



**UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA**

*La Universidad Católica de Loja*

**ÁREA TÉCNICA**

**TÍTULO DE ARQUITECTO**

**Mampostería de ladrillo portante como método constructivo para viviendas unifamiliares.**

**TRABAJO DE TITULACIÓN**

**AUTOR:** Navas Castellanos Ricardo Felipe

**DIRECTOR:** Galarza Viera José Luis, Arq. MGS.

LOJA – ECUADOR

2017



*Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NY-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>*

*Septiembre, 2017*

## **APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Arquitecto MGS.

José Luis Galarza Viera Galarza.

**DOCENTE DE LA TITULACIÓN**

De mi consideración:

El presente trabajo de titulación: “Mampostería de ladrillo portante como método constructivo para viviendas unifamiliares” realizado por Ricardo Felipe Navas Castellanos, ha sido orientado revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, febrero de 2017

f) .....

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo, Ricardo Felipe Navas Castellanos declaro ser autor del presente trabajo de titulación: **“Mampostería de ladrillo portante como método constructivo para viviendas unifamiliares”**, de la Titulación de Arquitectura, siendo el Arq. MGS José Luis Galarza Viera director del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 88 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado o trabajos de titulación que se realicen con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”

f) .....  
Ricardo Felipe Navas Castellanos  
CI: 0502836752

## DEDICATORIA

A mi familia, que es mi mayor fortaleza, mi compañía incondicional y mi refugio durante las  
tempestades.

## AGRADECIMIENTO

A mis padres Martha y Marco (+), a mi hermano Andrés, a mis abuelos, tíos y primos, que siempre han estado allí para a mí, compartiendo conmigo mis momentos de alegría y júbilo, ayudándome a soportar la carga de mis tristezas y decepciones, con aliento incondicional.

Al Arq. José Luis Galarza V., cuya dirección oportuna fue el faro que orientó siempre este proyecto en la dirección correcta, siendo un pilar fundamental en su exitosa culminación.

A mis profesores y compañeros de la Titulación, cuya enseñanza, ejemplo y apoyo lograron que me enamore de la arquitectura cada día más.

A mis amigos Nahúm, Sergio, Lenin, Rocío, Jimmy, Luis, entre tantos otros, quienes me acogieron, y me hicieron sentir bienvenido en una ciudad que no era la mía y se convirtieron, con el tiempo, en una segunda familia lejos de mi hogar.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

|   |      |
|---|------|
| APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN ..... | II   |
| DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS .....       | III  |
| DEDICATORIA .....                                       | IV   |
| AGRADECIMIENTO .....                                    | V    |
| ÍNDICE DE CONTENIDOS.....                               | VI   |
| RESUMEN.....  | X    |
| ABSTRACT.....   | XI   |
| INTRODUCCIÓN .....                                      | XII  |
| PROBLEMA.....   | XIII |
| JUSTIFICACIÓN.....                                      | XIV  |
| OBJETIVOS.....  | XV   |
| CAPÍTULO 1.....   | 16   |
| 1.1. Breve Historia del Ladrillo.....                   | 17   |
| 1.2. Definición del ladrillo.....                       | 18   |
| 1.2.1. Terminología de caras y aristas.....             | 18   |
| 1.3. Características del Ladrillo.....                  | 18   |
| 1.3.1. Propiedades Físicas y Químicas.....              | 18   |
| 1.3.2. Cualidades de la superficie.....                 | 19   |
| 1.3.3. Régimen de absorción y succión del Ladrillo..... | 19   |
| 1.3.4. Eflorescencia.....                               | 19   |
| 1.4. Clasificación del ladrillo.....                    | 21   |
| 1.4.1. Clasificación morfológica.....                   | 21   |
| 1.4.2. Clasificación fabril.....                        | 21   |
| 1.4.3. Clasificación cualitativa.....                   | 21   |
| 1.5. Proceso de Fabricación del ladrillo artesanal..... | 22   |
| 1.5.1. Extracción .....                                 | 22   |
| 1.5.2. Mezclado.....                                    | 22   |

|   |    |
|---|----|
| 1.5.3. Humectación .....  | 23 |
| 1.5.4. Moldeado .....   | 23 |
| 1.5.5. Secado .....   | 23 |
| 1.5.6. Cocción .....  | 23 |
| 1.6. Armado de mampostería de ladrillos. ....                   | 24 |
| 1.6.1. Nomenclatura en la disposición de ladrillos. ....        | 24 |
| 1.6.2. Tipos de disposiciones de ladrillo. ....                 | 25 |
| 1.6.3. Ejecución de muros de ladrillo .....                     | 26 |
| 1.6.4. Juntas en muros de ladrillo. ....                        | 27 |
| 1.6.5. Leyes de Traba. ....                                     | 27 |
| 1.7. Aparejos.....  | 28 |
| 1.7.1. Aparejo Americano.....                                   | 28 |
| 1.7.2. Aparejo Inglés. ....                                     | 29 |
| 1.7.3. Aparejo Belga.....                                       | 29 |
| 1.8. Cimientos de Mampostería. ....                             | 30 |
| 1.9. Muros de Sótano o Basamento.....                           | 31 |
| 1.10.Muros de Supraestructura.....                              | 32 |
| 1.11.Dinteles de Ladrillo.....                                  | 34 |
| 1.12.Celosías de Ladrillo.....                                  | 35 |
| CAPÍTULO 2.....   | 36 |
| 2.1 Simulación.....   | 37 |
| 2.2 Análisis de Elementos Finitos .....                         | 37 |
| 2.2.1 Breve Historia del Análisis de elementos Finitos .....    | 39 |
| 2.2.2 Etapas del Proceso de Análisis de elementos Finitos ..... | 40 |
| 2.2.3 Software de Evaluación .....                              | 41 |
| 2.3 Estrategias de Modelado de Mampostería de Ladrillo.....     | 42 |
| 2.3.1 Micro-Modelado .....                                      | 44 |
| 2.3.2 Macro-modelado .....                                      | 45 |

|   |    |
|---|----|
| CAPÍTULO 3.....   | 48 |
| 3.1. Consideraciones Previas .....                        | 49 |
| 3.1.1. Resistencia característica a la compresión.....    | 49 |
| 3.1.2. Resistencia de la mampostería a la flexión.....    | 50 |
| 3.1.3. Cargas que intervienen en el modelo.....           | 50 |
| 3.2. Descripción del Modelo Numérico .....                | 52 |
| 3.2.1. Modelado de Muros Independientes:.....             | 52 |
| 3.2.2. Modelado de Habitación Completa: .....             | 53 |
| 3.3. Resultados del Modelo Numérico .....                 | 54 |
| 3.3.1. Resultados sobre el muro Tipo I .....              | 54 |
| 3.3.2. Resultados sobre el muro Tipo II .....             | 55 |
| 3.3.3. Resultados sobre el muro Tipo III .....            | 55 |
| 3.3.4. Resultados sobre el muro Tipo IV.....              | 56 |
| 3.3.5. Resultados sobre la habitación (carga normal)..... | 56 |
| 3.3.6. Resultados sobre la habitación (terremoto) .....   | 57 |
| CONCLUSIONES .....  | 59 |
| RECOMENDACIONES.....                                      | 60 |
| BIBLIOGRAFÍA.....   | 61 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1: partes de un ladrillo .....   | 18 |
| Figura 2: nomenclatura en la disposición .....  | 24 |
| Figura 3: disposiciones de ladrillo en muros.....   | 25 |
| Figura 4: revestido sobre ladrillo.....   | 27 |
| Figura 5: tipos de juntas de ladrillo .....   | 27 |
| Figura 6: aparejo americano.....  | 28 |
| Figura 7: aparejo inglés .....  | 29 |
| Figura 8: aparejo belga.....  | 29 |
| Figura 9: estrategias para construir un cimiento de ladrillo en longitud y esquinas ..... | 31 |
| Figura 10: tipos de dinteles de ladrillo .....  | 34 |
| Figura 11: tipos de celosías de ladrillos.....  | 35 |
| Figura 12: ejemplo de una viga simplificada en forma de un elemento 1D.....               | 38 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 13: estrategias de modelado para estructuras de mampostería .....              | 43 |
| Figura 14: mecanismos de falla de mampostería.....                                    | 45 |
| Figura 15: modos de flexión de la mampostería de ladrillo .....                       | 50 |
| Figura 16: modelado de habitación y de las cargas externas a las que se somete. ....  | 54 |
| Figura 17: diagrama de estrés sobre el muro TI.....                                   | 54 |
| Figura 18: diagrama de desplazamiento del muro TI .....                               | 54 |
| Figura 19: diagrama de estrés sobre el muro TII.....                                  | 55 |
| Figura 20: diagrama de desplazamiento del muro TII .....                              | 55 |
| Figura 21: diagrama de estrés sobre el muro TIII.....                                 | 55 |
| Figura 22: diagrama de desplazamiento del muro TIII .....                             | 55 |
| Figura 23: diagrama de estrés sobre el muro TIV .....                                 | 56 |
| Figura 24: diagrama de desplazamiento del muro TIV .....                              | 56 |
| Figura 25: diagrama de estrés sobre la habitación (c. normal) .....                   | 56 |
| Figura 26: diagrama de desplazamiento de los muros de la habitación (c. normal) ..... | 56 |
| Figura 27: diagrama de estrés sobre la habitación (terremoto).....                    | 57 |
| Figura 28: diagrama desplazamiento de la habitación (terremoto) .....                 | 57 |
| Figura 29: diagrama de aceleración sobre la habitación (terremoto) .....              | 57 |
| Figura 30: diagrama velocidad de la habitación (terremoto) .....                      | 57 |

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

|  |    |
|--|----|
| Ilustración 1: vista exterior edificio Griboni .....                                       | 35 |
| Ilustración 2: visualización de automóvil deformado utilizando elementos finitos .....     | 37 |
| Ilustración 3: análisis estructural de la universidad de Cuza, usando macro-modelado ..... | 47 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1: clases de exposición a la que puede someterse el ladrillo.....  | 20 |
| Tabla 2: espesor en centímetros de muros de sótano .....   | 32 |
| Tabla 3: espesor en centímetros de muros de ladrillo en edificios comerciales, reglamento de construcción de EEUU..... | 33 |
| Tabla 4: muros modelados para analizarse independientemente, con vanos crecientes. ....                                | 52 |

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo ofrecer un método alternativo para el diseño constructivo de edificaciones de vivienda unifamiliar: el ladrillo estructural sin refuerzos, que cumple efectivamente con las exigencias estructurales de este tipo de construcciones. También se explora los beneficios del análisis computarizado, específicamente el análisis de elementos finitos como una opción más rápida y económica, para realizar pruebas de materiales y métodos constructivos sin necesidad de recurrir al laboratorio.

En el primer capítulo se realiza una reseña de la historia, características y posibilidades constructivas y estéticas del ladrillo artesanal disponible en la ciudad de Loja.

El segundo capítulo define el método de elementos finitos, sus propiedades ventajas y los métodos de modelado que ofrece, analizando las fortalezas y debilidades de cada uno, para poder escoger el más adecuado.

Finalmente, se aplica el método de macro-modelado para construir un modelo numérico de una estructura de ladrillo soportante sin refuerzo y probar su respuesta a cargas normales, y finalmente a eventos inesperados (sismos).

**PALABRAS CLAVE:** mampostería, ladrillo, análisis de elementos finitos, simulación, modelo numérico, Abaqus.

## **ABSTRACT**

The main goal of the present research work is to offer an alternative design method for constructive approach of single-family dwelling buildings: unreinforced brick masonry effectively meets the structural requirements of this small buildings. It is also important to explore the benefits of computerized analysis, specifically finite elements analysis (FEA) as a faster a cheaper option to carry on test that would be consume a lot more time and resources if carried on by traditional methods

The first chapter includes an overview of the history, features, constructive and aesthetic possibilities that the hand-crafted brick found in Loja has to offer.

The second chapters define the FEA, its features and superiority as an analysis tool, also examines the modeling methods that can be applied, overwathcing the strengths and weaknesses of each one.

Finally, the macro-modeling method is applied to construct a numerical model of an unreinforced masonry structure that fits the local conditions. The model is then tested under normal external loads, and finally under unexpected events (earthquakes).

**KEYWORDS:** masonry, brick, Finite Elements Analysis, simulation, numerical model, Abaqus.

## INTRODUCCIÓN

La revolución industrial y las nuevas ideas de construcción propuestas por los padres del modernismo en la Bauhaus a principios del siglo XX, y más tarde por le Corbusier en sus célebres cinco puntos y casa dominó propuso un sistema que revolucionó la arquitectura y la concepción de los espacios construidos durante los siguientes cien años. Una de las ideas más impactantes de esta nueva concepción, fue la del uso de la estructura independiente de hormigón armado que resultó en la “planta dominó”, utilizando las entonces nuevas ideas de combinar la resistencia del hormigón con la flexibilidad del acero, se pudieron crear estructuras esbeltas y resistentes, que permitieron alcanzar la idea de la planta libre, donde los muros son una mera envolvente, desprovista de toda función estructural, lo que deja la libertad de levantarlos, moverlos o derrocarlos, a medida que cambian las necesidades del espacio. Gracias a la genialidad de este sistema, se fue adaptando poco a poco a las edificaciones de todas las escalas, desde estadios, catedrales y rascacielos, hasta refugios temporales viviendas y garitas, dejando casi por completo de lado a los sistemas de construcción tradicionales que les precedieron, que consistían básicamente en muros de soporte construidos de tierra apisonada, o bloques independientes esculpidos.

Si bien este cambio de sistema ha sido el corazón de la modernización de las ciudades en todo el mundo permitiendo la construcción de edificios, que se convirtieron en hitos y las nuevas maravillas de la arquitectura moderna y contemporánea, también nos presenta el problema de la sobreutilización. La arquitectura moderna del acero y el hormigón armado se ha hecho universal y se ha aplicado en todo el mundo y para proyectos de toda escala, desplazando a las técnicas constructivas más tradicionales, que se han desarrollado localmente a base del ensayo y error, moldeándose con el tiempo a las condiciones y necesidades de cada lugar. En el caso de la arquitectura vernácula de la ciudad de Loja tenemos, desde la conquista española, una construcción basada en gruesos muros portantes de adobe apisonado, que ofrecían estabilidad y confort térmico, además de aprovechar exclusivamente las arcillas que se pueden extraer fácilmente de los alrededores de la ciudad. La industrialización ha traído grandes mejoras al estilo de vida de los habitantes de las ciudades, pero también nos ha traído una necesidad cada vez más voraz de recursos al olvidar principios arquitectónicos más elementales como la climatización pasiva o la estabilidad de los muros portantes.

La estandarización también ha eliminado casi por completo el “alma” que tienen los productos artesanales, las pequeñas variaciones que solo puede lograr un artesano, que hacen único a cada ejemplar que produce y que se han vuelto tan apreciadas en los últimos años dentro de las sociedades más avanzadas del mundo, hastiadas de la pesada monotonía de los productos fabricados en serie.

## **PROBLEMA**

Con la estandarización en los sistemas constructivos provocada por la revolución industrial, el sistema de estructuras independientes de hormigón armado y estructuras de acero que permiten la creación de plantas libres se ha adaptado a las construcciones de todos los tamaños, y en muchos lugares, ha desplazado completamente los sistemas constructivos tradicionales que han estado presentes desde hace siglos (Benévolo, 1987).

Aunque los sistemas de construcción tradicional no fueron desarrollados con una base teórica sólida, ni conocimientos técnicos, pero cuentan con un desarrollo empírico, llevado a cabo mediante prueba y error a lo largo de cientos de años. Otro valor agregado de los sistemas tradicionales es que utilizan materiales disponibles en el entorno inmediato de las obras, y a lo largo del tiempo se ha ido adaptando a las necesidades climáticas y culturales de sus usuarios, ofreciendo una economía que no siempre puede ser igualada por el método “industrial” de estructura de hormigón armados, especialmente lejos de centros urbanos.

Finalmente, uno de los aspectos más preocupantes de la creciente prefabricación en la construcción es la pérdida del trabajo de calidad artesanal, la creciente prefabricación de componentes hace cada vez menos importante el valor del trabajo manual de los carpinteros y albañiles, y le resta mucho del valor intrínseco de su oficio; no es necesario colocar cuidadosamente los ladrillos de una pared que luego va a ser maquillada con revoque y pintura, no se deben cuidar la calidad de las juntas ni conocer diferentes técnicas de aparejo para construir una pared, si todo el trabajo va a ser realizado por la estructura de hormigón. Es así que el presente trabajo busca presentar una alternativa, en lo que a edificaciones pequeñas se refiere –considerando también que las viviendas unifamiliares son el tipo de edificación más común en una ciudad como Loja, que todavía no se concentra en la densificación masiva- considerando las bondades constructivas del ladrillo, un material sencillo de fabricar a partir de materia prima abundante, y que ha sido injustamente relegado a un segundo plano en la arquitectura contemporánea.

## JUSTIFICACIÓN

La revolución industrial del siglo XIX supuso un profundo cambio en la sociedad mundial, catapultó al mundo de una economía agraria, a una basada en la producción industrial a gran escala, los bienes de consumo se democratizaron, pasando de las manos de unos pocos privilegiados a formar parte de una mayoría creciente, los productos dejaron de producirse uno a la vez en pequeños talleres de artesanos, para convertirse en series interminables de copias de gran calidad al alcance de todos.

