticas en las vigas, utilizando curvas de histéresis obtenidas de secciones reducidas dentro de las subestructuras analizadas.

Sin embargo, los ensayos experimentales a escala real presentan limitaciones debido a su alto costo y complejidad, lo que dificulta su replicación y restringe el análisis a un número limitado de casos. En contraste, los modelos numéricos son más económicos y permiten evaluar múltiples escenarios, aunque requieren ser validados con datos experimentales que respalden sus resultados. Por lo tanto, esta memoria propone el desarrollo de un modelo numérico que replique fielmente el estudio de Sepulveda, Mosqueda, et al. (2024), con el objetivo de representar el daño específico observado en las columnas, tanto a nivel de pandeo local como global en sus bases, así como el acortamiento axial registrado en el ensayo. Este modelo permitirá extender el análisis a otras configuraciones que no pudieron ser evaluadas experimentalmente, y proporcionará información esencial sobre el comportamiento sistémico de los marcos de acero, respaldado por datos experimentales que otorgan mayor credibilidad a los resultados obtenidos.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Replicar numéricamente la respuesta medida experimentalmente de ensayos de una subestructura cruciforme de marcos de acero de escala real.

2.2 Objetivos específicos

OE1. Cuantificar la progresión del pandeo local y global de ensayos de columna de acero mediante procesamiento de datos experimentales.

OE2. Desarrollar un modelo numérico de elementos finitos que represente el pandeo local y global de las columnas experimentado en el ensayo de escala real.

OE3. Comparar los resultados de fuerza, deformación y modos de pandeo obtenidos del modelo numérico con los datos experimentales de ensayos a escala real.

3 Marco teórico

3.1 Marcos de momentos de acero

Los marcos resistentes a momento se utilizan comúnmente como parte de los sistemas resistentes a carga sísmica. Las vigas, columnas y conexiones, son los componentes principales del marco, estos se dimensionan y detallan para resistir las acciones de flexión, axial y corte que resultan del movimiento del edificio a través de los múltiples ciclos de desplazamiento inelástico durante un terremoto, de tal manera que pueden resistir sin deformarse excesivamente o colapsar (Hamburger et al., 2009). En estas estructuras, las zonas disipativas están localizadas fundamentalmente en las rótulas plásticas (Ilustración 1; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), cerca de las uniones viga-columna, y la energía se disipa por medio de flexión cíclica por fluencia del acero.

la metodología de diseño que se ocupa para los marcos de acero es a través del análisis del mecanismo “columna fuerte- viga débil”, donde se diseña con tal que las rotulas plásticas de la estructura se forman en los extremos de las vigas, mientras que las columnas permanecen en el rango elástico, a excepción de la base de las columnas (Crisafulli, 2018) (Ilustración 1). Esto ocurre debido a que las vigas están diseñadas para ser menos rígidas que las columnas, permitiendo que se deformen más fácilmente en respuesta a cargas laterales, ayudando a disipar energía y reducir la rigidez de la estructura.

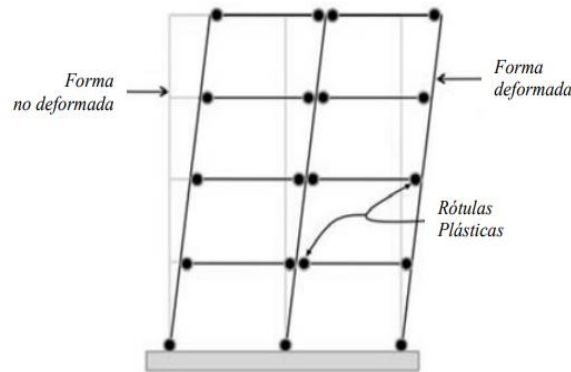


Ilustración 1 Mecanismo de movimiento lateral idealizado para marcos de momento.

Fuente: Hamburger et al. (2009)

Según la normativa American Institute of Steel Construction (2016)(AISC 360-16) indica que la estructura debe diseñarse para limitar la distorsión del panel nodal, evitar la rotulación en columnas y controlar los efectos de pandeo local. Con estos requisitos se logra que la estructura desarrolle una respuesta dúctil y estable. Las rótulas plásticas deben exhibir una capacidad de rotación inelástica de 0.03 radianes, como mínimo.

3.2 Interacción viga-columna

La interacción viga-columna en un marco de acero se refiere al comportamiento conjunto de estos elementos estructurales frente a cargas verticales y laterales. Las vigas tienen la función de transferir las cargas laterales hacia las columnas, mientras que estas últimas se encargan de transmitir tanto las cargas verticales como las horizontales hacia la cimentación. Esta interacción genera una redistribución de momentos flectores y esfuerzos axiales entre vigas y columnas, por lo que su adecuada consideración es esencial para garantizar el desempeño estructural. Una concentración excesiva de esfuerzos en puntos específicos puede provocar fallas localizadas y comprometer la estabilidad global del sistema. Entre los factores que influyen en esta interacción se encuentran la rigidez relativa entre vigas y columnas, el tipo de conexión utilizada, la distribución de cargas y la capacidad resistente del material (Crisafulli, 2018).

Según la normativa del American Institute of Steel Construction (2016) (AISC 360-16), los elementos estructurales deben verificarse individualmente frente a sus estados límite de resistencia, considerando

solicitaciones de flexión, corte y carga axial. Sin embargo, más allá del comportamiento individual de vigas y columnas, la conexión entre ambos elementos juega un rol crítico en la capacidad del sistema para disipar energía durante un evento sísmico. El principio de diseño “columna fuerte-viga débil” busca garantizar que las zonas de disipación de energía se concentren en las vigas mediante la formación de rótulas plásticas, evitando la falla prematura de las columnas. Esta condición debe ser verificada tanto en términos de resistencia como de rigidez relativa de los elementos involucrados. Para analizar esta interacción viga-columna, se emplean diversas metodologías:

- Ensayos experimentales a escala real: permiten evaluar el comportamiento conjunto de las conexiones viga-columna bajo cargas cíclicas, capturando fenómenos como el pandeo local, la degradación de rigidez y la acumulación de daño. Estos ensayos entregan información crucial sobre la ductilidad, capacidad rotacional y secuencia de mecanismos de falla.
- Modelos numéricos mediante elementos finitos: softwares como SAP2000, OpenSees o ANSYS permiten simular la respuesta lineal o no lineal de sistemas estructurales completos, considerando la interacción entre elementos y conexiones. Estos modelos permiten incluir efectos de no linealidad geométrica, comportamiento inelástico del material y rotación plástica concentrada.
- Análisis estáticos no lineales (pushover): se utilizan para aplicar cargas laterales controladas, que permiten identificar la secuencia de formación de rótulas plásticas y la capacidad última del sistema estructural. Este método incluye los efectos de imperfecciones geométricas iniciales y la inelasticidad de los elementos estructurales.

Según el texto “Diseño sismorresistente de construcciones de acero” de (Crisafulli, 2018) y la norma AISC 360-16 mencionan que es fundamental asegurar la relación resistente flexional entre las columnas y vigas, teniendo en cuenta los efectos del principio de diseño “viga débil- columna fuerte” en la configuración de marcos especiales.

3.3 Pandeo

El pandeo de los elementos ocurre cuando un cierto valor de carga produce una inestabilidad del sistema, experimentando que los elementos se deformen. La capacidad de pandearse de los elementos se ve influenciada por las dimensiones, tipo de conexiones en los extremos, excentricidad de la aplicación de la carga, imperfecciones del material como también los esfuerzos residuales de fábrica. Pero principalmente la tendencia a pandearse es para elementos comprimidos esbeltos en donde la relación entre la longitud del miembro y su radio de giro es mínima. Un elemento no esbelto es aquel cuya relación ancho-espesor no excede el valor límite “ λ_r ” establecido en la Tabla B4.1a de la Especificación American Institute of Steel Construction (2016) (ANSI/AISC 360-16). Por el contrario, si dicha relación supera ese valor, el elemento se clasifica como esbelto. Los tipos de pandeo que se van a abordar en la memoria serán los siguientes:

- Pandeo local: El pandeo local surge cuando una o más placas que conforman el perfil fallan por inestabilidad debido a grandes esfuerzos concentrados, especialmente en perfiles con placas delgadas (Razón ancho-espesor). Esta falla puede presentarse incluso antes de que el perfil alcance su capacidad plena de carga, particularmente suele localizarse en zonas sometidas a elevados momentos flectores o en regiones con restricciones geométricas, como en las conexiones o elementos rigidizados (Fermendois, 2022)(Ilustración 2). Sus efectos incluyen una reducción en la resistencia a la flexión, incluso dentro del rango elástico, una pérdida de rigidez y una disminución en la capacidad de corte del elemento.
- Pandeo global: El pandeo global en una columna de acero es un fenómeno de inestabilidad estructural que afecta al miembro en su totalidad cuando está sometida a una carga axial considerable. Se presenta como una deflexión lateral significativa de la columna (Ilustración 2), y puede ocurrir cuando la relación entre la longitud de la columna y su radio de giro excede ciertos límites críticos. Este tipo de pandeo es más común en columnas largas y esbeltas, y resulta en una pérdida súbita de capacidad de carga, lo que puede provocar una falla catastrófica

si no se prevé adecuadamente. A diferencia del pandeo local, el pandeo global compromete el comportamiento estructural del elemento completo. (Fermadois, 2022)

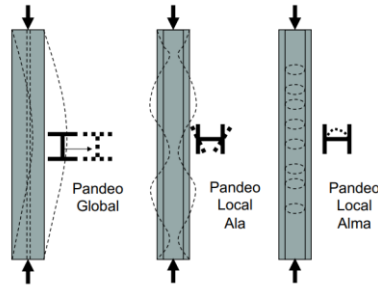


Ilustración 2 Tipos de pandeo a una columna.

Fuente: Fermadois (2022)

Para evaluar los modos de pandeo en una estructura, es necesario seguir una serie de pasos. En primer lugar, se deben determinar las cargas aplicadas, tanto permanentes como variables, así como las características geométricas y mecánicas de la estructura. A continuación, se seleccionan las combinaciones de carga que representen las condiciones límite más críticas del sistema. Posteriormente, se procede a modelar la estructura y a realizar un análisis estructural, con el fin de calcular los esfuerzos internos y las deformaciones en los distintos elementos bajo dichas combinaciones de carga. Finalmente, se lleva a cabo la verificación de la resistencia y la estabilidad de la estructura para asegurar que pueda soportar las solicitaciones previstas sin riesgo de inestabilidades, como el pandeo. (ANSI/AISC 360-16)

Según la norma ANSI/AISC 360-16, para los elementos sometidos a compresión, el pandeo por flexión representa el estado límite de falla más probable, ocurriendo generalmente antes de alcanzar la carga última de aplastamiento. La resistencia al pandeo está directamente relacionada con la esbeltez del miembro, expresada mediante la relación $\frac{K \cdot L}{r}$, donde "K" es el coeficiente de longitud efectiva, "L" es la longitud no arriostrada del elemento, y "r" es el radio de giro de la sección. En la Ilustración 3 se muestra la relación que dependiendo de la esbeltez del miembro analizado define el estado de pandeo elástico o inelástico analizado, donde " F_y " es la tensión mínima de fluencia, " F_e " es la tensión por pandeo elástico y " F_{cr} " es la tensión crítica.

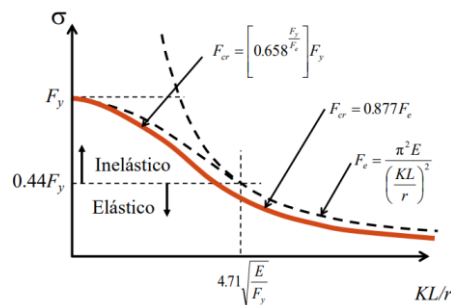


Ilustración 3 Resistencia a compresión con relación a la esbeltez del elemento.

Fuente: Fermadois (2022)

3.4 Columnas esbeltas

Las columnas esbeltas son elementos estructurales que presentan una elevada relación entre su longitud y su sección transversal, por lo que se consideran altas y delgadas en comparación con su área resistente. Esta geometría las hace especialmente vulnerables a inestabilidades estructurales, como el pandeo, tanto a nivel global como local (ANSI/AISC 360-16). Según la norma ANSI/AISC 360-16, la esbeltez de una columna sometida a compresión se evalúa mediante la razón $\frac{K \cdot L}{r}$, se recomienda que esta razón no exceda el valor de 200 para evitar inestabilidades prematuras.

El uso de columnas esbeltas se basa en maximizar el momento de inercia de la sección, lo que conlleva a un diseño más rentable y eficiente, esto en parte por la reducción del peso de los elementos (Chansuk P., 2021). No obstante, esta optimización geométrica también implica una mayor susceptibilidad al pandeo local, al pandeo global y al acortamiento axial cuando la columna está sometida a elevadas cargas axiales en combinación con deformaciones laterales (Ozkula, 2017). A pesar de que se han realizado numerosos estudios sobre columnas individuales bajo cargas axiales y laterales, los datos experimentales sobre el comportamiento de columnas esbeltas como parte de sistemas estructurales completos o subestructuras, que permitan analizar su interacción con el marco resistente, son aún limitados (Ozkula, 2017)

El estudio realizado por Sepúlveda et al. (2025) consistió en un programa de ensayos a escala real con el objetivo de investigar el comportamiento sísmico de marcos resistentes a momentos que incorporan columnas profundas y esbeltas. Esta investigación se llevó a cabo en el Centro Nacional de Investigación en Ingeniería Sísmica (NCREE), en Taiwán. Se ensayaron cuatro especímenes en total: dos de ellos fueron sometidos a protocolos de carga cuasiestática (QS) y los otros dos a simulaciones híbridas (HS). En estas pruebas se utilizaron dos arquetipos estructurales, denominados “A” y “B”, los cuales diferían en el perfil de las columnas y viga, tal como se detalla en la Tabla 1.

Arquetipo	A	B
Sección de columna (1° a 3° piso)	W24×131	W24×176
Sección de viga (1° a 3° piso)	W27×94	W27×129
Sección de columna (4° a techo)	W24×117	W24×131
Sección de viga (4° a techo)	W27×84	W27×94
Columna del 1° piso – $\lambda_f=bf/2tf$	6.7	4.81
Columna del 1° piso – $\lambda_w=h/tw$	35.6	28.7

Tabla 1 Perfiles del arquetipo A y B

Para estudiar el comportamiento a nivel de piso y las interacciones entre columnas, vigas y conexiones, el experimento utilizó una subestructura cruciforme como parte del programa. Donde la altura del espécimen corresponde a una planta y media, incluyendo dos vigas que se extienden hacia ambos lados hasta la mitad de la luz. El desplazamiento lateral del espécimen fue aplicado mediante dos actuadores ubicados en la parte superior de la subestructura. Por su parte, la fuerza axial se introdujo mediante cuatro gatos hidráulicos conectados a una viga de carga fijada en la parte superior de la columna. El espécimen ensayado se muestra en la Ilustración 4. Este montaje experimental aseguró condiciones de frontera representativas y permitió registrar con precisión tanto el comportamiento global como los efectos locales del sistema bajo cargas cíclicas.



