



BUAP

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ingeniería

Secretaría de Investigación Estudios de Posgrado

**HERRAMIENTA DE TOMA DE DECISIONES EN LA
CONVERGENCIA DEL DISEÑO ÓPTIMO DE
EDIFICACIÓN DE MAMPOSTERÍA**

TESIS

Que para obtener el grado de

**MAESTRO EN INGENIERÍA CON OPCIÓN TERMINAL EN
ESTRUCTURAS**

Presenta:

Ing. Jorge Antonio Letras González

Director de tesis:

Dr. José Guadalupe Rangel Ramírez

Puebla, Pue.

Marzo 2026



Oficio No. SIEP/2001-/2025

C. Jorge Antonio Letras González

Matrícula 224470078

Alumno de la Maestría en Ingeniería
con opción terminal en Estructuras, 12ª. gen.
Facultad de Ingeniería, BUAP.
Presente

Por medio del presente, el suscrito M.I. Angel Cecilio Guerrero Zamora, Director de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a su solicitud de aprobación de Tema de Tesis, le autoriza desarrollar el tema titulado: **Herramienta de toma de decisiones en la convergencia del diseño óptimo de edificación de mampostería**. Para obtener el grado de Maestro en Ingeniería con opción terminal en Estructuras. Asignándose como Director de tesis al Dr. José Guadalupe Rangel Ramírez y Codirector al M.I. Anselmo Chávez López.

Sin otro particular de momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente

"Pensar bien, para vivir mejor"

H. Puebla de Zaragoza, 26 de noviembre de 2025.

M.I. Angel Cecilio Guerrero Zamora
Director



C.c.p. Dr. José Guadalupe Rangel Ramírez y M.I. Anselmo Chávez López, Director y Codirector del tema de tesis.

C.c.p. Archivo
JPHT/sco*

Facultad
de Ingeniería

Bld. Valsequillo y Av. San Claudio
s/n, edif. ING - 4, Col. San Manuel,
Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72570
222 229 55 00 Ext. 7610

Heroica Ciudad de Puebla, Pue; a 18 de febrero de 2026
Asunto: **Autorización de impresión de tesis**

M.I. ANGEL CECILIO GUERRERO ZAMORA

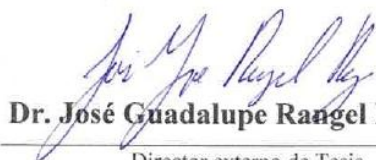
Director de la Facultad de Ingeniería
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Presente:

Por medio de la presente me permito enviarle un cordial saludo y al mismo tiempo notificar a Usted la **autorización de la impresión de tesis del alumno** Ing. Jorge Antonio Letras González, matrícula 224470078, por lo que, se extiende la presente carta para su conocimiento y los efectos legales a los que deba proceder.

Su servidor, asesor del trabajo de tesis que presenta el alumno, después de revisar el contenido del documento, la metodología empleada, y así mismo, de verificar que se han atendido las observaciones y recomendaciones de carácter técnico y de edición; expreso que no existe inconveniente en autorizar su impresión, a fin de que el estudiante de la Maestría en Ingeniería con opción terminal en Estructuras continúe su proceso de titulación, y defender el tema titulado: "Herramienta de toma de decisiones en la convergencia del diseño óptimo de edificación de mampostería", tema otorgado con el oficio No. SIEP/2001-/2025.

Agradezco su amable atención y espero no tenga inconveniente en proporcionar todas las facilidades que le puedan brindar al estudiante, quedo a sus órdenes para cualquier información adicional.

ATENTAMENTE



Dr. José Guadalupe Rangel Ramírez

Director externo de Tesis
Profesor de tiempo completo
Departamento de Tecnologías Sostenibles y Civil
Escuela de Ingeniería y ciencias, Región Centro – Occidente
Tecnológico de Monterrey, Campus Puebla

c.c.p. M.I. Anselmo Chávez López, Codirector del Tema de tesis
c.c.p. Ing. Jorge Antonio Letras González.
c.c.p. Archivo personal

Dedicatoria

Todos mis logros y todo mi esfuerzo, así como como todo mi amor se los dedico ahora y siempre a mis padres: Vicente y Minerva, por su apoyo incondicional, sus enseñanzas y por ser el ejemplo que ha guiado cada paso de mi formación. A mi hermana Cielo, por su ánimo constante y por inspirarme a su manera la importancia de enfrentar las adversidades y a mi abuela Mercedes, por su cariño, sus palabras y por ser una fuente permanente de inspiración y afecto a lo largo de mi vida.

Agradecimientos

Expreso mi más sincero agradecimiento a mi asesor de tesis, PhD. José Guadalupe Rangel Ramírez, por su guía, paciencia y disposición para compartir su conocimiento a lo largo del desarrollo de este trabajo. Sus observaciones, comentarios y orientación académica fueron fundamentales para dar forma a las ideas presentadas en esta investigación.

Asimismo, agradezco a mis compañeros del posgrado, con quienes tuve la oportunidad de compartir discusiones académicas, experiencias y momentos que enriquecieron significativamente este proceso. Su apoyo, colaboración y compañerismo hicieron de estos años de formación una etapa particularmente valiosa; especialmente agradecimientos al Ing. Jesús Loeza.

De igual manera, agradezco a la universidad y al programa de posgrado, particularmente al Dr. Juan Pablo Hidalgo Toxqui, por brindarme el espacio académico, los recursos y el entorno intelectual necesarios para llevar a cabo esta investigación y continuar mi formación profesional.

Finalmente agradezco a Dios, por darme la fortaleza, la paciencia y la oportunidad de recorrer este camino, y por recordarme que incluso en los momentos de mayor incertidumbre nunca estamos realmente solos. Porque aun cuando el mundo nos haya derribado, siempre existe una luz que nos guía hacia adelante: todas las estrellas en el cielo brillan solo para ti.

Contenido

INTRODUCCIÓN	V
I. FUNDAMENTOS Y ANTECEDENTES DEL PROBLEMA	6
I.1. Procedimientos de modelación y diseño estructural para mampostería.....	6
I.2. Conceptos y aplicaciones de la mampostería confinada.	19
I.3. Algoritmos de aprendizaje automático en ingeniería estructural	22
I.4. Resumen de contribuciones de esta investigación.....	28
II. FORMULACIÓN METODOLÓGICA DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN PROPUESTO.....	30
II.1. Fundamentos de integración de esfuerzos en elementos tipo membrana.....	31
II.2. Modelo metodológico de toma de decisiones estructurales.	36
II.3. Alcances y limitaciones del modelo de optimización propuesto.....	38
III. IMPLEMENTACION COMPUTACIONAL DE LA METODOLOGIA PROPUESTA.....	41
III.1. Criterios de diseño computacional del método propuesto	41
III.2. Flujo algorítmico del método de optimización	42
III.3. Estructura computacional para la implementación del método.	46
IV. APLICACIÓN, VALIDACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	55
IV.1. Comparativa entre flujos de trabajo del proceso de diseño.....	55
IV.2. Análisis e interpretación de patrones mediante resultados obtenidos.....	59
CONCLUSIONES	67
ANEXO A: Elaboración de modelo para pruebas de desarrollo.	68
ANEXO B: Descripción de la interfaz gráfica para herramienta de optimización.	74
Referencias.....	86

RESUMEN

El análisis estructural de edificaciones de mampostería confinada mediante modelos basados en el método de los elementos finitos genera grandes volúmenes de información asociados al campo de esfuerzos en los muros estructurales haciendo que la interpretación de estos resultados dentro del proceso de revisión normativa durante las iteraciones de diseño requiera muchos pasos intermedios y que dichos pasos requieran a la vez una observación cuidadosa que haga lento este proceso. En este trabajo se desarrolla una herramienta computacional de apoyo a la toma de decisiones que automatiza el procesamiento de resultados provenientes de modelos estructurales generados en ETABS mediante el uso de su interfaz de programación de aplicaciones (API). A partir de los esfuerzos obtenidos en elementos tipo membrana se generan variables mecánicas representativas del comportamiento del muro, las cuales se utilizan como entrada para modelos de árboles de decisión orientados a identificar patrones asociados al desempeño estructural. La herramienta desarrollada facilita la interpretación de resultados y contribuye a reducir el número de iteraciones en el proceso de diseño, así como el tiempo requerido en cada una de estas iteraciones.

ABSTRACT

The structural analysis of confined masonry buildings using models based on the finite element method generates large volumes of information associated with the stress field in structural walls. The interpretation of these results within the code-compliance verification process during design iterations requires multiple intermediate steps and careful examination, which makes this process time-consuming. This study presents the development of a computational decision-support tool that automates the processing of results obtained from structural models generated in ETABS through the use of its application programming interface (API). Mechanical variables representative of wall behavior is derived from the stresses obtained in membrane-type elements, and these variables are used as inputs for decision tree models aimed at identifying patterns associated with structural performance. The developed tool facilitates the interpretation of structural analysis results and contributes to reducing both the number of design iterations and the time required for each iteration.

INTRODUCCIÓN

El diseño estructural de edificaciones de mampostería confinada constituye una práctica ampliamente utilizada en México debido a su economía, disponibilidad de materiales y comportamiento estructural adecuado cuando se diseña conforme a los lineamientos normativos vigentes. A la par, el desarrollo de herramientas computacionales ha permitido mejorar significativamente el análisis de este tipo de estructuras, particularmente mediante el uso del método de los elementos finitos (MEF), el cual permite representar con mayor precisión la distribución de esfuerzos y deformaciones dentro de los muros estructurales. Sin embargo, el uso de modelos numéricos detallados genera grandes volúmenes de información que deben ser interpretados posteriormente para verificar el cumplimiento de los criterios normativos, lo que convierte el proceso de diseño en una actividad altamente iterativa que puede demandar un tiempo considerable de análisis y revisión.

El procesamiento y la interpretación sistemática de los resultados obtenidos del análisis estructural se convierten en un desafío importante dentro del flujo de trabajo del diseño. Paralelamente, el desarrollo reciente de técnicas de aprendizaje automático ha abierto nuevas posibilidades para analizar grandes volúmenes de información y detectar patrones dentro de conjuntos de datos complejos. A partir de esta oportunidad, la presente investigación propone el desarrollo de una herramienta computacional de apoyo a la toma de decisiones durante el proceso de diseño estructural de edificaciones de mampostería confinada. La propuesta integra el procesamiento automatizado de resultados provenientes de modelos estructurales con algoritmos de aprendizaje automático, con el objetivo de organizar la información generada por el análisis, facilitar su interpretación y contribuir a reducir el número de iteraciones necesarias durante el proceso de diseño estructural.

I. FUNDAMENTOS Y ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

El ser humano siempre ha necesitado resguardarse del entorno que lo rodea, motivo por el cual existió el desarrollo de distintas estrategias y técnicas de construcción de la vivienda. Las construcciones destinadas a vivienda se han realizado con diversos materiales a lo largo de la historia, siendo la mampostería uno de los más empleados al menos en México, donde más del 90% de la vivienda, ya sea unifamiliar o multifamiliar, se construye a base de muros de carga de mampostería. Esto hace que la edificación de vivienda a base de este sistema estructural represente un poco más del 50% del volumen total de la construcción que se hace en nuestro país (Fundación, I.C.A., UAEM, & S, 1999). En este contexto, la mampostería confinada se ha consolidado como uno de los sistemas estructurales predominantes debido a su economía, facilidad constructiva y disponibilidad de materiales, lo que la posiciona como una alternativa ampliamente empleada tanto en desarrollos habitacionales como en edificaciones de pequeña y mediana altura.

En este capítulo se abordarán los conceptos y antecedentes históricos vinculados al análisis y diseño estructural de edificaciones de mampostería, elementos fundamentales que nos permitirán entender del proceso de diseño. No obstante, el proceso de diseño estructural de edificaciones de mampostería presenta importantes desafíos técnicos, derivados de la complejidad geométrica de los sistemas tridimensionales, la heterogeneidad de los materiales y las limitaciones inherentes a los métodos tradicionales de modelación y análisis estructural.

I.1. Procedimientos de modelación y diseño estructural para mampostería.

El análisis de estructuras compuestas por muros y losas sometidas a cargas verticales u horizontales presenta una gran complejidad debido a que se trata de sistemas tridimensionales que no pueden simplificarse fácilmente como conjuntos de marcos bidimensionales, tal como ocurre en estructuras conformadas por vigas y columnas (Meli, 1992). A esto se suma la heterogeneidad de los materiales que las componen, así como la presencia de holguras, aplastamientos y agrietamientos locales entre el mortero y las

piezas, y entre estas y el concreto, lo cual genera deformaciones inelásticas desde etapas tempranas de carga, afectando significativamente la validez de los análisis elásticos.

Estas condiciones incrementan el tiempo requerido para el desarrollo de modelos estructurales confiables y demandan una elevada experiencia técnica por parte del proyectista, lo que puede traducirse en procesos iterativos prolongados y en una limitada exploración de alternativas óptimas de diseño. En paralelo, el avance reciente en tecnologías computacionales, particularmente en el área de inteligencia artificial y aprendizaje automático (Machine Learning, ML), ha abierto nuevas oportunidades para apoyar procesos complejos de toma de decisiones en ingeniería, permitiendo el análisis de grandes volúmenes de información y la identificación de patrones relevantes para optimizar procesos de diseño.

En este marco, la presente investigación propone el desarrollo de una herramienta computacional orientada a la toma de decisiones durante el diseño estructural de edificaciones de mampostería confinada, cuyo objetivo principal es complementar el proceso tradicional de diseño normativo mediante el uso de técnicas de optimización y algoritmos de aprendizaje automático. La herramienta desarrollada no busca sustituir el criterio del ingeniero estructurista, sino funcionar como un sistema de apoyo que facilite la evaluación de alternativas de estructuración, reduzca los tiempos de análisis iterativo y contribuya a la obtención de soluciones estructurales más eficientes y técnicamente consistentes.

De esta manera, el trabajo se estructura en cuatro capítulos principales: en el primero se presentan los antecedentes teóricos y normativos relacionados con la mampostería confinada y el aprendizaje automático; en el segundo se describe la propuesta metodológica de optimización; en el tercero se detalla el desarrollo de la herramienta computacional; y finalmente, en el cuarto capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de la implementación y validación de la metodología propuesta.

Como primer acercamiento conceptual, el comportamiento estructural de muros de mampostería confinada puede ser dividido principalmente por las respuestas ante cargas verticales y laterales en el plano del muro. Existen, basado en evidencia antes eventos sísmicos y pruebas experimentales, cuatro diferentes mecanismos de falla para muros de mampostería confinada, tal como se ilustra en la figura 1 (Alcocer, 1997):

- Falla por compresión: debida a una carga vertical muy elevada sobre el muro o a la baja resistencia a la compresión de la mampostería, lo que provoca su aplastamiento.
- Falla por deslizamiento por cortante: que se produce cuando el muro tiene una carga vertical baja y la fuerza lateral supera la resistencia al deslizamiento (es decir, la resistencia cohesiva y friccional entre el mortero y las unidades de mampostería)
- Falla por tracción diagonal: que sucede cuando la tensión sobre el muro supera la resistencia a la tracción de la mampostería y las grietas se propagan desde el centro del panel de mampostería hasta las esquinas del muro
- Falla por flexión: asociada a la fluencia del refuerzo longitudinal en las columnas de confinamiento y al aplastamiento del borde comprimido del muro.

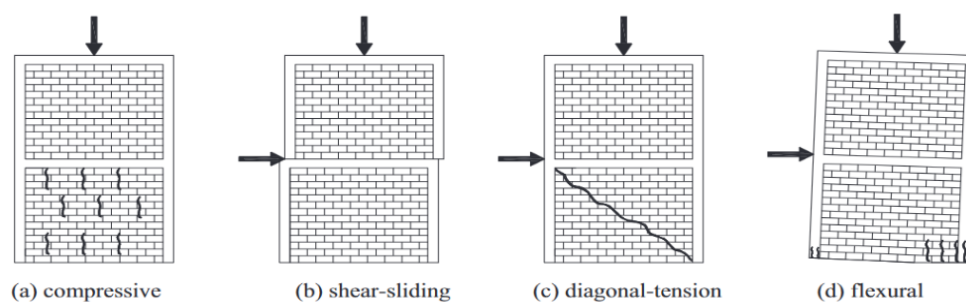


Figura 1: Mecanismos de falla teóricamente posibles en muros de mampostería confinada. Fuente: (Marques, 2019)

Aunque los cuatro mecanismos de falla descritos son teóricamente posibles, el daño observado se debe principalmente al agrietamiento diagonal debido a cargas sísmicas y en general, no se observa falla por balanceo en muros de mampostería confinada, ya que los elementos de anclaje la inhiben (Marques, 2019). En cualquier caso, la ocurrencia de un mecanismo de falla determinado dependerá de una combinación particular de factores

cualitativos y cuantitativos, como la geometría del muro, las condiciones de contorno, el tipo y la magnitud de la carga, así como la calidad de los materiales.

Considerando la importancia de las cargas sísmicas, es importante el análisis por cargas laterales de las estructuras a base de muros de carga de mampostería, que se enfrenta a dificultades para modelar correctamente el complejo arreglo tridimensional formado por los muros, las losas, los dinteles y pretilas. Las herramientas de cómputo actualmente disponibles permiten sin embargo resolver modelos muy refinados de estas estructuras. Los muros pueden modelarse como columnas anchas con el mismo momento de inercia y área de cortante que los muros reales. Estas columnas están acopladas por vigas con el momento de inercia de la losa en un ancho equivalente, al cual deberá sumarse el momento de inercia de pretilas y dinteles. Otra opción para modelar los muros, que es particularmente adecuada para estructuras con marcos y muros-diafragma, es como paneles que están conectados a las columnas y vigas que lo rodean (Meli, 1992). Cualquiera que sea el modelo, debe considerar las deformaciones de cortante y de flexión, y momentos de inercia reducidos de los elementos en que los momentos flexionantes produzcan agrietamiento.

Tomado de las experiencias experimentales y empíricas desde la década de los 90 se ha realizado un gran esfuerzo para el desarrollo de manuales de diseño para mampostería confinada particularmente en países de Latinoamérica como la Norma Técnica Complementaria para el Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTCM), que es un caso especial, ya que gran parte del conocimiento vertido en ella ha sido generada por investigaciones nacionales, resultado de una larga trayectoria de investigación de más de 60 años. Sin embargo, a principios de los años 2000 las normativas de diseño por sismo, con las cuales se realiza el cálculo de las cargas sísmicas laterales, exhibían un desfase que consistía especialmente en continuar con una filosofía de diseño basada en estados límites de falla y servicio, pero en el año 2023, en la última modificación de estas se ha empezado a adoptar la filosofía de diseño por desempeño. El diseño sísmico por desempeño consiste en la selección adecuada de criterios de diseño, sistemas estructurales, criterios de estructuración, criterios de dimensionamiento y detallado estructural, tal que, para un nivel dado de movimiento del terreno, la estructura

no se dañe más allá de ciertos estados límites. La característica principal de esta filosofía consiste en la suposición, por parte del analista del grado de deterioro (nivel de daño) que tendrá la estructura después de la ocurrencia del sismo de diseño, lo cual se logra con la interacción o acoplamiento de la demanda sísmica con la capacidad estructural.

La aplicación práctica de la filosofía de diseño por desempeño consiste en la preparación ante 4 niveles distintos de desempeño basado en el grado de distorsión de una estructura ante un evento sísmico, en documentos como el 273 de la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA) los niveles de desempeño estructural se representan a través de una curva de capacidad obtenida de un análisis pushover. En esta se indican 3 niveles de desempeño que se describen a continuación:

- Ocupación inmediata: La edificación presenta daños ligeros, puede ser reocupada una vez que se inspeccionen rápidamente sus elementos estructurales.
- Seguridad de vida: La edificación tiene daños considerables. Sin embargo, el riesgo de colapso es muy bajo. Se requieren reparaciones estructurales antes de que pueda ser reocupada.
- Prevención del colapso: La edificación se encuentra en pie de manera muy frágil. El daño es bastante considerable. Las reparaciones estructurales resultan muy caras.

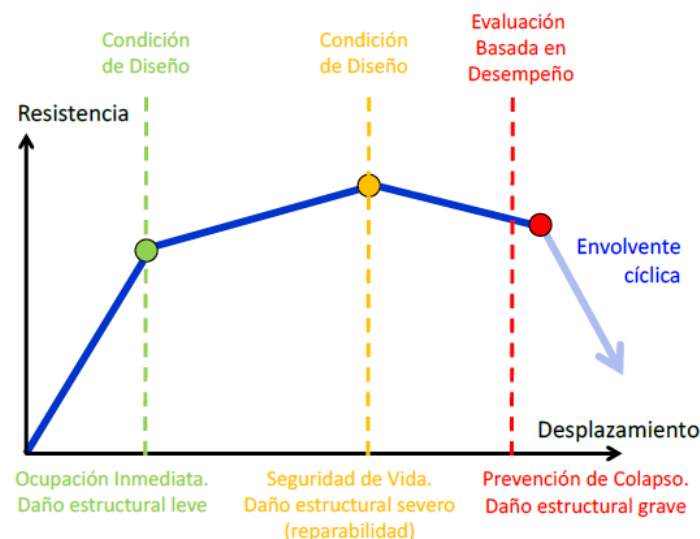


Figura 2: Límites de deformación lateral para los diferentes niveles de desempeño estructural. Fuente: (NORMA TÉCNICA COMPLEMENTARIA PARA EL DISEÑO POR SISMO, 2023)

Los primeros acercamientos para analizar estructuras de mampostería consisten en métodos excepcionalmente limitados si los comparamos con métodos presentados posteriormente en este capítulo. Un primer ejemplo lo encontramos documentado en la publicación 403 del Instituto de Ingeniería de la UNAM titulado: Diseño y construcción de estructuras de mampostería. Normas técnicas complementarias del reglamento de construcciones para el Distrito Federal. Con comentarios, ayudas de diseño y ejemplos. En la publicación 403 se proveen de 2 métodos de diseño: Método simplificado de diseño y Método detallado de diseño.

El método simplificado de diseño de acuerdo a la sección de comentarios de la publicación 403 dice:

Los requisitos que se imponen para poder aplicar el método simplificado tienden a evitar situaciones que puedan dar lugar a la presencia de momentos flexionantes importantes o efectos de esbeltez en los muros. Por lo tanto, si se cumplen las condiciones a que este párrafo se refiere, no es necesario hacer un análisis tomando en cuenta los momentos y excentricidades; basta simplemente con determinar las cargas verticales sobre cada muro a partir de su área tributaria.

Para el análisis por sismo de estas estructuras, en general será aplicable el método simplificado de diseño sísmico que presenta el reglamento, según el cual tampoco se requiere de un análisis por carga lateral de la estructural cuando se cumplen ciertas condiciones de altura y distribución de los muros. (Instituto de Ingeniería UNAM, 1977, pág. 57)

Los requisitos a los que se refiere este párrafo se enlistan a continuación:

- Los materiales satisfacen los requisitos especificados en la sección 2 “Materiales para mampostería de piedra artificiales”.
- Las deformaciones de los extremos superior e inferior del muro en la dirección normal a su plano están restringidas por el sistema de piso o por otros elementos.
- No hay excentricidades importantes en la carga axial aplicada.

- La relación altura a espesor del muro no excede de 20.
- Los muros están reforzados para cumplir con los requisitos correspondientes.

