

**“CONTRIBUCION AL ESTUDIO DE LA RESPUESTA ULTIMA DE MUROS DE
MAMPOSTERIA”**

**JONATHAN ALEJANDRO CHIQUILLO SALAMANCA
FRANCY YUBITH PATIÑO OICATÁ**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2011**

**“CONTRIBUCION AL ESTUDIO DE LA RESPUESTA ULTIMA DE MUROS DE
MAMPOSTERIA”**

**JONATHAN ALEJANDRO CHIQUILLO SALAMANCA
FRANCY YUBITH PATIÑO OICATÁ**

**Trabajo de grado para optar por el título de
INGENIERO/A CIVIL.**

**Director
Álvaro Viviescas Jaimes
Ingeniero Civil, Ph.D**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2011**

Agradezco a Dios que siempre ha sido mi mano derecha, también ti hermanito Efrén que siempre me has iluminado, dado fuerzas y guiado en este viaje y a mi abuelita Josefina que me lleno de fortaleza en momentos difíciles.

A mis padres **José Jacobo Patiño** y **Julia Oicatá Torres** por su sacrificio, apoyo incondicional, comprensión y por transmitir sus enseñanzas en cada instante de mi vida.

A mi hermana y amiga Adriana Moreno que siempre confió en mí, gracias por tus consejos y alegrías los cuales me han servido para ser una mejor persona tanto moral y espiritualmente.

Agradezco a Dios por otorgarme la sabiduría necesaria para superar satisfactoriamente todos los obstáculos interpuestos en alcanzar este objetivo
En especial a mis padres **Miguel Antonio Chiquillo y Miryan Consuelo Salamanca** al darme una confianza plena y un apoyo incondicional les dedico este logro alcanzado porque aun estando lejos siempre estuvieron conmigo cuando más lo necesitaba
A ti Ángela, por compartir los momentos alegres y amargos porque estando a mi lado me ayudas a pasar por encima de los pequeños incidentes de la vida.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestro director Álvaro Viviescas, Ing. Civil, por su atención, paciencia y colaboración dada al dirigir esta tesis.

A la Universidad Industrial de Santander y a todos los docentes que nos brindaron la ayuda para formarnos como personas y profesionales íntegros y útiles para la sociedad.

A IC INGENIEROS por la sesión de la licencia del programa MIDAS FEA, y por su asesoría brindada para el desarrollo satisfactorio de esta investigación.

A todos nuestros compañeros y amigos que nos brindaron su apoyo y compañía en el transcurso de esa etapa de nuestras vidas.

GRACIAS POR TODO.

TABLA DE CONTENIDO

CAPITULO 1	15
INTRODUCCION Y OBJETIVOS.....	15
1.1 INTRODUCCION.....	15
1.2 OBJETIVOS.....	16
1.2.1 Objetivo general	16
1.2.2 Objetivos específicos.....	16
CAPITULO 2	17
ESTADO DEL CONOCIMIENTO	17
2.1 RESEÑA HISTÓRICA.....	17
2.2 MAMPOSTERÍA ESTRUCTURAL.....	18
2.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA MAMPOSTERÍA.....	20
Comportamiento mecánico de la mampostería.....	20
2.3.1 Las unidades.....	20
2.3.2 El mortero.....	21
2.3.3 Interfaz entre la unidad y el mortero.....	22
2.3.4 Comportamiento de la mampostería como material compuesto. ...	24
2.4 ANALISIS DE MUROS EN MAMPOSTERIA	28
2.4.1 Modelos Numéricos.....	28
2.4.2 Modelo de fricción	30
2.4.2.1 Ley de coulomb.....	30
2.4.2 Características básicas de un material cuasifrágil.....	31
2.5 MÉTODOS DE CÁLCULO	32
2.5.1 Micromodelamiento	34
2.5.2 Macromodelamiento.....	35
2.6 DATOS EXPERIMENTALES PARA VALIDACION.....	36
2.6.1 ENSAYOS SOBRE PANELES CON JUNTAS DE MORTERO.....	36
2.6.2 Ensayos sobre paneles con juntas seca.	39
2.6.2.1 Campaña experimental de Oliveira (2003).....	39
CAPITULO 3	42
MODELOS DE BIELAS Y TIRANTES	42
3.1 INTRODUCCION.....	42
3.2 DESCRIPCION BASICA DE LOS MODELOS.....	42
3.3 MODELOS PROPUESTOS PARA MUROS BAJO CARGAS EN EL PLANO 44	
3.3.1 Muros sencillos bajo carga vertical.....	44
3.3.2 Muros sencillos bajo cargas parciales o concentradas.	45
3.3.3 Fallo por fisuración en las unidades.....	48
3.3.4 Modelos residuales	48
CAPITULO 4	50
VERIFICACIÓN DEL MODELO SIMPLIFICADO DE BIELAS Y TIRANTES	50

4.1 INTRODUCCION.....	50
4.2 MODELO NUMERICO UTILIZADO	50
4.2.1 Tipos de elementos	50
4.2.2 Parámetros y criterios de falla.....	50
4.2.3 Validación modelo numérico.	52
4.3 ESTUDIO DE LA INCIDENCIA DE LOS DIFERENTES PARAMETROS A EVALUAR PARA VALIDAR B-T.	55
4.3.1 Incidencia de la relación ancho /alto del muro.	55
4.3.2 Incidencia de la relación ancho /alto de las unidades.	57
4.3.3 Incidencia de la cohesión (c) de la interfase.	61
 CAPITULO 5.....	 66
DISEÑO DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL.....	66
5.1 MATERIALES.	66
 CONCLUSIONES	 68
 BIBLIOGRAFIA.....	 70

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1. Muro en aparejo trabado.....	15
Figura 2.1 Muro de Hatunrumiyoc (PERÚ)	17
Figura 2.2. Relaciones esfuerzo – deformación para mortero, las unidades aisladas y los paneles de mampostería (Paulay y Priestley, 1993).....	19
Figura 2.3 Nomenclatura para las dimensiones y caras de las piezas o unidades (Martínez, 2003).....	20
Figura 2.4. Curva experimental tensión-desplazamiento de fisura.....	23
Figura 2.5. Típicas superficies de unión.....	23
Figura 2.6. Unidad básica de un muro de mampostería.....	24
Figura 2.7. Comportamiento uniáxial de la mampostería bajo carga normal al plano de las juntas horizontales. (a). Columna de unidades y mortero. (b). Probeta para ensayo RILEM (c). Diagrama tensión – deformación para diferentes valores de la resistencia del mortero.	25
Figura 2.9. Curvas experimentales tensión- desplazamiento para tracción en dirección paralela a las juntas horizontales de mortero. (a) el fallo ocurre por fisuración escalonada paralela a las juntas; (b) el fallo ocurre verticalmente a lo largo de juntas y ladrillos-juntas. (Backes, 1985).....	26
Figura 2.10. Envoltorio de rotura propuesta por Mann y Müller.	27
Figura 2.11. Propuestas para evaluar la resistencia de la interfase: (a) resistencia a tracción directa de la interfase; (b) resistencia a flexión de la interfase. Jukes y Riddinton (1998).....	27
2.12. Ensayos de tracción directa: (a) diagrama experimental tensiones de tracción-desplazamiento de la fisura, representado en forma de envoltorio; (b) áreas netas de unión a tracción. Pluijijm (1992), Oliveira (2003).	28
Figura 2.13. Tensiones sobre un elemento sometido a cortante – Mann y Müller (1982), Charry (2009).....	29
Figura 2.14. Modelo con juntas de espuma de goma - Mann y Müller (1982)	29
Figura 2.15. Envoltorio de rotura para los ensayos de Darmstadt – Mann y Müller (1982), (Charry 2009.).....	30
Figura 2.16 Comportamiento típico de los materiales cuasifrágiles bajo carga uniáxial	31
Figura 2.17. Comportamiento de la mampostería bajo precompresión y corte.	31
Figura 2.18. Diferentes estrategias de modelización de la mampostería: (a) Mampostería simple, (b) Micromodelo, (c) Micromodelo simplificado, (d) Macromodelo.....	33
Figura 2.19. Mecanismo de falla de la mampostería: (a) Fisuración por tracción; (b) Deslizamiento por junta; (c) Fisuración del ladrillo por tracción directa; (d) Fisuración diagonal del ladrillo por tracción; (e) Fisuración por “Masonry crushing”	34
Figura 2.20. Modelo adoptado	35

Figura 2.21. Geometría de los muros y esquema de la distribución de carga aplicada, (Charry, 2009).....	37
Figura 2.22. Geometría de los muros de junta seca y esquema de distribución de carga, (Oliveira 2003)	39
Tabla 5. Muros ensayados. Carga vertical aplicada y horizontal resistida.	40
Figura 2.23. Diagramas carga – desplazamiento horizontal para los muros ensayados...	40
Figura 3.1. Características de los modelos: (a) desviación de los campos de tensiones de compresión por fuerzas de tracción horizontal (T); (b) bielas paralelas (sc) y nodos (CCS); (c) bielas discretas (dc) representando un efecto de cuello de botella de los campos de tensiones de compresión, combinados con un tirante (T), y nodos CCT y CCCS, Roca (2006)	43
Figura 3.2. Modelos propuestos para muros bajo carga vertical uniforme.....	45
Figura 3.3. Modelos propuestos para muros bajo cargas verticales o parciales o concentradas.	46
Figura 3.4. Modelo B-T modificado A para muros anchos superiormente confinados.	47
Figura 3.5. Modelo B-T modificado B para muros anchos confinados superiormente	48
Figura 3.6. Modelos residuales muros macizos superiormente confinados.....	49
Figura 4.1. Malla de elementos finitos	51
Figura 4.2 Deformadas muro 100 kn (a) experimental y (b) numérica.....	52
Figura 4.3. Deformadas muro 200 kn (a) experimental y (b) numérica.....	53
Tabla 7. Cargas horizontales últimas.....	54
Figura 4.4. Cargas últimas experimental vs numérica, datos obtenidos en midas.....	54
Figura 4.5. Incidencia de la relación b/h en la respuesta del modelo.....	56
Figura 4.6. Comparativa mecanismo resistente (a) tensiones principales de compresión en el modelo numérico con b/h=2 y c=0 (b) Modelo B-T en abanico modificado.	57
Figura 4.7. Incidencia de la relación bu/hu. Muro 1mx1m.....	58
Figura 4.8. Tensiones principales de compresión para 30 kn de carga vertical. (a) bu/hu=2 (b) bu/hu=1.....	58
Figura 4.9. Incidencia de la relación bu/hu. Muro 2mx1m.....	60
Figura 4.10. Tensiones principales de compresión para 100 kn de carga vertical. (a) bu/hu=1 (b y c) bu/hu=2	60
Figura 4.11. Incidencia de la cohesión.	61
Figura 4.12. Comparativa mecanismo resistente Muro 0.6x1m carga 100kn cohesión c=0(a) Modelo numérico, distribución de tensiones de compresión kn/mm ² (b) Modelo B-T en abanico.....	63
Figura 4.14. Comparativa mecanismo resistente Muro 2x1m carga 100kn cohesión c=0. 63	
Figura 4.15 Comparativa mecanismo resistente Muro 2x1m carga 100kn cohesión c=0.25	64
Figura 4.16 Comparativa mecanismo resistente Muro 2x1m carga 100kn cohesión c=2.5	64

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación de los morteros de pega por propiedad o por proporción. ...	22
Tabla 2. Campaña experimental I, cargas de rotura.	38
Tabla 3. Campaña experimental II, cargas de rotura.	38
Tabla 4. Campaña experimental III, cargas de rotura.	38
Tabla 6. Rigideces para las juntas Oliveira (2003).....	51
Tabla 8. Comparativas cargas horizontales últimas para diferentes b/h.....	55
Tabla 9 Incidencia de la relación bu/hu. Muro de 1mx1m.....	58
Tabla 10 Incidencia de la relación bu/hu. Muro de 2mx1m.....	60
Tabla 11 Incidencia de la cohesión.....	61

RESUMEN

TITULO: CONTRIBUCION AL ESTUDIO DE LA RESPUESTA ÚLTIMA DE MUROS DE MAMPOSTERIA*

Autores

PATIÑO OICATÁ Francy Yubith
CHIQUILLO SALAMANCA Jonathan Alejandro **

Palabras clave:

Muros de mampostería, bielas y tirantes, interfase, estudio paramétrico.

Descripción

Dadas nuestras condiciones de alta sismicidad en la mayoría de las grandes ciudades del país, es muy importante el estudio de la respuesta de muros en mampostería no reforzada ante acciones sísmicas. Aunque se ha realizado investigaciones sobre el comportamiento de muros sometidos a compresión y corte, todavía existen diversos fenómenos que no han sido plenamente entendidos o estudiados. La mampostería es un material que presenta diferentes propiedades en función de la dirección en la que estén orientadas las juntas de mortero. Estas constituyen planos de debilidad. Este sistema está constituido por muros formados por piezas o unidades entre sí por medio de una mezcla aglomerante, que generalmente es un mortero de dosificación variable de cemento, arena y agua. Por lo anterior se plantea aquí una investigación encaminada a estudiar la incidencia en la respuesta última de muros de mampostería sometidos a la acción combinada de cargas de compresión y corte en su plano. El desarrollo tiene por objetivo presentar los resultados obtenidos (incluido el análisis de los mismos) en la evaluación del modelo de bielas y tirantes para el análisis de la carga última de muros sometidos a carga vertical uniforme. Se estudiaron los diferentes factores de incidencia tales como: el tamaño del muro, de la unidad y cohesión existente en las juntas de interface.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingeniería Físico-Mecánica. Escuela de Ingeniería Civil. Ing. Álvaro Viviescas Jaimes.

ABSTRACT

TITLE: CONTRIBUTION TO THE STUDY OF THE LAST RESPONSE OF MASONRY WALLS*.

Autores:

PATIÑO OICATÁ Francy Yubith

CHIQUILLO SALAMANCA Jonathan Alejandro **

Keywords:

Masonry walls, rods and braces, interface, parametric study

Description

Given our high seismic conditions in most major cities, is very important to study the response of unreinforced masonry walls to seismic actions. Although it has conducted research on the behavior of walls under compression and shear, there are still several phenomena that have not been fully understood or studied. The masonry is a material which has different properties depending on the direction in which they are aimed mortar joints. These are planes of weakness. This system consists of walls made up of parts or units together by a binder mixture, usually a variable dosing mortar cement, sand and water. Therefore arises here an investigation to study the impact on the ultimate response of masonry walls subjected to combined action of compressive loads and cut into his plane. The development aims to present the results (including analysis of the same) in the evaluation model and tie rods for the analysis of the ultimate load of walls subjected to uniform vertical load. We studied the effect different factors such as the size of the wall, the unity and cohesion existing interface boards. A comparison was made for different types of cohesion in order to give a conclusion and a contribution to this research

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingeniería Físico-Mecánica. Escuela de Ingeniería Civil. Ing. Álvaro Viviescas Jaimes.

CAPITULO 1 INTRODUCCION Y OBJETIVOS

1.1 INTRODUCCION

Por mucho tiempo la humanidad ha construido toda clase de estructuras utilizando mampuestos de piedras, tierra, arcilla cocida y en tiempos más recientes, compuestos de cemento. En Colombia la mayor parte de todas las edificaciones se construyen principalmente con ladrillo de arcilla cocida o en concreto, a pesar que el encarecimiento de la mano de obra hace que la mampostería sea poco atractiva, en Colombia utiliza aun para la realización de proyectos.

La respuesta de muros de mampostería no reforzada ante excitaciones sísmicas perpendiculares al plano, responsable de la mayoría de los daños y colapsos en este tipo de estructuras, es una de las más complejas y poco comprendidas áreas de la ingeniería.

Este sistema está constituido por muros formados por piezas o unidades entre sí por medio de una mezcla aglomerante, que generalmente es un mortero de dosificación variable de cemento, arena y agua. Las unidades se disponen generalmente en aparejo trabado y el mortero o pega se coloca entre hiladas y juntas verticales, este tipo de muros son los más comunes en la construcción colombiana.

En este tipo de muros es necesario garantizar esfuerzos incluidos de compresión causados por el pretensionamiento de las piezas de mampostería que se unen entre sí, el muro se confina y las piezas generan esfuerzos de fricción que serán la respuesta al corte directo producido por las fuerzas horizontales.

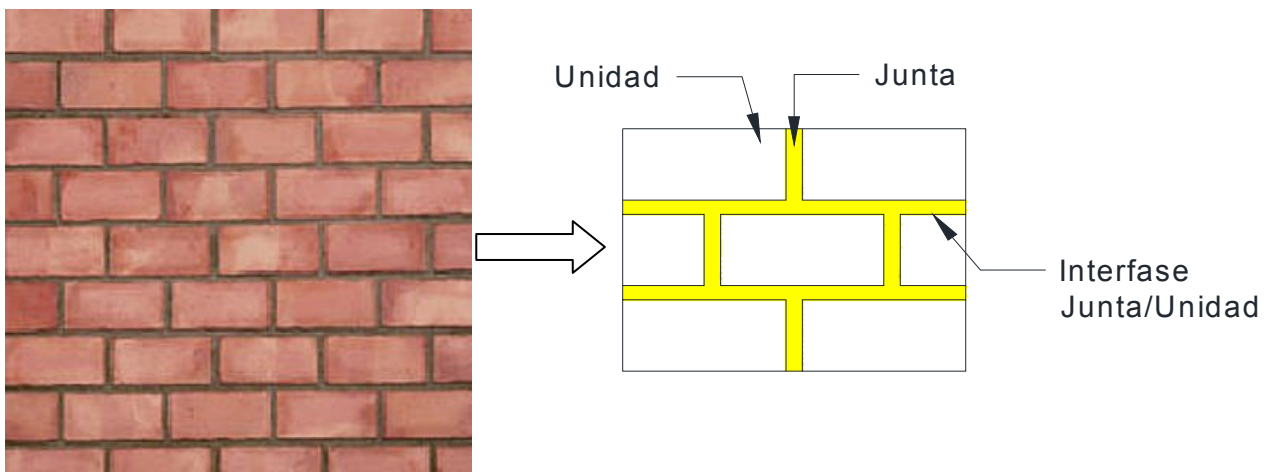


Figura 1.1. Muro en aparejo trabado.

La excesiva flexibilidad ante solicitaciones horizontales de las construcciones nacionales, daños graves y colapso de algunas edificaciones de mampostería debido a la ausencia de tratamientos en el sistema estructural por la ausencia de refuerzo horizontal para resistencia a esfuerzos cortantes hace necesario resaltar que no es conveniente utilizar mampostería no reforzada en zonas sísmicas debido a las catástrofes que este puede causar, ejemplo: daños causados por Sismo de Popayán.

Es innegable que Colombia es uno de los países donde se utiliza de manera más intensa el sistema estructural de pórtico de concreto reforzado, hay que tener en cuenta que a nivel arquitectónico y constructivo es una ventaja, pero tiene inconvenientes importantes debido a su flexibilidad ante solicitaciones horizontales.

En investigaciones anteriores se ha abordado el tema analizando de manera independiente el mecanismo horizontal y el mecanismo vertical. En este trabajo se presenta un avance en los modelos para la estimación de la resistencia sísmica fuera del plano de muros de mampostería no reforzada sometidos al mecanismo de flexión horizontal, o al mecanismo de flexión vertical, o a la combinación de ambos mecanismos cuando sea el caso.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Evaluar la incidencia de los diferentes parámetros (geométricos y mecánicos) en la respuesta última de muros de mampostería.

1.2.2 Objetivos específicos

- Generar y calibrar el modelo numérico en un software de elementos finitos, utilizando la evidencia experimental y numérica disponible en la literatura.
- Realizar un análisis de sensibilidad para la incidencia en la respuesta última de los diferentes parámetros de muros de mampostería.
- Evaluar la capacidad del modelo simplificado de Bielas y Tirantes, para representar la incidencia de los diferentes parámetros evaluados con el modelo numérico en la respuesta última de muros de mampostería.
- Proponer los ajustes necesarios al modelo simplificado de Bielas y Tirantes para mejorar su desempeño.
- Diseñar las campañas experimentales necesarias para aumentar los datos para validación de los resultados obtenidos numéricamente.

CAPITULO 2 ESTADO DEL CONOCIMIENTO

2.1 RESEÑA HISTÓRICA.¹

Los primeros intentos del hombre para protegerse del frío y de los animales, se basaron en una mínima modificación del medio natural. La adecuación de cuevas a cavernas naturales y la confección de chozas rudimentarias con piedras pegadas con barro eran tentativas para lograr una morada estable que no suponía una idea clara de construcción. En las burdas construcciones primitivas los grandes bloques de piedra eran utilizados sin modificaciones sensibles en su estado general. El empleo de unidades de material excesivamente grande, determinó una preponderancia exagerada en la estructura y en consecuencia una manifiesta desproporción entre el volumen del material de cerramiento y el espacio cerrado.

- Las ruinas de Jericó (Medio oriente, 7350 a.c)
- Las pirámides de Egipto (2500 a.c)
- La gran muralla China (200 a.c a 200 d.c)
- Las pirámides de Yucatán en México (500 d.c)
- Las murallas de piedra de Machu Pichu en Perú (1200 a 1400 d.c)

En los últimos años se ha venido utilizando frecuentemente la construcción en mampostería estructural en diferentes ciudades del país para edificios multifamiliares del rango de los 4 y 5 pisos principalmente, ofreciendo ventajas en para cierto tipos de usos.



²Figura 2.1 Muro de Hatunrumiyoc (PERÚ)

¹BONETT DÍAZ, Ricardo León, Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2003.

²<http://peruahora.wordpress.com/category/arqueologia/>

La vivienda es una de las necesidades básicas del hombre, superada en importancia solo por el alimento y el vestido. Colombia presenta un déficit cualitativo y cuantitativo grave en materia de vivienda.

Son numerosas las entidades públicas y privadas que trabajan para mitigar el déficit habitacional, pero se requiere un esfuerzo conjunto formidable de los sectores público, privado y comunitario, si se desea reducir de manera drástica el déficit en calidad y cantidad de viviendas, requeridas para el mejoramiento de la calidad de vida en nuestro país.

El desafío de posibilitar una vivienda digna a cada familia de colombianos, convoca esfuerzos institucionales y financieros. Requiere también desarrollos tecnológicos y metodológicos de construcción, apropiados a nuestros recursos, necesidades y costumbres; requiere capacitación y orientación de la mano de obra abundante en el medio; requiere un gran liderazgo en los diversos sectores involucrados, para canalizar nuestras ventajas y reducir nuestras deficiencias.

La mayor parte de la geografía nacional está ubicada en zonas de gran actividad sísmica que generan requisitos especiales de diseño y construcción y rehabilitación. En nuestras ciudades más pobladas, multitud de viviendas se han desarrollado sin el cumplimiento de los requisitos mínimos constructivos para garantizar un correcto funcionamiento bajo eventos sísmicos o eólicos, debilidad que amenaza el patrimonio y la vida de muchos habitantes.

