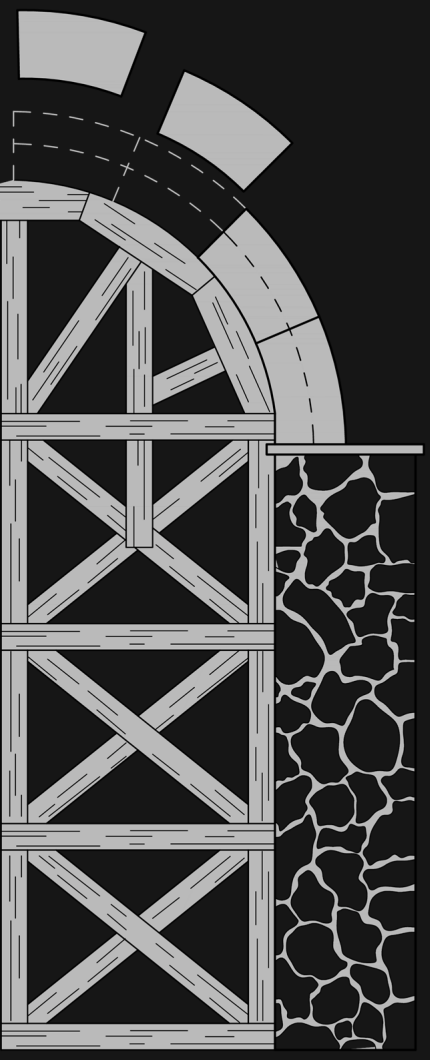
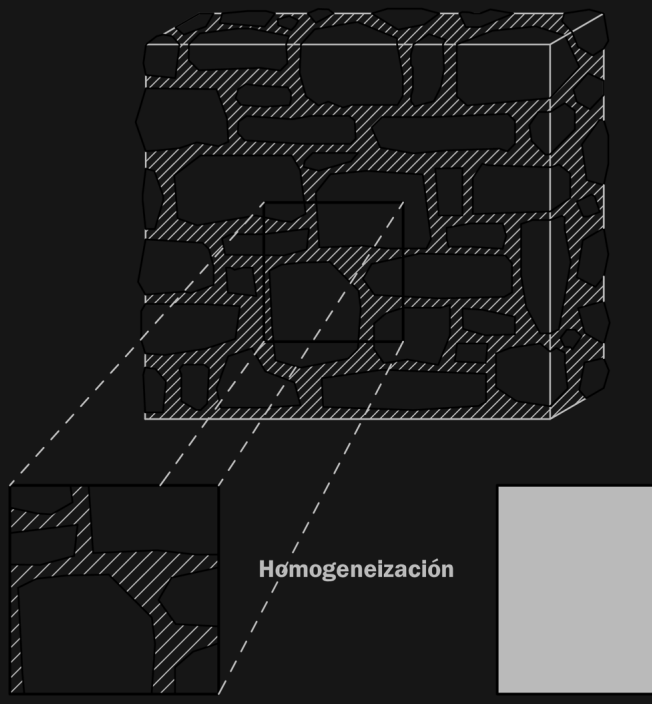
PROCEDIMIENTO SISTÉMICO Y PROPIEDADES DE LA MAMPOSTERÍA IRREGULAR PARA EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE EDIFICIOS HISTÓRICOS

CARLOS ALBERTO TORRES MONTES DE OCA





EDITORIAL RESTAURO COMPÁS Y CANTO

Carlos Alberto
Torres Montes de Oca
Dr. En C. en Arquitectura y Urbanismo
M. En C. en Estructuras

Profesor Investigador de la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación (SEPI) de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura (ESIA) Unidad Tecamachalco (UT) perteneciente al Instituto Politécnico Nacional (IPN).
Miembro del Colegio de Profesores en la SEPI-ESIA-UT. Profesor en los programas de Doctorado y Maestría en Arquitectura y Urbanismo, Maestría en Conservación Arquitectónica, Especialidad en Restauración Arquitectónica. Profesor de la Academia de Estructuras.
Actualmente pertenece al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores del Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) con nivel 1 (SNI1).

PROCEDIMIENTO SISTÉMICO Y PROPIEDADES DE LA MAMPOSTERÍA IRREGULAR PARA EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE EDIFICIOS HISTÓRICOS

CARLOS ALBERTO TORRES MONTES DE OCA

EDITORIAL RESTAURO COMPÁS Y CANTO

PROCEDIMIENTO SISTÉMICO Y PROPIEDADES DE LA MAMPOSTERÍA IRREGULAR PARA EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE EDIFICIOS HISTÓRICOS

Primera edición: 20 de octubre de 2023

© 2023. CARLOS ALBERTO TORRES MONTES DE OCA
© 2023. Editorial Restauro Compás y Canto

ISBN digital: 978-607-99572-4-7
Afiliación CANIEM con registro: 3862
Hecho en México
Disponible en: www.editorialrestauro.com.mx
Correo electrónico: contacto@editorialrestauro.com.mx
Dirección editorial: Héctor César Escudero Castro
Supervisión de producción: Diana Guadalupe González Oriani
Maquetación y diseño: David Odín Vargas López
Revisión por pares:
Dr. Alejandro Jiménez Vaca (ORCID)
Mtro. Arturo Suárez Suárez

Reservados todos los derechos. No se permite la reproducción total o parcial de esta obra con fines lucrativos, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio sin autorización previa y por escrito de los autores y editores. La infracción de dichos derechos puede constituir un delito contra la propiedad intelectual.

Perfil del Autor

Doctor en Ciencias en Arquitectura y Urbanismo, por el Instituto Politécnico Nacional - Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura - Unidad Tecamachalco (2016); Maestría en Ciencias en Estructuras por el Instituto Politécnico Nacional - Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura - Unidad Zacatenco, (2004-2007). Ha realizado investigaciones orientadas al Análisis Estructural de Edificios Históricos, tales como: "Hacia una metodología de análisis estructural de edificios históricos, un enfoque sistémico-interdisciplinario", como tesis de Doctorado, y "Pruebas de vibración ambiental para determinar las propiedades dinámicas de un edificio de 23 niveles y los efectos de interacción suelo-estructura", como tesis de Maestría. Desde el 2011 es profesor de la Academia de Estructuras en el Instituto Politécnico Nacional - Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura - Unidad Tecamachalco, donde se desenvolvió como presidente de ésta. También es miembro del Colegio de Profesores en el Doctorado y Maestría en Ciencias en Arquitectura y Urbanismo, Maestría en Restauración Arquitectónica, Especialidad en Restauración Arquitectónica, en la línea de investigación de Conservación del Patrimonio Urbano Arquitectónico. Ha laborado 25 años ininterrumpidos en la iniciativa privada en materia de supervisión de obra, construcción, análisis y diseño estructural, instalaciones en edificaciones, diseño arquitectónico y dibujo asistido por computadora, por mencionar algunas empresas: DIRAC S.A de C.V. - jefe de Proyectos estructurales, CAID Arquitectura Construcción e Ingeniería Interdisciplinaria S.A de C.V - director de proyectos estructurales. Se ha desempeñado en los últimos años como consultor colaborador para organismos públicos y privados, Ha impartido cursos a directores Responsables de Obra y Corresponsables en Seguridad Estructural. Ha obtenido distinción como Dictaminador en el Programa Nacional de Reconstrucción (Edificios patrimoniales y contemporáneos). Actualmente cuenta con nombramiento como miembro del Sistema de Nacional de Investigadores (S.N.I. Nivel 1).

A Dios (Jehová)

A mi esposa e hijos

A mis padres y hermanos

Nota de aclaración

Dada la alta importancia que se le debe conceder a los procedimientos de análisis estructural en los edificios patrimoniales, se vuelve necesario y esencial mejorarlos de manera continua, es por ello, que el procedimiento sistémico que se presenta en el primer capítulo de este libro, el cual ya se había editado con anterioridad en las obras: Objeto Patrimonial y Principios Teóricos de Conservación y Restauración Previos al Análisis Estructural de Edificios Históricos, se retoma en este texto para ser modificado y complementado, ya que las últimas cuatro fases o etapas, no se habían desarrollado con explicación objetiva, asimismo, se interpretan de manera más concisa cada una de estas. Adicionalmente, se integra la descripción del análisis mixto, ya que este es primordial para interrelacionar los análisis cualitativos y cuantitativos como otra fase principal. Con todo esto, se conforman las ahora 14 partes fundamentales del sistema. Cabe mencionar que en la actualidad existen lineamientos y criterios internacionales para analizar las estructuras de los edificios patrimoniales, sin embargo, pocos textos científicos abordan etapas específicas para sistematizar los procesos con fundamento teórico.

Agradecimientos

Al **Instituto Politécnico Nacional**, ya que a través de los conocimientos que continuamente se adquieren durante la interacción con los estudiantes, tanto de licenciatura, como de posgrado, en la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Tecamachalco (SEPI-ESIA-UT), se ha logrado escribir este texto.

Al ahora **CONAHCYT** por el apoyo brindado al Autor de este texto como miembro del S.N.I.

A los investigadores e instituciones de enseñanza que se mencionan en las páginas de este trabajo, ya que sin el arduo trabajo que han desarrollado en varias partes del mundo, sería imposible referenciar la información y datos relevantes de los temas que se tratan.

A **José Eduardo Rosas Valencia**, por el apoyo en el trabajo gráfico y analítico desarrollado en este texto, además por la búsqueda de documentación bibliográfica especializada.

A **Oswaldo Aldair Pérez Jarquín**, por el apoyo en la redacción inicial, generación de esquemas y documentación bibliográfica técnica.

A **Miguel Ángel Segovia Huitrón**, por el apoyo y la facilitación para utiizar el modelo con tipo shell. A la **Dra. Elizabeth Lozada Amador** y **Dr. Francisco Omar Lagarda García**, por la invitación a realizar el analizis estructural del inmueble Santa Catarina.

A mis compañeros profesores e investigadores de la línea de Conservación y Restauración Arquitectónica de la SEPI-ESIA-UT, por su apoyo en todos los aspectos y por compartir sus conocimientos.

ÍNDICE

Perfil de autor I
Nota de aclaración III
Agradecimientos IV

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO 1. PROCEDIMIENTO SISTÉMICO DE ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE EDIFICIOS HISTÓRICOS 7
1.1. Edificios históricos 9
1.2. Metodología de análisis estructural de edificios históricos 10
1.2.1. Reconocimiento de postura de restauración y problemática estructural 13
1.2.2. Planteamiento de los objetivos preliminares de análisis estructural 13
1.2.3. Adquisición de datos y análisis cualitativo 14
1.2.4. Diagnóstico cualitativo (preliminar) y propuesta del proceso de análisis estructural 14
1.2.5. Toma de decisiones (acciones inmediatas y acciones a considerar en el análisis cuantitativo) 15
1.2.6. Adquisición de datos y análisis cuantitativo 15
1.2.7. Monitoreo virtual 15
1.2.8. Diagnóstico cuantitativo 16
1.2.9. Análisis Mixto 16
1.2.10. Diagnóstico detallado (dictamen) 17
1.2.11. Medidas de intervención 17
1.2.12. Intervención física 17
1.2.13. Monitoreo de intervención física 17
1.2.14. Documentación del proceso 18

CAPÍTULO 2. LA FÁBRICA Y EL ARCO ESTRUCTURAL DE MAMPOSTERÍA 19
2.1. La fábrica 21
2.2. Características de la mampostería como elemento estructural 27
2.2.1. El arco estructural de mampostería 28
2.2.1.1. La línea de empuje 34
2.2.2. Bóvedas 40
2.2.3. Estribos 42

CAPÍTULO 3. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LA MAMPSOTERÍA IRREGULAR 45
3.1. Los materiales de fábricas y sus propiedades mecánicas 47
3.1.1. Pruebas invasivas y no invasivas 47
3.1.1.1. Analogía: análisis médico-paciente vs estructurista-edificio patrimonial 51
3.1.2. Piedra 53
3.1.3. Barro 56
3.1.4. Morteros 58
3.2. Propiedades mecánicas de la mampostería 60
3.2.1. Homogeneización de la mampostería 63
3.2.2. Modelos constitutivos de la mampostería 67

CAPÍTULO 4. COMPARACIÓN DE GRÁFICAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN DEL CONCRETO Y MAMPOSTERÍA IRREGULAR 75
4.1. Gráficas esfuerzo-deformación del concreto confinado y no confinado 77
4.2. Configuración de cuervas esfuerzo-deformación de la mampostería irregular a partir de materiales constitutivos del concreto no confinado 85

CAPÍTULO 5. APLICACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL VIRTUAL COMPUTACIONAL 89
5.1. Análisis estructural virtual computacional 91
5.1.1. Modelación estructural de un elemento tipo péndulo invertido 91
5.1.2. Simulación del comportamiento estructural de un inmueble del siglo XVI 94

Referencias bibliográficas 107

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

Los edificios que construyeron nuestros antepasados, además de las vertientes históricas tangibles e intangibles, contienen intrínsecamente una gran cantidad de conocimiento técnico-constructivo que se requiere conservar, tanto para la salvaguarda cultural, como de vidas humanas. Asimismo, muchos de estos sistemas antiguos de construcción, han sido la base para evolucionar en los elementos estructurales que hoy en día utilizamos en nuestras edificaciones, a los cuales distinguimos coloquialmente como “modernos”.

A estas edificaciones “modernas”, solemos verlas como sofisticadas por los grandes claros que se libran de manera horizontal y vertical con elementos muy esbeltos, poco aperaltados, con gran resistencia y condiciones industrializadas. Son de materiales que se pueden manipular y fabricar con una variada capacidad de resistencia a esfuerzos de: tracción, compresión, cortantes, flexión y combinaciones de estos; y por lo regular son construidas con materiales como concreto reforzado o acero, teniendo un nivel de continuidad, isotropía y “homogeneidad”, tanto en sus elementos estructurales asilados, como en el sistema. Si en algún punto es interrumpida la continuidad de dicha estructura, esta tiende a redistribuir elementos mecánicos de forma relevante, lo que en muchas ocasiones conlleva a que al fallar un elemento, la estructura colapse o se encuentre muy cerca de la falla total del sistema, dado que los elementos y conexiones continuas tienden a interactuar entre sí, y al formarse alguna articulación, frecuentemente se interpreta como un comportamiento de degradación en el desempeño estructural, ya que esto permitiría desplazamientos y deformaciones cada vez más cercanas a formación de rótulas o rupturas frágiles y por ende a la falla.

En el caso de los edificios históricos, y en especial los que están construidos con mampostería, tienen la peculiaridad de ser, en la mayoría de los casos, estructuras conformadas por elementos no continuos o semi-continuos, de tal manera que si la estructura llegara a separarse en macro-elementos, estos podrían seguir en pie de manera independiente (como macro elementos) y a su vez, cada macro-elemento formado de manera natural por las acciones actuantes en el inmueble, se comportará como un subsistema estructural, el cual presentará su deterioro particular. Es evidente que, en muchas ocasiones los encargados de intervenir este tipo de estructuras, en el afán de querer restaurarlas o consolidarlas, inyectan las “grietas” pensando que con ello se solucionará el padecimiento o mal comportamiento de la estructura, lo cual, al menos en las bóvedas, la gran mayoría de las veces, lo único que se logra, es restringir el posible regreso o reacomodo de los elementos o bloques a un estado de trabajo estructural inicial y coherente con el sistema completo. Cabe mencionar que en los edificios de mampostería irregular con argamasa, se tiene

un cierto grado de continuidad en los elementos, este nivel de continuidad depende del tipo de arreglo (acomodo) de las piedras y las características físico-mecánicas de las argamasas. Es por ello que, para analizar edificios históricos, se requiere conocer dichas propiedades.

Los edificios patrimoniales cada vez se vuelven más vulnerables al deterioro o incluso a su pérdida, ya que, por un lado, el paso del tiempo los continua envejeciendo y, por otra parte, la demanda de modificación en su uso conlleva a que se intervengan constantemente para ajustarse a los rápidos cambios promovidos por la sociedad que los habita; además de que estas intervenciones llegan a ejecutarse por personas que, en el mejor de los casos, "creen saber y comprender el funcionamiento estructural". Sin embargo, así como desde una perspectiva médico-paciente, no permitiríamos que el cirujano lleve a cabo una operación, sin antes hacer los estudios pertinentes que le proporcionen el sustento certero de lo que padece el paciente (ya que de lo contrario, podría terminar recetando un placebo que pudiera calmar la dolencia solo por un tiempo, lo cual conllevaría a agravar dicho padecimiento en el corto o mediano plazo), el restaurador no debería intervenir estructuras históricas sin el conocimiento real del sistema, o sin antes contar con los estudios pertinentes donde se describa el entendimiento, los sistemas constructivos, comportamiento estructural y las propiedades mecánicas de los materiales. Adicionalmente, hay que tener en cuenta que los cambios en las condiciones climáticas y del suelo donde se encuentran emplazados, llegan a modificar las condiciones de frontera para los cuales fueron concebidos. Es por estas razones que no podemos seguir interviniendo las estructuras del patrimonio arquitectónico solo a sentimiento, o siguiendo "procedimientos" o "recetas", que en su momento pudieron haber funcionado pero que actualmente no son adecuadas dadas las nuevas condiciones físicas que presentan dichos objetos patrimoniales y las nuevas condiciones de frontera a las que se encuentran expuestos, más bien, se deben seguir estudiando este tipo de estructuras para encontrar soluciones compatibles y además reversibles.

La ingeniería estructural se ha transformado en un inmenso campo de estudio, debido a la gran cantidad de materiales que día a día se exponen al mundo, sin embargo, existe una vertiente paralela a dichos materiales: los sistemas constructivos.

En el *capítulo 1* se presenta la importancia de la conservación del patrimonio arquitectónico, se mencionan una serie de autores (nacionales e internacionales) relacionados con estudios importantes en cuanto a las estructuras de edificios históricos, principalmente con la mampostería irregular. Se explica una metodología sistémica de análisis estructural de edificios históricos, en la cual se muestra gráficamente y de forma textual cada fase

que, al menos, debería de existir previo a los proyectos de intervención física donde la estructura esté involucrada. Cabe mencionar que en los edificios patrimoniales (históricos), los elementos arquitectónicos, en la mayoría de los casos, son parte de la estructura. El autor de este libro, ya había presentado parte de dicha metodología en publicaciones anteriores, sin embargo, en este libro se aborda desde una perspectiva más objetiva y concisa, además de que se ajustó la etapa del análisis mixto para trabajo paralelo e interrelacionado entre los enfoques cualitativos y cuantitativos, asimismo, se agrega la descripción de las tres fases que se relacionan con la intervención física y que no se habían explicado anteriormente.

En el *capítulo 2* se presenta la mampostería como material básico en la construcción de los edificios históricos, variaciones de arreglos de piedras en los elementos estructurales, principales tipos de mampostería utilizada en edificios históricos, primordialmente en muros y arcos. Se mencionan las hipótesis de Jacques Heyman. Por otra parte, se muestran diferentes configuraciones de mampostería en la construcción o intervención de arcos, ya sea como sistema constructivo aislado o con carga por encima de este. También se ilustran algunas de las configuraciones que puede tomar la línea de empujes de acuerdo con las condiciones a las cuales está expuesto el sistema, para ello se presentan tanto gráficas estáticas, como la modelación secuencial del colapso de un arco con elementos de contacto.

En el *capítulo 3* se muestran algunas pruebas básicas invasivas y no invasivas que se deben realizar como mínimo al sistema estructural, y los resultados de laboratorio de probetas de argamasa con diferente composición, utilizada comúnmente en la intervención física. Se presentan 13 tablas con información físico-mecánica nacional e internacional de la mampostería y de sus materiales componentes. Finalmente, con el objetivo de poder modelar de manera rápida, sencilla y certera, ya sea en el rango lineal o no lineal, se exhibe un método internacional para ayudar a homogeneizar las propiedades de la mampostería, lo cual permite procesar los datos mecánicos en algún software de análisis estructural.

En el *capítulo 4* se presentan, de varios autores, gráficas de esfuerzo-deformación del concreto simple, concreto reforzado y mampostería irregular, con la finalidad de revisar los comportamientos y formas que describen las pruebas, principalmente a compresión, dadas las similitudes que se han demostrado en dichas gráficas. Esto se lleva a cabo, tal como lo hacen algunos investigadores internacionales, con el interés de retomar los modelos constitutivos del concreto y configurar gráficas de esfuerzo-deformación con propiedades de tracción y compresión de la mampostería irregular.

En el *capítulo 5* se aplican las propiedades mecánicas para la modelación estructural de un elemento tipo péndulo invertido, en un inmueble patrimonial construido con elementos finitos.

En las siguientes páginas se presenta el desglose del libro.

CAPÍTULO 1

PROCEDIMIENTO SISTÉMICO DE ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE EDIFICIOS HISTÓRICOS

"Los sistemas constructivos y las estructuras antiguas son vestigios plasmados en el patrimonio edificado del mundo y de los cuales continuamos aprendiendo"

Fuente: Propia.

1.1. Edificios históricos

Los edificios históricos simbolizan un legado arquitectónico y cultural para la humanidad, que no solo representan un conglomerado que hoy en día continúa existiendo; su significado denota el legado patrimonial del periodo de tiempo en el que se materializaron y hablan por sí mismos de la historia a lo largo de su existencia; dicho patrimonio yace en sus dos vertientes: tangible e intangible. Los edificios históricos son esenciales en la arquitectura y primordialmente para la sociedad a la que pertenecen, es por ello que son catalogados como *objetos patrimoniales.*

Pastrana T. et al (2015) menciona: *"El objeto patrimonial es todo lo que heredamos y que heredaremos; los bienes más importantes de un individuo, un conjunto o una nación".*

Escudero Castro, H.C. (2019) menciona que los tres aspectos fundamentales de la restauración son: historia, teoría y técnica.

Es por ello por lo que la importancia de la *conservación del patrimonio arquitectónico* es tan relevante en este texto, siendo esta la directriz y el propósito con el que se deben desarrollar los análisis estructurales.

Dentro del ámbito de la ingeniería estructural es imprescindible conocer la *geometría, técnicas, materiales y condiciones de frontera* con los que fueron construidos y con los que cuenta actualmente este tipo de edificios, para lo cual es necesario tomar una postura análoga *médico-paciente*, en donde el *estructurista* debe evaluar cada uno de estos aspectos para la realización de un *diagnóstico* que le permita conocer con verdadera certeza -y no desde una postura del "yo creo", es decir, solo a sentimiento-, las *condiciones actuales* de los inmuebles patrimoniales, y con esto definir una medida de acción encaminada a la conservación del patrimonio arquitectónico. Por mencionar un ejemplo de inspección e intervención física, se tiene la Parroquia de San Agustín Obispo, en Chiautla, Puebla (figura 1.1).

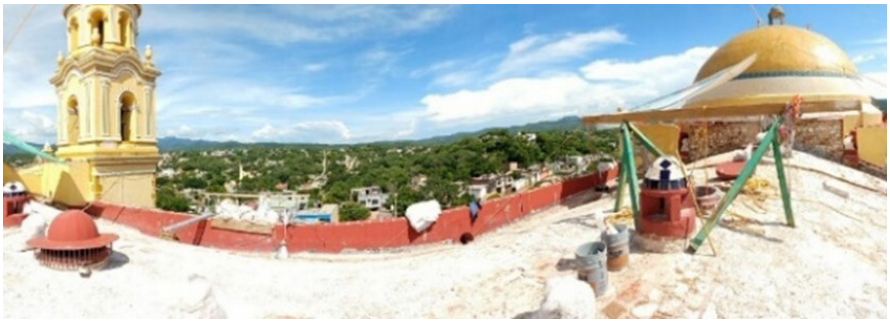


Figura 1.1. Intervención física en la Parroquia de San Agustín Obispo, Chiautla, Puebla, 2018. Retiro de impermeabilizante e inspección del sistema constructivo en bóveda. Fuente: propia.

Alrededor del mundo existen numerosos edificios históricos de mampostería catalogados como patrimonio de la humanidad. Hoy en día varios autores e investigadores del globo terráqueo han aportado un vasto conocimiento en su *análisis, conservación y restauración estructural*. Algunos de estos autores definen una categoría estructural, catalogándolos como ***estructuras de fábrica*** que en términos contemporáneos se trata de edificios de mampostería, aunque no como la conocemos actualmente en edificios modernos y contemporáneos. De este grupo, los autores mencionados y citados en este libro son:

Jacques Heyman, ingeniero británico y divulgador científico de la teoría de estructuras de fábrica; **Santiago Huerta Fernández**, arquitecto español, por aportaciones en el estudio del equilibrio de estructuras de fábrica; **Antonio José Mas-Guindal Lafarga**, arquitecto español, por sus aportaciones de análisis sobre el comportamiento mecánico de las estructuras de fábrica mediante métodos gráficos; **Roberto Meli Piralla**, ingeniero civil e investigador mexicano, por los aportes de investigación científica en la ingeniería estructural de edificios históricos; **Fernando Peña Mondragón**, investigador mexicano e ingeniero civil, por desarrollo de estrategias de modelación para monumentos históricos; **Paulo B. Lourenço**, profesor portugués de ingeniería civil, por sus aportes sobre el método de elementos finitos (FEM); **Marcos Mauricio Chávez Cano**, investigador mexicano e ingeniero civil, por sus estudios sobre el comportamiento de mampostería antigua; **Franco Lacobelli**, ingeniero Italiano, por el estudio en zonas sísmicas de estructuras de mampostería; **Riccardo Mariotti**, ingeniero italiano, por aportaciones en recuperación de estructuras de mampostería; **Norberto Domínguez Ramírez**, doctor mexicano en ingeniería civil, por su desarrollo en software de elementos finitos aplicados al análisis de edificios históricos; **Juan Miguel Meza Méndez**, doctor investigador de la metodología de macroelementos para la evaluación de resistencia y mecanismos del colapso de edificios históricos; **Maurizio Angelillo**, por el estudio de mecánica de estructuras de mampostería; y finalmente, **Gianmarco de Felice**, quien estudia el refuerzo estructural en inmuebles de mampostería.

1.2. Metodología de análisis estructural de edificios históricos

Para llevar a cabo cualquier análisis y diseño para la conservación y restauración estructural, es necesario contemplar y seguir los lineamientos proporcionados por las instituciones oficiales, nacionales e internacionales, así como lo especificado por aquellos autores e investigadores, que han aportado gran parte del conocimiento con sustento científico, sobre el comportamiento estructural de los edificios históricos y su correcta restauración e intervención estructural (algunos de ellos fueron mencionados previamente), donde el objetivo imprescindible es su verdadera *conservación*.

Es un hecho que la conservación de los inmuebles patrimoniales toma un mayor impulso de desarrollo desde finales del siglo XIX. Como menciona el autor del presente texto en su libro *"Principios Teóricos de Conservación y Restauración previos al análisis estructural de edificios históricos"* Torres C. A. (2018), donde se informa acerca de las cartas y convenios que expresan recomendaciones y opiniones sobre la restauración óptima de los inmuebles históricos, documentos que han dado como resultado, la creación de organismos que impulsan su conservación. En ese mismo libro se describen las recomendaciones propuestas por el Comité Científico Internacional para el Análisis y Restauración de Estructuras del Patrimonio Arquitectónico (International Scientific Committee for Analysis and Restoration of Architectural Heritage, (ISCARSAH, 2003) y las Bases para el diseño de estructuras-evaluación de estructuras existentes ISO 13822 (2010), ya que estas últimas contienen información importante para la evaluación de cualquier tipo de estructura existente, además es aplicable a estructuras de inmuebles patrimoniales. Dichos lineamientos ya han sido sincretizados y disertados en el libro mencionado con anterioridad, por lo que es imprescindible consultarlos.

Para efectos de este libro, se retoma y se complementa el procedimiento de análisis propuesto por Torres C. A. (2018), en el cual se muestra un procedimiento sistémico e interdisciplinario, conjuntando e interrelacionando principios que conlleva el análisis estructural, es decir, cada una de las etapas del procedimiento están interrelacionadas entre sí (ver figura 1.2). Esta metodología se representa por medio de un diagrama de 12 etapas ordenadas y dos subetapas (Análisis mixto y Monitoreo virtual), donde todas las fases están sistematizadas y se consideran fundamentales para el análisis estructural en este tipo de inmuebles.

Para la correcta comprensión del procedimiento ilustrado en la figura 1.2, se tiene que leer de arriba hacia abajo y donde las flechas rellenas indican una secuencia de avance, mientras que las que están sin rellenar señalan los probables retornos para tener en consideración nuevos datos o en su caso complementarlos para retomar el procedimiento en etapas previas.

Cabe mencionar que, de acuerdo con dicho procedimiento sistematizado e interdisciplinario, es necesario enfatizar que *"cualquier análisis estructural no se puede considerar como una receta de cocina"* a seguir (tal como muchos trabajadores de la práctica en restauración suelen hacerlo) puesto que en ciertas ocasiones es imprescindible volver a retomar una fase anterior y que esta a su vez llegue a configurar o reconfigurar nuevamente la siguiente etapa. Para facilitar el entendimiento de cada etapa, es necesario describir de manera más detallada el objetivo de cada una de estas, destacando que, el autor

proporciona plantillas de ayuda para llevar a cabo este proceso sistemático (ver Torres C. A., 2018).

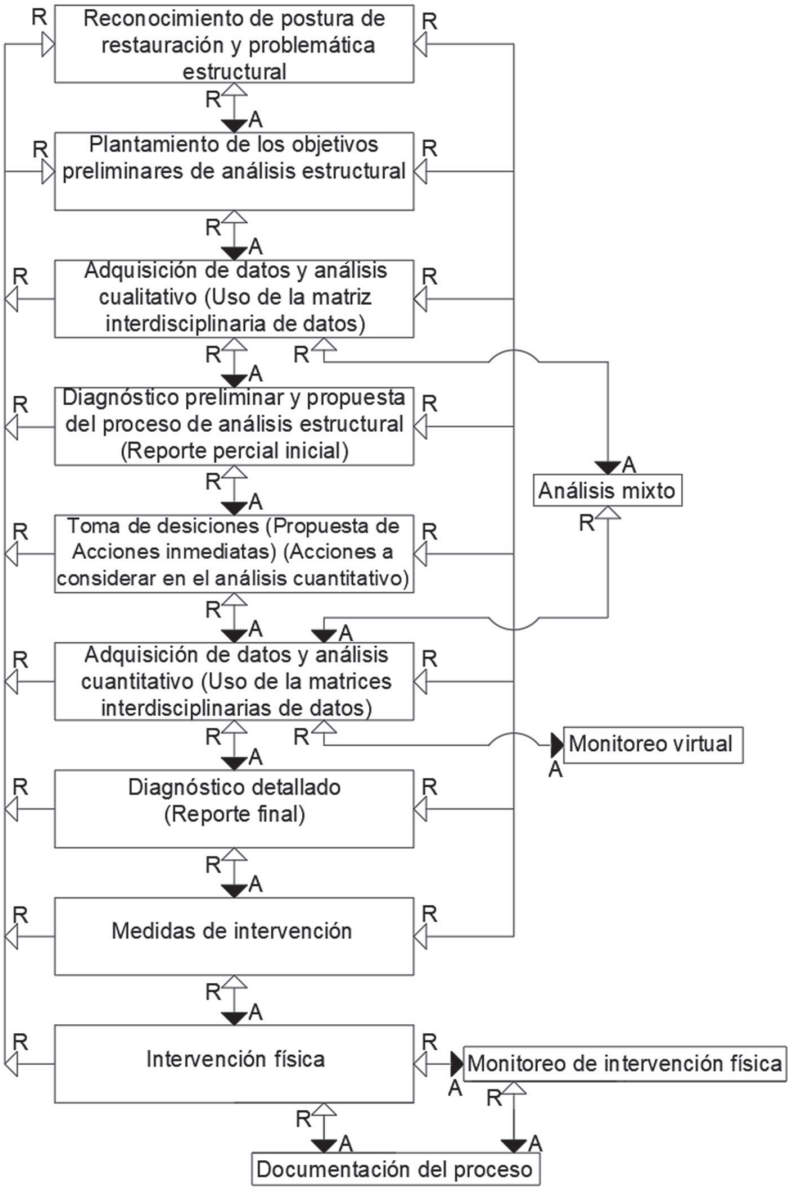


Figura 1.2. *Procedimiento de análisis estructural de edificios históricos con enfoque sistémico-interdisciplinario.* Donde: A = Avanza; R = Retorna. Fuente: tomado, modificado y complementado de Torres C. A., 2018.

1.2.1. Reconocimiento de postura de restauración y problemática estructural

La restauración de los inmuebles patrimoniales es una actividad que abarca una innumerable toma de decisiones en cuanto a las intervenciones por realizar, cada inmueble debe tener sus criterios de restauración, debido a que las condiciones que se presentan en las edificaciones son muy particulares y además los propósitos para realizar las *intervenciones estructurales* son multifactoriales. Para llevar a cabo estas, se deben tomar posturas y criterios que consideren aspectos especializados, mencionados en los lineamientos y recomendaciones de restauración y conservación de inmuebles patrimoniales, nacionales e internacionales y además deben estar respaldadas científicamente.

En esta etapa el *Estructurista Especializado en Edificios Patrimoniales* (EEEP) en colaboración con al menos el Arquitecto Especializado en *Conservación y Restauración*, debe reconocer tanto la postura de restauración-conservación, así como la problemática estructural, para posteriormente, por medio de un verdadero conocimiento científico, la pericia obtenida a través del tiempo en su formación académica y la práctica profesional, plantear los *objetivos preliminares* de análisis estructural; dichos objetivos pueden entenderse mejor en el capítulo 5 del libro: *Principios Teóricos de Conservación y Restauración previos al Análisis Estructural de Edificios Históricos, un enfoque sistémico e interdisciplinario*, escrito por Torres C. A., 2018. En esta etapa se identifican los posibles problemas estructurales que existen en el inmueble, mediante una primera revisión ocular, en donde se tenga pericia comprometida del EEEP con la conservación del patrimonio construido, haciendo énfasis en que los deterioros estructurales no son contemplados únicamente durante las condiciones actuales del edificio, sino que además es necesario realizar retrospectivas y prospectivas de comportamientos y problemas estructurales, además de los que puedan surgir durante la intervención o incluso a futuro, es decir, determinar los posibles riesgos que pueda sufrir el inmueble durante el proceso de intervención o incluso como resultado de esta.

1.2.2. Planteamiento de los objetivos preliminares de análisis estructural

Para que se determinen los objetivos del análisis estructural del edificio patrimonial, se debe realizar inicialmente, la inspección ocular del inmueble mencionado en la etapa anterior, para posteriormente proponer y gestionar los objetivos estructurales fundamentales basados en las necesidades y prioridades con un enfoque sistémico. En esta etapa se deben considerar aspectos económicos, criterios técnicos, históricos y teóricos, que conlleven a una relación realista y directa con la postura de conservación para el beneficio del inmueble, aunque no siempre es posible, debido a las *prioridades políticas*, casi siempre impuestas por las autoridades de las instituciones que están a cargo de la salvaguarda de este tipo de edificios. Tomando como base los

conocimientos *teóricos, técnicos e históricos*, es como se alcanzarán los fines certeros de los análisis e intervenciones estructurales.