Un segundo método descrito en la publicación, denominado “Método detallado de diseño”, es sugerido cuando los requisitos del método simplificado no se cumplan a muros específicos dentro de la estructuración propuesta,

El análisis elástico riguroso de sistemas de muros y losas sujetos a cargas verticales es sumamente complejo por tratarse de estructuras que no se prestan fácilmente a la descomposición en sistemas bidimensionales, como es el caso de estructuras que no se prestan fácilmente a la descomposición en sistemas bidimensionales, como es el caso de estructuras con columnas. El análisis elástico suponiendo que las uniones entre losa y muro son nudos rígidos, no se justifica debido a las rotaciones locales que ocurren en dichas uniones. Por lo contrario, se puede suponer que la junta que se forma entre el muro y la losa tiene suficiente capacidad de rotación para liberar al muro de los momentos que le puede transmitir la losa y considerar en el diseño que el muro está sujeto a carga axial únicamente. En pruebas de laboratorio de uniones muro-losa a flexión se ha comprobado que la rotación de los extremos de la losa produce aplastamientos locales del mortero permitiendo la libre rotación de la losa y que por lo tanto los momentos flexionantes que se transmiten a los muros son mínimos.

También hay que considerar que los momentos debido a la excentricidad con que se aplica la carga vertical. El que los muros permitan el libre giro de la losa que confinan, implica que la carga que esta le transmite a los muros no será axial; la fórmula propuesta para tomar en cuenta este efecto supone que la distribución de esfuerzos producidos por la carga es lineal, siendo el esfuerzo nulo en el punto donde comienza la losa. Solo hay que considerar esta excentricidad para la carga transmitida por la losa que descansa directamente sobre el muro; para la carga que baja de los niveles superiores puede considerarse que la excentricidad es nula excepto cuando estos se encuentren fuera del eje.

Para efectuar el análisis por cargas laterales, se considera conveniente que la rigidez de los muros se calcule tomando en cuenta: que se incluyan tanto deformaciones por flexiones como por cortante; que se tome el módulo de elasticidad correspondiente a cargas de corta duración, y que para el cálculo del momento de inercia se considere que se forman secciones T, L, C o I en las intersecciones entre muros

Los anteriores métodos son la actual base de cómo se plantea el diseño de los muros de carga, que toman como punto de partida la

De acuerdo a la NTCM-2023 sec. 3.2. Modelación de estructuras de mampostería, se aceptan 2 metodologías de análisis para modelar elementos de mampostería: Modelos de columna ancha y Modelos con elementos finitos. A continuación se describen los aspectos generales de cada método.

- Columna ancha

Este método consiste en idealizar un muro de mampostería como una columna ancha, concentrando en su eje centroidal sus características mecánicas y geométricas y se asume que las zonas de las vigas que quedan embebidas en los muros poseen una rigidez infinita frente a esfuerzos de flexión y cortante.

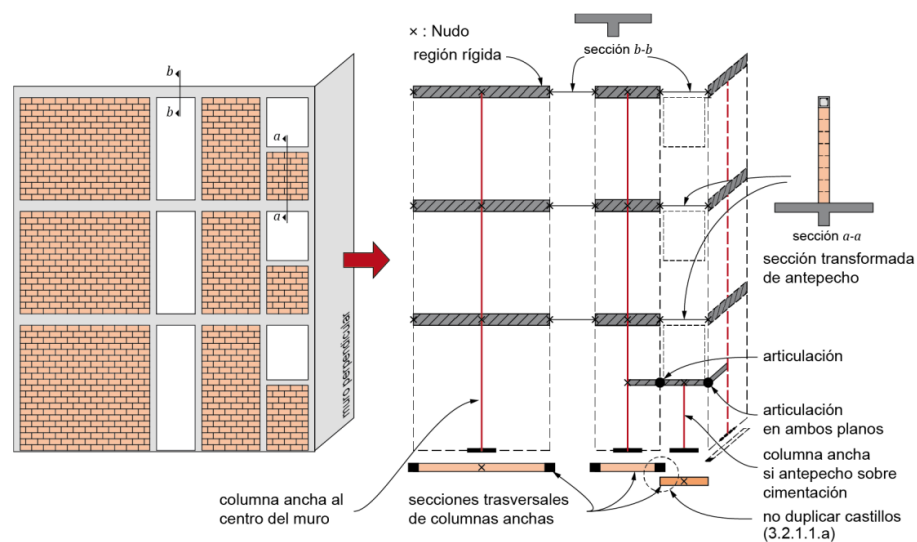


Figura 3: Imagen tomada de la sec. 3.2.1.1. que describe como deben ser modelados los muros de mampostería para ser simplificados como elementos barra y representar adecuadamente las condiciones mecánicas de la estructura. Fuente: (NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA, 2023)

En la sección 3.2.1.1. de las NTCM-23 se establecen una serie de criterios para la modelación de estructuras de mampostería utilizando este método, dichos criterios buscan representar de forma aproximada el comportamiento real de los muros.

- a) Área transversal. Será el área transversal del muro más el área transformada de los castillos que se estén considerando en la sección del muro. Los castillos deberán incluirse solamente en la sección transversal de un muro (no deben duplicarse en el modelo)
- b) Área de cortante en la dirección paralela al muro. En forma aproximada, el área de cortante podrá estimarse como el área del muro más el área sin transformar de los castillos.
- c) Área de cortante en la dirección perpendicular al plano del muro. Deberá tomarse como la suma del área transversal de la mampostería más el área transformada de los castillos dividida entre el factor de forma para cortante de la sección transversal (1.2, para secciones rectangulares)
- d) Momento de inercia con respecto al eje centroidal trasversal de la sección. Se tomará como la suma del momento de inercia de la sección de mampostería y el momento de inercia transformado de los castillos considerados en la sección, respecto al mismo eje
- e) Momento de inercia respecto al eje centroidal paralelo al muro. Se tomará como la inercia de la mampostería más la inercia transformada de los castillos
- f) Constante de torsión de Saint Venant. Se tomará como $L^3/3$, donde L incluye la longitud de los castillos, en su caso.

Además de los criterios listados antes, secciones posteriores añaden recomendaciones y restricciones adicionales:

- 3.2.1.2 Por simplicidad, los ejes de las columnas anchas podrán localizarse en el centro del muro o segmento del muro que se modela, siempre que la distancia del

centro del muro al centroide de la sección no sea mayor que 15 por ciento de la longitud del muro.

- 3.2.1.3 Las columnas anchas estarán acopladas por vigas con extremos rígidos dentro del ancho del muro y con el momento de inercia de la losa con un ancho efectivo, al cual deberá sumarse el momento de inercia de dinteles y pretiles (fig. 3.2.1.6). Los momentos de inercia deberán calcularse, en todos los casos, con respecto a ejes centroidales de la sección que se considere.
- 3.2.1.4 Los muros largos, como aquéllos con castillos intermedios, podrán dividirse, para efectos de modelación, en uno o más segmentos, cada uno para modelarse con una columna ancha, siempre que la longitud del muro dividida entre su altura libre sea al menos 1.4.
- 3.2.1.5 En los análisis, se usarán los módulos de elasticidad y de cortante de la mampostería, ***E_m*** y ***G_m***. Los valores deberán reflejar la rigidez axial y de corte que se esperan obtener de la mampostería en obra. Los valores usados en el análisis deberán indicarse en los planos.
- 3.2.1.6 Para estimar la rigidez a flexión en losas, con o sin pretiles, se considerará un ancho de cuatro veces el espesor de la losa a cada lado de la viga o dala, o de tres veces el espesor de la losa cuando no se tiene viga o dala, o cuando la dala está incluida en el espesor de la losa (fig. 3.2.1.6).

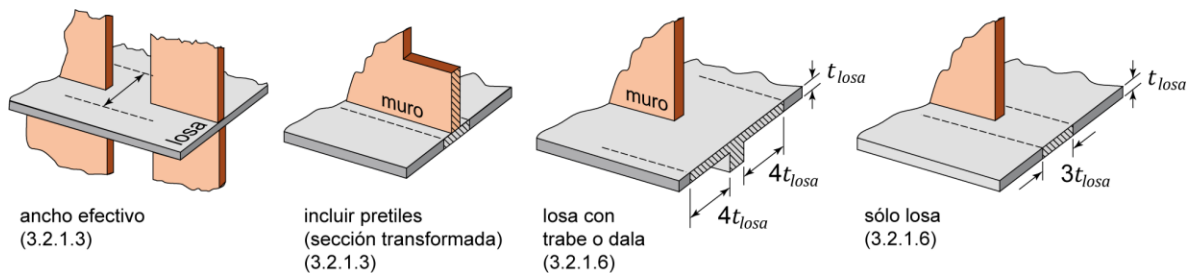


Figura 4: Imagen tomada de la sec. 3.2.1.6. que describe como se mide el ancho efectivo en losas para estimar su rigidez a flexión. Fuente: (NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA, 2023)

- 3.2.1.7 En los análisis a base de marcos planos, para estimar la rigidez a flexión de muros con patines, se considerará un ancho del patín a compresión a cada lado del alma que no exceda de seis veces el espesor del patín (fig. 3.2.1.7).

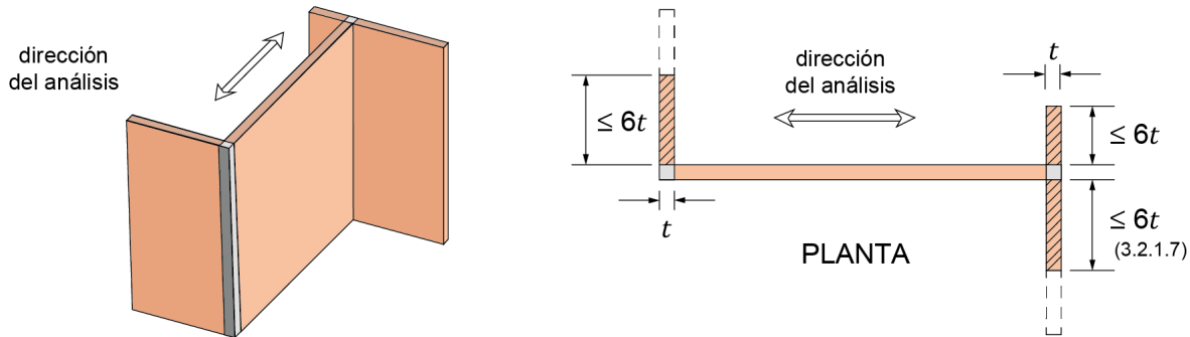


Figura 5: Imagen tomada de la sec. 3.2.1.7. que describe como se mide el ancho efectivo en patines a compresión en muros para análisis a base de marcos planos. Fuente: (NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA, 2023)

- 3.2.1.8 Para el caso de muros que contengan aberturas, éstos podrán modelarse como columnas anchas equivalentes, solamente si el patrón de aberturas es regular en elevación (fig. 3.2.1.1), en cuyo caso los segmentos del muro se modelarán como columnas anchas y éstas se acoplarán por vigas conforme se establece en 3.2.1.3.
- 3.2.1.9 Si la distribución de aberturas es irregular o compleja en elevación, deberán emplearse métodos más refinados para el modelado de dichos muros. Se admite usar el método de elementos finitos, el método de puntales y tensores u otros procedimientos analíticos similares que permitan modelar adecuadamente la distribución de las aberturas en los muros y su impacto en las rigideces, deformaciones y distribuciones de esfuerzos a lo largo y alto de los muros.
- 3.2.1.10 Los muros diafragma se podrán modelar como diagonales equivalentes o como paneles unidos en las esquinas con las vigas y columnas del marco perimetral.
- 3.2.1.11 Si se usan muros de mampostería y de concreto se deberán considerar las diferencias entre las propiedades mecánicas de ambos materiales.

Esta metodología surgió de la necesidad de simplificar la obtención de elementos mecánicos a través de reducir la complejidad de los elementos estructurales de elementos área a elementos barra, si bien en su momento permitió alcanzar resultados equiparables a métodos más refinados de diseño y solventar la baja capacidad computacional de su momento, hoy en día se ve rebasado para su implementación práctica porque aunque requiere de relativamente poco tiempo para modelarse en software comercial, gracias a que este último ha mejorado a lo largo de los años en rendimiento así como también se disponen de mejores y más accesibles herramientas de cómputo, se pueden obtener resultados más precisos invirtiendo tiempo adicional en el modelado. Incluso en los propios comentarios de la NTCM-2023, si bien no se desalienta a usar esta metodología, si propone que, incluso comparado con el método de elemento finito simplificado sugerido en la propia norma, se obtienen resultados más precisos, extraído de los comentarios de la norma tenemos:

Se ha podido corroborar que el nivel de precisión obtenido con el método simplificado de modelación es mejor al obtenido con el método de columna ancha, aun con las deficiencias mencionadas. Eso se debe, entre otras razones, a que el método de la columna ancha introduce la hipótesis de sección plana de los muros, que no se cumple, especialmente en muros largos, y el uso de elementos finitos no impone esa restricción.

Elemento Finito

A diferencia del método de columna ancha, este método no impone una transformación de las propiedades geométricas de muros y elementos confinantes por lo que no es necesario recalcular propiedades geométricas de las secciones y no es necesario tomar decisiones con relación a si se deben dividir los muros, sin embargo, esta metodología demanda al ingeniero un tiempo considerable, ya que los nudos de los distintos elementos deben hacerse coincidir para lograr la continuidad del modelo. La recuperación de resultados, aun con los programas de computadora modernos, requiere también de un esfuerzo importante (de Mampostería, 2008). El modelado con MEF, según las pautas de la sec. 3.2.2. de la NTCM-2023 se describe a continuación:

- 3.2.2.1: Los muros de mampostería podrán modelarse con elementos finitos lineales (cuatro nudos) tipo membrana (con rigidez sólo en su plano), siempre que la formulación de dichos elementos pueda representar adecuadamente la flexión en el plano del muro, o con elementos lineales tipo cascarón (con rigidez en su plano y fuera del plano). Los elementos tendrán las propiedades mecánicas de la mampostería y un espesor igual al espesor del muro.
- 3.2.2.2: Se utilizará un sólo elemento por panel, siendo un panel el área de muro delimitada por castillos y dadas, siempre que la relación de aspecto del elemento no sea mayor que 2; en caso contrario se propondrá una malla de elementos que cumpla este requisito.
- 3.2.2.3: Los elementos contiguos tanto en el plano del muro como fuera de él deberán ser continuos en los nudos.
- 3.2.2.4: Los castillos se modelarán con elementos prismáticos tipo barra localizados en el centroide de la sección transversal del castillo y las propiedades mecánicas del concreto de que están hechos. Los elementos-barra deberán ser continuos en los nudos de todos los elementos finitos contiguos.

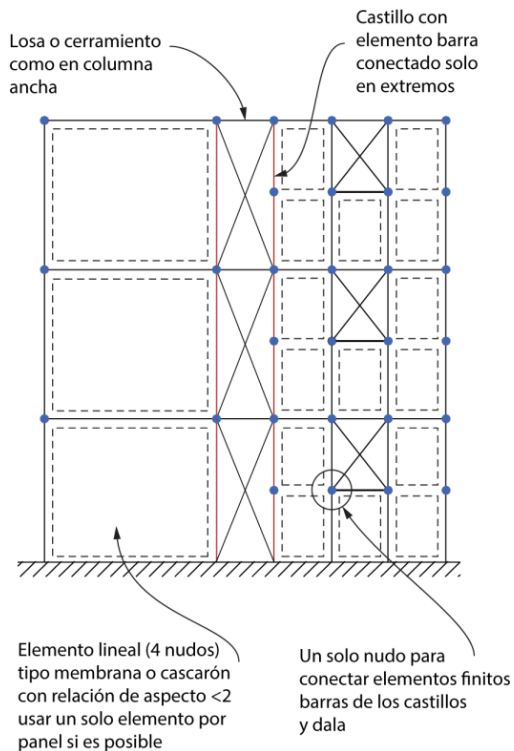


Figura 6: Imagen tomada de la sec. 3.2.2.4 que describe como deben ser modelados los castillos y elementos membrana para representar adecuadamente las condiciones mecánicas de la estructura. (NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA, 2023)

Una de las principales razones por las que se retrasó el uso del MEF para el análisis fue que los programas arrojaban esfuerzos cortantes en los elementos, y no fuerzas. Si se tenía que calcular el cortante total en un muro, su fuerza axial y el momento flexionante, se tenían que integrar dichos esfuerzos para obtener las resultantes deseada. Esa limitación ya ha desaparecido. Sin embargo, todavía es necesario especificar los nudos y elementos de las secciones donde se requiere la resultante, para que el programa pueda realizar la integración. Si bien dicha información es fácil de ingresar en los programas esto puede resultar engorroso; en la práctica, el menor número de requisitos de modelación para el MEF hace más ventajoso su uso sobre el método de columna ancha, que, si bien es computacionalmente más costoso, el abaratamiento de este poder de cómputo vuelve más factible su uso.

1.2. Conceptos y aplicaciones de la mampostería confinada.

Hoy en día, la mampostería se entiende como un material estructural compuesto por elementos de origen pétreo naturales o fabricados que se ensamblan mediante un mortero

que actúa como aglutinante. Si bien aún se utiliza en la construcción de arcos, bóvedas y cúpulas, lo más común en la práctica moderna es el uso de muros hechos con piedras artificiales de forma prismática, siendo estos los protagonistas en las aplicaciones actuales de la mampostería.

Debido a su naturaleza, la mampostería presenta una baja resistencia a los esfuerzos de tracción, mostrando un comportamiento frágil que se manifiesta en una pérdida rápida de rigidez y capacidad resistente. No obstante, este problema puede mitigarse de forma considerable al incorporar refuerzos de acero. Esta mejora es relativamente fácil de implementar en muros contruidos con piezas prismáticas artificiales, ya que las juntas, al seguir el contorno de los bloques o ladrillos, se alinean de manera ordenada tanto en sentido horizontal como vertical. Así, considerando la cantidad y la forma en que se dispone el acero de refuerzo, se pueden identificar tres tipos de sistemas constructivos basados en mampostería: Mampostería confinada, Mampostería con refuerzo interior, y Mampostería simple o sin refuerzo.

En el sistema de mampostería confinada, cuyos elementos destacables se ilustran en la figura 7, el refuerzo de acero se localiza dentro de elementos de concretos llamados “castillos” y “dalas”, los cuales poseen una sección transversal relativamente reducida y, por lo general, tienen el mismo espesor que el muro al que rodean o confinan. Estos elementos cumplen principalmente dos funciones: a) asegurar la continuidad estructural entre los muros, así como su conexión con las losas de entrepiso y azotea; y b) mejorar la capacidad del sistema para resistir, deformarse y disipar energía frente a cargas laterales cíclicas reversibles, como las generadas por sismos. Además, este sistema permite la incorporación de refuerzo adicional embebido en algunas de las juntas horizontales de mortero entre hiladas, lo cual contribuye a aumentar aún más su capacidad de deformación y de disipación energética.

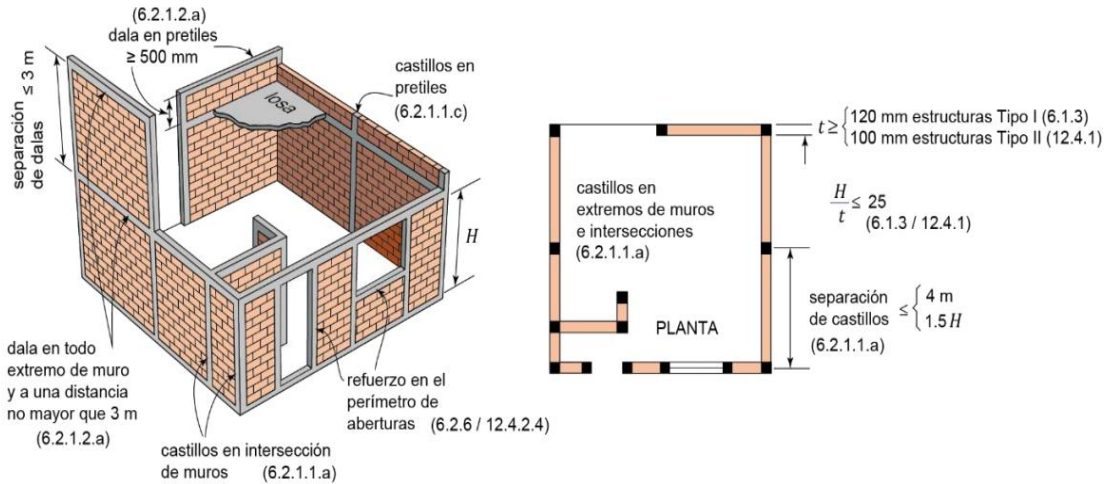


Figura 7: Requisitos del sistema constructivo de mampostería confinada. Fuente: (NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA, 2023)

En la mampostería confinada, la secuencia constructiva recomendada consiste en levantar primero los paños de muro y, después de colocar la cimbra, proceder al colado de los elementos de concreto reforzado (castillos y dalas) que los delimitan. Es conveniente que los bordes verticales de los muros presenten una configuración dentada o bien incorporen conectores o refuerzos embebidos en las juntas horizontales, con el propósito de lograr una mejor integración estructural. En cuanto a los acabados, cuando los muros se revisten con aplanados, estos no se consideran parte del sistema estructural, salvo en aquellos casos en los que los recubrimientos han sido diseñados con ese objetivo, como los aplanados de mortero de alta resistencia reforzados con malla de acero.

En México, la mampostería confinada representa el sistema constructivo más utilizado para viviendas unifamiliares y edificios multifamiliares de baja y mediana altura (generalmente de cuatro a cinco niveles), donde la necesidad de subdividir el espacio en áreas relativamente reducidas favorece una alta densidad de muros. Además, este sistema también es ampliamente adoptado en la edificación de residencias lujosas, incluso aquellas con diseños arquitectónicos de gran complejidad. (Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural (SMIE), 2019).

1.3. Algoritmos de aprendizaje automático en ingeniería estructural

El aprendizaje automático (Machine Learning, ML) es una rama de la inteligencia artificial (IA) que se enfoca en desarrollar algoritmos y modelos estadísticos que permiten a los sistemas informáticos realizar tareas complejas sin instrucciones explícitas, basándose en patrones e inferencias derivados de los datos, el objetivo del ML es que una máquina analice grandes volúmenes de datos para identificar patrones y producir un resultado. Estas técnicas permiten a los sistemas adaptarse y tomar decisiones basadas en datos, mejorando continuamente a medida que se expone a más información. (Amazon Web Services, 2023).

El sistema de aprendizaje de un algoritmo de ML se compone de tres partes principales (UC Berkeley School of Information, 2020).

- Un proceso de decisión: en general, los algoritmos de ML se utilizan para hacer una predicción o clasificación. Con base en algunos datos de entrada, que pueden estar etiquetados o no etiquetados, su algoritmo producirá una estimación sobre un patrón en los datos.
- Una función de error: esté evalúa la predicción del modelo. Si hay ejemplos conocidos, una función de error puede hacer una comparación para evaluar la precisión.
- Un proceso de optimización del modelo: si el modelo puede ajustarse mejor a los puntos de datos en el conjunto de entrenamiento, entonces los pesos se ajustan para reducir la discrepancia entre el ejemplo conocido y la estimación del modelo. El algoritmo repetirá este proceso iterativo de "evaluar y optimizar", actualizando pesos de forma autónoma hasta que se haya cumplido un umbral de precisión.

Así mismo también es relevante hablar sobre la clasificación de los métodos de aprendizaje automático, los cuales podemos dividir en 3 grupos (International Business Machines Corporation, 2021):

- Aprendizaje supervisado: se define por el uso de conjuntos de datos etiquetados para entrenar algoritmos para clasificar datos o predecir resultados con precisión.

A medida que los datos de entrada se introducen en el modelo, este tiende ajustarse dependiendo de sus pesos. Esto ocurre como parte del proceso de validación cruzada para garantizar que el modelo evite el ajuste excedido o el desajuste. El aprendizaje supervisado ayuda a resolver una variedad de problemas del mundo real a escala, como clasificar el spam en una carpeta separada de la bandeja de entrada. Algunos métodos empleados en el aprendizaje supervisado incluyen redes neuronales, Naïve Bayes, regresión lineal, regresión logística, bosque aleatorio y máquina de vectores de soporte (SVM).