Ilustración 4 Subestructura del ensayo a escala real

Fuente: Sepulveda, Mosqueda, et al. (2024)

Los ensayos cuasiestáticos siguieron el protocolo AISC, aplicando cargas axiales constantes entre el 20 % y 40 % de la capacidad de fluencia de las columnas, con el fin de evaluar el comportamiento cíclico bajo cargas laterales controladas. Por su parte, las simulaciones híbridas utilizaron un modelo numérico no lineal de un edificio de seis pisos como subestructura (Ilustración 5), y sometieron los especímenes físicos a cargas sísmicas simuladas, representando condiciones de diseño sísmico (DBE) y máximo considerado (MCE).

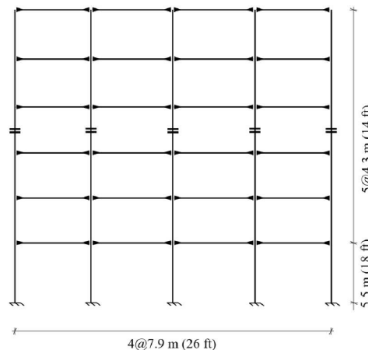


Ilustración 5 Elevación de arquetipo A y B

Fuente: Sepulveda, Mosqueda, et al. (2024)

Ambos métodos permitieron observar respuestas locales y globales del sistema, como pandeo, flexión y degradación de rigidez. En conjunto, los resultados entregan información clave para mejorar la comprensión del daño acumulado en columnas esbeltas de acero y apoyar el desarrollo de modelos numéricos más precisos y confiables.

3.5 Modelación de elemento finito

La modelación por elementos finitos es un método numérico utilizado en la ingeniería para analizar y resolver problemas mediante la división de un sistema en partes más pequeñas (elementos finitos). Por lo cual se trata de resolver el problema a través de ecuaciones diferenciales en una forma matricial para un número finito de puntos/elementos para posteriormente interpolar la solución al resto del dominio, entregando así una solución aproximada a lo planteado, ya que cada elemento se analiza individualmente, y luego se combinan para obtener una solución global del sistema (Celigüeta, 2011). Para validar un modelo de elementos finitos, es fundamental comparar los resultados obtenidos de la simulación numérica con los datos experimentales provenientes de ensayos físicos. Si existe una buena

correlación entre ambos, se incrementa la confianza en la capacidad del modelo para representar con precisión el comportamiento real de la estructura. Esta validación permite asegurar que las predicciones del modelo son fiables y que puede ser utilizado para analizar otros escenarios con un grado adecuado de exactitud.(Celigüeta, 2011).

El método se basa en dividir el cuerpo, estructura o dominio donde están definidas ciertas ecuaciones integrales que caracterizan el comportamiento físico del problema, en una serie de subdominios que no interceptan entre sí. Posteriormente se debe aplicar condiciones de frontera, condiciones iniciales y cargas del sistema descrito, para luego resolver el sistema con ecuaciones algebraicas lineales o no lineales simultáneas donde es el resultado por la discretización del problema analizado(Celigüeta, 2011). Esto es un proceso iterativo en el cual termina hasta que los resultados cumplan con los objetivos del análisis. En los problemas estructurales, las incógnitas son desplazamientos o tensiones generadas por la aplicación de una o más fuerzas. Estas tensiones y desplazamientos se determinan en cada subdivisión que constituyen los elementos, que conforman la estructura sujeta a estas fuerzas(Celigüeta, 2011).

En la ingeniería los programas más utilizados que incluyen el método de elementos finitos son SAP2000, ETAPS y ANSYS. Estos softwares se especializan en el análisis estructural mediante simulaciones de elementos finitos, para examinar y modelar el comportamiento de las estructuras con diversas condiciones. Permitiendo evaluar tanto los esfuerzos y deformaciones del sistema analizado.

4 Metodología

La metodología aplicada para desarrollar cada objetivo específico en la investigación estaría dada principalmente con las siguientes etapas con sus respectivas actividades:

4.1 Extracción de datos

La primera etapa del desarrollo se centra en el procesamiento de los datos experimentales del estudio de Sepulveda, Mosqueda, et al. (2024) , específicamente los correspondientes al ensayo cuasiestático de los prototipos “A” y “B”. Esta etapa contempla el análisis de un total de 31 archivos que contienen registros del desplazamiento de los sensores utilizados durante el ensayo. Sin embargo, los datos disponibles presentan una desorganización en la disposición de las columnas, así como vacíos debido a interferencias de los sensores durante el proceso experimental.

Para abordar esta situación, se desarrolló un código en Matlab, en el cual el objetivo es reorganizar, corregir e interpolar los valores faltantes, permitiendo generar un archivo Excel estructurado, sin vacíos y con una disposición uniforme de los datos, independiente del archivo de origen. En consecuencia, las actividades de esta etapa se relacionan con la extracción, depuración y automatización del procesamiento de datos mediante la creación del código. Las tareas específicas son las siguientes:

A.1.1 Desarrollo del código en MATLAB:

Se implementó un código que procesa los archivos de datos desordenados, generando como salida un archivo Excel con la información correctamente organizada. Para validar el funcionamiento del código, se realizó una corrección manual de uno de los archivos, lo que permitió comparar y verificar la coherencia entre los resultados obtenidos manualmente y los generados automáticamente.

El código sigue una secuencia de pasos específicos, el cual comienza por verificar que cada grupo de coordenadas se encuentre en su posición correspondiente dentro del archivo. En caso de detectar datos desalineados entre las columnas del documento, estos se reordenan según el dato que debería ser antecesor del encontrado para posteriormente ser ubicado en el lugar adecuado. Luego, se identifican posibles intervalos vacíos en los registros; si se encuentran, el código aplica una interpolación lineal entre los datos válidos para estimar los valores perdidos. Finalmente, los valores interpolados se replican de manera estratégica para completar todos los vacíos presentes en el conjunto de datos.

A1.2: Aplicación del código a los archivos del ensayo de escala real:

Una vez validado el código, se procedió a su aplicación sobre los 31 documentos que contienen los registros experimentales del estudio de los ensayos. El objetivo de esta etapa fue corregir y

homogeneizar todos los archivos, dejando los datos listos para su posterior análisis estructural y comparación con los modelos numéricos.

4.2 Desarrollo de modelo numérico de elemento finito

En la segunda etapa se desarrollará un modelo estructural utilizando el software de elementos finitos SAP2000, con el objetivo de reproducir los modos de pandeo observados en el ensayo físico bajo condiciones similares. Para ello, se definirán las condiciones del sistema, lo que implica especificar la geometría del marco, las propiedades mecánicas del material, las secciones transversales utilizadas y las cargas aplicadas. A continuación, se ejecutará el análisis estructural del modelo, el cual entregará resultados como desplazamientos, momentos flectores y deformaciones. Finalmente, estos resultados se exportarán a un archivo Excel, complementados con imágenes del modelo y sus respuestas, con el fin de facilitar el análisis comparativo y la documentación del estudio. Las actividades específicas de esta etapa incluyen:

A.2.1 Definición de las condiciones del modelo en el software SAP2000

Esta actividad busca replicar las condiciones del experimento realizado por Sepulveda, Mosqueda, et al. (2024) particularmente el ensayo cuasiestático correspondiente al prototipo “A” y “B”. Para ello se establecerán la configuración del ensayo simplificado a una columna, las secciones transversales utilizadas y el tipo de análisis requerido.

A.2.2 Ejecutar el análisis del modelo numérico utilizando el software SAP2000

El objetivo es obtener los resultados fundamentales para la investigación, incluyendo fuerzas internas, deformaciones y momentos estructurales. A continuación, proceder a la exportación de dichos resultados, junto con imágenes ilustrativas del modelo. Las imágenes deberán evidenciar especialmente los posibles de pandeo y acortamiento axial, en las columnas del primer piso de la estructura.

4.3 Análisis y comparación de los resultados

En la tercera etapa se procederá al análisis y comparación de los resultados obtenidos del modelo numérico con los datos experimentales del ensayo real, destacando similitudes, diferencias y posibles discrepancias en términos de fuerzas, deformaciones, momentos y modos de pandeo que afectan la estructura estudiada. Asimismo, se llevará a cabo una comparación visual con el propósito de verificar la correspondencia de los modos de pandeo entre ambos estudios. Paralelamente, se evaluará la precisión del modelo numérico mediante el cálculo del error relativo porcentual (Ecuación (1)) de los peaks de los momentos obtenidos en el ensayo real en relación con los resultados del modelo. Finalmente, se identificarán áreas susceptibles de mejora tanto en el modelo numérico como en los datos experimentales, buscando discrepancias significativas que permitan determinar ajustes o perfeccionamientos necesarios. El enfoque principal estará en optimizar la interpretación del modelo, poniendo especial atención en la inclusión y efecto de las imperfecciones iniciales. Las actividades contempladas en esta etapa son las siguientes:

A.3.1 Analizar y comparar los resultados del modelo numérico con los datos reales del ensayo, identificando similitudes, diferencias y posibles discrepancias en los resultados.

A.3.2 Evaluar la precisión del modelo, determinando el error relativo porcentual de los peaks de los momentos obtenidos en el ensayo real con los resultados del modelo numérico. Para aquello se cuantifica y analiza la incertidumbre en los resultados del modelo numérico como el del ensayo de escala real, identificando fuentes potenciales de error y evaluando su impacto en la comparación de resultados. La fórmula general del error relativo porcentual se calcula como:

$$\varepsilon\% = \frac{|X_{exp} - X_{num}|}{X_{exp}} \quad (1)$$

Donde " X_{exp} " es el valor experimental y " X_{num} " es el valor numérico de los valores obtenidos del modelo.

A.3.3 Identificar áreas de mejora tanto como el modelo numérico y los datos obtenidos en el ensayo de escala real de la subestructura ensayada, identificando cualquier discrepancia significativa entre los resultados, con la finalidad de determina posibles mejoras o ajustes necesarios en el modelo.

5 Código

Los datos utilizados en el desarrollo de esta memoria fueron proporcionados por la investigación de Sepulveda, Mosqueda, et al. (2024), centrada específicamente en el ensayo cuasiestático de los prototipos “A” y “B”. Esta investigación incluye un total de 31 archivos que registran la deformación de la subestructura en coordenadas cartesianas (X, Y, Z) a lo largo del tiempo, capturada mediante distintos sensores instalados en el sistema utilizando tecnología de captura de movimiento MoCap por sus siglas en inglés, Motion Capture Sensor technology (Haratian, 2022) como se muestra en Ilustración 7. No obstante, durante el traspaso de estos datos a un nuevo formato se produjo una desalineación en los datos, como se muestra en la Ilustración 6, los valores contenidos en las celdas amarillas deberían estar posicionados en las ubicaciones marcadas en verde. Adicionalmente, se identificaron tramos de datos vacíos, consecuencia de interferencias ocurrida por los sensores durante el experimento. Por ello, como primera actividad se desarrolló un código en MATLAB que permite importar los documentos originales, corregir los desajustes y completar los valores faltantes mediante interpolación.

	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM
4253 9927				-197.324173	169.163666	-579.951538	-196.147797	166.758881	44.447216				
4254 7681				-197.336823	169.102066	-579.962219	-196.160156	166.737106	44.470341				
4255 9536				-197.343246	169.114349	-579.950134	-196.149933	166.797806	44.460442	190.133743	169.765747	5185.23096	
4256 1611				-197.375168	169.155457	-579.966614	-196.202499	166.727356	44.436741				
4257 8096				-197.356781	169.106476	-579.962769	-196.19603	166.70372	44.460739				
4258 5908				-197.353821	169.134445	-579.951904	-196.235335	166.764526	44.445972				
4259 9292				-197.39801	169.193512	-579.964905	-196.235718	166.718658	44.465122	190.528931	169.734467	5185.21436	
4260 9634							-196.250473	166.675827	44.436394	190.631805	169.785828	5185.17578	
4261 3955							-196.285065	166.594925	44.438942				
4262 1025							-196.301102	166.728361	44.439786	190.792877	169.780396	5185.18018	
4263 4785							-196.289291	166.791306	44.444134				
4264 1636							-196.332809	166.711823	44.442272	190.943263	169.828369	5185.15166	
4265 7715							-196.359177	166.542908	44.443943				
4266 5811							-196.349274	166.700531	44.429638				
4267 7422							-196.372345	166.678864	44.447052	191.309921	169.7276	5185.15576	
4268 9155							-196.391632	166.665619	44.431385				
4269 9253							-196.385422	166.634277	44.437046				
4270 2207							-196.386093	166.714081	44.42791	191.556961	169.796572	5185.15576	
4271 0254							-196.441528	166.636887	44.426609				
4272 6665				-197.496735	169.127472	-580.011414	-196.469315	166.618912	44.41291	191.692413	169.765411	5185.1416	
4273 6687				-197.477966	169.157333	-579.953979	-196.477585	166.60994	44.404434				

Ilustración 6 Orden de los datos originales.

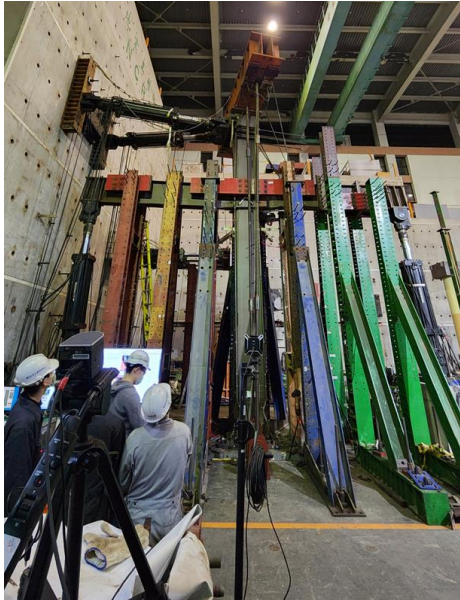


Ilustración 7 Sensores con sistema MoCap en el espécimen.

Fuente: Sepulveda, Mosqueda, et al. (2024)

En el desarrollo del código en Matlab, el proceso se dividió en dos etapas principales. La primera etapa consistió en la corrección de la ubicación de los datos, considerando la forma en que estaban organizados los sensores. Para esto, se estableció un umbral de error de 2 mm, utilizado para identificar valores cercanos dentro de las columnas de coordenadas Z. El código recorre estas columnas hasta encontrar una celda vacía. Al identificar una, busca hacia atrás en las filas previas de la misma columna para localizar el último valor no nulo, que se guarda temporalmente. A continuación, examina las columnas siguientes (a la derecha) en esa misma fila. Si encuentra un valor en la coordenada Z cuya diferencia con el valor almacenado es menor a 2 mm, se asume que dicho grupo de coordenadas (X, Y, Z) está desalineado y se procede a moverlo a la columna con la celda vacía, reemplazando así correctamente la posición del grupo de datos.