En esta etapa es de vital importancia escudriñar respecto al tipo, composición y comportamiento del suelo, condiciones climáticas, geometría de la estructura, conexiones de los elementos estructurales, espesores de los elementos, verificar si los elementos ornamentales forman parte del sistema estructural, claros, tipos de materiales, continuidad o discontinuidad de los materiales y elementos estructurales, existencia de flora o fauna nociva, humedades, degradación de las argamasas, posibles movimientos verticales u horizontales del suelo, excavaciones cercanas por obras, entre otras. Solo con dicho escudriñamiento se abre la posibilidad de plantear objetivos específicos.

1.2.3. Adquisición de datos y análisis cualitativo

Una vez planteados: los objetivos, la postura de conservación y/o restauración, y la problemática estructural, el especialista en este tipo de estructuras debe recopilar, ordenar, analizar y sintetizar la información necesaria que le lleve a generar los datos pertinentes que sean adecuados para procesarlos cualitativamente y generar un diagnóstico preliminar basado en una anamnesis (leer la analogía médico-paciente en el libro: *Principios Teóricos de Conservación y Restauración previos al Análisis Estructural de Edificios Históricos, un enfoque sistémico e interdisciplinario*, Torres C. A., 2018), en donde son tomados en consideración datos cualitativos de diversas disciplinas obteniendo un *enfoque epistemológico, tecnológico e interdisciplinario*.

1.2.4. Diagnóstico cualitativo (preliminar) y propuesta del proceso de análisis estructural

El objetivo del *diagnóstico preliminar* es sustentar el conjunto de sintomatologías que promuevan la adquisición de datos para desarrollar el análisis cuantitativo en etapas posteriores, el cual debe considerar todos y cada uno de los aspectos de las etapas anteriores. El análisis cualitativo consiste en el desarrollo de un reporte pericial donde se diagnostican los posibles estados estructurales pasados, presentes y futuros. Este diagnóstico se debe desarrollar por medio de un documento escrito donde es propuesto un análisis estructural cuantitativo que resulte favorable para la conservación y/o restauración del inmueble, así como las acciones inmediatas que se deben ejecutar para salvaguardar el objeto patrimonial. Los aspectos a considerar son: la postura de conservación y/o restauración, objetivos de conservación y/o restauración, problemas estructurales, anamnesis y el presupuesto. Se debe hacer mención que este diagnóstico es complemento y la base del diagnóstico cuantitativo. Se recomienda que este primer diagnóstico (reporte pericial inicial) se firme por los profesionales responsables.

1.2.5. Toma de decisiones (acciones inmediatas y acciones a considerar en el análisis cuantitativo)

Cuando la situación del inmueble demande una intervención urgente y/o temporal solo se realizarán y recomendarán acciones inmediatas, posteriormente se podrá aplicar una intervención mayor. Si la estructura se encuentra con alta probabilidad de tener falla súbita o peligro inminente, se deben establecer *acciones inmediatas* con muy amplio juicio ingenieril. De acuerdo con: las acciones inmediatas, la naturaleza del inmueble, el diagnóstico cualitativo preliminar y la problemática estructural, se deberán considerar actividades para alimentar los análisis cuantitativos.

1.2.6. Adquisición de datos y análisis cuantitativo

Para el desarrollo de un acertado análisis estructural de los inmuebles históricos es imprescindible tener en cuenta que son sumamente necesarios los análisis cualitativos y cuantitativos de manera sistémica. En una primera instancia, el análisis cualitativo define y moldea al cuantitativo, ambos análisis contemplan los aspectos de las primeras fases. Cabe señalar que en el análisis cuantitativo es indispensable considerar el menor número de suposiciones superficiales respecto a información o parámetros numéricos; las propiedades de los materiales y los sistemas constructivos que conforman al inmueble deben ser definidos correctamente para la obtención de resultados concisos y que estén relacionados con la postura de conservación y/o restauración, de lo contrario se estará haciendo cualquier otra cosa menos restaurar y/o conservar.

1.2.7. Monitoreo virtual

El monitoreo virtual se puede definir como la simulación de condiciones pasadas, previsualización de condiciones futuras o seguimiento del comportamiento estructural presente de manera gráfica o computacional en el tiempo. Este deberá estar directamente relacionado con la adquisición de datos y análisis mixto (cualitativo + cuantitativo), ya que dicho monitoreo requiere el conocimiento de las propiedades mecánicas, físicas, geométricas del objeto patrimonial y en realidad alimentarse de los tres aspectos básicos mencionados más adelante en el análisis mixto. El monitoreo virtual es una herramienta poderosa para conocer y controlar el comportamiento estructural o las intervenciones ya hechas, así como para tomar mejores decisiones y por ende conservar las estructuras patrimoniales.

1.2.8. Diagnóstico cuantitativo

Una vez que se obtienen los resultados cuantitativos, se debe elaborar un *documento escrito* que describa la postura de conservación y/o restauración efectiva y delimitada por una propuesta de trabajo, las problemáticas y posibles tendencias de comportamiento estructural que se detectaron durante el análisis de datos duros, los objetivos del análisis, recomendaciones del reporte pericial inicial (diagnóstico cualitativo preliminar) y las "posibles acciones" que pudieran llevarse a cabo para la intervención física del inmueble. Además, debe fundamentarse todo el desarrollo numérico describiendo su procedimiento mediante modelos matemáticos y gráficos.

Se recomienda que dicho documento contenga, al menos, los siguientes elementos: portada, índice, resumen ejecutivo, métodos utilizados, gráficos, resultados, conclusiones, apéndices y bibliografía. En este texto no se aborda la intervención física en inmuebles patrimoniales de manera directa, debido a que solo se refiere al análisis estructural de edificios históricos y a las características de mampostería irregular. El tratar temas de intervención física es muy amplio y requiere de un texto completo destinado para ello.

1.2.9. Análisis Mixto

Este análisis es parte clave para obtener éxito en los estudios previos a que se intervenga físicamente la estructura del objeto patrimonial, ya que este tipo de análisis es donde se llevan a cabo los estudios cualitativos y cuantitativos de manera paralela, ordenada y sistematizada, es decir, los análisis cualitativos alimentan a la modelación computacional a través de tácticas, levantamientos geométricos, medición de verticalidades, posibles desplomes, ortogonalidades en planta, arqueología constructiva, fábricas, acciones, tipo de problemática estructural y morfología del sistema, con ello, se puede seleccionar el tipo de herramienta matemática y/o computacional a emplear en el análisis cuantitativo, el cual a su vez retroalimentará o verificará al análisis cualitativo de manera reversible, de tal forma que si los análisis numéricos no son totalmente convergentes con lo propuesto inicialmente, se pueda reconsiderar en las premisas iniciales su modificación y replanteamiento hasta lograr convergencia real y efectiva en todos los aspectos de la restauración: histórico, teórico y técnico. Como resultado de lo anterior, se tendrán inmuebles intervenidos de manera certera y no como en la mayoría de los casos se ejecuta, solo con la creencia del "yo sé hacerlo o yo puedo ejecutarlo", cayendo en el pensar saber de una sola persona o disciplina. Con la retroalimentación reversible se deben realizar meta-inferencias y plasmar los resultados en un documento formal y escrito, el cual deriva en un diagnóstico y reporte final (previo a la intervención).

1.2.10. Diagnóstico detallado (dictamen)

Esta documentación es una recopilación de todos los datos de las fases anteriores, incluyendo los estudios cualitativos, cuantitativos y mixtos, aquí se plasma la valoración, evaluación y dictamen del objeto a interferir, teniendo especificaciones físicas, estructurales y limitaciones.

Estos documentos en su mayoría son inalterables, solamente llegando a tener modificaciones cuando en su evaluación se detecta alguna anomalía o error tanto en el proceso como en el documento y por ende sea necesario modificarlo, asimismo, es muy importante que sea firmado por el responsable, ya que estas son las pautas para llevar a cabo una interferencia viable y certera en una edificación histórica.

1.2.11. Medidas de intervención

Esta etapa debe ser coherente con el diagnóstico detallado, ya que, haciendo una analogía para la toma de decisiones entre los especialistas médicos respecto a la intervención más favorable para el paciente, se deben ponderar todos los resultados y basarse en los procesos de cada fase del procedimiento sistémico para a su vez planear las etapas de intervención física.

La intervención estructural debe ser planeada de tal manera que se pueda monitorear para corregir o controlar procesos o comportamientos no deseados.

1.2.12. Intervención física

En esta fase se interviene físicamente al edificio, se procede a ejecutar la planeación y recomendaciones plasmadas en las medidas de intervención. La fase de monitoreo de intervención física debería ejecutarse de manera paralela, aunque no siempre es posible, dado que depende del nivel y duración de las actividades, ya que en intervenciones cortas no se tendrá el tiempo para verificar de manera inmediata el comportamiento físico de la estructura; sin embargo, en seguimientos estructurales prolongados, como los que se han llevado a cabo en la Catedral Metropolitana de la Ciudad de México, además de ser posible, es completamente necesario el monitoreo permanente. La intervención física debe ser ejecutada y supervisada por personas con la capacidad técnica demandada.

1.2.13. Monitoreo de intervención física

Esta etapa se refiere al seguimiento en sitio y gabinete del comportamiento estructural de los elementos, conexiones y sistema completo, incluyendo condiciones de frontera locales y en caso de ser necesario, urbanas. Con el

propósito de tener mayor certeza en la intervención, se recomienda que el monitoreo se lleve a cabo con la instalación, de al menos: acelerómetros, deformímetros, escaneos con nubes de puntos, topografía, drones, etc. Cabe mencionar que la simple instalación de los instrumentos o hacer levantamientos con tecnología de puntos no son ni representan por sí solos el monitoreo, ya que todo ello implica un procesamiento especializado de los datos, información e interacción entre dichos procesamientos de cada instrumento, además de modelaciones matemáticas, estadísticas y/o probabilísticas. El objetivo de monitorear la intervención física es detectar comportamientos estructurales no deseados o no favorables para el inmueble que se esté interviniendo, o inclusive en inmuebles aledaños, en estos últimos por lo regular existe la posibilidad de afectación debido a la necesidad de renivelar edificios muy pesados, y por lo tanto, poder regresar a las fases o etapas pertinentes para corregir los imprevistos o retomar nuevamente decisiones de intervención completamente reversibles.

1.2.14. Documentación del proceso

Esta fase es de suma importancia, debido a que todo lo que se planea ejecutar, ya sea, que se lleve a cabo o no, debe quedar plasmado en documentación que permita ser resguardada tanto en el sitio patrimonial, como en las dependencias e instituciones designadas para la salvaguarda del patrimonio arquitectónico construido. Es fundamental que se documenten los procesos, con la finalidad de que en tiempos futuros (cuando posiblemente deje de funcionar lo que se ha empleado en el pasado o en nuestro presente), se puedan retomar y considerar en los nuevos estudios y propuestas estructurales, evitando utilizar una perspectiva a priori que después se tenga que verificar si funciona o no; esto con la finalidad de tener una mayor certeza de que lo que se proponga funcione en el futuro y se conserve para más generaciones.

CAPÍTULO 2

LA FÁBRICA Y EL ARCO ESTRUCTURAL DE MAMPOSTERÍA

"El conocer la naturaleza y el pasado del objeto histórico, ayudará a entender mejor su presente y, por lo tanto, poder aprender de éste"

Fuente: Propia.

2.1. La fábrica

Como ya se mencionó, la mampostería antigua (fábrica) es muy diferente y variada de la que actualmente se construye mediante confinamiento de concreto reforzado. Los primeros indicios que se conocen de la mampostería antigua son de cuando el "homo-sapiens" deja de refugiarse en cavernas y comienza a configurar el espacio que le rodea, al buscar una forma de protección comienza *apilando piedras naturales* que le permitían edificar espacios, en términos arquitectónicos a esta actividad de colocar manualmente piedras hasta formar un elemento arquitectónico-estructural como un muro (ver figura 2.1) se le conoce como *aparejo*.

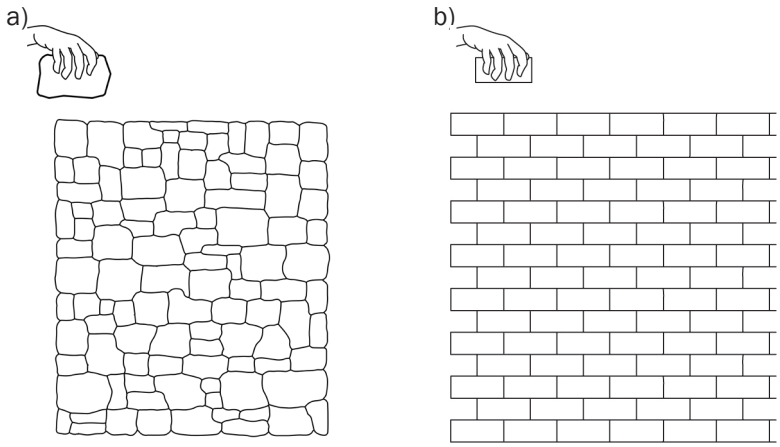


Figura 2.1. *Aparejo de muros de mampostería*: a) mampostería de piedra irregular a hueso; b) mampostería de piedra artificial regular a hueso (sin junta de mortero o argamasa). Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente con la aparición de civilizaciones, la mampostería comienza a tener un mayor desarrollo debido a múltiples factores, dando como resultado una gran variedad de mamposterías, por mencionar algunas: la utilización de argamasas que rellenaban huecos entre piedras y que añadían cohesión y adherencia entre ellas; los avances tecnológicos como la fabricación de herramientas que permitieron labrar piedras generando bloques con aspectos geométricos regulares y específicos para su colocación en los aparejos; la creación de piedras artificiales debido a la carencia de piedras naturales en el entorno.

La gran cantidad de tipos de mamposterías alrededor del mundo es tan variada que actualmente existen diversas clasificaciones, por mencionar algunas de estas: Huerta, S. (2004) extrae una tipología (ver figura 2.2.1 y 2.2.2).

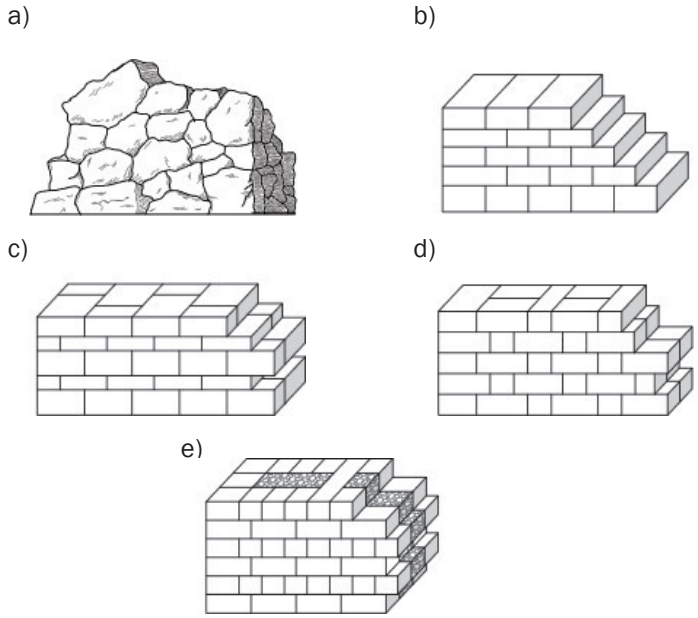


Figura 2.2.1. *Principales tipos de mampostería utilizados en edificios históricos*: a) mampostería concertada; b/c/d) distintos tipos de sillería; e) muro compuesto de parámetros de sillería atados con perpiaños y núcleo de mampostería u hormigón. Fuente: figura retomada de Huerta, S. (2004) y redibujada por el autor de este libro.

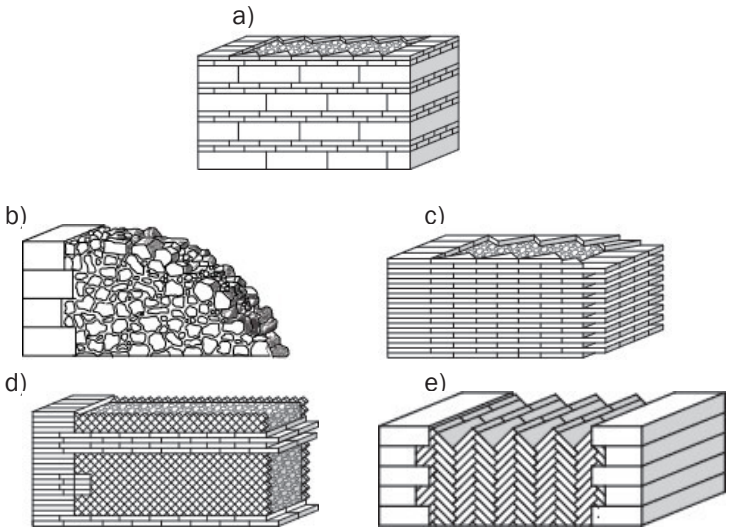


Figura 2.2.2. *Principales tipos de mampostería utilizados en edificios históricos*: a) muro romano de núcleo de hormigón con revestimiento de piedra y ladrillo; b) muro de parámetros de mampostería irregular, con núcleo de cascote, y rematado con una cadena de sillería; c–e) distintos tipos de muros romanos, algunos muy idealizados. Fuente: figura redibujada de Huerta, S. (2004) y redibujada por el autor de este libro.

Por otra parte, Meli R. (1998) menciona que en México existen principalmente 4 tipos de configuraciones en la mampostería de edificios históricos, esto se puede apreciar según el tipo de colocación, la cantidad de mortero agregado, el tipo de piedra implementada, incluso el tipo de corte que tiene la piedra; todas estas diferencias son observables en la figura 2.3.

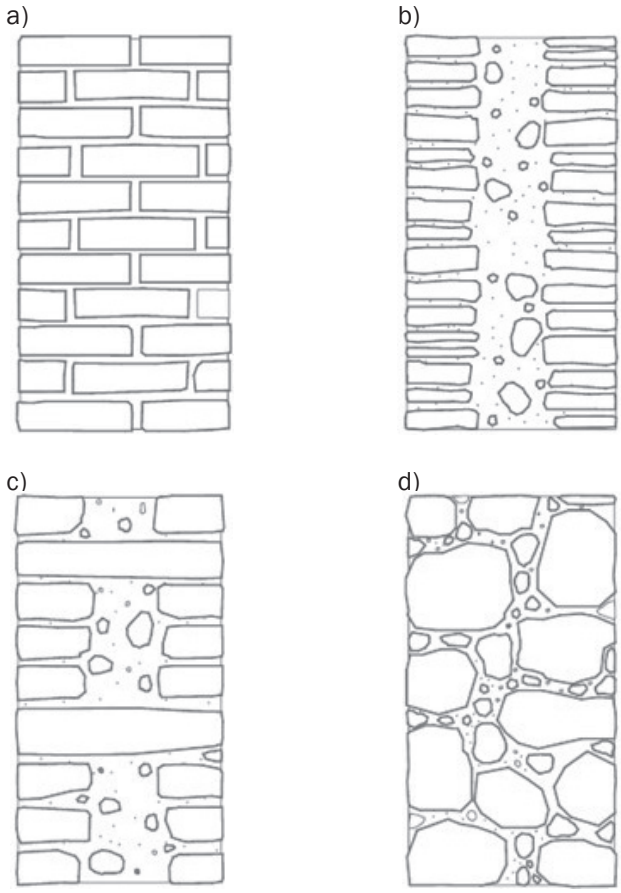
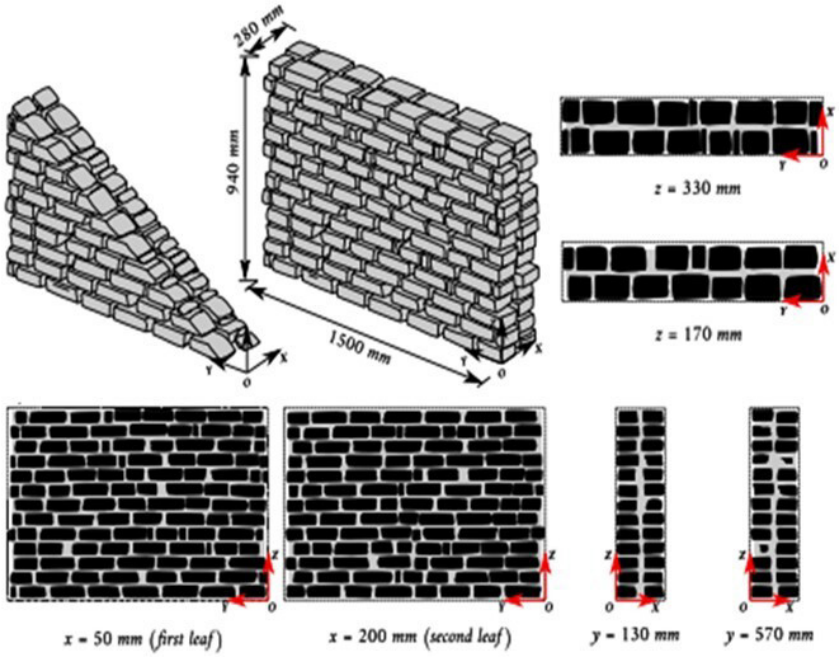
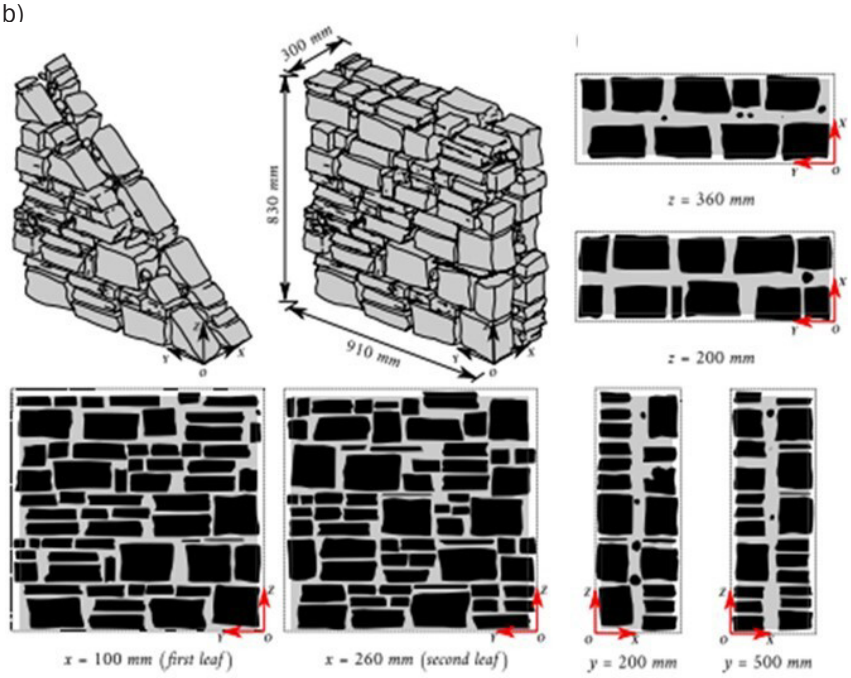


Figura. 2.3. *Tipos de mampostería común en México según su configuración interna de elementos compositivos*: a) mampostería de ladrillo junteado con mortero cal/arena; b) mampostería irregular desconectado del interior, comúnmente conocido como de relleno o limosna; c) mampostería irregular con elementos de amarre; d) mampostería irregular de piedra. Fuente: figura retomada de Meli, R. (1998) y de Segovia Miguel A. (2022).

a)


280 mm
940 mm
1500 mm
z = 330 mm
z = 170 mm
x = 50 mm (first leaf)
x = 200 mm (second leaf)
y = 130 mm
y = 570 mm

b)


300 mm
830 mm
910 mm
z = 360 mm
z = 200 mm
x = 100 mm (first leaf)
x = 260 mm (second leaf)
y = 200 mm
y = 500 mm

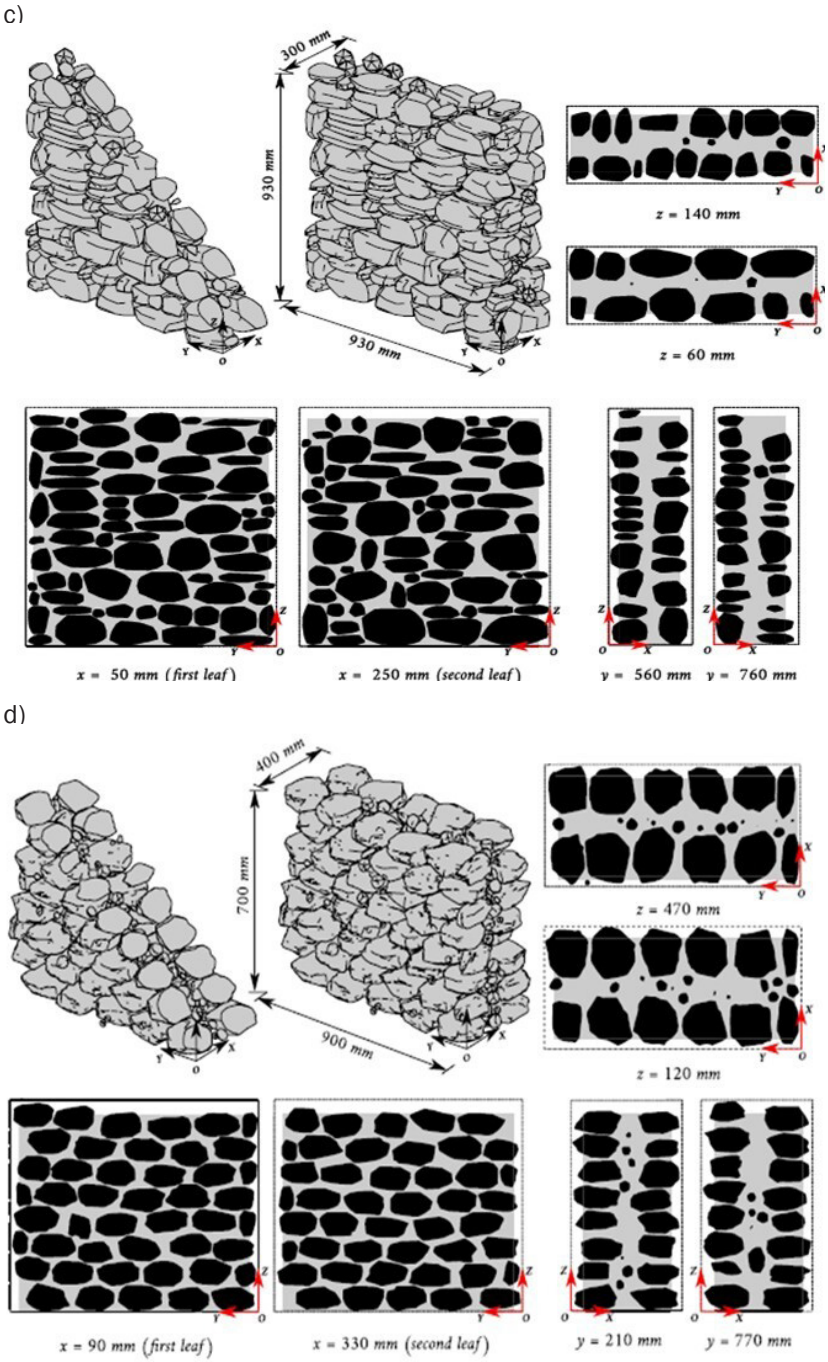


Figura 2.4. *Diferentes tipos de mampostería irregular en representación de un muro*: a) mampostería de ladrillo junteado con mortero cal/arena; b) mampostería irregular desconectado del interior, comúnmente conocido como de relleno o limosna; c) mampostería irregular con elementos de amarre; d) mampostería irregular de piedra. Donde: *x, y, z*, son los ejes de referencia para situar las distancias a las cuales se dibujaron los planos ortogonales. Fuente: Fuente: retomado de Shaqfa M. et al, (2022).

La primera mampostería (figura 2.4a) es un aparejo de ladrillo o bloque (también llamado *sillería*), consistente en piezas labradas y colocadas en hiladas con juntas de mortero, aunque también pueden estar construidas a hueso, es decir, sin ningún tipo de mortero entre las superficies que se tallaban o trabajaban, para hacerlos coincidir en superficies y aristas.

La segunda mampostería (figura 2.4b) consiste en un aparejo de piedra irregular con mortero (argamasa) en el núcleo y sillería en los extremos, se debe tener cuidado al estudiar un inmueble histórico ya que los muros de mampostería pueden aparentar que se trata de un aparejo de sillería, cuando internamente está compuesto por piedra irregular y argamasa.

La tercera mampostería (2.4c) es parecida a la segunda, con la distinción de que se prolongan grandes bloques intermedios con la finalidad de "amarrar" los extremos, dichos bloques generan un comportamiento en conjunto de la mampostería, debido a que están colocados de forma que atraviesan el espesor del elemento.

La última (figura 2.4d) está formada por piedras irregulares de diversos tamaños, asentadas con mortero (argamasa) y dicha composición de materiales genera un comportamiento discontinuo entre las piedras, aunque a veces se considera homogéneo desde una macro perspectiva, análogamente a lo que se le designa como concreto ciclópeo.

En la figura 2.4 se presentan algunos tipos de mampostería con dimensiones y arreglos de piedra y argamasa.

Cada uno de estos aparejos tiene un comportamiento estructural diferente, además de que, durante la construcción de edificios históricos, los materiales utilizados ya sea para construir columnas, muros, arcos, bóvedas, cúpulas, etc., dependieron de su ubicación geográfica, tipo de material disponible y del periodo en el que fue realizada la obra, siendo esto la principal razón, de que cada edificio histórico posea diferentes tipos de mampostería.

Además de estas clasificaciones, cabe mencionar que el *Servicio Sísmico Regional de la Dirección General del Sector de Políticas Territoriales y Ambientales en la Región Toscana, Italia*, proporciona un abanico de tipologías de mampostería en su normatividad D.2.7 (2002) *Istruzioni Tecniche per la redazione degli elaborati di indagine, documentazione e progetto di interventi di miglioramento antisísmico (2002)*, págs. 40-50.

2.2. Características de la mampostería como elemento estructural

De manera general, el comportamiento estructural de cualquier edificio depende, en mayor o menor grado, de dos características principales; 1) *Las características mecánicas* de los materiales que lo componen y 2) *Las características geométricas-constructivas* que poseen los elementos estructurales y el sistema completo. Estas dos características son determinantes para proporcionar la seguridad y estabilidad a los sistemas estructurales, debido a esto, los códigos actuales de análisis y diseño estructural han establecido parámetros que están relacionados con la geometría y las propiedades de los materiales empleados. Cabe mencionar que la normatividad y reglamentos nacionales e internacionales referentes al análisis estructural, son muy poco específicos para tratar temas referentes a los inmuebles históricos, por tal motivo, solo algunas fracciones de estos llegan a ser aplicables.

Una vez que se entiende la composición material de los elementos y del sistema estructural, se puede definir que la *fábrica* se trata de un sistema estructural de elementos superpuestos que generan una transmisión de cargas a compresión en donde se asumen esencialmente 3 hipótesis, Heyman J. (1997) en su libro *"The Skeleton Stone"* menciona dichas suposiciones:

1. Las estructuras de fábrica poseen una resistencia a compresión infinita.

2. Las estructuras de fábrica (mampostería no reforzada) no admiten esfuerzos a tensión.

3. No ocurren fallas por deslizamiento.

La primera hipótesis se debe a las altas resistencias a compresión de las piedras con las que están construidos este tipo de edificios y también a los robustos espesores de los elementos estructurales. La segunda hipótesis se confirma debido a que en las estructuras de fábrica no existe una continuidad total de elementos estructurales, la adherencia entre las piedras llega a ser tan baja, que muchas veces se desprecian los esfuerzos de tracción. La última hipótesis planteada por Jaques Heyman juega un papel fundamental a la hora de analizar este tipo de estructuras, donde los esfuerzos de compresión impiden un deslizamiento entre sus elementos, tal como lo menciona Huerta S. (2004), las fricciones entre los materiales de la estructura son impedidas por los altos coeficientes de rozamiento de las piedras. Estas hipótesis permiten estudiar el comportamiento de las estructuras de fábrica, donde la geometría resulta esencial en los análisis.

En la antigüedad no se estudiaban las propiedades mecánicas de los materiales con arduo detalle como actualmente se llega a proceder, la geometría presentaba un papel fundamental a la hora de construir edificios. La construcción de edificios, ahora etiquetados como "históricos", estaba direccionada por los avances tecnológicos y conocimientos heredados de cada época, en donde inicialmente se obtenían claros libres mediante el uso de dinteles de madera o piedra apoyados sobre dos pilares con características similares (ver figura 2.5).

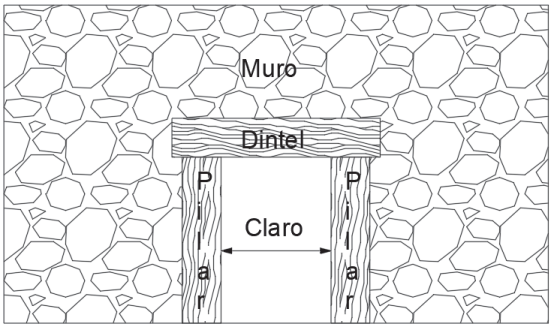


Figura 2.5. Muro de mampostería irregular con argamasa, dintel y pilares de madera para cubrir un vano o claro. Fuente: Elaboración propia.

Estos recursos constructivos llegaron a condicionar las dimensiones de los vanos (claros) por algunos factores, tales como: el tamaño de las piedras y de los troncos de los árboles, así como la necesidad de contar con árboles de calidad para la construcción de edificios. El proceso de construir con estos elementos daba como resultado que los espacios fueran reducidos y la iluminación se viera limitada.

Con el paso del tiempo el empleo de nuevas técnicas y materiales revolucionaría la ingeniería hasta la aparición del *arco* el cual es uno de los elementos más distintivos y peculiares de las estructuras antiguas.

2.2.1. El arco estructural de mampostería

Uno de los elementos principales que definen el comportamiento de la estructura de fábrica en los edificios históricos es el arco de mampostería, el cual puede estar constituido por piedras naturales (regulares o irregulares), piedras artificiales de barro y a su vez pueden estar unidas con argamasa o simplemente superpuestas (a hueso) tal y como se muestra en la figura 2.6.