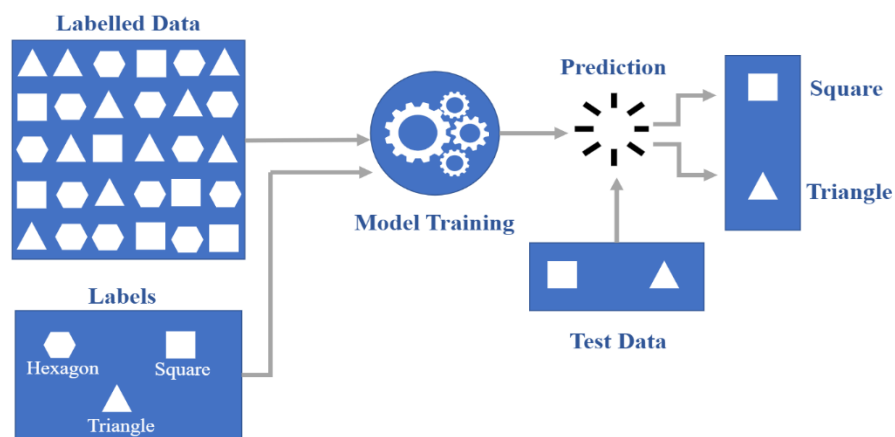


Figura 8: Esquema de funcionamiento de los algoritmos de aprendizaje automático supervisados. Fuente: (Etim, Al-Ghosoun, Renno, Seaid, & Mohamed, 2024)

- **Aprendizaje no supervisado:** utiliza algoritmos de aprendizaje automático para analizar y agrupar conjuntos de datos sin etiquetar (subconjuntos denominados clústeres). Estos algoritmos descubren patrones ocultos o agrupaciones de datos sin necesidad de intervención humana. La capacidad del aprendizaje no monitorear para descubrir similitudes y diferencias en la información lo hace ideal para el análisis exploratorio de datos o el reconocimiento de imágenes y patrones por mencionar ejemplos. También se utiliza para reducir el número de características de un modelo a través del proceso de reducción de la dimensionalidad. El análisis de componentes principales (PCA) y la descomposición de valores singulares (SVD) son dos enfoques comunes para esto. Otros algoritmos utilizados en el aprendizaje no supervisado son las Redes

Neuronales Artificiales, Agrupación de Medios K y los Métodos de agrupación probabilística.

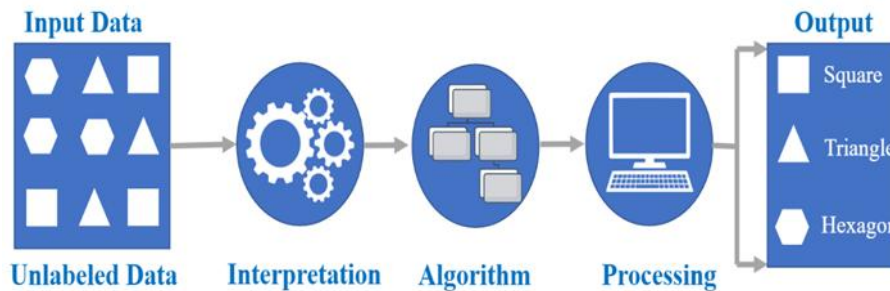


Figura 9: Esquema de funcionamiento de los algoritmos de aprendizaje automático no supervisados.
Fuente: (Etim, Al-Ghosoun, Renno, Seaid, & Mohamed, 2024)

- Aprendizaje semisupervisado: un punto medio entre el aprendizaje supervisado y el no supervisado. Durante el entrenamiento, utiliza un conjunto de datos etiquetados más pequeño para guiar la clasificación y la extracción de características de un conjunto de datos más grande sin etiquetar. El aprendizaje semisupervisado puede resolver el problema de no tener suficientes datos etiquetados para un algoritmo de aprendizaje supervisado. También ayuda si resulta demasiado costoso etiquetar suficientes datos.

En la actualidad, los algoritmos de ML han emergido como herramientas innovadoras y poderosas dentro del campo de la ingeniería estructural, trascendiendo metodologías y flujos de trabajo tradicionales para abordar problemáticas complejas en diferentes subcampos. Estos algoritmos facilitan la interpretación de grandes volúmenes de datos procedentes de sensores, simulaciones y experimentos, permitiendo no solo la detección temprana de fallos o deterioros, sino también la optimización en el diseño y mantenimiento de infraestructuras críticas. Mediante herramientas de ML los ingenieros pueden modelar comportamientos estructurales con un nivel de precisión que mejora significativamente la seguridad y eficiencia de las construcciones. Esta sinergia no solo impulsa la innovación en análisis predictivo y monitoreo en tiempo real, sino que además abre un abanico de posibilidades para el desarrollo de soluciones sostenibles y adaptativas ante escenarios de incertidumbre.

A pesar de su potencial en el ámbito de la ingeniería estructural, el ML enfrenta desafíos comunes a otras áreas de la IA. Entre estos se destacan criterios poco definidos para elegir metodologías adecuadas y un rendimiento computacional limitado. Asimismo, es fundamental analizar cómo afectan los datos incompletos o contaminados a los resultados, así como validar la precisión de los modelos mediante enfoques complementarios que potencien su eficacia. Adicionalmente, se requiere establecer protocolos transparentes para la configuración de parámetros en las herramientas de IA, garantizando así su adaptabilidad y efectividad en aplicaciones prácticas. (Yepes, 2023)

En este contexto, el número de las investigaciones en ML aplicado a la ingeniería estructural, además de verse incrementado exponencialmente a lo largo de los años evidencia avances significativos, orientados a superar los desafíos mencionados y consolidar su integración en la práctica profesional (Tapeh & Naser, 2023); ilustrado en la gráfica de la figura 10. De la investigación de Tapeh & Naser, que toma como muestra más de 4000 trabajos relacionados al tema, se indexan y clasifican las investigaciones recabadas de acuerdo al tipo de algoritmos empleados, y se muestra en la figura 11 la concentración de estos trabajos, donde se observa un uso preferencial de 4 algoritmos: Análisis de Componentes Principales (PCA), Máquina de Vectores de Soporte (SVM), Algoritmos Genéticos (GA) y Redes Neuronales Artificiales (ANN), los cuales para la muestra de más de 4000 trabajos representan en su conjunto el 77.4%, dado respaldado por la figura 12. Considerando el volumen que ocupan ciertos algoritmos mencionados en los trabajos consultados vale la pena realizar una definición de dichas herramientas.

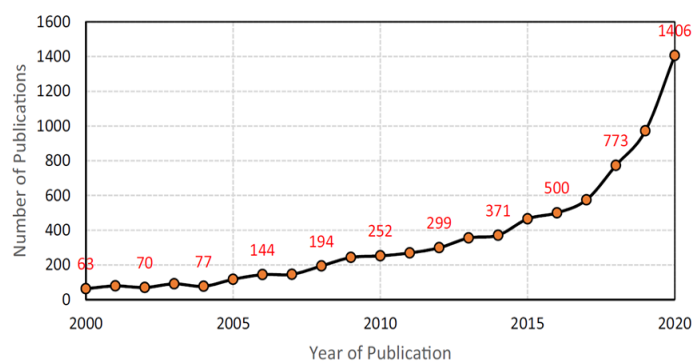


Figura 10: Numero de publicaciones que adoptan herramientas derivadas de la IA en ingeniería estructural (2000–2020) usando “artificial intelligence” y “structural engineering” como palabras claves en bases de datos académicas. Fuente: (Tapeh & Naser, 2023)

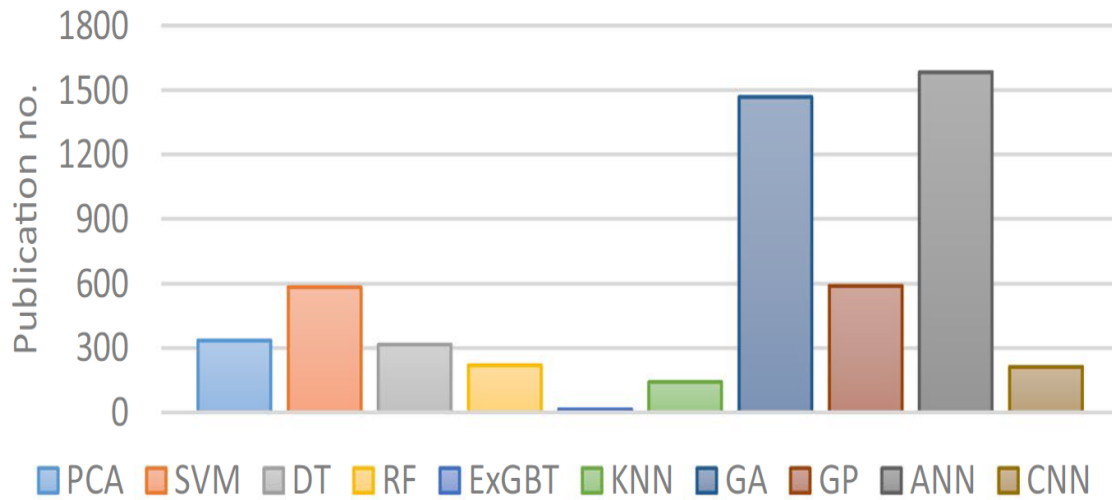


Figura 11: Numero de publicaciones que adoptan herramientas derivadas de la IA en ingeniería estructural (2000–2020) clasificadas de acuerdo con el algoritmo de ML empleado en una muestra de más de 4000 investigaciones académicas Fuente: (Tapeh & Naser, 2023)

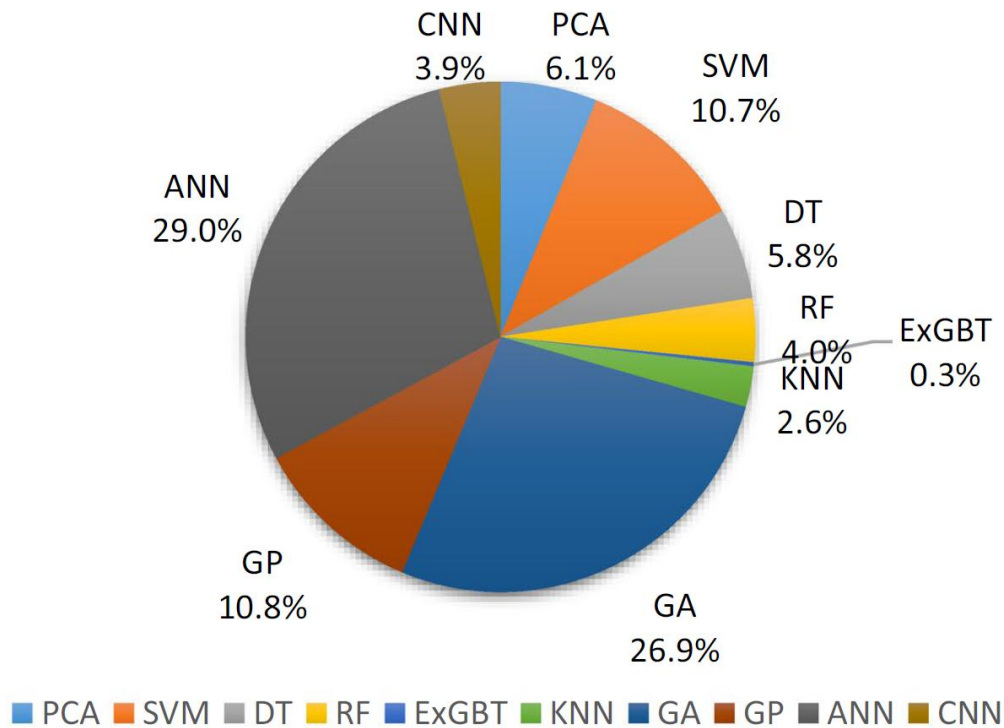


Figura 12: Ordenamiento por algoritmo de ML en porcentaje de la muestra de más de 4000 publicaciones académicas que adoptan herramientas derivadas de la IA en ingeniería estructural (2000–2020). Fuente: (Tapeh & Naser, 2023)

Análisis de Componentes Principales (Principal Component Analysis, PCA)

Es un algoritmo de aprendizaje automático no supervisado utilizado principalmente para la reducción de la dimensionalidad de datos. Su objetivo es transformar un conjunto de variables posiblemente correlacionadas en un conjunto más pequeño de variables no correlacionadas llamadas componentes principales, que capturan la mayor parte de la varianza presente en los datos originales. PCA logra esto mediante la proyección de los datos en nuevas direcciones (componentes) que maximizan la dispersión de los datos, lo que permite simplificar modelos, reducir ruido y mejorar la visualización sin perder información significativa. El PCA ha sido utilizado como herramienta para la reducción de dimensiones y extracción de características relevantes en estructuras civiles. Li et al. (2011) empleado para identificar daños estructurales mediante la compresión de funciones de respuesta de frecuencia residual, combinándolo con redes neuronales. Por su parte, Dongmei et al. (2017) integraron PCA con redes neuronales (POD-BPNN) para predecir coeficientes de presión del viento en edificios altos, alcanzando un margen de error de solo 3-5%.

Redes Neuronales Artificiales (Artificial Neural Network, ANN)

Son modelos de aprendizaje automático inspirados en la estructura y el funcionamiento del cerebro humano. Están compuestas por capas de nodos (neuronas artificiales) interconectados que procesan la información mediante pesos y funciones de activación. Las ANN aprenden a partir de los datos ajustando estos pesos durante el entrenamiento, generalmente mediante un algoritmo de retropropagación y optimización por descenso de gradiente. Son especialmente potentes para modelar relaciones complejas y no lineales, y se utilizan en una amplia variedad de tareas como clasificación, regresión, reconocimiento de imágenes, procesamiento del lenguaje natural y más. Su capacidad para aprender patrones complejos las hace fundamentales en el campo del deep learning. Las redes neuronales han demostrado gran capacidad predictiva en distintos contextos estructurales. Nguyen et al. (2019) desarrollaron modelos profundos para predecir la resistencia del concreto espumado, identificando variables clave en su comportamiento. Mangalathu et al. (2020) utilizaron ANN para identificar modos de falla en muros de corte de concreto reforzado, alcanzando una precisión del 86%. Asimismo, Lee y Lee

(2014) aplicaron esta técnica para predecir la resistencia al corte en elementos de concreto reforzados con FRP, logrando resultados más precisos que los métodos de diseño convencionales.

Árbol de decisión (Decision Tree, DT)

Un árbol de decisión es un algoritmo de aprendizaje supervisado no paramétrico, que se utiliza tanto para tareas de clasificación como de regresión. Tiene una estructura jerárquica, de árbol, que consta de un nodo raíz, ramas, nodos internos y nodos de hoja. (IBM, 2021). La estructura de un DT es secuencial y procedimental, en otras palabras, los datos importados se someten a un conjunto de sentencias de control condicional que se ramifican en posibles resultados. El resultado de cada sentencia define la siguiente condición a examinar y en el último nivel del árbol, se obtienen predicciones sobre el parámetro deseado. (Athanasiou, Ebrahimkhanlou, Zaborac, Hrynyk, & Salamone, 2020). Trabajos destacados empleando esta herramienta se encuentran la clasificación de modelos de agrietamientos en puentes de concreto realizados por Okazaki et al. (2020), predicción de propiedades mecánicas en materiales, predicción de la respuesta sísmica y mecanismos de colapso estructural de Hwang et al. (2020). También destaca la investigación sobre la identificación de modos de falla en muros concreto sometidos a cortante en los trabajos de Mangalathua et al. (2020).

1.4. Resumen de contribuciones de esta investigación.

Este documento desarrolla a lo largo de su contenido una serie de aportaciones orientadas a facilitar la integración entre modelos numéricos de análisis estructural y herramientas computacionales de apoyo al proceso de diseño, las cuales son resumidas en los siguientes puntos.

- *Formalización mecánica del proceso de integración de esfuerzos en elementos tipo membrana:* Se desarrolla una formulación que permite transformar el campo continuo de esfuerzos obtenido mediante el método de los elementos finitos en magnitudes estructurales equivalentes, adecuadas para su utilización sistemática dentro de procesos de revisión normativa y evaluación del comportamiento global de muros de mampostería confinada.

- *Estructuración computacional del proceso de post-procesamiento de resultados de un modelo analítico estructural:* Se propone un esquema de procesamiento automatizado de resultados provenientes de software de análisis estructural permitiendo la extracción, organización y transformación sistemática de resultados asociados a elementos tipo membrana que conforman los muros estructurales.
- *Desarrollo de una herramienta computacional para la organización e interpretación de resultados estructurales:* Se implementa un software que integra los procedimientos anteriores dentro de una interfaz gráfica que facilita la visualización, análisis y almacenamiento de resultados estructurales provenientes del modelo numérico.
- *Incorporación de técnicas de aprendizaje automático para la identificación de patrones estructurales:* Se integran modelos de árboles de decisión como mecanismo de clasificación e identificación de patrones dentro de los resultados estructurales obtenidos, permitiendo estructurar la información derivada del análisis y facilitar la detección de deficiencias en el diseño.
- *Propuesta de un esquema de apoyo a la toma de decisiones en el proceso iterativo de diseño estructural:* La integración de los elementos anteriores permite establecer un sistema de apoyo al diseñador estructural que organiza la información obtenida del análisis numérico y contribuye a reducir el número de iteraciones necesarias durante el proceso de diseño.

II. FORMULACIÓN METODOLÓGICA DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN PROPUESTO

El análisis estructural moderno se apoya ampliamente en el método de los elementos finitos como herramienta para aproximar el comportamiento mecánico de sistemas continuos mediante su discretización en dominios de menor complejidad. En el caso particular de muros de mampostería confinada, esta aproximación permite representar la distribución espacial de esfuerzos y deformaciones dentro del elemento estructural, proporcionando información detallada sobre su respuesta ante distintas condiciones de carga.

Sin embargo, aunque los modelos numéricos permiten obtener campos de esfuerzos con alto nivel de resolución, dichos resultados no constituyen por sí mismos variables directamente utilizables dentro de procesos sistemáticos de evaluación o toma de decisiones de diseño. En la práctica ingenieril, el diseñador requiere interpretar estos campos continuos mediante magnitudes equivalentes que representen el comportamiento global del elemento estructural, tales como fuerzas resultantes, esfuerzos promedio o parámetros de desempeño comparables.

En este contexto surge la necesidad de establecer un procedimiento consistente que permita transformar la información obtenida a partir del análisis por elementos finitos en variables estructurales representativas del comportamiento del muro. Este proceso implica la integración de esfuerzos distribuidos sobre el dominio del elemento, de manera que el estado tensional continuo pueda expresarse mediante resultantes equivalentes asociadas al sistema estructural analizado.

El presente capítulo desarrolla la formulación metodológica empleada para construir dicho proceso de transformación, estableciendo los fundamentos mecánicos necesarios para la integración de esfuerzos en elementos tipo membrana y su posterior utilización dentro de un modelo de optimización orientado a la toma de decisiones estructurales. Para ello, se parte de la idealización del muro como un continuo bidimensional sometido a un estado de esfuerzo plano, describiendo posteriormente la obtención de resultantes internas a partir de la integración espacial del campo de esfuerzos.

II.1. Fundamentos de integración de esfuerzos en elementos tipo membrana.

En el análisis estructural de muros de mampostería mediante el método de los elementos finitos, el comportamiento mecánico del elemento puede idealizarse empleando elementos bidimensionales tipo membrana, los cuales representan la superficie media del muro y permiten describir su respuesta mecánica dentro del plano. Esta idealización resulta adecuada cuando el espesor del elemento es pequeño en comparación con sus dimensiones en planta, condición que permite asumir un estado de esfuerzos predominantemente plano (MORALES, Botello, & Zárate, 2013).

Bajo esta hipótesis, el estado tensional del elemento queda definido únicamente por los esfuerzos contenidos en su plano medio, despreciándose las tensiones normales perpendiculares al espesor. En consecuencia, el estado de esfuerzos puede expresarse mediante el vector:

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix}$$

Donde σ_{11} y σ_{22} corresponden a los esfuerzos normales asociados a los ejes locales del elemento, mientras que τ_{12} representa el esfuerzo cortante en el plano. La componente fuera del plano σ_{33} se considera despreciable, adoptándose la condición de esfuerzo plano, es decir:

$$\sigma_{33} \approx 0$$

El estado de esfuerzos plano en elementos tipo membrana se define respecto a un sistema de ejes locales asociado al elemento discretizado, el cual permite describir de manera consistente la orientación de las tensiones internas. En este sistema, las componentes normales actúan a lo largo de las direcciones locales del elemento, mientras que el esfuerzo cortante representa la interacción entre ambas direcciones dentro del plano.

Al integrar dichos esfuerzos a lo largo del espesor del elemento se obtienen fuerzas membranales por unidad de longitud, comúnmente denotadas como N_{11} , N_{22} y N_{12} , cuya interpretación conserva la misma convención direccional que el estado tensional, pero expresada en términos de fuerza por unidad de longitud. La Figura 13 ilustra

esquemáticamente la definición de esfuerzos y fuerzas membranales en un elemento bidimensional, así como la orientación de los ejes locales empleados para su descripción.

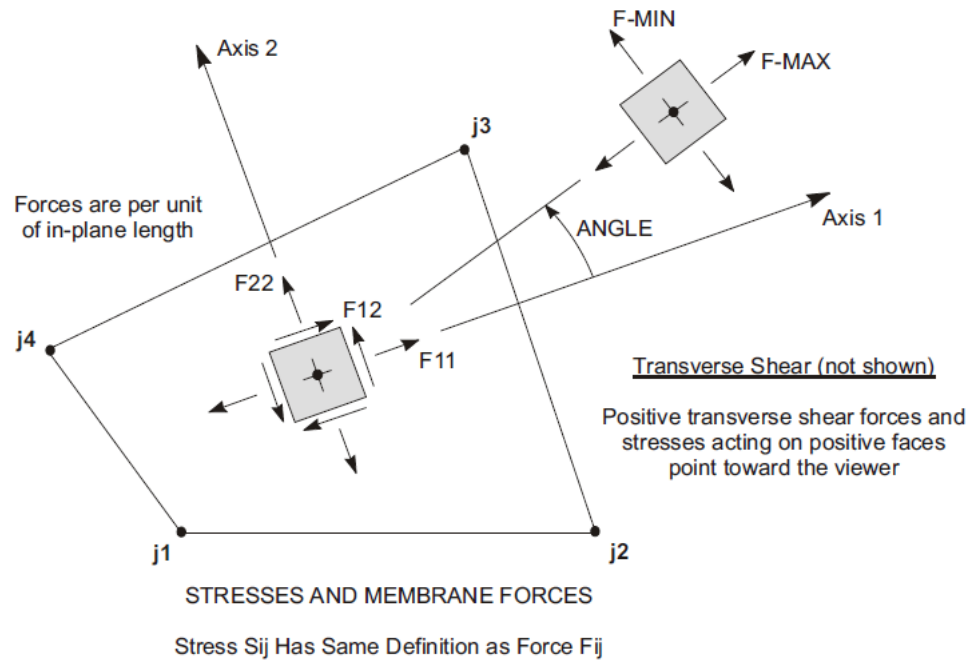


Figura 13: Representación del estado plano de esfuerzos y fuerzas de membrana en un elemento tipo membrana, mostrando las componentes F_{11} , F_{22} , y F_{12} por unidad de longitud en los ejes locales 1 y 2, así como la orientación y magnitud de los esfuerzos principales (F-MAX y F-MIN) y su ángulo asociado respecto al sistema local del elemento.
Fuente: (Computer & Structures, Inc., 2017)

Los elementos tipo membrana describen el comportamiento estructural mediante desplazamientos nodales contenidos en el plano del elemento, a partir de los cuales se generan deformaciones y esfuerzos distribuidos sobre su área. En el método de los elementos finitos, dichos desplazamientos constituyen las variables primarias del problema y permiten aproximar el campo de desplazamientos dentro del elemento mediante funciones de interpolación espacial. A partir de esta aproximación cinemática se obtiene el campo de deformaciones y, en consecuencia, el estado de esfuerzos asociado al elemento discretizado, estableciendo el vínculo entre la idealización mecánica del continuo y su representación numérica.