La segunda etapa del código se enfocó en el relleno de datos faltantes mediante interpolación. Para ello, el programa recorre cada columna en busca de celdas vacías. Al identificar una, se define la variable X_1 como el último valor conocido inmediatamente anterior, y X_2 como el siguiente valor no vacío posterior. Si ambos son numéricos, se calcula el promedio entre X_1 y X_2 para asignarlo a la celda vacía, aplicando así una interpolación lineal. En caso de que solo exista un valor anterior (X_1), este se repite hacia abajo para completar el vacío. Este procedimiento se aplica a toda la matriz de datos, asegurando una transición suave entre los valores conocidos y completando toda la información faltante. Finalmente, una vez corregida y completada la matriz, el código exporta los resultados en un nuevo archivo en formato CSV, conservando el encabezado original del documento fuente. El código desarrollado se encuentra en el Anexo 1.

Con el objetivo de verificar la correcta implementación del código desarrollado, se realizó una corrección manual de uno de los documentos. Este archivo fue luego comparado con la versión corregida mediante el código en Matlab. Para evaluar la coherencia entre ambos métodos, se graficaron los resultados obtenidos por dos sensores en distintas coordenadas, como se muestra en el Gráfico 1 y el Gráfico 2. En ambos casos, se observa una concordancia entre los valores corregidos manualmente y los generados por el código, sin diferencias significativas.

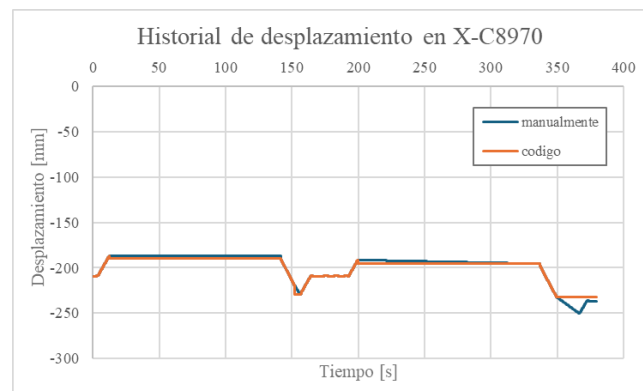


Gráfico 1 Historial de desplazamiento del sensor C8970 coordenada X

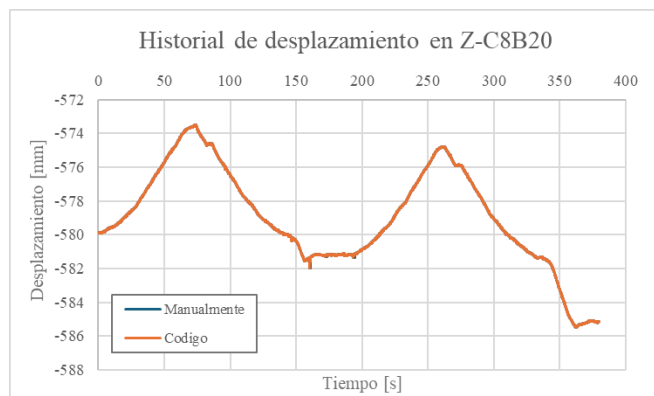


Gráfico 2 Historial de desplazamiento del sensor C8B20 coordenada Z

6 Modelo

El modelo numérico fue desarrollado con el objetivo de replicar las condiciones experimentales del estudio realizado por Sepúlveda et al. (2024), enfocado específicamente en los ensayos cuasiestáticos de los prototipos “A” y “B”. Para ello, se utilizó el software SAP2000 como herramienta de simulación. Si bien SAP2000 es un software que permite simular no-linealidad geométrica y de material utilizando elementos Shell no-lineales, no es una herramienta optimizada para estos fines, por lo que es fácil encontrar problemas de convergencia si la estructura a modelar es muy compleja. Es por esto que en este estudio se optó por simular únicamente una columna en voladizo, omitiendo las vigas del marco ensayado.

La columna se definió mediante elementos tipo “Shell”. En cuanto a la discretización, se utilizó una malla regular de 81.9×82.1 mm en las alas del perfil, mientras que en el alma del perfil se empleó una discretización de 75.8×82.1 mm para el prototipo “B” y de 74.7×82.1 mm para el prototipo “A”. Las condiciones de borde utilizadas fueron apoyos fijos en toda la base para simular una conexión perfectamente empotrada. Para la parte superior se asignó un diafragma en la cara del extremo libre, restringiendo la deformación fuera del plano y el giro, tal como se muestra en la Ilustración 8.

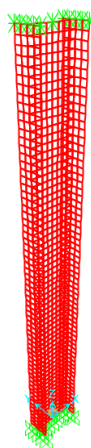


Ilustración 8 Modelo de la columna.

Para capturar un comportamiento estructural más realista, se optó por utilizar un acero tipo A992 Grado 50, cuyas propiedades fueron definidas a partir de los resultados de ensayos normalizados en probetas, tal como se detalla en la Tabla 2. Además, se implementó un modelo no lineal que incorpora tanto la no linealidad del material como la no linealidad geométrica incluyendo grandes deformaciones (corrotacional). Este enfoque permite considerar fenómenos como el endurecimiento del acero

asociados a la no-linealidad material, así como la inestabilidad debido a las imperfecciones iniciales. En SAP2000, la no linealidad del material para elementos tipo “Shell” se definió a través de la herramienta “Layered Shell Section”. En esta sección, se especificaron cinco capas con espesores uniformes tanto en el alma como en las alas del perfil, tal como se muestra a modo de ejemplo en la Ilustración 9.

Estructura	Sección	Límite elástico f_y (345 MPa)	Resistencia última f_u (450 MPa)	Módulo de elasticidad E (200 GPa)	Deformación de resistencia última (%)	Alargamiento a la fractura (%)
Q-A	Alma de la columna	-	-	-	-	-
	Ala de la columna	1.16	1.2	1.02	16.1	29.6
Q-B	Alma de la columna	1.28	1.26	1.01	14.2	25.3
	Ala de la columna	1.17	1.24	0.96	15.2	39.2

Tabla 2 Propiedades de material normalizadas obtenidas de ensayos en probetas.

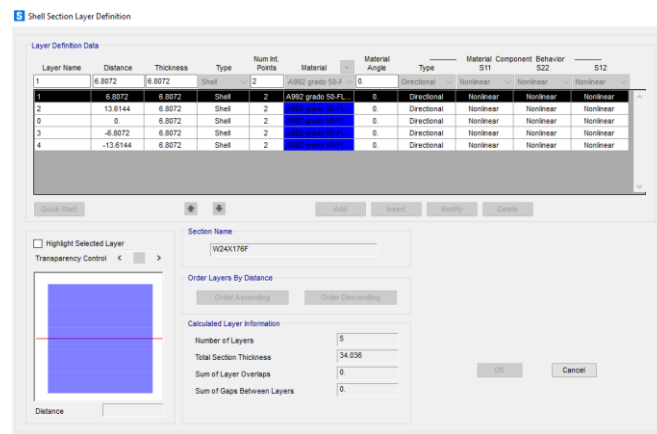


Ilustración 9 Shell section de la sección de las alas del prototipo “B”

Para la asignación de las cargas axiales en el modelo numérico, estas se aplicaron en los nodos ubicados en la parte superior del perfil. En el caso de las pruebas cuasiestáticas, dichas cargas axiales se mantuvieron constantes durante todo el ensayo, y su magnitud se definió en función de la relación entre la resistencia requerida y la resistencia axial de diseño, de acuerdo con lo establecido en las Seismic Provisions for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 341-22) mediante el coeficiente “ C_a ” definido como:

$$C_a = \frac{\alpha_s \cdot P_r}{R_y \cdot F_y \cdot A_g} \quad (2)$$

Donde α_s representa el factor de ajuste del nivel de fuerza LRFD-ASD, R_y es la relación entre la resistencia de fluencia esperada y la nominal, F_y es el límite de fluencia, A_g es el área bruta de la sección y P_r es la resistencia axial requerida. Para el ensayo cuasiestático correspondiente al prototipo “B”, se utilizó una carga axial igual al 40% ($C_a = 40\%$), replicando las condiciones del experimento a escala real. Adicionalmente, se modelaron otros escenarios con cargas axiales menores, correspondientes a $C_a = 30\%$ y 20% , con el objetivo de comparar su influencia en el comportamiento estructural. Para el prototipo “A” se empleó exclusivamente el valor de carga axial utilizado en el ensayo, correspondiente a $C_a = 20\%$. La Tabla 3 resume las distintas cargas axiales consideradas en los modelos.

Datos	Arquetipo A	Arquetipo B
α_s	1	1
Ry	1.1	1.1
Fy (Mpa)	345	345
Perfil	W24x131	W24x176
Ag (mm ²)	24839	33355
Pr (Ca=0.4) (KN)	-	5063
Pr (Ca=0.3) (KN)	-	3797
Pr (Ca=0.2) (KN)	1885	2532

Tabla 3 Carga axial.

La posible inestabilidad de las secciones de las secciones se incorporó a través de la imposición de imperfecciones iniciales. Estas imperfecciones fueron introducidas mediante la aplicación de cargas ficticias siguiendo lo establecido en la norma ANSI/AISC 360-16, considerando tanto el pandeo global, local como el lateral-torsional tal como lo realizaron autores como Tjörvi Björnsson (2017) y Zhang et al. (2023). Por otro lado, la no linealidad geométrica se incorporó a través de la configuración de los “Load Cases” en SAP2000. En primer lugar, se definió un caso no lineal correspondiente a la carga gravitacional (CG_NL), asegurando que el análisis inicial contemplara los efectos de grandes desplazamientos y deformaciones desde un comienzo. En este mismo paso se incluyeron las imperfecciones iniciales previamente descritas, estableciendo este caso como la condición de partida del modelo (Ilustración 10).

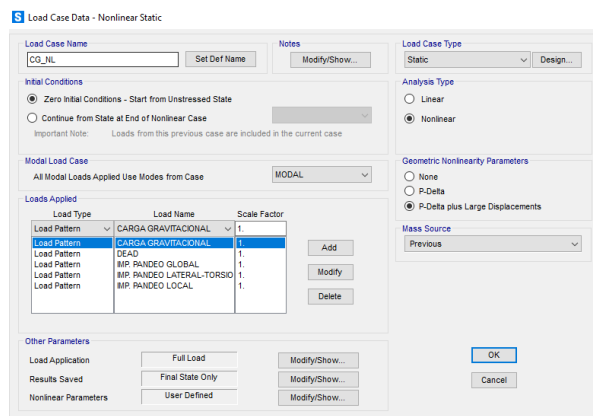


Ilustración 10 Caso de la carga gravitacional.

Posteriormente, se definieron los casos de carga correspondientes al ensayo cuasiestático, donde se aplicaron desplazamientos laterales controlados mediante incrementos de drift desde 0.375% hasta 5%, con el objetivo de generar curvas de histéresis para evaluar el comportamiento cíclico de la columna. Para imponer estos desplazamientos en SAP2000, se utilizó la opción de “Displacement Control” en los casos no lineales. Específicamente, se aplicó un desplazamiento lateral en el nodo superior de la columna, restringiendo el movimiento en las demás direcciones y grados de libertad según las condiciones del ensayo. El valor del desplazamiento aplicado se calculó mediante la expresión:

$$\Delta = Drift \cdot H \quad (3)$$

Donde Δ es el desplazamiento impuesto en la parte superior de la columna y H es la altura total de la columna. Este procedimiento se repitió para cada nivel de drift, simulando la respuesta estructural bajo cargas cíclicas controladas por desplazamiento. Una vez ejecutadas las simulaciones no lineales con control de desplazamiento, se procedió a extraer los resultados necesarios para construir las curvas de histéresis de la columna. Estas curvas permiten representar la relación entre la fuerza lateral aplicada y el desplazamiento correspondiente, lo que permite evaluar el comportamiento cíclico del sistema.

7 Resultados

7.1 Prototipo A

7.1.1 Ensayo

Durante el ensayo cuasiestático realizado en laboratorio por Sepulveda et al. (2024), se empleó el sistema de instrumentación mostrado en la Ilustración 11, con el objetivo de registrar el comportamiento del prototipo ante cargas cíclicas. En dicho ensayo, se planificó alcanzar un drift máximo del 5%. Sin embargo, tanto el prototipo “A” como el “B” no lograron alcanzar dicho valor, ya que se observaron daños significativos en el sistema estructural antes de llegar a ese límite. El Gráfico 3 muestra el historial del desplazamiento en el eje X registrado por los sensores ubicados en el costado izquierdo del prototipo “A” durante el ensayo. Cada curva representa el perfil de desplazamiento lateral a lo largo de la altura de la columna para distintos niveles de drift, desde 0.375% hasta 4.3%, siendo este último el mayor valor alcanzado antes de la detención del ensayo debido a los daños observados. A medida que se incrementa el drift aplicado, se aprecia una amplificación progresiva del desplazamiento lateral, lo que refleja el aumento de la deformación estructural bajo cargas cíclicas crecientes.

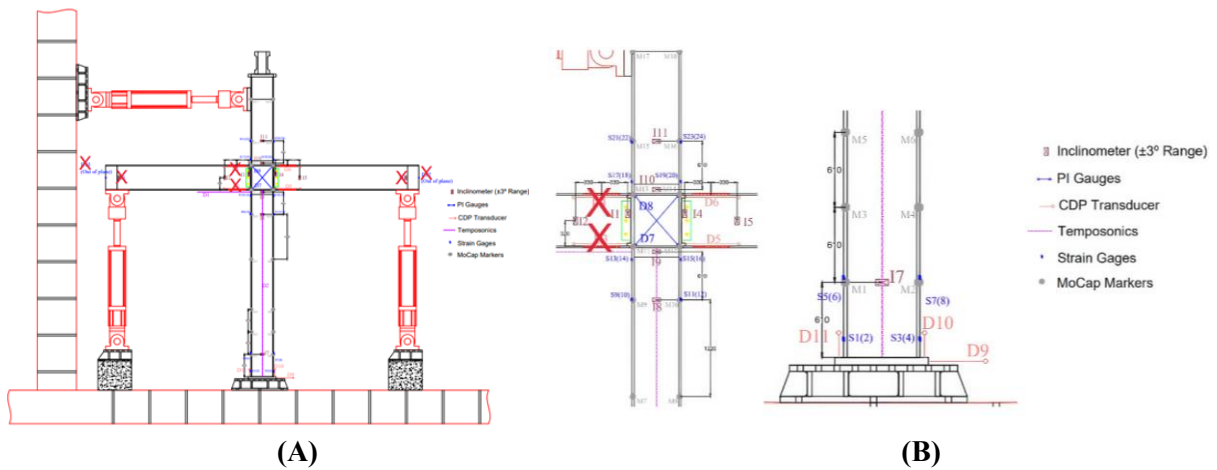


Ilustración 11: Instrumentación de la subestructura cruciforme: (A) General (B) Detalle

De los datos del Gráfico 3A se observa que la deformación lateral en la altura es relativamente lineal hasta un 1% de drift. Luego de esto, comienzan a ver ciertas perturbaciones en la altura y comportamiento no simétrico entre ambas direcciones. Esto se puede deber a la iniciación de un pandeo local observado en fotografías de estados posteriores. Notar que en el trabajo de Sepúlveda et al. (2024) se identifican posibles indicios de pandeo a nivel de strain gauges desde el 1.65% de drift, lo que sería consistente con lo observado en los resultados de MoCap de este estudio (Sepúlveda et al., 2024).