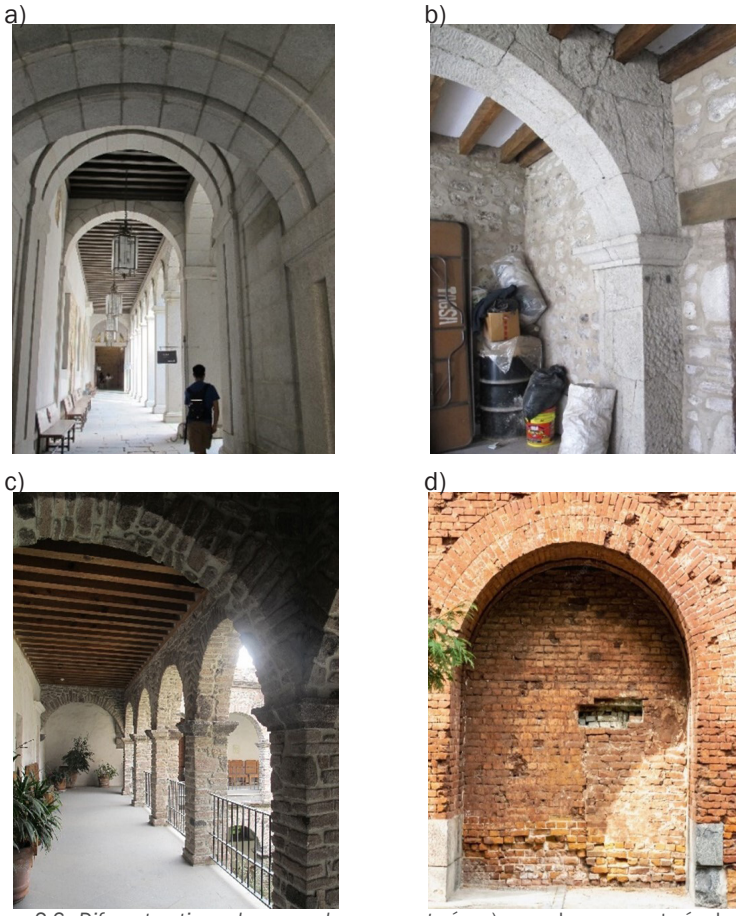


Figura 2.6. *Diferentes tipos de arcos de mampostería*: a) arco de mampostería de bloques de piedra regulares talladas y colocadas a hueso (sin argamasa); b) arco de mampostería de piedra irregular colocada a hueso; c) arco de mampostería de pequeñas piedras irregulares unidas con argamasa; d) arco de mampostería de ladrillo de barro. Fuente propia.

De origen el arco tiende a ser una estructura semicircular, parabólica o elíptica elaborada a partir de la colocación de bloques de piedra en contacto directo (dovelas) a través de una directriz geométrica (figura 2.7).

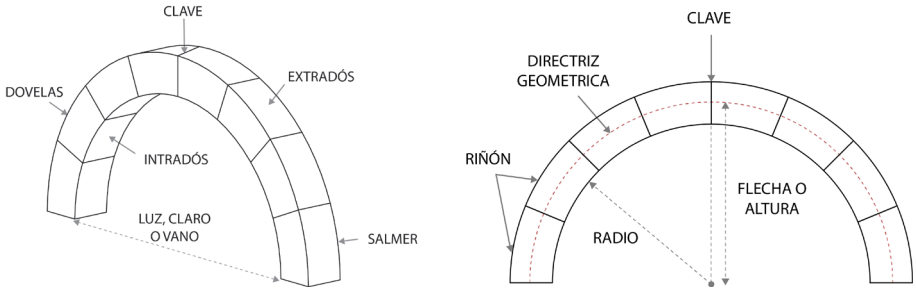


Figura 2.7. Elementos esenciales de un arco de sillería. Fuente: Elaboración propia.

La directriz geométrica de los arcos puede entenderse fácilmente en el estudio de la catenaria; Santa Ana P. (2018) la describe como la curva que adquiere el peso propio de una cadena o cuerda de densidad uniforme sujetada en sus dos extremos (ver figuras 2.7 y 2.8), en donde cada elemento está siendo sometido a esfuerzos de tracción, debido al peso propio de la cadena. Cuando dicho sistema es invertido, es decir, se construye una estructura con la misma forma geométrica como lo es el arco, se obtiene una estructura en donde sus elementos están siendo sometidos a esfuerzos de compresión debido a su peso gravitacional. Esto es apreciado en la figura 2.8, la cual muestra las tendencias tanto a la tracción, como a la compresión para los distintos tipos de propuestas de arcos de acuerdo con cada época.

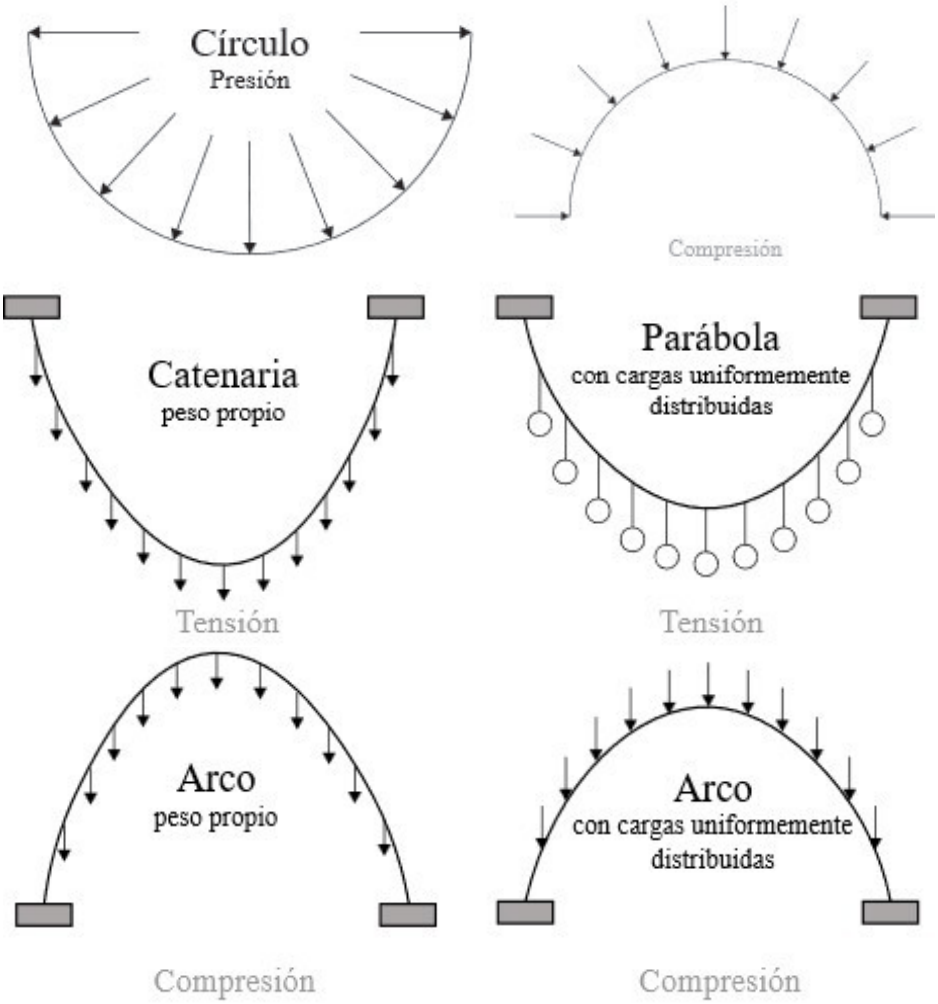


Figura 2.8. Analogía de cadenas y arcos sometidos ante su propio peso, con carga uniformemente distribuida y presión radial. Fuente: García, 2007.

Para lograr construir la forma geométrica de un arco mediante piedras o bloques es necesario colocar una estructura provisional de madera o de algún material que permita apilar los bloques, ya sea de piedra regular o piedra irregular, hasta formar la estructura del arco tal y como se muestra en las figuras 2.9.1 y 2.9.2.

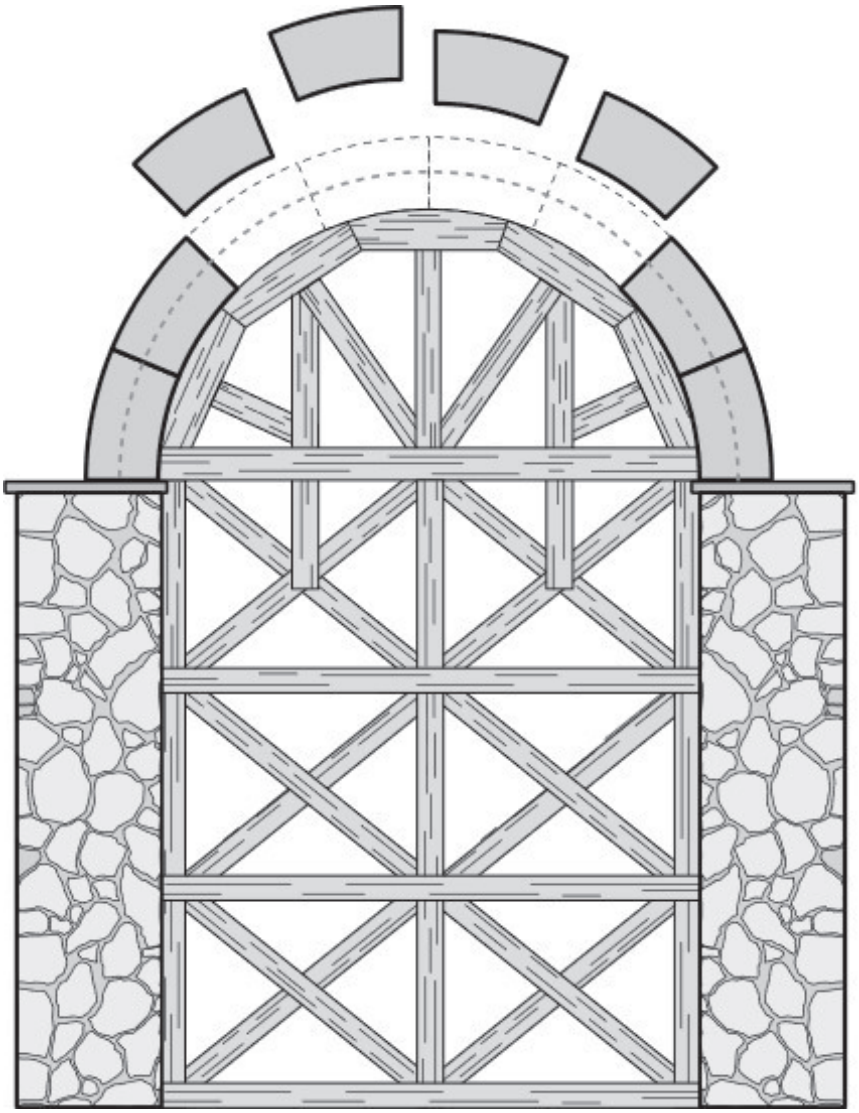


Figura 2.9.1. Proceso de construcción de un arco de mampostería de medio punto discretizado en dovelas. Colocación de dovelas. Fuente: Elaboración propia.

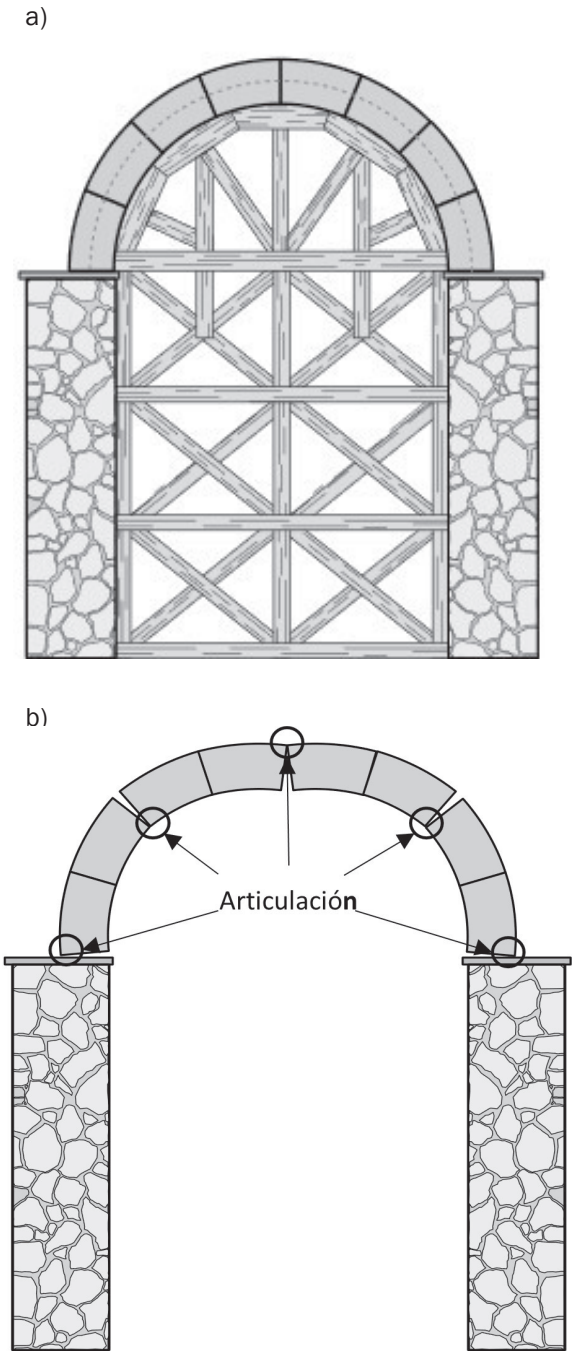


Figura 2.9.2. *Proceso de construcción de un arco de mampostería de medio punto discretizado en dovelas*: a) cierre completo de arco construido a base de dovelas; b) retiro de cimbra y ajuste geométrico por formación de rótulas debido a la acción de la línea de empuje, cuando no existen elementos o carga por encima del arco, que lo confine. Fuente: Elaboración propia.

Cuando se trata de arcos que forman parte de un sistema más complejo como vanos de accesos, andadores o como parte de puentes, tal y como se observa en las figuras 2.10.1 y 2.10.2, dicho ajuste y formación de rótulas tienden a ser nulas, debido a las fuerzas de compresión que genera el peso que producen los elementos situados por encima del arco, lo que impide el reacomodo de sus elementos, una vez retirada la cimbra.

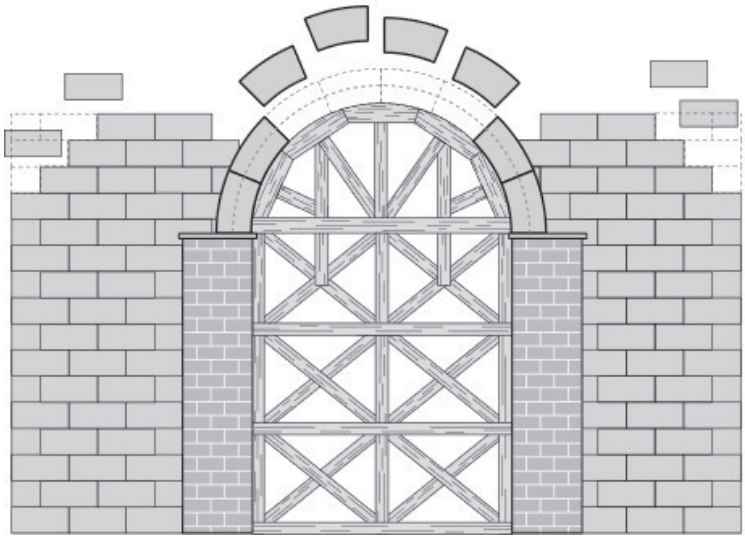


Figura 2.10.1. *Sistema estructural de arcos con cargas gravitacionales producidas por elementos situados en la parte superior*. Colocación gradual de sillares para construir el arco y el muro de mampostería adyacente. Fuente: Elaboración propia.

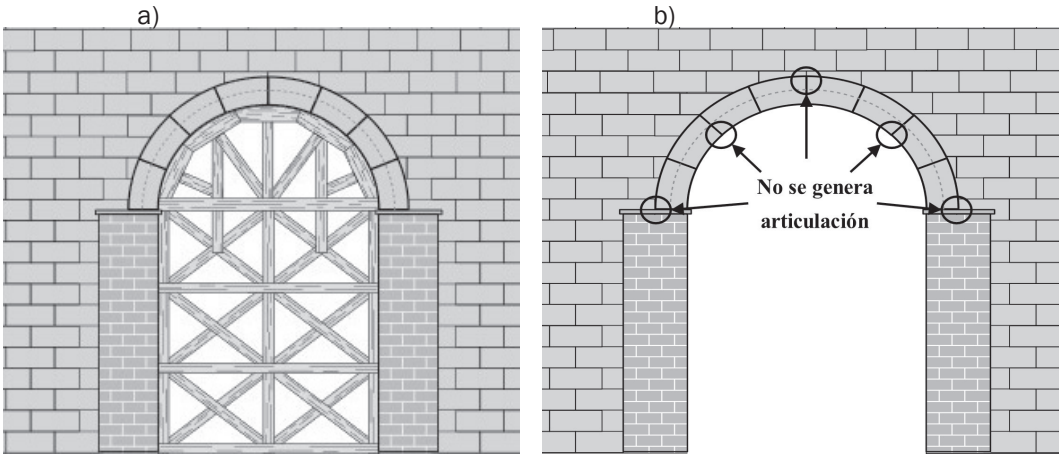


Figura 2.10.2. *Sistema estructural de arcos con cargas gravitacionales producidas por elementos situados en la parte superior*: a) muro acabado de construir con mampostería y arco de sillería; b) muro totalmente construido con arco completamente estable, dado que no se generan rótulas por recibir carga y confinamiento superior. Fuente: Elaboración propia.

2.2.1.1. La línea de empuje

Para definir el comportamiento estructural del arco, es necesario comprender que cada dovela o tramo discretizado de mampostería genera un empuje debido a la carga gravitacional (figura 2.11.1 a), dicho empuje se transmite a la dovela inferior subyacente en una superficie o punto de contacto (figuras 2.11.1 b y 2.11.2 a).

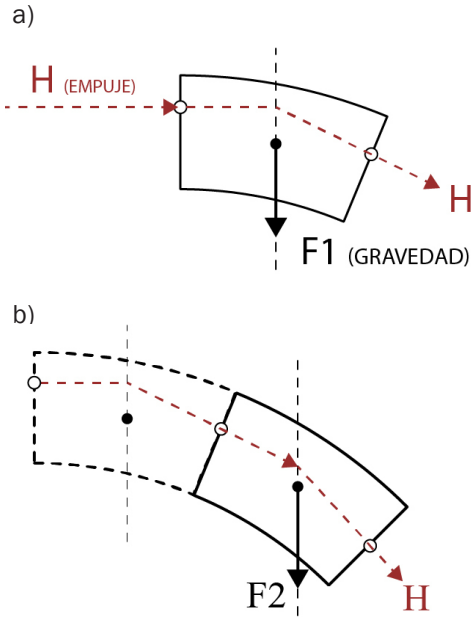
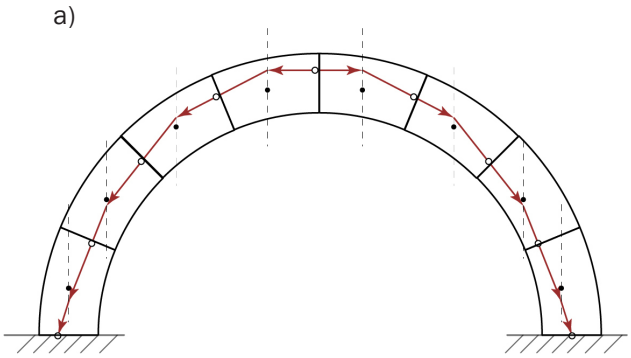


Figura 2.11.1. *Transmisión de empujes con línea suavizada en un arco discretizado en dovelas*: a) línea de empuje generada por la transmisión de cargas producidas por el peso propio de las dovelas, donde F1 y F2 son fuerzas gravitacionales que se asume actúan en el centro geométrico de estas; b) empuje transmitido en superficies de contacto, las cuales pueden tener juntas entre dovelas o estar recargadas a hueso. Fuente: Elaboración propia.



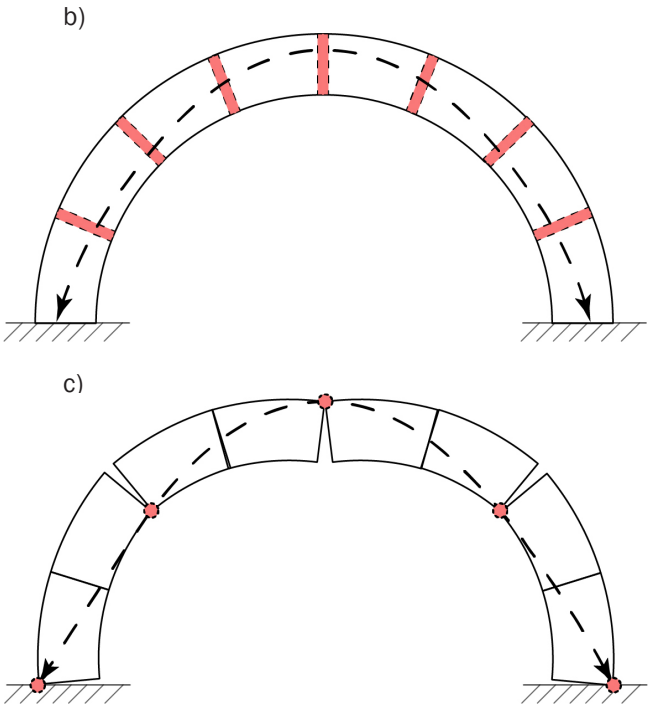


Figura 2.11.2. *Transmisión de empujes con línea suavizada en un arco discretizado en dovelas*: a) empuje transmitido con cambio de dirección en la línea imaginaria vertical que pasa por el centro geométrico; b) línea de empuje suavizada dentro de la geometría del arco que todavía no genera rótulas; c) línea de empuje y formación de rótulas en zonas de frontera. Fuente: Retomado de Huerta S. (2004) y redibujado por el autor de este libro.

Tal como lo describe Huerta S. (2004), la línea de empuje es el lugar geométrico del punto de paso de los esfuerzos en un sistema de planos de corte dados, donde la resultante entre las cargas generadas de dovela a dovela será la línea de empuje. Desde otra perspectiva se puede decir que la línea de empuje también es la sucesión de puntos de transmisión de fuerzas.

Del análisis cualitativo previamente descrito sobre el comportamiento de un arco de mampostería, es posible afirmar lo siguiente:

1. El empuje generado por un arco tiene su génesis en el elemento superior, es decir, en la última dovela (clave) colocada en el proceso constructivo.

2. Los empujes son fuerzas que dependen de las condiciones geométricas del arco, es decir, la simetría, dimensiones y posiciones, generando empujes horizontales e inclinados.

3. Los empujes transmitidos entre dovelas configuran su inclinación al pasar por el centro geométrico debido a fuerzas verticales derivadas del peso gravitacional.

El concepto de la línea de empuje es fundamental para comprender el estado de equilibrio en los arcos de mampostería, dado que es un elemento estructural que transmite fuerzas a compresión (en las superficies o puntos de contacto) a los demás elementos estructurales tales como estribos (muros), contrafuertes, cimentaciones, etc., los cuales pueden alterar la estabilidad de dicho equilibrio estructural, por lo que es necesario que estos elementos resistan los esfuerzos generados por la línea de empuje y se mantengan también en equilibrio para evitar el colapso de la estructura.

Guindal Mas-Lafarga (2011) menciona que debido a que las estructuras de fábrica son un sistema de elementos independientes, esto debido a que las piedras son colocadas superpuestas y que el mortero (argamasa) solo aporta una adherencia entre ellas, cualquier modificación en su geometría provocaría una serie de *incógnitas hiperestáticas* que reconfiguren la estabilidad de los edificios históricos. Esto conlleva a que en un arco esencialmente exista una alta probabilidad de diversas líneas de empujes de acuerdo con la posición de sus elementos (ver figura 2.12).

Para concebir el concepto de la línea de empuje es necesario representarla visualmente mediante el uso de vectores, pues en sí, la línea de empuje es una fuerza que posee magnitud, dirección y sentido manifestándose en el espacio y generada por los pesos de las dovelas de un arco. En la figura 2.12 a-b se observa el análisis vectorial-gráfico de un arco simétrico, respecto a su eje vertical, donde se determina una línea de empuje. Huerta S. (2004) describe que en la clave se origina un empuje inicial horizontal (H) el cual debe prolongar su línea de acción hasta la convergencia con la línea de acción del peso gravitacional (W1) de la dovela, el cual se sabe pasa por su centro de gravedad (figura 2.12 a), además se deben proyectar ambas fuerzas en un polígono vectorial (figura 2.12 b), donde el vector resultante (1) entre ambas fuerzas es el empuje transmitido a la dovela inferior el cual posee magnitud, dirección y sentido diferente, dicho empuje (1) se proyecta en el espacio en el punto de convergencia entre la prolongación de la fuerza gravitacional (W1) y el empuje inicial (H), hasta llegar a (W2).

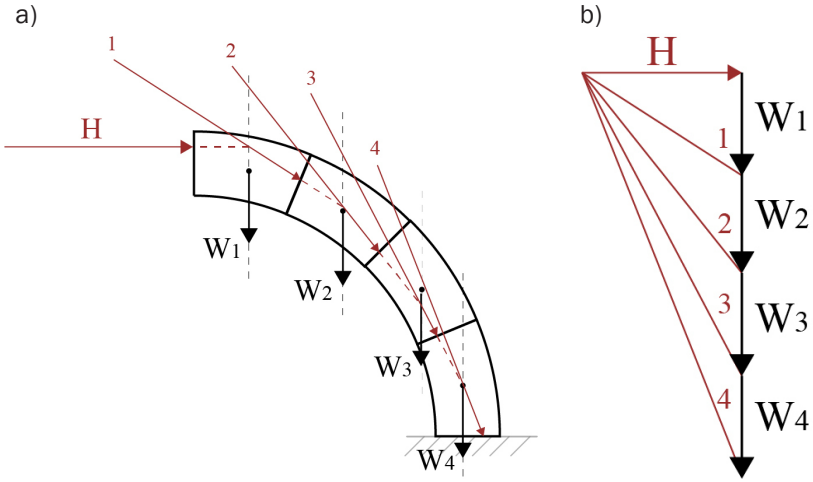


Figura 2.12. *Determinación de una posible línea de empuje horizontal de un arco simétrico*: a) representación visual de la línea de empuje, donde la envolvente resultante de todos los empujes (H, 1, 2, 3, 4) es la línea punteada no suavizada; b) polígono vectorial para la determinación de los empujes transmitidos entre dovelas. Fuente: Elaboración propia.

Cabe mencionar que la modificación de las cargas gravitacionales reconfigura la posición de la línea de empuje final, esto quiere decir que, si aumentan las cargas gravitacionales, entonces la magnitud, sentido y dirección de las componentes resultantes toman otra trayectoria. Es decir, si el empuje (H) es reducido, la proyección de la línea tiende a verticalizarse. Bajo esta premisa, el empuje mínimo (Hmin) corresponde al vector horizontal proyectado en la frontera superior de la zona etiquetada como "clave", y a su vez el empuje máximo (Hmax) corresponde al vector horizontal proyectado en la frontera inferior de la zona "clave" (ver figuras 2.13.1 y 2.13.2).

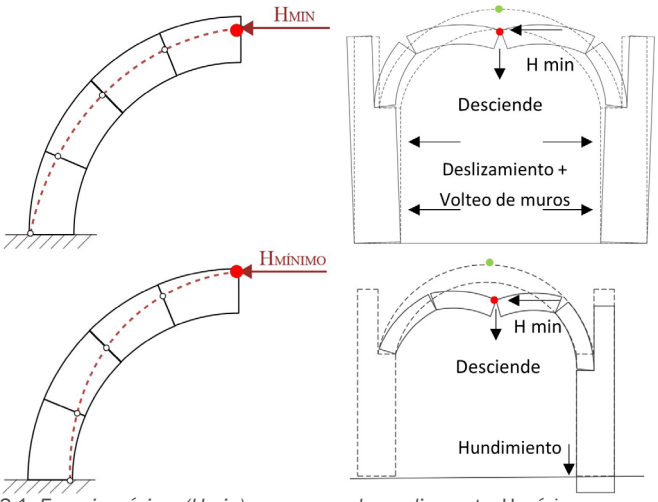


Figura 2.13.1. *Empuje mínimo (Hmin) en un arco de medio punto*. H mínimo, ocurre cuando el arco tiende a descender. Fuente: Elaboración propia.

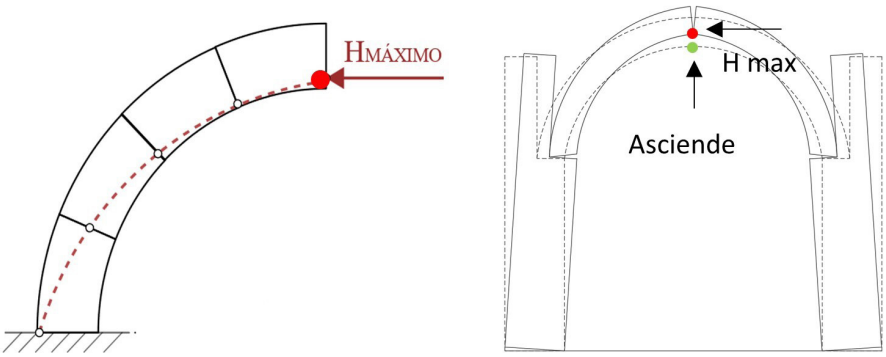
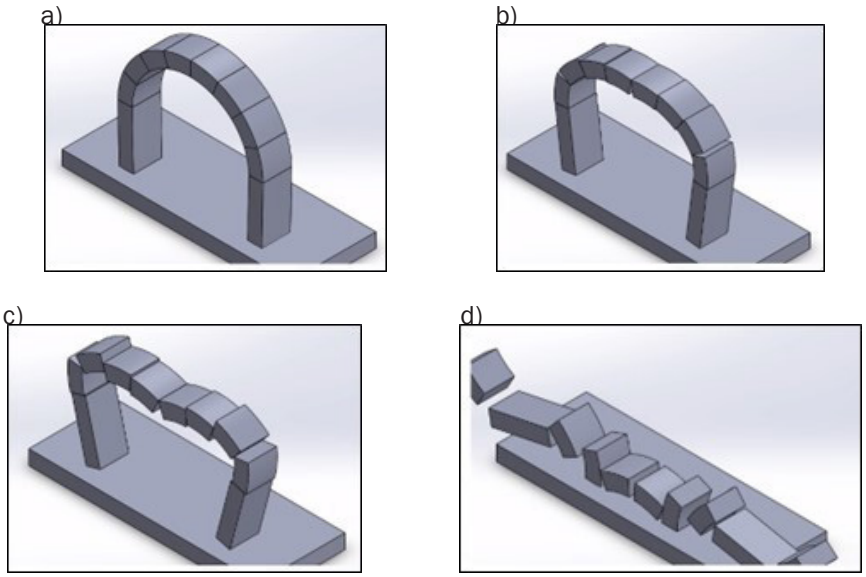


Figura 2.13.2. *Empuje máximo (Hmax) en un arco de medio punto*. H máximo, ocurre cuando el arco tiende a subir. Fuente: Elaboración propia.

Es importante señalar que la configuración de la línea de empuje puede tomar diferentes configuraciones, dependiendo del comportamiento de la estructura, en las figuras 2.13.1 y 2.13.2, se muestran algunas de estas.

El efecto producido por el aumento o disminución en la magnitud de la línea de empujes puede entenderse en el estudio de los antifuniculares que determinan los empujes máximos y mínimos.

Como ya se mencionó, la determinación de las posibles líneas de empuje es simplemente un análisis del equilibrio en arcos de mampostería. Huerta S. (2004) menciona que cuando la línea de empuje incide en el borde del espesor del arco se generan rotulas, es decir, articulaciones que pueden configurar una inestabilidad del arco generando un mecanismo de colapso (ver figura 2.14).



e)

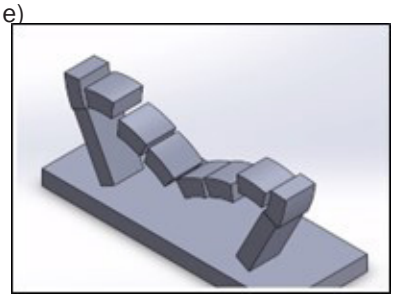


Figura 2.14. Modelo estructural de secuencia de colapso de un arco de dovelas apoyado en dos pilares (estribos), representado con elementos de contacto discontinuos: a) arco en equilibrio; b) formación de articulaciones debido a la línea de empujes; c) desplazamientos en los apoyos del arco y rotación en la base de los pilares, previos al colapso del sistema; d) desprendimiento de las dovelas del arco y volteos de los apoyos; e) colapso total del sistema estructural. Fuente: Elaboración propia.

Dichas articulaciones pueden ser visibles debido a que se generan aberturas en algunas zonas del arco, donde es posible apreciar una separación entre dovelas, ya sean naturales o tramos de dovelas formadas por el mismo comportamiento del elemento estructural.

Para evitar que la línea de empujes se proyecte en el borde del arco y genere un mecanismo de colapso es necesario que los empujes incidan en el tercio central de inercia (ver figura 2.15) también conocido como *núcleo central de inercia*, dicha condición es necesaria para que la línea de empuje no genere tensiones que provoquen a su vez la formación de articulaciones.

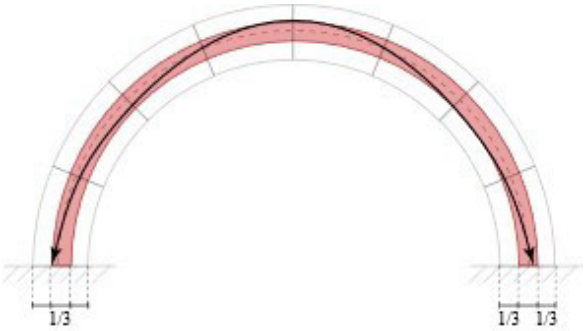


Figura 2.15. Tercio central de seguridad de un arco de mampostería. Fuente: Retomado de Lafarga, Guindal Mas. (2011). y redibujado por el autor de este libro.

Guindal Mas-Lafarga (2011) define que dicha regla del tercio central justifica las zonas de compresión del arco derivado de la línea de empujes (ver figura 2.15), la regla del tercio central es un coeficiente geométrico que determina un límite en cuanto al espesor del arco. Heyman (1969) propone que para determinar el coeficiente geométrico es necesario dividir el espesor del arco real entre el espesor del arco límite. Para establecer la seguridad en el

equilibrio del arco, el coeficiente geométrico es de 3 aunque en la práctica están dados por el valor de 2, esto quiere decir que el espesor mínimo del muro real, deberá ser el doble. Todo esto permite que la línea de empujes permanezca dentro del espesor del arco.

El arco de mampostería define un antes y un después en la historia de la ingeniería estructural de edificios históricos, pues la comprensión de su comportamiento mecánico es vital para el análisis de este tipo de edificios.

2.2.2. Bóvedas

El arco puede constituir un elemento estructural esencial de un edificio (como formar parte de un acceso, de un acueducto, de un puente o como simples vanos), también puede definir la forma geométrica del inmueble, es decir, al extruir un arco a lo largo de una profundidad se obtiene lo que se denomina *bóveda de cañón corrido* (ver figura 2.16). Dicho elemento sirve como cubierta en un espacio comprendido entre dos apoyos (muros), donde su comportamiento mecánico, es el mismo que se ha llevado a cabo con el arco, la línea de empujes ocurre a lo largo de la bóveda.