El comportamiento continuo se describe a partir de los desplazamientos definidos en los nodos que conforman cada elemento. Estos desplazamientos constituyen las variables

primarias del problema y permiten aproximar el campo de desplazamientos dentro del elemento mediante funciones de interpolación espacial.

El campo de desplazamientos en cualquier punto del elemento puede expresarse como:

$$\mathbf{u}(x, y) = [\mathbf{N}]\mathbf{d}$$

donde $[\mathbf{N}]$ corresponde a la matriz de funciones de forma y $\mathbf{d}$ representa el vector de desplazamientos nodales. A partir de esta interpolación, las deformaciones del elemento se obtienen mediante las relaciones cinemáticas que vinculan los gradientes de desplazamiento con el estado de deformación, lo cual puede expresarse en forma matricial como:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = [\mathbf{B}]\mathbf{d}$$

siendo $[\mathbf{B}]$ la matriz deformación–desplazamiento.

Finalmente, el estado de esfuerzos asociado al elemento se determina mediante la ley constitutiva del material bajo condición de esfuerzo plano, estableciendo la relación:

$$\boldsymbol{\sigma} = [\mathbf{D}]\boldsymbol{\varepsilon}$$

o, de manera equivalente,

$$\boldsymbol{\sigma} = [\mathbf{D}][\mathbf{B}]\mathbf{d}$$

lo cual indica que el campo de esfuerzos dentro del elemento queda completamente definido a partir de los desplazamientos nodales y de las propiedades mecánicas del material.

Esta formulación permite evaluar los esfuerzos en cualquier punto del elemento discretizado, proporcionando un campo tensional continuo aproximado que constituye la base para la posterior integración de esfuerzos y la obtención de resultantes estructurales equivalentes.

El campo de esfuerzos obtenido mediante la discretización por elementos finitos describe la distribución de tensiones internas sobre la superficie media del elemento membrana. Sin embargo, dichas magnitudes representan esfuerzos por unidad de área y, por tanto, no constituyen directamente fuerzas internas equivalentes del elemento estructural. Para relacionar el estado tensional con las acciones internas reales del muro, resulta necesario integrar los esfuerzos a lo largo del espesor del elemento.

Considerando un elemento tipo membrana de espesor constante t , el estado de esfuerzos plano definido en su superficie media puede extenderse a través del espesor bajo la hipótesis de esfuerzo plano. En estas condiciones, las fuerzas internas por unidad de longitud, denominadas resultantes membranales, se obtienen mediante la integración de las componentes de esfuerzo a lo largo de la coordenada transversal z , medida respecto al plano medio del elemento.

Las resultantes membranales se definen como:

$$N_{11} = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_{11} dz$$

$$N_{22} = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_{22} dz$$

$$N_{12} = \int_{-t/2}^{t/2} \tau_{12} dz$$

donde N_{11} y N_{22} representan las fuerzas normales por unidad de longitud asociadas a las direcciones locales del elemento, mientras que N_{12} corresponde a la fuerza cortante en el plano.

Bajo la hipótesis comúnmente adoptada para elementos tipo membrana, en la cual la distribución de esfuerzos se considera aproximadamente uniforme a través del espesor, las expresiones anteriores pueden simplificarse como:

$$N_{ij} = \sigma_{ij} t$$

lo cual permite relacionar directamente los esfuerzos obtenidos en el análisis numérico con las resultantes internas equivalentes del elemento.

lo cual permite relacionar directamente los esfuerzos obtenidos en el análisis numérico con las resultantes internas equivalentes del elemento.

Esta transformación es importante, ya que convierte el campo continuo de esfuerzos en magnitudes estructurales físicamente interpretables. Las resultantes membranales constituyen así el vínculo entre la descripción tensional del continuo y la evaluación global del comportamiento del muro, permitiendo posteriormente integrar dichas contribuciones sobre el área del elemento para obtener fuerzas equivalentes asociadas al sistema estructural.

Una vez definidas las resultantes membranales como fuerzas internas por unidad de longitud asociadas al estado tensional del elemento, resulta necesario establecer un procedimiento que permita evaluar su contribución al comportamiento global del muro. Si bien las magnitudes N_{ij} describen adecuadamente la intensidad de las fuerzas internas en cada punto del elemento, dichas resultantes continúan siendo funciones distribuidas sobre su superficie y, por tanto, deben integrarse espacialmente para obtener fuerzas equivalentes representativas del sistema estructural.

Sea A el área correspondiente al dominio del elemento membrana. Las fuerzas internas equivalentes pueden obtenerse mediante la integración de las resultantes membranales sobre dicha superficie, expresándose de forma general como:

$$F_i = \int_A N_i(x, y) dA$$

donde F_i representa la fuerza resultante asociada a la dirección considerada, mientras que $N_i(x, y)$ describe la distribución espacial de las resultantes membranales dentro del elemento.

En el contexto del método de los elementos finitos, el dominio continuo se encuentra discretizado en un conjunto de subelementos, por lo que la integral anterior puede aproximarse mediante una suma discreta de contribuciones individuales:

$$F_i \approx \sum_{k=1}^n N_i^{(k)} A^{(k)}$$

siendo $N_i^{(k)}$ la resultante membranal evaluada en el subelemento k y $A^{(k)}$ el área asociada al mismo. Esta aproximación permite transformar el campo distribuido de fuerzas internas en magnitudes globales equivalentes.

La integración espacial constituye así el mecanismo mediante el cual la información tensional obtenida del análisis numérico se traduce en fuerzas estructurales globales, conservando la consistencia mecánica del modelo continuo discretizado.

El proceso completo puede entenderse como una secuencia que parte del campo continuo de esfuerzos, continúa con la obtención de resultantes membranales mediante integración en el espesor y culmina con la integración espacial sobre el área del elemento. Este procedimiento establece la base conceptual para la formulación de criterios de evaluación estructural y para la construcción del modelo metodológico de toma de decisiones desarrollado en los apartados siguientes.

II.2. Modelo metodológico de toma de decisiones estructurales.

Entre los inconvenientes del proceso general de diseño estructural es que es iterativo, debido a que en la mayoría de los casos no se espera que una primera propuesta de solución pueda satisfacer todas las necesidades de un proyecto, teniendo en cuenta también que son comunes posteriores modificaciones fuera del control del diseñador, esto en estructuras de mampostería confinada adquiere otra dimensión de complejidad porque a diferencia de otros sistemas estructurales no es tan simple generar un modelo basado en elementos tipo barra y por ende cada prueba antes de la solución final requiere de más tiempo, otro inconveniente también consiste en la ponderación de soluciones y definir cuándo es realmente conveniente aplicar un sistema sobre otro, cosa que también es importante cuando se decide comenzar el planteamiento por un sistema de mampostería confinada ya que este puede ser superado con facilidad si se presentan inconvenientes como lo podría ser el desarrollo de claros de gran apertura.

A la par de la investigación que continuamente se realiza sobre el comportamiento de la mampostería confinada, desde la década pasada ha comenzado una tendencia al alza en

el campo de las ciencias computacionales sobre el estudio de la IA, tendencia apoyada en una explosión del volumen de datos disponibles debido a un mayor uso de servicios en internet, así como por perfeccionamiento en el manejo de dichos datos y la liberación de bibliotecas de código abierto que integran algoritmos de ML a proyectos de menor escala. Recientemente aplicaciones para la generación de imágenes y generación de texto marcaron un hito en la popularización del uso de IA para usuarios domésticos, pero desafortunadamente la rápida propagación de su uso trajo consigo una ola de problemas, por ejemplo, en ámbitos profesionales se teme que se den usos desproporcionados pretendiendo que estén preparadas para sustituir la capacidad de decisión humana, poniendo en riesgo recursos y vidas humanas.

Pese a sus inconvenientes actuales el potencial de los algoritmos de ML hará inevitable su integración en múltiples disciplinas actuales, incluyendo por supuesto la ingeniería estructural; parte de los propósitos de esta investigación consiste en probar los beneficios y desventajas de adoptar esta tecnología en el proceso de diseño de estructuras de mampostería confinada a fin de comenzar un acercamiento a su uso de manera responsable; después de un breve preámbulo de como se ha realizado históricamente el análisis de estructuras de mampostería de acuerdo a las NTCM en diferentes versiones se ha identificado que los análisis refinados se ven condicionados por las capacidades tecnológicas disponibles para los proyectistas y solventando estas dificultades a través de métodos simplificados de diseño que daban aproximaciones significativas; esto si bien era funcional para las necesidades arquitectónicas de la época es evidente que ahora los métodos de análisis simplificados son insuficientes por el añadido de nueva investigación respecto al comportamiento de estructuras ante fenómenos accidentales como sismos.

Dado el contexto anterior, se propone como parte de la solución a los inconvenientes del proceso de diseño de estructuras de mampostería reducir el número de iteraciones, por ende, realizar configuraciones más precisas desde un modelo de partida para cada iteración, empleando algoritmos de ML a través de una herramienta de toma de decisiones mediante la convergencia entre un número de iteraciones mínimas, con el propósito de conseguir diseños óptimos de forma rápida y eficiente. La premisa anterior se concibe como una oportunidad de incentivar el uso del MEF y permitir abandonar

gradualmente metodologías de difícil mantenimiento para diseñadores, como el método de columna ancha, donde si bien cumple el propósito de entregar resultados funcionales y prácticos, se hace engorroso de implementar como punto de partida por los numerosos requisitos antes descritos.

II.3. Alcances y limitaciones del modelo de optimización propuesto

La implementación de algoritmos de ML para agilizar el proceso de diseño es una herramienta explorada más en el ámbito académico, especialmente en el diseño de estructuras basadas en marcos como estructuras de perfiles de acero; pero estas requieren de modelos previamente entrenados con bases de datos de casos reales y con sus respectivos resultados etiquetados y categorizados, además de considerar que el no tener una integración adecuada de estas herramientas al momento de emplearlas arrojen resultados que aunque sean correctos resulten inútiles en la práctica, por lo cual: ¿Es viable una herramienta que integre algoritmos de ML al proceso iterativo tradicional de diseño de estructuras de mampostería para agilizar los tiempos de entrega y dar propuestas de solución óptimas?

El desarrollo de la herramienta de toma de decisiones requiere como preámbulo definir una metodología de diseño compatible con esta propuesta, es importante definir como primer alcance de esta su limitación en las revisiones normativas de los muros portantes, no se busca redefinir las reglas de modelación del MEF designadas correspondientes en las NTCM, sino servir como agregado que compense el tiempo llevado para construir modelos reglamentariamente válidos, al reducir el tiempo que se toma durante el diseño de los elementos portantes de una estructuración.

Si bien la premisa fundamental debería ser funcional para cualquier tipo de sistema de estructuración, en esta investigación se ha limitado únicamente en la revisión de estructuras de mampostería confinada, si bien los principios e ideas de la metodología no tendrían problema en ser aplicadas en mampostería reforzada interiormente, la experiencia personal hace significativamente más valioso el estudio de la mampostería confinada; como agregado de lo anterior, los alcances de la herramienta no abordaran la revisión de componentes estructurales que no sean de mampostería confinada pero que

en ocasiones son necesarias como parte de una propuesta final con este sistema, como trabes de concreto reforzado.

Otra limitación de los alcances de esta investigación consiste en establecer como se realizará la implementación de algoritmos de ML, es importante aclarar que este documento no busca crear nuevos algoritmos sino únicamente emplear algoritmos conocidos y estudiados previamente por los campos de investigación correspondientes, es decir, se buscará adaptar dichas herramientas en bruto y evaluar su integración en el proceso de diseño. Mas adelante en este documento se describirá con detalle cómo, mediante el desarrollo de una aplicación de escritorio, se realizó la integración de ML con bibliotecas de funciones especializadas.

Los resultados y productos derivados de esta investigación no pretenden constituir una solución definitiva al problema del diseño estructural asistido mediante técnicas de aprendizaje automático. La propuesta desarrollada se concibe como una aproximación metodológica orientada a explorar la integración entre herramientas de análisis estructural basadas en el método de los elementos finitos y algoritmos de aprendizaje automático aplicados al post-procesamiento de resultados. En este sentido, el modelo propuesto no busca resolver problemas de optimización estructural de forma integral, tales como la optimización de la topología estructural, la sustitución de procedimientos avanzados de análisis no lineal o la consideración explícita de incertidumbres asociadas a la demanda sísmica. Tampoco se plantea la construcción de modelos predictivos generalizables entrenados con grandes bases de datos de estructuras existentes, objetivo que requeriría volúmenes de información significativamente mayores y procesos de validación estadística más extensos.

En cambio, el alcance de la herramienta se limita a la organización sistemática de resultados provenientes de modelos estructurales, su transformación en variables estructurales comparables y la exploración de patrones mediante algoritmos de clasificación. Esta delimitación es coherente con el nivel y objetivos de una investigación de maestría, cuyo propósito principal es establecer una base metodológica que permita evaluar la viabilidad de integrar técnicas de aprendizaje automático dentro del proceso iterativo de diseño estructural. En consecuencia, el desarrollo presentado debe entenderse

como una plataforma inicial susceptible de ampliación en investigaciones futuras, donde podrían incorporarse bases de datos más extensas, algoritmos de aprendizaje más complejos o módulos de optimización estructural más avanzados.

Adicionalmente, considerando que modelos de aprendizaje automático más sofisticados, como las redes neuronales artificiales, requieren grandes volúmenes de información para lograr capacidad predictiva robusta, en esta investigación se optó por no construir una base de datos extensa de diseños estructurales. En su lugar, se propone que la herramienta permita el almacenamiento progresivo de resultados generados durante su uso, con el fin de conformar gradualmente una base de datos que en futuras investigaciones pueda emplearse para el entrenamiento de modelos predictivos de mayor complejidad. La lógica y funcionamiento de este mecanismo de almacenamiento de información se describen con mayor detalle en el capítulo siguiente.

III. IMPLEMENTACION COMPUTACIONAL DE LA METODOLOGIA PROPUESTA.

La herramienta de para toma decisiones durante el proceso de diseño desarrollada en esta investigación consiste en un programa de cómputo que permite organizar y extraer información proveniente de modelos generados en programas comerciales de análisis estructural, cuyo propósito es complementar el proceso tradicional de diseño de edificaciones de mampostería conforme a los lineamientos establecidos en la normativa NTCM-2023. El software permite presentar de forma estructurada los resultados analíticos de una corrida convencional de un programa de análisis estructural, de modo que, mediante un proceso de post-procesado integrado en el programa, el usuario pueda identificar las deficiencias en la estructuración del modelo al final de un análisis. Esto facilita la evaluación de alternativas disponibles para llegar a un diseño óptimo como por ejemplo reforzar los muros estructurales existentes o replantear la configuración estructural inicial del proyecto. El presente capítulo describe el proceso de desarrollo del programa, los fundamentos conceptuales que lo sustentan, las pautas normativas en la que se sostiene y las decisiones adoptadas para durante el proceso de desarrollo, como la selección del lenguaje de programación y el diagrama de flujo representativo de la metodología.

III.1. Criterios de diseño computacional del método propuesto

El estudio realizado, de tipo experimental y analítico por la naturaleza de la información requerida para su desarrollo, estudiara las inconveniencias y complicaciones de la modelación con MEF para las cuales la implementación de ML pueda servir como apoyo en la reducción del esfuerzo empleado y el mejoramiento de resultados. La población de este estudio consistirá en un modelo simplificado de una vivienda de dos niveles con muros de carga de mampostería confinada, este modelo servirá como base de calibración durante el desarrollo de la propuesta metodológica donde poder definir propiedades mecánicas de materiales y la aplicación de cargas externas para después realizar una corrida analítica, mediante los resultados de dicha corrida se generará un conjunto de datos que podremos ordenar y manipular a fin de realizar, los detalles del modelo

empleado y sus respectivos resultados arrojados pueden consultarse en el Anexo A: Elaboración de modelo para pruebas de desarrollo. El producto final de esta investigación es un programa de cómputo con algoritmos de ML integrados en donde se seleccionarán casos reales de diseño de viviendas unifamiliares, su uso servirá para complementar con software de análisis estructural, preferiblemente utilizando su interfaz de programación de aplicación (API) para modificar rápidamente los parámetros del diseño y generar las revisiones normativas correspondientes en tiempo real.

En esta etapa de experimentación, se optó por realizar la integración del ML a través de 2 etapas, de forma inmediata se implementará el DT como algoritmo de ordenación de resultados y para una segunda etapa de investigación a futuro se implementará una recolección interna de datos

El programa desarrollado será capaz de identificar deficiencias en el diseño donde después el usuario tendrá la libertad de corregir tales deficiencias y proponer mediante su criterio medidas al respecto, como una redistribución de los muros o la modificación de materiales, pero con el conocimiento mediante el programa de las condiciones del diseño y los resultados arrojados de forma ordenada.

III.2. Flujo algorítmico del método de optimización

Un desarrollo robusto y eficiente comienza a través de la planeación, esta etapa preliminar es crucial para sentar las bases lógicas y elegir las herramientas adecuadas que determinarán el curso del proyecto, para lo cual hace falta un diagrama de flujo como herramienta de planeación. Un diagrama de flujo es la representación gráfica de un algoritmo, su correcta elaboración es crucial ya que sirve como base para escribir un programa informático en cualquier lenguaje de programación. Cuando el diagrama de flujo es completo y preciso, la traducción de este a código se vuelve un proceso relativamente sencillo y directo. (Cairó, 2005).

La funcionalidad principal del programa reside en una secuencia de decisiones y operaciones las cuales imitan el procedimiento de la revisión normativa en estructuras de mampostería; el diagrama de flujo que se presenta a continuación es la representación gráfica formal de la arquitectura funcional del sistema, servirá como el plano fundamental

para la codificación y como la principal referencia para validar que la implementación final cumpla con los requisitos funcionales definidos y para que el flujo de trabajo sea eficiente. El diagrama representativo que seguirá el flujo de trabajo para el programa es mostrado en la figura 14 y en los próximos párrafos se describe a detalle los pasos que se plantean para la metodología. El procedimiento formulado parte de la creación de un modelo estructural para el proyecto arquitectónico en que este trabajando el ingeniero responsable de diseño, este modelo deberá ser diseñado bajo las indicaciones dadas para la modelación mediante MEF de acuerdo a las NTCM que sean vigentes al momento, cuidando aspectos como la compatibilidad de nodos y el correcto dimensionamiento de los elementos membrana.

Debido a los alcances de esta primera etapa de la propuesta metodológica, el programa desarrollado únicamente permite el manejo de modelos desarrollados en el programa comercial de análisis estructural ETABS, la elección de este programa no fue arbitraria, el acercamiento inicial a la solución de optimización mediante el programa ETABS fue motivada debido a las herramientas disponibles de este software para sus usuarios, particularmente aprovechando dos características de este en el desarrollo del programa: la herramienta llamada “Pier Labels”, cuyo propósito es la conversión de los esfuerzos internos de los elementos tipo membrana a elementos mecánicos, y la API integrada en ETABS, las API permiten a dos componentes de software comunicarse entre sí mediante un conjunto de definiciones y protocolos. API significa “interfaz de programación de aplicaciones”, la palabra aplicación se refiere a cualquier software con una función distinta. (Amazon Web Services, 2025). Para poder trabajar con el programa de optimización de diseño, el archivo del modelo requiere cumplir con unos cuantos requisitos estos consisten esencialmente en etiquetar adecuadamente los elementos tipo membrana mediante “Pier Labels” y a su vez estos elementos deben ser asignados con una propiedad de material tipo mampostería “Mansory”, el último requisito consiste en que el modelo debe ser guardado con la corrida de resultados finalizada.

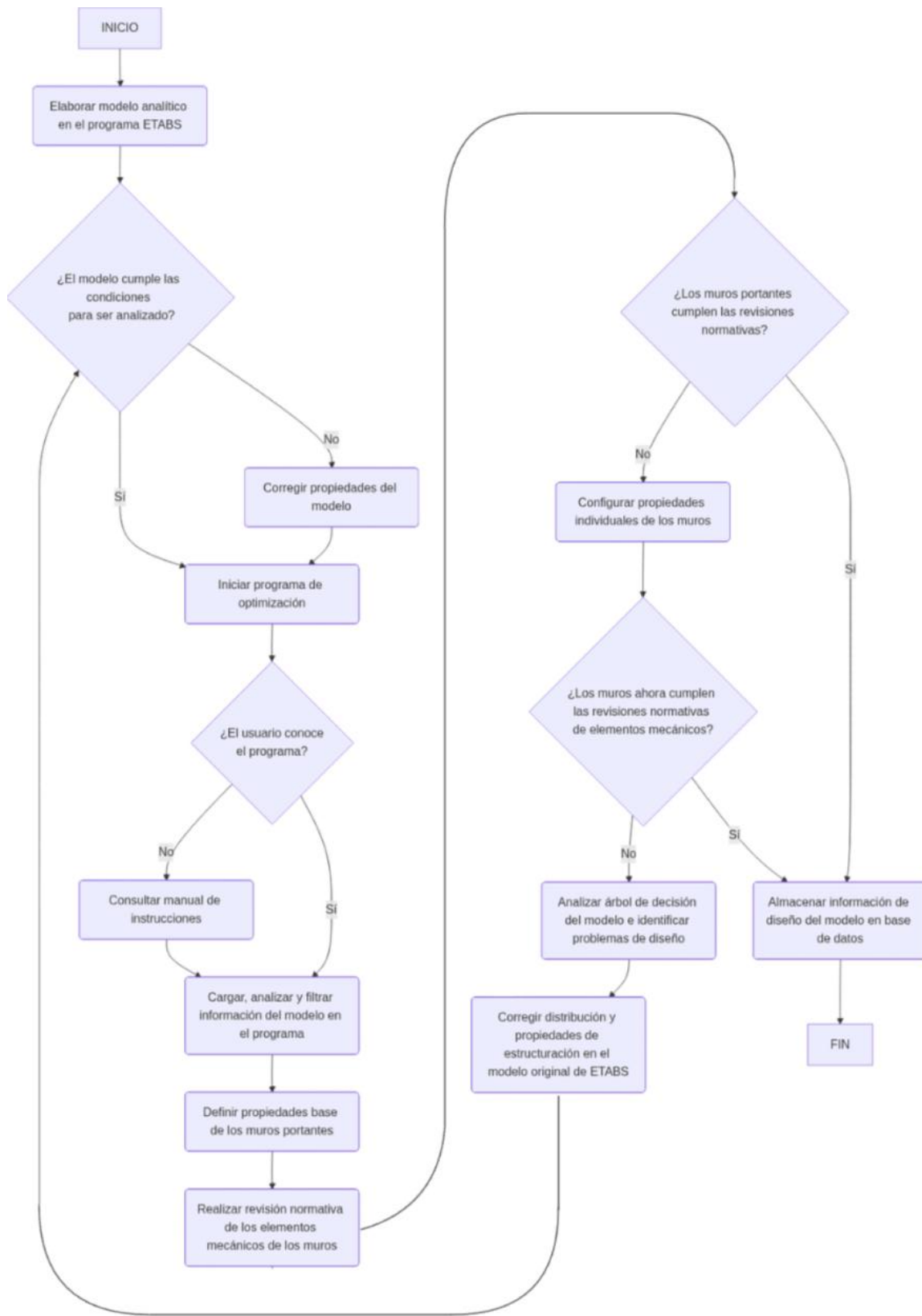


Figura 14: Diagrama de flujo para la propuesta de metodología de optimización. Fuente: Autoría propia (2025)

Teniendo un modelo en el que podamos trabajar desde el programa se puede proceder a la ejecución de este, debido a que el programa desarrollado involucra herramientas poco empleadas en la práctica profesional, como los árboles de decisión, así como también el programa desarrollado es nuevo se recomienda revisar la documentación proporcionada para su uso, así como estar en conocimiento del flujo de trabajo que sigue la metodología. El próximo paso consiste en cargar la información del archivo de modelado, resuelto mediante una solicitud a la API de ETABS; es en este paso que se aborda uno de los problemas de la práctica profesional al momento de resolver problemas de estructuración mediante mampostería confinada, la filtración y ordenación de información relevante para el análisis de resultados. La carga del modelo resulta en la apertura momentánea del programa, y mediante instrucciones provistas a través de código de programación, la rápida obtención de los elementos membrana a las que fueron asignados “Pier Labels”, la geometría correspondiente a cada uno de estos elementos, así como todas las demandas de todas las combinaciones de carga asignadas en el modelo.