Este fenómeno alcanzó también al mundo de la construcción adoptando el sistema de hormigón armado a las edificaciones de todos los tamaños, y aunque ha ofrecido soluciones impensables antes de ella para edificios colosales, con grandes luces y capacidad para acomodar a miles de personas, también se ha universalizado innecesariamente, desplazando a muchos sistemas tradicionales que se adaptaban mejor a los materiales y las condiciones específicas de un lugar determinado.

Y este cambio se hace especialmente evidente en las viviendas unifamiliares, una de las edificaciones más pequeñas, pero indiscutiblemente más común con la que lidia la arquitectura doméstica. En ella no es necesario tener una planta libre, ya que en muchos casos, las necesidades de la familia que la habita sufre pocos o ningún cambio durante toda la vida útil de la construcción y los espacios proyectados permanecen inamovibles, tampoco es necesario construir grandes luces ni espacios destinados a albergar a multitudes, ya que incluso bajo las ideas de la arquitectura habitacional moderna, con grandes espacios abiertos, la escala que se maneja todavía es doméstica y no se compara por ejemplo con los espacios libres que necesita un aeropuerto o un centro comercial.

El ladrillo es un material adecuado para los pequeños terrenos con los que se cuenta actualmente para construir en las ciudades; sin embargo el ladrillo de arcilla cocida se presenta como una alternativa ideal, capaz de ofrecer la misma resistencia con solo una fracción de la sección; además el ladrillo puede ser provisto por fábricas y talleres artesanales a muy bajo costo, tiene una larga tradición como elemento constructivo, por lo que existen técnicas probadas para crear toda clase de elementos estructurales contruidos a base de ladrillo (que como material visto también ofrece un abanico de posibilidades estéticas, cambiando simplemente el tipo de aparejo), y estudios realizados sobre su capacidad portante y aislante; es por esto que se puede considerar al ladrillo como una alternativa viable para la construcción de proyectos pequeños, especialmente viviendas unifamiliares.

## OBJETIVOS

### 1. Objetivo General

- Proponer el uso de los ladrillos de arcilla cocida como material portante en viviendas unifamiliares de una y dos plantas, mediante el desarrollo de un Modelo Numérico.

### 2. Objetivos Específicos

- Recopilar información sobre la fabricación, técnicas y códigos de construcción existentes para la mampostería de ladrillo.
- Indagar las opciones de simulación y creación de modelos numéricos, para escoger la mejor estrategia para analizar las capacidades portantes del ladrillo.
- Llevar a cabo la elaboración y prueba de un modelo numérico adaptado a las características del ladrillo disponible en el medio de la ciudad de Loja, para determinar su idoneidad como material portante.

# **CAPÍTULO 1**

## **PROPIEDADES DEL LADRILLO Y APAREJOS**

### **1.1. Breve Historia del Ladrillo.**

El ladrillo es uno de los materiales de construcción más antiguos de los que se tiene registro, su uso data de hace más de 9000 años. Los primeros ladrillos fueron de barro portante, es decir que simplemente han sido moldeados y secados al sol para alcanzarla resistencia necesaria para poder utilizarse; estos ladrillos han sido descubiertos en Tel Aswad, en la parte alta del río Tigris y en el sureste de Anatolia, y datan de antes del año 7500 a.C; otros hallazgos más recientes datan entre el 7000 y el 6500 a.C. en Egipto. Los primeros ladrillos cocidos son mucho más modernos, utilizados a partir del 3000 a.C. en ciudades del Valle del Indo. Algunas de las civilizaciones tempranas del mediterráneo adoptaron el uso de los ladrillos cocidos, incluyendo a los griegos y romanos, aunque éste siempre se prefirió como material de uso para obras de ingeniería o arquitectónicas de poca importancia, el material para los edificios más importantes estaba reservado para la piedra y el mármol. Las legiones romanas empezaron al llevar pequeños klins portátiles (hornos de cocción) que les permitían construir estructuras de ladrillo estampadas con el emblema de la legión dondequiera que iban, difundiendo la técnica a lo largo de toda Europa (Ignacio Alvarez & Martín Pedro García Casado, 1995).

Luego de la caída del imperio romano, el ladrillo cayó en desuso en la parte meridional del continente, reemplazado por las construcciones de mampostería y sillares de piedra, sin embargo, se mantuvo presente en el norte de Europa, donde el acceso a minas de piedra era muy limitado, dando origen a un estilo propio conocido como Gótico de ladrillo, que floreció en territorios donde se encuentran actualmente Dinamarca, Polonia, Alemania y Rusia.

La producción de ladrillo reapareció en Europa a mediados del siglo XIII, la producción a gran escala comenzó con Revolución Industrial, tanto en el Viejo Continente, como en los Estados Unidos, por la gran demanda para construcción de fábricas y viviendas urbanas masivas, el primer gran avance en esta etapa fue quizás cuando el inglés Henry Clayton patentó la primera máquina productora de ladrillos a gran escala en 1855,(Del Frusco, 1981) que era capaz de producir 25000 piezas diarias con mínima supervisión, sin embargo a medida que la Edad Moderna avanzaba, el acero, el cristal y el hormigón armado se convirtieron en los materiales preferidos para los grandes proyectos arquitectónicos, relegando al ladrillo a un segundo plano, como material idóneo solamente para pequeñas construcciones.

## 1.2. Definición del ladrillo.

“La mampostería (elementos puestos a mano) como el ladrillo, es una pieza de arcilla moldeada (a mano o mecánicamente), y cocida, en forma de paralelepípedo o prisma regular, que se emplea en albañilería. En la elaboración se pueden adicionar otros materiales de suficiente plasticidad y consistencia; que puedan tomar formas permanentes y al secarse no presente grietas nódulos o deformaciones”(Norma NTE INEN 297-1978: Ladrillos cerámicos. Requisitos., 1978). Las dimensiones de los ladrillos dependen de las necesidades y las costumbres de cada sector.

### 1.2.1. Terminología de caras y aristas.

Las aristas del ladrillo reciben tradicionalmente los nombres siguientes: sogá, la arista mayor, tizón la intermedia. La cara mayor (soga x tizón) se llama tabla, la cara intermedia (soga x grueso) se llama canto, y la cara menor (tizón x grueso) se llama testa (Figura 1). En general, el fabricante define las dimensiones de las piezas, que suelen hacerse en función de la sogá según la siguiente relación: 2 tizones + 1 junta = 1 sogá; 2 gruesos + 1 junta = 1 tizón; 4 gruesos + 3 juntas = 1 sogá

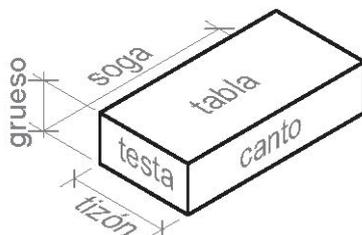


Figura 1: partes de un ladrillo  
Elaboración: el autor  
Fuente: Principios de Construcción

Las dimensiones normalmente se enuncian en el siguiente orden: sogá, tizón y grueso. En nuestro medio, los ladrillos artesanales provenientes de la ciudad de Catamayo (que son los más comunes) tienen las siguientes dimensiones promedio: 26.89x13.45x8.68cm (Pérez Castillo, 2016).

## 1.3. Características del Ladrillo.

### 1.3.1. Propiedades Físicas y Químicas.

El ladrillo cocido es un producto de la arcilla que se cuece a temperaturas elevadas que conducen a la vitrificación, lo que aumenta enormemente su resistencia a la compresión. La vitrificación ocurre cuando la temperatura ha alcanzado el punto de fundir todos los granos y cerrar los poros, convirtiendo al ladrillo en una masa impermeable. La densidad del ladrillo varía entre 2.6 y 2.8, y su peso por unidad de volumen varía entre 1.62 y 2.24 g/cm<sup>3</sup>. La arcilla que lo constituye se conoce técnicamente como silicato hidratado de aluminia ( $Al_2O_3-2SiO_2-$

2H<sub>2</sub>O). también contiene cantidades variables de óxido de hierro, calcio, magnesio, potasio, sodio, titanio y azufre (Ochoa Cueva & Santórum Merchán, 2005).

### **1.3.2. Cualidades de la superficie.**

La variedad de colores que se consiguen naturalmente dependen principalmente del tiempo de cocción, y varían principalmente dentro de los tonos rojizos, que se van oscureciendo hasta negro, y café amarillento. La textura que pueden tener varía entre tersa, rugosa, escariada, peinada etc, o tener manchas si es que se colocó agua o arena en los moldes para evitar que los ladrillos se peguen; también puede tener uno de los siguientes acabados:

- **Acabado natural.-** Cuando la superficie no tiene acabado alguno, el color que presenta es el obtenido por la cocción natural del ladrillo.
- **Acabado vidriado.-** Son recubrimientos vítreos que se funden sobre la superficie del ladrillo, dándole un acabado brillante, a veces tiene un tinte para alterar el color natural del ladrillo.

### **1.3.3. Régimen de absorción y succión del Ladrillo.**

Esta característica tiene un efecto importante en la adherencia del ladrillo al mortero, porque si el ladrillo absorbe el agua de la argamasa demasiado rápido, ésta se endurecerá muy pronto y no se logrará una adhesión adecuada. “Todo ladrillo cuyo régimen de absorción sea mayor a de 0.7 onza (19.85g) por minuto debe mojarse suficientemente para que el régimen de absorción no sobrepase esa cantidad” (Camuñas Paredes, 1974). Una prueba empírica pero efectiva para conocer este régimen consiste en dibujar un círculo de 3cm de diámetro sobre el ladrillo que se desea probar, y colocar 20 gotas de agua dentro. Si el ladrillo se demora más de 90 segundos en absorber toda el agua, se puede colocar seco, caso contrario, se recomienda mojarlos primero.

### **1.3.4. Eflorescencia**

La eflorescencia es un polvo blanco de cristales que se forma en los muros de mampostería de ladrillo debido a las sales que se depositan al evaporarse el agua. La eflorescencia se produce cuando hay sales diluidas en los materiales del muro, y humedad que lleve estas sales a la superficie, esta condición puede empeorar en condiciones de humedad, la Tabla 1 muestra los principales procesos que se desarrollan dentro de los muros de ladrillo, según el ambiente en el que deben trabajar. Para prevenir la eflorescencia se debe cuidar el tipo de ladrillo que se emplee, la calidad del agua que se use en el mortero, y principalmente los aditivos que se use, sin embargo, no se conoce un método completamente efectivo para erradicarla. La limpieza de los muros de ladrillo se hace con un cepillo suave y huna agua limpia, o una solución débil de ácido muriático (clorhídrico) que luego deberá enjuagarse con abundante agua limpia.

| Clase y Designación         |                  | Tipo de Proceso   | Descripción  | Ejemplos  |
|-----------------------------|------------------|---|--|---|
| Interior                    | No agresiva      | Ninguno.  | Interiores de edificios no sometidos a condensaciones.   | Interiores de edificios, protegidos de la intemperie.                                     |
|                             | Humedad media    | Carbonatación del conglomerante. Expansión de los núcleos de cal.   | Exteriores sometidos a la acción del agua en zonas con precipitación anual inferior a 600mm                  | Exteriores protegidos de la lluvia  |
| Exterior                    | Humedad alta     | Carbonatación del conglomerante. Expansión de los núcleos de cal.   | Interiores con humedades relativas >65%, o condensaciones con una precipitación media anual superior a 600mm | Exteriores no protegidos de la lluvia. Sótanos no ventilados. Cimentaciones.              |
|                             | Marino aéreo     | Corrosión de las armaduras por cloruros. Sabulización de los ladrillos y expansión de los núcleos de cal.   | Proximidad al mar por encima del nivel de pleamar. Zonas costeras.   | Proximidades a la costa. Pantanales, obras de defensa litoral e instalaciones portuarias. |
| Medio Marino                | Marino sumergido | Corrosión de las armaduras por cloruros. Sulfatación y destrucción por expansividad del conglomerante y los derivados del cemento.                              | Por debajo del nivel mínimo de bajamar permanentemente. Terrenos ricos en sulfatos                           | Recorrido de marea en diques, pantanales y obras de defensa litoral.                      |
|                             | Marino alternado | Corrosión de las armaduras por cloruros. Sulfatación y destrucción por expansividad del conglomerante y los derivados del cemento.                              | Zonas marinas situadas en el recorrido de carreteras de mareas.  | Recorrido de marea en diques, pantanales y obras de defensa litoral.                      |
| Otros Cloruros (no marinos) |                  | Corrosión de las armaduras por cloruros. Sulfatación y destrucción por expansividad del conglomerante y los derivados del cemento. Sulfatación y carbonatación. | Agua con un contenido elevado de cloro. Exposición a sales provenientes de deshielo                          | Piscinas. Zonas de nieve (alta montaña). Estaciones de tratamiento de agua.               |

Tabla 1: clases de exposición a la que puede someterse el ladrillo  
Fuente: Código Técnico de la Edificación (2014)

## 1.4. Clasificación del ladrillo.

### 1.4.1. Clasificación morfológica.

- **Ladrillo macizo.** - Es una pieza completamente sólida, o con perforaciones celulares que no sobrepasen el 20% del volumen; también se admiten en esta categoría extracciones en las caras que no sobrepasen el 40% de su área, destinadas a alojar mortero para mejorar la adherencia.
- **Ladrillo hueco.** - Es una pieza que presenta perforaciones que sobrepasen el 20% de su volumen, la disposición y cantidad de estas perforaciones tienen varios fines. Entre los que se puede contar reducir el peso del ladrillo, o alojar elementos como hierro y mortero para aumentar la resistencia de la pared, o ductos de instalaciones.
- **Rasillas.** - Son ladrillos de muy poco espesor, no mayor a 3cm utilizadas normalmente para paneles o recubrimientos.

### 1.4.2. Clasificación fabril.

- **Ladrillo artesanal.** - Es el ladrillo más común en nuestro medio, fabricado a mano por artesanos a partir de colocar barro en moldes de madera, secarlos al sol, y cocinados en un horno de leña, cuya temperatura se determina a simple vista. Este método depende mucho de la habilidad y experiencia del fabricante, y puede producir variaciones importantes en las características térmicas y portantes entre dos fábricas, o incluso dos lotes.
- **Ladrillo industrial.** - Es el ladrillo hecho en una fábrica, con maquinaria que se encarga de todos los pasos del proceso; el moldeado, el secado y el cocido se controlan para asegurar la uniformidad de todos los productos.

### 1.4.3. Clasificación cualitativa.

La norma "NTE INEN 297-1978: Ladrillos cerámicos. Requisitos" que regula las calidades y medidas de los ladrillos, diferencia los siguientes tipos de ladrillos:

- **Ladrillo macizo.** - Se puede utilizar para muros estructurales y como tabiquería de soporte. De acuerdo a su calidad, se clasificará en tipo A, B y C:
  - *Ladrillo Tipo A.* - Será ladrillo repesado, de color rojizo uniforme, con ángulos rectos y aristas rectas. No tendrán manchas, eflorescencias, quemados ni desconchados aparentes en caras y aristas. La resistencia mínima a la compresión será de 200kg/cm<sup>2</sup>. La absorción máxima de humedad será de 16%.

- *Ladrillo Tipo B.*- Será ladrillo de máquina, de color rojizo, con ángulos rectos y aristas rectas, diferenciándose del tipo A en que puede tener pequeñas imperfecciones en sus caras exteriores, así como variaciones de rectitud en sus aristas de hasta 5mm. La resistencia mínima a la compresión será de 140kg/cm<sup>2</sup>. La absorción máxima de humedad será de 18%.
- *Ladrillo Tipo C.*- Será semejante al tipo B, diferenciándose de el en que puede, además de ser fabricado a mano y tener imperfecciones en sus caras exteriores, así como variaciones de rectitud en sus aristas de hasta 8mm. La resistencia mínima a la compresión será de 60kg/cm<sup>2</sup>. La absorción máxima de humedad será de 25%.
- **Ladrillo hueco.** - Se puede utilizar en muros divisorios no soportantes y relleno de losas alivianadas. De acuerdo a su calidad, se clasificará en tres tipos D, E, F:
  - *Ladrillo Tipo D.*- Tendrá una resistencia mínima a la compresión de 50kg/cm<sup>2</sup>. La absorción máxima de humedad será de 16%.
  - *Ladrillo Tipo E.*- Tendrá una resistencia mínima a la compresión de 40kg/cm<sup>2</sup>. La absorción máxima de humedad será de 18%.
  - *Ladrillo Tipo F.*- Tendrá una resistencia mínima a la compresión de 30kg/cm<sup>2</sup>. La absorción máxima de humedad será de 25%.

## **1.5. Proceso de Fabricación del ladrillo artesanal.**

### **1.5.1.Extracción**

La arcilla y la arena, que son las principales materias primas, se extraen de minas cercanas a las ladrilleras, en terrenos que cubren varias hectáreas y son propiedad común de asociaciones de artesanos, las minas poseen un estrato de arcilla y arena de espesores similares, aproximadamente 2,00 a 2,50m de espesor. Primero se saca las raíces y restos vegetales para luego excavar en los bordes del talud con picos y palas, hasta hacer rodar grandes terrones de arcilla, luego se deposita junto con la arena -que se extrae de la misma manera- en un camión que espera al pie del talud para llevar la materia prima a la fábrica. La arcilla es un material demasiado graso, por eso se mezcla con arena, para evitar las grietas durante el secado.