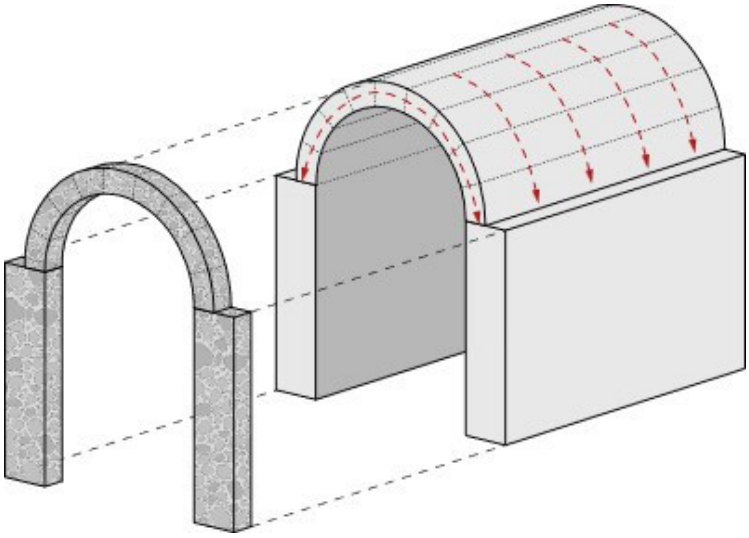


Figura 2.16. Bóveda de cañón corrido, construida a partir de la extrusión de un arco, el cual puede ser de mampostería irregular o regular. Fuente: Elaboración propia.

Delimitar el espacio con este elemento estructural tenía sus ventajas y desventajas, pues el paso de la luz era por huecos, pequeños accesos y ventanas. Los muros (estribos) debían tener espesores mayores para que la línea de empujes no se proyectara fuera de las secciones de los elementos estructurales y así evitar el desequilibrio de la estructura (ver figura 2.17).

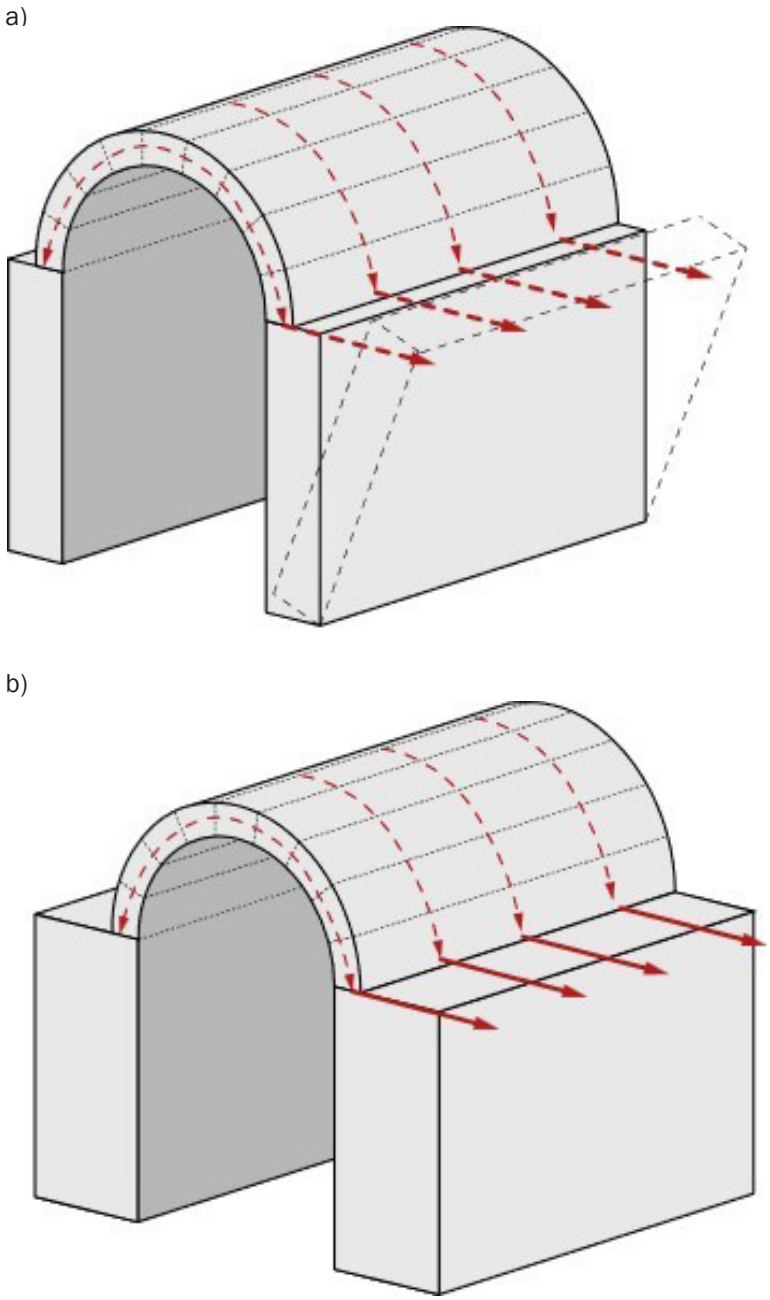
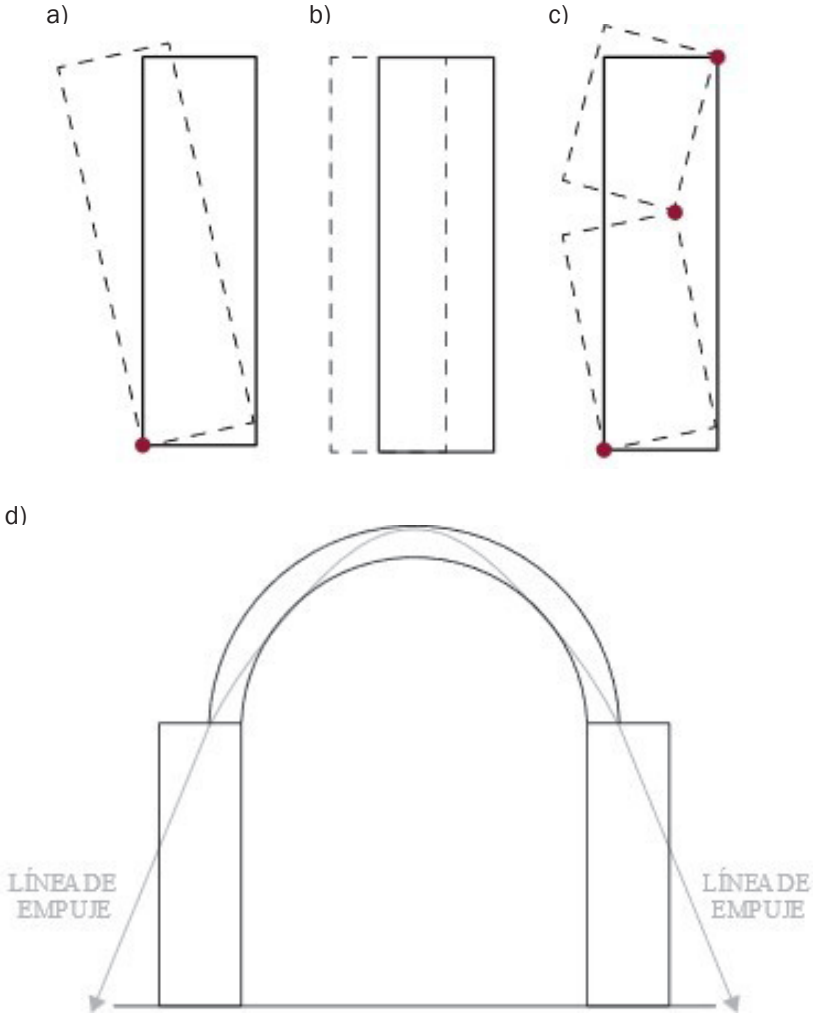


Figura 2.17. *Bóveda de cañón trazada mediante la extrusión de un arco*: a) componente de fuerza lateral en los apoyos del arco. Muro con deficiencia de peso y geometría, representado con tendencia a volteo; b) muro sin deficiencia geométrica y peso, sin tendencia a volteo (estable). Fuente: Elaboración propia.

2.2.3. Estribos

Como ya se ha mencionado, la estabilidad geométrica de las estructuras de edificios históricos es el umbral del análisis estructural, es por ello que, para que un arco o bóveda de fábrica permanezcan en equilibrio deben estar apoyados sobre elementos estructurales que resistan, por una parte, los esfuerzos de compresión generados por las líneas de empuje evitando los desplazamientos del arco y, por otra parte, cumplir con los momentos resistentes de volteo. De acuerdo con Lacobelli F. (2018) los muros también sufren efectos debido a la línea de empuje, también llamados *mecanismos de colapso* (figura 2.18).



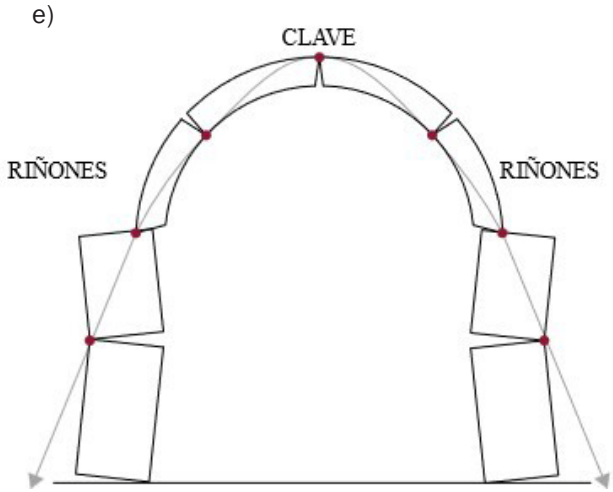


Figura 2.18. *Mecanismos de comportamiento estructural y/o posible colapso en muros de mampostería*: a) volteo; b) desplazamiento o deslizamiento; c) bisagra central; d) línea de empuje; e) comportamiento del sistema en 2D. Fuente: Retomado de Lacobelli F. (2018), Huerta S. (2004) y redibujado por el autor de este libro.

La geometría siempre resulta fundamental para comprender el comportamiento de las estructuras antiguas. Actualmente se conoce que los mecanismos de colapso, en estos inmuebles, dependen principalmente de la composición constructiva de los elementos estructurales, donde la disposición de los materiales que los integran, toman un papel importante para determinar cierto tipo de mecanismo de colapso; pues al existir diversos aparejos en las mamposterías antiguas ocurre una gran diversidad de comportamientos en los elementos, estos son, por citar algunos: arcos, bóvedas, estribos, muros, etc., que forman parte del sistema estructural.

Por ejemplo, si se agrietan en el sentido longitudinal, pudiera significar la posibilidad de que los muros perimetrales paralelos a la bóveda se están separando por algún motivo (ver figura 2.19 a), en caso de que la grieta sea en su sentido transversal, es probable que la estructura esté sufriendo hundimientos diferenciales o que se hayan integrado elementos incompatibles en la composición de los materiales constitutivos (ver figura 2.19 b), es decir, estos elementos se comportan de acuerdo con sus condiciones de frontera, materiales constitutivos en su estado actual, formas, etc.

El estado de esfuerzos y equilibrio de la bóveda se puede describir de acuerdo con la posición de la línea de presiones dentro de la estructura. Con el fin de que la línea no quede fuera de la sección de la estructura, sus apoyos deben ser lo suficientemente robustos para poder contrarrestar la componente horizontal; por otro lado, se puede aminorar el efecto desfavorable de dicha

componente por medio de relleno sobre sus riñones, debiendo ser éste el adecuado para generar cierta verticalidad al empuje horizontal.

a)

b)

Figura 2.19. *Grietas visibles en la parte interior del inmueble*: a) grietas generadas posiblemente por la separación de los muros perimetrales paralelos a la bóveda; b) grietas generadas posiblemente por hundimientos diferenciales. Fuente: Retomado de Segovia, M. A. (2022).

CAPÍTULO 3

CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LA MAMPOTERÍA IRREGULAR

¿Si en una analogía médico-paciente, el edificio a intervenir fuera tu propio cuerpo o el de algún familiar, le permitirías al médico cirujano que intervenga sin hacer estudios previos?"

Fuente: Propia.

3.1. Los materiales de fábrica y sus propiedades mecánicas

Una parte fundamental de cualquier análisis estructural, es identificar los materiales que componen a la estructura de los edificios. Tratándose de inmuebles históricos de mampostería, resulta complicado definir a *criterio simple*, la composición de materiales que poseen debido a la gran variedad de mamposterías que se construyeron alrededor del mundo, es por ello, que deben realizarse estudios específicos y particulares para tener el conocimiento de su composición mecánica y constructiva. Desde el punto de vista estructural, la mampostería es un sistema compuesto de materiales que trabajan principalmente a *compresión*, aunque esto no quiere decir que existan mamposterías con *tracción* siempre nula. Por tal motivo, es de vital importancia conocer los materiales, el tipo de aparejo, sus *propiedades* tanto *microscópicas* como *macroscópicas*, y con ello poder comprender dicho comportamiento estructural, para que resulte más eficaz la modelación estructural. La mampostería irregular posee características *mecánicas* y *geométricas* que se deben tener en cuenta en los modelos virtuales desarrollados mediante software de ingeniería estructural. Dentro de las principales propiedades mecánicas que son de interés para el análisis y la modelación estructural son: los *módulos elásticos, densidades, resistencias a compresión, tracción, cortante, coeficientes de Poisson y coeficientes de fricción, entre otros*.

3.1.1. Pruebas invasivas y no invasivas

Como menciona Peña F. et al (2018), la manera en que las propiedades mecánicas de los materiales pueden ser obtenidas, es mediante evidencias experimentales realizadas *in situ* o en un *laboratorio*.

Estas evidencias se pueden obtener mediante pruebas con *técnicas destructivas* (ver figura 3.1) que son extracciones del material (corazones o muestras); dicha técnica puede catalogarse como muy poco o mínimamente destructiva, debido a que se asemeja a una aguja que se introduce en un cuerpo humano.

También pueden obtenerse con *técnicas destructivas y semidestructivas* (ver figuras 3.2.1 y 3.2.2) que prácticamente no dañan la estructura y que aportan información como la composición y el deterioro de los materiales; para desarrollarlas, se necesita de personal especializado que pueda interpretar los resultados. Algunas de estas técnicas son: *sónicas, de radar, termografía, vibración ambiental, gatos planos, etc.*

Figura 3.1. *Pruebas invasivas o también llamadas destructivas (extracción de corazones) realizadas mediante la obtención de pequeñas muestras de argamasa en un muro de mampostería irregular en la Parroquia de San Agustín Obispo Chiautla de Tapia, Puebla. Fuente propia.*

a) b)

Figura 3.2.1. *Pruebas no destructivas mediante escaneos y reportes visuales en la Parroquia de San Agustín Obispo, Chiautla de Tapia, Puebla*: a) geo-radar trabajando en desplante de la intersección entre muro y pilastra; b) observación directa en muros agrietados. *Fuente propia*.

a) b)

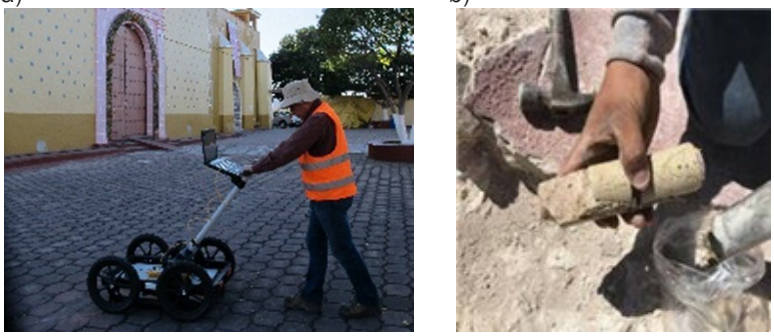
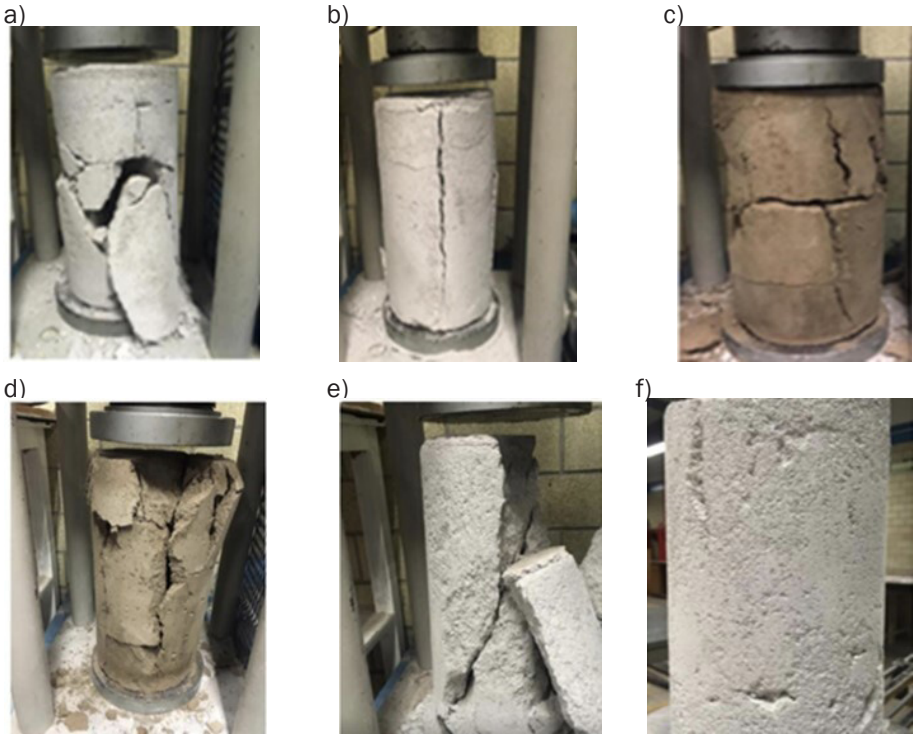


Figura 3.2.2. *Pruebas no destructivas mediante escaneos y reportes visuales en la Parroquia de San Agustín Obispo, Chiautla de Tapia, Puebla*: a) recorrido con geo-radar en el exterior del inmueble patrimonial; b) extracción de argamasa en bóveda. *Fuente propia.*

Es importante mencionar, que cuando se obtienen muestras mediante pruebas destructivas, es necesario crear otras muestras (ver figura 3.3) con una composición de materiales similares a los extraídos, esto con el objetivo de comparar la compatibilidad de sus propiedades y posteriormente realizar una posible intervención; lo anterior es aplicable siempre y cuando el sistema requiera verdaderamente las mismas características de los materiales, ya que resulta difícil pensar que si con dichas características, la estructura presenta deterioros importantes, sería ilógico volver a intervenir con materiales que tienden a fallar. En estos casos es fundamental pensar en nuevos paradigmas de intervención, acordes a la época o sistema estructural, con miras al correcto funcionamiento estructural y a la salvaguarda patrimonial. Para esto no hay que olvidar que la compatibilidad no solo es de los materiales, también debe verificarse con el objetivo de la intervención.

Con la finalidad de contar con parámetros mecánicos de argamasas que comúnmente se utilizan en la intervención física, en la figura 3.3 se presentan algunos que obedecen a ciertas proporciones de materiales.



g) h) i)

Figura 3.3. *Especímenes sometidos a compresión simple, para obtener propiedades mecánicas de argamasas comunes utilizadas en la restauración de mamposterías irregulares de inmuebles patrimoniales en México*. Pesos específicos en kg/cm3: a) 0.001722418; b) 0.0016461; c) 0.001569138; d) 0.00159253; e) 0.00175703; f) 0.001419046; g) 0.001535003; h) 0.00182905; i) 0.00168509. Fuente propia.

Tabla 3.1. *Propiedades físicas y mecánicas obtenidas de ensayos en probetas de argamasas comunes, utilizadas en la restauración de mamposterías irregulares de edificios patrimoniales en México. Fuente propia.*

PRB	a)	b)	c)ar	d)ar	e)	f)	g)cf	h)	i)
PRP	2.5,1,10	2,1,10	4,1,10	4,1,1,10	3,1,10	4,1,10	1,1,10	3,1,10	2,1,10
ϕ	15.1	15	15	15	15	15.1	15	15	15.1
H	30	30	30	30	30	26.8	28.7	29.5	29.8
A	179.07	176.7	176.7	176.7	176.7	179.07	176.7	176.7	176.7
W	9.25	8.73	8.32	8.44	9.31	6.81	7.78	9.53	8.87
V	5372.1	5301	5301	5301	5301	4799	5071	5212	5265
CME	430	468	270	384	498	268	748	488	496
σc	2.40	2.65	1.53	2.17	2.82	1.5	4.23	2.76	2.81
Ea	840.45	926.99	534.8	760.61	986.42	523.82	1481.61	966.46	982.46

PRB = Probeta; PRP = Proporciones; ϕ (cm) = Diámetro; H (cm) = Altura; A (cm2) = Área de sección transversal; W (kg) = Peso de PRB; V (cm3) = Volumen; CME (kg) = Carga máxima de ensayo; σc (kg/cm2) = Esfuerzo Máximo alcanzado a compresión simple; Ea (kg/cm2) = Módulo de Young de argamasa, (ver figura 2.3).

En la tabla 3.1, las proporciones (PRP) que contienen tres números separados por comas, se refiere a proporciones de *arena-cal-Sika latex*, excepto las probetas indicadas con las letras “cf” ó “ar”, las cuales significan que además de la arena contienen arcillas (para el caso “ar”), o que en lugar de arena contiene cero-fino (polvo de mármol fino, “cf”), por lo que se deben leer

de la siguiente manera: tomando como ejemplo la probeta “a)” se tiene una proporción de 2.5:1:10, esto significa que contiene 2.5 partes de arena, 1 parte de cal apagada y 10% de Sika latex; por otra parte, para “c) ar” se tiene una proporción de 4:1:1:10 esto quiere decir que contiene 4 partes de arcilla, 1 parte de arena, una parte de cal apagada y 10% de Sika latex; para “g) cf” se tiene una proporción de 1:1:10, es decir, se integró 1 parte de polvo de mármol fino (comúnmente llamado cero-fino), 1 parte de cal apagada y 10% de Sika latex. Cabe mencionar que el Sika latex se utilizó como sustituto del mucílago de nopal, pero también es importante señalar que se deberían realizar este tipo de pruebas en especímenes con mucílago en lugar de Sika latex para comparar propiedades.

3.1.1.1. Analogía: análisis médico-paciente vs estructurista-edificio patrimonial

De manera análoga, una prueba destructiva o invasiva puede compararse a la toma de muestra de sangre que se le realiza a un paciente por medio de una aguja, la cual es mínimamente invasiva; con esto se puede obtener un primer diagnóstico paramétrico. Análogamente, podríamos suponer que la estructura del inmueble es el cuerpo humano y la aguja con la que se le extrae la sangre, es el equipo de extracción de núcleos (corazones); se observa que la invasión tanto al cuerpo humano, como al objeto arquitectónico, es verdaderamente mínima y el beneficio que se obtiene es muy amplio.

Como nota complementaria, se aclara que una prueba no invasiva sería cuando el médico toma la temperatura o mide la presión de un paciente.

Siguiendo la línea de las analogías, podemos decir que las intervenciones en restauración se pueden asimilar médicamente a una transfusión de sangre donde se busca mejorar las condiciones del paciente, para ello, las distintas pruebas nos ayudan a determinar los tipos de materiales que deben compararse con otras muestras similares para lograr que exista una compatibilidad en las funciones mecánicas, químicas, geométricas, etc., todo esto con el fin de que las intervenciones sean favorables al correcto y deseado comportamiento estructural del sistema. De manera semejante a la medicina, cuando se requiere encontrar la compatibilidad de órganos, sangre, fluidos, tamaños, etc., así la intervención estructural de edificios patrimoniales debe ser *compatible* y además *reversible*.

En las figuras 3.4 y 3.5 se muestran esfuerzos alcanzados a compresión simple y módulos elásticos máximos en las probetas ensayadas en laboratorio.

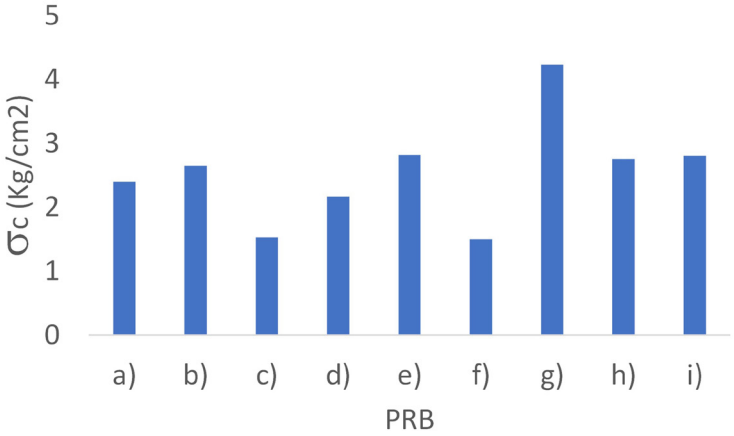


Figura 3.4. *Esfuerzo máximo a compresión simple en probetas de argamasas ensayadas a los 28 días (ver tabla 3.1). Fuente: Elaboración propia.*

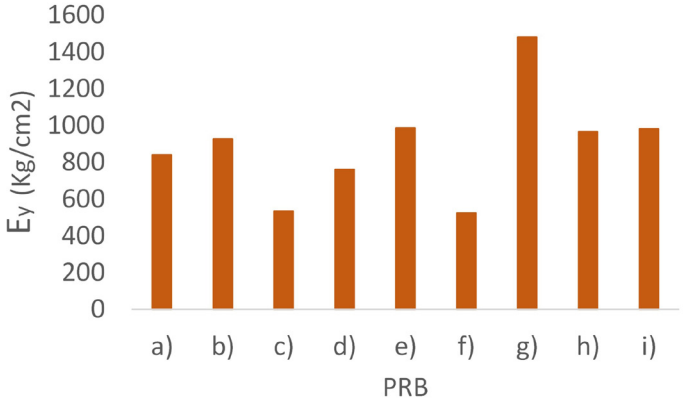


Figura 3.5. *Módulo de Young obtenido en probetas de argamasas sometidas a compresión simple, ensayadas a los 28 días (ver tabla 3.1). Fuente: Elaboración propia.*

Existe una gran cantidad de materiales utilizados en la construcción "inicial u original" de edificios históricos de mampostería, como se ha mencionado anteriormente, dentro de los principales materiales que constituyen su composición se encuentran: las piedras, ladrillos o sillares y argamasas, estos pueden variar en su naturaleza, apariencia, dimensiones, morfología, composición química y mecánica.

3.1.2. Piedra

La piedra es el material por excelencia que define el comportamiento estructural de los edificios históricos, esto debido a sus grandes capacidades de *resistencia a compresión* y la estabilidad derivada de las fricciones entre los elementos de piedra, además proporciona a los edificios durabilidad debido a su excelente relación con la intemperie que les ha permitido existir hasta el día de hoy. Dentro de las características principales de la utilización de la piedra, está la versatilidad para la construcción con este material, ya que su maleabilidad al ser labrada, resulta favorable a la hora de modificar las dimensiones para que coincidan con las demás piedras tal y como se muestra en la figura 3.6.

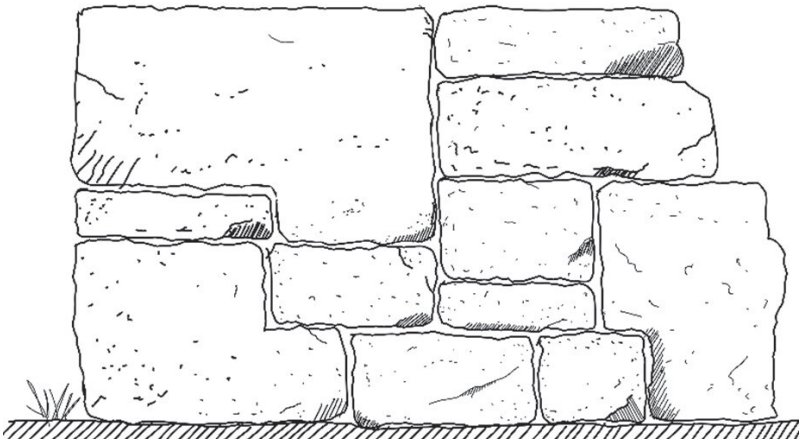


Figura 3.6. *Muro de piedra labrada, una zona sin intercalar. Fuente: Elaboración propia.*

A lo largo de la historia, las construcciones antiguas han sido materializadas principalmente por piedras de diversos tipos y tamaños. Al hablar de la morfometría en los elementos estructurales, la piedra puede estar constituida de 3 principales formas diferentes (ver figuras 3.7.1 y 3.7.2): de una sola pieza (monolito), la cual se utilizaba para formar elementos estructurales, ya sean arcos, muros o columnas principalmente; de bloques (de sillería) colocados en seco (sin mortero) o con una capa delgada de mortero; de formas irregulares con diversos tamaños, las cuales se colocaban con argamasa (mortero). De acuerdo con Meli R. (1998) dentro de la tipología de piedras generalmente se encuentran las rocas ígneas (granito y basalto), sedimentarias (areniscas y calizas) y metamórficas (mármoles). Chávez M. (2005) también describe la variedad de piedras ígneas utilizadas en edificios históricos de México, tales como la chiluca, el basalto-recinto, el tezontle, la piedra braza, toba (cantera), no obstante, también existe una diversidad de piedras.

a) b)

Figura 3.7.1. *Tipos de piedra utilizados en elementos estructurales de acuerdo con su morfometría*: a) fuste de columna de una sola pieza de piedra; b) arco y columna de sillería (bloques). Fuente propia.

Figura 3.7.2. *Tipos de piedra utilizados en elementos estructurales de acuerdo con su morfometría.* Arco de piedra irregular con argamasa (mortero). Fuente propia.

Meli, R (1998) menciona un "*efecto de tamaño*" en todas las piedras, debido a que tienen pequeñas imperfecciones, grietas o fisuras (dependiendo el tipo de piedra), que reducen su resistencia significativamente, esto da paso a un agrietamiento interno o externo hasta la falla de la pieza. Mientras la piedra sea mayor en sus dimensiones, existe una mayor posibilidad de encontrar heterogeneidad y, si la pieza es menor en sus dimensiones, la probabilidad de encontrarla se reduce.

Con la finalidad de contar con propiedades mecánicas y características físicas de la mampostería, principalmente la irregular, se reúnen y se listan dichas propiedades tanto nacionales como internacionales en las tablas 3.2 a 3.4.

Tabla 3.2. *Resistencias a compresión y tracción (tensión), módulo de elasticidad y peso volumétrico de piedras utilizadas en las estructuras de fábrica*. Fuente: retomadas de Huerta S. (2004) y transformadas a unidades del S.I. (kg/cm² y kg/m³). Conversión de unidades realizadas por el autor de este libro.

Tipo de piedra	***Resistencia a compresión (kg/cm²)***	***Resistencia a tensión (kg/cm²)***	***Módulo de Young (kg/cm²)***	***Peso volumétrico (kg/m³)***
Tiza	21-122	1-15	20,394 - 101,971	1,427.6
Caliza	71 -408	5-51	50,986 - 305,915	2,141.4
Caliza compacta	408-1,020	41-153	305,915 - 611,830	2,406.5
Esquistos	153-714	61-153	71,380 - 509,858	2,263.8
Granito	612-1,836	71-204	152,957 - 713,801	2,906.2
Cuarcita	816-3,059	71-204	254,929 - 815,773	3,120.3

Tabla 3.3. *Propiedades mecánicas de piedras utilizadas en edificios históricos*. Fuente: retomada y convertida a unidades del sistema internacional kg/cm² y kg/m³ de Huerta S. (2004). Conversión de unidades realizadas por el autor de este libro.

Tipo de piedra	***Resistencia a compresión (kg/cm²)***	***Peso específico (kg/m³)***
	Pierdras Volcánicas	
Basalto Sueco	1,912	3,060
Basalto de Auvernia	2,078	2,880
Lava de Vesubio	563	2,600
Lava gris (Roma)	228	1,970
	Granitos	
Granito azul (Aberdeen)	767	2,620
Granito verde (Vosgos)	620	2,850
Granito gris (Bretaña)	654	2,740
Granito gris (Vosgo)	423	2,640
	Piedras Areniscas	
Arenisca muy dura	813	2,520
Arenisca blanca	923	2,480
Arenisca abigarrada	400	2,170
	Piedras Calizas	
Mármol negro (Flandés)	789	2,720
Mármol blanco veteado	298	2,700
Mármol rojo (Devonshire)	522	2,700
Caliza de Portland	262	2,420
Piedra negra (St-Fortunat)	627	2,650
Travertino	174	2,360
	Ladrillos	
Ladrillo duro muy cocido	150	1,550
Ladrillo rojo	57	2,170
Ladrillo rojo pálido	39	2,080

Tabla 3.4. Propiedades mecánicas de piedras utilizados en edificios históricos de México. Fuente: Tabla generada por el autor de este lbro con base en informacion proporcionada por Chávez M. (2005).

Tipo de piedra	***Peso volumétrico (kg/m³)***	***Resistencia a compresión (kg/cm²)***
Chiluca	2,000 - 2,600	300 - 500
Basalto-recinto	2,450 – 2,850	600 – 2,600
Tezontle	650 – 1,315	45 - 75
Piedra braza	1,800 – 2,600	-
Toba (cantera)	1,750 – 2,400	100 - 250

3.1.3. Barro

En algunos edificios históricos era imprescindible la creación de elementos artificiales para su construcción debido a diversos motivos, ya sea por técnicas de construcción o por la carencia de piedras naturales. Minke G. (2005) menciona que el barro es un elemento de construcción artificial que se elabora a partir de una mezcla de agua con diversos tipos de tierra natural como la arcilla, limo, arena y agregados. Las primeras presentaciones del barro fueron en tierra apisonada también llamada *tapial* (ver figura 3.8) y como recubrimiento o relleno de estructuras entramadas de madera o caña también llamadas *bajareques*; la desventaja de estos sistemas constructivos era su baja resistencia ante los efectos de la intemperie y su fácil agrietamiento por contracción al contacto con el sol, dicho agrietamiento se puede reducir al añadir paja, no obstante, son muy raras las construcciones que lograron sostenerse hasta nuestros tiempos y principalmente las propiedades mecánicas eran diversas según las características del suelo Meli R. (1998).

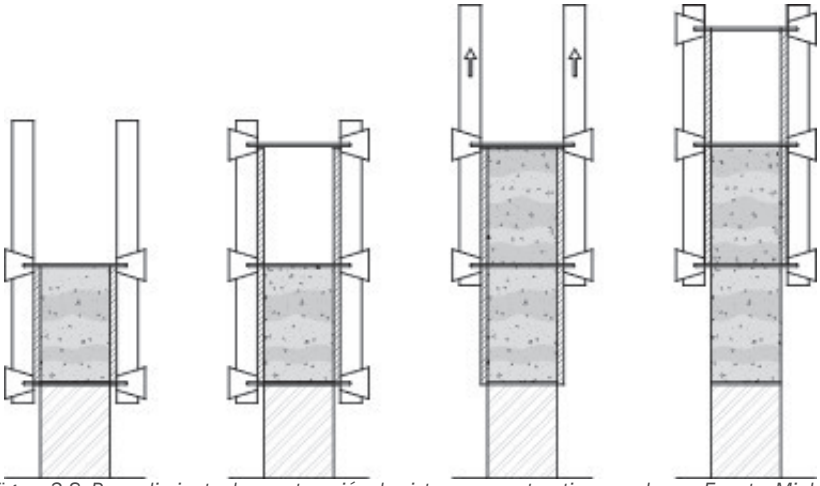


Figura 3.8. *Procedimiento de construcción de sistemas constructivos con barro. Fuente: Minke Gernot (2005).*

Dichas técnicas con barro evolucionaron hasta la fabricación manual de bloques de barro con tierra arcillosa, también denominados *adobes*, los cuales eran secados previamente al sol, y unidos con un mortero del mismo material o con algún aglutinante, esto permitió que las construcciones tuvieran mayor resistencia a la intemperie y aumentando un poco su capacidad a la compresión.