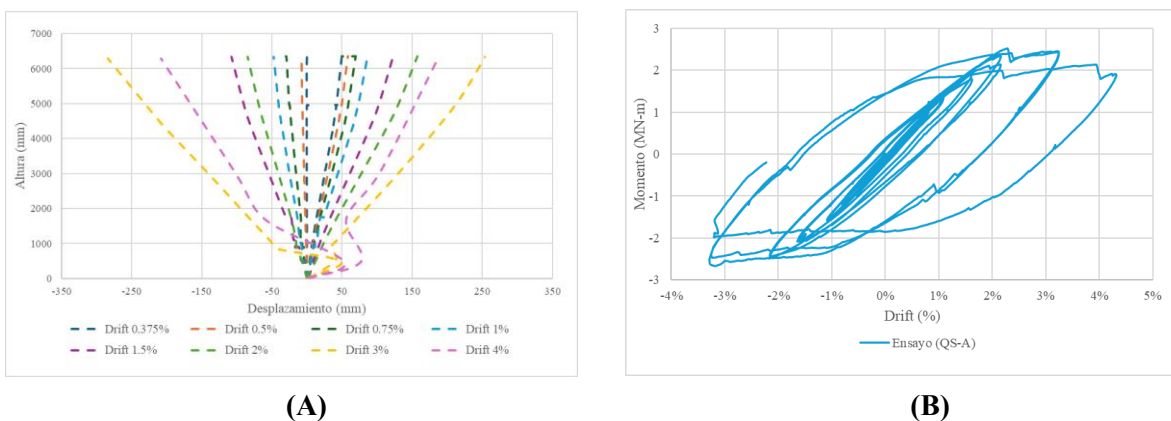


Gráfico 3 Resultados del ensayo QS-A: (A) Historial de desplazamiento eje X e (B) histéresis.

En el Gráfico 4 se muestra el historial del desplazamiento en el eje “Y”. El Gráfico 4A representa los desplazamientos correspondientes a los drift positivos, mientras que el Gráfico 4B ilustra aquellos asociados a los drift negativos. Se observa que, a medida que aumenta el nivel de drift, la magnitud del desplazamiento también se incrementa, comportamiento que ya se había evidenciado en el análisis del eje “X”. En los gráficos se observa que la deformación comienza a manifestarse a partir de un drift del 1,5 %. Sin embargo, es posterior al 2 % de drift cuando se evidencia un incremento considerable en la deformación, especialmente concentrada en la zona de la base de la columna. Asimismo, se aprecia una marcada asimetría entre los desplazamientos, siendo más notable luego de superar un drift del 1%. Esta diferencia podría estar relacionada con imperfecciones geométricas iniciales, rigideces no simétricas o con fenómenos de degradación localizada en las conexiones o en los materiales.

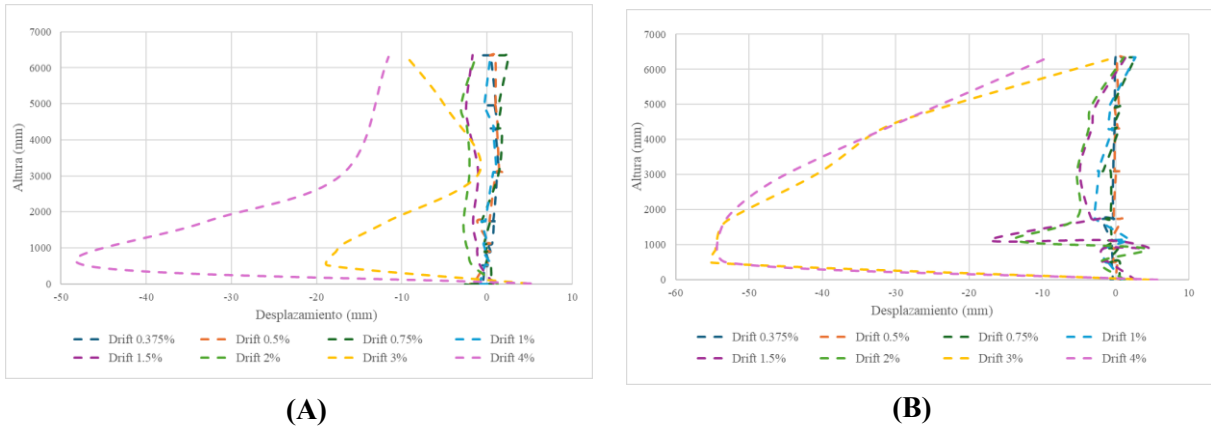


Gráfico 4 Historial de desplazamiento eje Y del ensayo QS-A: (A) Drift positivos; (B) Drift negativos

Según el ensayo realizado por Sepúlveda et al. (2024), durante el primer ciclo con un drift del 3.25% se observaron visualmente los primeros indicios de pandeo local en el alma de la columna (Ilustración 12A). A medida que se incrementó la demanda de deformación, la severidad del pandeo aumentó considerablemente, evidenciándose también en las alas de la columna (Ilustración 12B y Ilustración 12C). Estos daños estructurales coinciden con los patrones observados previamente en los Gráfico 3 y Gráfico 4, reforzando la correlación entre la respuesta visual del ensayo y los resultados obtenidos.

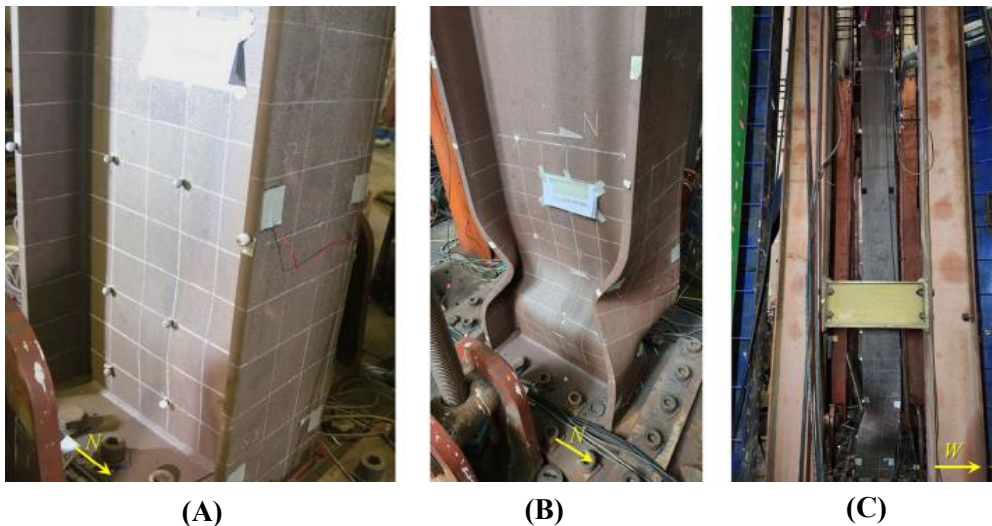


Ilustración 12 Fotos de la base de la columna para el ensayo QS-A: (A) drift 3.25%; (B) drift 4.3% y (C) vista lateral para un drift 4.3%

Fuente: Sepulveda et al. (2025)

7.1.2 Modelo

En el modelo correspondiente al prototipo “A” se obtuvieron resultados hasta el segundo ciclo positivo del drift de 5 %. Al igual que en los resultados experimentales, se decidió graficar únicamente la respuesta del lado izquierdo de la columna, con el fin de mantener la coherencia. En el Gráfico 5 se presenta el desplazamiento en el eje “X”, donde se observa un elevado desplazamiento en la parte superior de la columna, la cual aumenta progresivamente con el incremento del drift aplicado. A partir de un drift del 1 %, se observa un cambio más pronunciado en la amplitud de los desplazamientos (Gráfico 5A), lo que sugiere el inicio de un comportamiento no lineal más evidente en niveles de carga superiores. Esta interpretación se ve reforzada por la curva de histéresis, donde se identifica una meseta de fluencia posterior a los ciclos de drift del 1 %, indicando el inicio del comportamiento inelástico del sistema. También es importante destacar que, si bien la mayoría de los desplazamientos presentan un comportamiento mayoritariamente lineal, se identifica una desviación localizada en la parte inferior de la columna. Esta zona muestra signos de pandeo local, observable a partir de un drift del 2 %, el cual se intensifica progresivamente a medida que se incrementa el drift, indicando una pérdida de estabilidad local en dicha región.

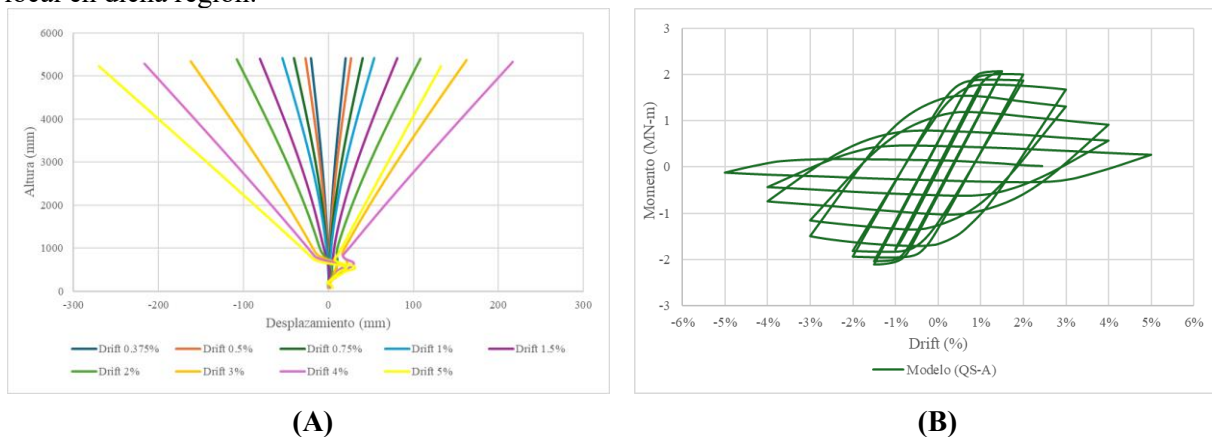


Gráfico 5 Resultados del modelo QS-A: (A) Historial de desplazamiento eje X e (B) histéresis

En el Gráfico 6 se presenta el historial de desplazamiento en el eje “Y” para los drift positivos y negativos. Se observa una cierta simetría en el comportamiento general, especialmente en lo referente a la localización de la deformación máxima, la cual se concentra en la base de la columna. Esta simetría es más evidente al alcanzar un drift del 5 %, donde ambos sentidos de carga presentan niveles de deformación iguales. Sin embargo, al analizar drifts menores, se evidencia que los drift negativos tienden a generar desplazamientos de mayor magnitud que los positivos, lo que podría estar asociado a la presencia de imperfecciones iniciales o asimetrías en la rigidez del sistema. Además, al igual que en el eje “X”, se aprecia un cambio significativo en el patrón de desplazamiento a partir de un drift del 1 %, ya que antes de ese umbral la columna no muestra variaciones relevantes, lo que sugiere un comportamiento predominantemente elástico en las primeras etapas de carga.

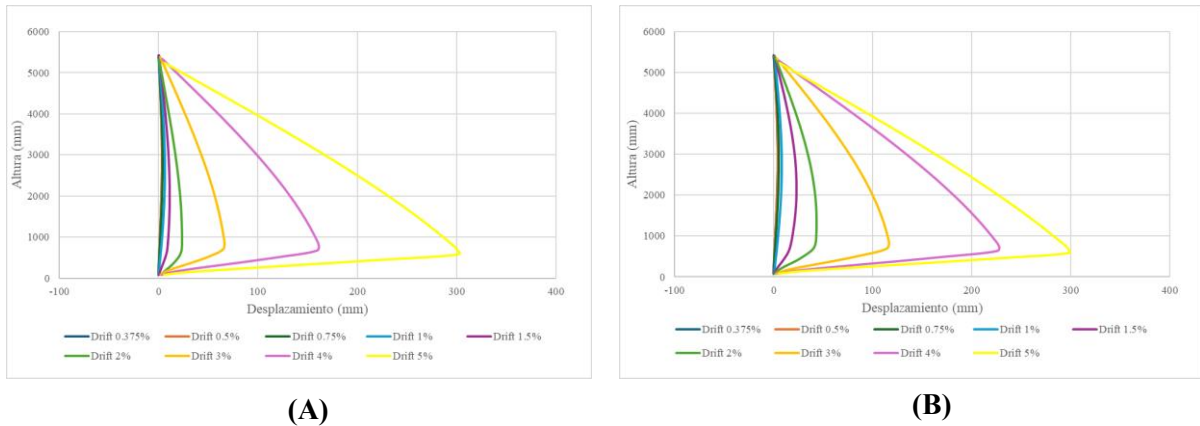


Gráfico 6 Historial de desplazamiento eje Y del modelo QS-A: (A) Drift positivos; (B) Drift negativos

Las imágenes obtenidas desde el modelo numérico, tal como se muestra en la Ilustración 13, permiten visualizar el estado final de la columna tras la aplicación del último paso del modelo que fue el segundo ciclo del drift positivo del 5 %, correspondiente al término del análisis. En esta figura se aprecia claramente la aparición del pandeo local en la base de la columna, coincidiendo con la zona de mayor concentración de deformación. Por otra parte, en la Ilustración 13C se observa también un acortamiento axial de la columna, lo que refuerza la evidencia de inestabilidad local y deformaciones significativas en la etapa final del ensayo numérico.