El próximo paso en la metodología consiste en asignar un conjunto de propiedades mecánicas y geométricas base para establecer a todos los elementos membrana que hayan pasado los filtros descritos anteriormente, dichas propiedades corresponden a las que constituyen la descripción de muros de mampostería confinada de acuerdo a lo documentado en las NTCM, como la resistencia a compresión diagonal de las piezas de mampostería del muro, el módulo de elasticidad asignado al concreto y al acero de refuerzo o la geometría de los elementos confinantes. Se requieren estas propiedades base ya que a partir de estas se realiza un primer paso iterativo del proceso de diseño, no es necesario que estas propiedades base sean las definitivas puesto que durante el flujo de trabajo se permite la modificación de propiedades particulares de cada muro según cada una de las demandas normativas, este paso es parte de la solución propuesta para la optimización de diseños puesto que permite identificar, a través de la interfase grafica dispuesta para ello en el programa generado, cuáles son los elementos portantes más demandados y por lo tanto los que requerirían una configuración más robusta, la cual se puede asignar directamente dentro del programa.

Definidas las propiedades base se procede a la revisión normativa de los muros de mampostería confinada según lo dictado en la NTC-2023, la revisión completa de estos elementos consiste en la comparativa de la relación entre demanda de carga y capacidad para soportarla, la cual se resume en verificar que esta relación no supere el 100% de la capacidad de cada uno de los elementos. A su vez, para los muros de carga de la estructuración es necesaria la revisión ante los fenómenos de compresión axial, flexocompresión y fuerza cortante en el plano del muro; durante la ejecución del programa se plantea que estas revisiones se realicen de forma secuencial según el orden descrito anteriormente, el porqué de esta disposición reside en que en el ejercicio profesional es común que las demandas de capacidad sean insuficientes para resistir cargas laterales si se considera únicamente el aporte de la mampostería, lo que hace necesario la inclusión de refuerzo adicional con acero y por lo tanto procedimientos adicionales que complican los cálculos de diseño, caso contrario resulta para la revisión ante cargas axiales, donde la naturaleza del material vuelve optimo su comportamiento ante este fenómeno, resultando en que esta revisión pueda cumplirse con requerimientos mínimos normativos casi siempre en la primera iteración.

Al finalizar la revisión normativa de los muros de mampostería confinada es importante considerar la posibilidad de que, a pesar de asignar propiedades más robustas a los elementos portantes, dichos cambios no sean suficientes para cumplir la demandas de capacidad de la estructura, esta es parte de la problemática abordada en el capítulo anterior, que una primera propuesta de estructuración muchas veces no llega a cumplir requisitos normativos continuando así en pasos adicionales en el proceso iterativo. Por lo cual, en caso de no alcanzar los objetivos de diseño, el programa de optimización ofrece una herramienta de análisis grafico conocido como “Árbol de decisión”

III.3. Estructura computacional para la implementación del método.

Con un panorama claro del diagrama de flujo y de cómo se ejecutarían sus procesos, se procedió al siguiente desafío: la elección del lenguaje de programación. La decisión depende de los propósitos específicos del proyecto, de las herramientas y ventajas que ofrece cada lenguaje frente a otros, así como de las desventajas que podrían dificultar su uso para cumplir con los objetivos planteados. Para el desarrollo del programa de

optimización de diseño de mampostería, se determinó que el lenguaje más adecuado era Python, y a continuación se presentan las razones que sustentan esta elección:

- Disponibilidad de bibliotecas documentadas: La mayor fortaleza de Python reside en su amplio y maduro ecosistema de bibliotecas, esta característica reduce drásticamente la necesidad de crear funcionalidades complejas desde cero. Para casi cualquier tarea como manejo de bases de datos, análisis de datos, aprendizaje automático, desarrollo de aplicaciones de escritorio o gestión de gráficos existe una biblioteca probada y optimizada, lo que permite centrarse de inmediato en la lógica del programa, en lugar de desarrollar soluciones específicas para cada tarea que requiera el programa. Bibliotecas como Pandas, NumPy y Matplotlib, cuentan con documentación exhaustiva y con el respaldo de una comunidad activa. Esto facilita su integración y permite resolver problemas con rapidez, acelerando significativamente el ciclo de desarrollo.
- Implementación rápida en proyectos: Python es reconocido como un lenguaje de rápido desarrollo porque requiere escribir menos líneas de código para lograr la misma funcionalidad que otros lenguajes. El lenguaje maneja automáticamente tareas complejas como la gestión de memoria, lo que permite a los desarrolladores codificar, probar e iterar más rápido. Esta velocidad de implementación es crucial para proyectos con plazos ajustados o cuando se utiliza una metodología ágil, permitiendo entregar un producto mínimo viable en menos tiempo y reaccionar rápidamente a los cambios en cuanto a funcionalidad y demandas añadidas al programa.
- Legibilidad de la sintaxis del código: La sintaxis de Python es notablemente clara, intuitiva y se asemeja mucho al lenguaje humano. La legibilidad se impone a través de reglas estrictas como la indentación obligatoria para definir bloques de código, lo cual es una medida de ingeniería de software que asegura que el código sea consistentemente estructurado. Un código legible es más fácil de mantener, depurar y auditar por lo que se puede entender la lógica de un bloque de código escrito por otro en mucho menos tiempo, lo que mejora significativamente la colaboración y reduce los errores a largo plazo.

La combinación de un diseño lógico riguroso mediante un diagrama de flujo y un lenguaje de programación apropiado para los objetivos de este documento como lo es Python nos posiciona para avanzar a la fase de codificación. Una vez descritos los fundamentos técnicos sobre los que se realizó el desarrollo del programa de cómputo propuesto como herramienta de optimización a continuación se describe parte de código empleado a fin de visualizar como se ajustaron los requisitos normativos de acuerdo en este caso con lo solicitado a las NTCM-2023.

El código consiste en un script que funciona bajo el paradigma de la orientación a objetos, que propone la organización del código escrito en torno a fragmentos denominados objetos, los cuales tienen datos y comportamientos en lugar de funciones y lógica, que se crean a partir de clases, que son plantillas que definen su estructura y comportamiento. Este paradigma se recomienda al momento de realizar proyectos como aplicaciones de escritorio, que es en esencia el producto final de esta investigación, porque en estos proyectos se permite un flujo de trabajo flexible con las necesidades de los usuarios, permitiendo realizar acciones en secuencias no definidas completamente, como por ejemplo en este proyecto. Con lo anterior en contexto se describen en brevedad las partes del código para el programa:

- Bibliotecas de funciones importadas: Parte del código donde se declara la importación de bibliotecas externas, ya sea del propio Python o de desarrolladores externos, entre las más importantes se encuentran numpy, matplotlib, pandas, tkinter, comtypes o sklearn.
- Escritura de funciones particulares del proyecto: Parte intermedia del código, donde se integran funciones escritas expresamente para completar funcionalidades que no se podían conseguir de bibliotecas externas o para reciclar código que sería empleado múltiples veces durante la ejecución del programa, como una función especial para interpolación lineal o para permitir la actualización en tiempo real de gráficos esquemáticos de la interfaz gráfica.
- Construcción de clases del programa: Es la parte más importante del código, desde aquí se permite la abstracción del programa en 3 elementos interconectados

que permiten su funcionalidad, a saber las clases implementadas son 3: Clase AppRevisionMamposteria, que es en donde se concentra el uso de la biblioteca tkinter y se controla la interfaz de diseño, la clase ModeloETABS que es donde se controla la conexión de interfaces entre el programa escrito y en este caso el programa de diseño ETABS mediante la API integrada de este a fin de extraer la información del análisis del modelo a revisar necesaria para las revisiones estructurales normativas, y finalmente se tiene la clase MuroMamposteria donde se aterrizan los requerimientos normativos de las NTCM-2023 para efectuar las posteriores revisiones de los elementos constituyentes del modelo cargado en el programa.

A continuación, se realizará la descripción general de los puntos contenidos en la normativa que fueron integrados en el código:

- 3.1.2.2. Fuerzas y momentos de diseño:
 - 3.1.2.2.2. Para el diseño sólo se tomarán en cuenta los momentos flexionantes especificados en a) y b) siguientes:
 - a) Los momentos flexionantes que deberán ser resistidos por condiciones de estática y que no pueden ser redistribuidos por la rotación del nudo, como son los debidos a un voladizo que se empotre en el muro y los debidos a empujes, de viento o sismo, normales al plano del muro
 - b) Los momentos flexionantes debidos a la excentricidad con que se transmite la carga de la losa del piso inmediatamente superior en muros extremos; tal excentricidad, e_c , se tomará igual a la calculada con la siguiente ecuación:

$$e_c = \frac{t}{2} - \frac{b}{3}$$

donde t es el espesor de la mampostería del muro y b es la longitud de apoyo de una losa soportada por el muro. Lo anterior se describe en la siguiente figura:

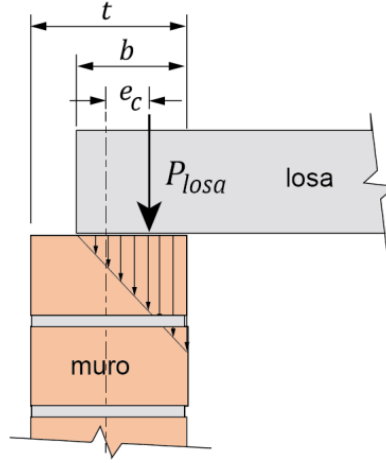


Figura 15: Excentricidad de carga vertical en muros extremos. Fuente: (NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA, 2023)

- 3.1.2.4. Efecto de las restricciones a las deformaciones laterales:
 - En el caso de que el muro en consideración esté ligado a muros transversales, a contrafuertes, a columnas o a castillos que restrinjan los desplazamientos fuera del plano, el factor ***F_E*** se calculará como:

$$F_E = \left(1 - \frac{2e'}{t}\right) \left[1 - \left(\frac{kH}{30t}\right)^2\right] \times \left(1 - \frac{H}{L'}\right) + \frac{H}{L'} \leq 0.9$$

donde L' es la separación de los elementos que rigidizan transversalmente al muro, tal como se describe en la figura 16; H es la altura libre de un muro entre elementos capaces de darle apoyo lateral, e' es la excentricidad calculada para la carga vertical más una excentricidad que se tomará igual a $t/24$; y k es el factor de altura efectiva del muro, que se tomara como 0.8 según los criterios de la sección 3.1.2.3.1.

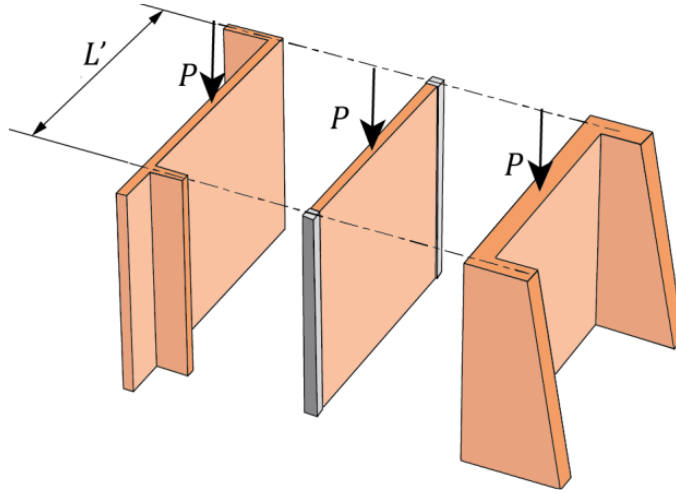


Figura 16: Restricción a la deformación lateral: Fuente: (NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA, 2023)

- 6.4.1. Resistencia a compresión de muros confinados
 - La carga vertical resistente, P_R , se calculará con la siguiente ecuación:

$$P_R = F_R F_E (f'_m A_T + \Sigma A_s f_y)$$

donde F_E se obtendrá de acuerdo con la ecuación descrita en la sección 3.1.2.4. y F_R se tomará igual a 0.6.

- 6.4.2. Resistencia a flexocompresión en el plano del muro
 - Para muros con barras longitudinales colocadas simétricamente en sus castillos extremos, sean estos externos o internos, se aceptará calcular M_R con las siguientes ecuaciones:

$$M_R = F_R M_0 + 0.3 P_u d \quad \text{si} \quad 0 \leq P_u \leq P_R/3$$

$$M_R = (1.5 F_R M_0 + 0.15 P_R d) \times \left(1 - \frac{P_u}{P_R}\right) \quad \text{si} \quad P_u > P_R/3$$

donde $M_0 = A_s f_y d'$ es la resistencia nominal a flexión pura del muro y F_R se tomará igual a 0.8 si $P_u \leq P_R/3$ e igual a 0.6 en caso contrario.

- Para cargas axiales de tensión será válido interpolar entre la carga axial resistente a tensión pura, $\Sigma A_s f_y$, y el momento flexionante resistente M_0 , afectando el resultado por $F_R = 0.8$.

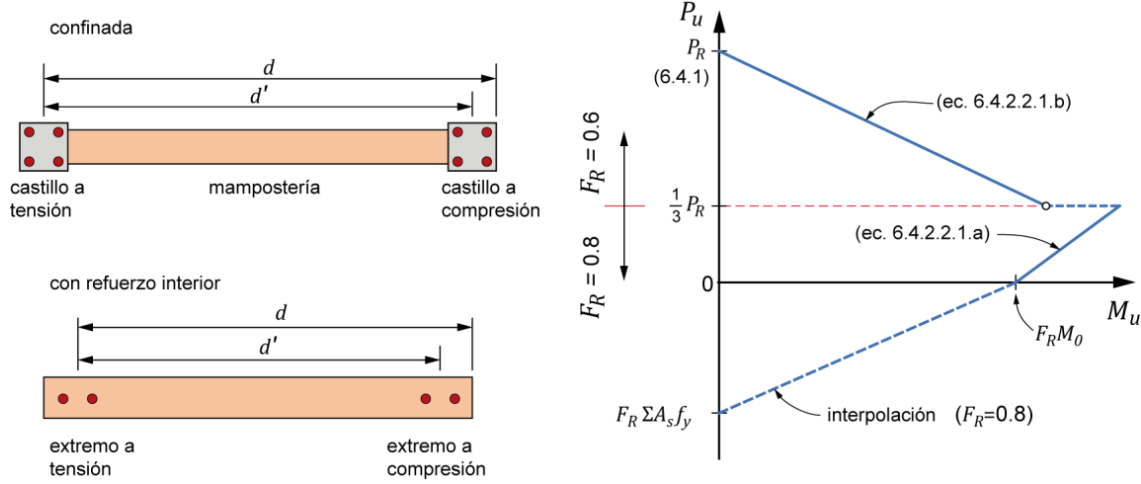


Figura 17: Diagrama de interacción carga axial-momento flexionante resistente de diseño con el método optativo.
Fuente: (NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA, 2023)

• 6.5. Resistencia a cargas laterales

- La resistencia a cargas laterales V_R , será proporcionada por la mampostería V_{mR} , y por el refuerzo V_{sR} , como se indica en siguiente ecuación:

$$V_R = V_{mR} + V_{sR}$$

- El factor de resistencia F_R , se tomará igual que 0.7

• 6.5.2 Fuerza cortante resistida por la mampostería

- La fuerza cortante de diseño debida a la mampostería V_{mR} , se calculará con siguiente ecuación:

$$V_{mR} = F_R(0.5v'_m A_T + 0.3P) * f \leq 1.5F_R v'_m A_T f$$

donde A_T es el área transversal del muro obtenida como $t \times L$, donde L incluye la longitud de los castillos.

- La carga axial P se deberá tomar positiva en compresión y deberá considerar las acciones permanentes, variables con intensidad instantánea, y accidentales que conduzcan al menor valor y sin multiplicar por el factor de carga. Si la carga vertical P es de tensión, se despreciará la contribución de la mampostería, V_{mR} .
- El factor f se determinará según la siguiente ecuación, donde para casos intermedios de H/L , se interpolará linealmente:

$$f = \begin{cases} 1.5 & \text{si } \frac{H}{L} \leq 0.2 \\ 1.0 & \text{si } \frac{H}{L} \geq 1.0 \end{cases}$$

- 6.5.3 Fuerza cortante resistida por el acero de refuerzo horizontal
 - Se permitirá el uso de acero de refuerzo horizontal colocado en las juntas de mortero para resistir fuerza cortante. El refuerzo consistirá de barras corrugadas o alambres corrugados laminados en frío que sean continuos a lo largo del muro.
 - El esfuerzo especificado de fluencia para diseño f_{yh} no deberá ser mayor que 600 MPa (6 000 kg/cm²).
 - La separación máxima del refuerzo horizontal s_h , no excederá de seis hiladas ni de 450 mm.
 - El producto de la cuantía de refuerzo horizontal y el esfuerzo de fluencia especificado $\rho_h f_{yh}$, no será inferior que 0.3 MPa (3 kg/cm²).
 - El valor máximo de $\rho_h f_{yh}$, será $0.15 f'_m f_{an}$ pero no menor que 0.3 MPa (3 kg/cm²) ni mayor que $0.05 h_j f_{yh} / s_h$, donde h_j es el espesor de la junta horizontal.
 - La fuerza cortante resistente debida al refuerzo horizontal, V_{sR} , se calculará con las siguientes ecuaciones:

$$V_{sR} = F_R \eta (\rho_h f_{yh})_e A_T$$

$$\rho_h = A_{sh} / (s_h \times t)$$

$$(\rho_h f_{yh})_e = \rho_h f_{yh} \leq 0.1 f'_m f_{an}$$

- El valor de η se determinará con a) o b) dependiendo de si la carga P es de compresión o tensión, respectivamente, como sigue:

- a) Si el muro está sujeto a una carga axial P de compresión:

$$\eta = \frac{V_{mR}}{F_R (\rho_h f_{yh})_e A_T} (k_0 k_1 - 1) + \eta_s$$

$$k_0 = \begin{cases} 1.3 & \text{si } \frac{H}{L} \leq 1.0 \\ 1.0 & \text{si } \frac{H}{L} \geq 1.5 \end{cases}$$

$$k_1 = 1 - \alpha (\rho_h f_{yh})_e$$

$$\eta_s = \begin{cases} 0.75 & \text{si } f'_m \geq 9 \text{ MPa} \left(90 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) \\ 0.55 & \text{si } f'_m \leq 6 \text{ MPa} \left(60 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) \end{cases}$$

Para casos intermedios de H/L y f'_m se interpolará linealmente para obtener los valores de k_0 y η_s , respectivamente; $\alpha = 0.45 \text{ MPa}^{-1} \text{ (} 0.045 \text{ cm}^2/\text{kg} \text{)}$

- b) Si el muro está sujeto a una carga axial P en tensión:

$$\eta = k_1 \eta_s$$

El valor de k_1 y η_s se calcularán de acuerdo con a).

IV. APLICACIÓN, VALIDACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El presente capítulo tiene como propósito evaluar la aplicabilidad y el alcance de la metodología desarrollada en los capítulos anteriores, mediante su implementación en un caso de análisis estructural real y la comparación con los procedimientos convencionales de revisión de muros de mampostería confinada.

La validación de metodología a través de la herramienta de optimización no se limita a verificar su funcionamiento como software, sino que implica analizar su capacidad para organizar, interpretar y sintetizar la información derivada del análisis numérico, reduciendo la complejidad asociada al procesamiento manual de grandes volúmenes de datos generados por modelos discretizados mediante elementos tipo membrana. En este sentido, se estudia tanto la eficiencia del flujo de trabajo propuesto como la consistencia de los resultados obtenidos respecto a los procedimientos tradicionales de revisión normativa.

Asimismo, se presentan los resultados derivados del procesamiento automatizado de esfuerzos y fuerzas membranales, incluyendo el análisis de patrones identificados en la distribución de esfuerzos y su relación con el desempeño estructural de los muros evaluados. Particular atención se presta a la interpretación de variables críticas y a la capacidad del modelo para identificar umbrales mecánicos relevantes, así como a las limitaciones observadas en la correlación entre parámetros locales y comportamiento global.

Este capítulo no solo expone la aplicación práctica del método propuesto, sino que discute su alcance, sus ventajas operativas y sus restricciones metodológicas, estableciendo un contexto que permite valorar su contribución dentro del proceso de diseño estructural.

IV.1. Comparativa entre flujos de trabajo del proceso de diseño.

En el proceso del diseño estructural de edificaciones de mampostería confinada, la revisión normativa de los muros de carga se realiza a partir de los resultados obtenidos mediante análisis numérico. Cuando los muros son modelados mediante elementos tipo

membrana, el análisis genera un conjunto extenso de resultados asociados a estados planos de esfuerzo y fuerzas de membrana distribuidas en cada subelemento del mallado.

El procedimiento convencional de revisión comienza con la consulta de tablas de resultados desde la interfaz del programa de análisis estructural con que prefiera trabajar un estructurista. En el caso del programa ETABS, esta información se presenta de manera concentrada y permite distintos niveles de filtrado; sin embargo, el volumen total de datos disponibles excede generalmente aquellos parámetros necesarios para la verificación de diseño. En consecuencia, una de las primeras tareas del diseñador consiste en identificar y seleccionar manualmente la información relevante para cada comprobación normativa.

Posteriormente, los resultados seleccionados suelen exportarse hacia herramientas externas destinadas a objetivos específicos, tales como hojas de cálculo para el procesamiento masivo de datos o programas de cálculo simbólico donde se documenta detalladamente la formulación empleada en la revisión estructural. Este flujo de trabajo introduce una fragmentación del proceso de diseño, obligando al usuario a trasladar información entre distintos entornos computacionales y aumentando tanto el tiempo de procesamiento como la probabilidad de inconsistencias en el manejo de datos.

La metodología propuesta aborda esta problemática mediante la automatización del procesamiento de resultados a través de un programa de cómputo desarrollado como medio de implementación del modelo descrito en el capítulo anterior. El programa realiza de forma automática la extracción y filtrado de información mediante la API del software de análisis, eliminando la necesidad de selección manual inicial por parte del diseñador.

Como resultado, el flujo de trabajo se reorganiza al integrar dentro de un mismo entorno la obtención de resultados, su procesamiento y la generación de reportes técnicos asociados a la revisión estructural. Esta integración permite reducir la complejidad operativa del proceso, facilitando la interpretación de los estados de esfuerzo relevantes para la evaluación normativa y disminuyendo la dependencia de herramientas externas durante la etapa de revisión.

Dado que la evaluación de muros de mampostería depende principalmente del control de esfuerzos normales y cortantes en el plano, la automatización del filtrado y organización de estos parámetros contribuye a una interpretación más consistente de los resultados analíticos, reduciendo la carga operativa asociada al procesamiento manual y permitiendo concentrar el análisis en la toma de decisiones de diseño.

Con el fin de sintetizar las diferencias operativas entre el procedimiento tradicional de revisión estructural y el flujo de trabajo derivado de la metodología propuesta, la Tabla 1 presenta una comparación sistemática de las etapas involucradas en ambos enfoques.