Posteriormente en las construcciones históricas, y más precisamente en el auge del imperio romano, se emplearon bloques de barro cocido en hornos, también llamados *ladrillos*, los cuales eran horneados a temperaturas cercanas a los 1,000°C, aumentando significativamente sus propiedades de resistencia a la compresión y durabilidad en la intemperie; sin embargo, dependerá de los materiales utilizados en su mezcla. Su uso más importante, fue durante el imperio romano en la elaboración de arcos y bóvedas.

Los ladrillos cocidos superan la capacidad de resistencia a compresión que los adobes, pero son inferiores a las capacidades de las piedras naturales; en comparación con los ladrillos actuales, poseen resistencias similares a los de la época romana y bizantina, Huerta S. (2004).

En la tabla 3.5 se recolectan las propiedades mecánicas del barro de investigaciones realizadas por diversas fuentes.

Tabla 3.5. *Propiedades mecánicas de distintos elementos elaborados con barro. Fuente: Retomado de Catalán, P. (2019) et al, Minke G. (2005), Huerta S. (2004) y converción de unidades realizadas por el autor de este libro.*

Elemento artificial	***Peso volumétrico (kg/m³)***	***Resistencia a compresión (kg/cm²)***	***Módulo de Young (kg/cm²)***	***Autor***
Adobe	1,376.617	10.91 – 13.86	2,015.36 – 3,239.33	Catalán, P. et al. (2019) .
Tierra apisonada (Tapial)	1,700 -2,200	5-50	6,118.3 – 7138.01	Minke G. (2005)
Ladrillo cocido	1,550 – 2,080	50.98 – 336.5	50985.81 - 254929.05	Huerta S. (2004)

3.1.4. Morteros

En la construcción de elementos estructurales de edificios históricos se debían unir las piezas (bloques o ladrillos), las cuales eran labradas para dar formas y dimensiones para facilitar su colocación, tal es el caso del aparejo de piedras en seco; no obstante, a pesar de ser muy detallados, existían pequeñas aperturas imperfectas o cuando se colocaban bloques sobre bloques en las columnas, requería algún tipo de nivelación para la siguiente pieza, entonces surgió la necesidad de crear un material con propiedades plásticas que nivelara y rellenara los espacios, Meli R. (1998). Otra necesidad era la adhesión entre las piedras naturales o artificiales, esto originó la creación de un mortero (también llamado *argamasa*) el cual proporcionó todas estas cualidades de relleno y adherencia (ver figura 3.9).

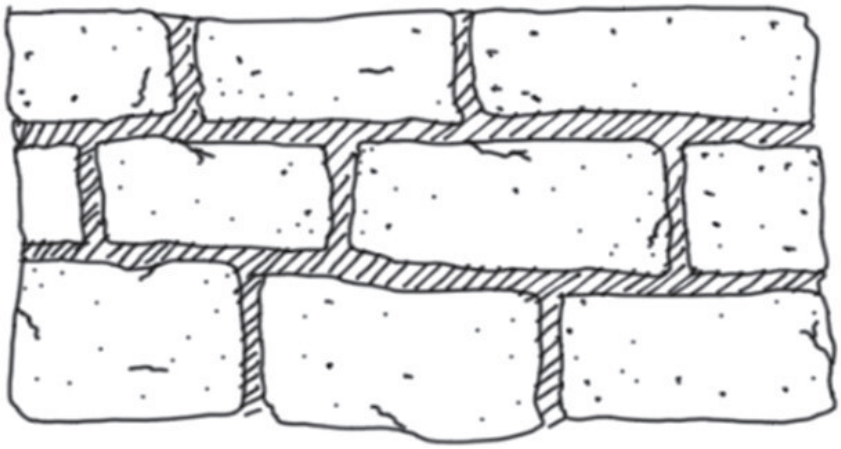


Figura 3.9. *Utilización de mortero para adherir y rellenar vacíos en los elementos de mampostería. Fuente: Elaboración propia.*

El mortero inicialmente fue el barro o la mezcla del mismo material del que se formaban las piezas, tal como en el caso del adobe; la mezcla que más se utilizaba era la de cal-arena, y es la que se encuentra en gran parte de los edificios antiguos. Y no fue hasta que los romanos agregaron puzolana a la mezcla, que se creó un mortero impermeable, de un fraguado más rápido, y de una resistencia mucho mayor a la de barro, dando paso al desarrollo del primer concreto.

En las tablas 3.6, 3.7 y 3.8 se presentan propiedades mecánicas de los morteros utilizados comúnmente en los edificios históricos.

Tabla 3.6. *Tabla de resistencias a compresión de morteros en ensayos de Rondelet y Vicat (Marvá 1902)*. Fuente: retomada del libro de Arcos Bóvedas y Cúpulas de Santiago Huerta (2004).

Autores	**Tipo de mortero**	***Esfuerzo a compresión (kg/cm²)***
Vicat	Cal y Arena	19
	Idem, íd.	35
Rondelet	Puzolana	37
	Enlucido	76
	Mortero de ruinas de Bastilla	55
	Idem de Cal hidráulica ordinaria	74
Vicat	Idem de id. Eminentemente hidráilica	144
	Mortero de Cal Hidráulica	
	285 kg de cal por 1m³ de arena	
	5-10 días	2.7
	11-15 días	4.3
	5-21 íd	5-5.5
	300-360 kg de cal por 1m³ de arena	
	45 íd	9.8
	3 meses	16.3
	6 íd	23,7-41
	500 kg de cal por 1m³ de arena	
	6 meses	70-74
	Yeso amasado con agua	50
Rondelet	Idem íd con lechada	73
Vicat	Idem íd espeso	90
	Idem íd claro	42

Tabla 3.7. *Tabla de propiedades mecánicas de los morteros, Collignon (1885).* Fuente: retomada de Huerta S. (2004) y conversión de unidades realizada por el autor de este libro a kg/cm² y kg/m³.

Tipo de mortero	***Esfuerzo a compresión (kg/cm²)***	***Peso específico (kg/m³)***
Cal y Arena de río	31	1,630
Cemento para baldosas	48	1,460
Puzolánico	37	1,460
Mortero Hidráulico con Cal	144	-

Tabla 3.8. *Tabla de propiedades mecánicas de morteros extraídos de monumentos de la región de los Balcanes*. Fuente: Penelis (1996), retomada de Meli P. (1998).

Monumento	***Resistencia a compresión (kg/cm²)***	***Proporción cal : arena***
Rotonda de Tesalónica	23	1: 3
Rotonda de Tesalónica	37	2: 5
Hagia Sophia	45	-
Bey Hamani	12	1: 2.5
Minarete de la Rotonda	12	1: 2.5

De acuerdo con la D.2.7 (2004), un mortero con elevadas propiedades mecánicas puede proporcionar un grado suficiente de homogeneidad en la mampostería, a pesar de que las piedras sean secas y pequeñas, y que además estén mal colocadas,

Durante el paso de los años, distintas culturas y en distintas épocas agregaron diferentes aditivos para mejorar la durabilidad, resistencia e impermeabilidad, sin embargo, estas eran muy costosas y solo se elaboraban cuando eran para construcciones importantes. Hasta el siglo XIX fue cuando se inventó el cemento Portland y los morteros significativamente incrementaron su resistencia a la compresión, durabilidad, impermeabilidad y resistencia a la intemperie.

3.2. Propiedades mecánicas de la mampostería

Los materiales utilizados en la construcción de edificios históricos poseen propiedades mecánicas muy diferentes entre sí, basta con observar los datos de las distintas investigaciones y pruebas realizadas, las cuales se muestran en las tablas 3.2 hasta la 3.8. No obstante, el comportamiento estructural de un elemento de mampostería, es una conjunción de los materiales que lo componen (por lo general está compuesta casi siempre por dos o más materiales), esto quiere decir que las propiedades mecánicas individuales de cada material se comportan de distinta manera cuando se encuentran en conjunto.

Para el conocimiento de dichas propiedades mecánicas de la mampostería, se han realizado ensayos mediante pruebas destructivas y no destructivas en edificios históricos, de las cuales, se toman referencias para el análisis estructural, dichos datos se muestran en las tablas 3.9 a la 3.14. Cabe mencionar que estos datos pueden ser tomados únicamente como referencia para el análisis.

Tabla 3.9. *Propiedades mecánicas de la mampostería de edificios históricos*. Fuente: retomado de Meli R. (1998) y conversión de unidades realizadas por el autor de este libro.

Material	Peso volumétrico [kg/m³]	Resistencia a la compresión [kg/cm²]	Resistencia a cortante [kg/cm²]	Módulo de Young [kg/cm²]
Adobe	1,800	2-5	0.5	3,000
Bloques de tepetate con mortero de cal	1,800	5-10	0.5	5,000
Ladrillo con mortero de lodo	1,600	5-10	1.0	5,000
Ladrillo con mortero de cal	1,600	15-20	2.0	10,000
Mampostería de piedra irregular con mortero de cal	2,000	10-15	0.5	5,000
Mampostería de piedra de buena calidad	2,000	30	2.0	20,000

Tabla 3.10. *Propiedades mecánicas de la mampostería empleadas en los modelos analíticos*. Fuente: retomado de Chávez M. (2010) y conversión de unidades realizadas por el autor de este libro.

Tipos de Mampostería	Elementos estructurales	ρ kg/m³	E kg/cm²	ƒm kg/cm²	ƒt kg/cm²	v
Piedra	Nave Bóveda y Cúpulas	1800	4,507	13	0.9	0.3
Ladrillo	Bóveda y Cúpulas	1550	5,506.5	40	2.85	0.3

Tabla 3.11. *Propiedades mecánicas de la mampostería de piedra*. Fuente: retomado de Chávez M. (2010) y conversión de unidades realizadas por el autor de este libro.

Contenido de piedra y mortero	Piedra		Mortero		Mampostería		E kg/cm²
	ρ kg/m³	ƒm kg/cm²	ρ kg/m³	ƒm kg/cm²	ρ kg/m³	ƒm kg/cm²	
44% mortero; 56% piedra	1900	66.28	1656	10	1664	13.26	2447.32
35% mortero; 65% piedra	1900	66.28	1598	8.06	1627	13.26	2702.25

Tabla 3.12. *Propiedades mecánicas de la mampostería de ladrillo*. Fuente: retomado de Chávez M. (2010) y conversión de unidades realizadas por el autor de este libro.

Ladrillo		Mortero		Mampostería			
ρ kg/m³	ƒm kg/cm²	ρ kg/m³	ƒm kg/cm²	ρ kg/m³	ƒm kg/cm²	E kg/cm²	ƒv kg/cm²
1612	119.3	1683	8.05	1541	39.76	4,802.86	28.5

*Valores obtenidos en especímenes ensayados a la edad de 56 días. Esta nomenclatura es aplicable a las tablas 3.10 a 3.12.

ρ = Densidad, ƒm = Resistencia a la compresión, E = Módulo elástico, ƒt = Resistencia a tensión, v = Coeficiente de poisson, ƒv = Límite de fluencia o límite elástico.

Tabla 3.13. *Propiedades mecánicas de la mampostería de acuerdo con el código italiano*. Fuente: retomado de Circolare (2019), Paulo B. Lourenco (2022) y conversión de unidades realizadas por el autor de este libro.

Tipo de Mampostería	**Peso volumétrico [kg/m³]** min-max	**Resistencia a compresión [kg/cm²]** min-max	**Resistencia a cortante [kg/cm²]** min-max	**Módulo de Young [kg/cm²]** min-max	**Módulo de Cortante [kg/cm²]** min-max
Mampostería de piedra irregular (guijarros, errática)	1,937.5	10.19 20.39	-	7,036.04 10,707.02	2,345.35 3,569.01
Mampostería de piedra sin cortar con grosor no homogéneo	2,039.4	20.39	-	10,401.11 14,683.91	3,467.04 4,894.64
Mampostería de piedra regular con buena adherencia	2,141.4	26.51 38.75	-	15,295.74 20,190.38	5,098.58 6,730.13
Mampostería de piedra blanda (caliza, toba)	1,325.6	14.28 22.43	-	9,177.45 12,848.42	3,059.15 4,282.81
Mampostería regular de piedra blanda (caliza, toba)	1,631.5	20.39 32.63	1.02 1.94	12,236.59 16,519.40	4,078.86 5,098.58
Mampostería de piedra rectangular (sillar)	2,243.4	59.14 83.62	1.83 2.85	24,473.19 33,650.64	8,157.73 11,216.88
Mampostería de ladrillo macizo con mortero de cal	1,835.5	26.51 43.85	1.32 2.75	12,236.59 18,354.89	4,078.86 6,118.30
Mampostería de ladrillo hueco con mortero de cemento	1,529.6	50.98 81.58	2.04 3.67	35,690.07 57,104.11	8,922.52 14,276.03

Tabla 3.14. *Densidades, resistencias mecánicas y rigideces de referencia de diferentes tipos de mampostería gruesa con mortero poroso*. Resistencia a la compresión y al Cizallamiento por cortante: σc; τ_s; E = Módulo de Young; **ρ** = densidad. Fuente: retomado de Circolare (2019), Paulo B. Lourenco (2022) y conversión de unidades realizadas por el autor de este libro.

Tipo de Mampostería	σ_c (Kg/cm²)	**τ_s(Kg/cm²)**	**E(Kg/cm²)**	**ρ(Kg/cm²)**
Mampostería desordenada de adoquines/piedras	10.20-18.35	0.20-0.33	7036.04-10707.02	1937.46
Mampostería de piedras desbastadas	20.39-30.59	0.36-0.52	10401.11-14683.91	2039.43
Mampostería de piedra tallada	26.51-38.75	0.57-0.75	15298.74-20190.38	214.40

Tipo de Mampostería	σ_c (Kg/cm^2)	τ_s(Kg/cm^2)	E(Kg/cm^2)	ρ(Kg/cm^2)
Mampostería de piedras blandas	14.28-24.47	0.29-0.43	9177.45-12848.42	1631.55
Mampostería de bloques de piedra escuadrada	61.18-81.58	0.91-1.23	24473.19-32630.92	2243.38
Albañilería de bloques y mortero de cal	24.47-40.79	0.61-0.94	12236.59-18354.89	1835.49
Albañilería de bloques semisólidos y mortero de cemento	50.99-81.58	2.45-3.26	35690.07-57104.11	1529.57
Albañilería de ladrillos aireados (45%)	40.79-61.18	3.06-3.26	36709.78-55064.68	1223.66
Albañilería de ladrillos aireados (< 45%)	30.59-40.79	1.02-1.33	27532.34-36709.78	1121.69
Mampostería de concreto de ladrillos aireados (45-65%)	30.59-44.87	1.84-2.45	24473.19-35894.01	1427.60
Mampostería de concreto de ladrillos aireados (< 45%)	15.30-20.39	0.97-1.27	12234.59-16315.46	1223.66

3.2.1. Homogeneización de la mampostería

Desde una micro perspectiva, la mampostería irregular es en realidad un material anisotrópico y heterogéneo, sin embargo, para facilitar el análisis estructural de inmuebles con tamaño considerable, donde una piedra es muy pequeña en comparación del edificio o incluso del elemento estructural, en algunas ocasiones conviene idealizarlo como un material isotrópico y homogéneo. Para ello, Angelillo M. (2014), propone homogeneizar la mampostería, con el objetivo de facilitar y acelerar los análisis.

Para llevar a cabo dicha homogenización, se procede a seleccionar una parte del elemento estructural, que en este caso sería el muro de mampostería representado por Ω, ya que al designar una sección (Segmento de Área representativo o célula elemental) puede contener tanto porciones de mampostería, como de mortero; así, pudiendo considerar un espécimen del elemento estructural a analizar como en la figura 3.10.a, y dejando un elemento representativo del volumen como en la figuras 3.10.b a la 3.10.e.

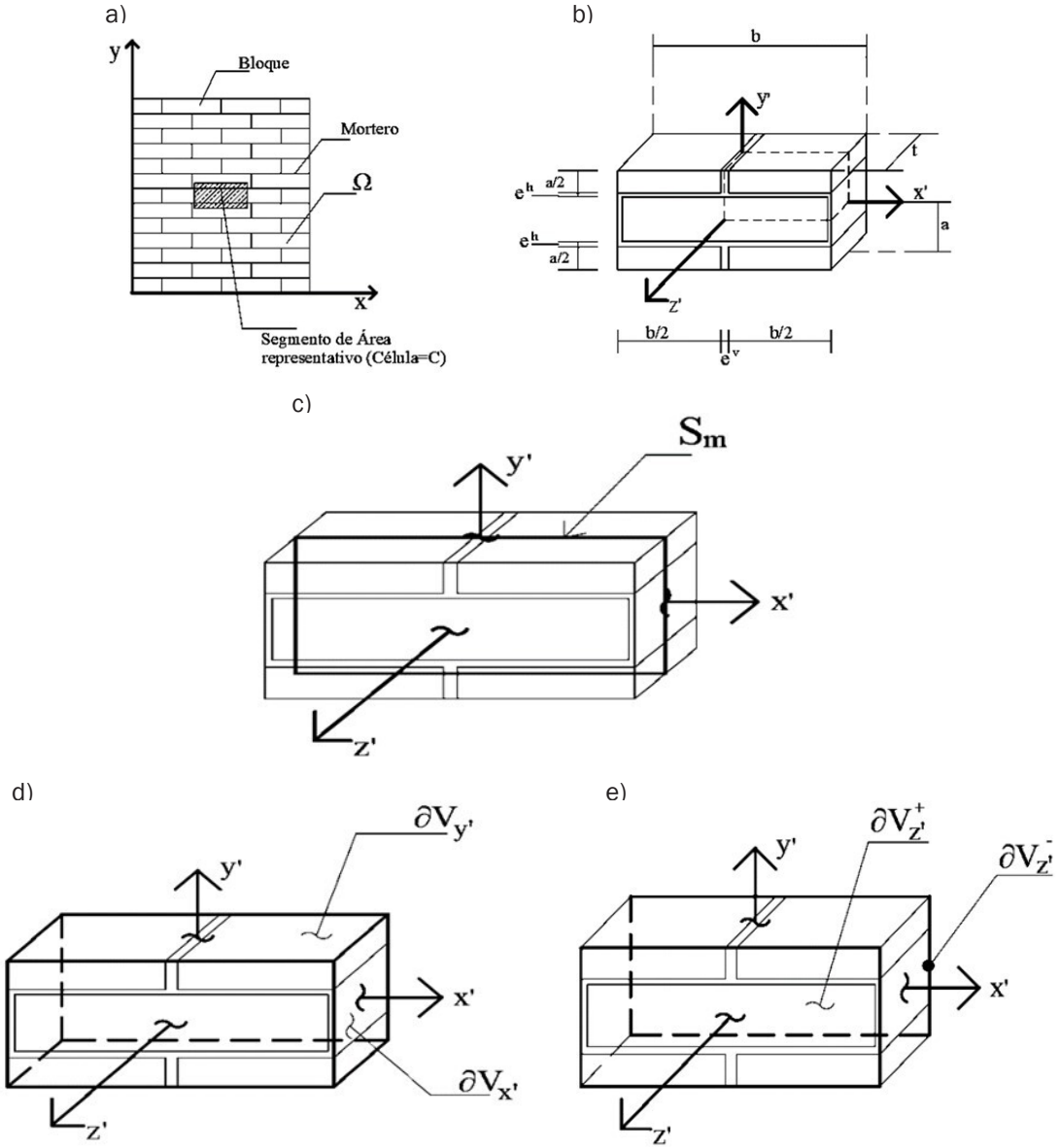


Figura 3.10. Elemento Representativo de Volumen (ERV). a) segmento de área representativo de la célula, b) Elemento Representativo del Volumen, c) Superficie media (Sm) del ERV, d) y e) superficies de frontera del ERV. Fuente: retomado de Angelillo M. (2014) y adaptado por el autor de este libro.

Sea A_c= [x, y] un área representativa para la descripción global de Ω en un estado macroscópico, y= [x', y', z'] como un volumen referencial para Y. Y se representa como Y= S_m(t), siendo Y el volumen y t la profundidad o espesor de la célula elemental y S_m el área o superficie que representa el plano medio de la placa. El límite del volumen por las laterales en ∂V se representa como $\partial V_x'$, $\partial V_y'$ y $\partial V_z'$. La principal idea de la homogenización es introducir ciertas cantidades promedio que representen a los tensores macroscópicos de deformación y tensión, representados respectivamente como *E* y Σ.

$$E = \langle \in \rangle \frac{1}{V} \int_Y \in (u) dY \qquad \Sigma = \langle \sigma \rangle = \frac{1}{V} \int_Y \sigma \, dY$$

V es el Volumen de Y, ϵ y σ son las magnitudes locales que son las deformaciones y esfuerzos respectivamente.

De manera análoga se propone la homogeneización de la mampostería irregular junteada con argamasa (ver figura 3.11).

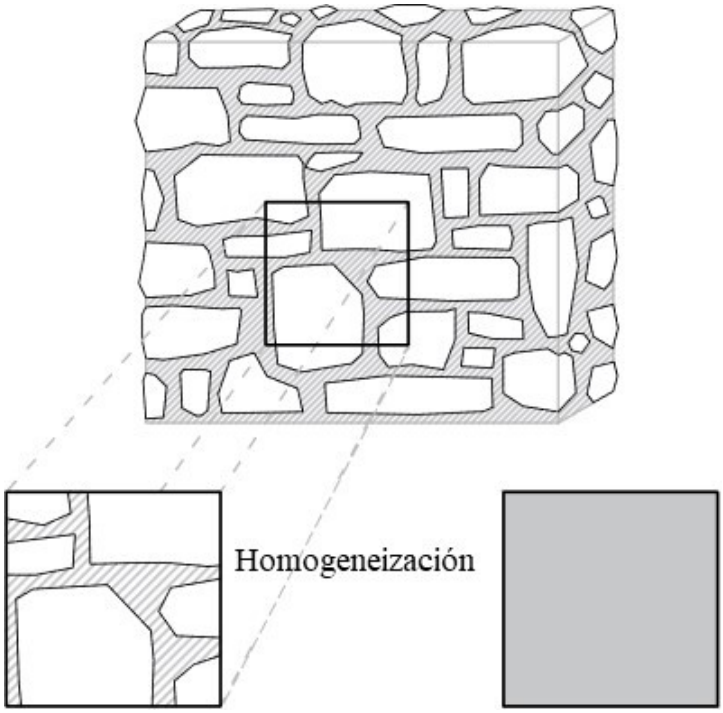


Figura 3.11. *Representación gráfica de: un segmento de volumen de muro de mampostería irregular (célula); proyección de un segmento de superficie vista desde fuera del plano; homogeneización mecánica representada con un segmento con relleno homogéneo visto desde fuera del plano. Fuente: retomado de Angelillo M. (2014) y adaptado por el autor de este libro.*

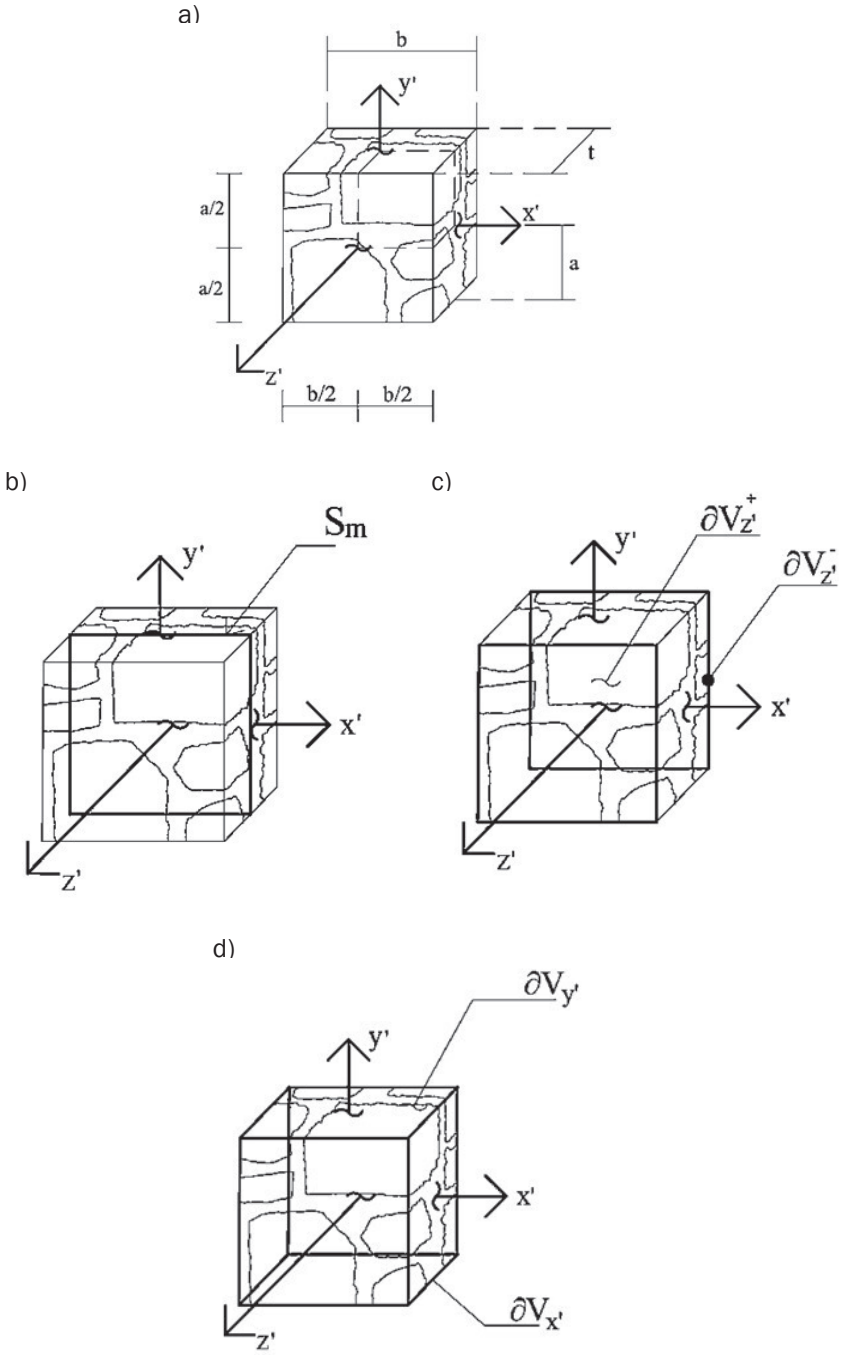


Figura 3.12. Elemento Representativo de Volumen (ERV). a) Elemento Representativo del Volumen, b) Superficie media (Sm) del ERV, c) y d) superficies de frontera del ERV. Fuente: retomado de Angelillo M. (2014) y adaptado por el autor de este libro.

Como referencia Ac = [x, y] es un área representativa para la descripción global del muro de mampostería completo en un estado macroscópico, Y es volumen, t de la profundidad de la célula elemental, Sm es el área o superficie que representa el plano medio del volúmen y ∂V es el límite del volumen por las laterales, para la figura 3.12.

3.2.2. Modelos constitutivos de la mampostería

De acuerdo con pruebas experimentales que se han realizado en la mampostería no confinada, se ha podido observar que el esfuerzo a tracción σ_t es mucho más pequeño que el esfuerzo a compresión σ_c. La relación σ_t/σ_c es por lo general menor que 0.1 y puede ser incluso más bajo que 0.01. Es importante resaltar que la mampostería se comporta esencialmente como un material elástico cuando trabaja a compresión hasta que llega al 80% ó 90% su la resistencia (ver figuras 3.13.1 y 3.13.2). Angelillo M. (2014)

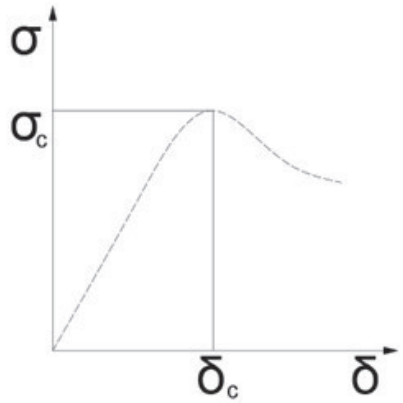


Figura 3.13.1 *Gráfica esfuerzo-deformación típica de la mampostería a compresión*. Este tipo de gráficas son cualitativas para cualquier tipo de mampostería no confinada. Los valores σ_c y σ_t difieren por lo menos un orden de magnitud. Fuente: retomado de Angelillo M. 2014 y redibujada por el autor de este libro.

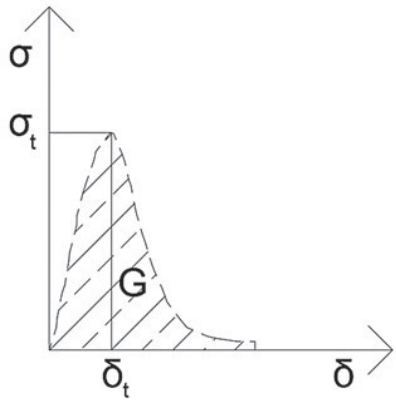


Figura 3.13.2 *Gráfica esfuerzo-deformación típica de la mampostería a compresión tensión (tracción).* En la gráfica se rellena con líneas inclinadas el área etiquetada como G, que representa a la dureza del material, la cual es la energía de la superficie por unidad de área que debe ser gastada para provocar una grieta. Fuente: retomado de Angelillo M. 2014 y redibujada por el autor de este libro.

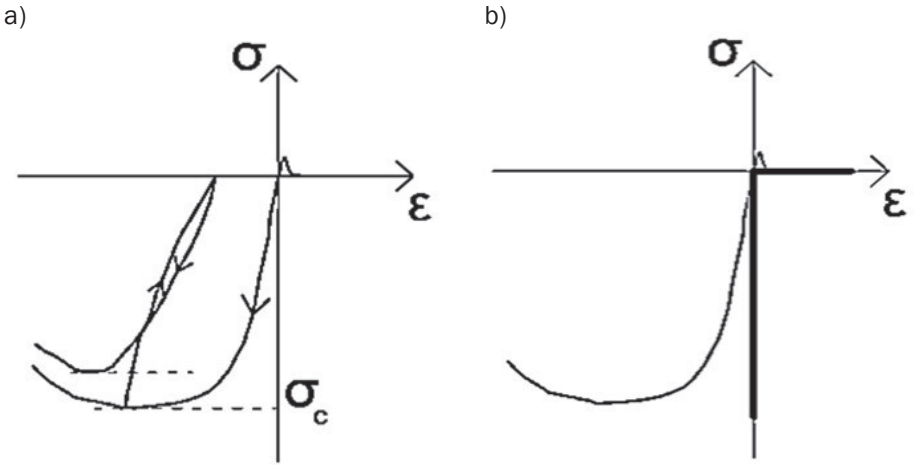
Cuando la mampostería presenta de manera temprana micro-fisuras, deterioro o daño considerable, su comportamiento es definitivamente no lineal. Asimismo, en la fase post-crítica, la mampostería presenta deformaciones irreversibles evidenciando comportamiento plástico, por ende, el diagrama esfuerzo-deformación típico de la mampostería puede ser representado como se muestra en la figura 3.13.a. Angelillo M. (2014)

Por otra parte, en la figura 3.14.a, se muestran los modelos que se han propuesto de manera simplificada para idealizar el comportamiento uniaxial de la mampostería, dichos modelos se han etiquetado como: *modelo cero, modelo uno y modelo dos*. Por tal motivo, existe la posibilidad de modelar estructuras de mampostería no reforzada como linealmente elásticas, dado que este tipo de mamposterías son definitivamente materiales elásticos y frágiles para ezfuerzos muy pequeños (Angelillo M. 2014).

Modelo cero (Rígido Sin Tracción, RST): este es un modelo unilateral en el que se describe al material como indefinidamente resistente y rígido a compresión, pero incapaz de soportar esfuerzos de tracción, el cual fue descrito por primera vez por Heyman en 1966, este modelo es de comportamiento elástico (ver figura 2.14.b). En este modelo la rigidez y la compresión se suponen infinitas, mientras que se desprecia la tracción. (Angelillo M. 2014)

Modelo uno (Elástico Sin Tracción, EST): este modelo supone una relación lineal de esfuerzo-deformación, se le puede denominar material elástico sin tracción, se puede decir que es el primer acercamiento para modelar la mampostería (ver figura 3.14.c). (Angelillo M. 2014)

Modelo dos (Carga Monótona, CM, Material hiperelástico Sin Tracción): este modelo supone una relación lineal de esfuerzo-deformación, se le puede denominar material elástico sin tracción, se puede decir que es el segundo acercamiento para modelar mampostería (ver figura 3.14.d). (Angelillo M. 2014)



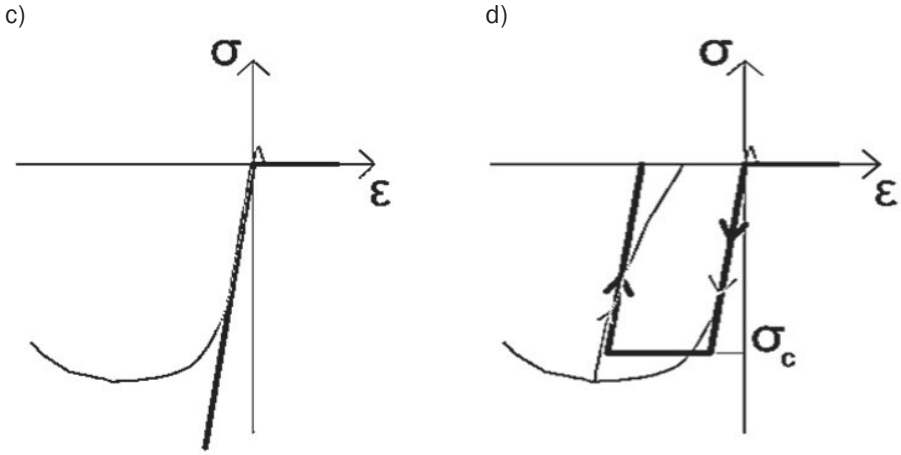


Figura 3.14. Gráficas esfuerzo deformación de comportamiento uniaxial típico de la mampostería: a) gráfica completa de esfuerzo-deformación. Modelos simplificados; b) modelo cero (Rígido Sin Tracción, RST); c) modelo uno (Elástico Sin Tracción, EST); d) modelo dos (Carga Monótona, CM, Material hiperelástico Sin Tracción). Donde: "σ " = Esfuerzo, ε= Deformación, σ_c= Esfuerzo a compresión. Fuente: Angelillo M. 2014.