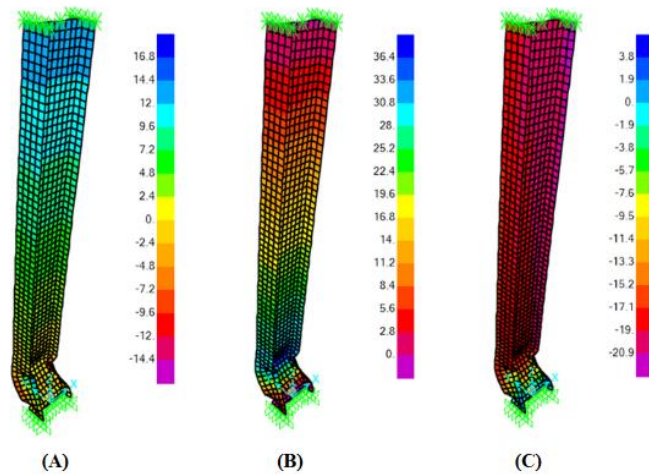


Ilustración 13 Deformación de la columna QS-A: (A) dir. X; (B) dir. Y; (C) dir. Z en cm

La Ilustración 14 presenta la distribución de los esfuerzos equivalentes de Von Mises (SVM) en el último paso de carga, correspondiente a un drift del 5 %, utilizando la opción “Normalize Stresses by Material Strength”. Esta función permite escalar los esfuerzos obtenidos dividiéndolos por la resistencia del material; en este caso, se empleó un acero A992 Grado 50, con un esfuerzo de fluencia aproximado de 345 MPa.

En este contexto, un valor normalizado igual a 1.0 representa el límite de fluencia del material, representado por el color morado en la columna, mientras que valores superiores indican una demanda inelástica significativa o plastificación. Tal como se observa en la Ilustración 14B, los mayores esfuerzos se concentran en la base de la columna, donde los valores normalizados alcanzan hasta aproximadamente 2.2 veces la resistencia de fluencia, lo que evidencia una plastificación considerable en dicha zona. Esta distribución es coherente con la aparición de mecanismos de daño local, como el pandeo del alma y las alas. En contraste, las zonas media y superior de la columna muestran valores de SVM inferiores a 1.0, lo que indica que estas regiones permanecen en el rango elástico del material.

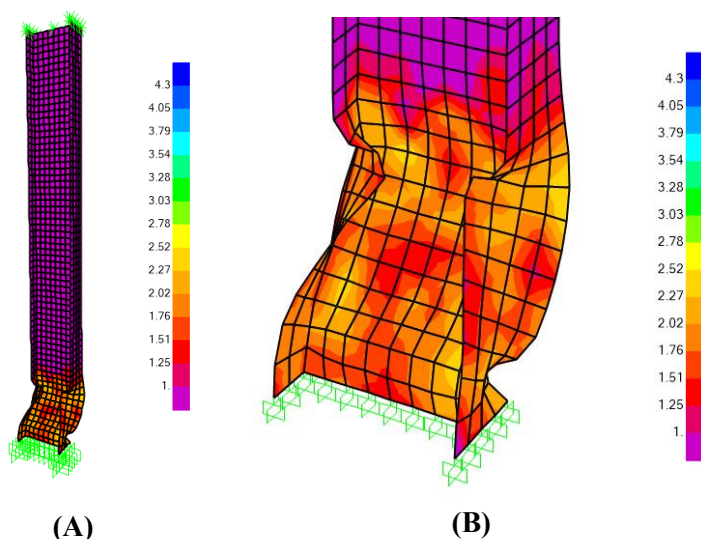


Ilustración 14 SVM del modelo QS-A: (A) columna completa y (B) Base de la columna

7.1.3 Comparación ensayo-modelo

Para comparar el comportamiento del modelo numérico con el del ensayo a escala real correspondiente al prototipo QS-A, se graficó el historial de desplazamiento en el eje “X”, como se muestra en el Gráfico 7. En dicho gráfico, la línea continua representa los datos obtenidos del modelo, mientras que la línea segmentada corresponde a los resultados experimentales del ensayo.

A lo largo de distintos niveles de drift, se aprecia una cierta semejanza en la magnitud de los desplazamientos, así como la aparición de pandeo local cercano a la base de la columna en ambos casos. Sin embargo, una diferencia relevante es que la magnitud del pandeo local observado en el ensayo es mayor que la registrada en el modelo. A pesar de ello, los resultados del modelo numérico muestran una tendencia coherente con los datos experimentales, evidenciando el inicio del comportamiento no lineal a partir del 1 %, donde se presenta un cambio marcado en las amplitudes del desplazamiento, siendo consistente con los indicios de pandeo que se observaron del strain gauges del ensayo que fue desde el 1.65% de drift (Sepúlveda et al., 2024).

En cuanto a las diferencias observadas, se identifica que el pandeo local en el modelo numérico se manifiesta a partir de un drift del 2 %, mientras que en el ensayo real aparece de forma más tardía, aproximadamente al alcanzar un 3 %. Además, la magnitud del pandeo local es significativamente mayor en el ensayo, con un valor máximo cercano a los 80 mm, en comparación con los aproximadamente 30 mm registrados en el modelo. Si bien en ambos casos se aprecia un comportamiento asimétrico frente a los ciclos de drift positivos y negativos, esta asimetría es más pronunciada en el ensayo real. Esto podría atribuirse a factores como imperfecciones geométricas iniciales, condiciones de borde no consideradas o daño acumulado en los materiales, los cuales no fueron completamente incorporados en la modelación numérica.

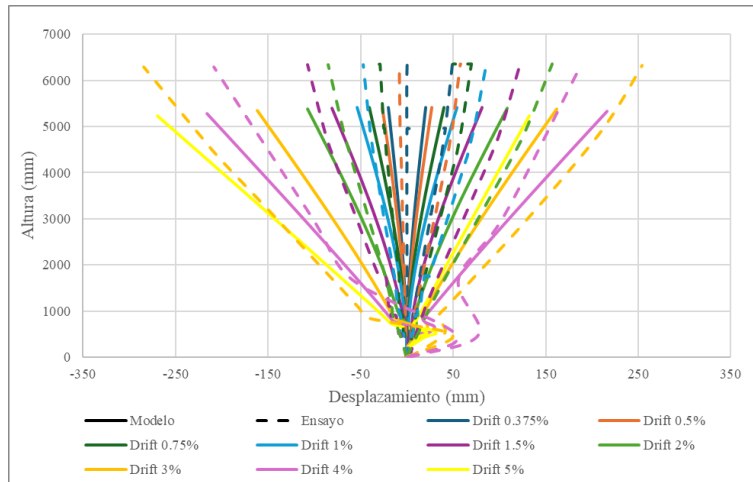
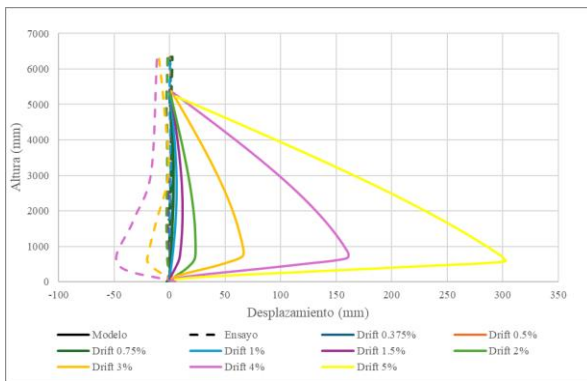
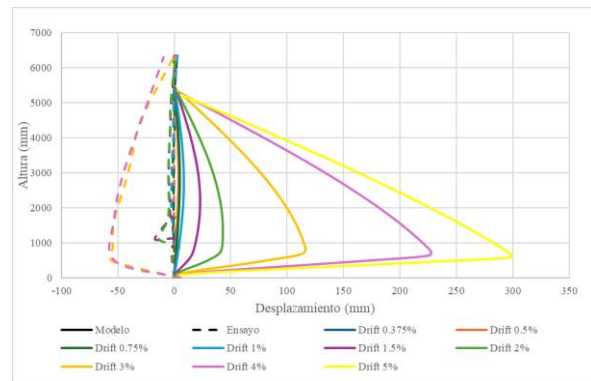


Gráfico 7 Historial de desplazamiento eje X del modelo y ensayo QS-A.

El Gráfico 8 compara el historial de desplazamiento en el eje Y para distintos niveles de drift, tanto del ensayo experimental como del modelo numérico. En ambos casos, se observa un aumento progresivo de los desplazamientos, concentrándose la mayor deformación en la base de la columna lo que refleja un comportamiento de pandeo en esa zona. Además, en los primeros ciclos de drift no se aprecia una deformación significativa en la columna para ambos casos. Otro aspecto en común es la asimetría en la respuesta entre drifts positivos y negativos, donde los positivos tienden a mostrar una respuesta más contenida, con ciclos más cerrados y de menor magnitud respecto a los negativos. No obstante, a medida que aumentan los niveles de drift comienzan a notarse diferencias entre ambos métodos, en el ensayo a partir de un drift de 2% se observa una deformación considerable, mientras que en el modelo numérico esto ocurre desde un 1.5%. Finalmente, se evidencia una discrepancia considerable en la magnitud máxima de desplazamiento alcanzado, ya que el modelo registra un valor cercano a los 300 mm, mientras que el ensayo muestra un desplazamiento máximo de aproximadamente 50 mm.



(A)



(B)

Gráfico 8 Historial de desplazamiento eje Y del modelo y ensayo QS-A: (A) drifts positivos y (B) drifts negativos

En el Gráfico 9 se presenta la comparación entre las curvas de histéresis obtenidas en el ensayo experimental y las generadas por el modelo. Se observa que la curva producida por el modelo reproduce de manera adecuada la tendencia general del comportamiento histérico característico de una columna de acero, especialmente en los ciclos iniciales. En esta etapa, la relación entre momento y drift sigue una trayectoria bastante similar a la registrada en el ensayo. Sin embargo, a medida que aumentan las demandas de deformación, comienzan a aparecer diferencias más significativas entre ambos resultados.

En particular, el modelo presenta ciclos de histéresis con una amplitud menor cuando la respuesta supera el rango elástico que sería después de un drift del 1%, lo que sugiere que la representación numérica no

logra captar completamente la degradación de rigidez y la disipación de energía observadas en el ensayo real, que por su parte indaga el rango inelástico después del drift del 1.5%. Análogamente, el ensayo muestra una degradación progresiva de la rigidez y una disipación de energía, sobre todo en los ciclos correspondientes a drifts mayores. Además, se aprecia que la curva experimental no exhibe una meseta tan prolongada como la que se observa en la respuesta numérica. También cabe a destacar que el modelo presenta una respuesta más rígida, debido a las condiciones de empotramiento en la base, que a su diferencia del ensayo se ocupó una placa base, donde entrega una cierta flexibilidad al sistema.

En cuanto a la precisión del modelo numérico, se aplicó la ecuación (1) para calcular el error relativo porcentual entre los peaks positivos y negativos de las curvas de histéresis obtenidas en el ensayo experimental y en el modelo. Los resultados indicaron un error del 15 % para el peak positivo y del 17 % para el peak negativo, siendo ambos valores del modelo inferiores a los registrados en el ensayo. Esto evidencia que el modelo tiende a subestimar la capacidad máxima de momento. Adicionalmente, al comparar la rigidez inicial de ambas curvas, se identificó una discrepancia del orden del 14 %, lo que también sugiere que el modelo presenta una mayor rigidez en las etapas iniciales del comportamiento estructural en comparación con la respuesta real observada experimentalmente, esto también se observa como el modelo presenta una mayor pendiente visualmente en comparación con el ensayo.

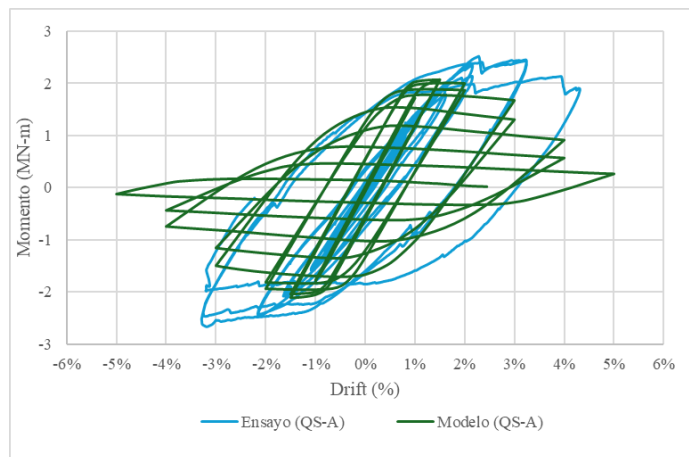


Gráfico 9 Histéresis del modelo y ensayo QS-A.

Por último, en la Ilustración 15 se presentan las imágenes de la columna correspondientes al último nivel de drift, tanto del ensayo experimental como del modelo numérico, para las imágenes del modelo se usó un factor de escala igual a 1. Al igual que en los gráficos anteriores, se puede identificar la presencia de pandeo local en la base de la columna, afectando tanto el alma como las alas (Ilustración 15A y Ilustración 15B). Asimismo, se evidencia un pandeo lateral a lo largo de la columna, lo que indica una combinación de inestabilidades locales y globales.

Cabe destacar que la magnitud del pandeo local en el modelo numérico resulta más pronunciada que en el ensayo experimental, lo cual es consistente con los resultados obtenidos en el Gráfico 8, donde se analizó la deformación fuera del plano. Esta diferencia sugiere que el modelo podría estar sobreestimando la respuesta inelástica en esa zona, posiblemente debido a simplificaciones en la representación de las condiciones de borde o las cargas ficticias que se impuso para las imperfecciones iniciales de la columna.

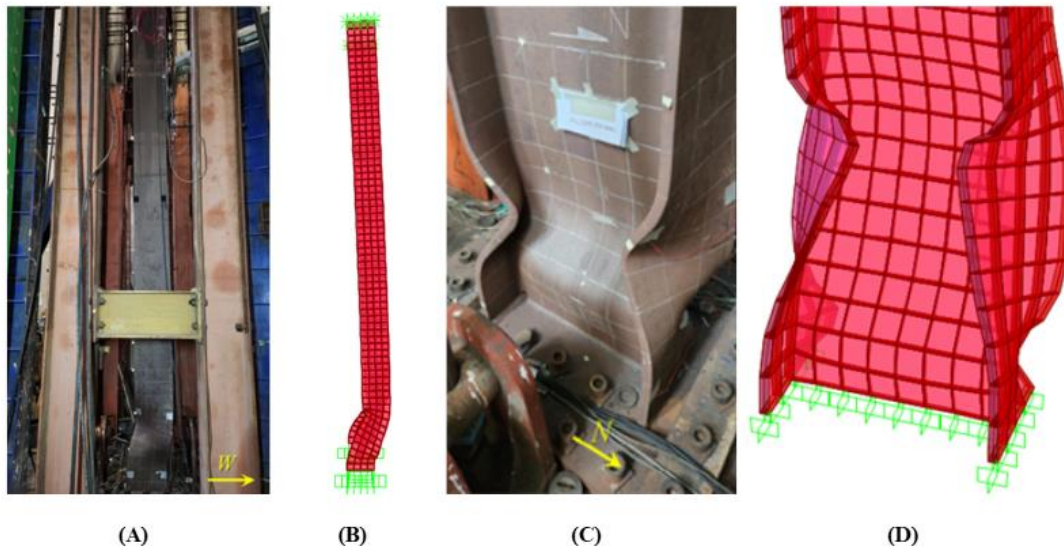


Ilustración 15 Imagen de columna QS-A: (A) Vista lateral del ensayo, (B) vista lateral del modelo, (C) base del ensayo y (D) Base del modelo.