Tabla 1: Comparación entre el flujo convencional de revisión estructural y el flujo automatizado propuesto. Fuente: Autoría Propia (2025).

ETAPA DEL PROCESO	FLUJO CONVENCIONAL DE DISEÑO	FLUJO CON METODOLOGÍA PROPUESTA	IMPACTO EN EL PROCESO
OBTENCIÓN DE RESULTADOS DEL ANÁLISIS	Consulta manual de tablas dentro del software de análisis estructural	Extracción automática mediante API del programa desarrollado	Reduce intervención manual inicial
ORGANIZACIÓN DE INFORMACIÓN	Exportación a herramientas externas (Excel, software de cálculo simbólico)	Procesamiento integrado dentro de un mismo entorno computacional	Reduce fragmentación del flujo de trabajo
PROCESAMIENTO DE RESULTADOS	Manipulación manual de datos y fórmulas en hojas de cálculo	Procesamiento automatizado basado en reglas estructurales predefinidas	Mejora consistencia del cálculo
VERIFICACIÓN NORMATIVA	Evaluación individual de elementos con apoyo externo	Evaluación sistemática basada en resultados procesados automáticamente	Incrementa eficiencia de revisión
INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	Dependiente de inspección visual y experiencia del diseñador	Presentación estructurada de parámetros críticos	Facilita identificación de condiciones relevantes
TIEMPO DE PROCESAMIENTO	Elevado y variable según experiencia del usuario	Reducido y consistente entre evaluaciones	Incrementa productividad

Durante el proceso de diseño, cuando alguno de los elementos no satisface los criterios establecidos por la normativa, se realizan modificaciones en la estructuración o en las propiedades de los elementos, generando una nueva corrida de análisis. Cada ciclo completo de modelación, análisis y revisión normativa constituye una iteración del proceso de diseño. A partir de la definición anterior, resulta necesario establecer un parámetro de evaluación que permita comparar en términos cuantificables, el comportamiento del proceso de diseño.

Para concebir como parámetro de evaluación el número de iteraciones necesarias hasta lograr que el modelo cumpla normativamente, se emplea el modelo estructural construido para la fase de experimentación de la metodología, el cual sirve para cuantificar el impacto de la herramienta en comparación a realizar revisiones normativas sin el uso de esta, también sirve como métrica comparativa visualizar la evolución de la mejora en el proceso de diseño visualizar cuantos muros aprueban revisiones normativas a lo largo de cada iteración. La siguiente tabla resumen muestra numéricamente la mejora en cuanto a la reducción de pasos iterativos:

Tabla 2: Comparación del número de muros deficientes identificados en cada iteración del proceso de diseño bajo el esquema tradicional y el proceso asistido mediante la herramienta computacional desarrollada. Fuente: Autoría Propia (2025).

ITERACIÓN	MUROS DEFICIENTES* EN PROCESO TRADICIONAL	MUROS DEFICIENTES* EN PROCESO ASISTIDO
1	16	16
2	7	0
3	3	
4	0	

** Se considera un muro deficiente aquel que no satisface los criterios de verificación establecidos por la normativa NTCM-2023 para elementos de mampostería confinada.*

$$\text{Reducción de iteraciones} = \frac{4 - 2}{4} * 100\% = 50\%$$

Además de realizar una comparación en el número de iteraciones necesarias, se analizó el tiempo requerido para completar cada iteración del ciclo de revisión del modelo. En este contexto, el tiempo de iteración se define como el intervalo necesario para revisar los resultados del análisis estructural, identificar los muros que presentan deficiencias normativas y plantear las modificaciones necesarias para generar una nueva configuración del modelo estructural.

$$\text{Tiempo promedio} = \frac{\sum \text{Tiempo iteración}}{\text{numero de iteraciones}}$$

Tabla 3: Comparación entre tiempos que toma realizar una iteración de revisión bajo el esquema tradicional y el proceso asistido mediante la herramienta computacional desarrollada. Fuente: Autoría Propia (2025).

EN PROCESO TRADICIONAL	EN PROCESO ASISTIDO
32-34 minutos	10-12 minutos

Retomando el parámetro del numero de iteraciones necesarias para cada tipo de proceso de diseño se puede ahora realizar una medición del tiempo que fue posible reducir con ayuda del programa:

$$\% \text{ t reducido} = \frac{T_{trad} - T_{asit}}{T_{trad}} = \frac{(4 * 34\text{min}) - (2 * 12\text{min})}{(4 * 34\text{min})} * 100\% = 91.17\%$$

Los resultados muestran que el uso de la herramienta desarrollada permite reducir el número de iteraciones necesarias para alcanzar un diseño estructural satisfactorio. Esto se debe principalmente al ordenamiento automatizado de los resultados que facilita la identificación de los muros críticos dentro del sistema estructural, permitiendo que las modificaciones realizadas en cada iteración sean más efectivas.

IV.2. Análisis e interpretación de patrones mediante resultados obtenidos.

Con el propósito de explorar posibles patrones presentes en los resultados derivados del análisis por elementos finitos, se emplearon modelos de árboles de decisión debido a su capacidad para generar reglas explícitas de clasificación e identificación de umbrales dentro de conjuntos de datos complejos. A diferencia de otros métodos de aprendizaje automático, los árboles permiten interpretar directamente la relación entre variables

mecánicas y el comportamiento observado, lo cual resulta particularmente conveniente en el análisis estructural.

Para la aplicación de estos modelos fue necesario construir un conjunto de variables representativas a partir de los resultados numéricos obtenidos del análisis estructural, de manera que la información mecánica contenida en el modelo discretizado pudiera expresarse en parámetros comparables entre distintos muros y combinaciones de carga. En consecuencia, se definió un procedimiento sistemático de procesamiento de resultados orientado a transformar el campo continuo de esfuerzos generado por el análisis en un conjunto estructurado de variables de entrada para los modelos de decisión.

Una vez concluido el análisis numérico del modelo estructural dentro del entorno de ETABS, el primer paso del procesamiento consiste en la extracción automatizada de resultados mediante la API del software. Para cada muro identificado mediante un Pier, se recupera el estado de esfuerzos correspondiente a los elementos tipo membrana que conforman su discretización.

Los resultados extraídos corresponden a esfuerzos planos expresados en términos de las componentes σ_{11} , σ_{22} y τ_{12} , evaluadas para todas las combinaciones de carga seleccionadas para la revisión estructural. Dado que cada muro se encuentra discretizado en múltiples subelementos del mallado, cada combinación de carga produce un conjunto de valores de esfuerzo distribuidos espacialmente sobre la superficie del elemento estructural.

Con el propósito de obtener parámetros representativos del comportamiento global del muro, se realiza un procesamiento estadístico independiente de la ubicación espacial de los valores dentro del mallado. Para cada muro y para cada combinación de carga, se identifican los valores extremos positivos y negativos de esfuerzo presentes en todos los subelementos asociadas a los muros etiquetados, obteniéndose los valores máximos y mínimos globales del campo tensional.

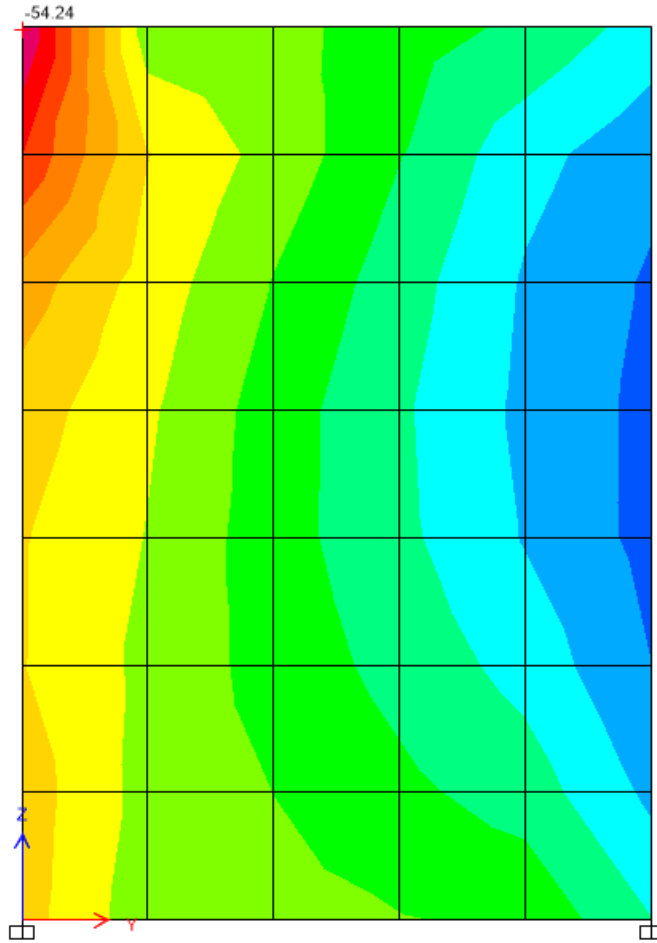


Figura 18: Ejemplo de distribución de esfuerzos en un elemento tipo membrana en ETABS, mostrando el campo tensional evaluado sobre el mallado de subelementos del muro. Fuente: Autoría Propia (2025).

Posteriormente, para cada subelemento del mallado se considera el valor máximo absoluto de esfuerzo, a partir del cual se calcula un valor promedio representativo del muro. Este promedio se emplea como referencia para normalizar los valores extremos previamente obtenidos, generando índices adimensionales que describen la relación entre concentraciones locales de esfuerzo y el comportamiento promedio del elemento estructural.

De esta manera, para cada componente de esfuerzo σ_{11} , σ_{22} y τ_{12} , se obtienen las siguientes variables características:

- valores máximos (σ_{ij}^{max})
- valores mínimos (σ_{ij}^{min})

- valores promedio (σ_{ij}^{avg})
- índices normalizados definidos como la razón entre valores extremos y promedio del campo de esfuerzos.

Este procedimiento se repite para todos los muros etiquetados dentro del modelo estructural y para cada combinación de carga considerada, generando un conjunto homogéneo de variables mecánicas utilizadas posteriormente como datos de entrada para los modelos de árboles de decisión empleados en el análisis.

Si bien la representación gráfica del estado de esfuerzos permite identificar cualitativamente zonas de concentración y variación espacial dentro del muro, la cantidad de información generada por el análisis numérico dificulta la comparación sistemática entre distintos elementos, combinaciones de carga y configuraciones estructurales. En consecuencia, la interpretación directa de los diagramas de contorno resulta insuficiente cuando se busca establecer criterios objetivos que permitan relacionar el comportamiento tensional con el desempeño estructural global.

Con el fin de transformar esta información distribuida en parámetros comparables, los resultados del análisis fueron procesados para obtener variables representativas del comportamiento del muro, tales como valores extremos, promedios e índices normalizados derivados del campo de esfuerzos. Estas variables constituyen una descripción simplificada del estado mecánico del elemento, conservando la información esencial asociada a la distribución relativa de esfuerzos dentro del mallado.

A partir de este conjunto estructurado de variables se implementó, dentro del propio programa desarrollado, la generación automática de modelos de árboles de decisión, cuyo objetivo consiste en identificar patrones y umbrales mecánicos asociados a la aceptación o rechazo estructural de los muros evaluados. De esta manera, los diagramas de árbol no se plantean como un método predictivo independiente, sino como una herramienta de interpretación orientada a explorar la relación entre los parámetros derivados del análisis numérico y los criterios de validación estructural.

Una vez generadas las variables representativas del estado de esfuerzos de cada muro se conformó un conjunto de datos estructurado en el que cada registro corresponde a un

muro de mampostería, evaluado bajo el conjunto de combinaciones de carga consideradas. A partir de este conjunto de entrada, se implementó dentro del programa un procedimiento de entrenamiento y visualización de modelos de árbol, con el objetivo de identificar reglas explícitas y umbrales asociados al desempeño estructural de los muros.

Con el fin de analizar la relación entre los parámetros derivados del campo de esfuerzos y los criterios de validación estructural, se emplearon modelos de árbol por su capacidad de generar reglas interpretables. El conjunto de variables de entrada X se integró con los descriptores mecánicos obtenidos para las componentes σ_{11} , σ_{22} y τ_{12} , incluyendo valores máximos, mínimos y promedio, así como índices normalizados definidos como la razón entre extremos y promedio del campo tensional.

Como variables objetivo se consideraron dos tipos de respuesta:

1. **Respuesta continua**, asociada a los parámetros de demanda/capacidad para cada verificación. Para estos casos se entrenaron **árboles de regresión**, con el propósito de identificar particiones del espacio de variables mecánicas que expliquen cambios en el nivel de demanda/capacidad.
2. **Respuesta categórica**, asociada al estado global de **cumplimiento** del muro (Aprobado/Rechazado). Para este caso se entrenó un **árbol de clasificación**, orientado a identificar reglas explícitas de aceptación o rechazo a partir de los parámetros de esfuerzo procesados.

En todos los modelos se adoptaron parámetros de control de complejidad (profundidad máxima y tamaño mínimo de hoja) con el propósito de evitar un ajuste excesivo y, al mismo tiempo, mantener la interpretabilidad de las reglas generadas. La salida de cada modelo se representó mediante diagramas de árbol integrados en el entorno del programa, permitiendo visualizar los umbrales identificados y la distribución de muros dentro de cada partición.

Finalmente, los diagramas fueron procesados posteriormente para facilitar su lectura e interpretación dentro del marco de análisis estructural presentado en este capítulo. Estos

modelos se emplean con fines de interpretación y exploración de patrones, no como sustituto de la revisión normativa.

Una vez construidos los modelos de árbol a partir del conjunto de variables mecánicas derivadas del análisis estructural, el siguiente paso consiste en analizar e interpretar las reglas y particiones generadas por dichos modelos. A diferencia de un enfoque predictivo convencional, el objetivo principal de esta etapa no radica en la obtención de un modelo de estimación automatizada, sino en la identificación de patrones mecánicos que permitan comprender cómo la distribución de esfuerzos obtenida mediante el análisis por elementos finitos se relaciona con los criterios de validación estructural empleados en la revisión normativa.

Los diagramas de árbol generados constituyen representaciones jerárquicas del espacio de variables mecánicas, en las cuales cada nodo define un umbral asociado a parámetros derivados del estado tensional del muro. Estas particiones permiten observar de manera explícita qué combinaciones relativas de esfuerzos influyen con mayor relevancia en los resultados de aceptación o rechazo estructural.

El análisis de los diagramas de árbol obtenidos permite identificar tendencias consistentes en la relación entre las variables derivadas del campo de esfuerzos y el desempeño estructural de los muros evaluados. A diferencia de una interpretación basada únicamente en valores máximos absolutos, los modelos generados muestran que las variables con mayor capacidad de partición corresponden principalmente a índices normalizados de esfuerzo, definidos como la relación entre valores extremos y el promedio del campo tensional.

La recurrencia de variables como s_{22_in1} y s_{22_in2} en los niveles superiores de los árboles indica que el comportamiento estructural de los muros se encuentra más influenciado por la distribución relativa de esfuerzos que por su magnitud absoluta. Este resultado sugiere que la presencia de concentraciones locales de esfuerzo respecto al comportamiento promedio del elemento constituye un indicador más representativo del desempeño estructural que los valores máximos aislados.



Figura 19: Diagramas de árbol de regresión y decisión generado a partir de variables derivadas del campo de esfuerzos en elementos tipo membrana y en su estado de cumplimiento normativo. Cada nodo representa una condición de partición basada en parámetros mecánicos del muro, mostrando la distribución de resultados estructurales dentro de cada subconjunto analizado. Fuente: Autoría propia (2025)

Desde el punto de vista mecánico, la predominancia de las componentes asociadas a la dirección local 2 del elemento refleja la influencia de cargas axiales y por flexocompresión en el comportamiento global de los muros de mampostería confinada. Este hallazgo resulta consistente con el comportamiento esperado de este tipo de sistemas estructurales, en los cuales la interacción entre carga axial y flexión controla gran parte de los mecanismos de falla observados.

Por otra parte, las variables asociadas al esfuerzo cortante aparecen principalmente en niveles intermedios o profundos de los árboles, lo que sugiere que su influencia se manifiesta como un mecanismo complementario condicionado por el estado previo de esfuerzos normales. En consecuencia, el cortante actúa como un factor de amplificación del daño estructural más que como el parámetro dominante en la clasificación inicial del desempeño.

Asimismo, se observa que las principales particiones del conjunto de datos ocurren en los primeros niveles jerárquicos del árbol, indicando que el comportamiento estructural puede explicarse mediante un número reducido de umbrales mecánicos relevantes. Este resultado

refuerza la utilidad de los árboles de decisión como herramientas de interpretación, al permitir sintetizar grandes volúmenes de resultados numéricos en reglas explícitas comprensibles desde una perspectiva ingenieril.

Los diagramas obtenidos evidencian que el procesamiento de resultados del análisis por elementos finitos mediante variables normalizadas permite identificar patrones mecánicos coherentes con el comportamiento estructural esperado, proporcionando un medio adicional para explorar la relación entre la distribución espacial de esfuerzos y los criterios de validación normativa aplicados a los muros analizados.

El análisis comparativo de los árboles generados para los distintos modos de verificación indica que las variables con mayor capacidad discriminante corresponden a índices normalizados derivados de los esfuerzos normales y cortantes. La recurrencia de estos parámetros en los nodos principales sugiere que el desempeño estructural de los muros está más relacionado con la distribución relativa de esfuerzos dentro del elemento que con la magnitud absoluta de los valores extremos.

Este resultado evidencia que la heterogeneidad del campo tensional constituye un factor determinante en la evaluación estructural, indicando que patrones espaciales de concentración de esfuerzos influyen significativamente en la aceptación o rechazo normativo de los muros analizados.

CONCLUSIONES

Los productos finales de esta investigación no buscan ser definitivos, se consideran como parte de un primer acercamiento en el camino de la integración del ML en el diseño estructural. Los resultados obtenidos muestran que la herramienta desarrollada es capaz de organizar, procesar y presentar información estructural de manera sistemática, facilitando la identificación de deficiencias en la estructuración inicial y permitiendo al usuario evaluar diferentes alternativas de diseño de forma más eficiente.

Asimismo, se observó una reducción significativa en el tiempo requerido para el análisis iterativo de modelos estructurales, lo que representa una ventaja operativa importante para el ejercicio profesional, particularmente en proyectos de vivienda donde los tiempos de entrega son un factor crítico. Otra limitación relacionada al punto anterior es que, según lo establecido en el marco teórico, modelos de ML avanzados como el ANN requieren de una enorme cantidad de información para generar resultados predictivos más acertados.

En este sentido, se reconoce que el desempeño predictivo de la herramienta podrá incrementarse conforme se incremente la base de datos de entrenamiento, lo cual abre la posibilidad de mejoras sustanciales en investigaciones futuras mediante la incorporación de casos reales de diseño y bases de datos estructurales más robustas.

Finalmente, se concluye que la herramienta propuesta no sustituye el criterio del ingeniero estructurista, sino que lo complementa, fortaleciendo el proceso de toma de decisiones y promoviendo un diseño estructural más eficiente, seguro y técnicamente fundamentado. Se recomienda como trabajo futuro la ampliación de la herramienta para otros sistemas estructurales, así como la integración de módulos adicionales que permitan evaluar aspectos económicos, constructivos y de sostenibilidad.

ANEXO A: Elaboración de modelo para pruebas de desarrollo.

El diseño estructural suele partir de proyectos arquitectónicos ya elaborados por lo que es ventajoso hacer conciencia del buen o mal comportamiento que se obtendrá dependiendo de ciertas configuraciones geométricas. Esto permitiría al encargado del análisis proponer modificaciones que mejoren el buen desempeño estructural sin restar funcionalidad y estética al proyecto. (de Mampostería, 2008).

El proyecto estructural se desarrolló empleando un sistema de muros de carga de mampostería confinada, construido a base de piezas de block macizo, las cuales proporcionan la rigidez lateral necesaria para atender la demanda sísmica correspondiente al sitio. Los elementos de confinamiento garantizan la integridad del conjunto, permitiendo que los muros trabajen adecuadamente bajo la acción combinada de cargas gravitacionales y cargas laterales. El sistema horizontal está conformado por losas macizas de concreto reforzado, diseñadas para funcionar como diafragmas rígidos, capaces de transmitir las fuerzas sísmicas hacia los elementos verticales resistentes. Para la evaluación del comportamiento estructural y con fines de verificación y desarrollo, se generó un modelo tridimensional de la edificación, cuyas geometrías, zonas de rigidez y disposición de muros pueden apreciarse en las figuras presentadas a continuación.

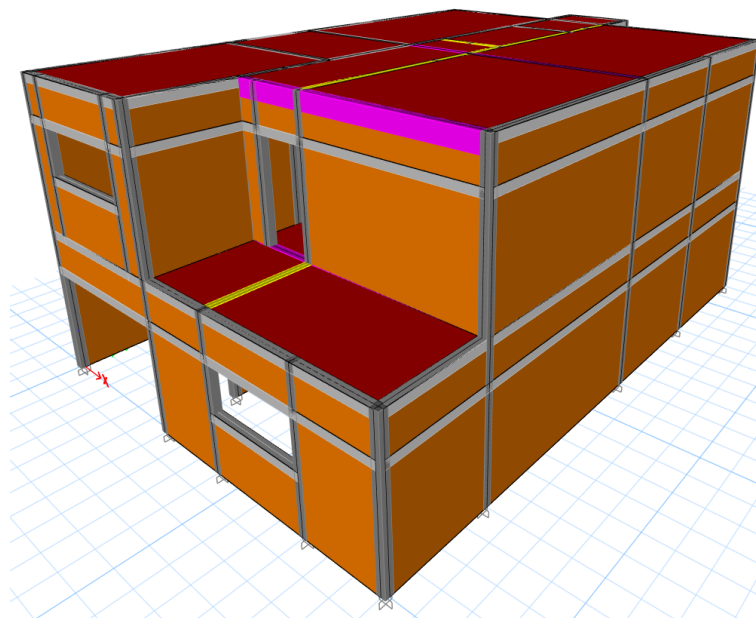


Figura 20: Vista isométrica de modelo analítico del proyecto. Fuente: Autoría Propia (2025).

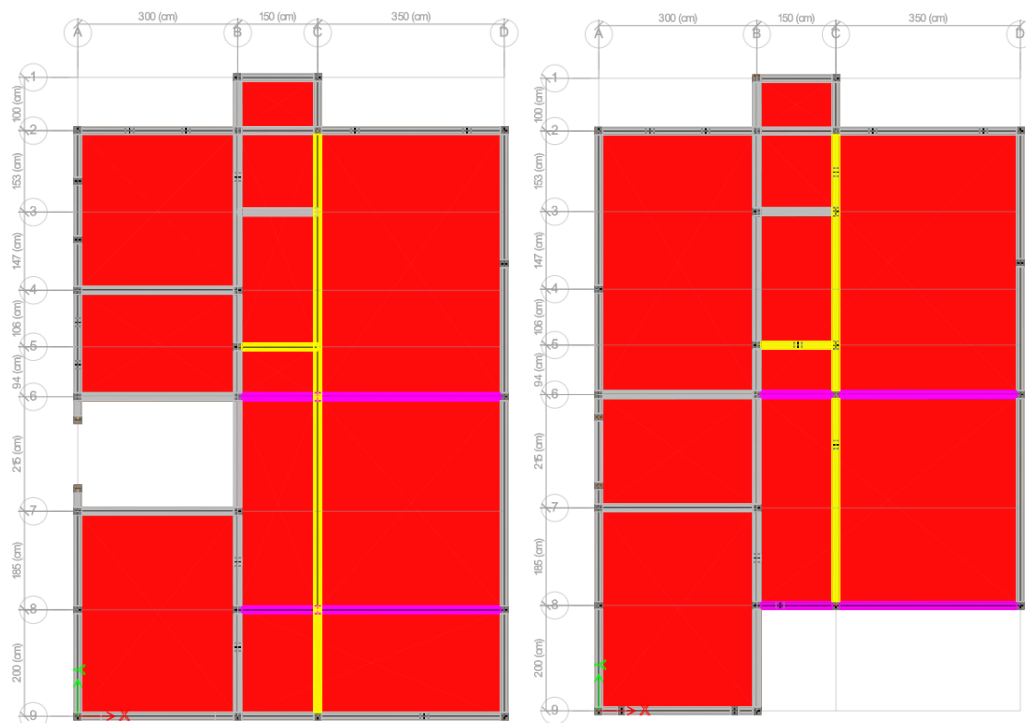


Figura 21: Vista en planta de las losas de entrepiso y azotea del proyecto. Fuente: Autoría propia (2025)

El análisis y diseño de los elementos estructurales del proyecto elaborado se realizó conforme a los criterios y disposiciones establecidos en las NTCM edición 2023, que regulan las propiedades mecánicas, los requisitos geométricos y los criterios de diseño para elementos contruidos con mampostería confinada. Del mismo modo, el análisis sísmico se desarrolla siguiendo los lineamientos del Manual de Diseño por Sismo de la Comisión Federal de Electricidad, edición 2015 (CFE-2015), el cual define el modelo de peligro sísmico, los espectros de diseño, los coeficientes de reducción por ductilidad y los criterios para la evaluación de demandas y deformaciones en estructuras sujetas a cargas laterales.