2.2 MAMPOSTERÍA ESTRUCTURAL.

La mampostería es un material compuesto, no homogéneo e isotrópico, por tres componentes esenciales: las unidades, el mortero y la interfaz, los cuales, dadas sus propiedades particulares y el comportamiento en conjunto, han permitido proyectar y construir estructuras desde épocas remotas hasta la actualidad.

Debido a la influencia en la respuesta que pueden ejercer cada uno de sus componentes, es necesario realizar numerosos ensayos que permitan caracterizar tanto el comportamiento a nivel individual de cada uno de ellos, así como el del material compuesto. Por lo anterior existen grandes limitaciones de los modelos numéricos propuestos ya que hasta el momento hay poca cantidad de datos experimentales con los cuales pueden ser validados

Los métodos de cálculo avanzado (modelos constitutivos de la mecánica del medio continuo) deben ser el pilar sobre el que desarrollar elementos más objetivos de análisis estructural de la mampostería. Los elementos finitos son una herramienta potente en la que apoyar el cálculo de la mampostería pero, debido a

que esta tiene un tamaño pequeño respecto a las dimensiones globales de la estructura, se hacen inviables desde el punto de vista computacional.

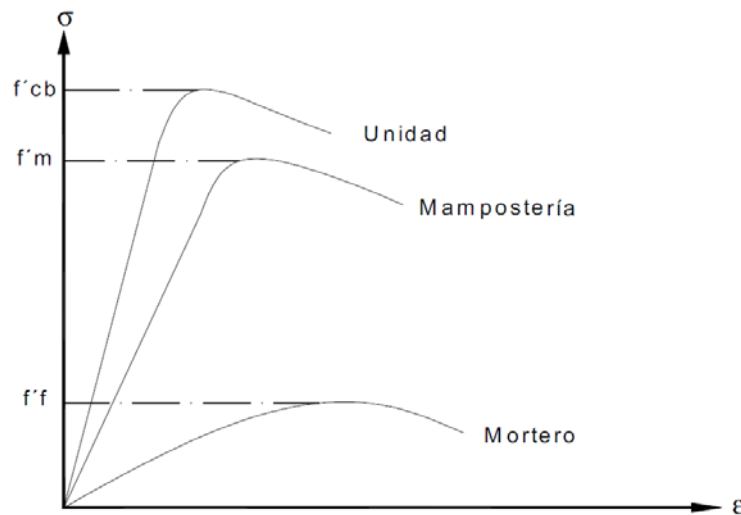
La necesidad de encontrar un método que equilibre sencillez, objetividad rapidez de cálculo es la que motiva el desarrollo de formulaciones con tratamiento al nivel de macromodelo de la mampostería.

En la mayoría de los países latinoamericanos, el proceso de construcción primó en algunos casos la falta de normatividad o por los costos económicos que acarrearía el diseño realizado por un arquitecto o ingeniero. El comportamiento de estas viviendas represento verdaderamente un puente de unión para la realización de métodos de diseño y lógica explicación de la respuesta ultima.

El diagrama de esfuerzo – deformación de la mampostería explica la variabilidad del comportamiento ante cargas cíclicas de la misma, es decir cuando trabaja en el rango elástico, la mampostería puede presentar un comportamiento “excelente” para ese tipo de estructuras y cuando alcanza su valor pico puede colapsar inmediatamente ante esas cargas.

El estudio de su desempeño debe evaluar:

- Capacidad de disipación de energía.
- El agrietamiento inicial.



³Figura 2.2. Relaciones esfuerzo – deformación para mortero, las unidades aisladas y los paneles de mampostería (Paulay y Priestley, 1993).

³Viviescas Álvaro (2009), Modelos simples para el análisis de muros de obra de fábrica cargados en su plano. UPC, Tesis Doctoral.

2.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA MAMPOSTERÍA.

Comportamiento mecánico de la mampostería.

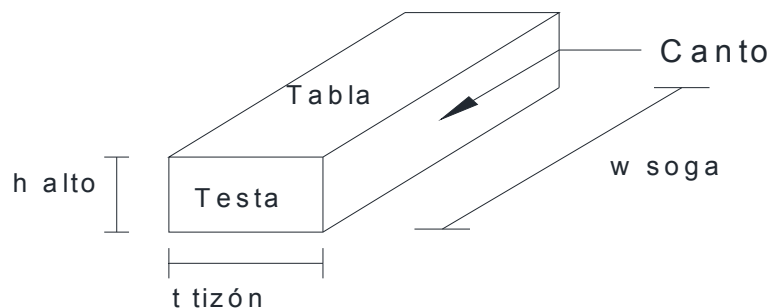
La mampostería estructural es un material que presenta diferentes propiedades en función de la dirección en la que estén orientadas las juntas de mortero. Éstas constituyen planos de debilidad. El fallo de las estructuras de mampostería va precedido generalmente por un desarrollo masivo de fisuración en dichas juntas, por lo que éstas son las limitantes de la capacidad resistente final.

Las propiedades de los materiales son determinadas a partir de ensayos experimentales individualizados de cada una de las partes que conforman la mampostería.

2.3.1 Las unidades.

La geometría y las propiedades mecánicas dependen, fundamentalmente de la naturaleza de la piedra o ladrillo. Las unidades de mampostería que se utilicen en las construcciones de mampostería estructural pueden ser de concreto, cerámica (arcilla cocida), sílico-calcareas o de piedra. Según el tipo de mampostería estructural y según el tipo de refuerzo, las unidades pueden ser de perforación vertical, de perforación horizontal o sólidas, de acuerdo con la posición normal de la pieza en el muro. Las unidades sólidas son aquellas cuyas cavidades ocupan menos de un 25% del volumen de la pieza.⁴

Los ladrillos presentan un comportamiento típico elástico-frágil, pero no necesariamente homogéneo o isótropo.



⁵Figura 2.3 Nomenclatura para las dimensiones y caras de las piezas o unidades (Martínez, 2003).

⁴NSR-10, Título D: Concreto estructural, D.3.6: Unidades de mampostería, D.3.6.1: Tipos de unidades de mampostería. Bogotá D.C Colombia, Marzo 2010.

⁵León Javier, Corres Hugo, Espejo Sergio. Obras de fábrica. Sostenibilidad e Ingeniería. Sevilla (2007).

Las proporciones entre las 3 dimensiones de las piezas son muy variables y dependen del tipo de piedra y uso de la fabricación de los ladrillos. Es típico encontrar que la mayor dimensión en la dirección paralela a las juntas horizontales sea del orden de 3 o 4 veces la altura. El tizón no suele ser menor que el doble de la altura.

Las propiedades mecánicas dependen fundamentalmente de la naturaleza de la unidad, las más importantes a efectos de análisis estructural son la densidad, el módulo de deformación longitudinal y la resistencia a compresión, también se suele determinar directamente la resistencia a flexo-tracción. Hay otras propiedades que a pesar de ser valiosas, su determinación experimental es altamente laboriosa, motivo por el cual no suelen ser evaluadas en todas las campañas realizadas.

2.3.2 El mortero.

El mortero utilizado está compuesto por diferentes combinaciones de cemento, arena y finos. Es usual la fabricación de morteros con menores resistencias que las del ladrillo. El logro de un mortero de alta resistencia no es tan importante como el de la consecución de una unión sólida entre mortero y ladrillo. El mortero presenta un comportamiento no-lineal a nivel tensodeformacional que provoca deformaciones inelásticas significativas en la mampostería. Lenczner (1973) estableció que las deformaciones por deslizamiento en mampostería pueden ser bastante significativas siendo del mismo orden que el crecimiento de fisuración que ocurre cuando cambian los contenidos de humedad.

Los morteros de pega utilizados en construcciones de mampostería deben cumplir la norma NTC 3329 (ASTM C270) y con lo especificado en la Tabla 1., (Según NSR-10, Tabla D.3.4.1). El mortero premezclado para pega de unidades de mampostería debe cumplir con la norma NTC 3356 (ASTM C1142). Los morteros de pega deben tener buena plasticidad, consistencia y ser capaces de retener el agua mínima para la hidratación del cemento y, además. Garantizar su adherencia con las unidades de mampostería para desarrollar su acción cementante.

Es necesario estudiar sus propiedades mecánicas, tales como: peso específico, resistencia a compresión, módulo de deformación longitudinal, coeficiente de Poisson, para poder entender su comportamiento en estado de servicio y en condiciones uniaxiales o de ausencia de coacción lateral.

Mortero tipo	Especificación de los morteros por propiedad ⁽¹⁾			Especificación de los morteros por proporción				
	Resistencia mínima a la Compresión f'_{cp} MPa ⁽²⁾	Flujo en (%) ⁽³⁾	Retención Mínima de Agua	Cemento Portland	Cal hidratada ⁽⁴⁾	Cemento para Mampostería ⁽⁷⁾	Arena/Material Cementante ⁽⁶⁾	
							Mín.	Máx.
H	22.5	115-125	75%	1	0.25	no aplica	2.00	2.5
M	17.5	115-125	75%	1	0.25	no aplica	2.25	3.0
				1	no aplica	1	2.25	2.5
S	12.5	110-120	75%	1	0.25 a 0.50	no aplica	2.50	3.5
				0.5	no aplica	1	2.50	3.0
N ⁽⁶⁾	7.5	105-115	75%	1	0.50 a 1.25	no aplica	3.00	4.5
				0	no aplica	1	3.00	4.0

Tabla 1. Clasificación de los morteros de pega por propiedad o por proporción.⁶

2.3.3 Interfaz entre la unidad y el mortero

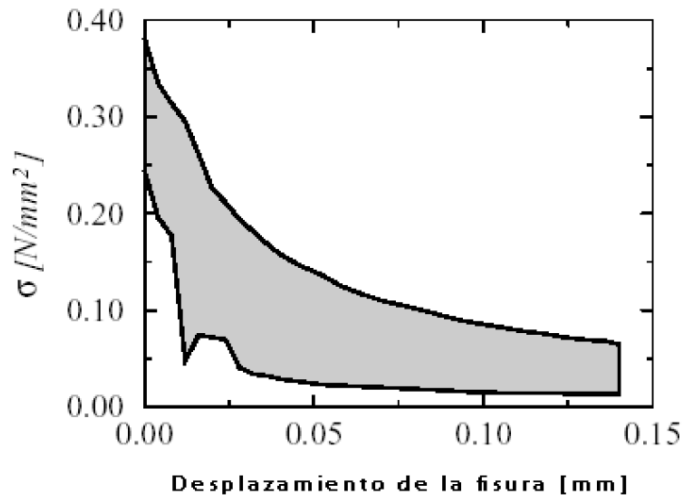
Muchos autores consideran la interfaz entre las unidades y el mortero como una componente más de los muros de mampostería ya que tiene propiedades peculiares y exhibe un comportamiento que condiciona el de la fábrica y debe estudiarse específicamente.

La junta entre la unidad y el mortero es, comúnmente, la junta más débil, esta se ve afectada por diversos factores, entre los que sobresale el contenido de humedad en las unidades en el momento de su colocación y el índice de succión de estas. Si las unidades se colocan con un contenido de humedad próximo de absorción la adherencia cae a cero.

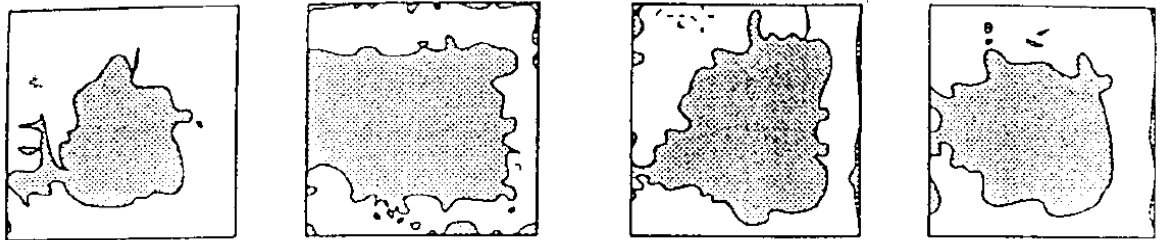
Al tener un comportamiento no lineal de las juntas, que es controlada por la interfaz unidad-modelo, es una de las características más relevantes de dicho comportamiento en la mampostería. Dos diferentes fenómenos aparecen en la interfaz unidad-mortero, uno asociado con la falla por la tracción y otro asociado con la falla a cortante.

⁶SR-10, Título D: Concreto estructural, D.3.4: Mortero estructural, D.3.4.1: Requisitos generales, Tabla D.3.4.1. Bogotá D.C Colombia, Marzo 2010.

2.3.3.1 Modo de falla por tracción. Van der Pluijijm, en 1992, realizó ensayos de deformación controlada en pequeñas probetas de mampostería. A través de estos ensayos se obtuvo una curva asociada al comportamiento a tracción con una forma similar a una exponencial descendente. Igualmente, se obtuvieron valores para la energía de fractura G_f relacionados a este modo de falla en un rango entre 0.005 a 0.002 (N-mm/mm²) para valores de resistencia a tracción del razón de 0.3 a 0.9 (N/mm²), acorde al tipo de junta.⁷



⁸Figura 2.4. Curva experimental tensión-desplazamiento de fisura.



⁹Figura 2.5. Típicas superficies de unión.

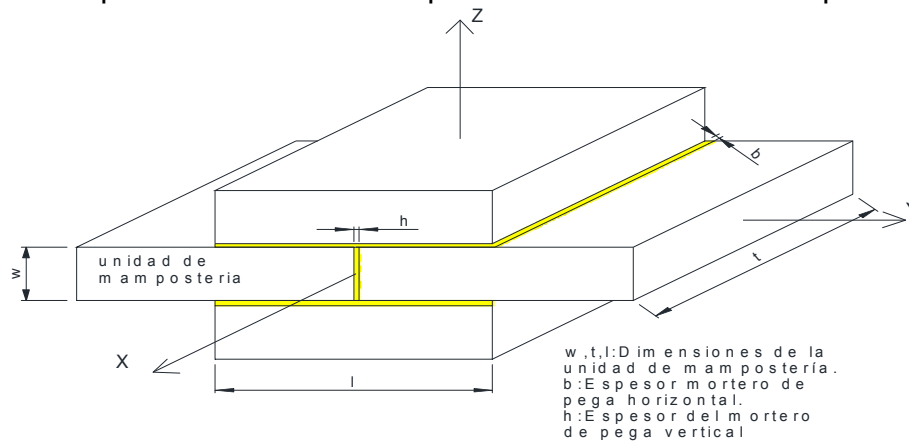
⁷LOPEZ, S. Oller, E. Oñate, Calculo del comportamiento de la mampostería mediante elementos finitos. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 1998D

⁸J. Lopez, S. Oller, E. Oñate. Calculo del Comportamiento de la Mampostería Mediante Elementos Finitos. UPC. (1998).

⁹J. Lopez, S. Oller, E. Oñate. Calculo del Comportamiento de la Mampostería Mediante Elementos Finitos. UPC. (1998).

2.3.3.2 Modo de falla a cortante. Un aspecto importante en la determinación de la respuesta a cortante de las juntas en mampostería es la capacidad de generar estados uniformes de tensión en las juntas. Existe la dificultad en la obtención de este objetivo debido a que las restricciones de introducen estados no uniformes de tensiones normales en la junta.

2.3.4 Comportamiento de la mampostería como material compuesto.



¹⁰Figura 2.6. Unidad básica de un muro de mampostería.

El comportamiento uniáxial del material compuesto es descrito con respecto a los ejes del material conocidas las dos direcciones paralelas y normal a la orientación de las juntas.

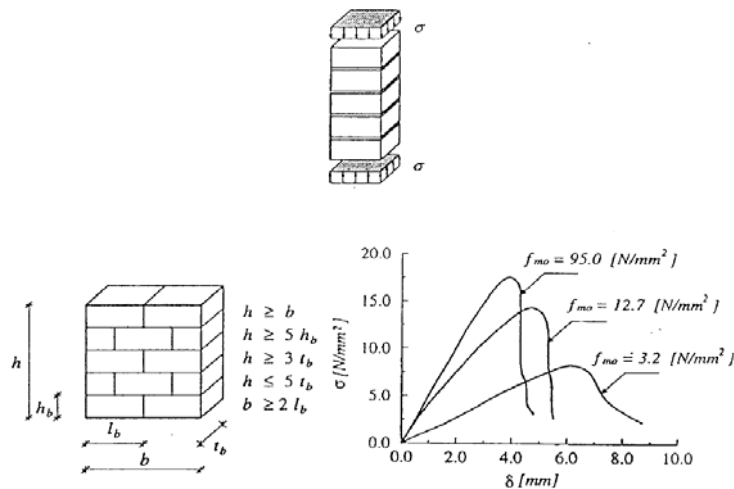
2.3.4.1 Comportamiento de la mampostería en compresión uniáxial. En el hecho resistente conjunto de piezas y mortero se produce un interesante fenómeno de “solidaridad” entre materiales: la mampostería no resiste tanto como lo haría si fuera monolítica, sin juntas, de una sola pieza de piedra o ladrillo. Tampoco resiste como lo haría si fuera de mortero, sino que la resistencia del conjunto es un valor intermedio entre ambos.

La resistencia a compresión de la mampostería en la dirección normal a la junta ha sido usualmente vista como una propiedad notable del material, eso hasta la nueva introducción de los métodos numérico a las estructuras de mampostería. Un ensayo frecuente usado para obtener esta resistencia a compresión uniáxial es el ensayo de prisma con elementos apilados (Fig. 8). El ensayo que es aceptado para la determinación de la resistencia a compresión uniáxial de la mampostería en dirección normal a las juntas de mortero es el que se obtiene a partir de los ensayos RILEM (Wesche y Ilanzis, 1980), este se puede visualizar en la figura 2.7. La compresión uniáxial de la mampostería conduce a un estado triaxial de

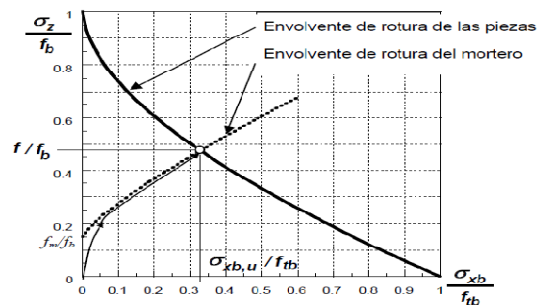
¹⁰Jaramillo Juan, Morales Marcela, Hincapié Gonzalo. Respuesta Sísmica de muros de mampostería no reforzada sometidos a aceleraciones perpendiculares a su plano. Universidad EAFIT. (2008).

compresión en el mortero y a una compresión-tracción en el ladrillo. Según las observaciones hechas por Mann y Betzler (1994), indicaron que inicialmente aparecían las fisuras verticales en los ladrillos a lo largo de la línea media de las piezas coincidiendo usualmente con la continuación de las juntas verticales de mortero.

¹¹Figura 2.7. Comportamiento uniáxial de la mampostería bajo carga normal al plano de las juntas horizontales. (a). Columna de unidades y mortero. (b). Probeta para ensayo RILEM (c). Diagrama tensión – deformación para diferentes valores de la resistencia del mortero.



La figura 2.8 muestra de manera compacta el resultado de esa interacción, en la que básicamente las piezas aportan un confinamiento al mortero que ve así aumentada su resistencia en la medida en que aumenta el confinamiento. Por razones de equilibrio en el comportamiento transversal, las piezas están traccionadas, dando lugar a resistencias más reducidas que si estuvieran solicitadas a compresión uniáxial.



¹²Figura 2.8. Estado tensional en la unidad y en el mortero en la mampostería sometida a esfuerzos de compresión

¹¹J. Lopez, S. Oller, E. Oñate. Calculo del Comportamiento de la Mampostería Mediante Elementos Finitos. UPC. (1998).

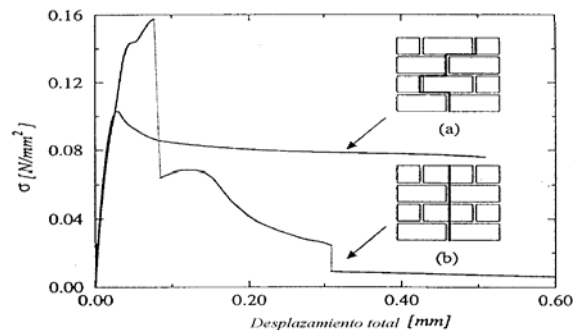
¹²León Javier, Corres Hugo, Espejo Sergio. Obras de fábrica. Sostenibilidad e Ingeniería. Sevilla (2007).

2.3.4.2 Comportamiento de la mampostería en tracción uniáxial. Para cargas a tracción en sentido perpendicular a las juntas de mortero, el colapso es causado por una bajada en la resistencia a tracción relativa en la interfase mortero-ladrillo. En una aproximación no rigurosa, la resistencia a tracción de la mampostería se puede equipara a la resistencia a tracción de la unión entre la junta y el ladrillo.

En mampostería con baja resistencia de los ladrillos y gran resistencia a tracción de la unión entre la junta y el ladrillo, por ejemplo, mortero de alta resistencia y ladrillo con numerosas perforaciones, el fallo ocurre como resultado de la superación por parte de las tensiones de la resistencia a tracción del ladrillo. Como aproximación a la resistencia a tracción de la mampostería se toma la resistencia a tracción del ladrillo.

A partir de ensayos realizados se han observado dos diferentes mecanismos de rotura en paneles ensayados a tracción paralelos a la junta. Cuando un muro de cortante en mampostería se encuentra sometido a un nivel de pre compresión significativamente alta, la resistencia a tracción de las unidades se convierte en una propiedad importante ya que el fallo del muro se produce por fisuración de las unidades debido al cortante y los esfuerzos de compresión aplicados que generan tensiones de tracción principales que alcanzan con mayor rapidez la resistencia a tracción que al valor de la fricción. Por tal motivo es de gran importancia realizar ensayos para evaluar la incidencia de la resistencia a tracción uniáxial de la mampostería.

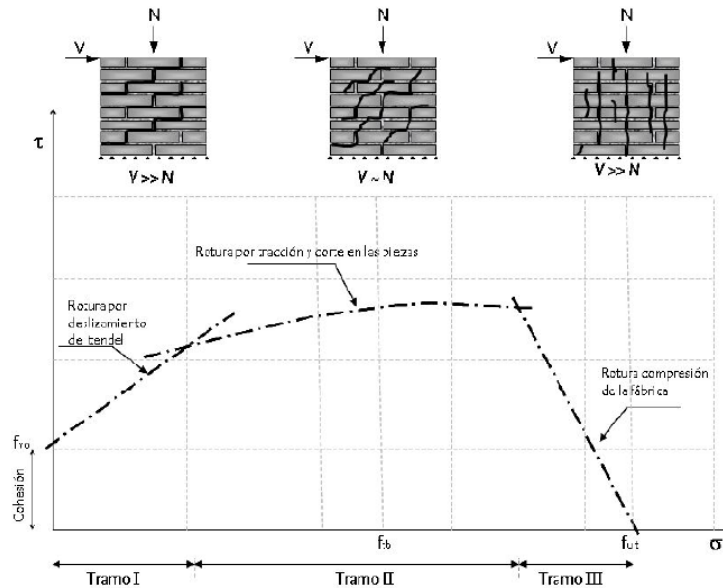
A partir de ensayos realizados se han observado dos diferentes mecanismos de rotura en las probetas ensayadas a tracción paralelas a la junta. El primero falla por desarrollo de fisuración en las juntas verticales y horizontales y en forma de zigzag. El segundo se presenta como una fisura perpendicular a la fuerza de tracción y que aparece siguiendo las juntas verticales de mortero y atravesando los ladrillos.