7.2 Prototipo B

7.2.1 Ensayo

En el ensayo correspondiente al prototipo “B”, se logró alcanzar un drift del 3 %. Donde, en el Gráfico 10 se evidencia el historial de desplazamiento estructural de la columna bajo las condiciones de carga aplicadas. Asimismo, se observa cómo la amplitud de la respuesta se modifica a medida que aumenta el drift, destacándose un cambio significativo en el patrón de deformación a partir de un drift del 1,5 %. También se aprecia que el desplazamiento máximo se produce en la parte superior de la columna, aumentando progresivamente conforme se incrementa el drift impuesto, mostrando como existe un pandeo global en la columna.

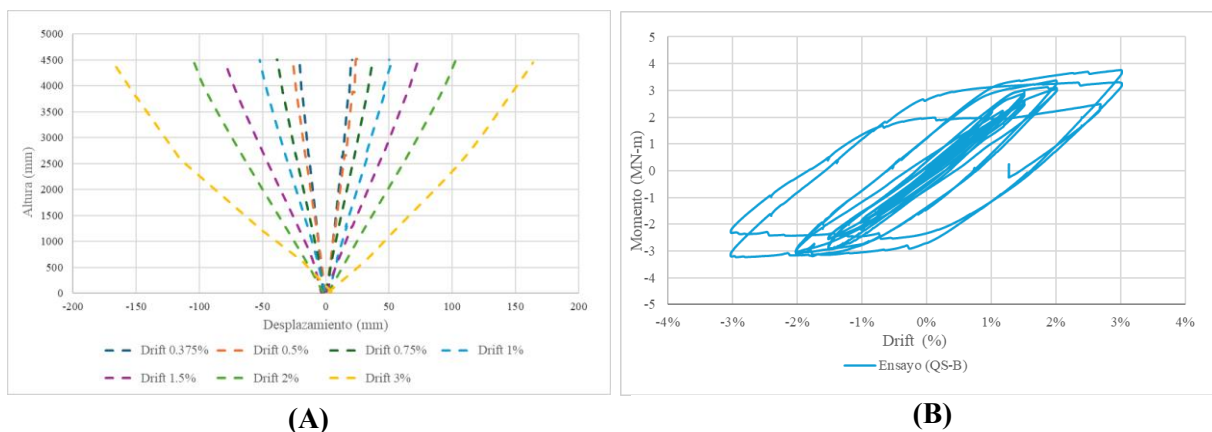


Gráfico 10 Resultados del ensayo QS-B: (A) Historial de desplazamiento eje X e (B) histéresis.

Por su parte, el Gráfico 11 muestra el historial de desplazamiento de la columna en el eje “Y”, evidenciando un comportamiento similar al registrado en el eje “X”. Se observa un incremento significativo del desplazamiento al alcanzar un drift del 2%, en concordancia con el ensayo de Sepúlveda et al. (2025), donde las mediciones obtenidas mediante strain gauges sugieren que empezó el pandeo local en el alma de la columna en un drift del 2% y que por otro lado se detectó visualmente el inicio del pandeo de la columna (Ilustración 16A) y un comportamiento emergente de pandeo asimétrico en un drift del 3%. En las primeras etapas del ensayo se observa en el Gráfico 11, la deformación se concentró en la parte superior de la columna; sin embargo, al llegar a un drift del 3% la deformación crítica se localizó cerca de la base, lo que indica un cambio sustancial en el mecanismo de deformación bajo mayores demandas cíclicas. En ese mismo nivel de drift, se evidenció en la subestructura cruciforme una mayor severidad del pandeo, observándose una segunda onda de pandeo local acoplada con pandeo lateral-torsional y global. En particular, el pandeo global fuera del plano (Ilustración 16C) guarda similitud con el comportamiento obtenido en el Gráfico 11.

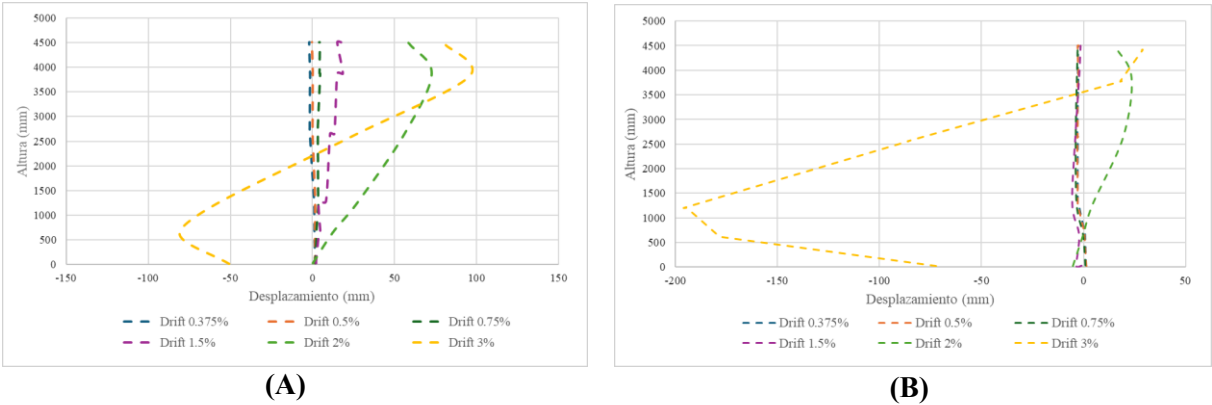


Gráfico 11 Historial de desplazamiento eje Y del ensayo QS-B: (A) Drift positivos; (B) Drift negativos

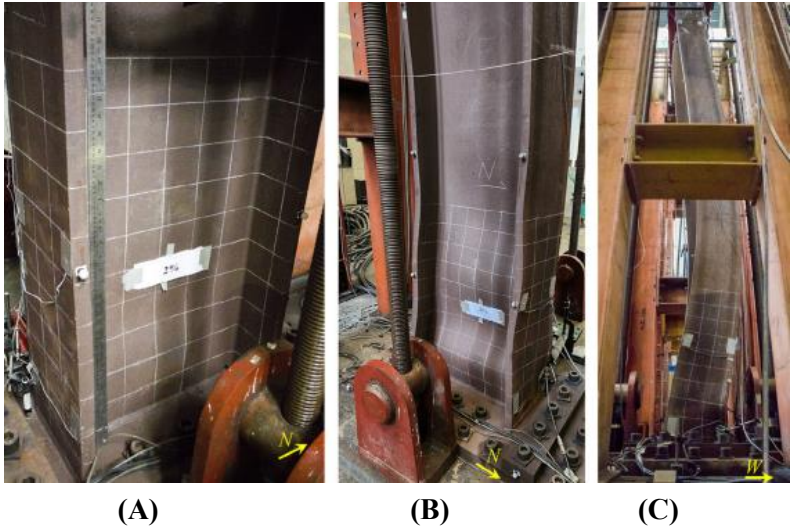


Ilustración 16 Fotos de la base de la columna para el ensayo QS-B: (A) drift 2%; (B) final del ensayo y (C) vista lateral para el final del ensayo

Fuente Sepúlveda et al. (2025)

7.2.2 Modelo

En el modelo correspondiente al prototipo “B”, la simulación alcanzó hasta el primer ciclo del drift positivo del 2%. En el Gráfico 12A se observa que a medida se aumenta el drift aplicado, también se incrementan los desplazamientos en la parte superior de la columna modelada. Las curvas presentan un comportamiento relativamente simétrico respecto al eje vertical, lo que sugiere una respuesta estructural uniforme y sin presencia significativa de asimetrías en las condiciones de borde. A partir del drift del 1.5% se comienza a evidenciar una flexión pronunciada a lo largo de la columna, lo que indica el inicio de un pandeo global; esta observación coincide con los resultados de la curva de histéresis, donde se identifica un comportamiento predominantemente lineal hasta un drift del 1%, seguido por una transición hacia un régimen inelástico, reflejando la pérdida de rigidez progresiva del sistema.

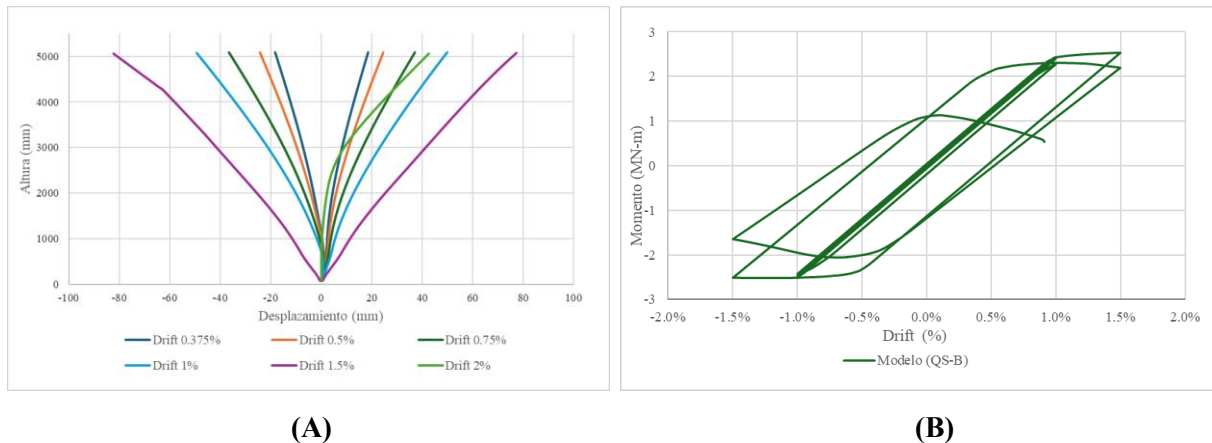


Gráfico 12 Resultados del modelo QS-B: (A) Historial de desplazamiento eje X e (B) histéresis.

En el Gráfico 13 se presenta el historial de desplazamiento en el eje “Y”, donde se evidencia nuevamente la presencia de un pandeo global en el sistema, con una magnitud aproximada de 150 mm. Además, se observa un cambio significativo en el desplazamiento a partir de un drift del 1 %, alcanzando su valor máximo para drifts positivos en el 2 %, y para drifts negativos en el 1,5 %, dando una forma asimétrica en los resultados.

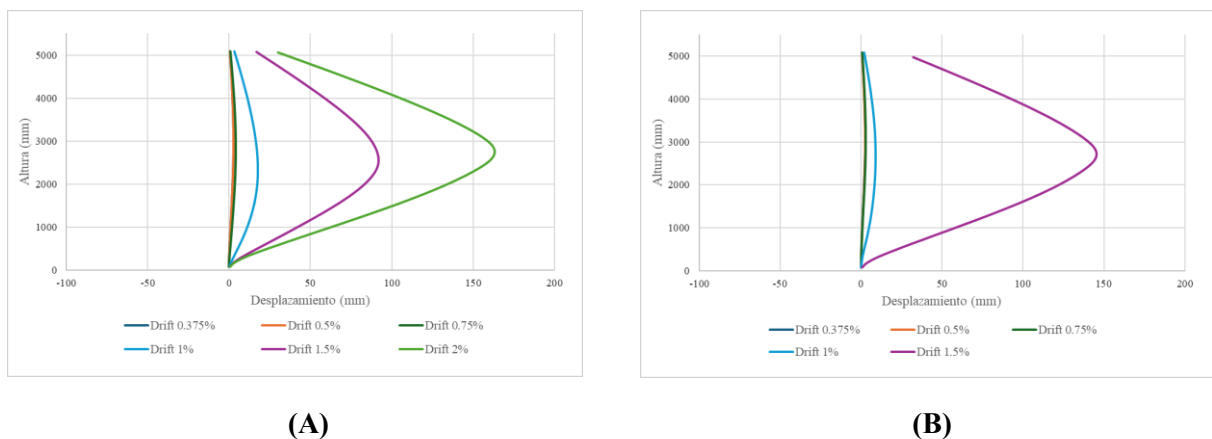


Gráfico 13 Historial de desplazamiento eje Y del modelo QS-B: (A) Drift positivos; (B) Drift negativos

Para analizar el comportamiento de la columna bajo diferentes niveles de carga, se modelaron casos con cargas axiales (CA) del 20 %, 30 % y 40 %. En el Gráfico 14 se presenta la histéresis correspondiente a cada nivel de carga, donde se observa que a menor carga el modelo es capaz de resistir un mayor número de ciclos, llegando incluso a alcanzar un drift del 4 % para el caso de CA = 20 %. Además, se evidencia que la misma columna puede soportar un momento flector mayor en estas condiciones y que la no linealidad del sistema se manifiesta claramente cuando se aplica una carga menor. También se aprecia

una elongación más pronunciada de la meseta de fluencia en el comportamiento estructural bajo dichas cargas menores, como también una mayor disipación de energía de esta.

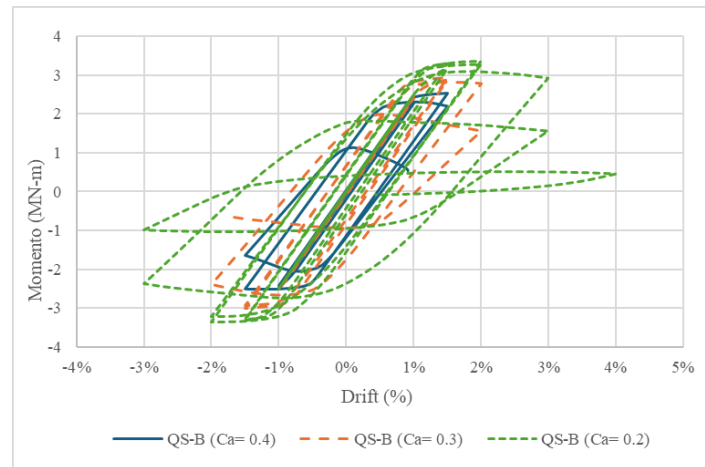


Gráfico 14 Histéresis del modelo QS-B en distintas cargas.