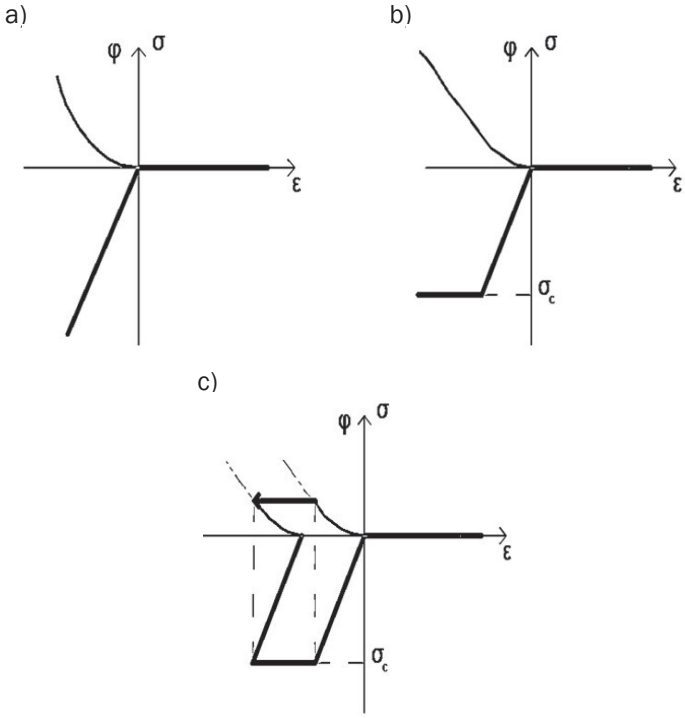


Figura 3.15. *Gráficas esfuerzo deformación de comportamiento uniaxial típico de la mampostería*: a) gráfica completa de esfuerzo-deformación. Modelos simplificados; b) modelo cero (Rígido Sin Tracción, RST); c) modelo uno (Elástico Sin Tracción, EST); d) modelo dos (Carga Monótona, CM, Material hiperelástico Sin Tracción). Donde: "σ" = Esfuerzo. ε= Deformación Unitaria, σ_c=Esfuerzo a compresión, φ= Energía Elástica. Nota: (Φ = 0 si no es negativo, de lo contrario Φ = +∞). Fuente: *retomado Angeillo M. (2014) y redibujado por el autor de este libro*

Las figuras 3.14 y 3.15 muestran gráficas de esfuerzo-deformación uniaxiales completas, con sus secciones a compresión y tracción; sin embargo, para apreciarlas a detalle, primeramente se presenta la figura 3.16, en la cual se muestra únicamente el comportamiento a tracción, a su vez está dividida en su punto más alto, donde se interpreta que la sección vacía es la zona elástica y la sección sombreada es la zona plástica. En esta última, la mampostería ya no regresa a su estado original, esto se puede observar también en la figura 3.17.

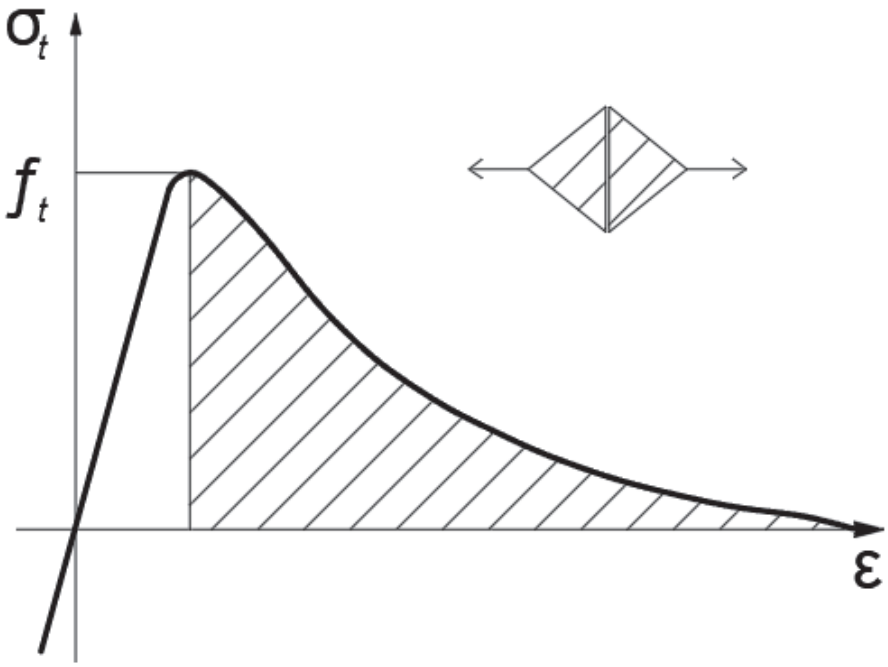


Figura 3.16. *Gráfica de la sección a tensión, diferenciando la parte plástica de la elástica*. σ_t= Esfuerzo a tracción, ε = Deformación unitaria, f_t = Resistencia a tracción. Fuente: retomado de Sarhosis, V; et. al., (2016) y redibujado por el autor de este libro.

En la figura 3.17 los módulos elásticos se representan con la variable E_0, los cuales varían según la resistencia del material. Con línea punteada se presenta el retorno debido a la descarga, donde d_t es la degradación de la rigidez elástica, provocando que el material no regrese a su estado original y haciendo que ahora tenga una deformación permanente. De manera análoga se muestra la figura 3.18, que a diferencia de la figura 3.17, se observa su comportamiento a compresión.

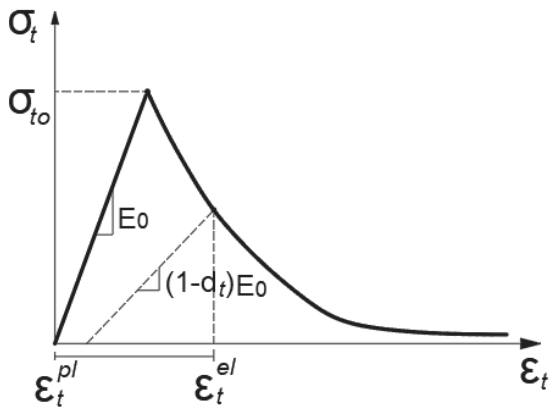


Figura 3.17. *Representación de la gráfica esfuerzo-deformación del comportamiento a tracción de la mampostería*. Donde: σ_t= Esfuerzo a tracción; σ_{to}= Esfuerzo de falla a tracción; E_0 = Módulo Elástico (Módulo de Young); d_t= Degradación de la rigidez elástica en tracción; ε_t^{pl}= Deformación unitaria a tracción en su estado plástico; ε_t^{el}= Deformación unitaria a tracción en su estado elástico; ε_t= Deformación unitaria a tracción. Fuente: retomado de Bahman G., et al, (2019) y redibujado por el autor de este libro.

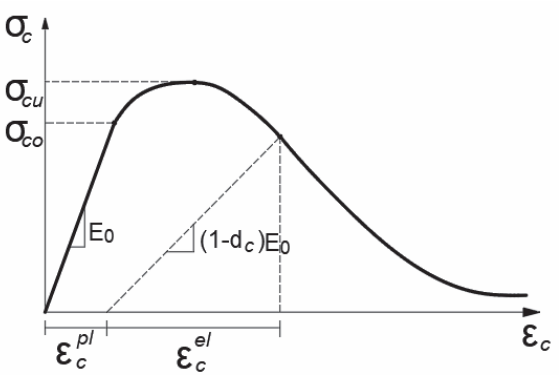


Figura 3.18. *Representación de las gráficas de la fase a compresión de la mampostería*. Donde: σ_c= Esfuerzo a compresión; σ_{cu}= Esfuerzo último a compresión; σ_{co}= Esfuerzo de falla a compresión; E_0 = Módulo Elástico; d_c= Degradación de la rigidez elástica en compresión; ε_c^{pl}= Deformación unitaria a compresión en su estado plástico; ε_c^{el}= Deformación unitaria a compresión en su estado elástico; ε_c= Deformación unitaria a compresión. Fuente: retomado de Bahman G., et al, (2019) y redibujado por el autor de este libro.

Las figuras 3.17 y 3.18 son representadas en una sola gráfica en la figura 3.19, la cual es un ciclo de carga uniaxial, este básicamente consta del comportamiento a tracción y compresión, donde se puede detectar que una vez que se tracciona la probeta de mampostería y posteriormente se deja de tensionar, esta presenta una deformación unitaria permanente, acercándose cada vez más a un estado de falla. Estas pruebas normalmente se hacen en laboratorio, sin embargo, con este tipo de gráficas es posible obtener modelos digitales constitutivos.

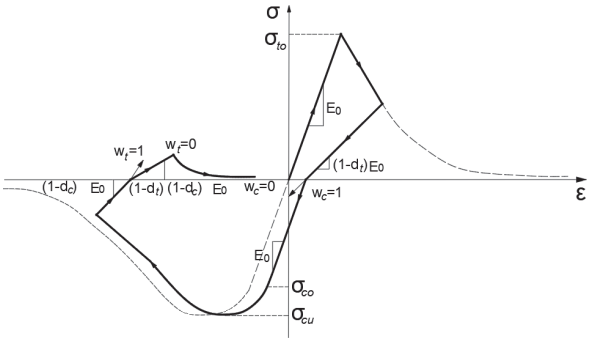


Figura 3.19. *Ciclo de carga uniaxial (tracción, compresión, tracción) con valores predeterminados para los factores de recuperación de rigidez*. Donde: σ= Esfuerzo; σ_{to}= Esfuerzo de falla a tracción; E_0 = Módulo Elástico; w_t= Factor de rigidez en tracción; d_t= Degradación de la rigidez elástica en tracción; w_c= Factor de rigidez en compresión; d_c= Degradación de la rigidez elástica en compresión; σ_{co}= Esfuerzo de falla a compresión; σ_{cu}= Esfuerzo último a compresión; ε= Deformación unitaria. Fuente: retomado de Bahman G., et al, (2019) y redibujado por el autor de este libro.

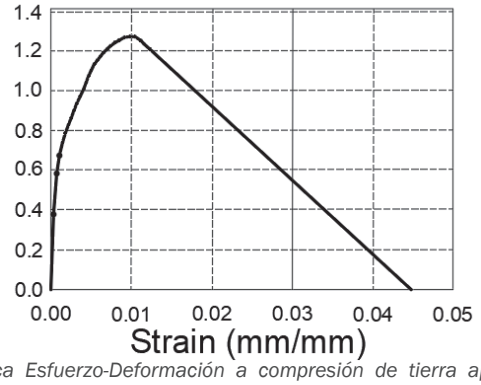


Figura 3.20. *Gráfica Esfuerzo-Deformación a compresión de tierra apisonada, donde el esfuerzo a compresión está dando en MPa y los valores de deformación unitaria en mm/mm*. Fuente: retomado de Bahman G., et al, (2019) y redibujado por el autor de este libro.

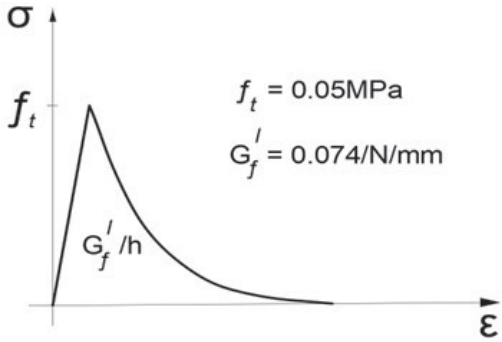


Figura 3.21. *Gráfica Esfuerzo-Deformación a tracción (tensión) de tierra apisonada, donde el esfuerzo a tracción está dado en MPa y los valores de deformación unitaria en mm/mm*. Donde: σ= Esfuerzo; ε= Deformación Unitaria; f_t= Resistencia a tracción; *h*= Ancho de la grieta; G_f^{I} = Energía de fractura por tracción. Fuente: retomado de Bahman G., et al, (2019) y redibujado por el autor de este libro.

En las Figuras 3.20 y 3.21 se muestran gráficas esfuerzo-deformación, tanto de compresión como de tracción de un espécimen de tierra apisonada.

Por otra parte, en la figura 3.22 se muestran las tendencias que puede tener un espécimen a compresión en las gráficas esfuerzo-deformación de la mampostería regular junteada con mortero; como se observa, la curva parabólica llega a un esfuerzo último y tiende a bajar de igual manera, que en este caso sería representada por la curva típica, sin embargo, al diseñar una estructura con mampostería, se usa la curva más corta, ya que el diagrama de diseño se rige bajo el valor de 0.33 veces la curva típica, o en otras palabras sería un factor de seguridad por el cual se puede tener un margen de error al calcular elementos de mampostería.

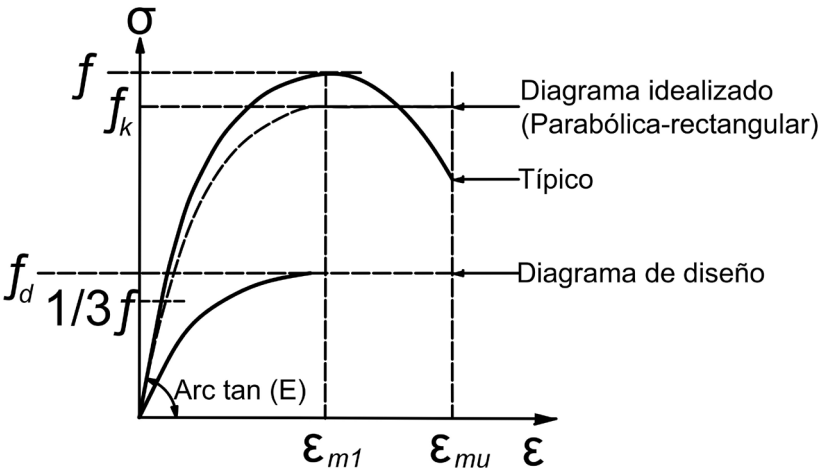


Figura 3.22. *Tipos de parábolas de mampostería regular unida con mortero en gráficas esfuerzo-deformación según su función*. Donde: σ= Esfuerzo; f= Esfuerzo a la compresión en un diagrama idealizado; f_k= Esfuerzo a la compresión según a sus unidades y mortero; f_d= Esfuerzo a la compresión el diagrama de diseño; 1/3f=Un tercio del esfuerzo a la compresión; ε_{m1}= Deformación unitaria de la mampostería respecto al esfuerzo más alto; ε_{mu}= Deformación unitaria de la mampostería última del mortero; ε= Deformación Unitaria. Fuente: retomado de Bahman G., et al, (2019) y redibujado por el autor de este libro.

CAPÍTULO 4

COMPARACIÓN DE GRÁFICAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN DEL CONCRETO Y MAMPOSTERÍA IRREGULAR

"Las características de los materiales que se usen en los trabajos de restauración y su compatibilidad con los existentes se deben conocer por completo. Este conocimiento debe incluir los efectos a largo plazo (ISCARSAH 2003)"

4.1. Gráficas esfuerzo-deformación del concreto confinado y no confinado

En las figuras 4.1 a 4.10 se muestran gráficas esfuerzo-deformación del comportamiento que describen las curvas de pruebas realizadas a especímenes de concreto confinado y no confinado, de diferentes autores. Estas gráficas se presentan con la finalidad de observar la similitud que pudiera haber entre el comportamiento del concreto y la mampostería, dado que en la práctica profesional se llegan a retomar los materiales constitutivos precargados en los programas de cómputo para análisis estructural, y lo único que se hace es cambiar los parámetros de esfuerzos, resistencias máximas y deformaciones unitarias, usando la tendencia de la curva.

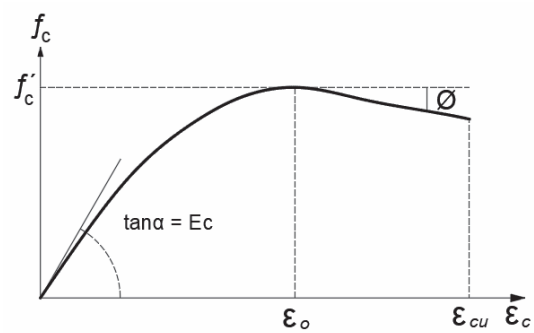


Figura 4.1. *Gráfica esfuerzo-deformación de concreto confinado*. Donde= f_c= Esfuerzo a compresión; f'_c= Esfuerzo último de la gráfica a compresión; Ø= Ángulo; tanα = Ángulo de la tangente; Ec= Módulo Elástico a compresión; ε_o= Deformación unitaria de la mampostería respecto al esfuerzo más alto; ε_{cu}= Deformación unitaria última; ε_c= Deformación en compresión. Fuente: retomado de Hognestad, E. (1951), Moreno, N. (2017) y redibujado por el autor de este libro.

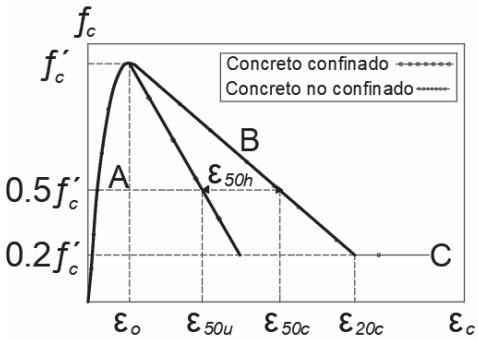


Figura 4.2. *Gráfica esfuerzo-deformación. Comparativa de comportamiento a compresión del concreto confinado y no confinado*. Donde:f_c= Esfuerzo a compresión; f'_c= Esfuerzo último de la gráfica a compresión; 0.5 f'_c= Esfuerzo a compresión degradado un 50%; 0.2 f'_c= Esfuerzo a compresión degradado un 80%; ε_{50h}= Diferencia entre concreto confinado y sin confinar (ancho de la sección de acero); ε_{50u}= Deformación de concreto no confinado a compresión; ε_{50c}=Esfuerzo a compresión del concreto confinado; ε_{20c}= Deformación al 80% de degradación del concreto confinado; ε_c= Deformación Unitaria a compresión. Fuente: retomado de Kent D., et al, (1971), Moreno, N. (2017) y redibujado por el autor de este libro.

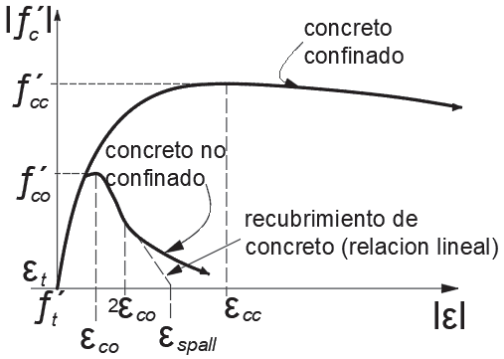


Figura 4.3. *Gráficas encimadas de las tendencias de concreto confinado, no confinado y la interacción del recubrimiento de concreto*. Donde: f_c= Esfuerzo a compresión; f'_{cc}= Esfuerzo último de la gráfica de concreto confinado a compresión; f'_{co}= Esfuerzo último de la gráfica de concreto no confinado a compresión; ε_t= Deformación a tracción; f'_t= Esfuerzo a tracción; ε_{co}= Deformación última en gráfica de concreto no confinado a compresión; $2\varepsilon_{co}$= Deformación degradada a la mitad en gráfica de concreto no confinado a compresión; ε_{spall}= Deformación última asociada al recubrimiento del concreto; ε_{cc}= Deformación última en gráfica de concreto confinado a compresión; |ε|= Deformación Unitaria. Fuente: retomado de Mander J., et al. (1988), Moreno, N. (2017) y redibujado por el autor de este libro.

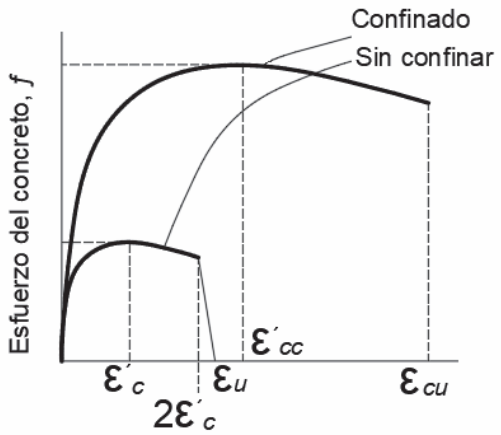


Figura 4.3.1. *Superposición de gráficas de tendencias de concreto confinado, no confinado y la interacción del recubrimiento de concreto*. Donde: f = Esfuerzo a compresión; ε'_c= Deformación de concreto no confinado a compresión; $2\varepsilon'_c$= Deformación de ruptura de concreto no confinado a compresión; ε_u= Deformación última de concreto no confinado a compresión; ε'_{cc}= Deformación de concreto confinado a compresión; ε_{cc}= Deformación última de concreto confinado a compresión. Fuente: retomado de Mander J., et al. (1988), Computers and Structures (2008) y redibujado por el autor de este libro.

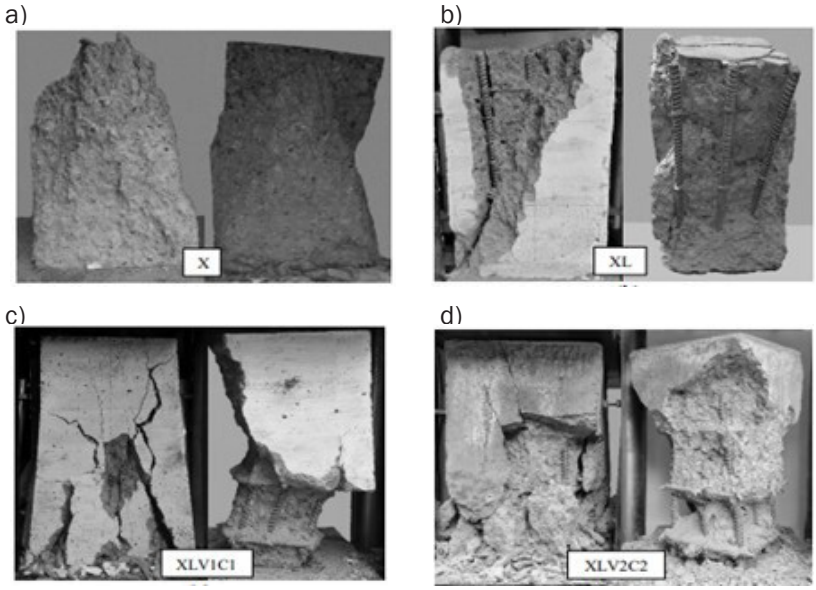
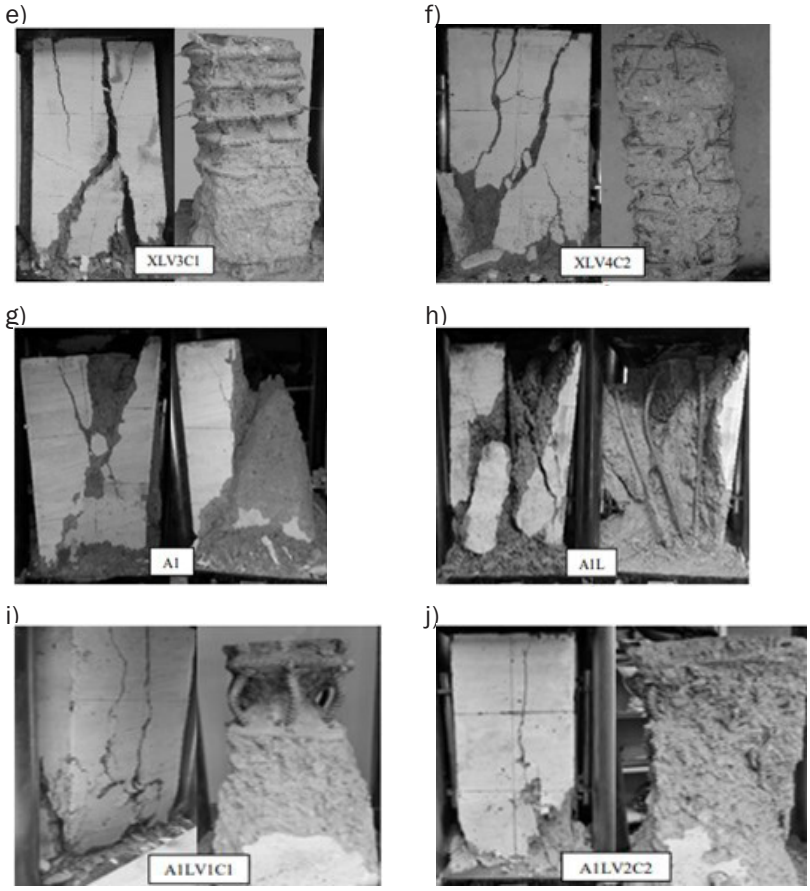


Figura 4.4.1. *Especímenes de concreto confinado y sin confinar, a compresión, ensayados en laboratorio*. Fuente: retomado de Moreno, N. (2017).



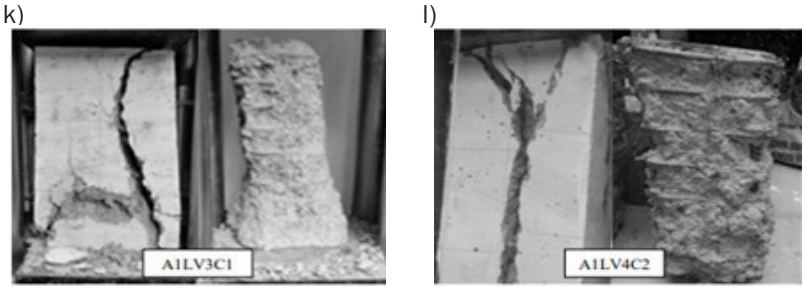


Figura 4.4.2. *Especímenes de concreto confinado y sin confinar, a compresión, ensayados en laboratorio*. Fuente: retomado de Moreno, N. (2017).

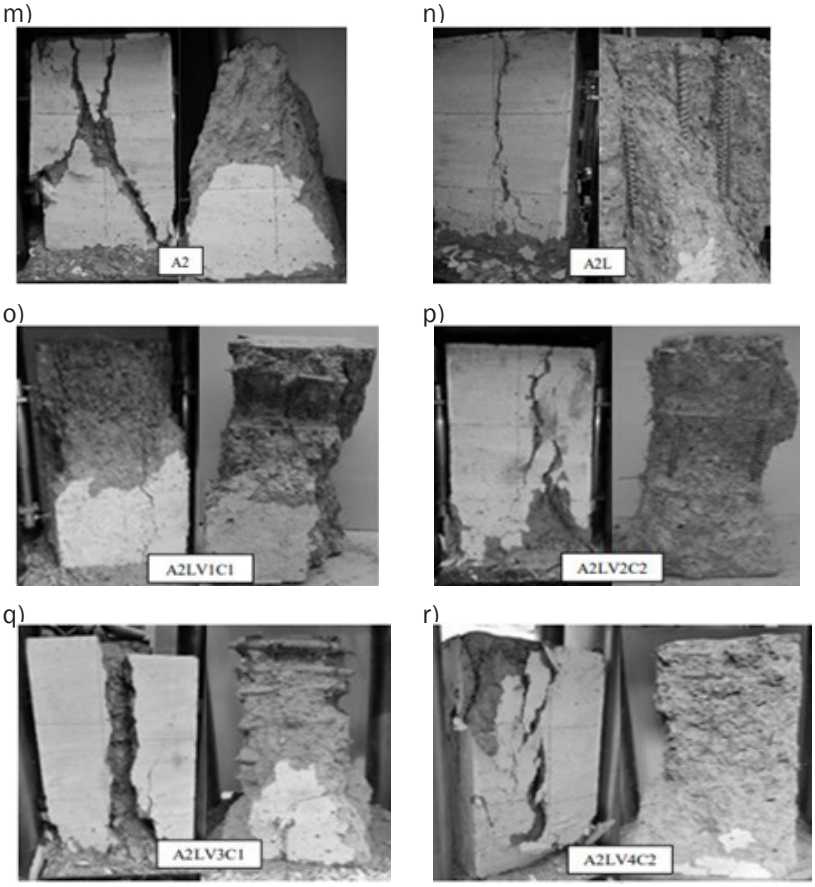


Figura 4.4.3. *Especímenes de concreto confinado y sin confinar, a compresión, ensayados en laboratorio*. Fuente: retomado de Moreno, N. (2017).

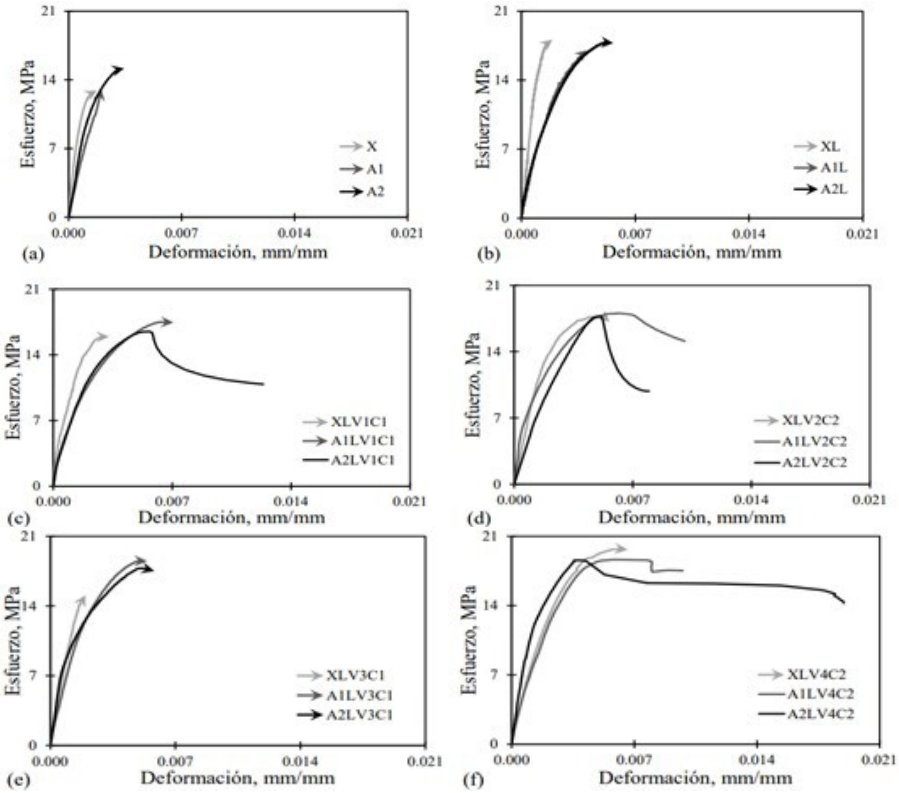
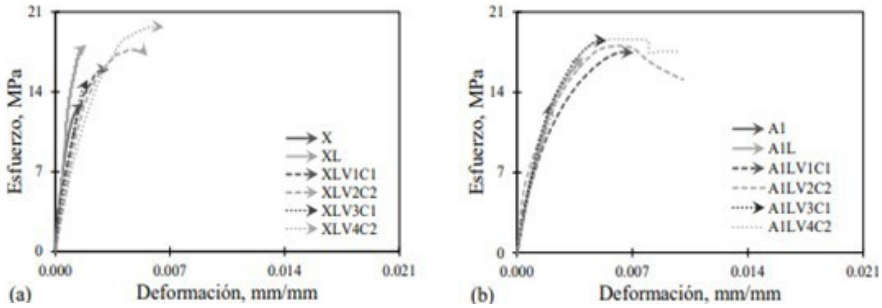


Figura 4.5. *Comparación de la Vf en las curvas esfuerzo-deformación de los especímenes*: a) sin esfuerzo convencional; b) con refuerzo longitudinal convencional; c) con refuerzo transversal p_s=2.7% y longitudinal convencional; d) con refuerzo transversal p_s=2.8% y longitud convencional; e) con refuerzo transversal p_s=5.5% y longitudinal convencional; f) con refuerzo transversal p_s= 5.6% y longitudinal convencional. Fuente: retomado de Moreno, N. (2017).



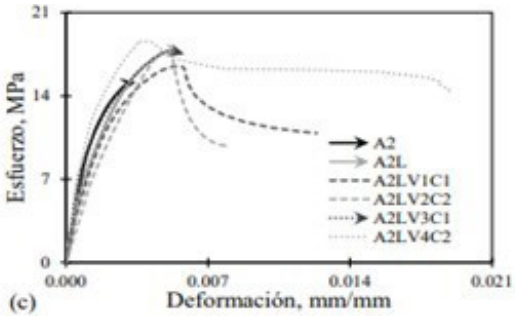


Figura 4.6. *Efecto de la cuantía volumétrica en las curvas esfuerzo-deformación de los especímenes*: a) Concreto sin fibras; b) Df 11.9 kg/m3; c) Df 20.0 kg/m3. Fuente: retomado de Moreno, N. (2017).

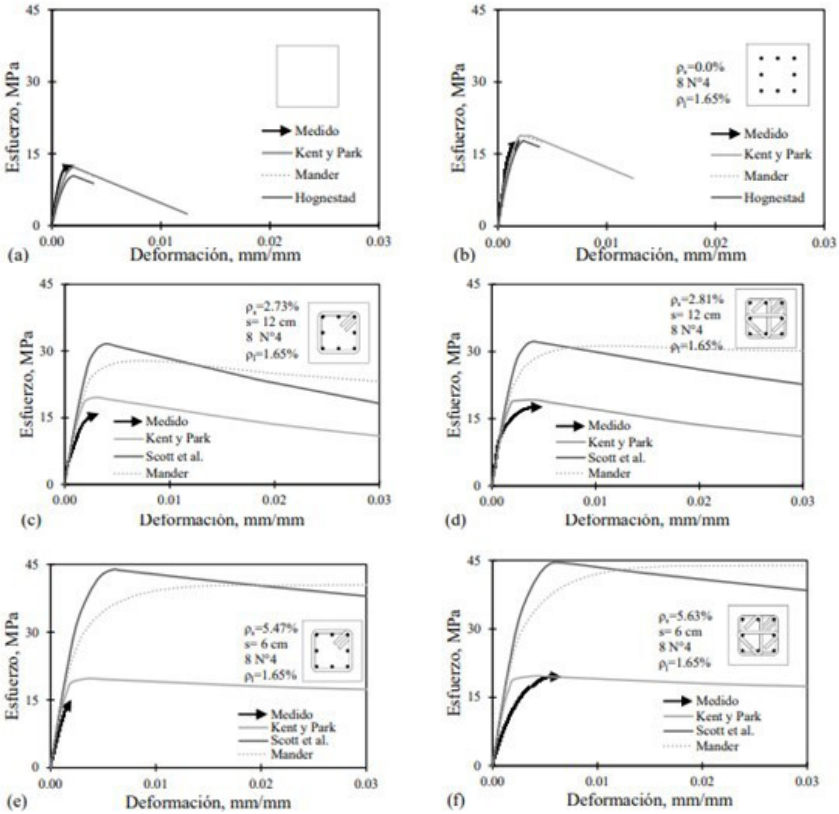


Figura 4.7. *Modelos de predicción para columnas sin fibras de acero*: a) X; b) XL; c) XLV1C1; d) XLV2C2; e) XLV3C1; f) XLV4C2. Fuente: retomado de Moreno, N. (2017).