### **1.5.2.Mezclado**

Una vez en el taller, se mezclan los materiales en proporciones que varían según la fábrica, o incluso el lote; también se aprovecha para limpiar de forma manual los restos de raíces, plantas y piedras grandes, sin embargo, en el proceso artesanal, no se trituran los terrones grandes de arcilla, ni se tamizan, para evitar partículas mayores a 5mm, como sugiere la técnica.

### **1.5.3. Humectación**

Se vacía la arcilla en un pozo poco profundo (50cm aprox.) lleno de agua, y se deja reposar 24 horas, después un obrero amasa el barro con los pies, hasta lograr una masa homogénea que pueda ser vertida en los moldes.

### **1.5.4. Moldeado**

Se esparce polvo de ladrillo o arena sobre la superficie plana de trabajo, para evitar que los ladrillos se adhieran, después se coloca un molde de madera recién lavado con capacidad para 6 ladrillos, son fondo; se arroja una bola de masa de arcilla desde el pozo y se comprime con las manos hasta llenar completamente el espacio, finalmente se desmolda con un movimiento hacia arriba, el molde debe lavarse y limpiarse cada vez para evitar que se adhiera la pasta. Una cuadrilla de cuatro trabajadores puede fabricar hasta tres mil ladrillos diarios siguiendo este procedimiento.

### **1.5.5. Secado**

El objetivo de esta etapa es eliminar la mayor cantidad posible de agua de la etapa del amasado, porque la evaporación brusca en el horno puede resquebrajar los ladrillos. Para esto se seca el ladrillo a la sombra (para que pierda la misma cantidad de agua en la superficie que en interior del bloque), por un período de 24 horas sobre la tabla, y 48 horas sobre el canto, después se apilan cuidando dejar suficiente espacio entre los ladrillos para que circule el aire, y se dejan secar por 5 días; durante todo este proceso, los ladrillos pierden aproximadamente el 8% de su volumen.

### **1.5.6. Cocción**

La última etapa Es la cocción, cuyo objeto es eliminar la humedad del resto del agua de las piezas, además de modificar las características de la arcilla, para convertirla en una masa pétreo que lleguen a la resistencia esperada. Para ello se apila las piezas secas de canto dejando espacio entre ellas, formando una pirámide de base cuadrada, con piezas unidas por barro alrededor para evitar la pérdida de calor, luego se enciende un fuego de leña en la base, hasta llegar a una temperatura aproximada de 900°C, por un tiempo de entre 18 y 20 horas, luego se deja enfriar. La cocción por este método no es uniforme, ni se controla con precisión, la temperatura solo se puede controlar por el color de la llama y la experiencia del ladrillero.

## 1.6. Armado de mampostería de ladrillos.

Se entiende por mampostería al conjunto de bloques y aglutinante para construir un elemento sólido. Los bloques pueden ser naturales (piedras de cantera) o artificiales (ladrillos, bloques) y las juntas de mortero dispuestas en forma irregular (en el caso de los sillares) o regular (como los muros de ladrillo); en el segundo caso las juntas siguen la disposición del contorno de los ladrillos, por lo que se pueden clasificar en horizontales (tendel) y verticales (llagas), como se ve en la Figura 2, esta diferenciación es importante para conocer la respuesta del muro a cargas.

La mampostería en general es un material que transmite de manera efectiva las cargas de compresión, su capacidad está regida por las propiedades mecánicas de los ladrillos, debido a que las fallas se producen generalmente por agrietamiento en éstos, a causa de la tracción lateral provocada por la expansión de los ladrillos circundantes, y fallas plásticas en el mortero. (López, Oller, & Oñate, 1998)

### 1.6.1. Nomenclatura en la disposición de ladrillos.

En un muro tradicional de mampostería de ladrillo, se debe saber diferenciar las partes más importantes (Ferri & Pérez, 2010):

- **Hilada.**- Conjunto de ladrillos en un mismo plano horizontal (Figura 2)
- **Tendel.**- Junta de mortero horizontal entre hiladas consecutivas (Figura 2).
- **Llaga.**- Junta vertical entre ladrillo consecutivos de la misma hilada (Figura 2).
- **Roza.**- Acanaladura abierta para el paso de instalaciones (Figura 2).

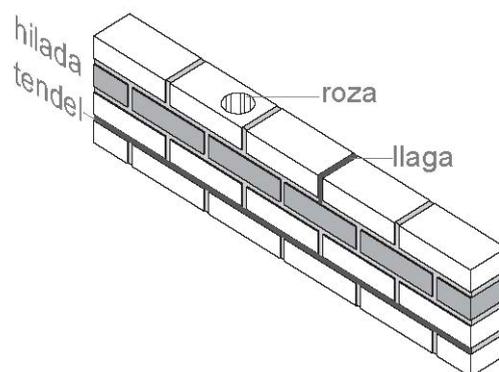


Figura 2: nomenclatura en la disposición  
Elaboración: el autor  
Fuente: Principios de Construcción (2010)

### 1.6.2. Tipos de disposiciones de ladrillo.

- **Disposición a soga.** - Se denomina así a la disposición donde los ladrillos se apoyan sobre la tabla, y unidas por el canto (Figura 3).
- **Disposición a tizón.** - Se denomina así a la disposición donde los ladrillos se apoyan sobre la tabla, y unidas por la testa (Figura 3).
- **Disposición a sardinel.** - Se denomina así a la disposición donde los ladrillos se apoyan sobre la testa, y unidas por el canto (Figura 3).
- **Disposición a rosca.** - Se denomina así a la disposición donde los ladrillos se apoyan sobre el canto, y unidas por la testa (Figura 3)
- **Disposiciones a panderete.** - Se denominan así a las disposiciones donde los ladrillos se apoyan sobre una de sus caras menores, y están unidas por la otra (Figura 3).

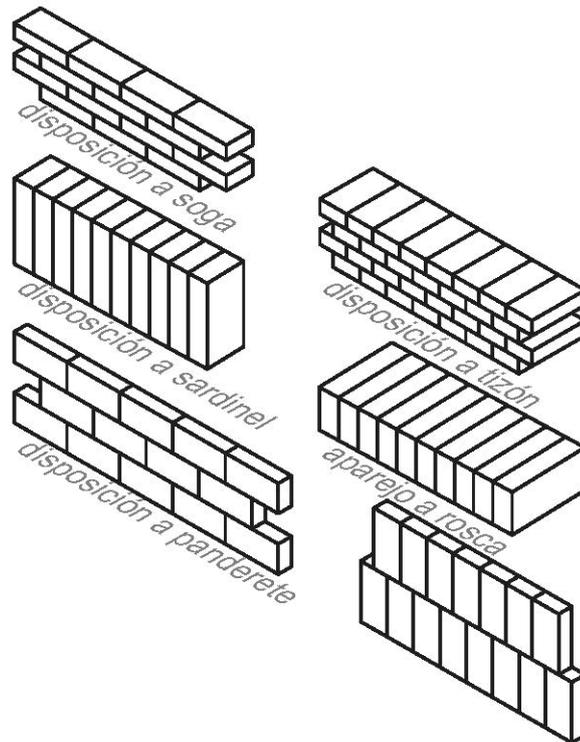


Figura 3: disposiciones de ladrillo en muros  
Elaboración: el autor  
Fuente: Principios de Construcción (2010)

### 1.6.3. Ejecución de muros de ladrillo<sup>1</sup>

- **Humectación de las piezas.** – Es importante humedecer las piezas de cerámica antes de la ejecución del muro, ya sea por aspersión o inmersión. Se debe agregar agua suficiente para que, una vez puesta en contacto con el mortero, no absorba ni le aporte agua.
- **Colocación de las piezas.** – Las piezas se deben colocar restregándose sobre una capa de mortero, hasta que éste rebose por el tendel y la llaga. Después de colocada, no se moverá ninguna pieza; si es necesario un cambio de posición, se debe quitar la pieza y el mortero y repetir toda la operación. Las piezas con machihembrado lateral se colocarán de forma vertical sobre la junta de mortero.
- **Relleno de juntas**
  - Una llaga se considera llena si el mortero maciza el grueso total de la pieza en al menos 40% del tizón; se considera hueca en caso contrario.
  - Cuando se especifique juntas delgadas, se deben asentar las piezas cuidadosamente para mantener la uniformidad de la unión.
  - En muros con espesor menor de 200mm, no se podrá rehundir las juntas más de 5mm, salvo tener autorización expresa.
  - El mortero debe llenar completamente las juntas de tendel y llagas.
- **Traba de Fábrica.**
  - La mampostería debe levantarse por hiladas horizontales en toda la extensión de la obra, siempre que sea posible. Cuando dos partes de un muro deban levantarse en momentos diferentes, la que se construya primero debe dejarse escalonada. Si esto no fuera posible, se dejará formando entrantes alternadas.
  - En las hiladas consecutivas de un muro, las piezas se deben solapar para que el muro se comporte como un elemento estructural único. El solape debe ser mayor a 0,4 veces el grueso de la pieza o  $\frac{1}{4}$  de la longitud de la pieza en la que descansa, nunca menor a 40mm. En las esquinas o encuentros, el solape de las piezas no será menor que su tizón; en el resto del muro se pueden utilizar piezas cortadas para lograr un solape preciso.

---

<sup>1</sup> Tomado del Código Técnico de la Edificación SE-F 39 (2014)

#### 1.6.4. Juntas en muros de ladrillo.

Se considera juntas a las capas de mortero que se coloca para unir las piezas cerámicas del muro (ya diferenciadas anteriormente en llagas y tendeles); estructuralmente las llagas (juntas verticales) tienen una importancia menor que la de los tendeles (juntas horizontales) que absorben los esfuerzos de tracción lateral. Como norma general, las juntas deben ser lo más delegadas posible, ya que el hormigón tiene propiedades de dilatación diferentes al ladrillo, y puede ocasionar esfuerzos cortantes, teniendo un espesor de entre 8 y 12mm, para poder compensar las irregularidades de los ladrillos. El albañil puede crear distintos perfiles en la argamasa mientras ésta sigue húmeda, aunque muchos de estos acabados sirven principalmente para enriquecer la textura del muro, también pueden servir a fines prácticos, como repeler el agua de los ladrillos, como en el caso de la unión cóncava o en "v". En caso de que se desee revestir el muro, se deben utilizar juntas rehundidas que sobrepasen los 5mm detrás, para asegurar una óptima sujeción de la capa de empaste posterior.

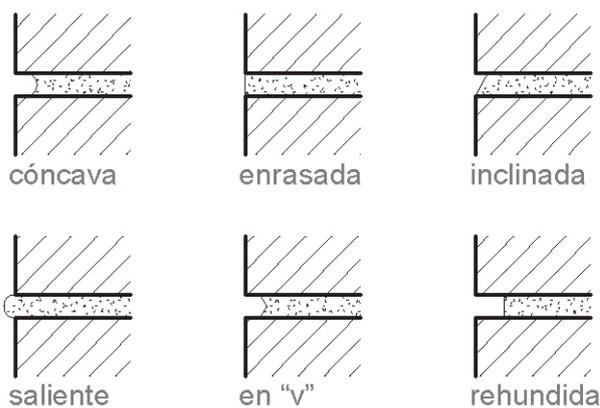


Figura 5: tipos de juntas de ladrillo  
Elaboración: el autor  
Fuente: Principios de Construcción (2010)



Figura 4: revestido sobre ladrillo  
Elaboración: el autor  
Fuente: Principios de Construcción (2010)

#### 1.6.5. Leyes de Traba.

El manual de la construcción de Ferry y Pérez hace hincapié en algunas recomendaciones durante el armado de paredes de ladrillo, el objetivo de dichas leyes es evitar la continuidad de las grietas, emplear el mayor número posible de ladrillos enteros, y dar a la pared el mayor carácter monolítico posible, las reglas que hay que tener en cuenta son las siguientes:

- Disponer de una cantidad suficiente de ladrillos enteros.
- El plano de tendeles debe ser horizontal y continuo en todo el espesor del muro.
- Ningún ladrillo debe solaparse menos de  $\frac{1}{4}$  de la longitud del ladrillo sobre el que descansa.

- Se debe guardar la verticalidad de las juntas para no perder el solape, en lo posible, las llagas deben prolongarse en línea recta a lo largo de toda la sección del muro.
- Las llagas de dos hiladas consecutivas deben estar desplazadas entre  $\frac{1}{4}$  y  $\frac{1}{2}$  de la longitud de la pieza, nunca deben coincidir.
- En las esquinas, cruces y encuentros de muros, las hiladas a soga deben continuarse, y las hiladas a tizón interrumpirse.

## 1.7. Aparejos.

Las disposiciones en las que se pueden colocar los ladrillos, respetando las leyes de traba, reciben el nombre de aparejos, un concepto más preciso reza que “es ensamblaje adecuado de piezas naturales o artificiales para lograr un reparto regular en las cargas del muro y asegurar una unión tridimensional entre distintas piezas. Para que sea exitoso, se requiere una profunda comprensión de funcionamiento y la cohesión de los muros de ladrillo” (Deplazes, 2010) Algunos de los más importantes se listan a continuación<sup>2</sup>:

### 1.7.1. Aparejo Americano.

Es un formato principalmente compuesto por hiladas a soga, compuesto por una de tizones cada cinco hiladas (Figura 6).

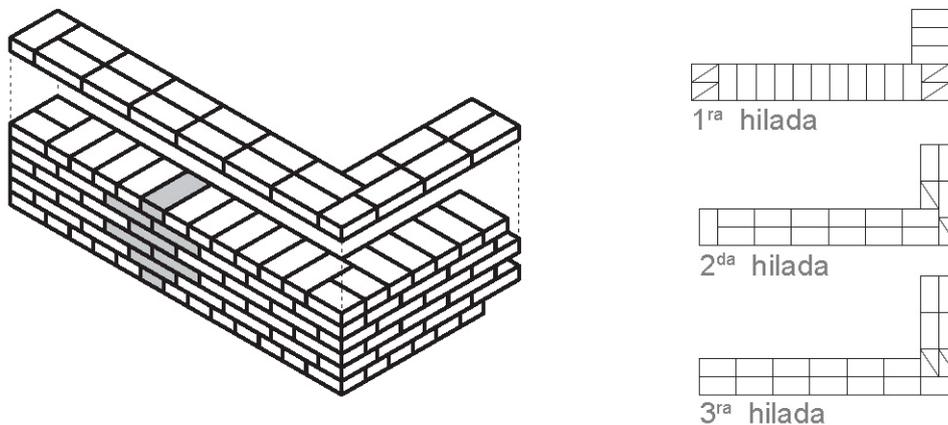


Figura 6: aparejo americano  
Elaboración: el autor  
Fuente: Principios de Construcción (2010)

<sup>2</sup> Las líneas diagonales en los diagramas de las hiladas representan casos en los que no se usan ladrillos completos (solo medios ladrillos o tres cuartos de un ladrillo, según el caso) para facilitar la interpretación de los diagramas.

### 1.7.2. Aparejo Inglés.

Es un tipo muy difundido. En él se alternan regularmente una hilada a soga con una a tizón, por lo que las llagas están siempre alineadas verticalmente (Figura 7).

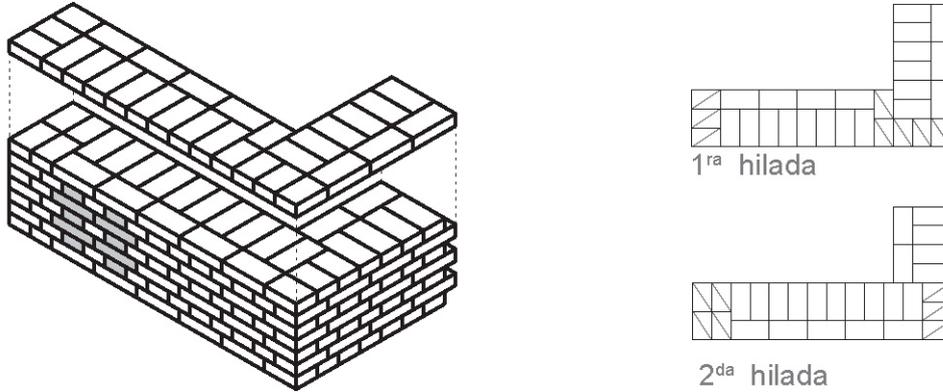


Figura 7: aparejo inglés  
Elaboración: el autor  
Fuente: Construir la Arquitectura (2010)

### 1.7.3. Aparejo Belga.

A diferencia del aparejo inglés, la pieza de cada segunda hilada a soga, se desplaza la mitad de su longitud con respecto a la hilada a soga anterior, creando variedad en los entrelazados, “las juntas presentan un escalonamiento regular, que crean una mejor unión entre los ladrillos y, gracias a ello, una mayor resistencia que el aparejo inglés”(Deplazes, 2010).