¹³Figura 2.9. Curvas experimentales tensión- desplazamiento para tracción en dirección paralela a las juntas horizontales de mortero. (a) el fallo ocurre por fisuración escalonada paralela a las juntas; (b) el fallo ocurre verticalmente a lo largo de juntas y ladri-juntas. (Backes, 1985)

¹³J. Lopez, S. Oller, E. Oñate. Calculo del Comportamiento de la Mampostería Mediante Elementos Finitos. UPC. (1998).

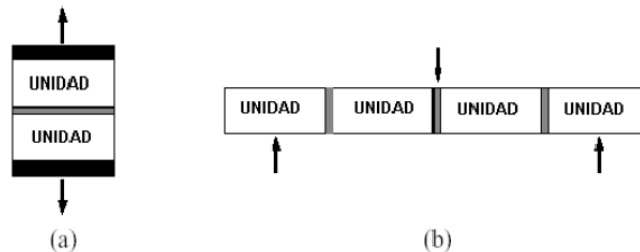
Frente a solicitaciones compuestas de axial y tangencial, las cosas se complican notablemente, dando lugar a diferentes modo de fallo, recogidos en la envolvente de rotura de Mann-Müller (figura 2.10), rotura de interfaz; rotura por generación de estados de tracción y corte en las piezas; y rotura por compresión de la mampostería. Figura 2.10.



¹⁴Figura 2.10. Envolvente de rotura propuesta por Mann y Müller.

Jukes y Riddinton (1988) dividen en dos grupos los ensayos disponibles para determinar la resistencia a tracción de la interfase: ensayos de resistencia a tracción directa y ensayos de resistencia a flexión.

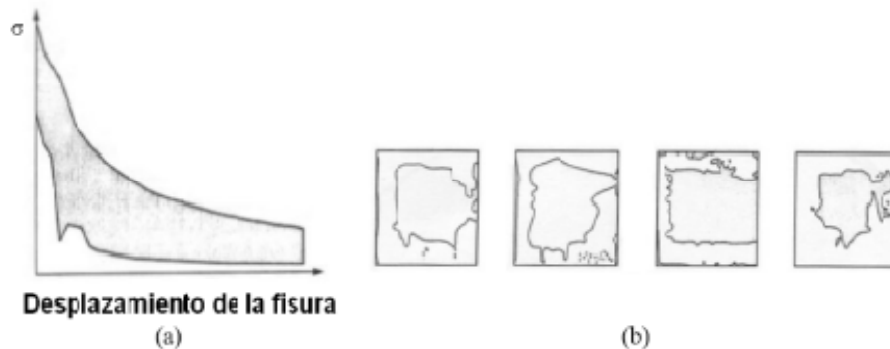
¹⁵Figura 2.11. Propuestas para evaluar la resistencia de la interfase: (a) resistencia a tracción directa de la interfase; (b) resistencia a flexión de la interfase. Jukes y Riddinton (1998).



¹⁴León Javier, Corres Hugo, Espejo Sergio. Obras de fábrica. Sostenibilidad e Ingeniería. Sevilla (2007).

¹⁵Viviescas Álvaro (2009), Modelos simples para el análisis de muros de obra de fábrica cargados en su plano. UPC, Tesis Doctoral.

Pluijim (1992) realizó ensayos de tracción directa sobre probetas de obra de fábrica formadas por unidades solidas de arcilla y silicato-cálcico. Aplicando carga monotónica bajo control de desplazamientos. Como resultado se observó que las probetas fisuradas poseían un área de contacto más pequeña que el área de su sección transversal, ver figura 2.12. Esta área de contacto se encontraba concentrada en el interior de la probeta, quizás, como consecuencia del efecto de asentamiento del mortero en su fase plástica y su retracción.



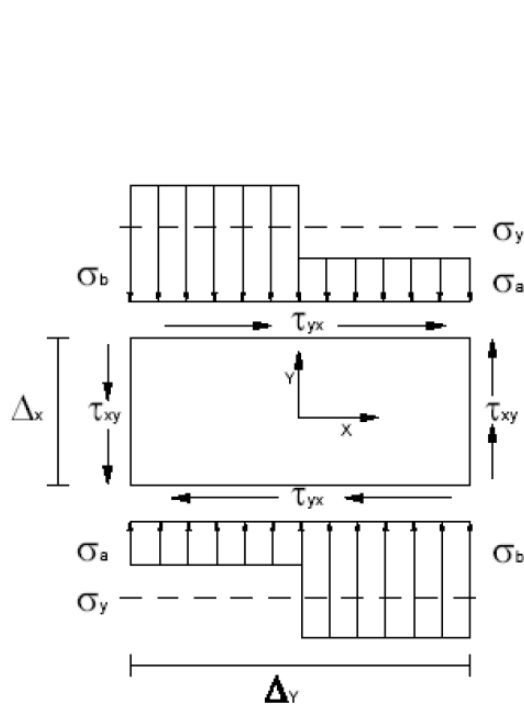
¹⁶Figura 2.12. Ensayos de tracción directa: (a) diagrama experimental tensiones de tracción-desplazamiento de la fisura, representado en forma de envolvente; (b) áreas netas de unión a tracción. Pluijim (1992), Oliveira (2003).

2.4 ANALISIS DE MUROS EN MAMPOSTERIA

2.4.1 Modelos Numéricos.

Mann y Müller (1982) desarrollaron una teoría para el análisis de fallo de muros de cortante que tiene la incidencia de factores como la resistencia de la unidad, su forma, tipo de mortero, coeficientes de fricción y cohesión, sometidos a condiciones variables de carga y cortante aplicado. Para desarrollar su teoría analizan un elemento diferencial extraído del muro de cortante (figura 2.13.), en el cual las tensiones en dirección vertical (σ_y) y en todo el contorno las tensiones de cortante ($\tau = \tau_{xy} = \tau_{yx}$). Las tensiones de compresión horizontal (σ_x) fueron ignoradas. Su teoría preside bajo que combinación de tensiones (σ_y, τ) puede ocurrir a rotura. Asumió que las juntas verticales eran incapaces de transmitir tensiones de corte (τ), dada la imposibilidad de garantizarse en ellas un relleno adecuado o como consecuencia de la retracción, produciéndose de esta forma ausencia de fricción.

¹⁶



¹⁷Figura 2.13. Tensiones sobre un elemento sometido a cortante – Mann y Müller (1982), Charry (2009)

Por otra parte, las tensiones de corte (τ) presentes en las juntas horizontales producen en cada unidad de la mampostería una torsión que solo puede ser equilibrada con un par de fuerzas verticales, generando que una mitad de la unidad este sometida a grandes tensiones σ_1 y la otra a tensiones más bajas σ_2 . Para demostrar estas hipótesis Mann y Müller crearon un modelo con juntas muy blandas denominado modelo con juntas de espuma de goma donde se evidenciaban las deformaciones por ellos planteadas. Figura 2.14.



¹⁸Figura 2.14. Modelo con juntas de espuma de goma - Mann y Müller (1982)

La envolvente de rotura propuesta por Mann y Müller, se compone de varios aspectos que dependen de la relación σ_y/τ . Esta representa el fallo por fricción de la junta horizontal que se sucede en la mitad de la unidad sometida a menores

¹⁷Viviescas Álvaro (2009), Modelos simples para el análisis de muros de obra de fábrica cargados en su plano. UPC, Tesis Doctoral.

¹⁸Viviescas Álvaro (2009), Modelos simples para el análisis de muros de obra de fábrica cargados en su plano. UPC, Tesis Doctoral.

tensiones, en la cual para su obtención se debe considerar una fricción y cohesión reducidas, para tener en cuenta el hecho de los diferentes estados de tensión en la unidad descrito.

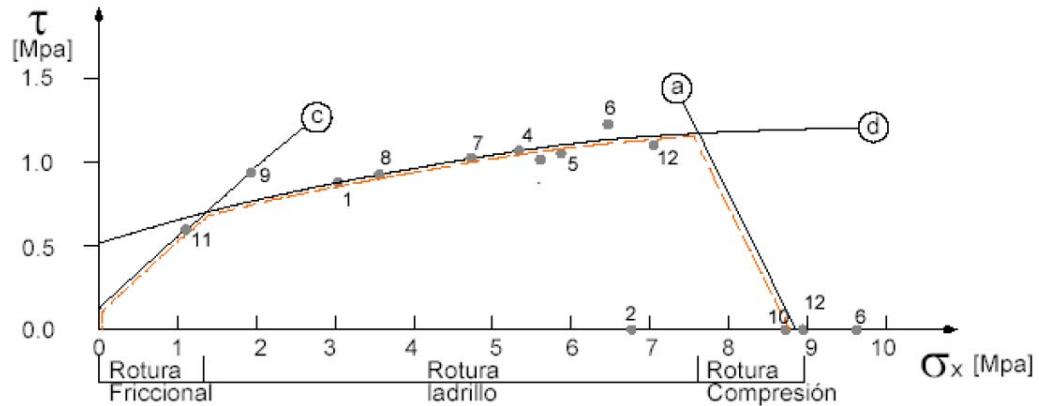


Figura 2.15. Envolvente de rotura para los ensayos de Darmstadt – Mann y Müller (1982), (Charry 2009.)

2.4.2 Modelo de fricción

Debido al gran interés despertado en los últimos años en la comunidad científica por lograr un mejor entendimiento del comportamiento mecánico de la mampostería diferentes estados de carga se han ido aplicando teóricas o modelos provenientes muchas veces de otros campos, pero que debido a similitudes de comportamiento, se han podido utilizar en esta área de una forma eficiente y satisfactoria.

2.4.2.1 Ley de coulomb. Para materiales tales como suelos y rocas, los efectos fricciónales y dilatantes son significantes. Los modelos de flujo asociado no son apropiados para estos materiales. En su lugar, funciones de fluencia han sido desarrolladas para representar el comportamiento de materiales fricciónales. En estos materiales, el comportamiento plástico depende de la presión, a diferencia de lo que sucede a la plasticidad de Von Mises. Además, para materiales fricciónales, leyes de plasticidad asociada son a menudo inapropiadas, Belytschko et al (2000).

En el modelo básico de fricción de Coulomb, dos superficies en contacto pueden soportar tensiones de corte hasta una cierta magnitud a través de su interfase antes de que ellas inicien un deslizamiento relativo de una respecto de la otra. El estado es conocido como unión (“sticking”). El modelo de fricción de Coulomb será definido como:

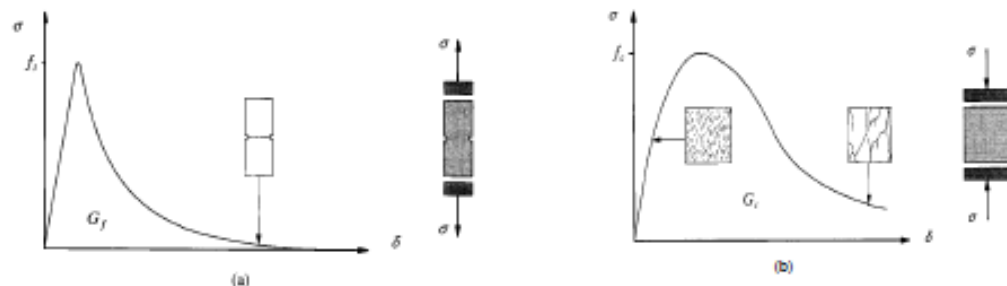
$$\tau_{lim} = \mu P + b, \text{ y } |\tau| \leq \tau_{lim}$$

Adicionalmente en los programas de cálculo que utilizan la técnica de los elementos finitos, caso del ANSYS, se permite opcionalmente definir un valor máximo de tensiones de corte equivalentes, de tal forma que sin importar la magnitud de la presión de contacto, el deslizamiento debe ocurrir si la magnitud de las tensiones de corte equivalentes alcanza este valor.

2.4.2 Características básicas de un material cuasifrágil.

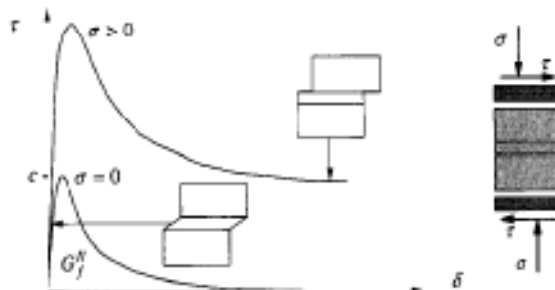
Los materiales cuasifrágiles son aquellos materiales como el hormigón hiel, materiales cerámicos, huesos, rocas, etc., que muy a pesar de tener una composición diferente, presentan un comportamiento mecánico similar bajo estados de carga. Este comportamiento se encuentra muy influenciado por la heterogeneidad del material debida a la presencia de diferentes fases y defectos materiales, como microfisuras y vacios (Lourenço, 1996).

Esta heterogeneidad que presentan los materiales cuasifrágiles da lugar a un comportamiento mecánico diferente denominado “reblandecimiento”, consistente en una disminución gradual de su resistencia mecánica bajo un aumento continuo de la deformación. Este fenómeno es la manifestación resistente de toda una serie de procesos internos.



¹⁹Figura 2.16 Comportamiento típico de los materiales cuasifrágiles bajo carga uniaxial.

(a) carga a tracción, (b) carga a compresión.



²⁰Figura 2.17. Comportamiento de la mampostería bajo precompresión y corte.

¹⁹Viviescas Álvaro (2009), Modelos simples para el análisis de muros de obra de fábrica cargados en su plano. UPC, Tesis Doctoral.

El fenómeno ha sido identificado en el caso de la fallo a tracción, Hordijk (1991), ver figura 2.16. (a). Para el fallo a cortante, el proceso de reblandecimiento también se puede observar como una degradación de la cohesión en los modelos friccionales de Coulomb. Este fallo por cortante representa uno de los tipos mecanismos de fallo más típicos en la mampostería, el cual consiste de deslizamiento de la interfase unidad- mortero bajo carga de cortante. Se puede asumir que el comportamiento inelástico en cortante puede ser descrito por la energía de fractura en modo II. Cuando el fallo se produce a compresión, el reblandecimiento tiene gran dependencia de las condiciones de contorno y del tamaño de la muestra ensayada.

2.5 MÉTODOS DE CÁLCULO²¹

Si bien es cierto que las formas de cálculo utilizando como herramienta el método de elementos finitos no es el único es importante resaltar que este en sus resultados refleja un comportamiento más real. Una forma de calcular la mampostería es también discretizando la mampostería con modelos aproximados, donde el ladrillo se discretiza mediante una barra mientras que las juntas de mortero están representadas por soportes elásticos en extremo de barra.

La mampostería es una material que presenta direccionalidad en sus propiedades debido a que las juntas del mortero actúan como planos de debilidad en el material. La aproximación hacia una modelización numérica puede ser orientada con MICROMODELOS, los cuales discretizan de forma detallada y separada ladrillos y juntas de contacto. Alternativamente, y con fines de simplificación existe la posibilidad de realizar un MACROMODELO donde se trata a la mampostería como un material compuesto.

Ahora bien, dependiendo del nivel de detalle deseado es posible utilizar las siguientes formas de modelización:

- Micromodelización detallada: Ladrillos y morteros son representados por elementos elástica, mientras que la discontinuidad generada por la interfase mortero-ladrillo es representada por elementos junta (inelásticos).
- Micromodelización simplificada: Las unidades (ladrillos) se expanden ficticiamente para ocupar el espacio del mortero, esto se representan con elementos elásticos y las juntas de contacto unidad-mortero, al igual que para el

20

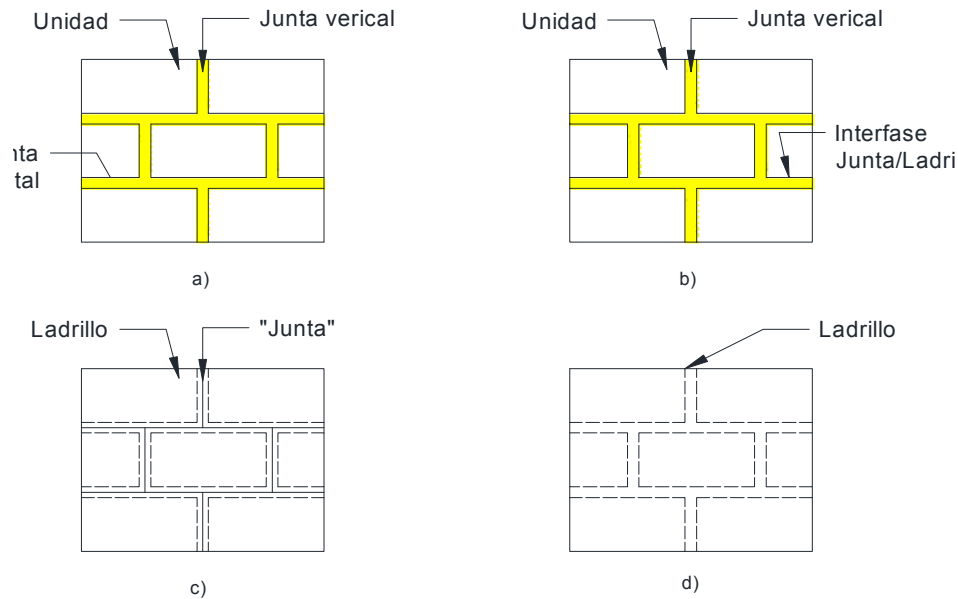
²¹LOPEZ, S. Oller, E. Oñate, Calculo del comportamiento de la mampostería mediante elementos finitos. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 1998D.

caso anterior, se representa por elementos lineales de interfase los que aumentan la no linealidad de la mampostería.

- **Macromodelización:** Los ladrillos, mortero e interfase están representados por un mismo elemento. Una herramienta útil para obtener un modelo continuo de la mampostería es la homogeneización.

En una primera aproximación, el modulo de Young, el coeficiente de Poisson y, opcionalmente, las propiedades inelásticas de ambos materiales se han de tener en cuenta para cualquier tipo de modelo que se utilice.

Esto produce la acción combinada de ladrillo, mortero e interfase. Como segunda aproximación, cada junta consiste en mortero y dos interfases, se unen en una interfase que recoge estos tres elementos para simplificar el problema sin cambiar la geometría. La mampostería es considerada como un conjunto de bloques elásticos separados por superficies potenciales de fractura en las juntas.



²²Figura 2.18. Diferentes estrategias de modelización de la mampostería: (a) Mampostería simple, (b) Micromodelo, (c) Micromodelo simplificado, (d) Macromodelo.

La precisión se pierde en el momento que el efecto Poisson del mortero no es incluido. La tercera aproximación no hace distinción entre ladrillos individuales y juntas, ya que trata la mampostería como un continuo homogéneo y anisótropo.

²²J. Lopez, S. Oller, E. Oñate. Calculo del Comportamiento de la Mampostería Mediante Elementos Finitos. UPC. (1998).

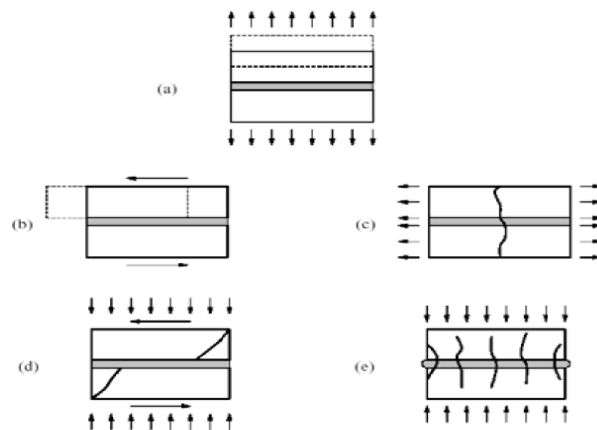
Una de estas estrategias de modelización no puede ser preferible por encima de otras, ya que el campo de aplicación es diferente para el caso de micromodelos que para el de macromodelos.

La precisión de los micromodelos y los macromodelos de estructuras de mampostería exigen una descripción de los materiales a través de experimentación. Sin embargo, las propiedades de la mampostería están influidas por un gran número de factores como las propiedades de las unidades de mortero, la calidad de la mano de obra, el grado de curado, desarrollo y edad. Debido a estos factores, la utilización de modelos numéricos como contraposición a los ensayos experimentales tiene un gran interés. De todas maneras, la obtención de los parámetros debe ser por lo general determinada a partir de ensayos experimentales para posteriormente introducirlos como datos en los modelos numéricos.

2.5.1 Micromodelamiento

Esta herramienta es quizás la mejor para entender el comportamiento de la mampostería. El provecho de su utilización como aproximación es la posibilidad de consideración de diferentes mecanismos de falla, por una parte una falla consiste en la consideración de fisuración por corte y otro, un mecanismo de fractura por compresión esto basándose en la consideración de las superficies de fluencia de MOHR-COULOMB. El considerar estos fenómenos inelásticos es necesario tenerlos en cuenta en la interfase entre elementos, siendo una gran herramienta de trabajo para considerar en los micromodelos.

Un modelo bien discretizado debe incluir todos los tipos básicos de mecanismos de falla que es característico de la mampostería. (ver Figura 2.19.)

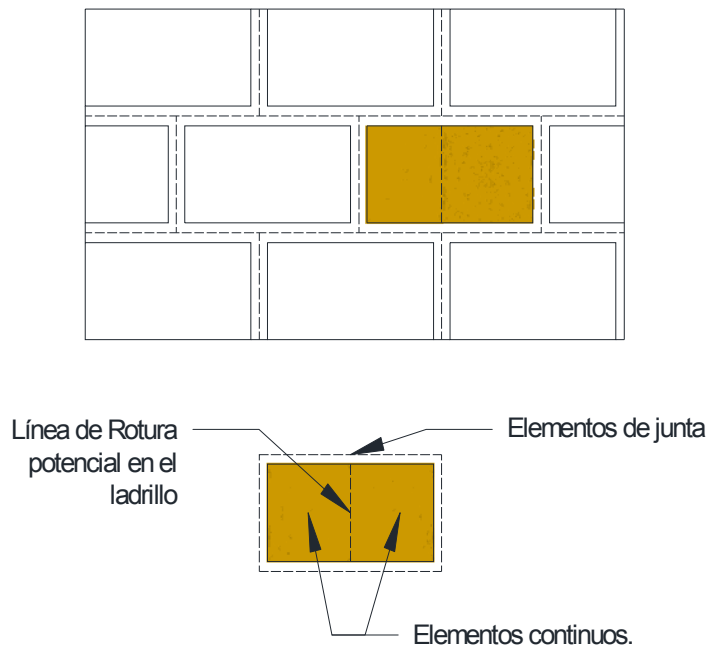


²³Figura 2.19. Mecanismo de falla de la mampostería: (a) Fisuración por tracción; (b) Deslizamiento por junta; (c) Fisuración del ladrillo por tracción directa; (d) Fisuración diagonal del ladrillo por tracción; (e) Fisuración por "Masonry crushing"

²³Viviescas Álvaro (2009), Modelos simples para el análisis de muros de obra de fábrica cargados en su plano. UPC, Tesis Doctoral.