Las imágenes obtenidas del modelo, específicamente para el caso de una carga axial (Ca) del 40 % en el último paso del análisis correspondiente a un drift del 2 %, muestran con claridad la ocurrencia de pandeo global en la columna modelada, tal como se presenta en la Ilustración 17. En dicha etapa se observó una deformación máxima de aproximadamente 20 cm en la zona media de la columna, en la dirección del eje Y, lo que indica no solo la presencia de pandeo global, sino también la manifestación de un pandeo flexo-lateral, evidenciando un comportamiento inestable y no lineal del sistema estructural.

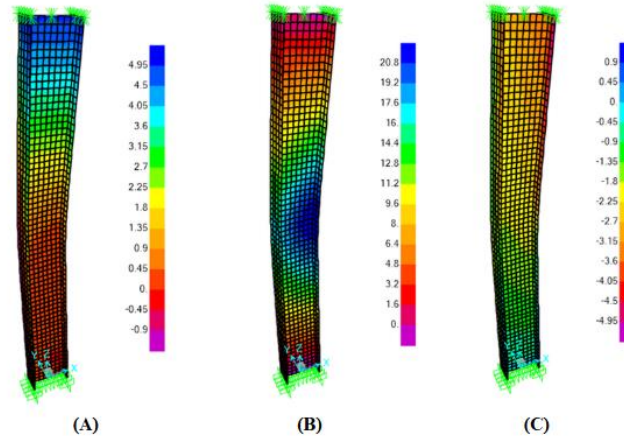


Ilustración 17 Deformación de la columna Ca=40% en cm: (A) dir. X; (B) dir. Y; (C) dir. Z

Por otra parte, los resultados correspondientes a los casos con una carga axial del 30 % y del 20 % se presentan en las Ilustración 18 e Ilustración 19, respectivamente. En estos escenarios, debido a la menor carga aplicada, el modelo fue capaz de resistir un mayor número de ciclos antes de alcanzar la falla. En particular, para $CA = 20\%$, se alcanzó un drift del 4 %, mientras que para $CA = 30\%$ se logró un drift del 2 %, con una mayor cantidad de ciclos en comparación con el caso de $CA = 40\%$. A pesar de estas diferencias, en todos los casos se observó un tipo de pandeo similar, aunque con una intensidad (deformación) más pronunciada en los modelos sometidos a menor carga, debido a la mayor cantidad de ciclos acumulados antes del colapso.

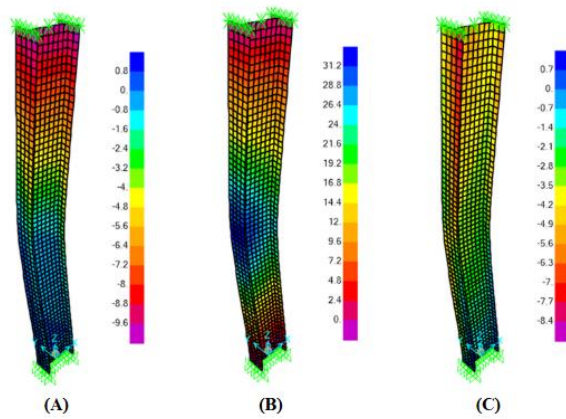


Ilustración 18 Deformación de la columna Ca=30% en cm: (A) dir. X; (B) dir. Y; (C) dir. Z.

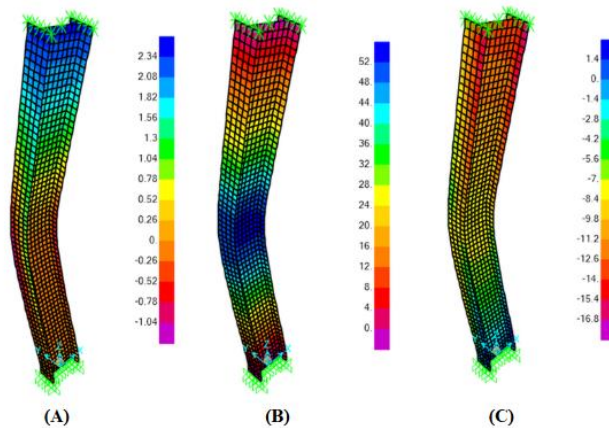


Ilustración 19 Deformación de la columna Ca=20% en cm: (A) dir. X; (B) dir. Y; (C) dir. Z

La Ilustración 20 presenta los esfuerzos equivalentes de von Mises (SVM) en la columna del prototipo “B” para tres niveles de carga axial: $C_a = 40\%$, 30% y 20% . Estos se presentan para un drift del 2% en los casos de $C_a = 40\%$ y $C_a = 30\%$, y para un drift del 4% en el caso de $C_a = 20\%$, correspondientes al último nivel de carga registrado en el modelo. En las tres configuraciones, los valores máximos de esfuerzo se sitúan en un rango aproximado entre 1.1 y 1.5 veces la resistencia de fluencia del material ($F_y \approx 345$ MPa), lo que evidencia una plastificación significativa en las zonas más solicitadas. En todas las configuraciones analizadas, se aprecia una distribución de esfuerzos similar, con una concentración predominante en la zona media de la columna, especialmente en las alas del perfil. Esta tendencia indica una redistribución de esfuerzos producto de la interacción entre la flexión global y la carga axial. Además, en la base de la columna también se observa una notable concentración de esfuerzos, lo que refleja una pérdida de linealidad estructural en esa zona. Este comportamiento es coherente con el empotramiento en la base y con el pandeo lateral evidenciado en los resultados previos.

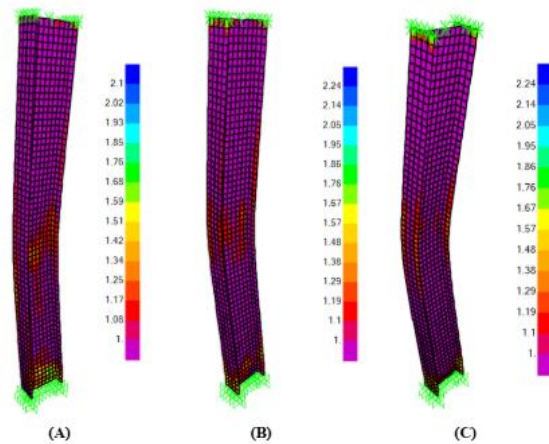


Ilustración 20 SVM del modelo QS-B: (A) Ca=40%; (B) Ca=30%; (C) Ca=20%.

7.2.3 Comparación ensayo-modelo

Para comparar el comportamiento del modelo numérico con el ensayo a escala real, se graficó el historial de desplazamiento en el eje “X” a lo largo de la columna del prototipo B, tal como se muestra en el Gráfico 15. En este gráfico se aprecia que la principal discrepancia entre ambos resultados radica en que el ensayo real alcanzó mediciones hasta un drift del 3 %, momento en que fue detenido, mientras que el modelo numérico solo logró resultados hasta el primer ciclo de un drift del 2 %.

Se observa una cierta concordancia en la forma general de las curvas obtenidas para el modelo numérico y el ensayo experimental. No obstante, la curva del ensayo muestra una respuesta más "abierto" y menos rígida en comparación con la del modelo, lo que sugiere que el sistema real presenta una mayor flexibilidad o está experimentando deformaciones adicionales que el modelo no logra representar completamente. Aun así, en ambos casos es posible identificar la presencia de un pandeo global en la columna. Respecto al comportamiento no lineal, el modelo comienza a evidenciar signos de pandeo global a partir de un drift del 1 %, mientras que en el ensayo este fenómeno se manifiesta de forma más tardía, aproximadamente después del 1.5 %. Este desfase indica que el modelo anticipa la aparición de ciertas inestabilidades, las cuales en el ensayo se desarrollan de manera más progresiva.

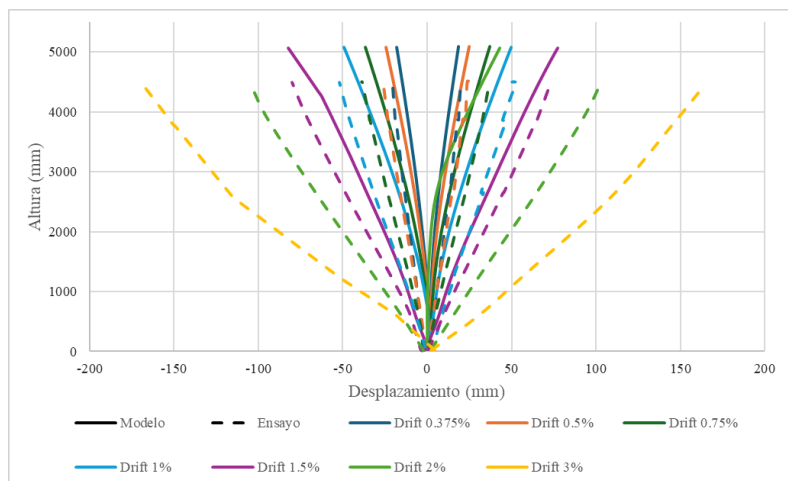


Gráfico 15 Historial de desplazamiento eje X del modelo y ensayo QS-B.

En el Gráfico 16 se presenta el historial de desplazamiento en el eje Y, tanto para los drifts positivos como negativos, comparando los resultados del modelo numérico y del ensayo experimental. En una primera instancia, se aprecia una concordancia en la tendencia inicial de ambos gráficos, hasta aproximadamente un drift del 1 %, donde no se observan deformaciones significativas en la columna,

lo que sugiere un comportamiento principalmente elástico y simétrico en ambas direcciones de carga tanto para el modelo y el ensayo. No obstante, a partir del drift del 1.5 % comienzan a evidenciarse diferencias más relevantes. En el caso del modelo numérico, se identifica el inicio de un pandeo global en la zona media de la columna, indicando una pérdida de rigidez y el comienzo del comportamiento no lineal. Por su parte, el ensayo experimental muestra una respuesta no lineal más tardía, aproximadamente desde el drift del 2 %, con deformaciones que se concentran tanto en la parte superior como en la base de la columna. Esta distribución sugiere una mayor flexibilidad global en el ensayo, posiblemente atribuida a efectos acumulativos no lineales, imperfecciones geométricas iniciales o condiciones de borde no consideradas en el modelo.

En los drifts positivos, se observa además una mayor apertura de las curvas en el ensayo para niveles de drift del 2 % y 3 %, lo cual es indicativo de la presencia de mecanismos de pandeo más severos o deformaciones adicionales que el modelo no logra captar con precisión. En el caso de los drifts negativos (Gráfico 16B), las diferencias también se acentúan a partir del drift del 1 %. El ensayo alcanza desplazamientos máximos de aproximadamente 200 mm, en contraste con los 150 mm registrados en el modelo, mostrando así una respuesta más flexible y deformada. Finalmente, es importante destacar que ambos sistemas presentan cierta asimetría en su comportamiento ante cargas cíclicas, siendo esta más marcada en el ensayo experimental. En cambio, el modelo conserva un comportamiento más simétrico y contenido, lo cual sugiere que no logra replicar completamente las no linealidades estructurales observadas en el ensayo físico.

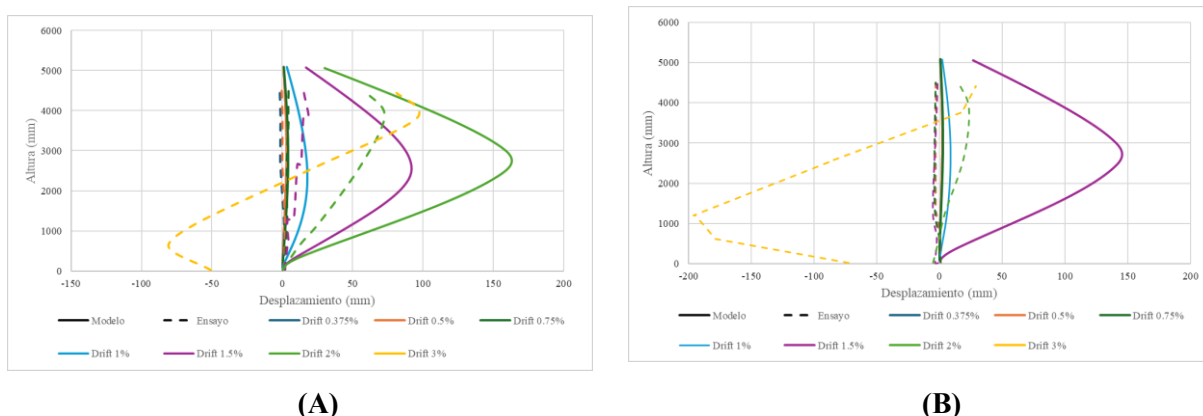


Gráfico 16 Historial de desplazamiento eje Y del modelo y ensayo QS-B: (A) drifts positivos y (B) drifts negativos

En el Gráfico 17 se presenta la comparación entre los ciclos de histéresis obtenidos en el ensayo experimental y aquellos derivados del modelo numérico. En términos generales, se observa que el modelo reproduce de manera similar los valores y la forma de las curvas durante los primeros ciclos del experimento. Sin embargo, es importante destacar que los valores máximos de momento alcanzados en el ensayo experimental se sitúan en torno a 3.7 MN-m, mientras que el modelo únicamente alcanza aproximadamente 2,5 MN-m. Esta diferencia sugiere que, aunque el modelo logra captar la tendencia general del comportamiento estructural.

Otro aspecto relevante al comparar ambos resultados es la formación de la meseta de fluencia. En el modelo numérico, esta meseta comienza a observarse a partir de un drift del 1 %, lo cual resulta consistente con los resultados previamente analizados. En contraste, en el ensayo experimental, los indicios de comportamiento no lineal aparecen más claramente a partir de un drift del 1.5 %. Además, la meseta de fluencia en el ensayo se muestra más prolongada y abierta, lo que refleja una mayor disipación de energía y pérdida de rigidez. En cambio, en el modelo numérico, dicha meseta es más estrecha y cerrada, evidenciando una respuesta más idealizada que no logra representar completamente los efectos inelásticos observados en el comportamiento real de la columna. A pesar de estas diferencias, ambos resultados presentan una tendencia coherente en la evolución del momento respecto al drift, especialmente en los primeros ciclos de carga. Esto indica que el modelo es capaz de capturar de forma

razonablemente precisa el comportamiento global del sistema. Sin embargo, también se evidencian limitaciones en su capacidad para reproducir con fidelidad los fenómenos no lineales observados en niveles de drift más elevados.