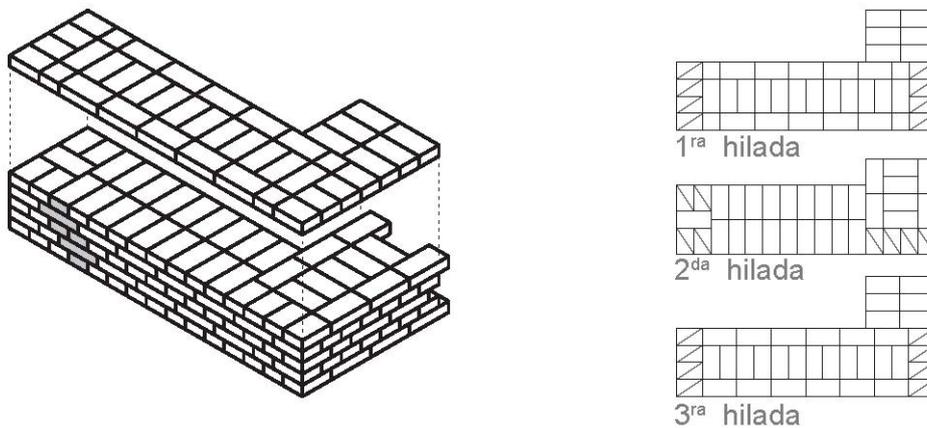


Figura 8: aparejo belga  
Elaboración: el autor  
Fuente: Construir la Arquitectura (2010)

### **1.8. Cimientos de Mampostería.**

Todos los muros de carga de una edificación deben descansar sobre cimientos, que deben ser de mayores dimensiones que el muro en sí, para poder transmitir las fuerzas al suelo; para el caso de edificaciones pequeñas sobre suelos estable, se puede utilizar cimientos de piedra o ladrillo, éstos cimientos deben seguir dos consideraciones importantes:

- Repartir el peso de la estructura sobre la mayor área posible de terreno, para disminuir la carga por metro cuadrada y evitar el hundimiento.
- Cuando se aumenta el área de la base de muro, el cimiento puede contribuir a la estabilidad general, ésta parte más ancha en la base de los muros, que constituyen la base del edificio se llama zarpa. La mayoría de códigos de la construcción disponen que todo muro de fundación o pilar estructura debe asentarse sobre una zarpa de que por lo menos exceda en 30cm al grosor del muro de cimiento que reposa encima, 15cm a cada lado.

Debido a la estandarización del hormigón, los cimientos de piedra y ladrillo han ido cayendo casi en desuso, sin embargo, los manuales los consideran como una opción en el caso de construcciones pequeñas (Kidder & Parker, 1957), donde se pueden emplear en los muros de sótano; en la mayoría de países, el espesor mínimo de un cimiento de este tipo es de 30cm, independientemente del tamaño del edificio o las características del terreno donde va a emplazarse. En el caso de viviendas o edificaciones pequeñas, la carga que se apliquen deben ser menores a la resistencia del terreno, en caso de no conocer ésta exactamente, o para compensar las variaciones que puede haber en diferentes puntos del predio, los cimientos deben proyectarse escalonados, con uno o varios escalones. Deben construirse con piedra cuyo largo, de ser posible, sea igual al ancho del cimiento, o sino con dos piedras cuya junta coincida con el eje del muro; las alturas de las hiladas deberán calcularse con fórmulas de flexión. Cada hilada de cimiento debe penetrar en la hilera anterior una distancia mínima a 1.5 veces la altura del escalón, porque, de no ser así, no se trasladarán las cargas adecuadamente, y el cimiento podrá fisurarse en las juntas. La dificultad más común al utilizar piedras de grandes dimensiones es conseguir un asiento conveniente, ya que las piedras grandes se asientan con dificultad sobre otras más pequeñas, para nivelar la base, se vierte una dosis de mortero espeso y maniobrar las piedras con una barra hasta que se asienten en el sitio deseado.

En caso de terrenos secos, con muros de sótano de ladrillo, el cimiento puede hacerse también de ladrillo; los ladrillos que se empleen deben ser los más resistentes y sanos posibles, se deben asentar sobre una base de mortero de cemento Portland fluido, para que

pueda penetrar en todas las juntas, sin dejar vacíos. Los cimientos se deben hacer con una doble hilada sobre el lecho de fundación, todos los ladrillos se deben colocar a tizón, y ningún escalón debe sobresalir del anterior más que la cuarta parte de la longitud de un ladrillo.

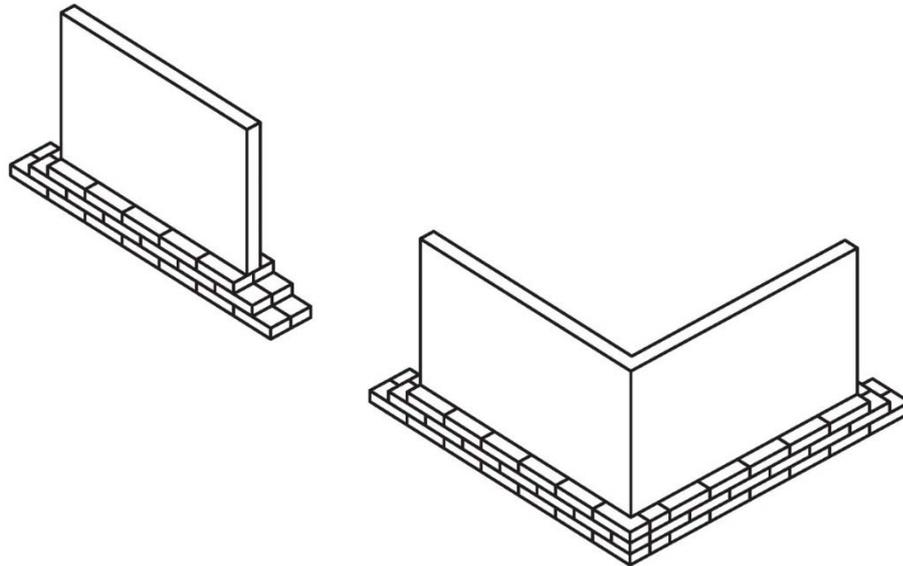


Figura 9: estrategias para construir un cimiento de ladrillo en longitud y esquinas  
Elaboración: el autor  
Fuente: Construir la Arquitectura (2010)

### 1.9. Muros de Sótano o Basamento

Este término se aplica a los muros que están debajo de la superficie del terreno, y las vigas del primer piso, directamente sobre los muros de cimentación y soportando la estructura superior (supraestructura); albergan habitaciones subterráneas, su principal función -además de transportar las cargas verticales de la estructura al terreno- es la de contener las cargas laterales que produce el terreno sobre la estructura.

El mejor material para este tipo de muros es la piedra de estrato dura y caras regulares, que soporta mejor la humedad y presión del terreno que el ladrillo, sin embargo, un muro construido con piedras blandas o con formas muy irregulares es inferior a uno de ladrillos regulares.

El hormigón se debe colar en encofrados de madera, que se deben retirar tan pronto haya fraguado, y, si el tiempo es seco rociar con agua dos veces al día para evitar un secado muy rápido. Los muros de sótano deben tener un espesor mínimo de 40cm, aparejados a tizón o  $\frac{3}{4}$  de tizón, y todos los espacios rellenos con un buen mortero. El mortero debe ser de cemento y arena gruesa, los muros exteriores de sótano deben tener un revestimiento de entre 1 y 2cm, hecho con mortero de cemento a 1:2 o 1:1,5; en terrenos de arcilla, o donde sea fácil

que el agua se filtre, se debe dar a los muros un talud exterior, dejando que sean entre 15 a 30cm más gruesos en la base que en la parte superior.

El espesor de los muros de sótano depende de la supraestructura que se vaya a colocar encima y la profundidad del propio muro, la mayoría de códigos de la construcción establece que los muros de base para una profundidad menor a 3.50m por debajo de la rasante del terreno deben ser 10cm más anchos que los muros superiores, en el caso del ladrillo, y 20cm más anchos en el caso de la piedra, la siguiente tabla muestra una guía de los espesores para estos muros según el número de pisos:

| Altura del edificio | Vivienda, hoteles, etc. |        | Almacenes |        |
|---------------------|-------------------------|--------|-----------|--------|
|                     | Ladrillo                | Piedra | Ladrillo  | Piedra |
| Dos pisos           | 40                      | 51     | 40        | 51     |
| Tres pisos          | 40                      | 51     | 51        | 61     |
| Cuatro pisos        | 51                      | 61     | 61        | 71     |
| Cinco pisos         | 61                      | 71     | 61        | 71     |
| Seis pisos          | 71                      | 81     | 71        | 81     |

Tabla 2: espesor en centímetros de muros de sótano  
Fuente: Manual del Arquitecto y el Constructor (2000)

### 1.10. Muros de Supraestructura.

La mayoría del conocimiento que se tiene sobre la resistencia de los muros de mampuestos portantes proviene de la experiencia, “los únicos esfuerzos en una sección horizontal, que se pueden calcular con alguna exactitud, son el peso de los muros y las cargas que producen los pisos y la cubierta” (Kidder & Parker, 1957), la principal debilidad de este tipo de muros es que se pandean cuando son demasiado esbeltos, por lo que se debe aumentar su espesor para contrarrestar únicamente los esfuerzos de compresión. La resistencia de los muros en este caso depende enormemente de la calidad de los materiales y la mano de obra, un muro con una hilada a tizón cada 30cm, con juntas llenas de buen mortero de cemento y para el que se hayan humedecido bien los ladrillos, será tan resistente como uno peor construido, pero 10cm más ancho.

Las leyes y reglamentos de construcción establecen el espesor mínimo, considerando márgenes de seguridad, por lo que los arquitectos pueden ajustarse a ellos para diseñar; la Tabla 3, sintetiza los grosores para muros de ladrillo estructural en edificios de uso comercial, promediados entre los códigos de construcción de las principales ciudades comerciales de los Estados Unidos (Boston, Nueva York, Chicago, Filadelfia, Denver y San Francisco), y pueden

usarse de guía porque los valores representan el criterio de profesionales autorizados. Para los edificios de vivienda, se pueden considerar espesores 10m menores, aunque en algunos lugares no se hace distinción. Para la tabla se ha supuesto que la parte superior del segundo piso tiene una altura de 5,80m sobre el nivel de la acera, y los otros pisos, una altura de 4m, y sus espesores están adaptados a los ladrillos disponibles en ese país; algunas consideraciones adicionales a tener en cuenta se enumeran a continuación:

- La longitud de un muro contribuye a debilitarlo, por lo que, cuándo esta exceda los 35m se debe aumentar 10cm a su espesor por cada 7.5m
- Los muros hechos con ladrillo hueco (vacío en más de 33% de su volumen), deberán ser más gruesos.
- Las medianeras o muros divisorios podrán tener un espesor 10cm menor a los muros de exterior, siempre y cuando su longitud sea menor a 18m, sin embargo, este espesor no podrá ser menor a 20cm.
- Para construcciones de hasta 12m de altura (cuatro pisos), se permiten muros soportantes de ladrillo cocido de entre 20 y 30cm, donde cada bloque debe ocupar todo el grueso del muro.

| Altura del edificio | Pisos |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |
|---------------------|-------|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|
|                     | 1°    | 2° | 3° | 4° | 5° | 6° | 7° | 8° | 9° | 10° | 11° | 12° |
| <b>Dos Pisos</b>    | 33    | 31 | -  | -  | -  | -  | -  | -  | -  | -   | -   | -   |
| <b>Tres Pisos</b>   | 40    | 35 | 31 | -  | -  | -  | -  | -  | -  | -   | -   | -   |
| <b>Cuatro Pisos</b> | 44    | 40 | 36 | 31 | -  | -  | -  | -  | -  | -   | -   | -   |
| <b>Cinco Pisos</b>  | 50    | 45 | 40 | 38 | 35 | -  | -  | -  | -  | -   | -   | -   |
| <b>Seis Pisos</b>   | 52    | 50 | 47 | 40 | 38 | 35 | -  | -  | -  | -   | -   | -   |
| <b>Siete Pisos</b>  | 60    | 52 | 52 | 47 | 42 | 37 | 35 | -  | -  | -   | -   | -   |
| <b>Ocho Pisos</b>   | 64    | 62 | 52 | 52 | 48 | 42 | 37 | 35 | -  | -   | -   | -   |
| <b>Nueve Pisos</b>  | 73    | 69 | 66 | 56 | 56 | 49 | 46 | 38 | 38 | -   | -   | -   |
| <b>Diez Pisos</b>   | 80    | 76 | 69 | 66 | 59 | 56 | 49 | 49 | 38 | 38  | -   | -   |
| <b>Once Pisos</b>   | 83    | 80 | 73 | 66 | 66 | 56 | 56 | 49 | 46 | 38  | 38  | -   |
| <b>Doce Pisos</b>   | 86    | 83 | 80 | 81 | 69 | 66 | 56 | 56 | 49 | 46  | 38  | 38  |

Tabla 3: espesor en centímetros de muros de ladrillo en edificios comerciales, reglamento de construcción de EEUU

Fuente: Manual del Arquitecto y el Constructor (2000)

### 1.11. Dinteles de Ladrillo

La forma más habitual de resolver aberturas en muros de mampostería, para contener el peso del material colocado encima es el arco. Conocido desde la época de los romanos, el arco es un conjunto de piezas de forma especial colocados para formar una curva, y concebidos para resistir los empujes del muro, y dirigirlos hacia abajo y los lados; aunque se han creado infinitas variantes de este arreglo a lo largo de la historia, entre los que se pueden resaltar los arcos ojivales, elípticos de tres puntos, arábigos, etc.; el principio de funcionamiento sigue siendo el mismo, siendo el arco original de medio punto preferente, porque no necesita de piezas especiales hechas a medida, como claves o dovelas, sino que puede estar conformado con ladrillos normales, moldeados en obra, como se ve en la Figura 10. Otra solución que se puede resolver con ladrillos regulares es la del dintel recto, que se logra dividiendo el espacio de la puerta de modo angular, de modo que la longitud de a pieza más grande (la clave, colocada en la mita de la luz) no sea mayor que la altura de un ladrillo, así las piezas exteriores serán progresivamente más pequeñas, luego se toma una altura equivalente a dos o tres hiladas de ladrillo para la altura del dintel y se corta las piezas conforme a la figura, cuidando de que las juntas horizontales no formen una sola línea (Pyromasse Montreal, 2016).

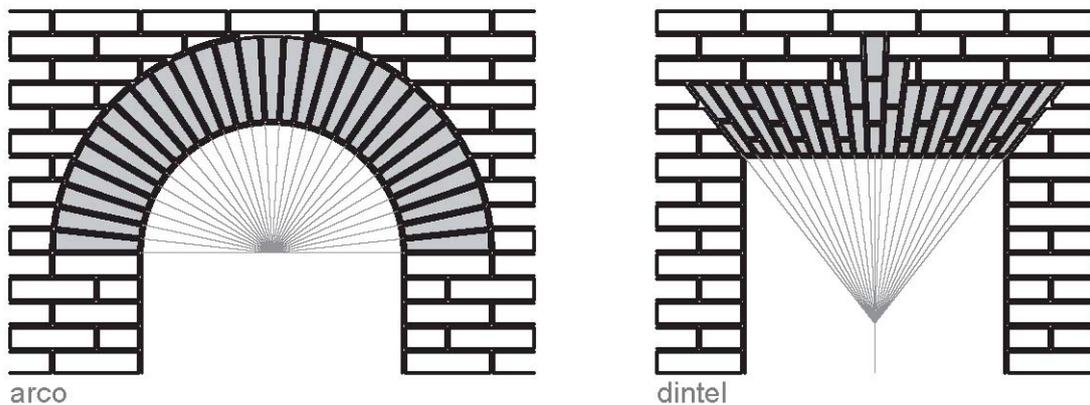


Figura 10: tipos de dinteles de ladrillo  
Elaboración: el autor  
Fuente: Construir la Arquitectura (2010)

## 1.12. Celosías de Ladrillo

El ladrillo también se puede aplicar como material de envolvente en viviendas, para proteger del sol o el viento, además de la evidente aplicación en muros, se pueden crear elementos permeables, como celosías, para este apartado, se ha tomado como referente la casa de ladrillos proyectada por Ventura Virzi arquitectos en la ciudad de Buenos Aires, Argentina en 2011, que explota el potencial expresivo del ladrillo, cubriendo la fachada principal con una envolvente que presenta tres variaciones en la disposición como se ve en



Ilustración 1: vista exterior edificio Griboni  
Fuente: [www.plataformaarquitectura.com.cl/](http://www.plataformaarquitectura.com.cl/)

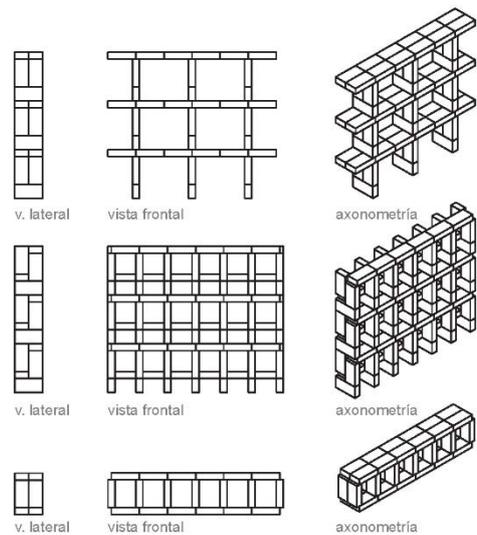


Figura 11: tipos de celosías de ladrillos  
Elaboración: el autor  
Fuente: Construir la Arquitectura (2010)

## **CAPÍTULO 2**

### **ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DE SIMULACIÓN**

## 2.1 Simulación

Aunque la mampostería de ladrillo es uno de los elementos más ampliamente utilizados en la construcción, su capacidad portante y para enfrentar sismos se conoce casi completamente gracias a la experiencia. La mayoría de los métodos tradicionales de análisis serios de estas capacidades se limitan a análisis en laboratorio de elementos solos, o de tipos de armado; este tipo de estudios proveen con datos de gran precisión, vitales para estudios posteriores, pero consumen demasiado tiempo y dinero, al necesitar equipos extremadamente complejos y costosos y utilizar modelos que deben ser construidos a conciencia antes de ser probados.