En los primeros dos casos, el mecanismo se produce en las juntas; en el tercero se produce en el ladrillo, en el cuarto y quinto, el mecanismo es combinado involucrando tanto a juntas como a ladrillos. La aproximación seguida en los micromodelos se hace concentrando todo el daño en un espesor relativo de las juntas, y si es necesario, en el caso de tracción, se concentra la fisuración en una zona vertical en el medio ladrillo.

Esta fisuración potencial en los ladrillos es capaz de reproducirse como un salto desde el límite de una junta hasta la siguiente, inmediatamente por encima y por debajo de la primera. (Ver figura 2.20)



²⁴Figura 2.20. Modelo adoptado.

2.5.2 Macromodelamiento

Debido a la necesidad de analizar estructuras a gran escala se ha implementado esta técnica que considera a la mampostería como un compuesto anisótropo homogéneo, utilizando tensiones y deformaciones medias para describir el comportamiento. Esta técnica no establece distinción entre los componentes de mampostería (ladrillos, mortero e interfase) por lo tanto es aplicable para estructuras grandes ya que mantiene un estado uniforme de tensiones, ya que no se requiere un mayor refinamiento en las mallas de elementos finitos y de la

²⁴J. Lopez, S. Oller, E. Oñate. Calculo del Comportamiento de la Mampostería Mediante Elementos Finitos. UPC. (1998).

misma manera un menor tiempo de cálculo y capacidad de procesamiento para su final solución.

2.6 DATOS EXPERIMENTALES PARA VALIDACION

Se tiene en cuenta una serie de campañas experimentales hechas para el estudio del comportamiento mecánico de la mampostería, las cuales están disponibles en la literatura, que se tienen en cuenta para la calibración y validación del modelo numérico a utilizar.

2.6.1 Ensayos sobre paneles con juntas de mortero.

En este tipo de ensayo se encuentran varios análisis que han realizado, por lo tanto el numero de campañas es suficiente para realizar un análisis satisfactorio.

2.6.1.1 Campaña experimental de Charry (2009). Charry (2009), como parte de su tesis doctoral, realizó un extenso trabajo experimental en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras de la UPC sobre paneles de mampostería a escala real y reducida, variando las condiciones de contorno en el extremo superior de los muros: giro libre o impedido.

Las diferentes campañas realizadas como parte de este trabajo experimental, todas bajo carga biaxial, aparecen referenciadas por el autor como:

- Campaña experimental I: se evaluaron 10 muros 1:1 con giro superior libre
- Campaña experimental II: comprendió 17 muros 1:4 con giro superior impedido
- Campaña experimental III: realizada sobre 15 muros 1:4 con giro superior libre
- Campaña experimental IV: realizada sobre 10 muros 1:4 con giro superior libre(dimensiones variables).
- Campaña experimental V: realizada sobre 5 muros 1:4 con giro superior libre y junta seca.

La figura 2.21 muestra la geometría de los muros y el mecanismo de aplicación de la carga.

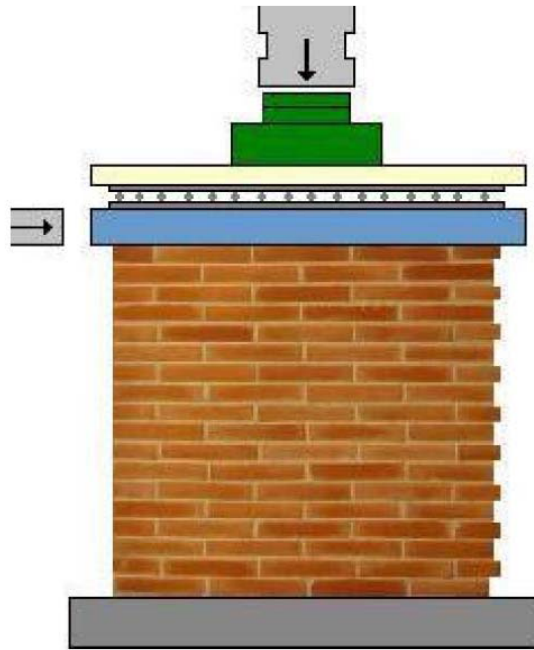


Figura 2.21. Geometría de los muros y esquema de la distribución de carga aplicada, (Charry, 2009).

Los muros para las campañas a escala real eran de 1200x1000 mm y estaban formados por 16 hiladas de ladrillos macizos con dimensiones 290x50x140 mm y juntas tanto verticales como horizontales de espesor aproximado 10 mm. Para el caso de muros a escala reducida, se utilizaron 17 paneles con dimensiones 300x255x35 mm.

V(kN)	H(kN)
150	80
250	110
250	114
400	134
400	143
500	185
509	191
650	207
800	243
997	186

Tabla 2. Campaña experimental I, cargas de rotura.

V(kN)	H(kN)
3	2.64
6	4.48
9.4	5.44
15.6	9.88
25	16.21
31.3	17.73
31.3	18.07
40.6	18.63
50	20.99
50	21.66
62.5	27.13
75	36.56
90	32.61
95	30.07
105	24.5
115	7.52
121.3	0

Tabla 3. Campaña experimental II, cargas de rotura.

V(kN)	H(kN)
9	5
12	6
15	8
20	10
25	12
28	14
31	15
35	16
40	17
45	18
50	19
56	20
62	21
95	22

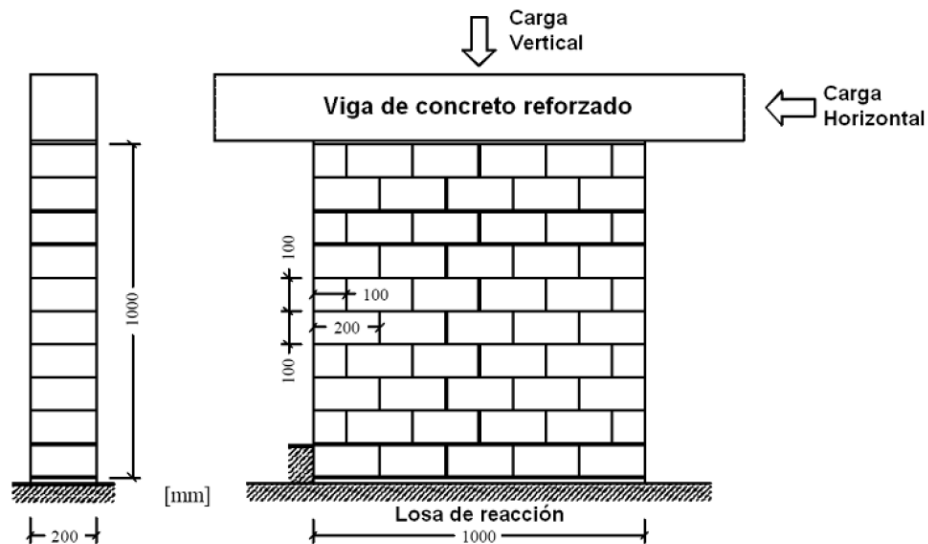
Tabla 4. Campaña experimental III, cargas de rotura.

2.6.2 Ensayos sobre paneles con juntas seca.

Existe poca información experimental relativa a este tipo de configuración de paneles. No obstante la presencia en construcciones históricas de este tipo de junta es amplio, ya que algunas se construyeron siguiendo este mecanismo y para las que se construyeron con junta de mortero, los procesos de degradación a través del tiempo en el material ligante o el deficiente llenado de juntas en la construcción hace que su comportamiento sea prácticamente como muros con junta seca, esto se debe a que es prácticamente inexistente un aporte considerable en el mecanismo de resistencia.

2.6.2.1 Campaña experimental de Oliveira (2003). Se realizó una campaña experimental sobre siete muros de bloques de piedra con junta seca (sin material ligante) que fueron ensayados bajo la acción combinada de cargas de compresión y corte. La aplicación de la carga fue monotonica (Oliveira, 2003 y Lourenço et al, 2005).

Los muros a ensayar presentaban la geometría de la figura 2.22. Todos fueron mecánicamente cortados y mostraban una superficie lisa.



²⁵Figura 2.22. Geometría de los muros de junta seca y esquema de distribución de carga, (Oliveira 2003)

Para diferenciar los muros, se tomo en cuenta la carga vertical que se aplico en la fase inicial (tabla 5). Se muestran los valores de las tensiones de compresión generada por cada una de las cargas aplicadas del mismo modo la máxima carga horizontal resistida. En valores altos de carga vertical (200 y 250 KN) se evidenció

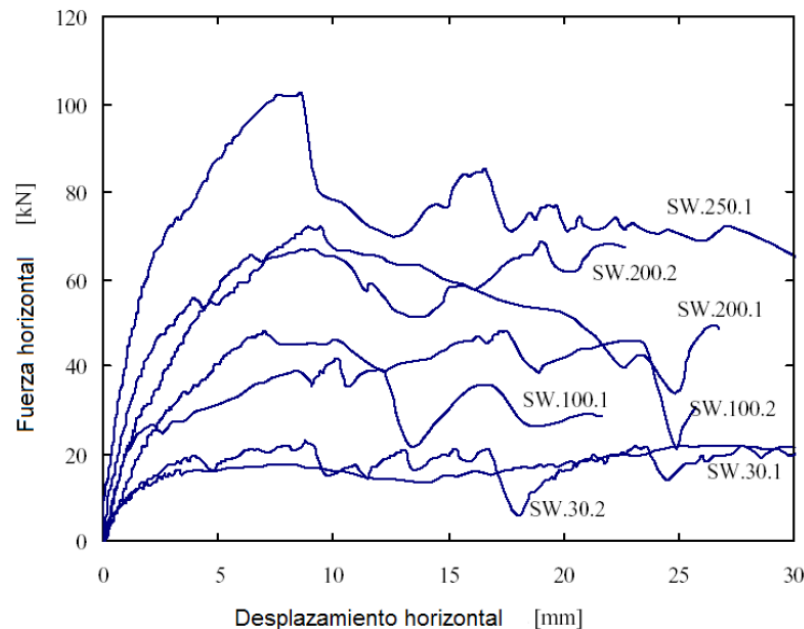
²⁵Viviescas Álvaro (2009), Modelos simples para el análisis de muros de obra de fábrica cargados en su plano. UPC, Tesis Doctoral.

el riesgo del pandeo lateral, el cual incluso se presentó en un ensayo de la campaña no registrado por Oliveira en los resultados.

Muro	Carga vertical [kN]	Tensiones de compresión [MPa]	Máxima carga horizontal [kN]
SW.30.1	30	0.15	22
SW.30.2	30	0.15	23
SW.100.1	100	0.50	42
SW.100.2	100	0.50	49
SW.200.1	200	1.00	72
SW.200.2	200	1.00	69
SW.250.1	250	1.25	102

Tabla 5. Muros ensayados. Carga vertical aplicada y horizontal resistida.

En su fase inicial de carga, los muros presentan gran rigidez, se observó un comportamiento elástico casi hasta un 30% de la respectiva carga máxima, luego se presenta una continua degradación de la rigidez bajo incrementos de desplazamiento horizontal. La segunda parte está caracterizada por oscilaciones de carga horizontal.



²⁶Figura 2.23. Diagramas carga – desplazamiento horizontal para los muros ensayados.

²⁶Viviescas Álvaro (2009), Modelos simples para el análisis de muros de obra de fábrica cargados en su plano. UPC, Tesis Doctoral.

Los movimientos repentinos de los bloques de piedra originaron esas oscilaciones, debido a la ausencia de un material ligante entre ellos. Para posteriores incrementos de desplazamiento, ocurrió un incremento de carga hasta que una próxima disminución de carga.

CAPITULO 3 MODELOS DE BIELAS Y TIRANTES

3.1 INTRODUCCION

A continuación presentamos una serie de propuestas basadas en el método de las bielas y tirantes, que nos permitirá obtener con mayor rapidez la respuesta última de muros de mampostería bajo cargas verticales de compresión y horizontales de corte.

Los modelos de bielas y tirantes se han utilizado generalmente para modelar la condición última del hormigón reforzado, ver Schlaich et al. (1987). Por tal motivo se utilizan las bielas que representan los campos de tensiones de compresión y los tirantes que representan las barras de refuerzo.

Se parte de las propuestas planteadas por Roca (2006) y Viviescas (2009). Se desarrolló el trabajo de investigación aquí presentado, orientado a estudiar su validez mediante la utilización de técnicas numéricas avanzadas como el micromodelamiento numérico. El desarrollo de la investigación y los diferentes resultados obtenidos se presentan en los capítulos siguientes del documento.

3.2 DESCRIPCION BASICA DE LOS MODELOS²⁷.

Los modelos propuestos están basados en las siguientes consideraciones:

- Los modelos deben ser tan sencillos como sea posible, para así proveer enfoques prácticos y eficientes.
- Las bielas utilizadas en un modelo describen campos de compresión cubriendo un cierto volumen, ver figura 3.1.
- Las cargas parciales o concentradas aplicadas sobre el muro, así como las reacciones concentradas que se generan, causarán que los campos de compresión experimenten un efecto de cuello de botella, descrito mediante un mecanismo combinado, formado por un mínimo de dos bielas que se abren con un tirante balanceador, figura 3.1.
- La pendiente máxima de una biela con respecto a la vertical está limitada por la respuesta friccional de las juntas. Si se utiliza el criterio de Mohr-Coulomb, estará dada por:

$$\tan \alpha = \tan \phi + \frac{c}{\sigma_n}$$

²⁷Viviescas Álvaro (2009), Modelos simples para el análisis de muros de obra de fábrica cargados en su plano. UPC, Tesis Doctoral.

Donde c es la cohesión y σ_n es la compresión vertical media.

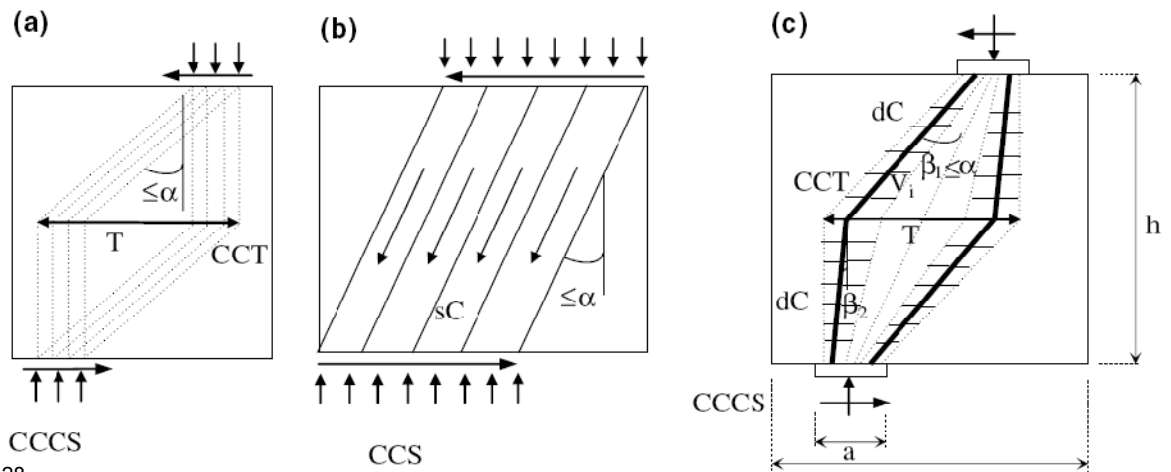
- El ángulo de los tirantes con respecto a la horizontal está limitado por la resistencia a tracción en la dirección normal a las juntas horizontales. Sin embargo, teniendo en cuenta la baja resistencia a tracción de la interfase unidad-mortero, característico en los muros de mampostería, por tal motivo los tirantes se encuentran en la dirección horizontal.
- La máxima fuerza de tracción T que puede ser resistida por un tirante está dada por las dos condiciones siguientes:

$$T \leq V_i \tan \alpha$$

$$T \leq A_b \sigma_{bt}$$

Donde V_i puede ser tomado como la mínima de las fuerzas verticales resistidas por las dos bielas enlazadas al tirante, A_b es el área seccional de las hiladas (filas horizontales de unidades o bloques de piedra) que contribuyen a resistir la fuerza de tracción (normalmente considerada como la mitad de la altura del muro debido a la presencia de las juntas verticales) y σ_{bt} incremento medio de las tensiones de tracción que pueden ser resistidas por las unidades en la dirección horizontal.

- Los mecanismos resistentes propuestos deben ser consistentes con la evidencia experimental y la micromodelización numérica, en términos de distribución de tensiones, fisuración y otros aspectos medibles u observables.



²⁸Figura 3.1. Características de los modelos: (a) desviación de los campos de tensiones de compresión por fuerzas de tracción horizontal (T); (b) bielas paralelas (sc) y nodos (CCS); (c) bielas discretas (dc) representando un efecto de cuello de botella de los campos de tensiones de compresión, combinados con un tirante (T), y nodos CCT y CCCS, Roca (2006)

²⁸Viviescas Álvaro (2009), Modelos simples para el análisis de muros de obra de fábrica cargados en su plano. UPC, Tesis Doctoral.

3.3 MODELOS PROPUESTOS PARA MUROS BAJO CARGAS EN EL PLANO

3.3.1 Muros sencillos bajo carga vertical.

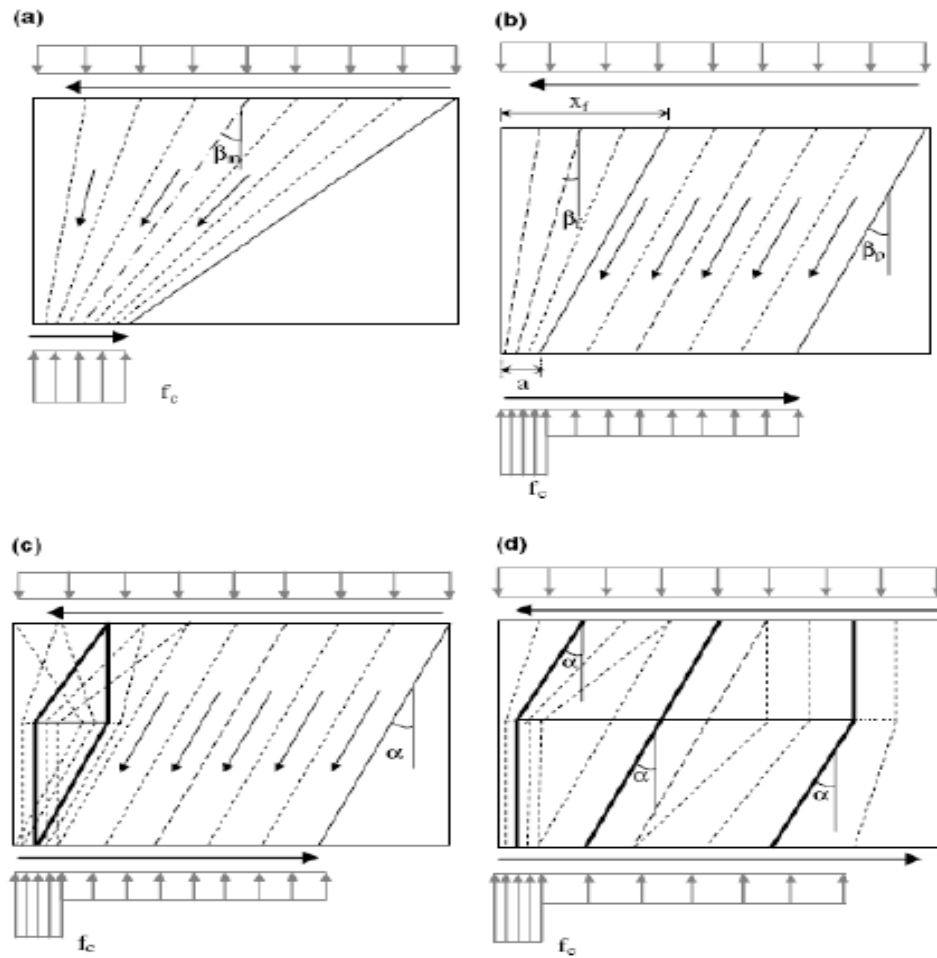
Se puede observar las diferentes propuestas de modelos sencillos basados en el método de las bielas y tirantes para su aplicación en la evaluación de la carga última resistida por muros macizos bajo cargas en el plano (ver figura 3.2). Las líneas continuas gruesas representan las bielas, las líneas continuas delgadas representan los tirantes y las líneas discontinuas indican los campos de tensiones asociados a las bielas.

El modelo (a), reconoce el hecho de que la pendiente de las rutas de carga desarrolladas a lo ancho del muro deben variar gradualmente para compatibilizar con la geometría del mismo.

El modelo (b), es consecuencia de la limitación que debe cumplir la pendiente de las bielas en función de las características del muro. Este modelo al ser aplicado a muros estrechos o muy comprimidos, donde se cumpla que:

$$m \geq b - h \tan \alpha \quad , \quad m = \frac{V}{f_c}$$

Produce valores de carga última semejantes al modelo B-T (a). El modelo (c) es una variación simple del modelo (b), más consistente con algunos tipos de fallo observado experimentalmente que muestran la importancia de considerar en la respuesta del muro la rotura por fisuración de unidades bajo ciertas condiciones de carga.



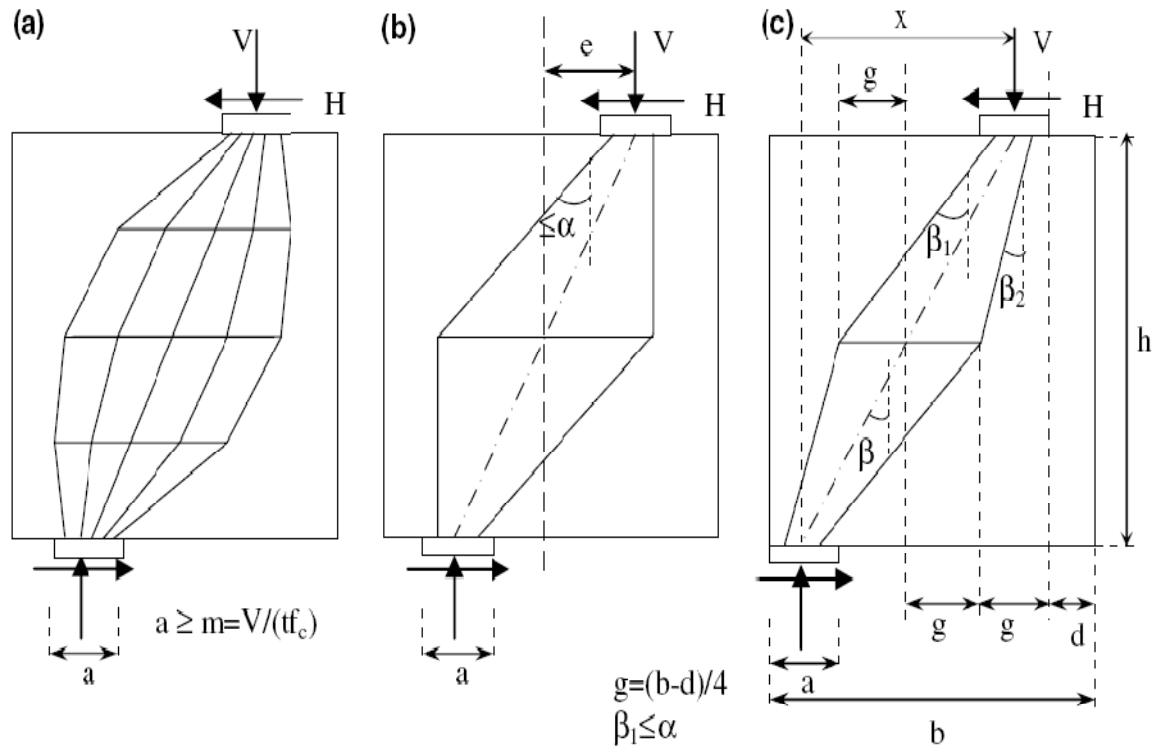
²⁹Figura 3.2. Modelos propuestos para muros bajo carga vertical uniforme.