Con fundamento en la Sección 3.4 de las Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones (NTC-Criterios y Acciones), las combinaciones de carga empleadas en el presente proyecto consideran los coeficientes de mayoración aplicables a estructuras clasificadas dentro del Grupo B, para las cuales se establece un factor de 1.3 para cargas permanentes (CM) y de 1.5 para cargas

vivas (CV_{max}). Estas combinaciones permiten evaluar el efecto simultáneo de las acciones gravitacionales y laterales bajo condiciones de diseño último, garantizando que la estructura de mampostería confinada cuente con la resistencia suficiente para resistir las solicitaciones inducidas por cargas muertas, sobrecargas de uso y excitación sísmica. A continuación, se presentan las combinaciones de carga mayoradas que se utilizarán en el análisis estructural y en el dimensionamiento de los elementos.

Estado límite de falla	Combinación gravitacional	$1.3CM + 1.5CV_{max}$
	Combinaciones de fuerzas sísmicas	$1.10CM + 1.10CV_{inst} \pm 1.10S_x \pm 0.33S_y$ $1.10CM + 1.10CV_{inst} \pm 0.33S_x \pm 1.10S_y$
Estado límite de servicio	Combinación gravitacional	$1.0CM + 1.0CV_{med}$
	Combinaciones de fuerzas sísmicas	$0.90CM + 0.90CV_{med} \pm 1.10S_x \pm 0.33S_y$ $0.90CM + 0.90CV_{med} \pm 0.33S_x \pm 1.10S_y$

Para la obtención de los parámetros de construcción del espectro sísmico se empleó el Programa de Diseño Sísmico (PRODISIS) versión 4.1, herramienta oficial basada en el Manual de Diseño por Sismo de la CFE. Mediante la introducción de las coordenadas geográficas del sitio del proyecto (latitud 18.398° N y longitud 97.3499° O), el programa genera automáticamente el conjunto de parámetros que caracterizan la peligrosidad sísmica local. PRODISIS determina estos valores a partir de la zonificación sísmica nacional, considerando la cercanía a fuentes sismogénicas, las condiciones de sitio y la clasificación del tipo de suelo, proporcionando así un espectro compatible con los requisitos del análisis dinámico definidos por la CFE. Estos parámetros sirven como base para la construcción del espectro de diseño y para el cálculo de las fuerzas sísmicas que se aplicarán a la estructura de mampostería confinada. Los parámetros que conforman el espectro de diseño sísmico son los siguientes

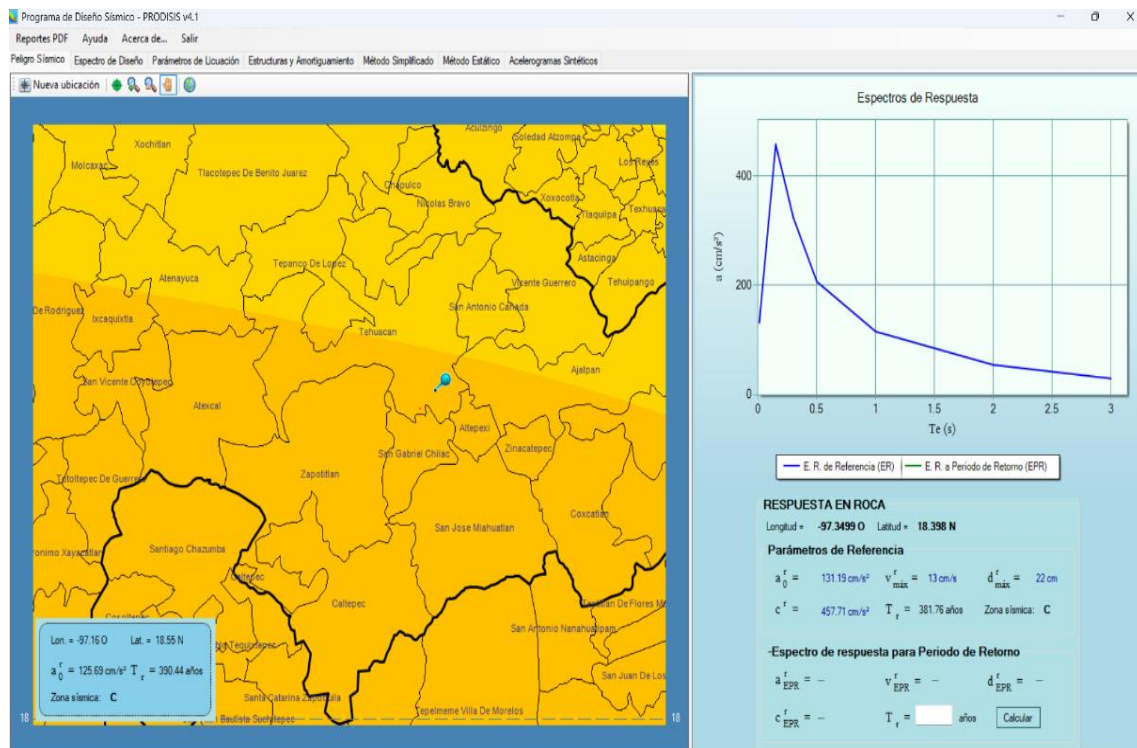


Figura 22: Zonificación sísmica acorde al MDOC para diseño por sismo de CFE mediante el uso de PRODISIS. Fuente: Autoría propia (2025).

Los materiales empleados en la estructura cumplen con las características mecánicas y requisitos de calidad establecidos por las NTC y las normas mexicanas aplicables. A continuación, se describen los parámetros adoptados para cada material considerado en el diseño:

Concreto estructural

- El concreto para elementos principales tales como vigas, columnas, traveses y losas fueron especificado con una resistencia a compresión de $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$, un módulo de elasticidad $E = 173,925 \text{ kg/cm}^2$, tamaño máximo de agregado (T.M.A.) de 19 mm, y un revenimiento mínimo de 14 cm.
- El concreto para elementos de confinamiento (castillos y dalas) cumple con una resistencia mínima de $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$, módulo de elasticidad $E = 113,137 \text{ kg/cm}^2$, tamaño máximo de agregado 19 mm, y revenimiento mínimo de 14 cm.

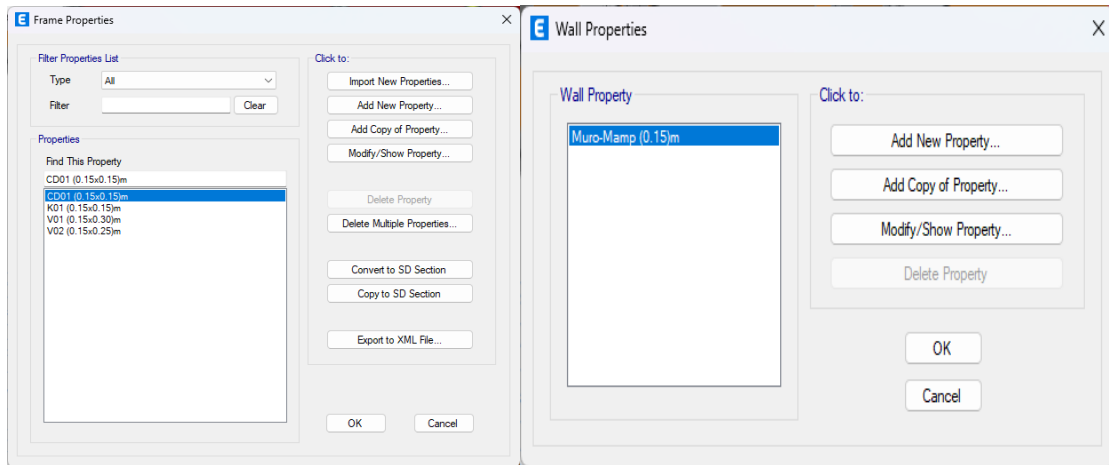
Acero de refuerzo

- El acero corrugado #3 y mayores utilizado como refuerzo longitudinal y transversal se especifica con una resistencia mínima a fluencia de $f_y = 4,200 \text{ kg/cm}^2$, cumpliendo con la norma NMX-C-407.

Mampostería

- La mampostería empleada en la estructura se conforma por block macizo de la región, con dimensiones nominales de $15 \times 20 \times 40 \text{ cm}$, cumpliendo como mínimo con los valores establecidos en las NTCM-2023. Dichas unidades presentan una resistencia prismática $f'_m = 15 \text{ kg/cm}^2$, una resistencia a cortante $v'_m = 2 \text{ kg/cm}^2$, un peso volumétrico $\gamma = 1,700 \text{ kg/m}^3$, así como un módulo de elasticidad $E = 12,000 \text{ kg/cm}^2$ y un módulo de cortante $G = 2,400 \text{ kg/cm}^2$.

La estructuración del sistema resistente se modeló mediante el software ETABS, reproduciendo la geometría arquitectónica, la distribución de muros portantes y la configuración de los diafragmas rígidos definidos para cada nivel. Los muros de mampostería confinada fueron representados mediante elementos tipo “shell”, asignándoles las propiedades mecánicas y espesores correspondientes, mientras que los castillos y dadas se modelaron como elementos tipo “frame” para asegurar la adecuada interacción entre los componentes de confinamiento y los paneles de mampostería. Las losas macizas se definieron como diafragmas rígidos para transmitir las fuerzas laterales hacia los muros de carga, de acuerdo con su rigidez y continuidad. El modelo permite evaluar el comportamiento global del edificio, las distribuciones de cortante y flexión en los muros, así como los desplazamientos y derivas de entrepiso requeridos para el cumplimiento normativo.



*Figura 23: Ventanas de configuración de propiedades geométricas para secciones en modelo dentro del programa ETABS.
Fuente: Autoría propia (2025)*

Para la adecuada identificación, agrupación y evaluación de los muros de mampostería confinada dentro del modelo estructural, se empleó el sistema de “Pier Labels” de ETABS, el cual permite definir cada muro como un elemento resistente vertical continuo. La asignación de etiquetas se realizó siguiendo criterios geométricos y estructurales: cada pier representa un muro completo por nivel, delimitado entre ejes estructurales y considerando únicamente las secciones efectivamente participantes en la transmisión de cargas laterales. Se establecieron etiquetas únicas y consistentes para todos los niveles, manteniendo la misma nomenclatura para muros alineados verticalmente con el fin de garantizar continuidad en la interpretación de esfuerzos. Además, se diferenciaron muros por dirección resistente (X o Y) y por su condición de confinamiento o presencia de aberturas, permitiendo una evaluación precisa de cortantes, momentos, fuerzas axiales y derivas asociadas a cada panel. Este criterio garantiza que ETABS calcule las demandas internas de manera coherente con el comportamiento real esperado de los muros de carga en la estructura.

ANEXO B: Descripción de la interfaz gráfica para herramienta de optimización.

Este apartado aborda el funcionamiento del programa mediante la interfaz gráfica planteada para facilitar su uso. Describiremos aquí el paso a paso de la navegación mediante ventanas destinadas a puntos en concreto, tal como se muestra en el diagrama de árbol de la sección IV.1 así como de las acciones posibles a realizar dentro del entorno para verificar o solventar el cumplimiento normativo de los elementos estructurales de sistema.

Al momento de ejecutar el programa, el usuario es recibido por la página de inicio que muestra el nombre del programa y botones para comenzar a interactuar de inmediato, ya sea para que usuarios familiarizados con el programa comiencen a trabajar a dar clic en el botón de “Siguiente” resaltado en color azul en la figura 24, o para que nuevos usuarios consulten un breve manual de instrucciones al dar clic en el botón de “Indicaciones” resaltado en color verde también en la figura 24.

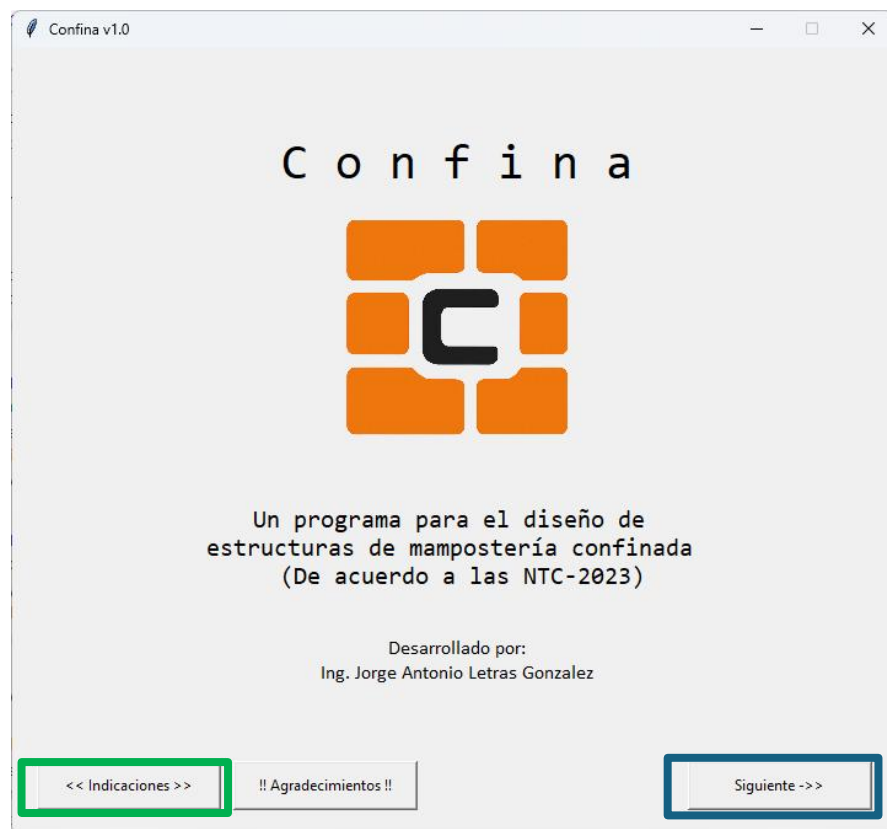


Figura 24: Ventana de bienvenida al programa, donde se destacan los botones de navegación y de indicaciones de uso.
Fuente: Autoría propia (2025)

Si el usuario no necesita ayuda para manejar el programa el siguiente paso consiste en una nueva página llamada “Conexión API a ETABS”, recordando nuevamente que en esta primera versión del programa solo se permite manejar modelos estructurales de este software en particular. Esta página, así como las subsecuentes, se divide en cuadros con nombres individuales donde se puede concentrar información ordenada para su rápida visualización, así como botones y listas desplegables que permiten interactuar con el programa. En la primera página el usuario debe comenzar siempre desde el botón de “Buscar Archivo”, resaltado en color morado en la figura 25, al momento de hacer clic sobre él se abre un cuadro de dialogo cuya función es facilitar la búsqueda de un archivo “.edb” correspondiente a la extensión de archivos para modelos de ETABS, retomando nuevamente las pautas y alcances del programa, es necesario que el modelo del cual se va a extraer información haya sido ya analizado dentro del programa y que dicho análisis quede guardado en la memoria del archivo; si estos requisitos son cumplidos el programa el usuario puede ahora hacer clic en el botón “Cargar información”, que se resalta ahora en color verde en la figura 25, y a continuación se abre una nueva ventana del programa ETABS donde a su vez abrirá el archivo elegido para extraer la información necesaria para trabajar en el programa y posteriormente dar cierre a la misma ventana de ETABS que ha abierto.

Al finalizar la secuencia de carga de información anterior el programa muestra un despliegue de la información relevante extraída en el apartado de “Datos de interés del modelo”, que para este caso consiste en todos los elementos tipo membrana contenidos en el programa a los que se les haya asignado materiales de tipo mampostería, indicando también las etiquetas de sección asignadas a cada elemento membrana, así como las dimensiones de estas membranas en el elemento, finalmente se muestra en la misma tabla cuales de los elementos membrana que hayan pasado los filtros anteriores contienen una etiqueta de “Pier Label”, de la que se pueden extraer sus elementos mecánicos para ser procesados en el programa.

La última parte de esta página, llamada “Combinaciones de carga disponibles”, es el apartado destinado para que los usuarios permitan seleccionar de forma manual cuales de las combinaciones asignadas en el modelo requieren ser analizadas, esta necesidad surge

porque en la práctica profesional algunos diseñadores tienen una plantilla de combinaciones de carga adaptada a sus necesidades y experiencias, de la cuales no todas requieren ser empleadas al momento de realizar diseños con sistemas de mampostería confinada. El manejo de este apartado consiste en el despliegue de las combinaciones de carga disponibles del modelo y en 3 botones resaltados en color rojo en la figura 25, que permiten seleccionar bajo que combinaciones se requiere trabajar, se hace una nota breve acerca de que al menos se requiere una combinación de carga seleccionada para poder continuar. Al cumplirse todos los requisitos listados de este apartado se permite avanzar a la siguiente página,

Confinar v1.0

Cargar modelo de ETABS

Buscar Archivo C:/Users/jorge/OneDrive/Escritorio/Nueva carpeta (4)/Modelado_0.EDB

Cargar información

Datos de interés del modelo

Muros con mampostería del modelo: 148 Piers en secciones de mampostería: 26

#	Material	Sección	B (m)	H (m)	Cx (m)	Cy (m)	Cz (m)	Pier
2	fm 20 kg/cm2	Muro-Mamp (0.1	3.0	0.7	0.0	9.5	5.25	
3	fm 20 kg/cm2	Muro-Mamp (0.1	2.0	0.7	0.0	7.0	5.25	
4	fm 20 kg/cm2	Muro-Mamp (0.1	0.43	0.7	0.0	5.78	5.25	
5	fm 20 kg/cm2	Muro-Mamp (0.1	0.42	0.7	0.0	4.06	5.25	
6	fm 20 kg/cm2	Muro-Mamp (0.1	1.85	0.7	0.0	2.92	5.25	
7	fm 20 kg/cm2	Muro-Mamp (0.1	2.0	0.7	0.0	1.0	5.25	
8	fm 20 kg/cm2	Muro-Mamp (0.1	2.0	2.1	0.0	1.0	3.85	
9	fm 20 kg/cm2	Muro-Mamp (0.1	1.85	2.1	0.0	2.92	3.85	

Combinaciones de carga disponibles

ELS_DIN_100SX+30SY
ELF_GRAVITACIONAL
ELS_GRAVITACIONAL
ELS_DIN_100SX-30SY
ELS_DIN_-100SX+30SY
ELS_DIN_-100SX-30SY
ELS_DIN_30SX+100SY
ELS_DIN_30SX-100SY
ELS_DIN_-30SX+100SY

Elegir Combinación ->>
<<- Retirar Combinación
Restablecer Lista

Conexión API a ETABS

Siguiente ->>

Figura 25: Ventana de carga de modelo y filtración de combinaciones de carga para realizar revisiones normativas.
Fuente: Autoría Propia (2025)

El siguiente paso ahora consiste en definir propiedades generales para todos los muros en revisión, esto se realiza desde la página “Propiedades base de muros” mostrada en la figura 26, dicha página dividida ahora en 2 secciones, permite al usuario definir

propiedades base con las cuales permitir al programa realizar las revisiones correspondientes por normativa de cada uno de los muros en los pasos subsecuentes. En la primera sección “Propiedades de la mampostería y del concreto”, es donde se definen las propiedades mecánicas de las piezas, del concreto y del acero de refuerzo para castillos que se deseen emplear en una primera iteración y se puede ingresar la información mínima requerida de los materiales que hace posible la revisión normativa de los muros de carga; es aquí donde los usuarios pueden ingresar de forma manual los valores de estas propiedades en caso de conocerlas o se permite desde una lista desplegable, indicada en color rojo en la figura 26, colocar información predeterminada para diferentes tipos de piezas conocidas, como block de concreto o ladrillo rojo, esta información se basa en las recomendaciones de la sec. 2 “Materiales para mampostería” de las NTCM-2023. En cuanto a la información requerida para el concreto y el acero de refuerzo de los castillos se destina un espacio para ingresar las resistencias a compresión y fluencia requeridas para revisiones normativas e indicar el tipo de concreto empleado en castillos a fin de estimar su módulo de elasticidad de acuerdo a la sección 2 “Materiales” en las Norma Técnica Complementaria Para Diseño Y Construcción De Estructuras De Concreto del año 2023 (NTCC-2023).

La segunda parte de esta página “Esquema de propuesta inicial de muros” da la posibilidad a los usuarios de definir tanto la geometría de los castillos confinantes de cada muro, así como definir su espesor, al momento de hacer un cambio en la geometría del muro, la vista en planta esquemática se actualizará a fin de dar una visión de cómo es que luce proporcionalmente esta geometría. Sin embargo, el punto más importante del apartado es proporcionar un área de acero para los castillos, requisito indispensable para realizar las revisiones correspondientes a carga axial y flexocompresión de los muros de carga de la estructura; se dispone de un cuadro especial, resaltado en color verde en la figura 26, que sirve como revisión del acero mínimo que debe ser proporcionado de acuerdo a las especificaciones normativas NTCM-2023 en la sección 6.2 “Requisitos de castillos y dalas”, en caso de no proporcionarse este acero mínimo se marcará error y el programa solicitará al usuario la corrección de este dato. Al terminar de llenar la información solicitada el usuario podrá continuar al siguiente paso al momento de dar clic en el botón “Siguiente”, resaltado en color azul en la figura 26.