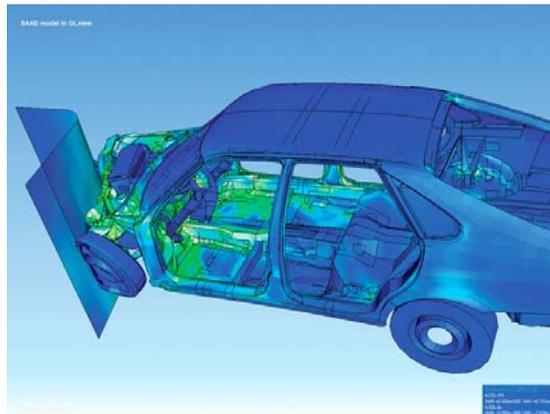


Ilustración 2: visualización de automóvil deformado utilizando elementos finitos

Fuente: Dominio público, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=641911>

## 2.2 Análisis de Elementos Finitos

El Análisis de Elementos Finitos (AEF o FEA en inglés) es un método numérico para aproximar soluciones a problemas complejos de ecuaciones diferenciales que se presentan en problemas de física e ingeniería, utilizando el gran poder de cálculo de las computadoras modernas. Actualmente el AEF se utiliza principalmente en el diseño de nuevos productos, o para el mejoramiento de diseños existentes o con diferentes especificaciones, con el AFE se puede:

- Predecir y mejorar el rendimiento de productos.
- Disminuir la necesidad de maquetas y prototipos físicos.
- Evaluar el comportamiento del diseño y diferentes materiales.

Las partes principales que podemos encontrar en cualquier sistema a resolver se dividen en Dominio (espacio geométrico donde se encuentra el sistema), Condiciones de contorno (variables conocidas que condicionan el cambio del sistema, como cargas, desplazamientos, focos de calor) e Incógnitas (variables que queremos conocer después de que las condiciones

de contorno han actuado sobre el sistema, desplazamientos, tensiones, temperaturas). (Carnicero, 2001).

Los modelos para AEF pueden ser creados utilizando elementos en una dimensión (1D haz), dos dimensiones (2D shell) o tres dimensiones (3D solid). Mediante el empleo de vigas y conchas en lugar de elementos sólidos, un modelo representativo se puede crear con menos nodos sin comprometer la precisión (Siemens, 2014), para estos elementos simplificados se requieren algunas características, para que puedan emular a sus contrapartes reales, algunos ejemplos de estas propiedades son:

- Área de sección
- Momentos de inercia
- Torsión constante
- Resistencia a la flexión
- Corte transversal

En los paquetes de software modernos, el objeto real se representa por un modelo geoméricamente similar; éste objetos se divide en por regiones (denominadas elementos finitos) conectadas por medio de nodos, en un proceso que se llama “discretización. Las formas que toman estas partes dependen de la naturaleza del modelo original, pudiendo ser

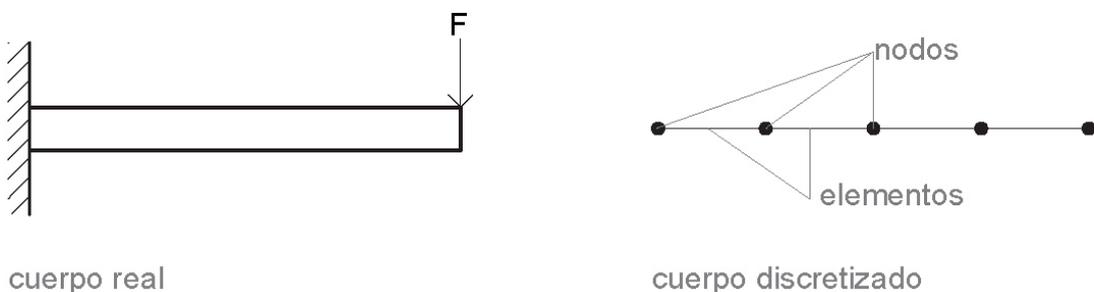


Figura 12: ejemplo de una viga simplificada en forma de un elemento 1D

Elaboración: el autor

Fuente: Introducción al Método de los elementos Finitos (2001)

puntos en el caso de una línea, líneas en el caso de un plano bidimensional, o superficie o polígonos sencillos (cubos, pirámides) para modelos tridimensionales (Jiménez Pézer Mitre, 2004). Por ejemplo, si el sistema a estudiar es una viga en voladizo con una fuerza aplicada en un extremo (Figura 12), el procedimiento adecuado sería representarla por un elemento tipo línea, y colocar una restricción en el primer nodo, para representar el encastre, y una fuerza puntual en el último nodo, para representar la carga.

Algunos de los análisis más comunes que se obtienen utilizando AEF incluyen:

- Estática lineal: análisis lineal con las cargas aplicadas y limitadas a resolución estática.
- Estática y dinámica no lineal: los efectos debidos a fricción (donde dos caras adyacentes del modelo están en contacto), definiciones de materiales no lineales (plasticidad, elasticidad, etc.), movimiento de fluidos.
- Modos Normal: frecuencias naturales de vibración.
- Respuesta Dinámica: las cargas que varía con el tiempo y la frecuencia.
- Pandeo: carga crítica en la que la estructura se vuelve inestable.
- Transferencia de calor: por cambio, conducción, radiación, etc.
- Transferencia eléctrica: de ondas electromagnéticas, de radio de distinta frecuencia, etc.

Al aplicar una acción externa en el cuerpo de cualquier naturaleza (fuerza, temperatura, sonido, etc.), se puede analizar la reacción en el primer elemento finito, el primer bloque en el que se dividió el cuerpo original, al obtener la reacción en éste, se evalúa la reacción en los bloques circundantes, y se continua a medida que la influencia de la acción aplicada sucesivamente hasta haber completado todo el modelo. Finalmente se despliegan los resultados del análisis en cada elemento, y por los tanto, a través de toda la geometría del cuerpo original.(Espinoza & Niño, 2001). Para simular los entornos reales de trabajo, en los modelos de AEF, se pueden aplicar distintos tipos de cargas a cada categoría de partes del diseño discretizado, así:

- Nodal: fuerzas, desplazamientos, aceleraciones, temperatura, flujo de calor, etc.
- Elemental: cargas distribuidas, presiones, flujos de calor.
- Corporales: las cargas de aceleración que afectan al cuerpo entero (gravedad).

### **2.2.1 Breve Historia del Análisis de elementos Finitos**

Aunque este proceso pueda parecer nuevo, lo cierto es que tiene raíces que se remontan a la Antigüedad, es así que los egipcios utilizaban métodos de discretización para determinar el volumen de las pirámides. Un sistema similar fue empleado por Arquímedes para calcular el volumen de distintos sólidos; uno de sus logros más importantes fue poder determinar el valor de  $\pi$  con una precisión de casi 40 dígitos, representando al círculo como un polígono de un número finitamente grande de lados, de los que si se podía determinar la longitud con respecto al diámetro. El matemático chino Lui Hui (300 d.C.) aproximaba el perímetro de un círculo con un polígono regular de 3072 lados.

El desarrollo de elementos finitos empezó de forma conceptual junto con las bases del cálculo diferencial e integral propuestos por Sir Isaac Newton, aunque el desarrollo moderno de esta técnica, aplicada al diseño estructural de aeronaves (donde se trata a las alas y fuselajes como ensambles de largueros, esqueletos y paneles de revestimiento) empezó en la década de 1940, cuando se propuso el uso de líneas unidimensionales para representar barras o vigas para el cálculo de elementos de sección continua. Aunque ciertas características del análisis de elementos finitos se encuentran en trabajos anteriores, el término “elementos finitos” fue utilizado por primera vez en 1690 por Clough (P. Rodríguez, 2004).

Actualmente el método se encuentra en una fase de crecimiento, gracias a la incorporación de computadoras cada vez más veloces, que pueden resolver la enorme cantidad de ecuaciones necesaria, e incluso han desarrollado interfaces gráficas para facilitar el modelado y la presentación de resultados.

### **2.2.2 Etapas del Proceso de Análisis de elementos Finitos**

La ingeniería asistida por computadora actualmente aplica procesos sistematizados para la simulación de respuestas reales en objetos de estudio, el método más común, que es utilizado por la mayoría de softwares de análisis, consta de tres pasos:

- **Pre-Procesamiento (modelado).** – Durante esta fase se construye un modelo virtual de la estructura que será analizada. En muchos programas (Abaqus incluido), que el elemento se defina dentro de una de las tres categorías dimensionales explicadas arriba; la forma debe replicar de manera realista los parámetros importantes del modelo real. Luego de creada la geometría, se le aplican propiedades reales (como peso, densidad, resistencia a la compresión, etc.), y estímulos exteriores (fuerzas, temperatura, carga eléctrica, etc.) para que se pueda poner a prueba. Finalmente se utiliza un procedimiento llamado “mallado”, para dividirla en las pequeñas partes que serán analizadas una a la vez; para determinar el tamaño que tendrán estas partes con relación al elemento completo (se sobreentiende que mientras más partes tenga, el análisis será más preciso, pero necesitará más tiempo para terminar de calcularse) se define un número de nodos, ya sea un número fijo de nodos, o localizados a una distancia determinada. Los programas FEA utilizan los nodos también como una herramienta de identificación, los elementos están definidos por los nodos que los rodean, además se asignan numeraciones a los nodos para poder referenciar el esfuerzo o deflexión en una localización específica.

- **Análisis.** – En la siguiente etapa, se envía el modelo para buscar errores en la etapa anterior y luego, llevar a cabo una serie de procesos computacionales donde se involucran las fuerzas aplicadas, y las propiedades del elemento geométrico, para determinar las reacciones del elemento.
- **Post-procesamiento (visualización).** – Cuando el análisis ha terminado correctamente, se pueden emplear herramientas gráficas o numéricas para mostrar los resultados. Así se puede ver exactamente la localización de las reacciones y los cambios que se provocaron en el cuerpo original (como deformaciones o transferencia de calor).

### 2.2.3 Software de Evaluación

Abaqus es un paquete de programas informáticos que aplican el método de elementos finitos para realizar cálculos estáticos, estructurales, térmicos, entre otros. La empresa fue fundada en 1978 por David Hibbitt, Bengt Karlsson y Paul Sorenson (Huang, 2005). Abaqus, que fue uno de los primeros softwares disponibles que utilizaban el análisis de elementos finitos, estaba centrada en el análisis sísmico para plantas nucleares, que necesitaban los cálculos más complejos; durante este período, sin embargo, el programa se dedicaba exclusivamente a realizar los cálculos, sin preocuparse por el modelado previo o la presentación de los resultados.

Posterior a ello, la compañía pasó casi 10 años desarrollando su propio pre y post procesador interactivo, el Catia V5, para cubrir todo el proceso de diseño, este esfuerzo se realizó en conjunto con la empresa francesa Dassault Systèmes, que adquirieron toda la compañía algunos años después, y son los que desarrollan Abaqus en la actualidad.

Abaqus CAE (Complete Abaqus Environment) es el paquete más completo de software para diseño, análisis y presentación de análisis de elementos finitos, incluye una interface intuitiva y herramientas para diseñar elementos in situ o exportar geometrías desde CAD; la herramienta de cálculo y visualización también está integrada, lo que lo convierte en la opción más adecuada para el análisis del presente proyecto, ya que no depende de otros programas para llevar a cabo todos los pasos del análisis.

La versión del software utilizada en la presente investigación es el Abaqus CAE 6.13 Versión Estudiantil, lanzado en septiembre de 2013

### **2.3 Estrategias de Modelado de Mampostería de Ladrillo**

La característica más relevante de la mampostería de ladrillo es su simplicidad, elegancia y durabilidad, sin embargo, la mayoría del conocimiento que se tiene actualmente de su comportamiento estructural proviene de la observación empírica y la experiencia. La mampostería está compuesta de ladrillos y mortero, debido a la poca resistencia del mortero a la tensión y compresión (Soveja, 2013), las uniones de los ladrillos forman planos de falla horizontales y verticales; en un esfuerzo por racionalizar su proceso de análisis a la vez que se involucra el cálculo computarizado. Para ello se necesitan modelos numéricos confiables, que puedan replicar la resistencia de estructuras de ladrillo existentes, además de predecir y mejorar el desempeño de muros de ladrillo en pequeñas construcciones (Bolhassani, Hamid, & Lau, 2015; Daniel & Dubey, 2014). Estos modelos pueden adaptarse fácilmente a las técnicas y los materiales disponibles en diferentes regiones. La mampostería es un material compuesto, el conjunto de bloques independientes y una argamasa aglutinante (Figura 13 a), por tanto, un entendimiento profundo de su comportamiento estructural se puede lograr con el micro-modelado (Figura 13 b), donde los ladrillos y el hormigón de las uniones se modela como elementos sólidos y la relación entre los dos como una interacción (este es el nombre que recibe una relación que se establece entre dos elementos adyacentes en Abaqus, como la fricción, ya que el simple contacto en el momento de modelar no basta). Las propiedades inelásticas, como el módulo de Young y radio de Poisson, de ambos elementos se toma en consideración por separado. Esta forma de modelado permite analizar las propiedades del ladrillo y el hormigón por separado y con gran precisión, pero consumen demasiado tiempo de modelado y recursos de cálculo en la computadora, por lo que para fines prácticos, e la mayoría de los casos se recurre a una versión de micro-modelado simplificada (Figura 13 c), donde se utilizan “unidades” expandidas, que ocupan también el espacio de las juntas, para no cambiar la geometría resultante, y éstas se representan simplemente por una interacción que se programa para asemejarse a las condiciones reales, cada unión, que en la realidad consta de la argamasa y la interacción que esta tiene con el ladrillo, se reduce a una interacción simple; en este caso la mampostería se considera como una serie de bloques elásticos, unidos entre sí por líneas donde existe un potencial de fractura o desplazamiento (Addessi, Marfia, Sacco, & Toti, 2014). La precisión de este modelo se reduce ya que el efecto del radio de Poisson de la argamasa ya no se considera.

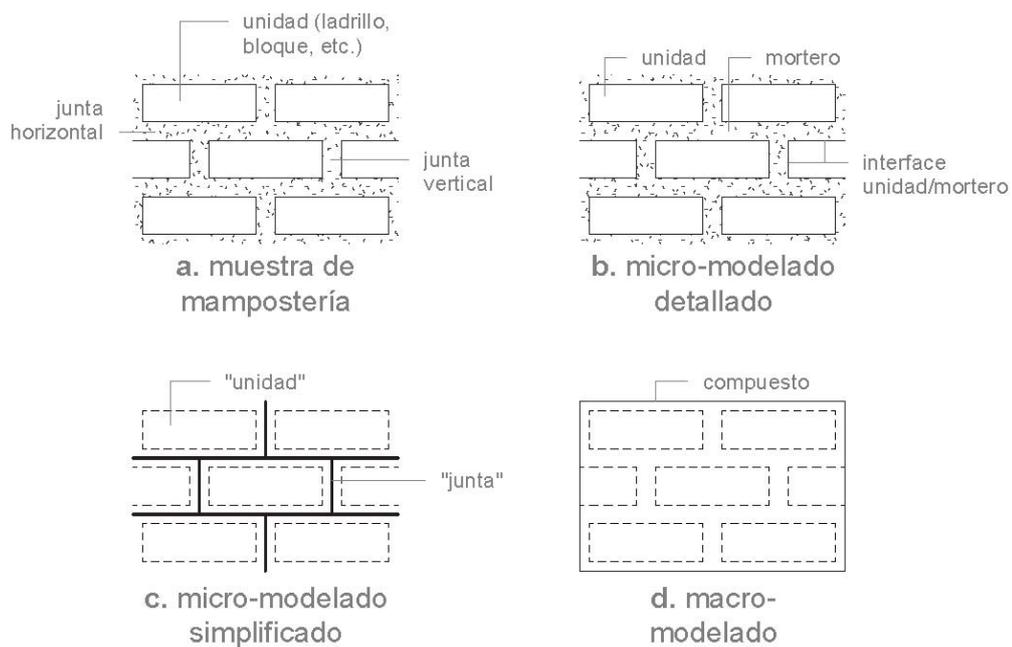


Figura 13: estrategias de modelado para estructuras de mampostería  
 Elaboración: el autor  
 Fuente: Dos enfoques para el análisis de estructuras de mampostería: micro y macro-modelado (2014)

El enfoque de micro-modelado es apropiado para pequeñas estructuras, que se van a someter a condiciones de gran estrés y tensión, el objetivo primario del micro-modelado es representar con la mayor precisión posible la mampostería, partiendo del conocimiento de las propiedades físicas de los elementos que la constituyen, esta información experimental debe provenir de los análisis de laboratorio de estos elementos solos.