3.3.2 Muros sencillos bajo cargas parciales o concentradas.

Estos presentan diferente nivel de simplicidad, partiendo de uno básico cuya capacidad en la predicción de la respuesta última de los muros ha sido evaluada utilizando como herramienta de análisis un micromodelo numérico de elementos finitos (previamente calibrado y validado).

²⁹Viviescas Álvaro (2009), Modelos simples para el análisis de muros de obra de fábrica cargados en su plano. UPC, Tesis Doctoral.

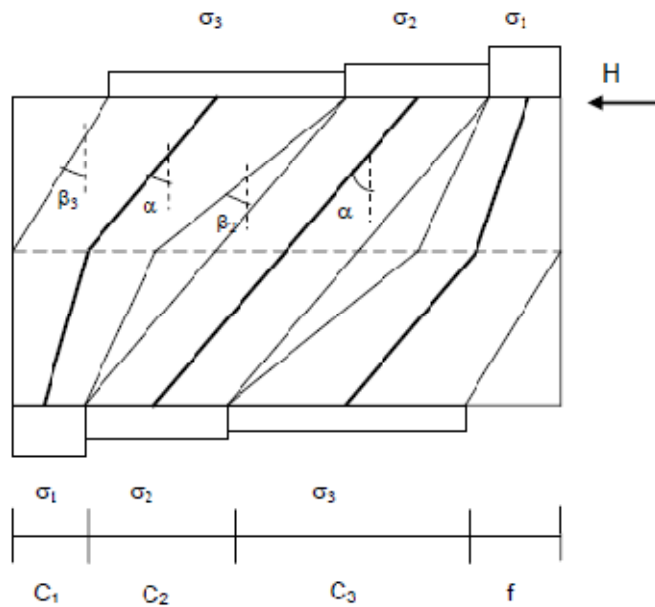
3.3.2.1 Modelo B-T básico. De las propuestas presentadas en la figura 3.3, los mecanismos resistentes de los modelos (b) y (c) son preferidos debido a su simplicidad; entre estos, el modelo (c) parece ser más realista debido a que establece una estimación superior de la carga última y es más consistente con las evidencias experimentales y numéricas disponibles que muestran la tendencia a concentrar, en estado último, la reacción vertical del muro en el extremo opuesto al de aplicación de la fuerza horizontal.



³⁰Figura 3.3. Modelos propuestos para muros bajo cargas verticales o parciales o concentradas.

3.3.2.2 Modelo B-T modificado a. El análisis de los resultados obtenidos en la evaluación del comportamiento del modelo B-T básico propuesto para muros bajo cargas parciales o concentradas, utilizando como herramienta el micromodelo numérico, permitió establecer que en determinadas situaciones, éste modelo no predecía adecuadamente la carga última de los muros evaluados, especialmente para el caso de muros anchos.

³⁰Viviescas Álvaro (2009), Modelos simples para el análisis de muros de obra de fábrica cargados en su plano. UPC, Tesis Doctoral.



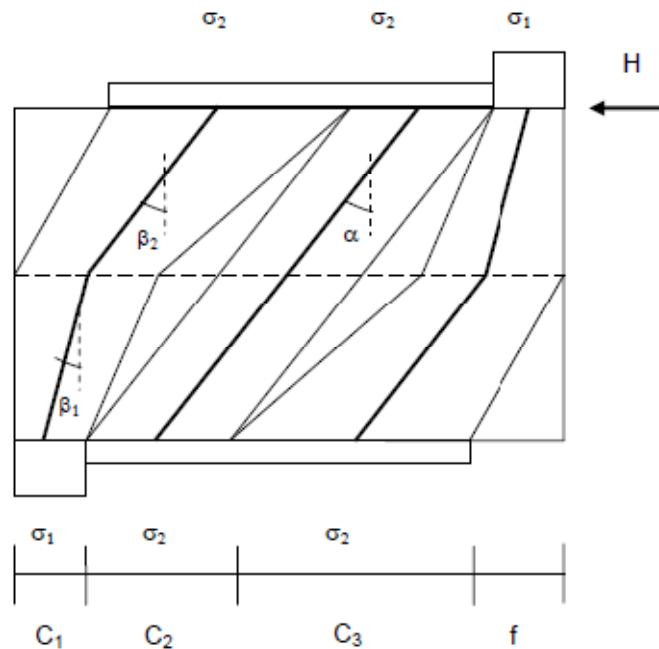
³¹Figura 3.4. Modelo B-T modificado A para muros anchos superiormente confinados.

Este modelo plantea una configuración de mecanismo resistente más consistente con los resultados numéricos obtenidos, para el caso de muros confinados superiormente y donde se pudo observar una capacidad del muro para distribuir la reacción vertical, en una extensión mayor que la consideración inicial de concentración en el extremo inferior opuesto al de aplicación de la fuerza horizontal.

3.3.2.3 Modelo B-T modificado b. Para el mismo caso de paredes confinadas superiormente, se presenta una nueva propuesta de modelo (figura 3.5) que pretende ser una versión simplificada del B-T modificado A.

En el modelo presentado en la figura 3.5, al igual que para el caso del numeral anterior, se asume que la carga vertical resistida por el muro se encuentra distribuida en tres zonas. La diferencia radica en que para este nuevo modelo no se consideran tres estados diferentes de tensiones de compresión sino que se reducen a dos. Esto se hace con fines de simplificación y en concordancia con la evidencia numérica que muestra la validez de esta consideración.

³¹Viviescas Álvaro (2009), Modelos simples para el análisis de muros de obra de fábrica cargados en su plano. UPC, Tesis Doctoral.



³²Figura 3.5. Modelo B-T modificado B para muros anchos confinados superiormente

3.3.3 Fallo por fisuración en las unidades.

Los modelos de bielas y tirantes propuestos en esta investigación solo permiten la predicción directa de la carga máxima horizontal, para los tipos de muros de mampostería especificados y cuando la rotura de los mismos se produce bien sea por deslizamiento a través de las juntas de interfase (fallo por cortante) o por aplastamiento de la obra de fábrica (fallo por compresión).

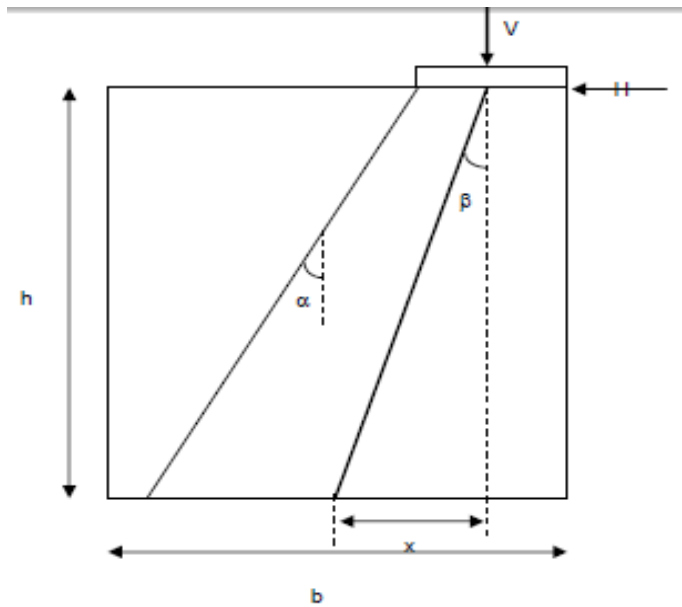
3.3.4 Modelos residuales

Cuando el muro agota su capacidad para resistir las fuerzas de tracción, como consecuencia del fallo por fisuración de las unidades que impide el desarrollo del tirante, es necesario recurrir a modelos residuales para evaluar el comportamiento del mismo.

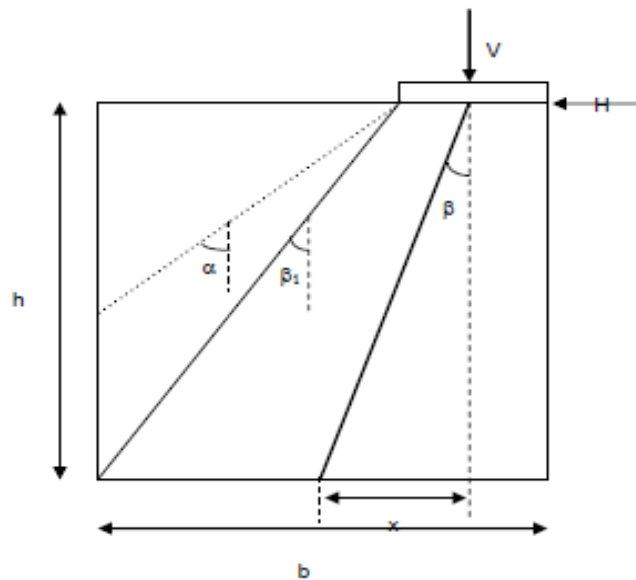
Para la tipología de muros objeto de estudio en la investigación aquí presentada (macizos y sin aberturas) se pueden considerar varias alternativas de modelos residuales a utilizar (figura 3.6).

³²Viviescas Álvaro (2009), Modelos simples para el análisis de muros de obra de fábrica cargados en su plano. UPC, Tesis Doctoral.

El modelo residual (a) se aplica al caso de muros superiormente confinados donde su ancho permite desarrollar la pendiente máxima de las bielas de compresión. Para cuando lo anterior no se cumple, se utiliza el modelo residual (b).



(a)



³³Figura 3.6. Modelos residuales muros macizos superiormente confinados.

³³Viviescas Álvaro (2009), Modelos simples para el análisis de muros de obra de fábrica cargados en su plano. UPC, Tesis Doctoral.

CAPITULO 4

VERIFICACIÓN DEL MODELO SIMPLIFICADO DE BIELAS Y TIRANTES

4.1 INTRODUCCION

El desarrollo de este capítulo tiene por objetivo presentar los resultados obtenidos (incluido el análisis de los mismos) en la evaluación del modelo de bielas y tirantes propuesto anteriormente para el análisis de la carga última de muros sometidos a carga vertical uniforme, debido a la falta de datos experimentales para la calibración de las campañas o comparación directa con los modelos B-T, se realizara una calibración del modelo numérico con ayuda de los datos experimentales obtenidos por Oliveira (2003).

4.2 MODELO NUMERICO UTILIZADO

Como siguiente etapa del estudio se procedió a establecer la herramienta a utilizar para realizar una validación más rigurosa del modelo de bielas y tirantes propuesto para esta condición de carga. Para ello se utiliza un modelo numérico de elementos finitos, el cual, para ser puesto a punto, es calibrado con ayuda de los datos experimentales obtenidos por Oliveira (2003) en su campaña experimental sobre muros macizos de junta seca sometidos a carga vertical (2.8.2), la elección de esta campaña se debe a la simplificación que representa para su modelamiento por pertenecer configuración en junta seca y también por representar del fenómeno a estudiar.

4.2.1 Tipos de elementos

En el modelo numérico se asume toda la no linealidad del problema en las juntas de contacto entre unidades con la finalidad de reducir el esfuerzo computacional. Para el modelado de los ladrillos se utilizan elementos elásticos de tensión plana, representando cada bloque con 1 división horizontales y 2 verticales que generan 2 elementos.

4.2.2 Parámetros y criterios de falla

Por ahora se incluyen únicamente mecanismos de rotura a nivel de junta (modelo de contacto con fricción) con lo cual trasladamos toda la no linealidad del problema a las interfases. No se incluyen mecanismos de rotura a nivel de unidad. En cuanto a parámetros elásticos del modelo, para el módulo de Young de las unidades, de acuerdo con los datos de la caracterización mecánica suministrados

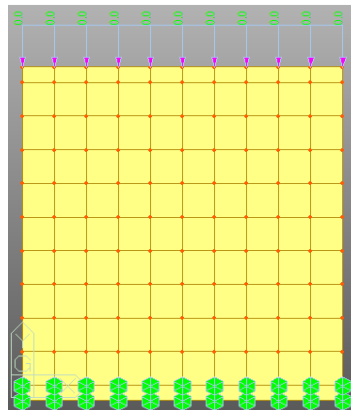
por Oliveira (2003), se toma un valor de 15500 N/mm² y para el módulo de Poisson un valor de 0,2.

Para modelar las discontinuidades generadas por las juntas de interfase entre las unidades, generadoras de la no linealidad, se utilizan elementos lineales de interfase con espesor nulo aplicándoseles el modelo de contacto con fricción tipo Coulomb descrito en el numeral 2.6.1.1. El programa de análisis utiliza puntos de integración de Gauss debido a que generalmente producen resultados más precisos que aquellos que utilizan sus propios nodos como puntos de integración. Los parámetros de rigidez en estas juntas se toman siguiendo el criterio analítico utilizado por Oliveira (2003) y se presentan en la Tabla 6, donde se observa que éstos dependen de la carga vertical aplicada. K_n representa la rigidez normal de las juntas y K_s la rigidez tangencial.

Carga vertical [kN]	K_n [N/mm ³]	K_s [N/mm ³]
30	5,87	2,45
100	8,08	3,37
200	11,4	4,73
250	13,0	5,43

³⁴Tabla 6. Rigideces para las juntas Oliveira (2003)

En el caso de los parámetros inelásticos, por tratarse de juntas secas, tanto la resistencia a tracción como la cohesión se toman iguales a cero. Para el comportamiento a cortante de las juntas, representadas por elementos lineales con espesor nulo y modelo de contacto con fricción, se les asigna el valor de 0,62 para $\tan \phi$, de acuerdo a lo registrado experimentalmente por Oliveira (2003).



³⁵Figura 4.1. Malla de elementos finitos

³⁴ Oliveira, D. (2003). Experimental and numerical analysis of blocky masonry structures under cyclic loading. Ph. D. Thesis, University of Minho, Guimaraes, Portugal.

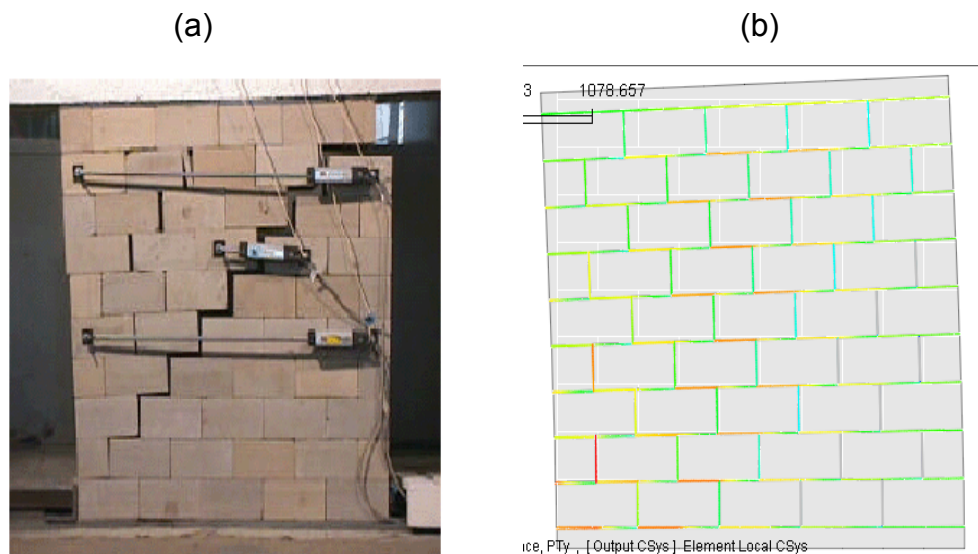
³⁵ Figura de medidas FEA.

4.2.3 Validación modelo numérico.

Se evaluó el comportamiento del modelo numérico en cuanto a mecanismos de rotura, cargas y desplazamiento. Para ellos se utilizó los casos de carga vertical realizados experimentalmente (30, 100, 200 y 250 kN).

4.2.3.1 Aplicación de la carga. De acuerdo a los modelos y las campañas experimentales que encontramos en la literatura realizamos la calibración de nuestro modelo numérico. Como primer paso se carga verticalmente el modelo, para lograr el estado de compresión vertical, (30, 100, 200, 250 kN). Luego se mantiene constante el estado de compresión vertical logrado anteriormente y se procede a la aplicación de la carga horizontal sobre el nodo ubicado en el extremo superior derecho de la viga de carga.

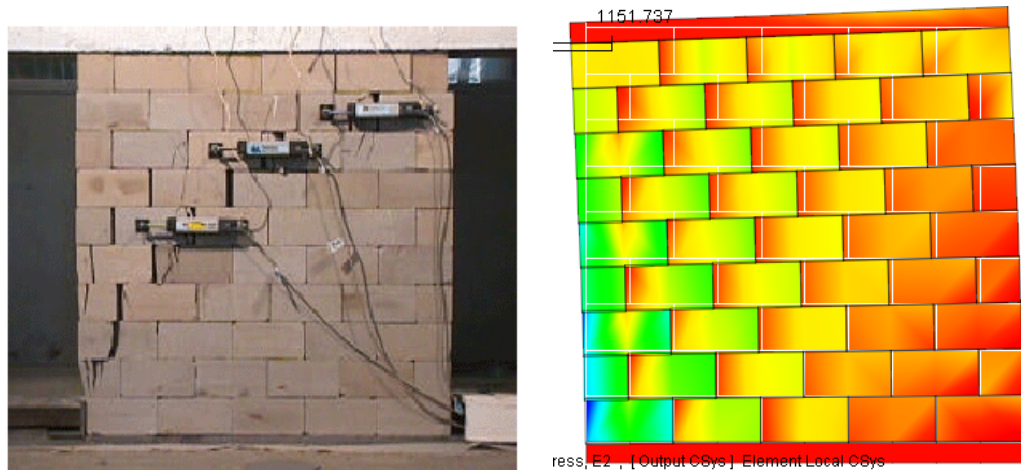
4.2.3.2 Mecanismos de rotura. La figura 4.2, presenta la comparación con los resultados numéricos, presenta a comparación de los resultados experimental, para el caso de carga vertical de 100 kN, como representativo de un estado de bajas compresiones en la campaña. Se puede apreciar cómo el modelo permite predecir muy satisfactoriamente el mecanismo de rotura obtenido experimental para el muro evaluado. En el comportamiento del modelo numérico se evidencia claramente en las líneas rojas las cuales significan que hay una separación en diagonal escalonada por deslizamiento de las unidades sobre las juntas de contacto.



³⁶Figura 4.2 Deformadas muro 100 kn (a) experimental y (b) numérica.

³⁶ a. Oliveira, D. (2003). Experimental and numerical analysis of blocky masonry structures under cyclic loading. Ph. D. Thesis, University of Minho, Guimaraes, Portugal. b. Plataforma midas FEA

Para estados de altas compresiones verticales (muros con 200 y 250 kN), según la evidencia experimental, se presenta fisuración de los ladrillos en las zonas de compresión máxima. Se observa la inestabilidad local presentada en la zona izquierda del modelo numérico (color verde), zona de máximas compresiones, en el cual se produce la falla del muro.



³⁷Figura 4.3. Deformadas muro 200 kn (a) experimental y (b) numérica.

4.2.3.3 Curvas carga – desplazamiento horizontal. Se realiza la comparación de los valores numéricamente encontrados en la literatura para evaluar la capacidad del modelo numérico y así predecir las curvas carga-desplazamiento horizontal, como los datos obtenidos por Oliveira (2003) utilizando el micromodelo numérico de Lourenço (1996), en el que se evaluó su desempeño con los datos disponibles de la campaña realizada en su investigación.

Se sabe que el modelo numérico utilizado hasta ahora solo involucra criterios de rotura a nivel de junta, modelamiento base en el que se tiene en cuenta la mayor no linealidad del estudio realizado, las curvas carga-desplazamiento horizontal obtenidas presentan un adecuado comportamiento, al compararlas con las fuentes experimentales y numéricas disponibles.

³⁷ a. Oliveira, D. (2003). Experimental and numerical analysis of blocky masonry structures under cyclic loading. Ph. D. Thesis, University of Minho, Guimaraes, Portugal. b. Plataforma midas FEA

4.2.3.4 Carga ultima. Para efectuar las comparaciones de la carga última obtenidas al aplicar el modelo numérico se dispone, al igual que para las curvas carga-desplazamiento horizontal, de los datos de la campaña experimental y de los resultados de la aplicación del micromodelo numérico de Lourenço (1996) realizada por Oliveira (2003). También se compara con los resultados obtenidos de aplicar los modelos basados en bielas y tirantes propuestos. Se presenta una comparación de los valores de carga última obtenidos en los diferentes casos en la figura 4.4. Los casos de carga que corresponden a aquellos donde se ensayaron dos muros (30, 100 y 200 kN) se presenta el valor medio de los dos datos experimentales obtenidos.

Pv	numérico	lourenço	modelo B-T	experimental
30	17,8	16,3	14,02	22,4
100	50,01	47,5	43,88	45
200	88,13	81,4	86,36	70,3
250	87,04	98	107,53	102,7

Tabla 7. Cargas horizontales últimas.