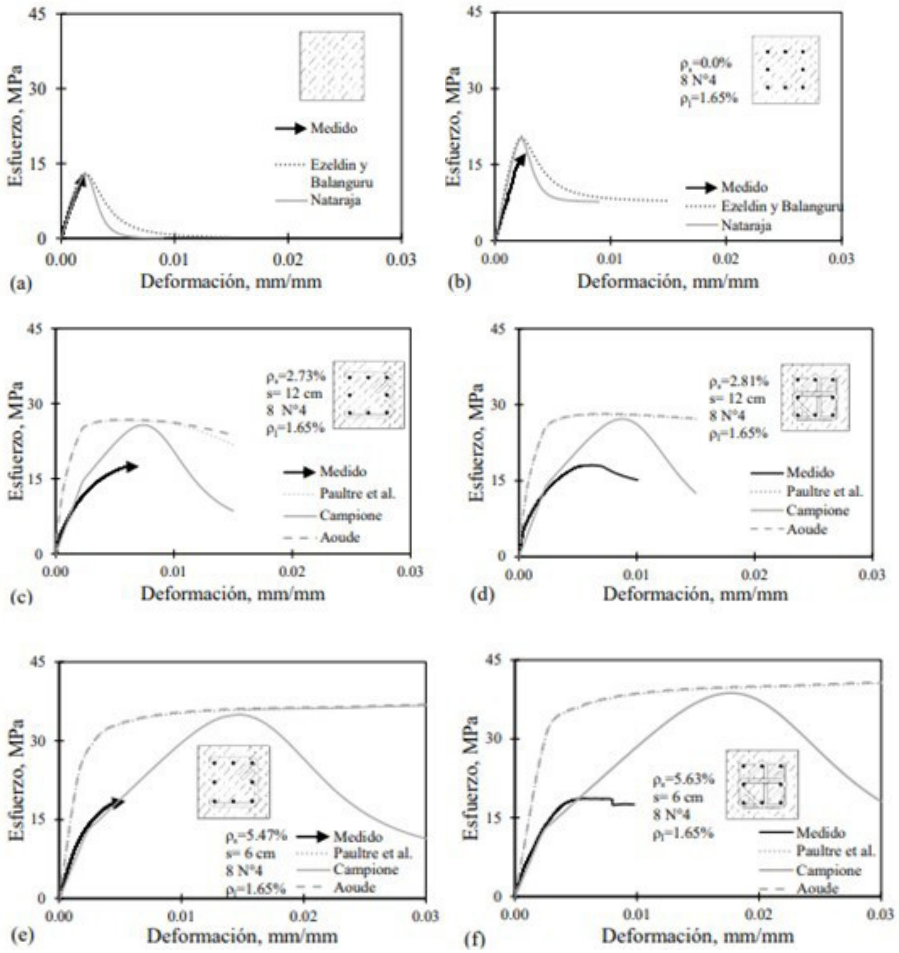
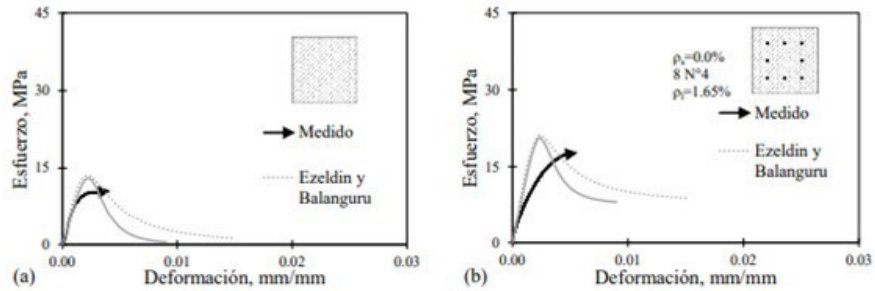


Figura 4.8. *Modelos de predicción columnas de concreto con dosificación de fibras de acero 11.9 kg/m3*: a) A1; b) A1L; c) A1LV1C1; d) A1LV2C2; e) A1LV3C1; f) A1LV4C2. Fuente: retomado de Moreno, N. (2017).



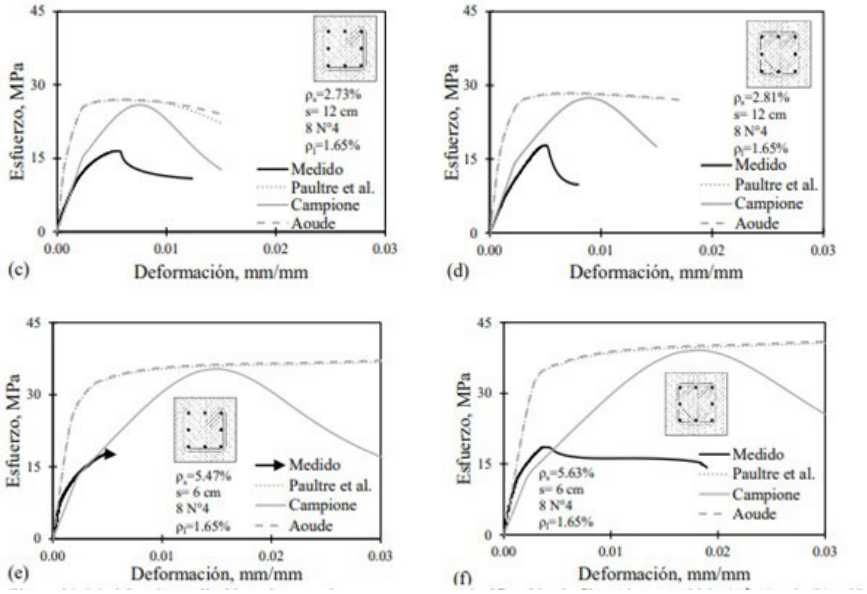


Figura 4.9. *Modelos de predicción columnas de concreto con dosificación de fibras de acero de 20kg/m2*: a) A2; b) A2L; c) A2LV1C1; d) A2LV2C2; e) A2LV3C1; f) A2LV4C2. Fuente: rretomado de Moreno, N. (2017).

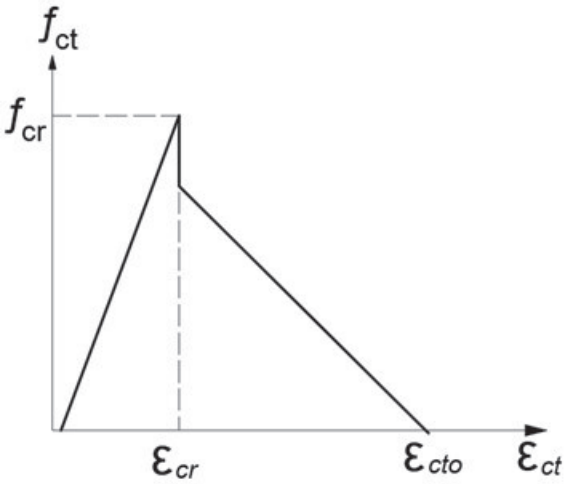


Figura 4.10. *Curva esfuerzo-deformación del concreto a tracción*. Donde: f_{cr} = Esfuerzo último de la gráfica de concreto; f_{ct} = Esfuerzo de concreto a tracción; ε_{cr} = Deformación en el punto más alto en la gráfica de concreto; ε_{cto}= Deformación de falla de concreto; ε_{ct} = Deformación de concreto a tracción. Fuente: Restrepo, J. (2020).

4.2. Configuración de curvas esfuerzo-deformación de la mampostería irregular a partir de materiales constitutivos del concreto no confinado

La mayoría de los software comerciales de análisis estructural utilizados en la práctica profesional contienen precargados algunos materiales constitutivos, como el concreto confinado y no confinado, los cuales dejan de lado las curvas constitutivas de la mampostería no confinada, ya que en la actualidad es muy poco probable que se construyan edificaciones sin confinamiento; sin embargo, para el análisis de inmuebles históricos, se requiere contar con herramientas que permitan modelar este tipo de edificios, para ello, en muchas ocasiones se ha optado por ajustar las propiedades constitutivas del concreto confinado y no confinado para representar el comportamiento de la mampostería no confinada, dadas las infinitas similitudes de las gráficas esfuerzo-deformación, tanto a compresión, como a tracción.

Con la finalidad de contar con materiales constitutivos que se puedan utilizar en los análisis prácticos (lineales y no lineales), se presenta la tabla 4.1, donde se realizan ajustes y comparaciones de gráficas paramétricas de esfuerzo-deformación a compresión y tracción para mamposterías irregulares, a través de un compendio de esfuerzos obtenidos por diferentes autores (nacionales e internacionales) a partir de la gráfica propuesta por Mander, J.B. (1984).

En la tabla 4.1 se aprecian diferentes casos de curvas esfuerzo-deformación, donde cada caso representa un nodo base para el trazo práctico de dichas curvas. El caso “C” es el esfuerzo máximo a compresión de la lista de autores, mientras que el caso “H” es el esfuerzo máximo a tracción. Las curvas se generaron a partir de una interpolación lineal con base en el caso C-MAN, el cual representa un concreto sin confinar.

Con base en lo descrito anteriormente, se reprodujo en un software CAD la gráfica de Mander J., et al. (1988). Asimismo, en la gráfica se dibujó de manera escalada la misma curva pero de manera análoga, asumiendo que el comportamiento de la mampostería es similar al concreto no reforzado, y tomando en cuenta de primera instancia, el esfuerzo máximo a compresión de la tabla 4.1, el cual reporta Chávez (2005) como 40 kg/cm2 (caso M-CH1). Posteriormente por medio de una interpolación, se determinaron el resto de los nodos (ver figura 4.11), así se procedió con los demás parámetros reportados por los otros autores, y con ello se conformaron la tabla 4.1 y la figura 4.14.

En las figuras 4.12 y 4.13 se puede apreciar la comparativa de las gráficas esfuerzo-deformación a compresión y tracción, indicando la deformación unitaria correspondiente a cada nodo de la figura 4.11.

Tabla 4.1. *Analogías y comparación de parámetros de puntos en las gráficas esfuerzo-deformación a compresión y tracción de mamposterías irregulares, para esfuerzos obtenidos de diferentes autores a partir de la gráfica propuesta por Mander J., et al. (1988), Montero V. (2004). Fuente: Elaboración propia.*

CASO		Esfuerzos (kg/cm²)							Ey (kg/cm²)
		A	B	C	D	E	F	H	
C	MAN	-224.98	-258.79	-281.23	-273.10	-221.69	-55.69	33.35	253456.35
M	CH1	-32.00	-36.81	-40.00	-38.84	-31.53	-7.92	2.85	5506.5
	CH2	-10.40	-11.96	-13.00	-12.63	-10.25	-2.57	0.90	4507
	CH3	-24.00	-27.60	-30.00	-29.15	-23.65	-5.93	2.40	19996.63
	CH4	-10.44	-12.01	-13.05	-12.68	-10.29	-2.58	1.02	4496.95
	CH5	-10.61	-12.20	-13.26	-12.88	-10.46	-2.62	0.91	24447.3
	CH6	-10.61	-12.20	-13.26	-12.88	-10.46	-2.62	0.91	2702.25
	CIR 1	-8.15	-9.38	-10.19	-9.90	-8.04	-2.01	0.90	7036.04
	CIR 2	-16.31	-18.77	-20.39	-19.81	-16.09	-4.02	0.90	10401.11
	CIR 3	-11.42	-13.14	-14.28	-13.88	-11.27	-2.82	0.90	9177.45
	CIR 4	-16.31	-18.77	-20.39	-19.81	-16.09	-4.02	0.90	10707.02
	CIR 5	-16.31	-18.77	-20.39	-19.81	-16.09	-4.02	0.90	14683.91
	CIR 6	-17.94	-20.65	-22.43	-21.79	-18.49	-4.42	0.90	12848.42
	MEL 1	-12.24	-13.99	-15.30	-14.88	-12.07	-3.02	0.90	4996.61
	MEL 2	-24.47	-27.97	-30.59	-29.75	-24.13	-6.03	0.90	19996.63
	BAI	-16.97	-19.39	-21.21	-20.63	-16.73	-4.18	0.90	12542.51
	BAS	-24.47	-27.97	-30.59	-29.75	-24.13	-6.03	0.90	15295.74
	CON	-16.31	-18.77	-20.39	-19.81	-16.09	-4.02	0.90	50985.81
	MAR	-17.31	-19.71	-21.41	-20.80	-16.89	-4.22	0.90	21414.04
	PEÑ	-23.66	-27.22	-29.57	-28.73	-23.33	-5.83	0.90	20006.83
	ROJ	-24.47	-27.97	-30.59	-29.75	-24.13	-6.03	0.90	23861.56
ε	-0.00443	-0.0033	-0.0022	-0.0017	-0.0010	-0.0002	0	0.0001	0.00015

MAN= Mander, J.B. (1984); CH = Chávez M. (2005, 2010); CIR = Circolare (2019); MEL = Meli R. (1998); BAI =Barbieni D. (2019); BAS = Barbales H. (2014); CON = Conde B. et al, (2017); MAR = Martínez G., et al, (2020); PEÑ = Peña F. (2010); ROJ = Rojas C. (2013); Ey = Módulo de Young; M= Mampostería; C= Concreto; ε = Deformación Unitaria. Nota 1: Para todos los casos, los nodos G e I son igual a cero. Nota 2: Los valores de "ε" en la deformación unitaria corresponden a cada nodo etquitados con lettras (ver figura 4.11).

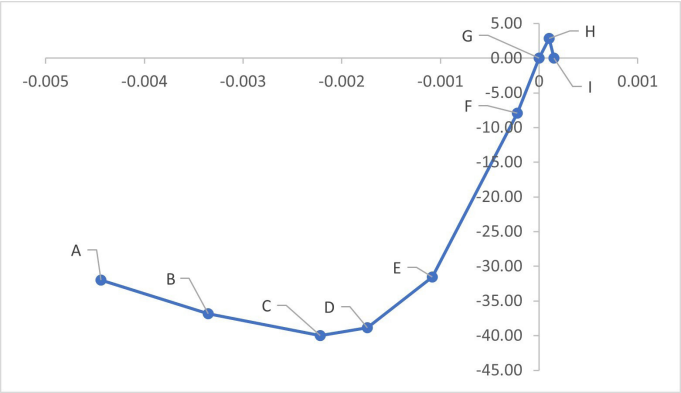


Figura 4.11. *Gráfica esfuerzo-deformación de mampostería basada en curva de concreto no confinado, generada con los datos de la tabla 4.1, tanto a compresión y tracción, en kg/cm2 , con parámetros tomados del caso M-CH1. Fuente: Retomado de Mander J., et al. (1988), Montero V. (2004), Circolare 21 (2019), Durán D. et al, (2022) y adaptado por el autor de este libro.*

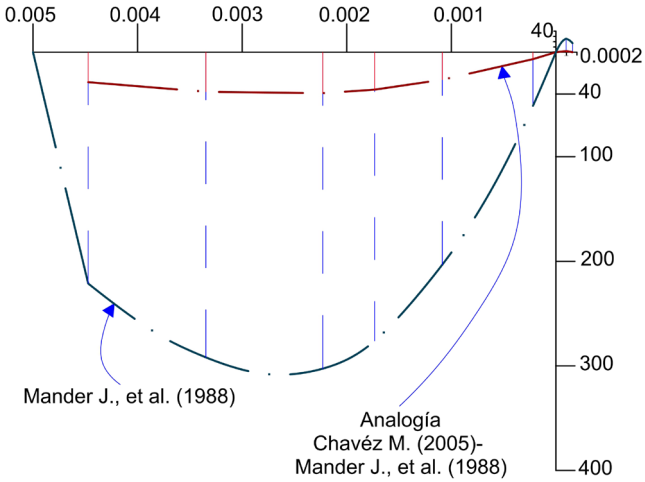


Figura 4.12. *Analogía de gráfica esfuerzo-deformación a compresión del concreto no confinado y mampostería irregular, indicando los nodos etiquetados con letras en la tabla 4.1, (en kg/cm²).* Fuente: retomado de Angelillo, M.(2014), Mander J., et al. (1988), Montero V. (2004) adaptado y redibujado por el autor de este libro.

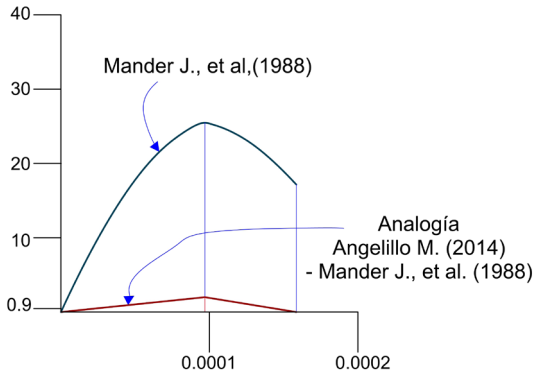


Figura 4.13. *Zona a tracción aumentada en tamaño de la analogía de gráficas esfuerzo-deformación del concreto no confinado y mampostería irregular, indicando los nodos etiquetados con letras en la tabla 4.1, (en kg/cm²)*. Fuente: retomado de Angelillo, M.(2014), Mander J., et al. (1988), Montero V. (2004) adaptado y redibujado por el autor de este libro.

En la figura 4.14 se grafican los parámetros propuestos en la tabla 4.1. Se recomienda que en la práctica profesional se obtengan especímenes propios del objeto patrimonial, sin embargo, en caso de no llevarse a cabo las pruebas de laboratorio, se pueden utilizar como una base estos parámetros de propiedades mecánicas.

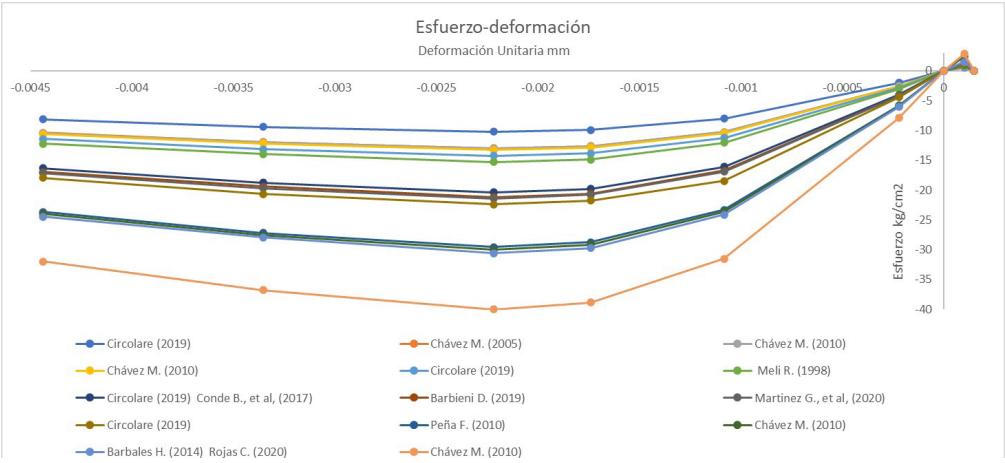


Figura 4.14. *Gráficas Esfuerzo-Deformación de la mampostería irregular.*
Fuente: resistencias a la compresión retomadas de CH = Chávez M. (2005, 2010); CIR = Circolare (2019); MEL = Meli R. (1998); BAI =Barbieni D. (2019); BAS = Barbales H. (2014); CON = Conde B. et al, (2017); MAR = Martínez G., et al, (2020); PEÑ = Peña F. (2010); ROJ = Rojas C. (2013), procesadas y graficadas por el autor de este libro.

CAPÍTULO 5

APLICACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL VIRTUAL COMPUTACIONAL

"El uso y la aplicación de la tecnología de última generación fusionada con el conocimiento nos acerca a eso que llamamos magia"

Fuente: Idea retomada de Arthur C. Clarke, modificada y complementada por el autor de este libro..

5.1. ANÁLISIS ESTRUCTUTRAL VIRTUAL COMPUTACIONAL

Antes de proceder con la modelación estructural virtual, se requiere comprender la frase *"Análisis Estructural Virtual Computacional"*, para ello, se consideran algunas definiciones que proporciona el diccionario de la Real Academia Española (RAE 2014), por ejemplo, el término "análisis" lo define como: distinción y separación de las partes de algo para conocer su composición; estudio detallado de algo. Por otra parte, define al término "estructura" como: armadura fija sobre el suelo que sirve de sustento a un edificio. Asimismo, define la palabra "virtual" como: algo que tiene virtud para producir un efecto, aunque no se produzca en el presente, por lo regular no es real; algo que tiene existencia aparente, pero no real. Por último, "computacional" lo define como: estudio o proceso que es tratado mediante computadoras.

De acuerdo con lo descrito anteriormente y con los conceptos y tecnicismos utilizados en la ingeniería estructural, el **"Análisis Estructural Virtual Computacional"** se puede definir como: *El estudio o escudriñamiento del comportamiento del sistema, es decir, elementos físicos, deformaciones, desplazamientos y elementos mecánicos, para determinar la salud estructural de algún objeto o edificio de manera gráfica o por medio de alguna reproducción no real a escala o proporción, que contenga características lo más aproximadas a un estado real de dicho objeto en el tiempo.*

5.1.1. Modelación estructural de un elemento tipo péndulo invertido

Partiendo de lo mencionado por Angelillo, M.(2014), respecto a que la mampostería no confinada trabaja básicamente de manera lineal en cuanto a los esfuerzos que desarrolla, se revisa la coherencia de resultados entre un caso analítico y los obtenidos por medio de un software de análisis estructural basado en elementos finitos. En el análisis desarrollado se utilizan las propiedades mecánicas de la "mampostería irregular" del capítulo 4, específicamente se retomaron las propuestas por Chávez M. (2005, 2010), análogamente a la curva constitutiva del concreto no reforzado, propuesta por Mander J., et al. (1988).

Con el objetivo de mostrar uno de los tantos usos del análisis por computadora de los edificios históricos, se procede a retomar de Torres C. (2023) un ejemplo en el cual se lleva a cabo una comparativa. Para ello se desarrolló un modelo de un muro asemejando un péndulo invertido, tanto de manera analítica como simulado en un software y con esto se comparan los resultados y se obtienen diferencias entre estos. Asimismo, se presenta el modelo de un inmueble del siglo XVI intervenido con elementos de concreto reforzado.

Para el caso analítico se toma en cuenta un péndulo invertido, el cual se somete a una carga concéntrica en la parte superior de la sección transversal (ver figura 5.1a). Para este análisis se tomó en cuenta un coeficiente sísmico de 0.22.

Para este caso se propone un elemento estructural tipo muro de mampostería irregular con medidas: 470cm de alto, 100cm de largo y 50cm de ancho (ver figura 5.1), a este elemento se le aplica una carga de 40 toneladas en la parte superior. El peso propio del elemento estructural fue despreciado para la simplificación del ejemplo.

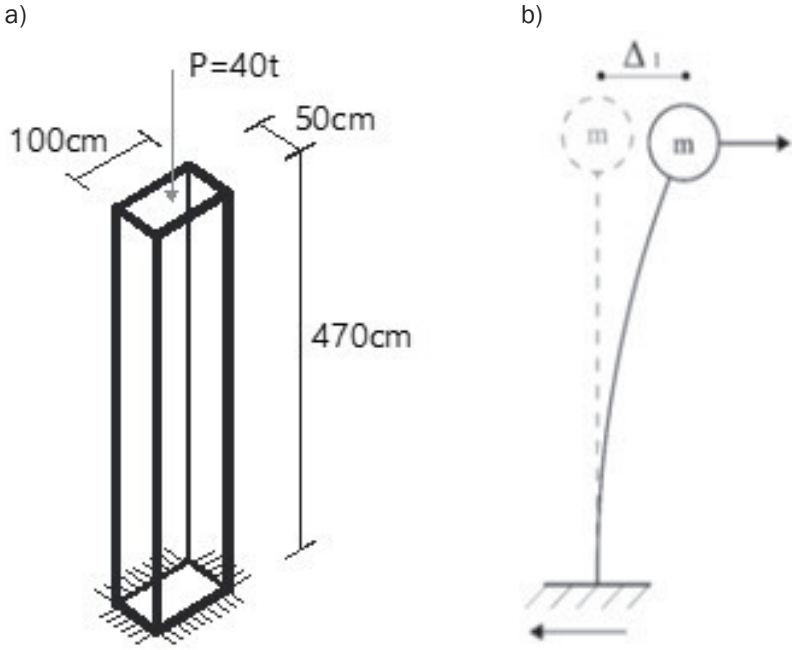


Figura 5.1. *Elemento estructural tipo péndulo invertido*: a) elemento estructural prismático con carga axial en la parte superior para ser analizado con elementos tipo Shell y sólidos, análogamente a un péndulo invertido con desplazamiento máximo, sin considerar interacción suelo-estructura; b) diagrama de cuerpo libre para simular un péndulo invertido con desplazamiento máximo en la parte superior debido a su fuerza lateral inercial. Fuente: Elaboración propia.

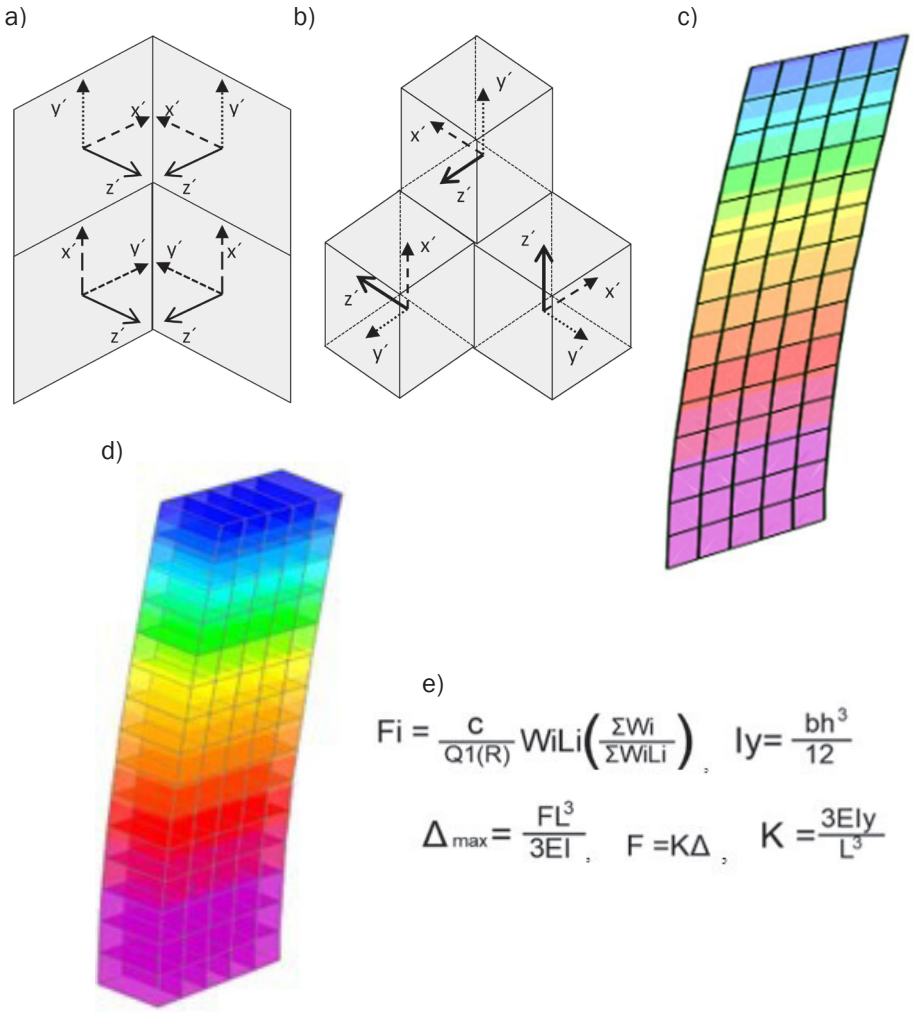


Figura 5.2. *Aplicación de las propiedades mecánicas al análisis estructural de un elemento estructural tipo péndulo invertido con propiedades de mampostería irregular*: a) elementos planos tipo Shell; b) elementos prismáticos tipo sólidos; c) análisis estático lineal con Shell; d) análisis estático lineal tipo sólido; e) expresiones matemáticas para el caso analítico. Variables: Fi=8,800 kg; Iy=4,166,666 cm^4; Δ=10.38 cm; k=847.12 kg/cm; m=40.77 $kg.s^2/m$; Te=1.378 s. Donde: Fi=Fuerza inercial; c=Coeficiente sísmico; Q1=ductilidad; R=factor de reducción por sobre-resistencia Wi=Carga inicial; Li=Altura inicial; Iy=Inercia en y; b=base de la sección transversal; h=altura de la sección transversal; ΔMax=Δ1 ; F=Fuerza; L=altura o longitud del elemento; E=Módulo Elástico; I=Inercia; K=Rigidez; Te=Periodo de la estructura; m=Masa. Fuente: retomado de Torres C. (2023).

Una vez obtenidos los desplazamientos máximos que están localizados en la parte superior del elemento denominado péndulo invertido (figura 5.1.b) por medio de las expresiones matemáticas de la figura 5.2.e, se seleccionan los nodos representativos para generar la comparativa de comportamiento entre el caso analítico (figura 5.1.b) y los casos con elementos finitos Shell y sólido (figura 5.2.c y 5.2.d).

5.1.2. Simulación del comportamiento estructural de un inmueble del siglo XVI

Se desarrolló un modelo estructural utilizando herramientas computacionales basadas en elementos finitos para simular el comportamiento estructural de un inmueble patrimonial del siglo XVI, se le aplicaron las propiedades mecánicas de mampostería irregular: Módulo de Young (Em) de 7036.04 kg/cm^2 y 5506.5 kg/cm^2, como parámetros máximo y mínimo; módulo de Poisson (*V*) de 0.15. Esta edificación está ubicada en el municipio de Santa Catarina, Estado de Hidalgo, México, construido a base de mampostería irregular junteada con argamasa compuesta de arcilla y piedra de la región, muy probablemente argamasa sin cal, dado el deterioro, degradación y socavación que presenta la capilla actualmente. La figura 3.2 muestra el modelo estructural con elementos finitos tipo Shell.

Es importante resaltar que el objetivo de la modelación estructural, presentada en este texto, es simplemente la aplicación de las propiedades mecánicas y la revisión de la variación del comportamiento estructural como simulación didáctica. Los resultados emanados en esta simulación no se deben tomar como únicos para interpretar al objeto patrimonial real, ya que dicha modelación solo representa a una parte del conjunto de actividades sistémicas como para derivar en un diagnóstico preciso.

Los modelos analizados en esta sección (figuras 5.3 a 5.7) son de un templo mexicano con dos elementos de modelación digital que son los elementos Shell y sólidos. Estos tienen diferencias complejas en su levantamiento digital, las cuales se aprecian en las mencionadas figuras.

De forma más específica en la figura 5.7 se localizan todos los nodos analizados y se muestran los resultados en tablas posteriores (tablas 5.2 a 5.7) los cuales serán comparados entre sí para concluir cuál es el mejor tipo de elemento digital o si es preferible usar uno u otro en diferentes casos.