Sin embargo, en un campo donde los experimentos se orientan a elementos más grandes, como edificaciones completas, se sabe que la interacción entre los ladrillos y el mortero es generalmente despreciable dentro del comportamiento global de la estructura. En estos casos se sigue un rumbo diferente, el macro-modelado (Figura 13 d) donde los muros se modelan como un solo elemento, y los parámetros de este material "compuesto" se obtienen a partir de análisis de grandes paneles de ladrillo expuestos a estados homogéneos de estrés.

Un macro-modelo completo debe reproducir las características de un material ortótropo, con diferentes resistencias a la tensión y compresión a lo largo de su eje, al igual que diferentes comportamientos inelásticos en cada eje. Los modelos propuestos en el pasado no han sido enteramente aceptados, debido a las dificultades inherentes a crear un modelo suficientemente complejo para expresar satisfactoriamente estos comportamientos inelásticos. Sin embargo, al ser mucho más rápido y amigable, este enfoque es más adecuado

cuando la estructura es lo suficientemente grande como para que el estrés en las uniones sea prácticamente uniforme.

Es por eso que se debe notar que ninguno de los dos sistemas (el micro y macro-modelado) puede reemplazar completamente al otro, debido a que tienen diferentes fortalezas, debilidades y campos de aplicación, por lo que el uso de cada uno debe ser considerado cuidadosamente para conseguir un balance entre la eficiencia y la precisión.

### **2.3.1 Micro-Modelado**

El micro-modelado es la mejor estrategia para conocer las micro fallas de la mampostería; aunque se utilice normalmente el modelado simplificado, un modelo riguroso debe considerar las clases principales de fallas que afectan a la mampostería de ladrillo, estas son: agrietamiento de las juntas (Figura 14 a), deslizamiento en las juntas horizontales debido a valores bajos de estrés normal (Figura 14 b), agrietado de las unidades por tensión directa (Figura 14 c), agrietado diagonal de las unidades debido a estrés suficiente para desarrollar deslizamiento de las uniones (Figura 14 d) y triturado de ladrillos debido a presión (Figura 14 e). Se puede determinar que a y b son fallas de mecanismo, c es falla de las unidades, d y e son fallas combinadas de las unidades y las juntas. La cuestión de cómo considerar todos estos fenómenos en el modelo persiste, para evitar tener que modelar y discretizar sólidos tanto para los boques como para el mortero que los une (Figura 13 b), en el modelado simplificado se parte del principio que los agrietamientos se originan en las interfaces de unión ladrillo-mortero, que son planos de debilidad por el emparejamiento de dos materiales diferentes, como estas uniones están reducidas a planos de contacto (donde la acción del cemento puede reemplazarse con una fricción de valor asignado), las propiedades que se asignen a estos planos sumamente importantes para el desempeño del modelo durante las simulaciones.

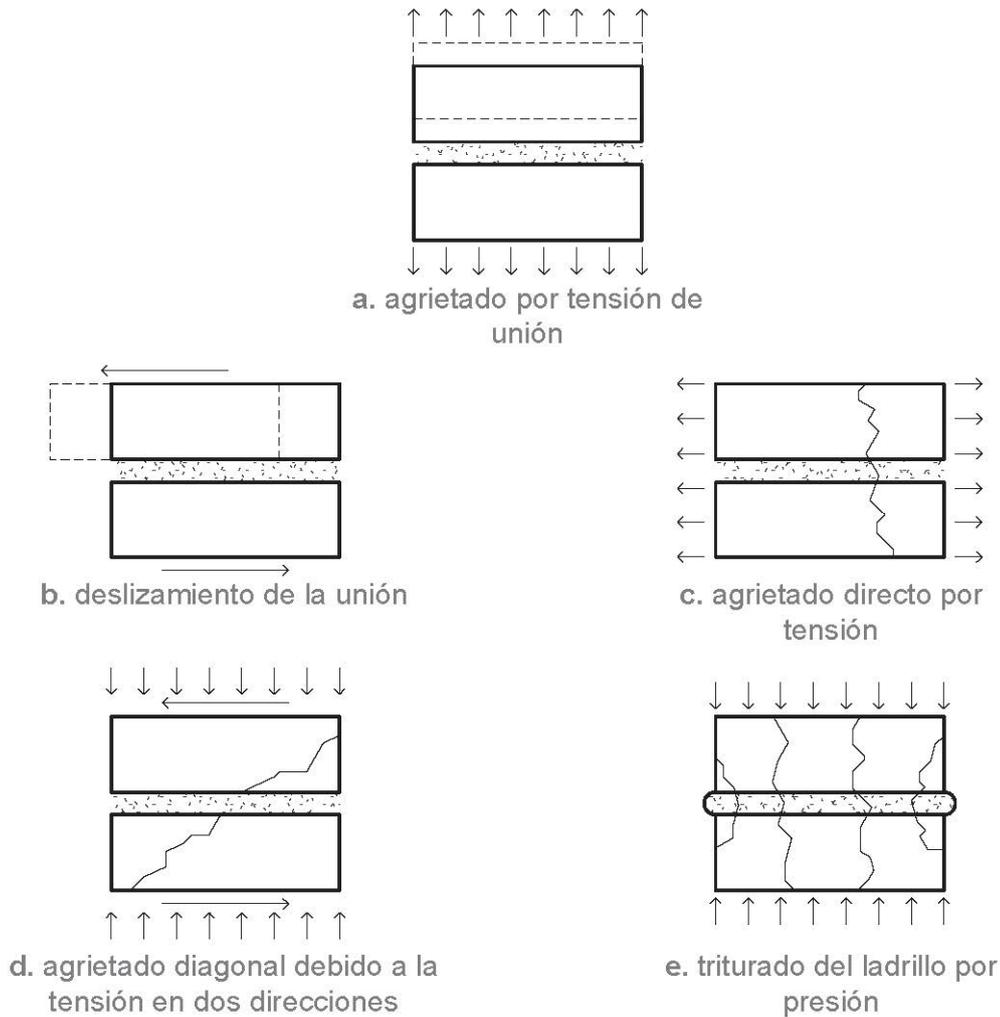


Figura 14: mecanismos de falla de mampostería

Elaboración: el autor

Fuente: Dos enfoques para el análisis de estructuras de mampostería: micro y macro-modelado (2014)

### 2.3.2 Macro-modelado

El macro-modelado es relativamente más fácil de lograr, requiere menos ingreso de datos y los criterios de falla en la mampostería está definida por leyes simplificadas. La parte más delicada del proceso es homogenización del material, donde se busca replicar las propiedades del muro en un solo material homogéneo ficticio (Noor-E-Khuda, Dhanasekar, & Thambiratnam, 2016). La aplicabilidad del modelo depende de que los límites elásticos y plásticos para igualar las de la mampostería.

Esto no es un ejercicio puramente teórico, los materiales heterogéneos se encuentran muy comúnmente en la realidad, en forma de aleaciones de metales, uniones de polímeros, compuestos, etc. La dificultad estriba en que las propiedades de un material heterogéneo varían enormemente, según el tamaño, forma y características espaciales de cada ejemplar. Para determinar las características macroscópicas exactas del material, se necesitaría una

cantidad demasiado costosa de pruebas hechas en muestras de distintos tamaños y bajo distintas condiciones; por el otro lado, debido a la naturaleza intrínsecamente variable de estos materiales, ni siquiera después de todo ese proceso se puede asegurar crear una malla que prediga con precisión la respuesta del material original en todos los casos (Kouznetsova, Brekelmans, & Baaijens, 2001). Para superar este problema, se han desarrollado diversos métodos de homogenización para crear un material que satisfaga las necesidades de análisis:

- La forma más sencilla para lograr la homogenización de un material compuesto es “mezclar” las propiedades de sus componentes, es decir promediar las propiedades de cada uno de los compuestos, y colocarlos proporcionalmente al porcentaje del volumen total del compuesto que representan, este enfoque considera las características micro estructurales y se justifica solamente para propiedades lineales de los materiales, como el módulo elástico.
- Un método más sofisticado de aproximación consiste en una solución analítica del valor del límite de una muestra esférica de un material contenido en una matriz infinita de otro material. Este procedimiento proporciona una aproximación aceptable para estructuras con forma regular, pero falla al momento de replicar el comportamiento de estructuras en forma de racimo.
- Otro enfoque matemático es la teoría de homogenización asintótica, que aplica una expansión asintótica al parámetro de longitud natural, es decir compara el radio de un tamaño de heterogeneidades a una medida de la macro estructura, para aproximar su distribución macroscópica, y luego utiliza principios variaciones para determinar una relación entre diferentes escalas. El enfoque de homogenización asintótica provee buenos valores generales, así como valores bastante precisos de estrés y tensión, sin embargo, su aplicación está limitada a geometrías microscópicas y modelos simples de materiales, expuestos a pequeñas tensiones.

Con el desarrollo de métodos computacionales, se ha extendido el método de células unitarias, que están basados en el concepto en un elemento de volumen representativo (RVE por sus siglas en inglés), desarrollado originalmente por R. Hill en 1963. Las propiedades del material homogenizado se obtienen después de ajustar los resultados del modelo RVE (aplicando el método de elementos finitos) en ecuaciones fenomenológicas macroscópicas.

El método de células unitarias permite tomar en cuenta fácilmente la morfología micro estructural y permite la investigación de la influencia de diferentes características geométricas sobre ella; este método permite el análisis sencillo de la compleja morfología micro estructural de elementos expuestos a cargas sencillas, pequeñas deformaciones, y comportamiento sencillo del material (cuando se analizan propiedades elásticas y plásticas).

El proceso de macro-modelado se utiliza en el análisis de estructuras grandes, como el caso de edificios antiguos, anteriores al período donde se colocaban refuerzos adicionales, y cuya solidez dependía enteramente de muros de carga (Ilustración 1). En el campo de la restauración de edificios históricos, uno de los objetivos más extendidos es dotar de un nuevo uso a edificaciones históricas, diferente al que tenían originalmente. Además de devolver el esplendor original estas obras, el modelado permite encontrar un balance entre la conservación y la seguridad (Zielinska & Misiewicz, 2016).

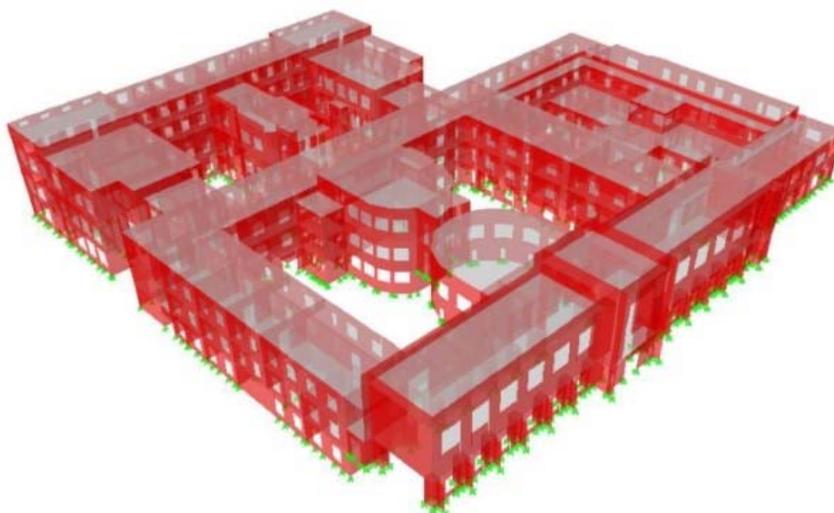


Ilustración 3: análisis estructural de la universidad de Cuza, usando macro-modelado  
Fuente: Métodos de modelado para mampostería sin refuerzo (2013)

# **CAPÍTULO 3**

## **MODELO MATEMÁTICO Y SIMULACIÓN**

### 3.1. Consideraciones Previas

#### 3.1.1. Resistencia característica a la compresión.

Al considerar un muro de mampostería de ladrillo sin refuerzo, con juntas ordinarias extendidas a todo el grueso, (Arroyo, Rodríguez, Gimbernat, Leguina, & Queralt, 2014), se utiliza la siguiente ecuación:

$$f_k = K \cdot f_b^{0,65} \cdot f_m^{0,25}$$

Donde:

- $f_k$  es la resistencia característica a la compresión de la fábrica
- $f_b$  es la resistencia normalizada a la compresión de una pieza de fábrica, en la dirección del esfuerzo, expresada en  $Nw/mm^2$ .
- $f_m$  es la resistencia media a la compresión del mortero ordinario; no mayor a 20  $Nw/mm^2$  o a  $0,75 f_b$
- $K$  es una constante de valor:
  - a) En muros de una hoja, cuyo grueso sea igual al tizón o la sogá de las piezas,  $K=60$  para ladrillos macizos,  $K=55$  para ladrillos perforados,  $K=50$  para aligeradas y  $K=40$  para piezas huecas.
  - b) En muros de dos hojas con suturas continuas  $K=50$  para ladrillos macizos,  $K=45$  para ladrillos perforados y  $K=40$  para aligeradas.

Los datos utilizados<sup>3</sup>:

- $f_b = 8,71 Nw/mm^2$  considerando los ladrillos mejorados<sup>4</sup>
- $f_m = 4,50 Nw/mm^2$  considerando una mezcla ordinaria 1:2:4 (Kidder & Parker, 1957)
- $K = 60$  por tratarse de ladrillos macizos

Reemplazando y resolviendo:

$$f_k = 60 \cdot 8,71^{0,65} \cdot 4,50^{0,25}$$
$$f_k = 356,88 Nw/mm^2$$

---

<sup>3</sup> Los valores adoptados para la resistencia del mortero y el ladrillo se multiplicaron, como margen de seguridad de 0,60, debido a que los valores recuperados de las fuentes ( $14,52 Nw/mm^2$  para el ladrillo y  $7,5 Nw/mm^2$  para el mortero) corresponden a las cargas de rotura.

<sup>4</sup> El valor de resistencia de los ladrillos corresponde al de los ladrillos mejorados con la adición de 2% aserrín propuestos por Pérez Castillo, 2016. El aserrín mejora la transmisión de calor interna de los ladrillos en hornos artesanales, logrando una cocción más homogénea y un aumento sustancial en la resistencia a la compresión, que se incrementa de  $55,3 Kg/cm^2$  a  $148,5 Kg/cm^2$ , con un incremento del precio por ladrillo de 2 centavos.

### 3.1.2. Resistencia de la mampostería a la flexión.

En la mampostería de ladrillo se consideran dos resistencias características, dependiendo de la dirección del plano de rotura (Figura 15)

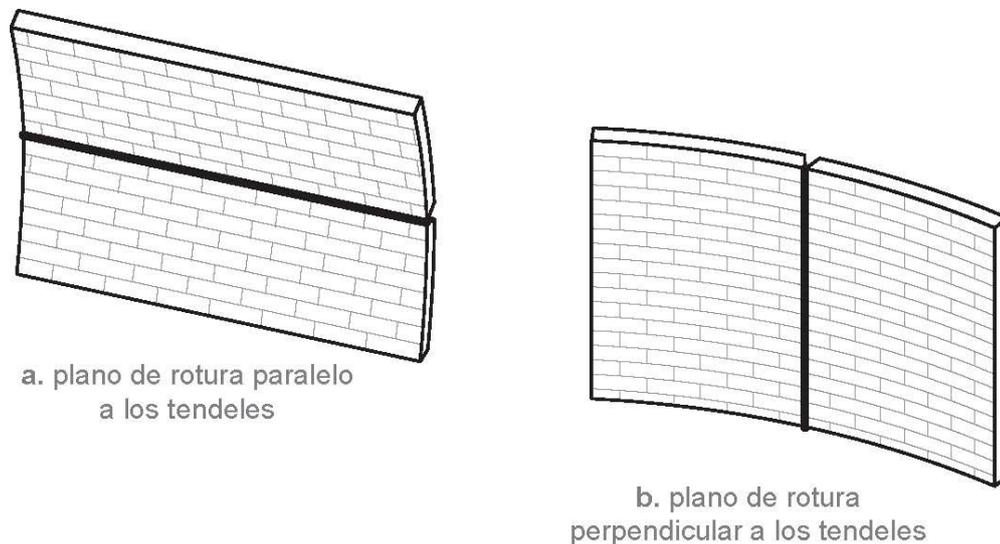


Figura 15: modos de flexión de la mampostería de ladrillo

Elaboración: el autor

Fuente: Código Técnico de la Edificación (2014)

Dependiendo de la dirección de este plano se consideran dos resistencias para ladrillos cerámicos con mortero simple cuya resistencia es mayor que  $5 \text{ Nw/mm}^2$ : para el caso a son  $0,10 \text{ Nw/mm}^2$ , y para el caso b  $0,40 \text{ Nw/mm}^2$

### 3.1.3. Cargas que intervienen en el modelo

- **Cargas muertas.** – Es el peso de todos los elementos pertenecientes a la estructura, en el momento en que está lista para su utilización. Para el presente estudio, que considera una estructura enteramente de muros portantes de ladrillo, se utilizará el peso volumétrico del ladrillo (tabique) rojo, macizo, hecho a mano, de  $1500 \text{ Kg/m}^3$ , según el reglamento de construcción de México (Kidder & Parker, 1957), y un peso de  $2400 \text{ Kg/m}^3$  para una losa de hormigón maciza.