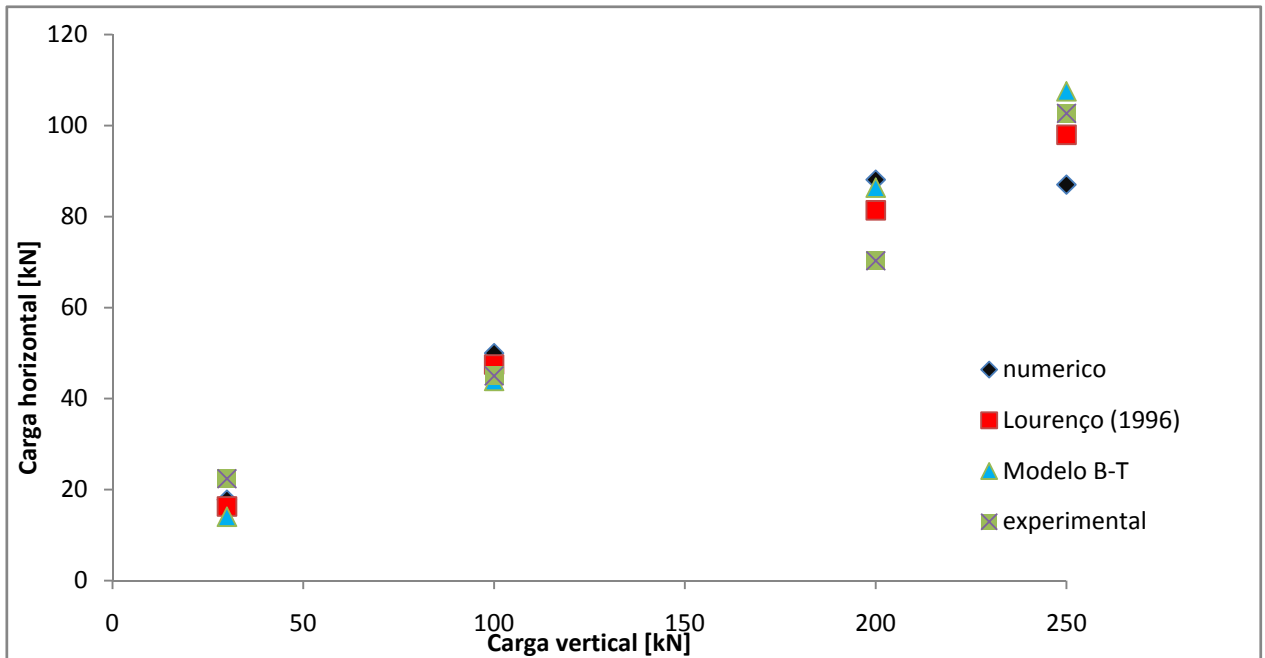


Figura 4.4. Cargas últimas experimental vs numérica, datos obtenidos en midas FEA.

Para valores bajos de compresión vertical (30 y 100 kN), el fallo se produce por deslizamiento de los bloques sobre sus juntas de contacto, por esto la buena concordancia en el valor de la carga última para estos dos casos con el modelo de contacto con fricción utilizado. En estado de altas compresiones verticales (200 y 250 kN), se evidencio por medio del modelo numérico utilizado, las cargas máximas correspondientes que producen el colapso del muro.

4.3 ESTUDIO DE LA INCIDENCIA DE LOS DIFERENTES PARAMETROS A EVALUAR PARA VALIDAR B-T.

Después de validar y determinar que es válido el modelo para la estimación en la respuesta última de muros de mampostería, se procedió con el análisis en la incidencia de los diversos factores para la determinación de la carga última; relación ancho/alto, valor de la cohesión y ángulo de rozamiento en las juntas de contacto entre unidades. Para ello se utilizó la geometría del caso estudiado hasta el momento y correspondiente a muros con juntas secas ensayado por Oliveira (2003).

4.3.1 Incidencia de la relación ancho /alto del muro.

Las variables b y h corresponden al ancho y el alto del muro. El valor de las tensiones verticales sobre el muro se mantuvo constante. Los modelos numéricos se componían de unidades elásticas que representaban los ladrillos, manteniendo constantes sus dimensiones con ancho 20 cm y alto 10 cm, discretizados con 2 divisiones horizontales y 1 vertical.

σ (N/mm ²)	P (kN)					
	b/h=0,6		b/h=1		b/h=2	
	Modelo numérico	Modelo B-T	Modelo numérico	Modelo B-T	Modelo numérico	Modelo B-T
0.15	10.62	5.77	15.61	14.02	38.70	34.57
0.5	17.13	18.28	45.43	43.88	123.50	107.82
1	31.4	36.01	78.7	86.36	243.50	212.30
1.25	56.83	44.80	90.87	107.53	276.4	269.47

Tabla 8. Comparativas cargas horizontales últimas para diferentes b/h

Los datos de la tabla 8 permiten establecer que los modelos B-T propuestos incluyen de una manera adecuada la variación en la respuesta para muros con diferentes valores en su relación b/h. Esto se puede afirmar, teniendo en cuenta el satisfactorio grado de concordancia entre los valores de carga última horizontal obtenidos con el Modelo B-T y los del Modelo numérico.

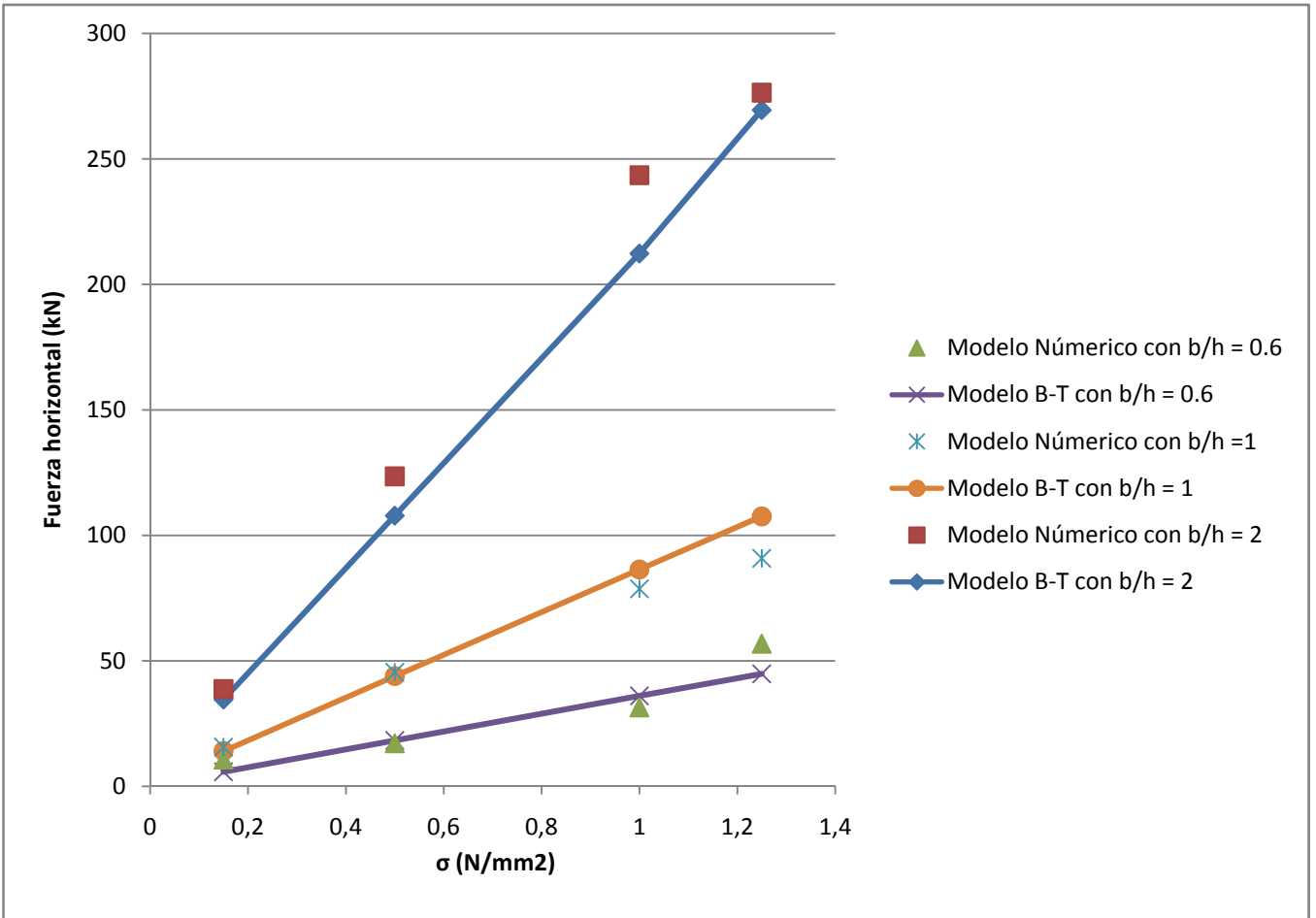
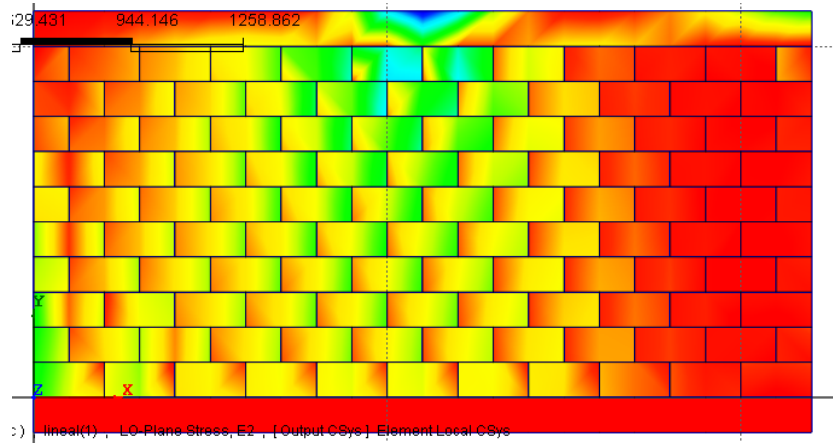
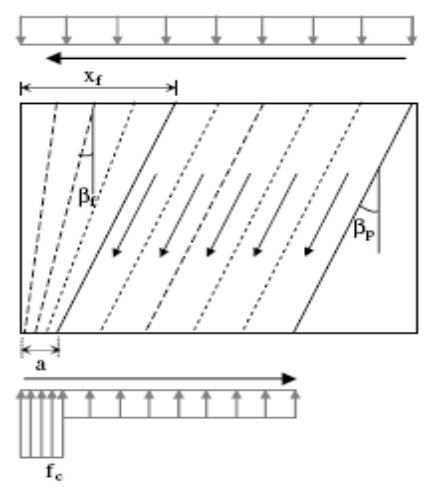


Figura 4.5. Incidencia de la relación b/h en la respuesta del modelo.

Además de la capacidad demostrada por el modelo numérico para predecir la carga última cuando se varía la relación b/h del muro, es posible apreciar en él la formación del mecanismo resistente previsto por el modelo B-T. A continuación generamos uno de los modelos donde podemos evidenciar la formación del modelo en abanico modificado tal como lo predice el modelo de bielas y tirantes.



(a)



(b)

Figura 4.6. Comparativa mecanismo resistente (a) tensiones principales de compresión en el modelo numérico con $b/h=2$ y $c=0$ (b) Modelo B-T en abanico modificado.

4.3.2 Incidencia de la relación ancho /alto de las unidades.

Las variables b_u y h_u representan el ancho y el alto de la unidad respectivamente. En este caso se mantuvo constante la altura de la unidad del ladrillo con un valor de 10 cm.

Muro con $b=1\text{m}$ y $h=1\text{m}$

Pv[kN]	Ph[kN]		
	Modelo Numerico bu/hu=1	Modelo Numerico bu/hu=2	Modelo B-T
30	20,1	21,2	14,02
100	48,1	49,6	43,88
200	72,5	75,7	86,36
250	100	102,5	107,53

Tabla 9 Incidencia de la relación bu/hu. Muro de 1mx1m.

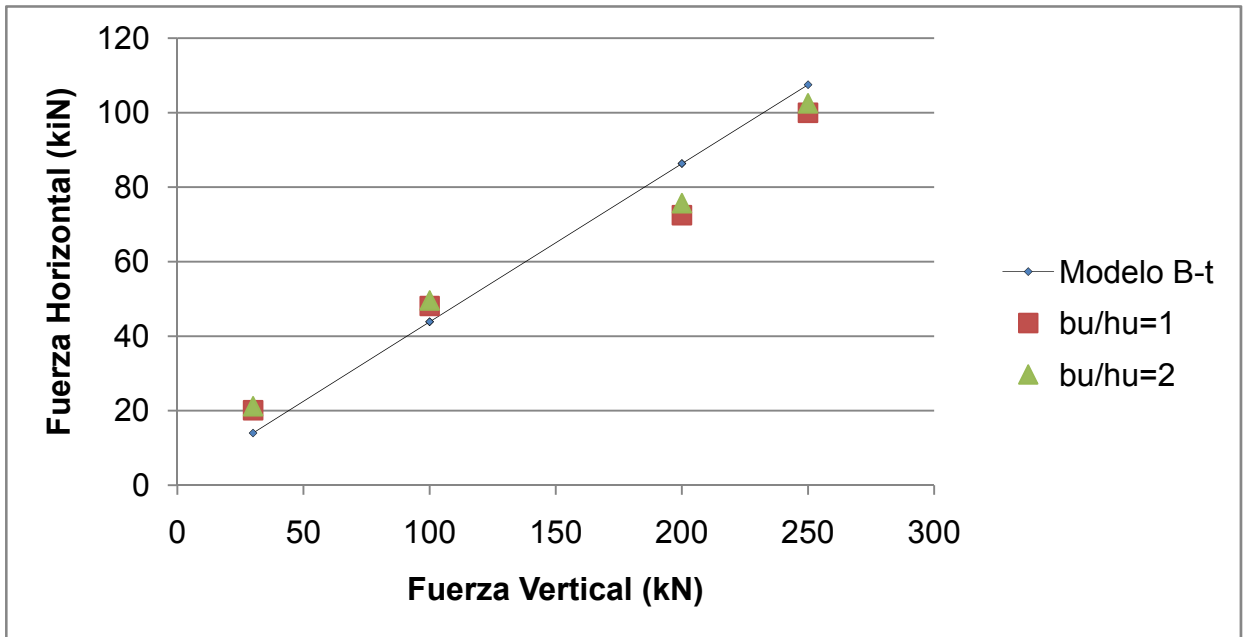


Figura 4.7. Incidencia de la relación bu/hu. Muro 1mx1m.

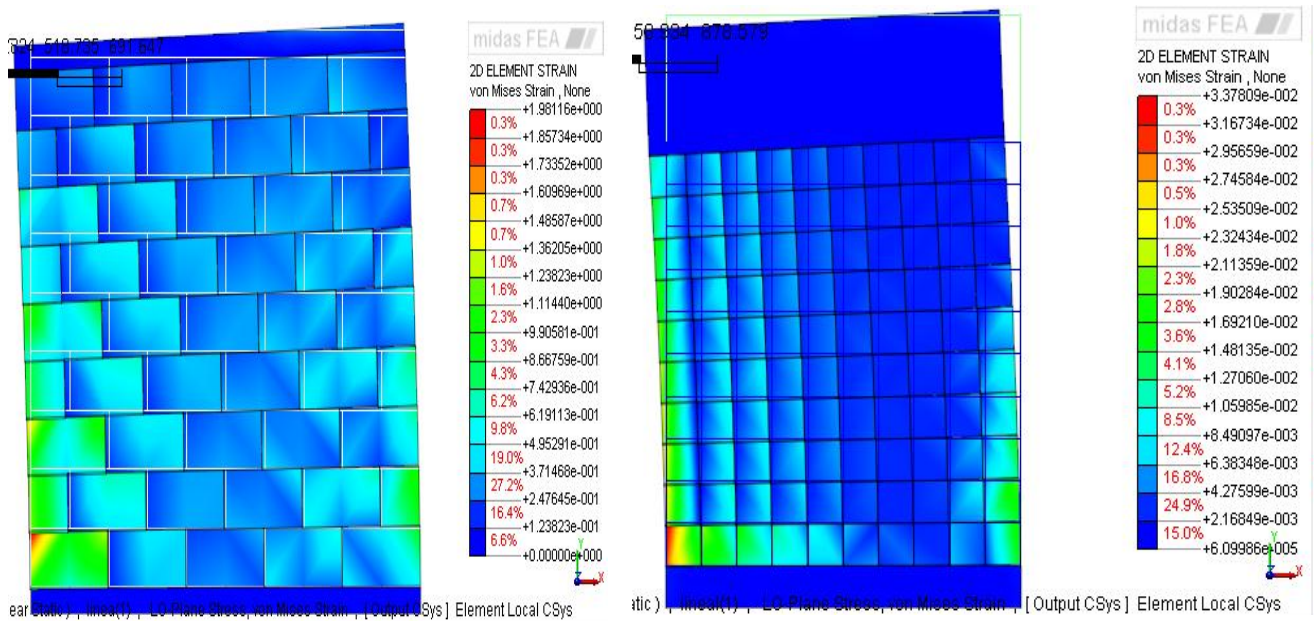


Figura 4.8. Tensiones principales de compresión para 30 kn de carga vertical. (a) bu/hu=2 (b) bu/hu=1.

Para este muro se encuentra diferencias sustanciales en los valores de carga ultima (tabla 9), por tal motivo se considera que la relación entre el ancho y el alto de las unidades influye considerablemente en la capacidad de carga de un muro, se deduce esto observando la manera como el muro responde a una misma carga, y la manera como este reacciona, por lo tanto se realiza una revisión junto a la información seleccionada para deducir la influencia de estas unidades en la respuesta ultima del muro.

Al aumentar su relación bu/hu , es decir al aumentar el ancho de la unidad, crece considerablemente su capacidad de resistir cargas horizontales, para un mismo estado de cargas verticales.

En general la mayor o menor presencia de juntas de contacto entre las unidades es un factor de gran importancia que influye en la capacidad resistente del muro ante sollicitaciones horizontales debido a que estas juntas son las creadoras del inicio de fisuraciones por ser la parte más débil de la estructura en comparación con las propiedades mecánicas de las unidades.

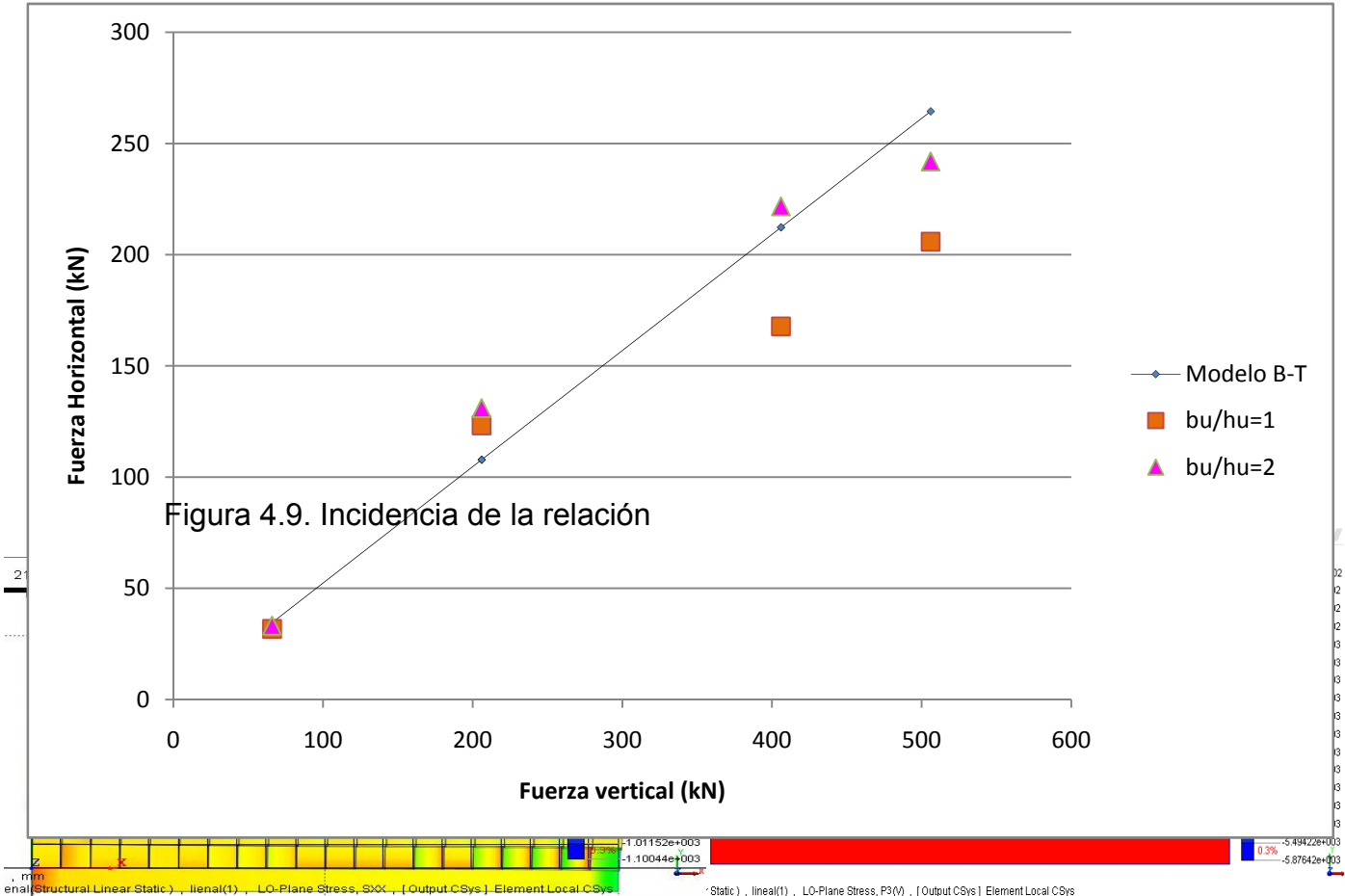
La influencia de la relación bu/hu en la respuesta del muro es más evidente para valores altos de carga vertical, el mecanismo de rotura se presenta por un fallo por compresión en la mampostería.

En la figura 4.8 y 4.10 se presentan las diferentes distribuciones de las tensiones de compresión obtenidos con el modelo numérico para cada una de las relaciones bu/hu en el caso de 30 y 100 kN de carga vertical para muros de 1mx1m y 2mx1m. Se puede ver como la formación de las bielas de compresión está influenciada por la geometría de las unidades. Se aprecia la correspondencia de la distribución de las tensiones de compresión con el mecanismo resistente planteado para este caso de carga según el modelo B-T.

Muro con $b=2m$ y $h=1m$

Pv[kN]	Ph[kN]		
	Modelo Numerico		Modelo B-T
	bu/hu=1	bu/hu=2	
66	31,8	33,2	34,57
206	123,3	131	107,82
406	167,8	221,7	212,3
506	205,9	241,9	264,47

Tabla 10 Incidencia de la relación bu/hu. Muro de 2mx1m



bu/hu. Muro 2mx1m.

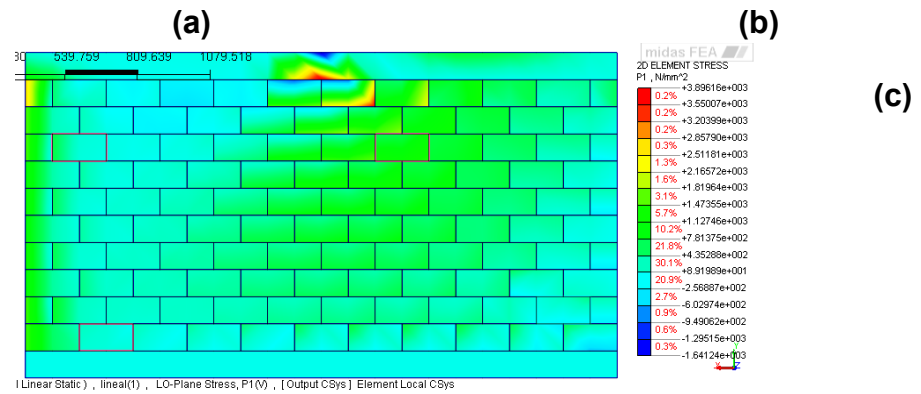


Figura 4.10. Tensiones principales de compresión para 100 kn de carga vertical. (a) bu/hu=1 (b y c) bu/hu=2.