Respecto a la precisión del modelo numérico, se utilizó la ecuación (1) para calcular el error relativo porcentual entre los peaks positivos y negativos de las curvas de histéresis obtenidas en el ensayo experimental y el modelo. Los resultados mostraron un error del 33 % para el peak positivo y del 22 % para el negativo, siendo en ambos casos los valores del modelo inferiores a los observados en el ensayo. Esto evidencia que el modelo tiende a subestimar la capacidad máxima de momento. Por otra parte, al comparar la rigidez inicial de ambas curvas, se identificó una diferencia del orden del 6 %, lo cual sugiere que el modelo logra representar de manera adecuada el comportamiento estructural durante las etapas iniciales. Sin embargo, a medida que se incrementan los niveles de drift, la precisión del modelo disminuye, reflejando mayores discrepancias con respecto al comportamiento observado experimentalmente.

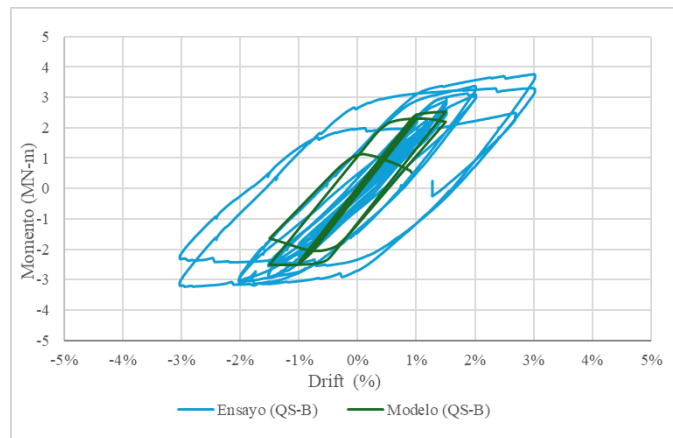


Gráfico 17 Histéresis del modelo y ensayo QS-B.

Por último, en la Ilustración 21 se muestran las imágenes correspondientes al último nivel de drift, tanto del ensayo experimental como del modelo numérico. Para una mejor apreciación de las deformaciones en el modelo, se aplicaron factores de escala de 1.5 y 2 en las Ilustración 21B y Ilustración 21D, respectivamente. En ambas representaciones, se observa la presencia de pandeo lateral-torsional y pandeo global fuera del plano. No obstante, estos mecanismos son visualmente más evidentes en el ensayo real que en el modelo desarrollado en SAP2000. Adicionalmente, en el ensayo se logró identificar un pandeo local en el alma de la columna (Ilustración 21C), fenómeno que también se sugiere en el modelo numérico (Ilustración 21D), aunque de forma menos marcada. Esto indica una posible limitación del modelo para reproducir con precisión ciertos mecanismos de inestabilidad local.

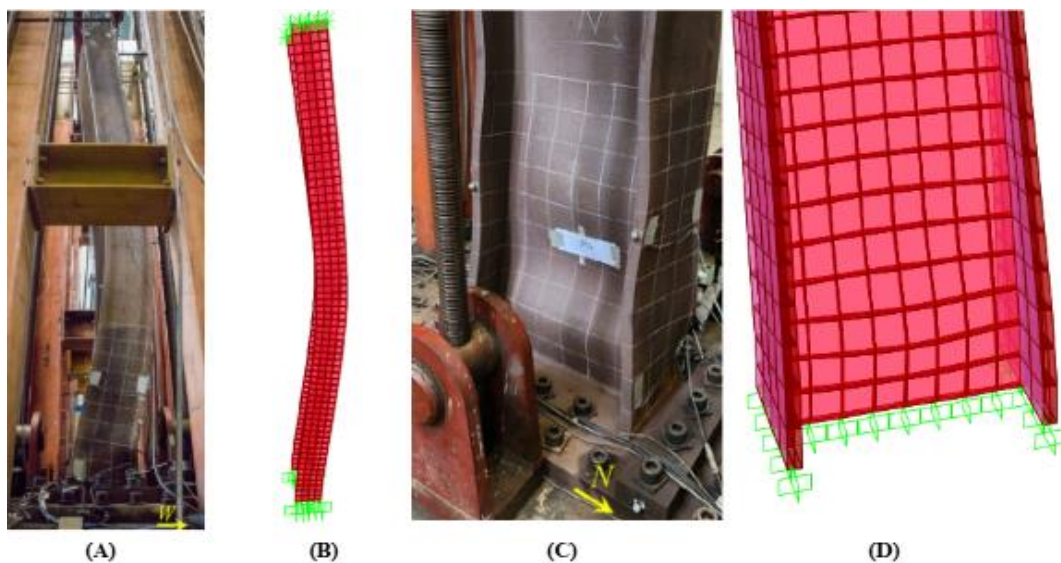


Ilustración 21 Imagen de columna QS-B: (A) Vista lateral del ensayo, (B) vista lateral del modelo, (C) base del ensayo y (D) Base del modelo

8 Conclusión

El análisis realizado permitió comparar de manera detallada el comportamiento estructural de los prototipos “A” y “B” frente a un ensayo cuasiestático, contrastando los resultados numéricos obtenidos en SAP2000 con los datos experimentales. En el caso del prototipo “A”, se observó una correspondencia razonable en cuanto al desarrollo del desplazamiento lateral, la localización de zonas críticas y la aparición de mecanismos como el pandeo local en la base de la columna. Además, ambos enfoques mostraron el inicio del comportamiento no lineal en torno a un drift del 1 %, lo cual es coherente con lo evidenciado en las curvas de histéresis y los registros de desplazamiento.

Sin embargo, también se identificaron diferencias importantes, ya que el modelo tendió a subestimar tanto los desplazamientos máximos como la capacidad resistente, mostrando una respuesta más rígida frente al ensayo. Esto se refleja en los errores relativos de los peaks de las curvas de histéresis, con valores del 15 % y 17 % en los ciclos positivos y negativos, respectivamente. Aunque estos errores son aceptables en términos generales, revelan limitaciones en la representación del pandeo local, que aparece de forma más temprana a partir de un 2 % de drift y menos pronunciada en comparación con el ensayo, que lo presenta al 3 %. Asimismo, el modelo exhibe ciclos de histéresis de menor amplitud una vez superado el rango elástico, lo que sugiere una capacidad reducida para capturar la degradación de rigidez y la disipación de energía observadas en el experimento. Estas diferencias podrían atribuirse a simplificaciones en la modelación, como condiciones de borde idealizadas o la falta de representación del daño acumulativo. Pese a estas limitaciones, el modelo logra reproducir de forma adecuada las tendencias generales del comportamiento estructural, especialmente en los primeros niveles de deformación. No obstante, su precisión disminuye en etapas avanzadas, donde la fidelidad del análisis depende en mayor medida de una modelación más detallada y de la incorporación de efectos no lineales complejos.

En el caso del prototipo “B”, el modelo numérico logró reproducir adecuadamente la tendencia general del comportamiento estructural y la evolución de los ciclos de histéresis durante las primeras etapas de carga. Se observó una buena correlación en la rigidez inicial, con un error relativo del 6 %, lo cual indica un ajuste aceptable en los primeros niveles de drift. Sin embargo, a medida que aumentaron las demandas de deformación, comenzaron a evidenciarse discrepancias más significativas. En particular, el máximo error relativo alcanzó un 33 % en los peaks de las curvas de histéresis, lo que refleja una menor precisión del modelo en etapas avanzadas del ensayo.

Los desplazamientos laterales en el eje del sistema presentan valores y comportamientos similares entre el modelo numérico y el ensayo experimental. Sin embargo, en el caso de los desplazamientos fuera del eje, se observan diferencias tanto en magnitud como en el desarrollo del comportamiento, como también la asimetría de los resultados. Esto evidencia que el modelo presenta dificultades para representar adecuadamente este tipo de deformaciones fuera del plano.

Las diferencias en la magnitud y ubicación del pandeo, junto con la extensión reducida de la meseta de fluencia, ponen en evidencia la dificultad del modelo para capturar ciertas inestabilidades locales observadas en el ensayo. Esto resalta la importancia de considerar ciertos aspectos como las condiciones de borde o tipo de programa a utilizar en la modelación. En síntesis, la comparación entre los resultados numéricos y experimentales demuestra que, si bien el modelo es eficaz para representar las etapas iniciales del comportamiento estructural, su precisión disminuye significativamente frente a estados más avanzados de daño. Por ello, los ensayos físicos a escala real resultan fundamentales para validar y complementar las simulaciones numéricas, permitiendo una comprensión más completa del desempeño estructural ante cargas extremas.

Si bien el software SAP2000 es una herramienta práctica y versátil para realizar análisis no lineales, presenta limitaciones relevantes al momento de simular de forma detallada el comportamiento inelástico, especialmente en elementos tipo Shell cuando se representa un perfil. Entre sus principales restricciones se encuentran la representación simplificada de la plastificación local, la ausencia de modelos de daño acumulativo, las limitaciones para definir con precisión imperfecciones geométricas, y las dificultades de convergencia que pueden surgir en análisis no lineales complejos. Estas limitaciones reducen su capacidad para capturar con fidelidad los fenómenos de degradación progresiva y los efectos acumulativos de daño observados en ensayos reales. Por ello, aunque el modelo desarrollado logra reproducir de forma razonable las tendencias globales del comportamiento estructural, su precisión disminuye cuando se alcanzan estados avanzados de daño, donde se requieren calibraciones más detalladas o incluso el uso de herramientas numéricas más específicas, como Abaqus o Ansys.

Cabe destacar, además, que la modelación de la columna en este estudio se llevó a cabo de manera simplificada respecto a las condiciones reales del ensayo. Por tanto, ciertas discrepancias entre el modelo numérico y los resultados experimentales pueden estar relacionadas con estas simplificaciones, particularmente en aspectos como las condiciones de borde, las conexiones viga-columna o la degradación progresiva del material. En consecuencia, se sugiere que en futuros modelos se incorporen estos factores para mejorar la precisión en la simulación del comportamiento estructural.

En conclusión, el estudio realizado demuestra que el modelo numérico implementado es una herramienta útil para interpretar las tendencias generales del comportamiento estructural de los prototipos "A" y "B", especialmente en los rangos iniciales de drift. No obstante, presenta limitaciones importantes para reproducir con precisión los fenómenos no lineales que se manifiestan en etapas avanzadas del ensayo. En ambos casos, los modelos tienden a subestimar los desplazamientos y sobreestimar la rigidez, lo que se traduce en una menor deformación respecto a los ensayos experimentales, particularmente a altos niveles de demanda. Esto sugiere que la simulación no logra capturar por completo la degradación progresiva ni la acumulación de daño estructural. En el caso de QS-B, además, se observó que una menor carga axial favorece una respuesta más estable y una mayor capacidad de disipación energética, lo que resalta la importancia de considerar este parámetro en futuros estudios.

9 Referencias

- American Institute of Steel Construction. (2016). ANSI/AISC 360-16:Specification for Structural Steel Buildings. In *American Institute of Steel Construction (AISC)*.
- Celigüeta, J. (2011). Método de los elementos finitos para análisis estructural. In *Campus Tecnológico de La Universidad de Navarra, Escuela Superior de Ingenieros*.
- Chansuk P., O. G. , U. C.-M. , H. J. L. (2021). *Seismic Behavior of Deep, Slender Wide-flange Structural Steel Beam-columns*.
- Crisafulli, F. J. (2018). Diseño sismorresistente de construcciones de acero. *Marzo*.
- Elkady, A., & Lignos, D. G. (2017). Full-Scale Testing of Deep Wide-Flange Steel Columns under Multiaxis Cyclic Loading: Loading Sequence, Boundary Effects, and Lateral Stability Bracing Force Demands. *Journal of Structural Engineering*, 144(2), 04017189. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001937](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001937)
- Fernandois, G. (2022). *Elementos en Compresión CIV336-200 Diseño en Acero*.
- Hamburger, R. O., Krawinkler, H., Malley, J. O., & Scott M. Adan. (2009). Seismic Design of Steel Special Moment Frames: A Guide for Practicing Engineers. *NEHRP Seismic Design Technical Brief*, 2.
- Haratian, R. (2022). Motion Capture Sensing Technologies and Techniques: A Sensor Agnostic Approach to Address Wearability Challenges. *Sensing and Imaging*, 23(1), 1–21. <https://doi.org/10.1007/S11220-022-00394-2/FIGURES/8>
- Mahin, S. A. (1998). Lessons from damage to steel buildings during the Northridge earthquake. *Engineering Structures*, 20(4–6). [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(97\)00032-1](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(97)00032-1)
- Miller, D. K. (1998). Lessons learned from the Northridge earthquake. *Engineering Structures*, 20(4–6), 249–260. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(97\)00031-X](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(97)00031-X)
- Ozkula, G. (2017). *UC San Diego UC San Diego Electronic Theses and Dissertations Title Seismic Behavior, Modeling and Design of Deep Wide-Flange Steel Columns for Special Moment Frames*. <https://escholarship.org/uc/item/0gc7z55w>
- Seismic Provisions for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 341-22) Download | American Institute of Steel Construction*. (n.d.). Retrieved October 7, 2024, from <https://www.aisc.org/Seismic-Provisions-for-Structural-Steel-Buildings-ANSIAISC-341-22-Download>
- Sepulveda, C., Mosqueda, G., Uang, C. M., Ozkula, G., Chou, C. C., Wang, K. J., Huang, C. W., Huang, P. C., Cheng, M., Becker, T., El-Tawil, S., & McCormick, & J. (2024). *FULL-SCALE TESTING OF STEEL MOMENT FRAMES CRUCIFORM SUBASSEMBLIES TOWARDS SYSTEM-LEVEL BEHAVIOR ANALYSIS*.
- Sepulveda, C., Ozkula, G., Mosqueda, G., Uang, C. M., Chou, C. C., Wang, K. J., El-Tawil, S., & McCormick, J. (2025). Full-Scale Beam-To-Column Subassemblage Testing for Seismic Evaluation of Deep Columns. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 54(4), 1289–1310. <https://doi.org/10.1002/EQE.4309;JOURNAL:JOURNAL:10969845;WGROU:STRING:PUBLICATION>
- Tjörvi Björnsson. (2017). *Structural analysis of columns with initial imperfections*. <https://skemman.is/handle/1946/27809>
- Wu, T.-Y., El-Tawil, S., & McCormick, J. (2018). Seismic Collapse Response of Steel Moment Frames with Deep Columns. *Journal of Structural Engineering*, 144(9). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0002150](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0002150)


```

        break;
    end
    end
    if ~isnan(x_1) && ~isnan(x_2)
        matriz_dato(fila, col) = (x_1 + x_2) / 2;
    elseif ~isnan(x_1)
        matriz_dato(fila, col) = x_1;
    end
    end
end
end
end
tabla = array2table(matriz_dato, 'VariableNames', dato.Properties.VariableNames);
output_file = [documento(1:end-4) '_corregido.csv'];
writelines(encabezado, output_file);
writetable(tabla, output_file, 'writeMode', 'append');

```

Anexo 1 : Código de Matlab de la corrección de datos