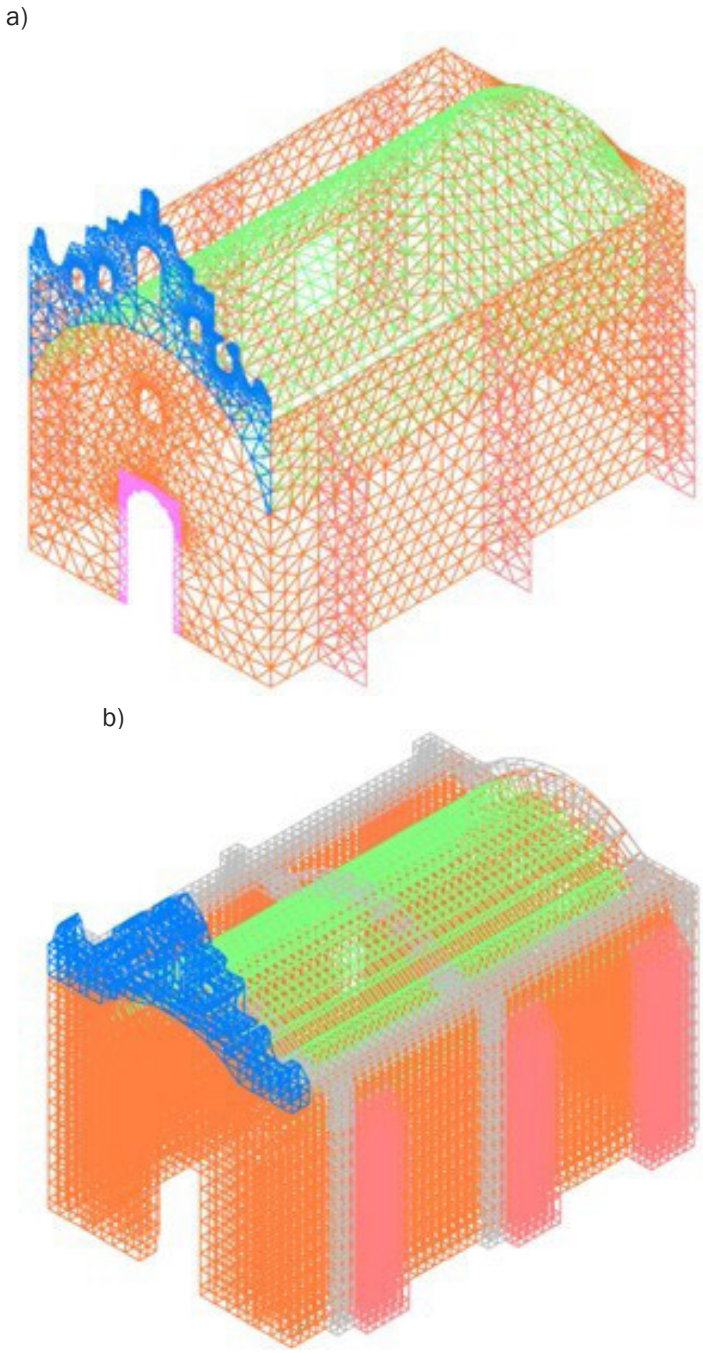


Figura 5.3. *Modelos virtuales de un templo virreinal del siglo XVI construido a base de mampostería irregular y con elementos integrados de concreto reforzado. a) modelo con elmentos shell, b)modelo con elmentos sólidos. Fuente: Torres C. (2023)*

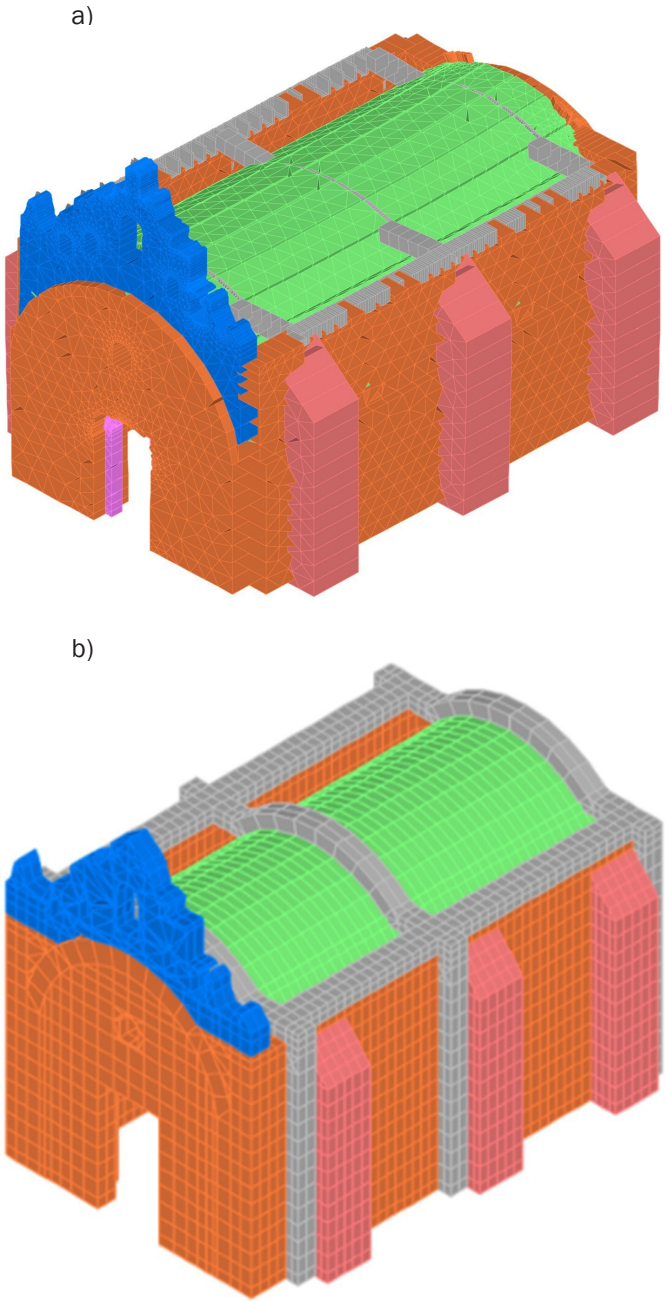
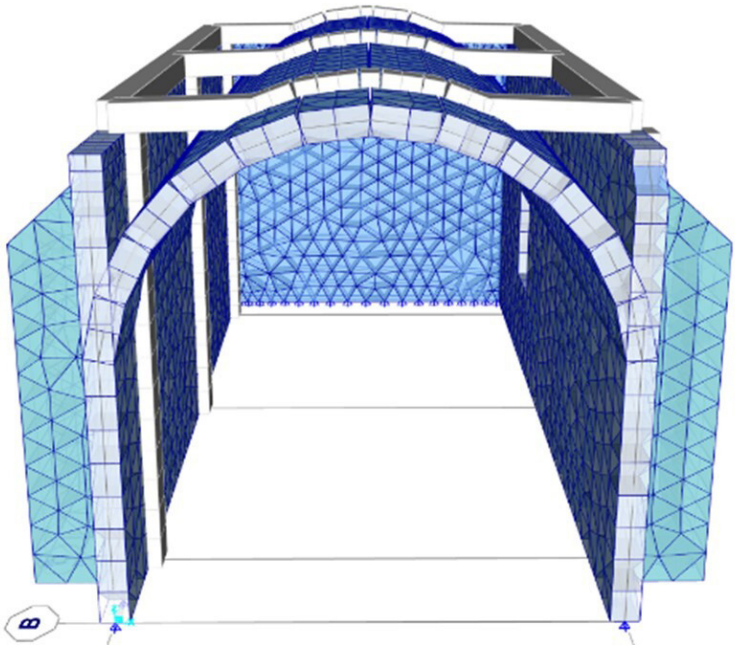


Figura 5.4. *Extrusión de modelos virtuales de un templo virreinal del siglo XVI construido a base de mampostería irregular y con elementos integrados de concreto. a) modelo con elmentos shell, b)modelo con elmentos sólidos. Fuente: Torres C. (2023)*



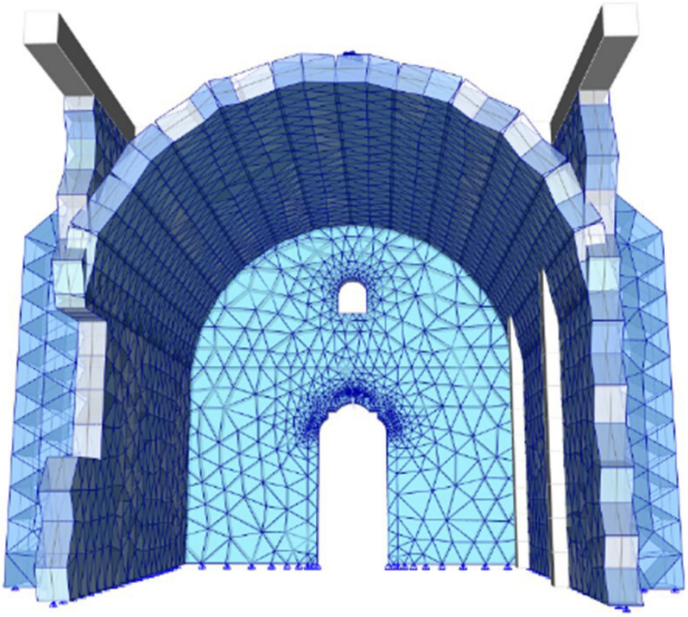
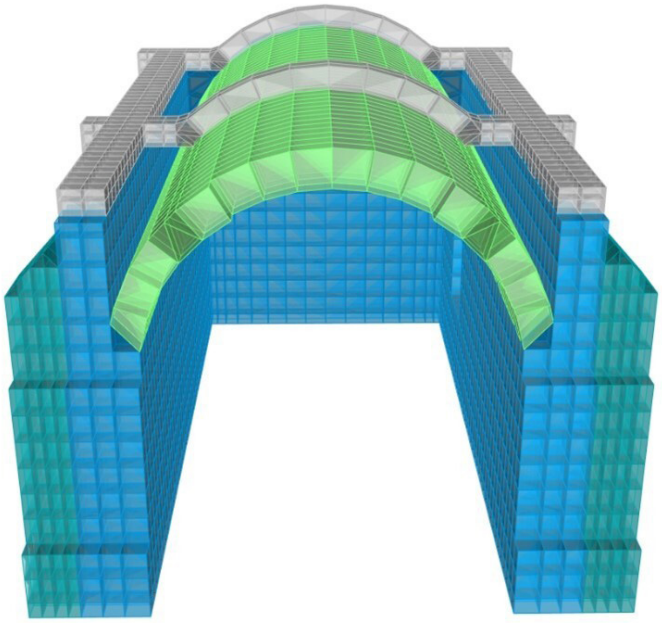


Figura 5.5. *Cortes transversales del templo virreinal del siglo XVI construido a base de mampostería irregular y con elementos integrados de concreto, en modelo con elementos shell. Fuente: Torres C. (2023)*



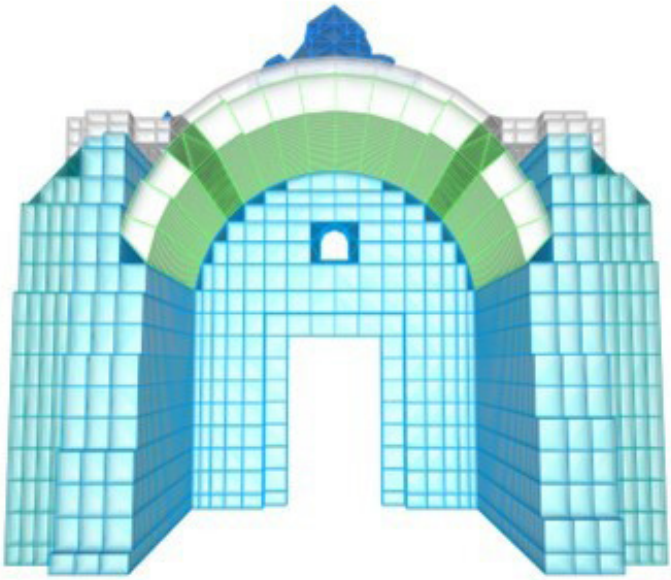


Figura 5.6. *Cortes transversales del templo virreinal del siglo XVI construido a base de mampostería irregular y con elementos integrados de concreto, en modelo con elementos sólidos. Fuente: Torres C. (2023)*

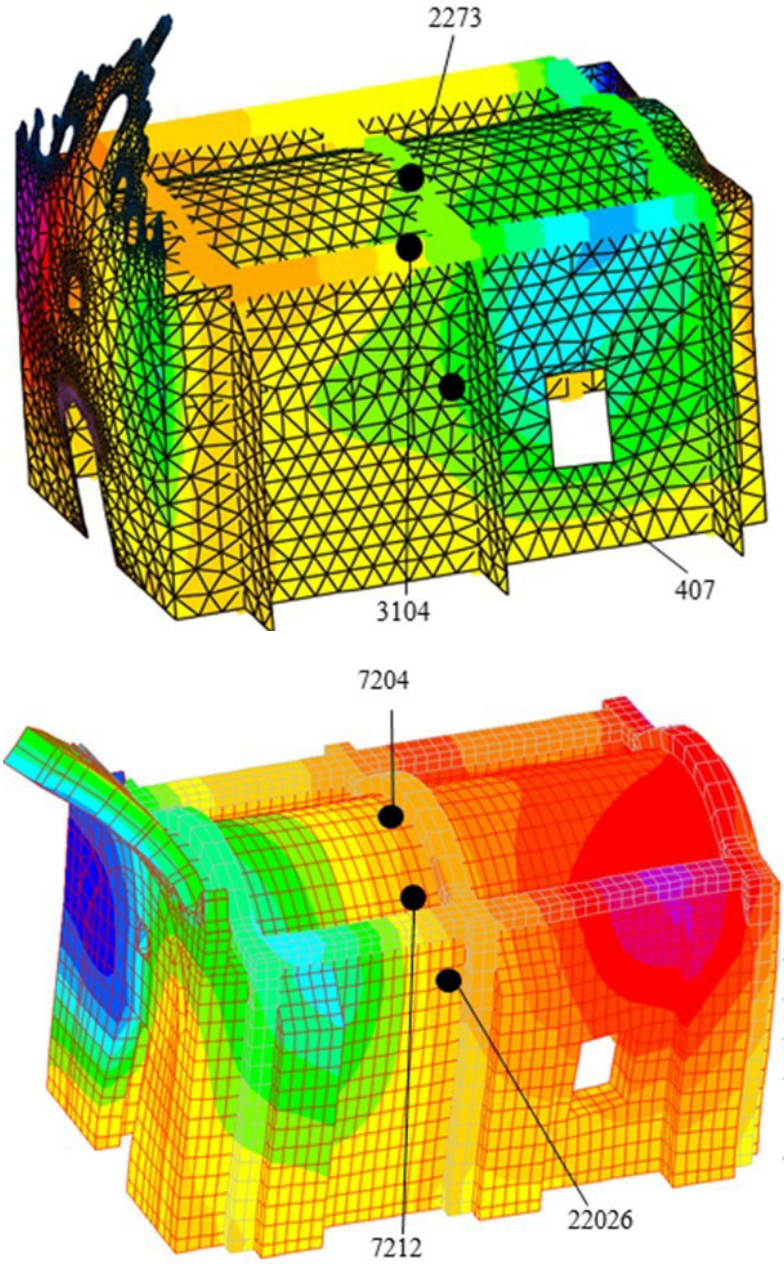


Figura 5.7. *Localización de los nodos utilizados para mostrar resultados de las deformaciones.*
Fuente: Torres C. (2023)

En la figura 5.7 se muestran los nodos seleccionados para presentar resultados, estos se pueden observar en la tablas 5.3 a 5.7, la elección de estos nodos se consideró debido a la cercanía con elementos de concreto.

Tabla 5.1. Resultados de desplazamientos máximos en elemento estructural tipo péndulo invertido para diferentes casos de análisis. Fuente: Elaboración propia

MY-TA	Δ max (cm)
E1-AN	10.72
E1-SF	70.39
E2-AN	13.45
E2-SF	13.27

Figura 5.8. *Desplazamiento lateral máximo obtenido en el análisis del péndulo invertido de manera analítica (AN) y a través de un software basado en elementos finitos (SF).* Donde: MY = Módulo de Young; TA = Tipo de análisis; E1 = 7036.04 kg/cm^2; E2 = 5506.5kg/cm^2; Δmax = Desplazamiento máximo en centímetros (ver tabla de desplazamientos máximos en tabla 5.1). Fuente: Elaboración propia.

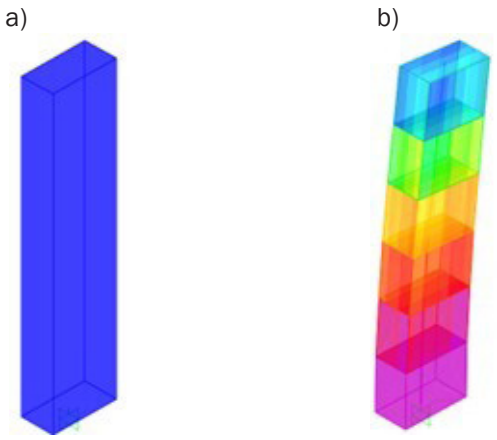


Figura 5.9. Modelo virtual de elemento tipo Frame a) elemento frame sin dezplasamientos, b) elemento frame deformado Fuente: Torres C. (2023)

En la gráfica de desplazamientos máximos (Δ Max) mostrada en la figura 5.8, se pueden observar los resultados obtenidos en los análisis del elemento péndulo invertido de manera analítica, y en la figura 5.9, con elementos Frame; con estos resultados se puede apreciar que las variaciones son mínimas entre ambos casos. Por ello se puede concluir que existe congruencia numérica en los dos métodos comparados.

Con base en lo anterior, el siguiente apartado muestra el análisis de dos tipos de elementos finitos, uno con elementos Shell y otro con sólidos, en los cuales se seleccionan varios nodos para compararlos entre ellos. Torres, C. A. (2023) Análisis lineal y no lineal de estructuras históricas de mampostería irregular comparativa entre elementos sólidos y shell, 4CIHCLB, ISBN: 978-989-54496-9-9

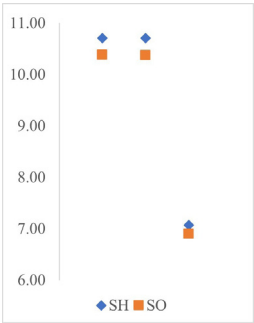
Tabla 5.2. *Desplazamientos en elementos Shell y sólidos de un caso de péndulo invertido, considerando diferentes tipos de análisis. Fuente: Elaboración propia.*

Desplazamientos en cm de elemento péndulo invertido

TA	STC	
	SH	SO
	E1	
EL	10.71	10.38
CS	10.71	10.37
ER	7.07	6.90
	E2	
EL	13.67	13.26
CS	13.67	13.25
ER	8.38	8.19

Donde: TA = Tipo de Análisis; STC = Santa Catarina; SH = Shell; SO = Sólido; E1 y E2 = Módulo de Young; EL = Estático Lineal; CS = Coeficiente Sísmico; ER = Espectro de Respuesta.

a)



b)

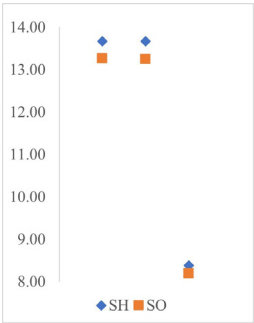


Figura 5.10. *Desplazamientos del caso péndulo invertido*: a) módulo elástico de 7036.04kg/cm^2; b) módulo elástico de 5506.5kg/cm^2. Donde: SH = Shell; SO = Sólido; E1 y E2 = Módulo de Young. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.3. Desplazamientos en elementos Shell y sólidos, de un templo mexicano intervenido con concreto y no intervenido, considerando los nodos 2273 y 7204 para sus diferentes tipos de análisis. Fuente: Elaboración propia.

Desplazamientos en cm en modelos de la Santa Catarina

TA	STC			
	CC		SC	
	E1			
	SH	SO	SH	SO
CS	0.30	0.16	0.33	0.24
ER	0.23	0.13	0.25	0.18
	E2			
CS	0.34	0.20	0.33	0.30
ER	0.28	0.16	0.25	0.23

Donde: TA = Tipo de Análisis; STC = Santa Catarina; SH = Shell; SO = Sólido; CC = Con Concreto; SC = Sin Concreto; E1 y E2 = Módulo de Young; CS = Coeficiente sísmico; ER = Espectro de respuesta.

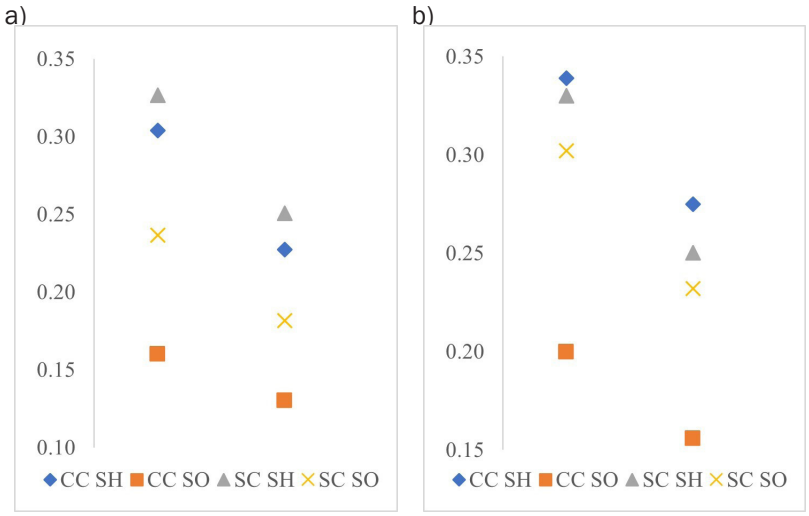


Figura 5.11. *Desplazamientos del caso Santa Catarina en los nodos 2273 y 7204 en modelos Shell y sólido*: a) módulo elástico de 7036.04kg/cm^2; b) módulo elástico de 5506.5kg/cm^2. Donde: SH = Shell; SO: Sólido; E1 y E2 = Módulo de Young; CC = Con Concreto; SC = Sin Concreto. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.4. *Desplazamientos en elementos Shell y sólidos de un templo mexicano intervenido con concreto y no intervenido, considerando los nodos 3104 y 7212, para sus diferentes tipos de análisis. Fuente: Elaboración propia.*

Desplazamientos en cm en modelos de la Santa Catarina

TA	STC			
	CC		SC	
	E1			
	SH	SO	SH	SO
CS	0.34	0.18	0.65	0.27
ER	0.29	0.14	0.60	0.21
	E2			
CS	0.38	0.20	0.66	0.35
ER	0.31	0.17	0.61	0.27

Donde: TA = Tipo de Análisis; STC = Santa Catarina; SH = Shell; SO = Sólido; CC = Con Concreto; SC = Sin Concreto; E1 y E2 = Módulo de Young; CS = Coeficiente sísmico; ER = Espectro de respuesta.

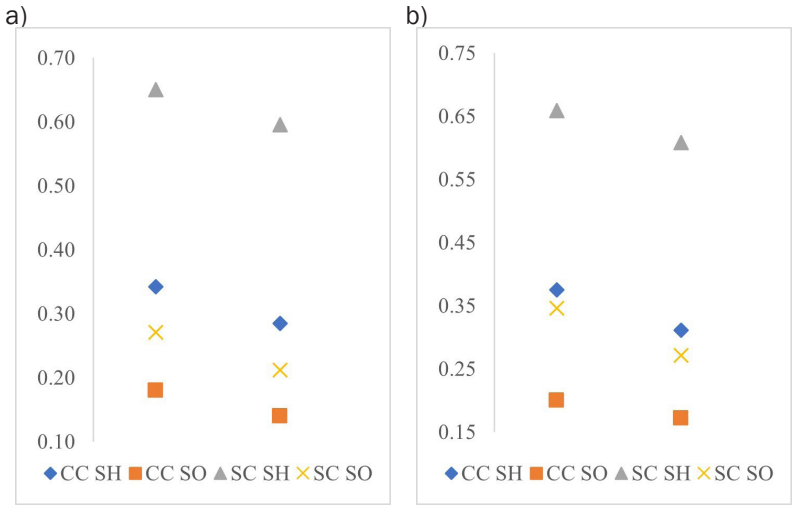


Figura 5.12. *Desplazamientos del caso Santa Catarina en los nodos 3104 y 7212 en modelos Shell y sólido*: a) módulo elástico de 7036.04kg/cm^2; b) módulo elástico de 5506.5kg/cm^2. Donde: SH = Shell; SO: Sólido; E1 y E2 = Módulo de Young; CC = Con Concreto; SC = Sin Concreto. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.5. *Desplazamientos en elementos Shell y sólidos de un templo mexicano intervenido con concreto y no intervenido, considerando los nodos 407 y 22026, para sus diferentes tipos de análisis. Fuente: Elaboración propia.*

Desplazamientos en cm en modelos de la Santa Catarina

TA	STC			
	CC		SC	
	E1			
	SH	SO	SH	SO
CS	0.27	0.17	0.36	0.34
ER	0.23	0.14	0.33	0.29
	E2			
CS	0.30	0.21	0.38	0.43
ER	0.26	0.17	0.34	0.37

Donde: TA = Tipo de Análisis; STC = Santa Catarina; SH = Shell; SO = Sólido; CC = Con Concreto; SC = Sin Concreto; E1 y E2 = Módulo de Young; CS = Coeficiente sísmico; ER = Espectro de respuesta.

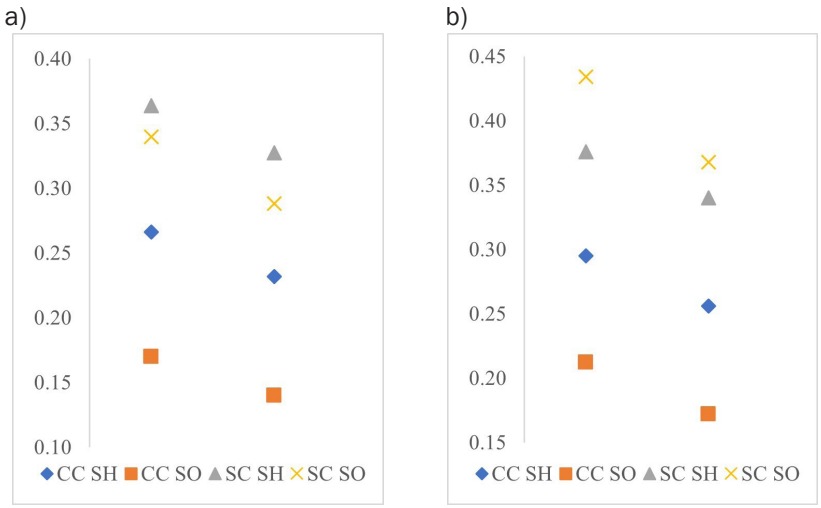


Figura 5.13. *Desplazamientos del caso Santa Catarina en los nodos 407 y 22026 en modelos Shell y sólido*: a) módulo elástico de 7036.04kg/cm^2; b) módulo elástico de 5506.5kg/cm^2. Donde: SH = Shell; SO: Sólido; E1 y E2 = Módulo de Young; CC = Con Concreto; SC = Sin Concreto. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.6. *Comparación de periodos de vibrar del caso de estudio de péndulo invertido en elementos tipos Frame, Shell y sólido. Fuente: Elaboración propia.*

Comparación de periodos en segundos

TA	PIF	SH	SO	IPF	SH	SO
	E1			E2		
Te	1.38	1.41	1.38	1.56	1.59	1.56

Donde: TA = Tipo de Análisis; PIF = péndulo Invertido Frame; SH = Shell; SO = Sólido; E1 y E2 = Módulo de Young; Te = Periodo de vibrar de la estructura.

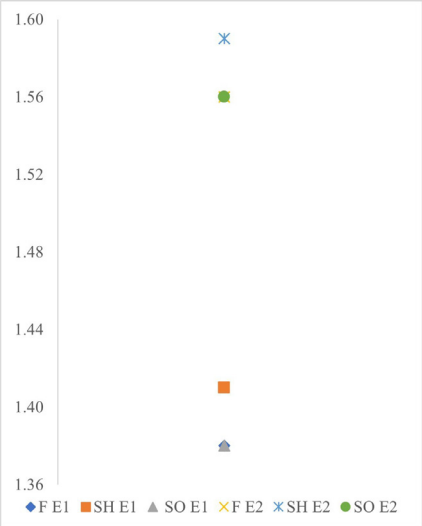


Figura 5.14. *Comparación de periodos del Caso péndulo invertido*. Donde: F = Frame; SH = Shell; SO = Sólido; E1 y E2 = Módulo de Young; CC = Con Concreto; SC = Sin Concreto. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.7. *Comparación de periodos de vibrar del templo mexicano modelado con elementos Shell y sólido. Fuente: Elaboración propia.*

Comparación de periodos en segundos

TA	E1				E2			
	CC		SC		CC		SC	
Te	SH	SO	SH	SO	SH	SO	SH	SO
M1	0.17	0.13	0.19	0.16	0.18	0.15	0.19	0.18
M2	0.16	0.13	0.17	0.13	0.17	0.14	0.17	0.15
M3	0.12	0.09	0.15	0.12	0.12	0.10	0.16	0.13

Donde: TA = Tipo de Análisis; PIF = Péndulo Invertido Frame; SH = Shell; SO = Sólido; CC = Con Concreto; SC = Sin Concreto; E1 y E2 = Módulo de Young; Te = Periodo de vibrar de la estructura; M1 = Modo 1; M2 = Modo 2; M3 = Modo3.

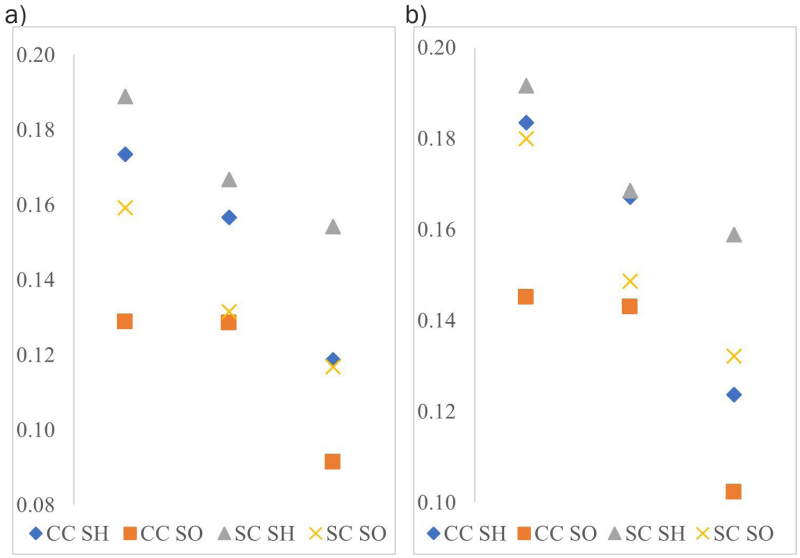


Figura 5.15. *Comparación de periodos del Caso péndulo invertido*. Donde: F = Frame; SH = Shell; SO = Sólido; E1 y E2 = Módulo de Young; CC = Con Concreto; SC = Sin Concreto. Fuente: Elaboración propia.

Es evidente que de las tablas 5.2 a 5.5 los elementos Shell (SH) tienden a tener desplazamientos ligeramente mayores que los obtenidos con elementos tipo sólidos (SO), la diferencia es muy pequeña en algunos casos, por tal motivo, se puede decir que el análisis y la modelación estructural con ambos tipos de elementos es viable en elementos aislados; sin embargo, se requieren excelentes tácticas de modelación en sistemas tridimensionales al utilizar los elementos Shell, debido a la ubicación en el espacio, las conexiones e intersecciones del objeto real.

Por último, en las tablas 5.6 y 5.7 se aprecian los diferentes modos de vibrar de ambos modelos en los cuales los resultados tienen variaciones proporcionales entre estos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Angelillo, M.(2014). Mechanics of Mansory Structures. Maurizio Angelillo. Springer. Università di Salerno.

Asteris P., Cavaleri L., Trapani F. & Sarhosis V. (2016). A macro-modelling approach for the analysis of infilled Frame structures considering the effects of openings and vertical loads. Routledge Taylor & Francis Group.

Bahman, G; & Gabriele, M. (2019). Modelización numérica de estructuras mansas e históricas. Elsevier, Woodhead publishing.

Barbieri D.M. (2019), Two methodological approaches to assess the seismic vulnerability of masonry bridges, ISSN 2095-7564, J. Traffic Transp. Eng. (Engl. Ed.) 6, 49–64

Catalán, P., Moreno, J., Galvan, A., & Arroyo, R. (2019). Obtención de las propiedades mecánicas de la mampostería de adobe mediante ensayes de laboratorio.

Chávez M. (2005). Estudio experimental de las propiedades mecánicas de mamposterías de piedra natural. Instituto de ingeniería, UNAM, México.

Chávez M. (2010). Validación experimental de modelos analíticos para el estudio del comportamiento sísmico de estructuras históricas. Instituto de ingeniería, UNAM. México.

Circolare. (2019). Código italiano DM 14.1. Il Ministro: Toninelli.

Collignon, Édouard. 1885. Cours de mécanique appliquée aux constructions. Première partie: Résistance des matériaux. 3a ed. Paris: Vve. Ch. Dunod.

Computers and Structures, Inc. (2008). Technical Note Material Stress-Strain Curves. CSI.

Conde B., Ramos L.F., Oliveira D., Riveiro B., Solla M., (2017). Structural assessment of masonry arch bridges by combination of non-destructive testing techniques and three-dimensional numerical modelling: application to Vilanova bridge, ISSN 0141-0296, Eng. Struct. 148 621–638,

D.2.7. (2002). Istruzioni Tecniche per la redazione degli elaborati di indagine, documentazione e progetto di interventi di miglioramento antisísmico. Ordi-

nanza del Ministero dell'Interno - Dip.to della Protezione Civile - N. 3193 del 29.3.2002.

Durán D., Chávez M. (2022). "Mechanical properties of masonry stone samples extracted from Mexican Colonial churches" Editado por Elsevier, Woodhead publishing, Duxford, United Kingdom.

Escudero Castro, H. C. (2019). Restauración arquitectónica, problema teórico. [Tesis de maestría]. Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía "Manuel del Castillo Negrete".

García, G. (2007). Funcionamiento y seguridad estructural de los templos conventuales del siglo XVI en México. Tesis doctoral. México; UNAM, México.

Heyman, J. (1969). TEORÍA, HISTORIA Y RESTAURACIÓN DE ESTRUCTURAS DE FÁBRICA. Inst. Juan de Herrera.

Heyman, J. (1997). El esqueleto de piedra. Inst. Juan de Herrera.

Hognestad E. (1951). A study of combined bending and axial load in reinforced concrete members. University of Illinois Bulletin, 49(22).

Huerta, S. (2004). Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica. Inst. Juan de Herrera.

ISO 13822. (2010). Bases for design of structures — Assessment of existing Structures. International Organization for Standardization.

Istruzioni. (2004). D.2.7 Tecniche per la redazione degli elaborati di indagine, documentazione e progetto di interventi di miglioramento antisísmico.

Kent D. y Park R. (1971). Flexural members with confined concrete. Journal of the Structural Division, ASCE, 97(7):1969-1990.

Lacobelli, F. (2018). Progetto e verifica delle costruzioni in muratura in zona sísmica VIII Edición. EPC S.r.l.

Lourenço, B. P; & Gaetani, A. (2022). Análisis de elementos finitos para la evaluación de edificios: Uso avanzado y recomendaciones prácticas. Routledge Taylor & Francis Group.

Mander, J. B; Priestley, M. J. N; & Park, R. (1984). Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete. Journal of Structural Engineering. ASCE. 114(3). 1804-1826.

María, G. (2007). Experiencias multidisciplinarias en el estudio del patrimonio y el paisaje. Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

Martinez G., Castillo D., Jara J. , Olmos B., (2020). Seismic vulnerability assessment for San Francisco temple in Morelia, M´exico, NED Univ. J. Res. 207–215

Mas-Guindal, A. J. (2011). *Mecánica de las estructuras antiguas o cuando las estructuras no se calculaban*. MUNILLALERIA

Meli, R. (1998). Ingeniería estructural de los edificios históricos. ICA.

Minke, G. (2005). Manual de construcción para viviendas antisísmicas de tierra. Forschungslabor für Experimentelles Bauen, Universidad de Kassel.

Montero López, V. (2004). Diseño de un edificio con muros de carga y cortante. Bibliotecas UDLAP.

Moreno, N. (2017). Efecto de las fibras de acero sobre el confinamiento de columnas de concreto. Informe Técnico. Universidad militar nueva granada.

Pastrana T., Montejano M., Torres C., Reséndiz A., Escuder H., Domíngez L., (2015). El objeto Patrimonial. Editorial Restauro Compás y Canto S.A. de C.V.

Penelis, G. (1996). “Techniques and Materials for Structural Restoration” Memorias 1 WCEE, Paper No. 2089, Elsevier Science, Ltd.

Peña F., Meza M., (2010) Seismic assessment of bell towers of Mexican Colonial churches, Adv. Mater. Res. 133 585–590,

Real Academia Española, (2014) Diccionario de la lengua española, 23.ª ed. [versión 23.6 en línea]. <https://dle.rae.es> [05/10/23].

Restrepo, J. I. (2020). Evaluación de la rigidez lateral efectiva de columnas de concreto reforzado. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Rodrígez I., Vasconcelos G., Lourenço P., Quintana P., García C., Dionísio A. (2021). “Physical-mechanical characterization of limestones from Yucatan churches”, Mexico, México. Elsevier, Woodhead publishing.

Rojas C. , (2013). Diagnóstico y propuesta de rescate estructural de la Capilla de la Trinidad, San Francisco de los Romo, Ags, Master’S. Thesis Univ. Auton. De. Aguascalientes 86.

Santa Ana, P. (2018). Estudio geométrico y constructivo de la obra de Antonio Gaudí. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación.

Segovia, M. A. (2022). Análisis constructivo - estructural para determinar el comportamiento de un inmueble de mampostería del siglo XVI, Santa Catarina, Atotonilco del grande. Tesis del IPN.

Shaqfa M. & Beyer K. (2022). A virtual microstructure generator for 3D stone masonry walls. Elsevier, European Journal of Mechanics / A Solids

Torres, C. A. (2018). Principios Teóricos de Conservación y Restauración previos al Análisis Estructural de Edificios Históricos, un enfoque sistémico e interdisciplinario. Restauro Compás y Canto – SA. de CV.

Torres, C. A. (2023). Análisis lineal y no lineal de estructuras históricas de mampostería irregular comparativa entre elementos sólidos y shell, 4CIHCLB, ISBN: 978-989-54496-9-9

Este texto está pensado para que sirva de apoyo a restauradores de bienes inmuebles, investigadores, profesores, alumnos de nivel licenciatura y posgrado, así como a profesionales involucrados en el análisis e intervención estructural de edificios patrimoniales.

Se presenta una propuesta metodológica general para analizar las estructuras de edificios patrimoniales, aunque en realidad se puede aplicar para cualquier tipo de edificación ya construida, sea cual sea su nivel de deterioro estructural, simplemente se deberán hacer los ajustes pertinentes en cada fase y contar con las herramientas de análisis acordes en cada caso.

Es esencial que todos aquellos involucrados en el análisis estructural de edificios patrimoniales conozcan las características de los sistemas constructivos y en específico las propiedades de los materiales, con la finalidad de poder realizar las simulaciones de comportamiento estructural con mayor certeza. Es por ello, que en este libro se presentan propiedades de la mampostería irregular, tanto nacionales como internacionales.

EDITORIAL RESTAURO COMPÁS Y CANTO