Algunas investigaciones han mostrado que las fisuras se inician a lo largo de dos o tres unidades y luego se propagan horizontalmente a todo lo largo del muro. Si la presión aumenta, el muro colapsará como un mecanismo; sin embargo, si la presión lateral se mantiene o disminuye, está podrá ser resistida por el efecto estabilizador del peso propio del muro.

Se propone una relación de b_u/h_u de la unidad para que el modelo de Bielas y Tirantes tenga un comportamiento BT en abanico, esta relación debe ser mayor a la relación b/h del muro, de esta manera se garantiza que el muro resista una mayor carga horizontal.

4.3.3 Incidencia de la cohesión (c) de la interfase.

V [kN]	bxh [muro]	H [kN]					
		c=0		c=0.25 N/mm		c=2.5 N/mm	
		Modelo numerico	Modelo B-T	Modelo numerico	Modelo B-T	Modelo numerico	Modelo B-T
120	0.6mx1m	33,2	36,01	34,4	36,01	35,3	36,1
200	1mx1m	77,34	86,36	94,85	98,9	90,2	100,37
400	2mx1m	224,2	212,3	301,2	275,61	379,5	401,88

Tabla 11 Incidencia de la cohesión.

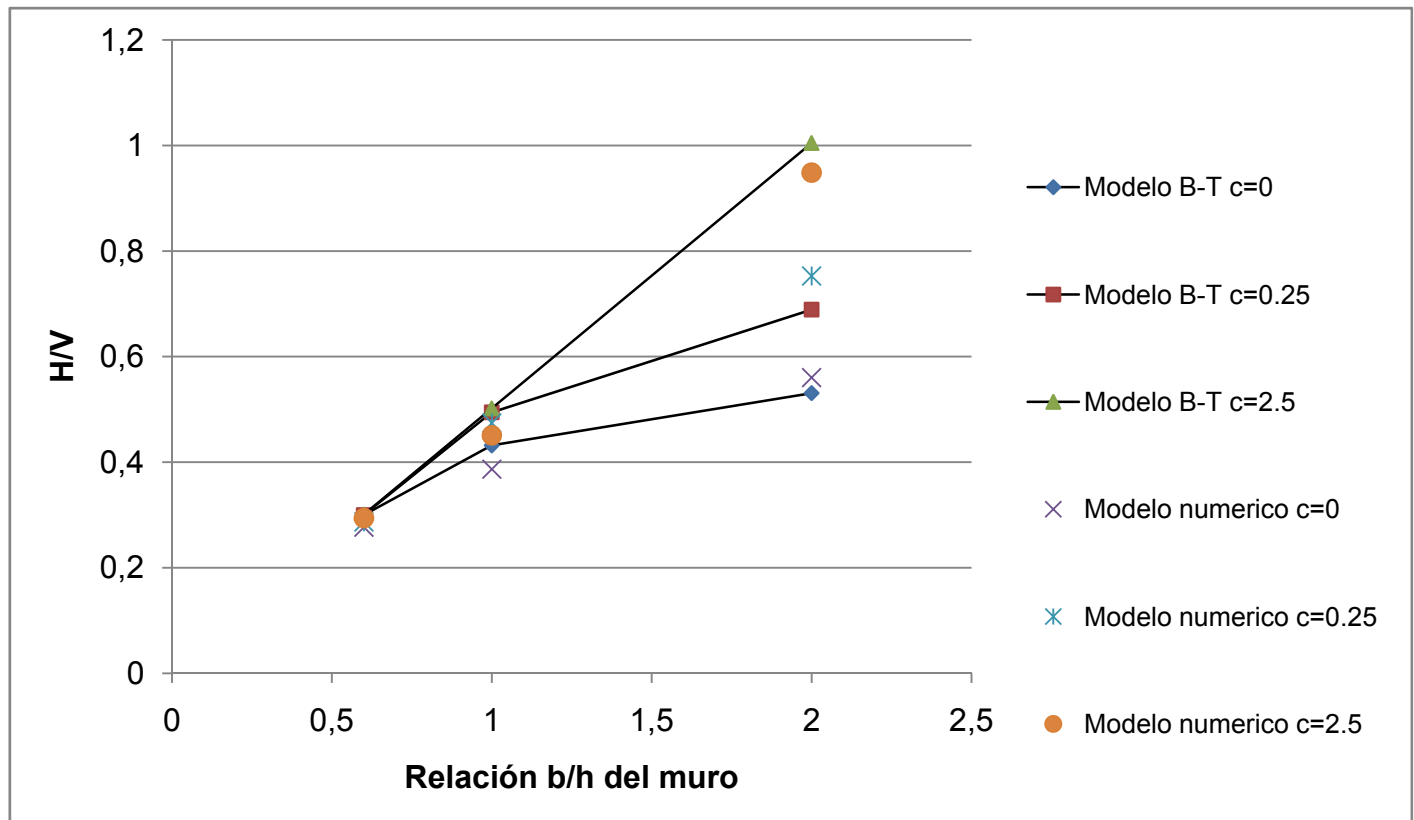


Figura 4.11. Incidencia de la cohesión.

La influencia de la cohesión (c) de la interfase en la respuesta del muro es evaluada para tres geometrías diferentes de muro. Los resultados obtenidos tanto con la aplicación del modelo numérico como con el modelo B-T, se presentan a partir de la figura 4.12. Para todos los muros analizados, el estado de compresiones verticales permaneció constante.

4.3.3.1 Muro 0.6x1m carga 100kn cohesión $c=0$.

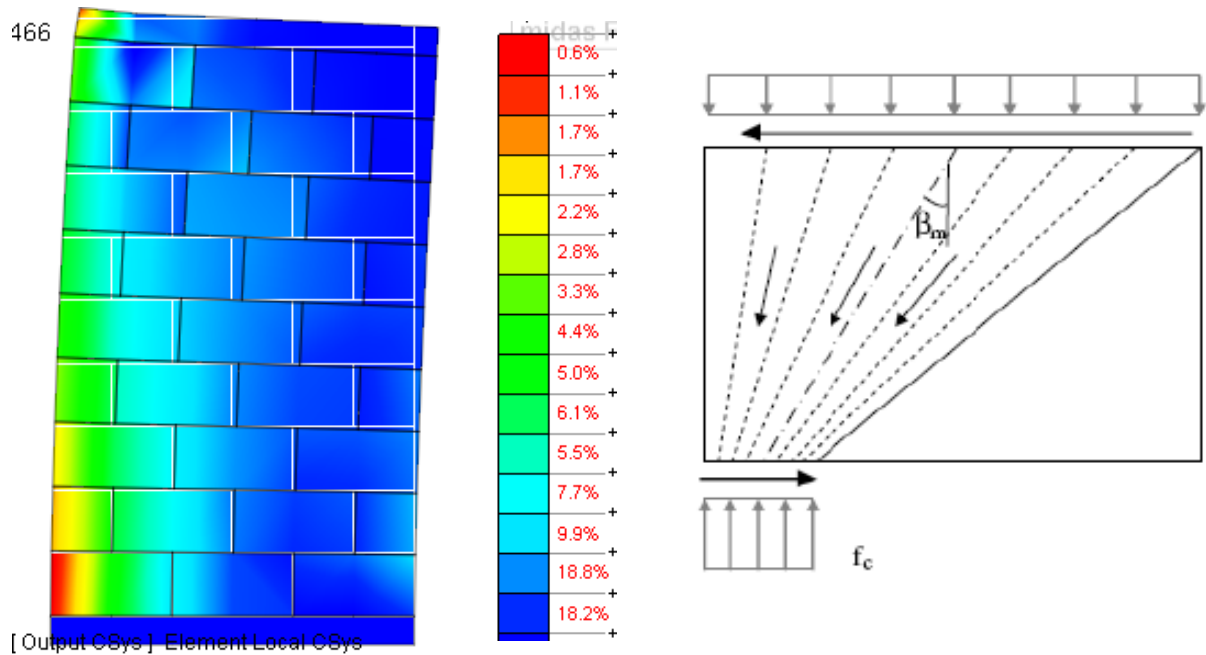


Figura 4.12. Comparativa mecanismo resistente Muro 0.6x1m carga 100kn cohesión $c=0$ (a) Modelo numérico, distribución de tensiones de compresión kn/mm^2 (b) Modelo B-T en abanico.

4.3.3.2 Muro 0.6x1m carga 100kn cohesión c=0.25

Muro 0.6x1m carga 100kN cohesión c=2.5

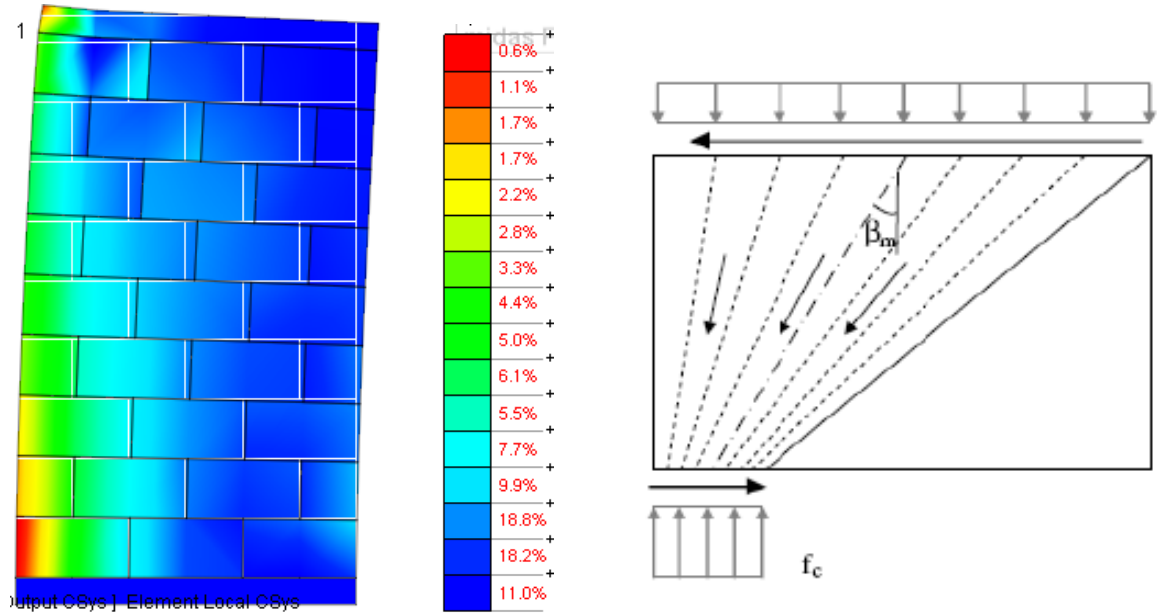


Figura 4.13. Comparativa mecanismo resistente Muro 0.6x1m carga 100kn cohesión c=0.2 y 2.5

(a) Modelo numérico, distribución de tensiones de compresión kn/mm^2 (b) Modelo B-T.

4.3.3.3 Muro 2x1m carga 100kn cohesión c=0

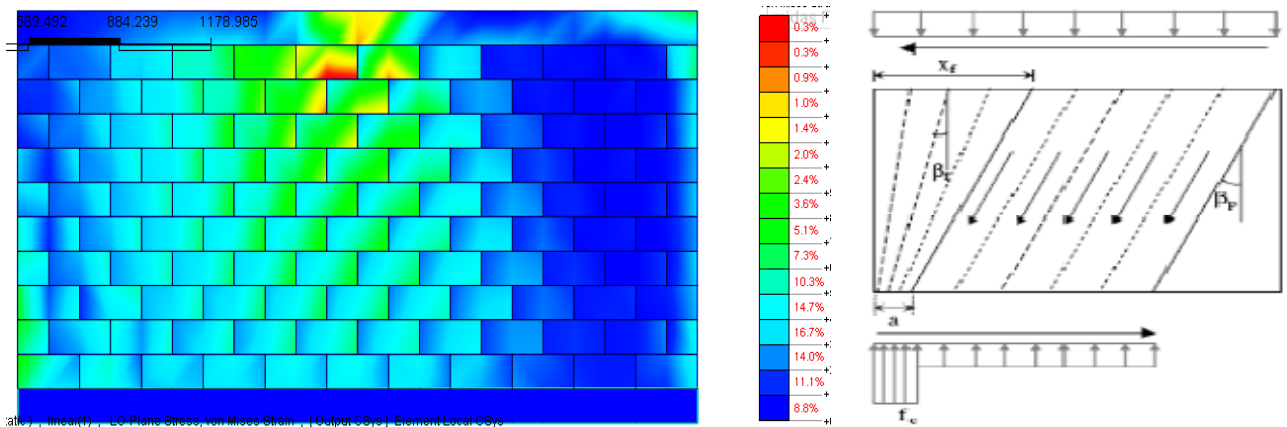


Figura 4.14. Comparativa mecanismo resistente Muro 2x1m carga 100kn cohesión c=0

(a) Modelo numérico, distribución de tensiones de compresión kn/mm^2 (b) Modelo B-T

4.3.3.4 Muro 2x1m carga 100kn cohesión $c=0.25$

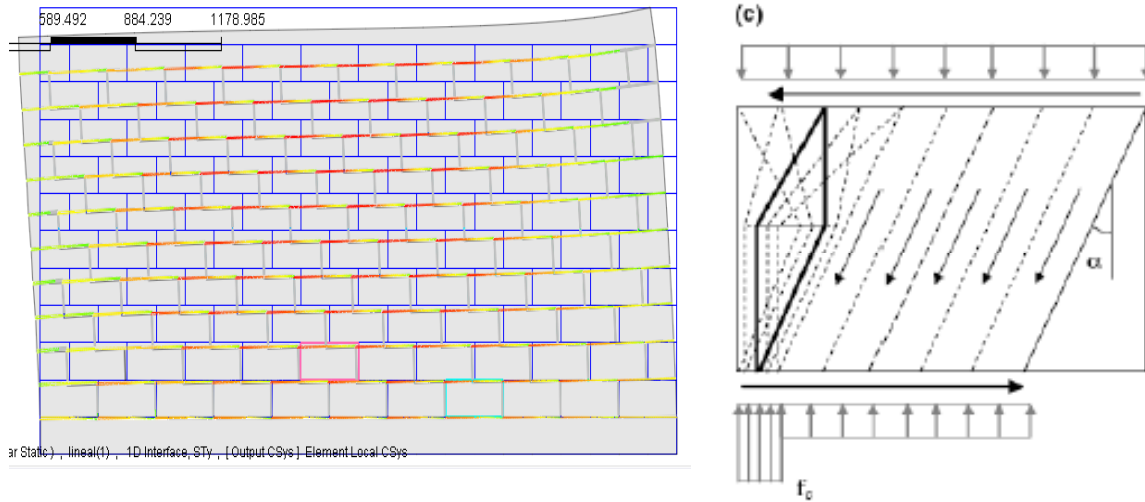


Figura 4.15 Comparativa mecanismo resistente Muro 2x1m carga 100kn cohesión $c=0.25$

(a) Modelo numérico, distribución de tensiones de compresión kn/mm^2 (b) Modelo B-T

4.3.3.4 Muro 2x1m carga 100kn cohesión $c=2.5$

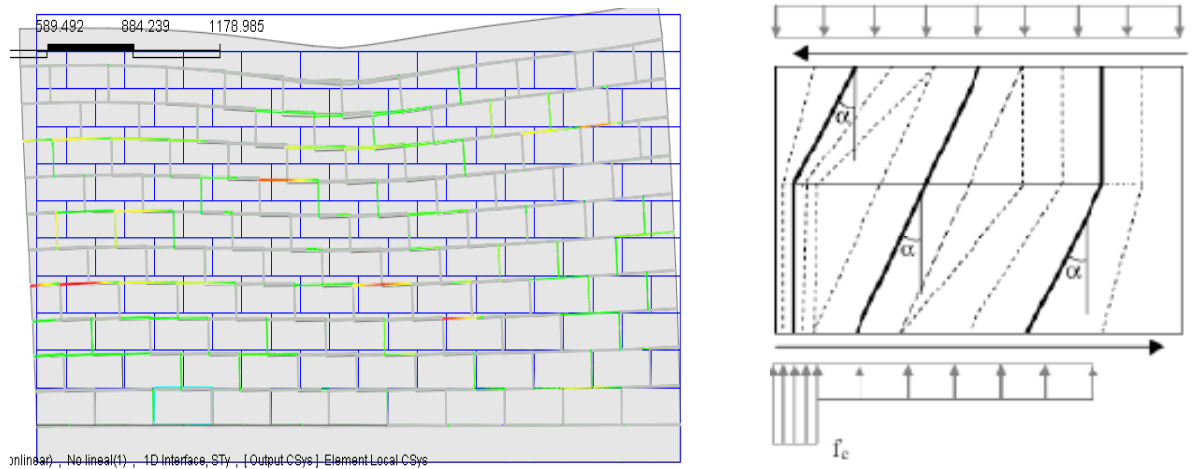


Figura 4.16 Comparativa mecanismo resistente Muro 2x1m carga 100kn cohesión $c=2.5$

(a) Modelo numérico, distribución de tensiones de compresión kn/mm^2 (b) Modelo B-T

Podemos observar que los resultados obtenidos nos permiten concluir que para el caso de muros estrechos, $0.6 \times 1\text{m}$, la variación de la cohesión no ejerce influencia en su respuesta, esto se debe a que su geometría condiciona la formación del modelo de bielas y tirantes permitiendo solo la generación de un modelo B.T en abanico.

En el siguiente caso a analizar, muro $2 \times 1\text{m}$, encontramos que al aumentar la cohesión de la interfase, la respuesta ultima es diferente en cada muro, por lo tanto la interfase que existe entre el mortero-unidad es de gran importancia y tiene una gran influencia en muros de mampostería de dimensiones anchas debido a que la carga ultima varia considerablemente y por lo tanto aria su comportamiento final.

CAPITULO 5.

DISEÑO DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL

5.1 MATERIALES.

El material a utilizar debe cumplir con las especificaciones técnicas expuestas en la NSR-10. En la construcción del modelo se debe emplear los ladrillos destinados a la construcción de mampostería con unidades macizas (en arcilla).

Para construir el muro se debe emplear hormigón con una mezcla cemento Pórtland, este debe estar empotrado sobre una viga reforzada rígida, además en la parte superior del muro debe ir otra viga lo suficientemente rígida para soportar y transmitir la carga vertical necesaria para el análisis.

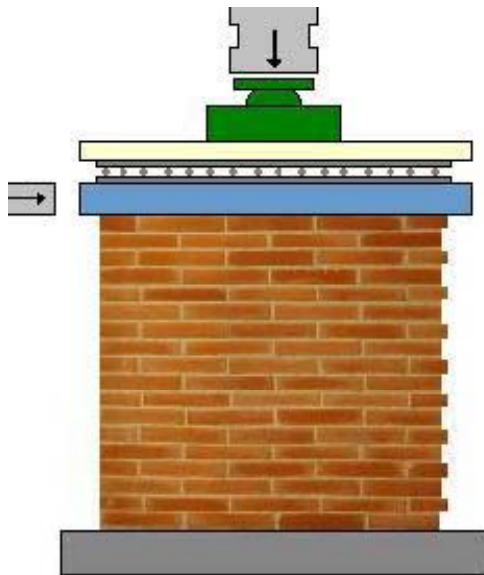
La pega debe tener un ancho de 1cm, y las unidades deben cumplir con las dimensiones investigadas en el presente informe.



5.2 APLICACIÓN DE LA CARGA HORIZONTAL Y VERTICAL

Para caracterizar el comportamiento bajo cargas horizontales y verticales, se requiere una carga concentrada en la viga superior concéntrica que simula la carga vertical, en esta misma viga se aplica la carga horizontal.

³⁸Jaramillo Juan, Morales Marcela, Hincapié Gonzalo. Respuesta Sísmica de muros de mampostería no reforzada sometidos a aceleraciones perpendiculares a su plano. Universidad EAFIT. (2008).



Los resultados obtenidos experimentalmente se comparan con los resultados obtenidos numéricamente para su optimización.

CONCLUSIONES

- El conocimiento disponible acerca del comportamiento de la mampostería, así como del comportamiento resistente de cada uno de los sistemas complejos que forman este elemento aun es insuficiente. Una mayor investigación sobre el comportamiento de las estructuras construidas en este material es de vital importancia para la validación de su seguridad estructural y su mantenimiento tanto por las cargas de compresión como por las cargas de acción lateral.
- El modelo B-T son una herramienta útil de la cual podemos obtener resultados aproximados a los obtenidos de manera experimental en las campañas investigadas y mediante otros métodos computacionales de forma sencilla que predice la carga última cuando las paredes de carga forman parte de la estructura portante de un edificio sometido a carga horizontal.
- El criterio en que se basa la formulación del método evaluado (Roca (2003), Viviescas (2009)), resulto adecuado y dio lugar a resultados aproximados. Mediante el método propuesto ha sido posible predecir de manera satisfactoria los resultados obtenidos de forma individual.
- El comportamiento de rotura es por deslizamiento de las juntas, donde la rotura transcurre sobre el mortero o en la interfase (mortero-ladrillo) en forma escalonada. Otro comportamiento corresponde la rotura a tracción de los ladrillos, donde la rotura es una combinación entre rotura del mortero, de la interfase y rotura de los ladrillos.
- Evidenciamos que los modelos de bielas y tirantes son una herramienta satisfactoria, ya que es cómoda para su análisis debido a la sencillez de comparación con el cálculo no lineal de elementos finitos.
- Por medio de los modelos numéricos utilizados podemos evidenciar y comprobar la existencia de los diferentes mecanismos resistentes propuestos por el método de bielas y tirantes.
- El modelo numérico utilizado (midas FEA y midas GEN), resulto ser una herramienta de gran importancia para el análisis del comportamiento de muros de mampostería bajo carga vertical uniforme.
- Se establece que la relación ancho/alto (b/h) del muro no influye en la respuesta resistente del muro ante acciones horizontales.

- La relación ancho/alto (b_u/h_u) de las unidades ejercen influencia en la capacidad de carga del muro. Además se observó que es necesario introducir un factor de ajuste al modelo B-T para mejorar su capacidad.
- Para los parámetros de la cohesión (c) de la interfase, se evidenció que al cambiar su valor para un mismo caso de muro se produce una modificación en la respuesta del mismo, por lo tanto este factor influye notablemente en la capacidad resistente del muro.

BIBLIOGRAFIA

Bautista, Paola (2008). Validación de las funciones de vulnerabilidad sísmica simuladas para mampostería. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander.
Charry, J. (2009). Estudio experimental del comportamiento de paredes de obra de fábrica deladrillo ante la acción de cargas laterales. Tesis Doctoral, UPC, Barcelona (España).

Consuegra Mugras, Jose Fancisco, Constantino Niño Pinto (2007). Análisis Paramétrico al Variar la Geometría de los Muros de Mampostería de uno y dos pisos. Universidad Industrial de Santander.