Para el modelo se consideran en total seis muros de seis metros de longitud (Figura 16 b) que reposarán sobre la estructura original, con un área total de  $99,12 \text{ m}^2$ , lo que supone una carga total en muros de  $29736 \text{ Kg}$ , o  $291710 \text{ Nw}$ .

El modelo también supondrá la carga de dos losas de hormigón armado macizas (una de entepiso y otra de cubierta) con un volumen total de 14,4 m<sup>3</sup>, que suponen una carga de 34560 Kg, 339033.6 Nw.

- **Cargas vivas.** – Es la suma de las cargas de todos los elementos que no pertenecen a la estructura (personas, muebles peso del agua, vientos y nieve) pero que también tiene que ser soportadas por esta. Según el reglamento de construcción del Departamento de Comercio del Bureau of Standards, U.S. se debe considerar una carga viva permanente de 150 Kg/m<sup>2</sup> para las estructuras de uso residencial, cuartos de hotel y casas de alquiler.

Suponiendo que se aplica en el área de la losa libre de muros (31,36 m<sup>2</sup>), se obtiene una carga viva total de 4704 Kg, o 46146,24 Nw.

- **Coefficiente Sísmico.** – Los movimientos sísmicos a los que está expuesta una edificación pueden ser trepidatorios u oscilatorios (los segundos son los más exigentes con las edificaciones, porque causan tensiones horizontales), por eso se debe tener en cuenta la historia sísmica del lugar de emplazamiento, porque los sismos suelen repetirse.

Para este caso se ha tomado como referencia el código Sísmico de México, que considera movimientos de hasta 8° (El terremoto devastador que azotó la costa ecuatoriana el 16 de abril de 2016 alcanzó 7,8°), que clasifica las edificaciones en 8 tipos. Las viviendas unifamiliares del estudio pertenecen al tipo III “construcciones para edificios destinados al público, pero donde no se congrega gran número de personas (así como otras construcciones que al fallar pueden poner en peligro a las primeras), como hoteles, casas de vivienda, departamentos o despachos” (Kidder & Parker, 1957), por lo que se considera multiplicar todas las cargas resultantes entre vivas y muertas, por un coeficiente de seguridad de 1,02.

Al sumar todas las cargas vivas y muertas del modelo, se obtiene un resultado de 69000 Kg (676890 Nw); después de multiplicar por el factor de seguridad antisísmico, obtenemos una carga total sobre la estructura inferior de 70380 kg (690427,8 Nw).

### 3.2. Descripción del Modelo Numérico

#### 3.2.1. Modelado de Muros Independientes:

Para el modelo numérico, se ha seleccionado una estrategia de macro modelado, que permite calcular las reacciones de la mampostería de ladrillo como un conjunto, siguiendo el procedimiento adoptado por Aceh, 2012, se tienen los siguientes elementos:

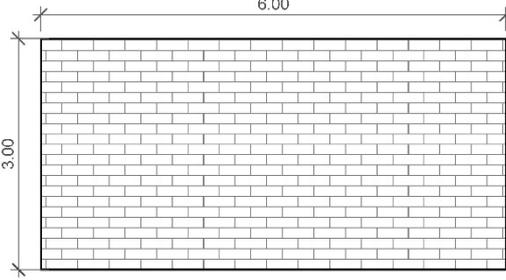
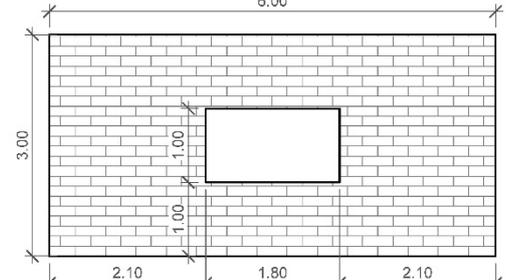
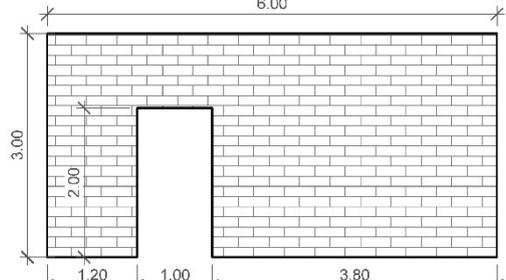
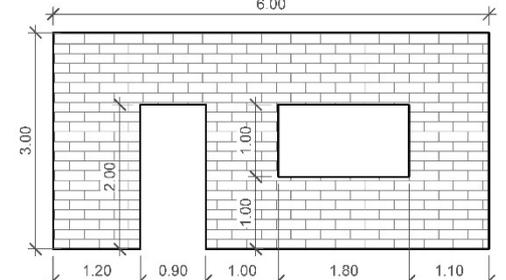
| Tipo de Muro | Imagen   | Aberturas  |
|--------------|--|--|
| Tipo I       |    | ninguna<br>porc. de vanos: 0%  |
| Tipo II      |   | ventana: 1,80m <sup>2</sup><br>porc. de vanos: 10%                               |
| Tipo III     |  | puerta: 1,80m <sup>2</sup><br>porc. de vanos: 10%                                |
| Tipo IV      |  | puerta: 1,80m <sup>2</sup><br>ventana: 1,80m <sup>2</sup><br>porc. de vanos: 20% |

Tabla 4: muros modelados para analizarse independientemente, con vanos crecientes.  
Fuente: el autor

Como se aprecia en la Tabla 2 se observa que se empieza con un muro macizo, donde se puede analizar la respuesta de los materiales asignados (W. Rodríguez, Rocío, & Muñoz, 2009), para comprobar que se acercan a la realidad, este muro es el caso “óptimo” donde las cargas se trasladan uniformemente hacia el terreno; después de eso se empiezan a practicar perforaciones que evoquen puertas y ventanas para analizar la respuesta de estos muros “debilitados” y comprobar que aún trabajan dentro de los márgenes de seguridad permisibles.

Cada uno de los muros se modela independientemente, según las dimensiones de la tabla y con un espesor de 20 cm, después se discretiza en bloques cúbicos de 10 cm de lado (3600 elementos para el muro Tipo I); para el primer análisis de carga simple, se considera una carga distribuida igual a la cuarta parte (se toma la cuarta parte porque, como se ve en la Figura 16 b, la carga total se divide entre las cuatro paredes que la soportan, como muestran las líneas de distribución de cargas) de la suma de las cargas vivas y muertas, multiplicadas por el factor de seguridad sísmica; en la parte inferior se coloca una restricción de encastre, que impide que el modelo se mueva o rote en cualquiera de los tres ejes. Para el análisis sísmico, se coloca una aceleración creciente en sentido paralelo al plano de tierra para simular un terremoto oscilatorio (el más peligroso para las edificaciones).

El procedimiento debe repetirse con los cuatro tipos de muros, para poder apreciar las diferencias en el desempeño de la mampostería con los vanos en distintas posiciones. Para la simulación sísmica, se ha aplicado una aceleración siguiendo la frecuencia del terremoto de Vrancea en Rumania, ocurrido en 1977, que alcanzo  $7,2^\circ$  en la escala de Richter, la fuerza se aplicará perpendicular a la longitud de los muros, que es cuando son más vulnerables.

### **3.2.2. Modelado de Habitación Completa:**

Finalmente se combinan los cuatro muros tipo del apartado anterior (Figura 16) para crear el modelo de una habitación, ésta permitirá analizar los efectos de las cargas y los movimientos sísmicos en una estructura real; las cargas para este caso se representarán como una carga distribuida uniformemente a lo largo y ancho del plano superior del modelo. Se realizarán, igual que en caso anterior, simulaciones de carga con una restricción de encastre en la base y de respuesta a movimientos sísmicos, con un movimiento oscilatorio simulado en la parte inferior del modelo.

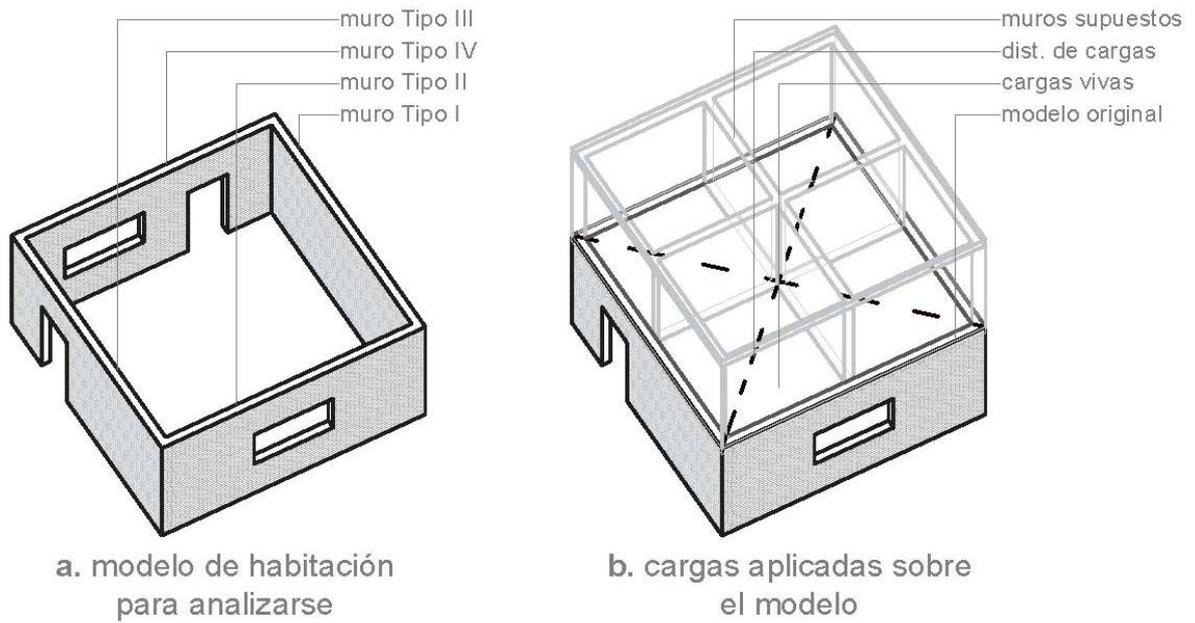


Figura 16: modelado de habitación y de las cargas externas a las que se somete.  
Elaboración: el autor

### 3.3. Resultados del Modelo Numérico

#### 3.3.1. Resultados sobre el muro Tipo I

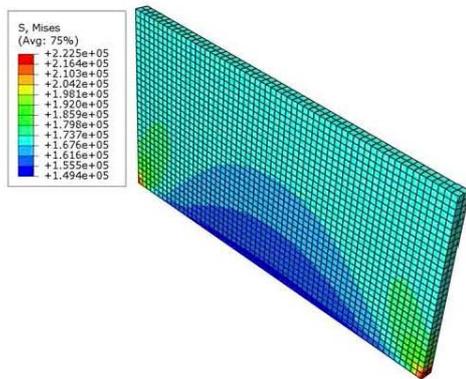


Figura 17: diagrama de estrés sobre el muro TI  
Elaboración: el autor

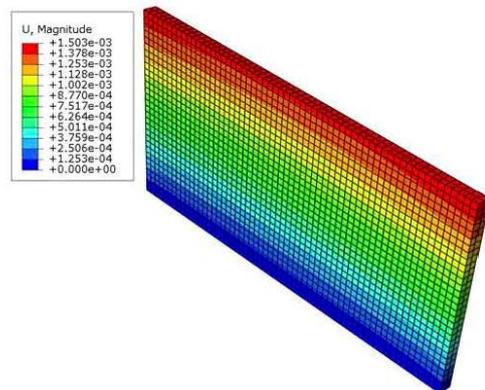


Figura 18: diagrama de desplazamiento del muro TI  
Elaboración: el autor

En el caso del muro Tipo I (TI) se observa que las cargas debido al estrés normal afectan de a la estructura principalmente en los extremos de las hiladas inferiores, donde la carga llega a los 22360 Nw, sin embargo, este esfuerzo afecta a una zona muy pequeña, de menos de 5 cm, a partir de ahí se distribuye a lo largo del eje inferior. Con respecto al desplazamiento de los bloques debido a la compresión (Figura 18), la primera hilada es la que se mueve una distancia mayor hacia el suelo, sin embargo, el mayor desplazamiento solo llega a  $9,54e-4$  m (0,09 mm), que apenas es perceptible.

### 3.3.2. Resultados sobre el muro Tipo II

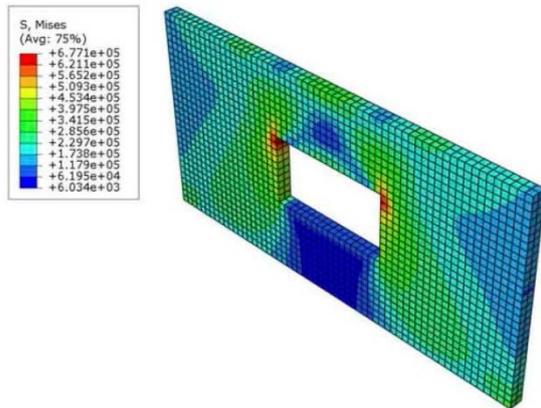


Figura 19: diagrama de estrés sobre el muro TII  
Elaboración: el autor

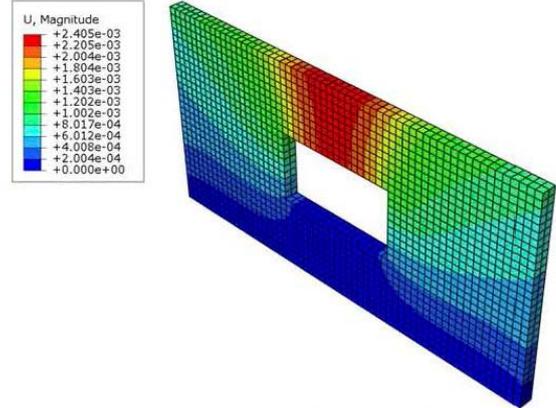


Figura 20: diagrama de desplazamiento del muro TII  
Elaboración: el autor

En el caso del muro TII, el estrés se concentra en las esquinas superiores del vano de la ventana, donde los momentos generados por el “dintel” son mayores, y a partir de ahí se reparten encima de éste; es interesante notar que la mayor carga también se localiza en el antepecho de la ventana, pero ya no se distribuye a lo largo de toda la hilera inferior, como en el caso anterior. Con respecto al desplazamiento, la parte superior de la ventana es la que sufre un movimiento mayor (casi 0,25 mm), y el patrón se distribuye alrededor de la ventana, compuesto principalmente por los desplazamientos laterales causados por la tracción de la región del muro sobre el “dintel” de la ventana.

### 3.3.3. Resultados sobre el muro Tipo III

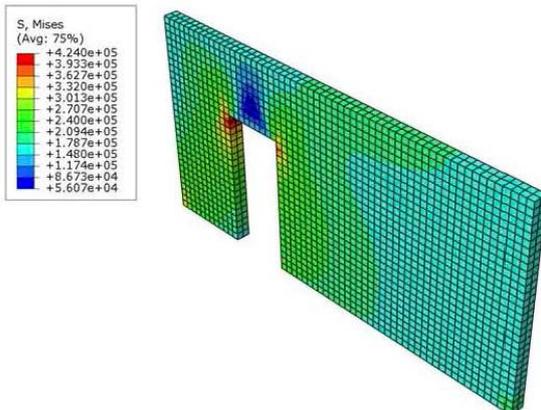


Figura 21: diagrama de estrés sobre el muro TIII  
Elaboración: el autor

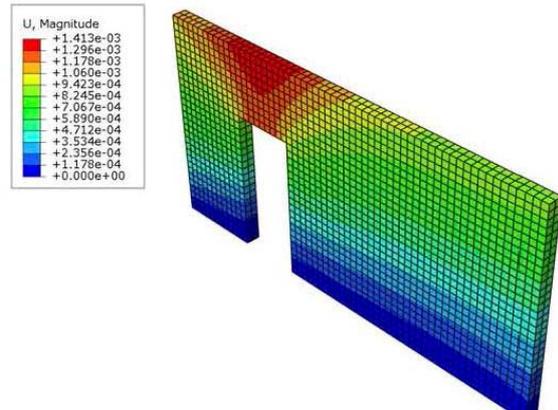


Figura 22: diagrama de desplazamiento del muro TIII  
Elaboración: el autor

Los resultados arrojados al analizar una abertura hasta el suelo (puerta), son similares a los del caso anterior, una vez más el estrés se acumula en las esquinas superiores del vano, donde se localiza los mayores momentos de torque, sin embargo, este fenómeno elimina

mucha de la carga aplicada sobre el la base, y por tanto sobre el cemento. El desplazamiento, igual que en al caso anterior, se concentra sobre y alrededor del vano.