Confin v1.0

Propiedades de la mampostería y del concreto

Piezas de mampostería: Datos de usuario

Factor de área neta:

Dimensiones de piezas:

Espesor de juntas: cm

Clase del concreto:

Tipo de agregado:

Resistencia a comp de piezas: f_p kg/cm²

Resistencia a comp de diseño: f_m kg/cm²

Resistencia a comp diagonal: v_m kg/cm²

Res del concreto en castillos: f_c kg/cm²

Modulo elasticidad del concreto: E_c kg/cm²

Fluencia del acero en castillos: f_y kg/cm²

Modulo elasticidad del acero: E_s kg/cm²

Esquema de propuesta inicial de muro

Dimensiones del castillo izquierdo		Espesor de la mampostería (t): 15 cm	Dimensiones del castillo derecho	
Ancho del castillo	15 cm		Ancho del castillo	15 cm
Espesor del castillo	15 cm		Espesor del castillo	15 cm
Acero del castillo	3.81 cm ²	Long de apoyo (b): 15 cm	Acero del castillo	3.81 cm ²
(Acero minimo)	2.68 cm ²		(Acero minimo)	2.68 cm ²

Diagrama de muro:

hc1 = 15.0 cm, As1 = 3.81 cm², t = 15.0 cm, As2 = 3.81 cm², hc2 = 15.0 cm, bc1 = 15.0 cm, bc2 = 15.0 cm

Propiedades base de muros

<< - Atrás

Siguiete ->

Figura 26: Ventana para ingreso de las propiedades mecánicas y geométricas de los muros de mampostería confinada para primera iteración de resultados. Fuente: Autoría propia (2025)

El próximo paso en el programa es donde se comienzan las revisiones normativas de los muros de carga partiendo de las propiedades mecánicas y geométricas definidas del paso anterior. La página “Revisión y diseño a compresión” está destinada para realizar las revisiones solicitadas ante el fenómeno de compresión axial de acuerdo a lo establecido en las NTCM-2023 sección 6.4.1 “Resistencia a compresión de muros confinados”. El procedimiento de revisión consiste en verificar las demandas individuales de cada combinación de carga elegida desde la página de “Conexión API a ETABS”, dichas combinaciones se enlistan dentro del cuadro “Resumen de eficiencia a carga axial en muros”, en una tabla dinámica que contiene 3 columnas: “Combinación”, “PU (Ton)”, y “D/C”. El cumplimiento normativo para la revisión de carga axial se verifica al revisar la columna “D/C” y determinar que en ninguna combinación de carga el valor sea superior a 1, es decir, más del 100% de la capacidad del muro; a manera de auxilio visual para los

usuarios, si para una de las combinaciones de carga listadas en la tabla se alcanza un valor superior al 100% de la capacidad, el renglón correspondiente se resaltara en color rojo.

La revisión normativa en esta página de los muros se puede seguir mediante dos caminos: revisar uno por uno los muros mediante una lista desplegable ubicada en el cuadro “Propiedades geométricas del muro en revisión”, resaltada en color morado en la figura 9, donde se enlistan todos los muros de carga etiquetados con un “Pier Label”, identificados desde la página de “Conexión API a ETABS”, o mediante los botones de “Visualizar todos los muros” y “Exportar tabla a hojas de cálculo”, resaltados en color verde en la figura 27, para revisar todos los muros y respectivas demandas por combinación de carga al mismo tiempo desde una segunda tabla dinámica expandida. La razón de este diseño de interfaz es que de acuerdo a las necesidades de revisión de cada usuario se permita la exploración individual de las propiedades derivadas de cada muro, como el factor de relación de aspecto f o el factor de altura efectiva k y además permitir modificar las propiedades geométricas y mecánicas de cada muro en caso de que la propuesta general inicial no sea suficiente para cubrir la demanda de capacidad, esto último es posible al hacer clic en el botón “Reconfigurar propiedades del muro en revisión”, resaltado en color rojo en la figura 27, el segundo camino, que consiste en abrir una tabla dinámica expandida que contenga la revisión de todos los muros, es más útil para revisiones de proyectos existentes o para realizar una inspección rápida de los resultados identificando cuales muros y ante que combinaciones respectivas es más vulnerable la estructura.

Independientemente de si todos los muros han cumplido la revisión normativa para cargas de compresión o no, se permite al usuario avanzar al siguiente punto de la revisión, nuevamente haciendo clic en el botón siguiente, resaltado en azul en la figura 27. Como nota adicional, es necesario informar que las próximas revisiones normativas correspondientes a la revisión a flexocompresión y carga lateral, funcionan bajo el mismo procedimiento, donde se permite la revisión individual de los elementos o una exploración rápida de todos estos mediante tablas dinámicas y verificando que la demanda no rebase el 100% de la capacidad, con diferencias evidentes que se exponen en los próximos párrafos.

Confinia v1.0

Propiedades geométricas del muro en revisión

Pier de muro en revisión: X1

Altura de muro en revisión: 2.1 m.

Factor relacion de aspecto (f): 0.2719

Factor altura efectiva (k): 0.6

Factor de reducción (FE): 0.9

As1 = 3.81 cm² 15.0 cm As2 = 3.81 cm²

15.0 cm 15.0 cm

L = 0.97 m

d = 0.90 m

d' = 0.82 m

Acero colocado en muro: 7.62 cm².

Area de los castillos del muro: 450.0 cm².

Carga axial resistida por la mampostería:

PR_{Mamp} 29.0677 Tonf

Reconfigurar propiedades del muro en revisión

Resumen de eficiencia a carga axial en muros

Combinación	PU (Ton)	D/C
ELS_DIN_100SX-30S	3.6694	0.1262
ELS_DIN_-100SX+30	3.6694	0.1262
ELS_DIN_-100SX-30	3.6694	0.1262
ELS_DIN_30SX+100	3.8108	0.1311

Visualizar todos los muros

Exportar tabla a hojas de calculo

Revisión y diseño a compresión

<< -> Atrás Siguiente ->>

Figura 27: Ventana para abordar la revisión normativa ante carga axial de los muros. Fuente: Autoria Propia (2025)

La segunda revisión normativa de los muros estructurales de acuerdo al diagrama de flujo del capítulo IV.1 consiste en la revisión a flexocompresión según lo establecido en las NTCM-2023 sec. 6.4.2.2. “Resistencia a flexocompresión en el plano del muro”. Si bien en la práctica no es una revisión difícil de solucionar, es esquemáticamente la más compleja de las revisiones de diseño requeridas, debido a que se requiere de un diagrama de interacción para cada muro, sin embargo, el programa tiene la capacidad de generar estos diagramas de forma instantánea.

En el cuadro “Diagrama de interacción para diseño a flexocompresión”, se realiza el trazo del grafico representativo de la capacidad de cada muro ante acciones combinadas de flexión y carga axial. El procedimiento habitual para esta revisión consiste en verificar que, de acuerdo a las demandas de cada combinación para las que toca una carga axial y momento flexionante en el plano, se grafiquen a modo de coordenada sobre el diagrama de interacción, la solicitud de capacidad sobre los elementos se ve satisfecha, si se

consigue que los puntos coordinados de las combinaciones de carga se ubiquen dentro de los límites del diagrama. Para ilustrar la verificación a los usuarios ante esta demanda, se muestra en el espacio designado en la ventana el diagrama de interacción acorde a las propiedades particulares del muro elegido desde la lista desplegable en el cuadro “Propiedades geométricas del muro en revisión”, resaltado en color morado en la figura 28, a su vez en la lista desplegable de combinaciones, resaltada en color verde de la misma figura, se permite acentuar en un color distinto el punto coordinado que corresponde a la combinación elegida para analizar.

En esta revisión, la demanda-capacidad es determinada mediante la relación entre la distancia medida del origen del diagrama en el punto (0,0) hasta la ubicación de las coordenadas de combinación de carga, entre la distancia medida nuevamente desde el origen hasta el límite proyectado en el diagrama de interacción, pasando por las coordenadas de la combinación de carga correspondiente, lo anterior es ejemplificado adecuadamente en la figura 28. Retomando las indicaciones descritas para la revisión anterior y aun si no se logra el cumplimiento de la revisión ante este fenómeno de carga, podemos continuar al siguiente paso mediante un clic en el botón siguiente, de nuevo resaltado en azul en la figura 28.

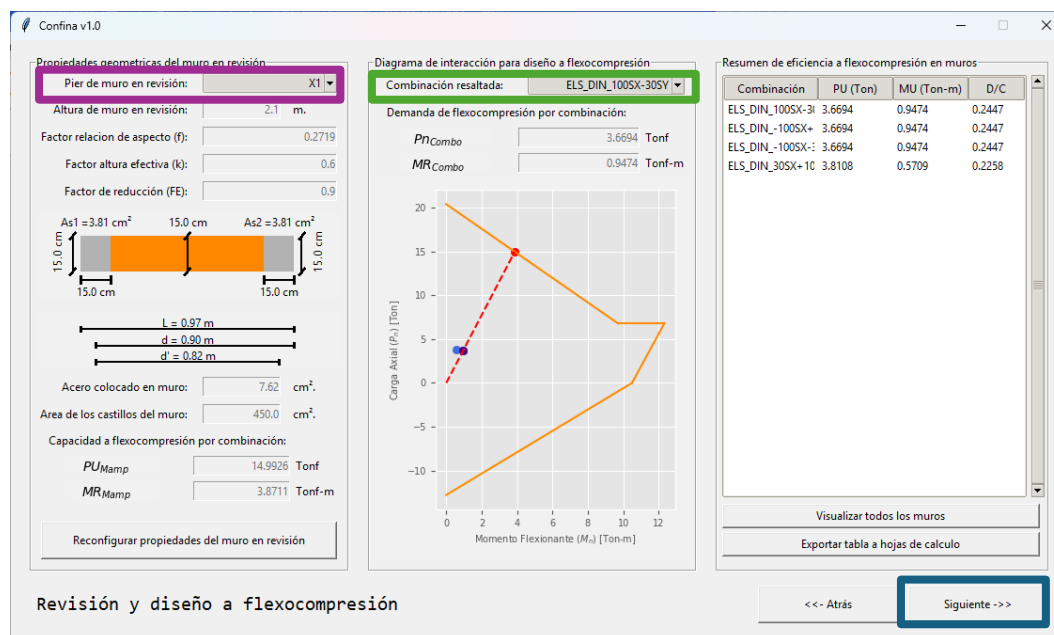


Figura 28: Ventana para abordar la revisión normativa ante el fenómeno de flexocompresión de los muros. Fuente: Autoría Propia (2025).

La última revisión requerida para los muros de mampostería confinada, de acuerdo con las NTCM-2023 y siguiendo el diagrama de flujo del programa, consiste en la revisión ante cortante lateral, descrito en la sec. 6.5. “Resistencia a cargas laterales” de la normativa. Es en la práctica, la revisión más problemática en el diseño de muros de mampostería, tanto confinada como reforzada interiormente, razón por la cual en el programa se sugiere como la última en ser solucionada. En esta página titulada “Revisión y diseño a cargas laterales” se permite al usuario una revisión similar a las anteriores, pero la parte más importante en esta consiste en que se permite colocar refuerzo adicional en aquellos muros donde sea requerido, actualizando en tiempo real si el refuerzo colocado es suficiente para cumplir con esta revisión normativa. Así también se ofrece información adicional paramétrica sobre el aparejo del muro, conociendo mediante un gráfico esquemático el número de hiladas de acuerdo a las dimensiones de las piezas, que pueden ser ingresadas en tiempo real o ser capturadas desde la base de datos interna del programa para piezas de mampostería.

El refuerzo con acero para resistir cargas laterales, según las NTCM-2023 puede ser proporcionado mediante la colocación de malla electrosoldada en las caras de un muro estructural, o mediante la colocación de varilla como refuerzo entre las hiladas de las piezas de mampostería. El procedimiento para añadir el aporte del refuerzo en los cálculos consiste en seleccionar desde el área indicada en color rojo en la figura 29 una de las opciones disponibles, colocando como opción por defecto que no sea añadido refuerzo adicional, si en concordancia con el resumen de eficiencia no se cumplen las demandas de carga impuestas, el usuario entonces puede incluir la aportación del acero de refuerzo eligiendo ya sea entre colocar malla electrosoldada o varillas dentro de las juntas de hiladas; las especificaciones geométricas y mecánicas de dicho refuerzo pueden ser cambiadas en el apartado marcado con color morado en la figura 29, cambiando entre sus respectivas pestañas, como parte de la ayuda que el programa provee al usuario, estas propiedades no pueden ser cambiadas fuera de los rangos establecidos en las NTCM, como por ejemplo la separación entre varillas de refuerzo. Repitiendo por última vez las indicaciones de las revisiones previas al terminar en esta página podemos dar clic en Siguiente, resaltado en color azul en la figura 29.

Confin v1.0

Selección de muro

Pier de muro en revisión:

Factor relación de aspecto (f):

Factor de altura efectiva (k):

Factor de reducción (FE):

[Cambiar Propiedades de Muro](#)

Configuración de los elementos de reforzamiento

Malla electrosoldada **Reforzo horizontal**

Hiladas en el muro:

Diametro de las varillas de refuerzo colocadas:

Hiladas de separación entre varillas de refuerzo:

Esfuerzo de fluencia especificado de varillas: f_{yh}

Colocación de refuerzo adicional por cortante

☒ Sin refuerzo adicional por cortante

☐ Colocar malla electrosoldada en caras

☐ Colocar varillas de refuerzo entre hiladas

Descripción de la construcción del muro

Altura de piezas:

Ancho de piezas:

Espesor de piezas:

Factor de área neta:

Espesor de juntas:

Hiladas en el muro:

H = 210 cm

L = 97 cm

As1 = 3.81 cm²

As2 = 3.81 cm²

Resumen de eficiencia a cortante en el muro

Carga axial mínima del muro:

$P_{U_{Min}}$

Cortante resistido por mampostería y refuerzo:

VR_{Mamp}

$\rho_h f_{yh}$

$\rho_{he} f_{yh}$

VR_{Ref}

Combinación	VU (Ton)	D/C
ELS_DIN_100SX-30	7.1721	14.7435
ELS_DIN_100SX+3	7.1721	14.7435
ELS_DIN_100SX-3l	7.1721	14.7435
ELS_DIN_30SX+10l	4.1273	8.4844

[Visualizar todos los muros](#)

[Exportar tabla a hojas de calculo](#)

Figura 29: Ventana para abordar la revisión normativa ante cargas laterales en los muros. Fuente: Autoría Propia (2025).

Al finalizar las revisiones normativas correspondientes para los muros estructurales, la última pantalla del programa concentra un resumen general de cómo se compone la geometría de estos de acuerdo a la configuración general proporcionada en la página “Propiedades base de muros”, considerando además los cambios individuales que hayamos realizado para muro en particular si la revisión correspondiente lo requería. En este apartado se desglosan además los porcentajes de demanda de acuerdo a las combinaciones listadas y elegidas previamente para revisión, resaltando en color rojo aquellas revisiones que no cumplan los requisitos de aprobación. De acuerdo al flujo de trabajo descrito en el capítulo 3, llegar a este punto no requiere que todos los muros cumplan con los filtros de capacidad admisible, ya sea porque el cambio en la geometría base para muros no sea admisible de forma individual por requisitos de construcción o porque sea más adecuado sustituir dicho muro de mampostería por uno de material distinto, que podrían ser algunos problemas particulares que requieren iteración sobre el diseño propuesto inicial. En esta página del programa contamos con 4 botones, resaltados en color rojo en la figura 30, para realizar las siguientes acciones: el primer botón “Exportar resultados”, permite exportar el conjunto de datos mostrado en la tabla a un archivo externo para su uso en otros entornos de análisis o documentación. La información exportada corresponde a los parámetros geométricos de cada muro, las

combinaciones de carga evaluadas y las variables mecánicas obtenidas del procesamiento del modelo de elementos finitos, esto facilita la interoperabilidad con herramientas externas, tales como hojas de cálculo o software de análisis estadístico, permitiendo realizar verificaciones adicionales o almacenar los resultados para su posterior consulta. Mediante el segundo botón, “Guardar resultados”, se almacena internamente el conjunto de resultados procesados dentro del proyecto actual. A diferencia de la función de exportación, esta acción permite conservar el estado del análisis dentro del propio entorno del programa, de modo que los datos puedan ser recuperados posteriormente sin necesidad de repetir el proceso de extracción desde el modelo estructural lo cual resulta útil para mantener un registro de los resultados obtenidos durante distintas etapas del proceso de diseño. El botón “Generar reporte” ejecuta el procedimiento de compilación automática de la información relevante del análisis en un documento técnico. El reporte incluye los parámetros geométricos del muro con mayor relación de demanda entre todas las combinaciones preseleccionadas, el objetivo de esta función es proporcionar un medio de documentación del proceso de revisión estructural que pueda ser utilizado como respaldo técnico del diseño o como material de revisión dentro del flujo de trabajo del usuario. Y finalmente con el botón “Árbol de decisión” se activa el módulo de análisis interpretativo basado en árboles de decisión implementado dentro del programa. Al ejecutar esta función, el sistema procesa las variables derivadas del campo de esfuerzos obtenido del análisis por elementos finitos y genera diagramas de árbol que permiten visualizar las reglas y umbrales asociados a los criterios de validación estructural. Los diagramas generados facilitan la identificación de patrones dentro del conjunto de resultados, permitiendo explorar la relación entre las variables mecánicas del modelo y el desempeño estructural de los muros analizados, la interpretación de dichos árboles y como integrarlo dentro de un proceso de diseño estructural se discute con profundidad en el capítulo IV.

En su conjunto las funciones disponibles en la última ventana de la interfaz permiten completar el ciclo de procesamiento de resultados, desde la organización y almacenamiento de la información obtenida del análisis numérico hasta la generación de documentación técnica y el análisis interpretativo de los resultados.

Confina v1.0

Resumen de resultados para diseño propuesto

Pier muro	Combinación	Altura (m)	Ancho (m)	C.Cent X (m)	C.Cent Y (m)	C.Cent Z (m)	fm (kgf/cm ²)	fp (kgf/cm ²)	vm (kgf/cm ²)	fan	fy (kgf/cm ²)
Y11	ELS_DIN_100SX-30SY	2.1	4.0	8.0	4.0	1.05	15.0	15.0	2.0	1.0	4200.0
Y11	ELS_DIN_-100SX+30SY	2.1	4.0	8.0	4.0	1.05	15.0	15.0	2.0	1.0	4200.0
Y11	ELS_DIN_-100SX-30SY	2.1	4.0	8.0	4.0	1.05	15.0	15.0	2.0	1.0	4200.0
Y2	ELS_DIN_100SX-30SY	2.1	2.5	8.0	9.75	1.05	15.0	15.0	2.0	1.0	4200.0
Y2	ELS_DIN_-100SX+30SY	2.1	2.5	8.0	9.75	1.05	15.0	15.0	2.0	1.0	4200.0
Y2	ELS_DIN_-100SX-30SY	2.1	2.5	8.0	9.75	1.05	15.0	15.0	2.0	1.0	4200.0
X1	ELS_DIN_100SX-30SY	2.1	0.97	0.48	11.0	1.05	15.0	15.0	2.0	1.0	4200.0
X1	ELS_DIN_-100SX+30SY	2.1	0.97	0.48	11.0	1.05	15.0	15.0	2.0	1.0	4200.0
X1	ELS_DIN_-100SX-30SY	2.1	0.97	0.48	11.0	1.05	15.0	15.0	2.0	1.0	4200.0
X1	ELS_DIN_30SX+100SY	2.1	0.97	0.48	11.0	1.05	15.0	15.0	2.0	1.0	4200.0
Y1	ELS_DIN_100SX-30SY	2.1	0.95	0.0	10.52	1.05	15.0	15.0	2.0	1.0	4200.0
Y1	ELS_DIN_-100SX+30SY	2.1	0.95	0.0	10.52	1.05	15.0	15.0	2.0	1.0	4200.0
Y1	ELS_DIN_-100SX-30SY	2.1	0.95	0.0	10.52	1.05	15.0	15.0	2.0	1.0	4200.0
Y1	ELS_DIN_30SX+100SY	2.1	0.95	0.0	10.52	1.05	15.0	15.0	2.0	1.0	4200.0
Y3	ELS_DIN_100SX-30SY	2.1	0.95	0.0	8.48	1.05	15.0	15.0	2.0	1.0	4200.0
Y3	ELS_DIN_-100SX+30SY	2.1	0.95	0.0	8.48	1.05	15.0	15.0	2.0	1.0	4200.0
Y3	ELS_DIN_-100SX-30SY	2.1	0.95	0.0	8.48	1.05	15.0	15.0	2.0	1.0	4200.0
Y3	ELS_DIN_30SX+100SY	2.1	0.95	0.0	8.48	1.05	15.0	15.0	2.0	1.0	4200.0
Y5	ELS_DIN_100SX-30SY	2.1	0.6	0.0	7.7	1.05	15.0	15.0	2.0	1.0	4200.0
Y5	ELS_DIN_-100SX+30SY	2.1	0.6	0.0	7.7	1.05	15.0	15.0	2.0	1.0	4200.0
Y5	ELS_DIN_-100SX-30SY	2.1	0.6	0.0	7.7	1.05	15.0	15.0	2.0	1.0	4200.0
Y5	ELS_DIN_30SX+100SY	2.1	0.6	0.0	7.7	1.05	15.0	15.0	2.0	1.0	4200.0

Exportar resultados Guardar resultados Generar reporte Árbol de decisión <<- Atrás Finalizar

Figura 30: Ventana de resumen de resultados de diseño propuesto, aquí termina el proceso analítico del programa y se permite la consulta y ordenamiento de los resultados. Fuente: Autoría Propia (2025).

Por último, resaltado en azul se encuentra el botón “Finalizar” que da cierre al programa, a la vez que en caso de que los resultados finales no satisfagan los requisitos normativos de diseño se permite también la opción de regresar a paginas anteriores ahora en conocimiento de cuáles son las revisiones más desfavorables de cada muro y si es pertinente hacerlo, optar por cambiar tanto su geometría como su refuerzo interno; y en dado caso también discernir si es necesario cambiar el tipo de material con que se construirá dicho muro.

Referencias

- (6 de Noviembre de 2023). *NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA*. Ciudad de Mexico, Mexico: Corporación Mexicana de Impresión.
- Alcocer, S. M. (1997). Comportamiento sísmico de estructuras de mampostería: una revisión. En *Memorias del XI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica* (Vol. 1, págs. 164-191).
- Amazon Web Services. (13 de Noviembre de 2025). *¿Qué es una interfaz de programación de aplicaciones (API)?* Obtenido de Amazon Web Services: <https://aws.amazon.com/es/what-is/api/>
- Athanasiou, A., Ebrahimkhanlou, A., Zaborac, J., Hrynyk, T., & Salamone, S. (2020). A machine learning approach based on multifractal features for crack assessment of reinforced concrete shells. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 565-578.
- Cairó, O. (2005). *Metodología de la programación*. Alpha Editorial.
- Computer & Structures, Inc. (2017). *CSiAnalysis Reference Manual*.
- de Mampostería, C. (2008). Guía para el Análisis de Estructuras de Mampostería. *Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural (SMIE)*.
- Etim, B., Al-Ghosoun, A., Renno, J., Seaid, M., & Mohamed, M. (2024). Machine Learning-Based Modeling for Structural Engineering. *Buildings*, 14(11), 3515.
- Fundación, I.C.A., UAEM, & S. (1999). Edificaciones de mampostería para vivienda. *Fundación ICA, AC. México*.
- IBM. (02 de Noviembre de 2021). *¿Qué es un árbol de decisión?* Obtenido de IBM Web site: <https://www.ibm.com/mx-es/think/topics/decision-trees>
- Instituto de Ingenieria UNAM. (1977). *Diseño y construcción de estructuras de mampostería, Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de construcciones para el Distrito Federal. Con comentarios y ejemplos*. Distrito Federal: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Marques, R. L. (2019). Structural behaviour and design rules of confined masonry walls: Review and proposals. (Elsevier, Ed.) *Construction and Building Materials*, 217, 137-155.
- Meli, R. (1992). *Comentarios y ejemplos de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería, DDF*. UNAM. Instituto de Ingeniería.
- MORALES, Q., Botello, S., & Zárate, F. (2013). Formulación de elementos finitos y elementos discretos.

- Sociedad Mexicana de Ingenieria Estructural (SMIE). (2019). *Edificaciones de mampostería* (1 ed.). Ciudad de México, México: Limusa.
- Tapeh, A. T., & Naser, M. Z. (2023). Artificial Intelligence, Machine Learning, and Deep Learning in Structural Engineering: A Scientometrics Review of Trends and Best Practices. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 30(1), 115-159.
- Yepes, V. K.-B. (2023). La inteligencia Artificial en la Ingeniería Civil: Oportunidades y desafíos. *IC Ingeniería Civil*, 1(642), 20-23.