### 3.3.4. Resultados sobre el muro Tipo IV

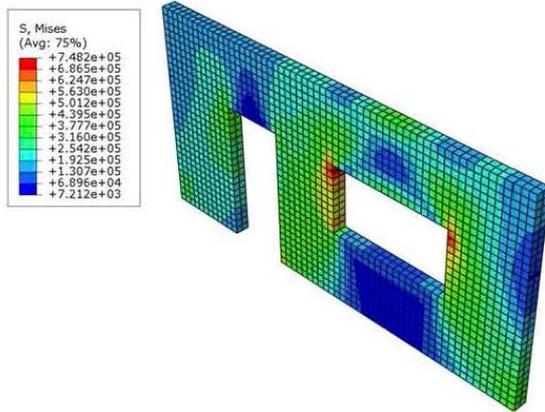


Figura 23: diagrama de estrés sobre el muro TIV  
Elaboración: el autor

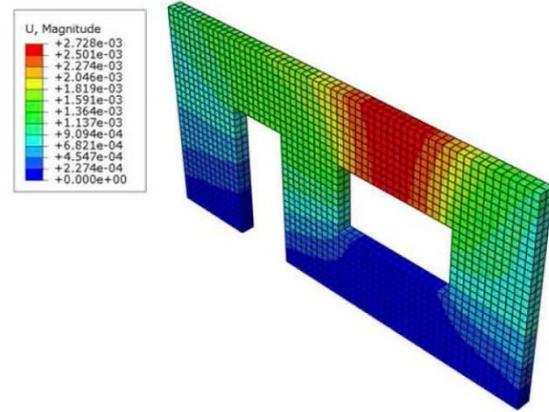


Figura 24: diagrama de desplazamiento del muro TIV  
Elaboración: el autor

Finalmente, en el caso con una puerta y una ventana (20% total del muro vacío), se ve que el momento mayor se ubica sobre el vano de la ventana, esto “levanta” la pared sobre la puerta, reduciendo drásticamente los estreses de carga que enfrenta. Este fenómeno también se refleja en los desplazamientos, donde la sección que más se movió (0,27mm) se encuentra sobre la ventana, el resto de desplazamientos se distribuyen, como en casos anteriores alrededor del mayor, paulatinamente hasta llegar a cero en los puntos más alejados.

### 3.3.5. Resultados sobre la habitación (carga normal)

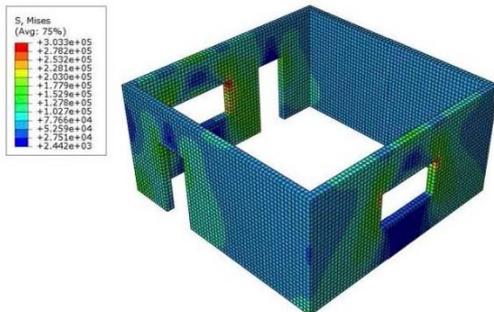


Figura 25: diagrama de estrés sobre la habitación (c. normal)  
Elaboración: el autor

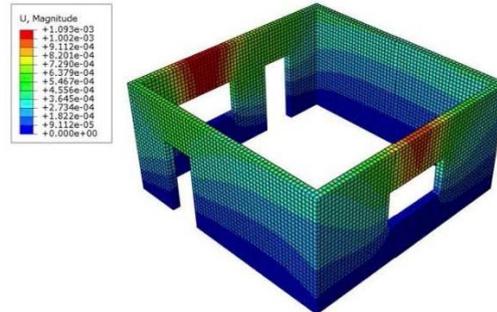


Figura 26: diagrama de desplazamiento de los muros de la habitación (c. normal)  
Elaboración: el autor

Cuando se evalúan las cargas totales sobre una habitación completa, se observan reacciones diferentes que, al evaluar muros independientes, por ejemplo, la carga que antes se concentraba completamente en la primera hilada del muro Tipo I, ahora se encuentra distribuida en toda la estructura; los estreses debido a carga mayores, todavía se concentran

en la parte superior del vano de las ventanas, pero la forma total ha contribuido a reducir los esfuerzos de las aberturas sobre las puertas, la distribución general de los esfuerzos se distribuye, e general de una manera más homogénea a través de todo el modelo. Con respecto a los desplazamientos, estos se concentran de nuevo en los dinteles de los vanos más anchos, de nuevo se puede ver que la cantidad de muros en un muro reduce su capacidad portante.

### 3.3.6. Resultados sobre la habitación (terremoto)

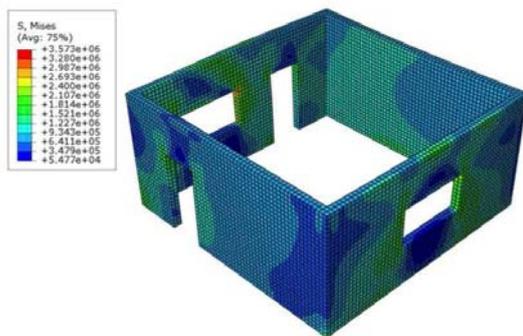


Figura 27: diagrama de estrés sobre la habitación (terremoto)  
Elaboración: el autor

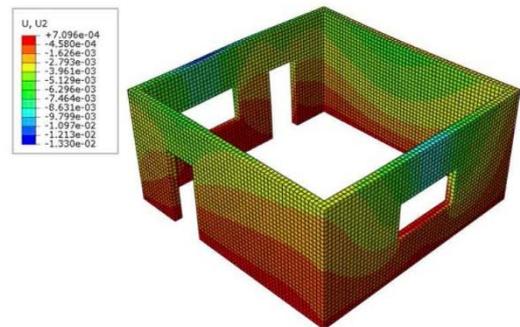


Figura 28: diagrama desplazamiento de la habitación (terremoto)  
Elaboración: el autor

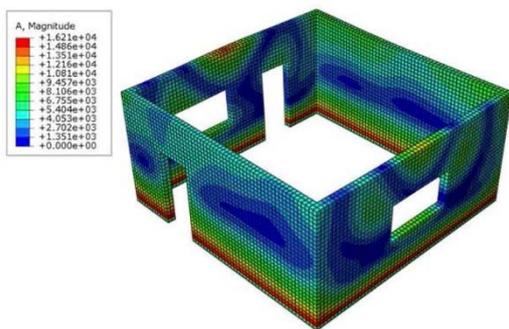


Figura 29: diagrama de aceleración sobre la habitación (terremoto)  
Elaboración: el autor

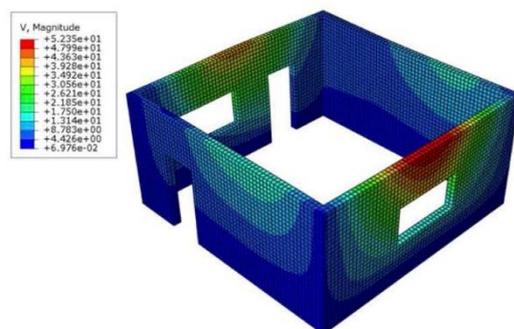


Figura 30: diagrama velocidad de la habitación (terremoto)  
Elaboración: el autor

Durante un evento sísmico, el estrés de las cargas se distribuye uniformemente a través de toda la estructura, los empujes laterales son contrarrestados por las cargas fijas aplicadas, el desplazamiento más fuerte es recibido por las hiladas inferiores, pero a medida que sube, es absorbido paulatinamente por la masa de la estructura, haciendo que sea casi imperceptible en las plantas superiores; un hecho que llama la atención es que, a pesar de que la hilera inferior está en contacto directo con el plano de movimiento durante un sismo, la aceleración más alta se registra una hilada más arriba Figura 29, ya que la inferior está sujeta a la cimentación, esta información resulta útil en la etapa de diseño, si se desean plantear refuerzos para mejorar la respuesta antisísmica de la estructura, aunque aquí queda demostrado que, en lo concerniente a estructuras pequeñas, no es necesario. Finalmente podemos ver en la Figura 30, que la velocidad de la estructura coincide con la dirección del sismo, debido a que esto es imposible de proveer, se debe colocar anclajes en ambos ejes horizontales para proteger la integridad de la estructura en el caso de un terremoto oscilatorio.

## CONCLUSIONES

- Al comienzo de la investigación, se pudo determinar que no existen estudios en base a modelos numéricos adaptados a los materiales de nuestro medio, y a pesar que existe una gran variedad de estos estudios realizados en el exterior, es una práctica que todavía es prácticamente inexistente en el país, aunque sí existen numerosos estudios sobre modelos físicos, llevados a cabo en laboratorios,
- La construcción de modelos numéricos es una herramienta extremadamente versátil para el análisis y diseño de construcciones de una manera precisa, rápida y económica; utilizando como materia prima la gran cantidad de estudios y pruebas de laboratorio existentes sobre distintos materiales, puede predecir la respuesta estructural de proyectos existentes o futuros, como lo demuestra su extendido uso en la industria automotriz y diseño de productos.
- El ladrillo artesanal producido en la ciudad de Catamayo, a pesar de no contar con el respaldo técnico ni la estandarización que se puede exigir a sus contrapartes de procedencia fabril, tiene las capacidades portantes necesarias para resistir las cargas exigidas por edificaciones pequeñas (viviendas unifamiliares), sin necesidad del apoyo de una estructura adicional de hormigón armado.
- La forma y tamaño de los vanos practicados en los muros afectan directamente la forma como éste reacciona a las cargas, como se muestra en la Figura 23 un vano puede contribuir a reducir drásticamente la carga sobre otro adyacente, algo que se debe tomar en cuenta en el momento de diseñar.
- El estrés de los muros debido a las cargas se concentra principalmente en el punto medio de los dinteles de los vanos más anchos (ventanas), es necesario cuidar la longitud de éstos en el diseño, o de no ser posible, reforzar la estructura.
- En caso de un movimiento sísmico, las estructuras de ladrillo portantes, considerando la resistencia integral del muro como la media de sus componente (macromodelo) son una opción que brinda seguridad, como se observa en la Figura 28, la mayoría del movimiento se absorbe por la propia estructura, haciéndose casi imperceptible en las plantas superiores, el modelo fue probado con un terremoto de 7,2° en la escala de Richter, y resistió satisfactoriamente.

## RECOMENDACIONES

- La calibración del modelo numérico es uno de los procesos más delicados de la simulación, es necesario utilizar la información experimental más exacta posible, para mejorar los resultados de la simulación.
- La calibración es mucho más sencilla cuando se empieza con un muro completamente macizo, en el que se puede probar la respuesta de los materiales asignados.
- El método de Análisis de Elementos Finitos, es una herramienta que depende enormemente de los datos con que se alimente el programa; es por esto que es de vital importancia que las fuentes de donde se busque esta información sean serias (resultados de laboratorio, libros, revistas científicas, etc.).
- El método de Análisis de Elementos Finitos puede aplicarse para infinidad de simulaciones del comportamiento de estructuras, dentro de la mampostería de ladrillo sin refuerzo, se puede analizar las reacciones a empujes laterales del terreno desde todas las direcciones (sótanos), o el impacto del viento en construcciones de más pisos, en los que éste sea un factor a considerar; el método es igualmente efectivo para evaluar otras propiedades útiles en una construcción, como su aislamiento acústico, aislamiento de temperatura, protección contra humedad, etc..
- La presente investigación utilizó solamente el método del macro-modelado, debido a que actuó sobre los ladrillos comunes de arcilla, de los que se tiene gran cantidad de información en trabajos de investigación y códigos de construcción, para materiales nuevos (como bloques de materiales reciclados), es recomendable empezar con un modelo logrado con micro-modelado primero, para poder tener una idea más exacta de sus capacidades portantes, para poder posteriormente transferir información a un modelo más grande, en la escala de un edificio completo, por ejemplo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aceh, B. (2012). Finite Element Modelling of Unreinforced Masonry ( URM ) Wall with Openings : Studies in Australia, 2(2), 22–24.
- Addessi, D., Marfia, S., Sacco, E., & Toti, J. (2014). Modeling Approaches for Masonry Structures. *The Open Civil Engineering Journal*, (2), 288–300.  
<https://doi.org/10.2174/1874149501408010288>
- Arroyo, I., Rodríguez, R., Gimbernat, E., Leguina, J., & Queralt, J. M. (2014). *Código Técnico de la Edificación. Tecnos* (Vol. 1).
- Benévolo, L. (1987). *Historia de la Arquitectura Moderna* (6th ed.). Barcelona: Gustavo Gili.
- Bolhassani, M., Hamid, A. A., & Lau, A. C. W. (2015). Simplified micro modeling of partially grouted masonry assemblages. *Construction and Building Materials*, 83, 159–173.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.021>
- Camuñas Paredes, A. (1974). *Materiales de Construcción. Gráficas BeCeFe* (Vol. 1).
- Carnicero, a. (2001). Introducción al Método de los Elementos Finitos, 1–25.
- Daniel, A. J., & Dubey, R. N. (2014). Finite element simulation of brick masonry building under shock loading. *10th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*.  
[https://doi.org/10.1007/978-81-322-2193-7\\_81](https://doi.org/10.1007/978-81-322-2193-7_81)
- Del Frusco, R. (1981). *Historia de la Arquitectura Contemporánea*. Madrid: Unigraf.
- Deplazes, A. (2010). *CONSTRUIR LA ARQUITECTURA. Del material en bruto al edificio. Un manual. Editorial Gustavo Gili*.
- Espinoza, C., & Niño, Y. (2001). CI71D Modelación Numérica en Ingeniería Hidráulica y Ambiental 1, (2), 1–22. Retrieved from  
<http://materias.fi.uba.ar/7538/material/Otros/Espinoza%26Ni%F1o-Metodo de los Elementos Finitos.pdf>
- Ferri, J., & Pérez, V. (2010). *Principios de Construcción. Universidad de Alicante* (Vol. 1). Alicante.
- Hill, R. (1963). Elastic Properties of Reinforced Solids: Some Theoretical Principles. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(63\)90036-X](https://doi.org/10.1016/0022-5096(63)90036-X)
- Huang, P. (2005). *The New Age for ABAQUS. Entrevista con Mark Goldstein, CEO of ABAQUS*.
- Ignacio Alvarez, J., & Martín Pedro García Casado, A. J. (1995). HISTORIA DE LOS MORTEROS. *Boletín Del Instituto Andaluz Del Patrimonio Historico*, 13, 52–59.

- Jiménez Pézer Mitre, A. (2004). Análisis y optimización con interacción de Dummy, de la carrocería del automóvil "Tubolare SAND CAR" de Tecnoidea SA de CV, en impacto frontal empleando el método de elementos finitos en ALGOR FEA, mediante la simulación de eventos mecánicos, 19–52. Retrieved from [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lim/lopez\\_sa\\_ja/](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/lopez_sa_ja/)
- Kidder, F., & Parker, H. (1957). *Manual del Arquitecto y el Constructor* (cuarta). Balderas.
- Kouznetsova, V., Brekelmans, W. A. M., & Baaijens, F. P. T. (2001). Approach to micro-macro modeling of heterogeneous materials. *Computational Mechanics*, 27(1), 37–48. <https://doi.org/10.1007/s004660000212>
- López, J., Oller, S., & Oñate, E. (1998). Cálculo del Comportamiento de la Mampostería Mediante Elementos Finitos, 46.
- Noor-E-Khuda, S., Dhanasekar, M., & Thambiratnam, D. P. (2016). An explicit finite element modelling method for masonry walls under out-of-plane loading. *Engineering Structures*, 113, 103–120. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.01.026>
- Norma NTE INEN 297-1978: Ladrillos cerámicos. Requisitos. (1978).
- Ochoa Cueva, S. F., & Santórum Merchán, H. V. (2005). *Recomendaciones generales para la fabricación del ladrillo artesanal y su uso en la construcción de vivienda con mampostería confinada*. Universidad Técnica Particular de Loja. Retrieved from <http://dspace.utpl.edu.ec/handle/123456789/14780>
- Pérez Castillo, J. G. (2016). *Mejorar la calidad de los ladrillos artesanales producidos en la ciudad de Catamayo*. Universidad Técnica Particular de Loja, Loja- Ecuador. Retrieved from <http://dspace.utpl.edu.ec/handle/123456789/14779>
- Pyromasse Montreal. (2016). Jack Arch Construction Sequence. Retrieved from [http://www.pyromasse.ca/articles/jacs\\_e.html](http://www.pyromasse.ca/articles/jacs_e.html)
- Rodríguez, P. (2004). *Determinación de las curvas de calibración mediante simulación numérica de compresión de anillos*. Universidad Autónoma de Nuevo León .
- Rodríguez, W., Rocío, M., & Muñoz, P. (2009). Calibración de modelos de elementos finitos de muros de adobe por optimización Using optimisation for calibrating finite element models for adobe walls, 29(2), 10–19.
- Siemens, E. (2014). FEA / Análisis de elementos Finitos. Retrieved from [https://www.plm.automation.siemens.com/es\\_es/plm/fea.shtml](https://www.plm.automation.siemens.com/es_es/plm/fea.shtml)
- Soveja, L. (2013). MODELLING METHODS FOR UNREINFORCED MASONRY STRUCTURES, *Tomo LIX*(6).
- Zielinska, M., & Misiewicz, J. (2016). Analysis of Historic Brick Walls' Strengthening Methods. *Procedia Engineering*, 161, 771–776. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.702>