Jaramillo Juan, Morales Marcela, Hincapié Gonzalo (2008). Respuesta Sísmica de muros de mampostería no reforzada sometidos a aceleraciones perpendiculares a su plano. Universidad EAFIT.

Florián Ramírez Elida Yesenia (2009). Recomendaciones para el diseño en mampostería de viviendas mínimas, menores de 50m².trabajo de graduación. Universidad de San Calos de Guatemala.

León Javier, Corres Hugo, Espejo Sergio(2007).. Obras de fábrica. Sostenibilidad e Ingeniería. Sevilla.

Lopez J., S. Oller, E. Oñate. (1998). Calculo del Comportamiento de la Mampostería Mediante Elementos Finitos. UPC.

Lourenço, P.B. (1996). Computational strategies for masonry structures. Ph. D. Thesis, DelftUniversity of Technology, Delft , The Netherlands.

Lourenço, P. B., and Rots, J. G. (1997). A multi-surface interface model for the analysis ofmasonry structures. J. Struct. Eng., ASCE 123, 7, 660–668

Lourenço, P.B., Oliveira, D.V., Roca, P. y Orduña, A. (2005). Dry Joint Stone Masonry WallsSubjected to In-Plane Combined Loading. Journal of Structural Engineering ASCE, 131(11), pp.1665-1673.

Olher, A. (1986). Zur Berechnung der Druckfestigkeit von Mauerwek unter Berücksichtigung derMehrachsigen Spannungszustande in Stein und Mortel.

Oliveira, D. (2003). Experimental and numerical analysis of blocky masonry structures undercyclic loading. Ph. D. Thesis, University of Minho, Guimaraes, Portugal.

Reglamento Colombiano de Construcción sismo resistente (NSR-10).

Roca, P. (2006). Assessment of masonry shear-walls by simple equilibrium models. *Construction and Building Materials*, 20, pp. 229-238.

Sánchez, Carlos Alberto (2004). Metodología de Diseño para Edificaciones en Mampostería Estructural Basados en la Norma Colombiana De Diseño y Construcción Sismo-Resistente, NSR-98. Proyecto de Grado. Universidad Industrial de Santander.

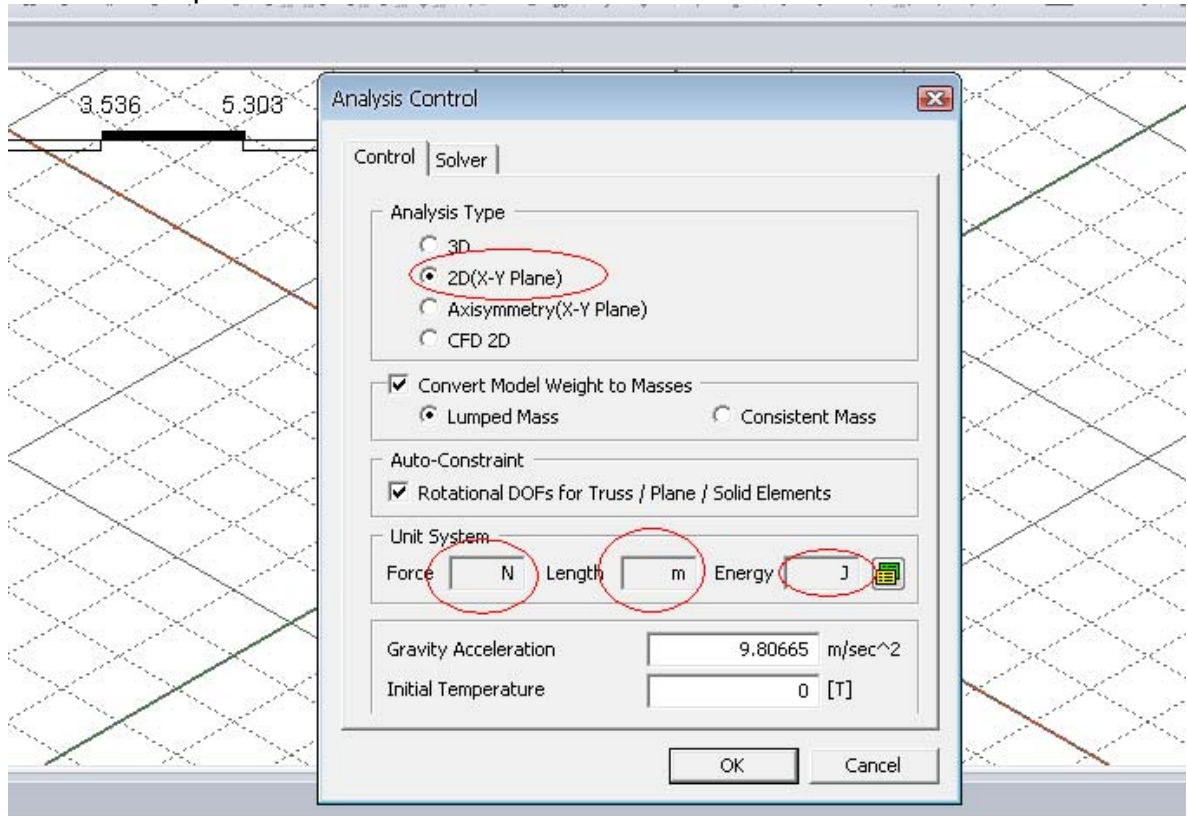
Torres Torres, Carlos Mauricio (2005). Metodología para el diseño de Muros de Mampostería Estructural Postensada. Trabajo de Monografía para Obtener El Título de Especialista en Estructuras. Universidad Industrial de Santander Abril.

Viviescas Álvaro (2009), Modelos simples para el análisis de muros de obra de fábrica cargados en su plano. UPC, Tesis Doctoral.

ANEXOS

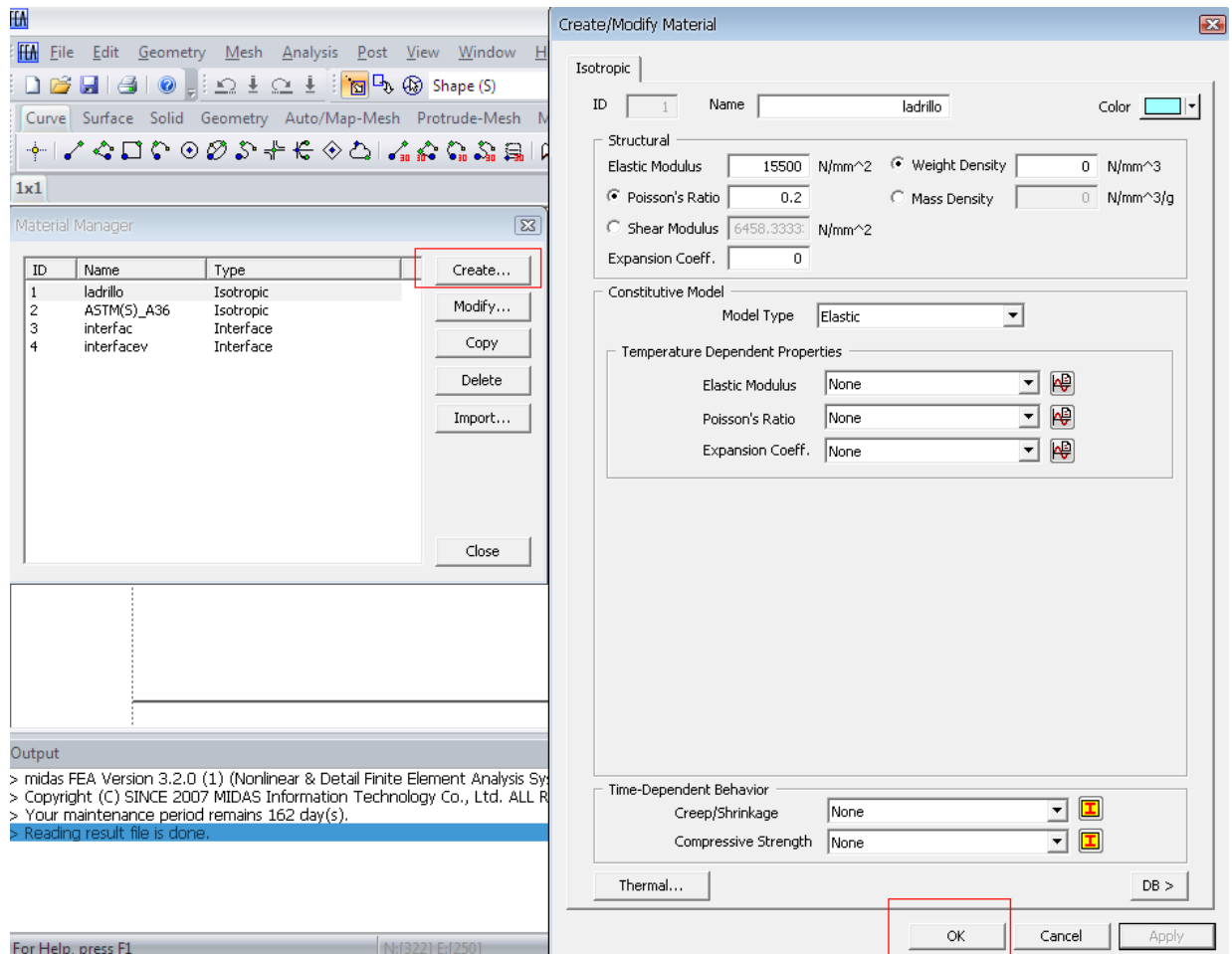
TUTORIAL MIDAS FEA

1. Se inicia definiendo en que plano se desea trabajar y las unidades que se van a utilizar para el modelo.



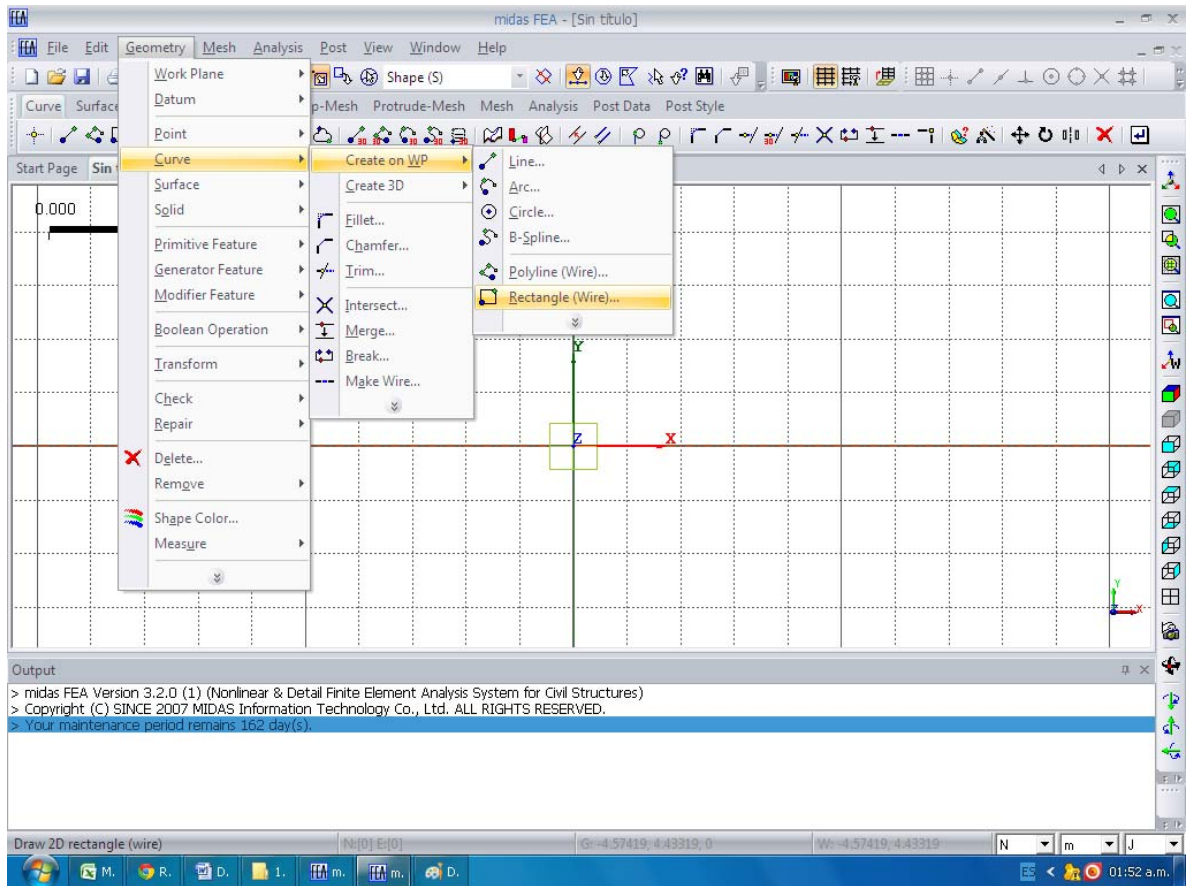
(1) (Nonlinear & Detail Finite Element Analysis System for Civil Structures)
© 1977 MIDAS Information Technology Co., Ltd. ALL RIGHTS RESERVED.
Time remains 162 day(s).

2. Se definimos los materiales que se van a utilizar en nuestro modelo. Vamos a analysis-material, y le damos crear un nuevo material.

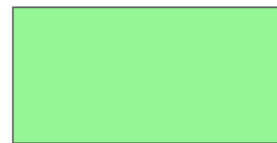
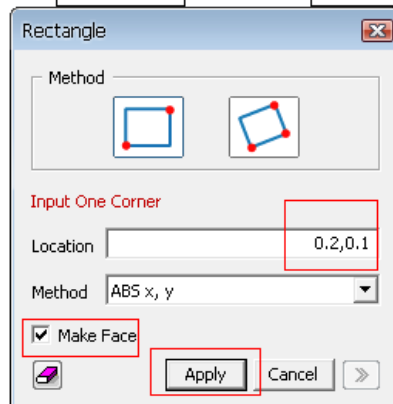


En esta sección se define todos los materiales que se van a utilizar, teniendo en cuenta si el material es isotrópico o es de interfase. como se muestran en la figura anterior.

3. Luego creamos las unidades:



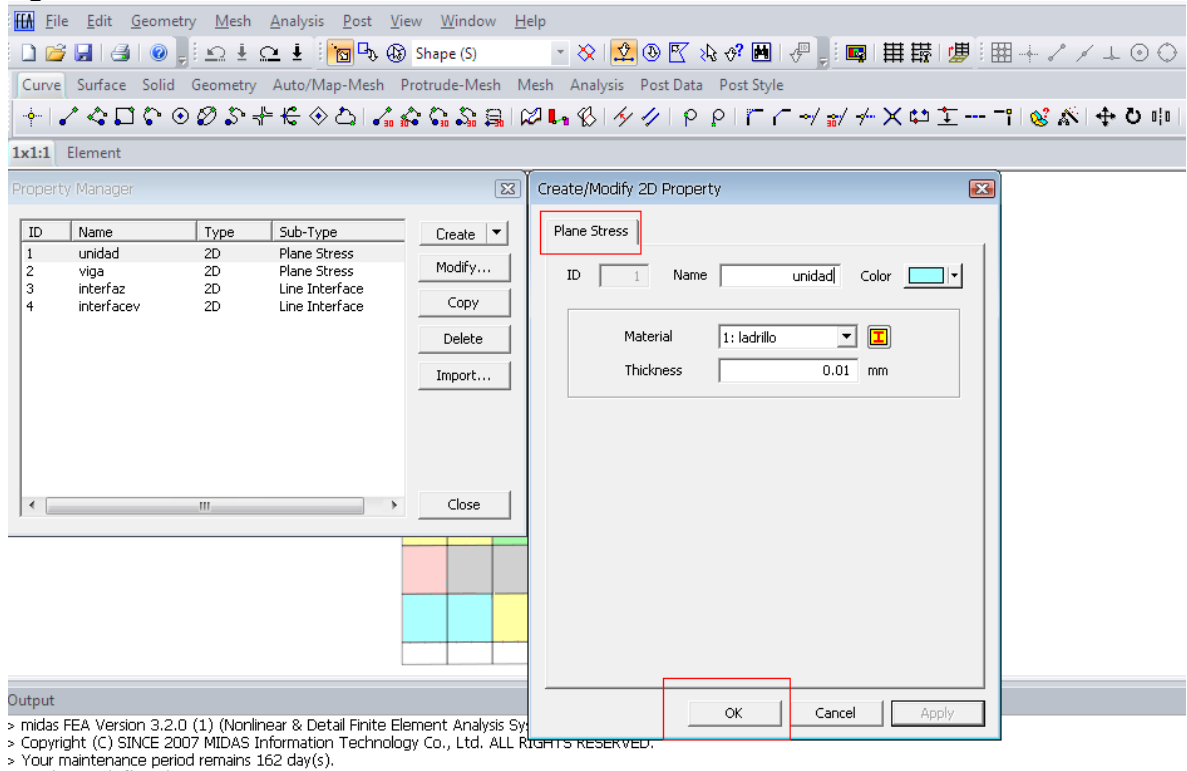
0.000 0.093 0.186 0.279 0.372

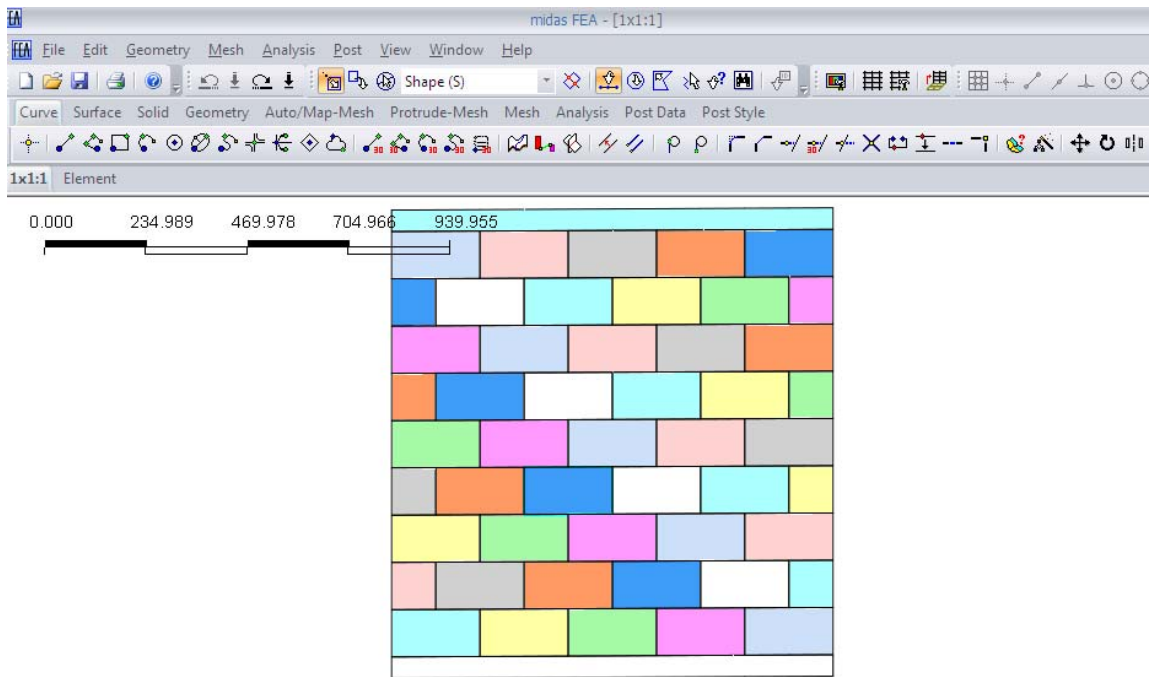


Realizamos este pasó con coordenadas hasta obtener el muro completo con las vigas respectivamente.

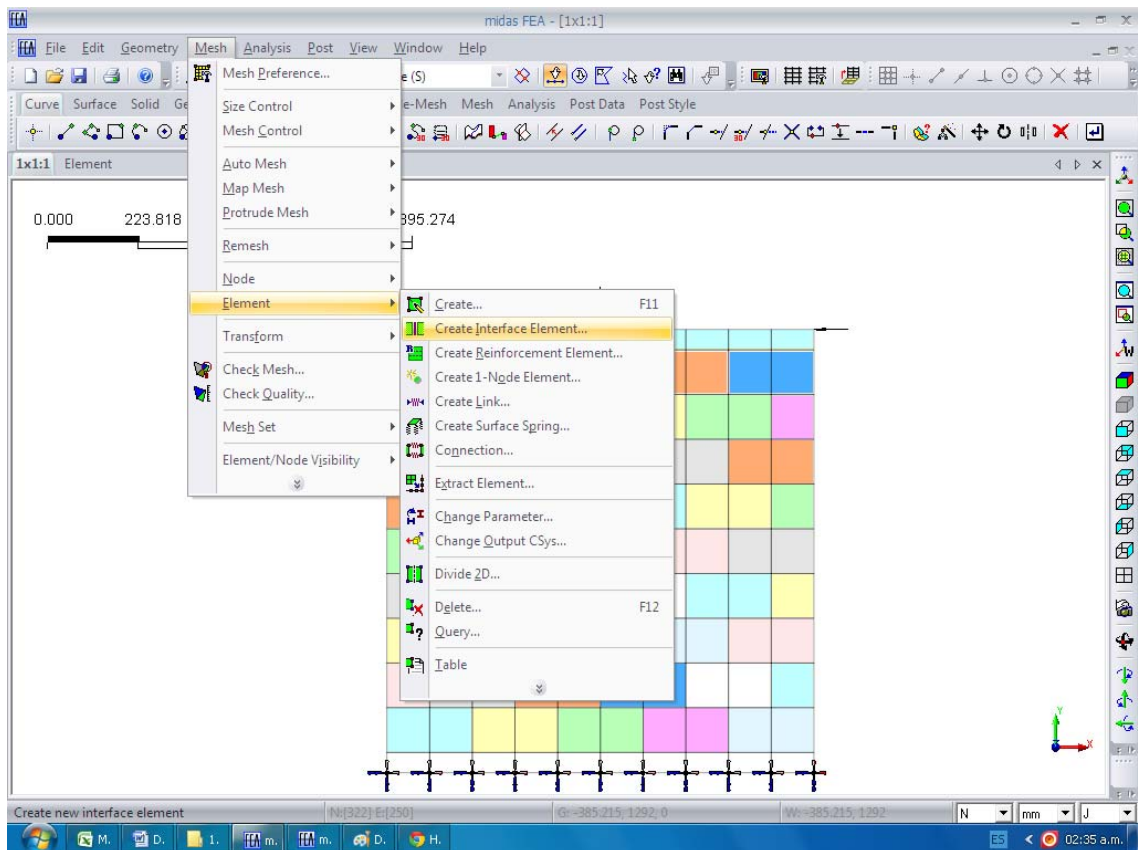
4. Posteriormente se indica en el programa cuales son las unidades y cuáles son las vigas de la siguiente forma:

Mesh-Map Mesh-on face , y se define las propiedades de las unidades y de la viga.

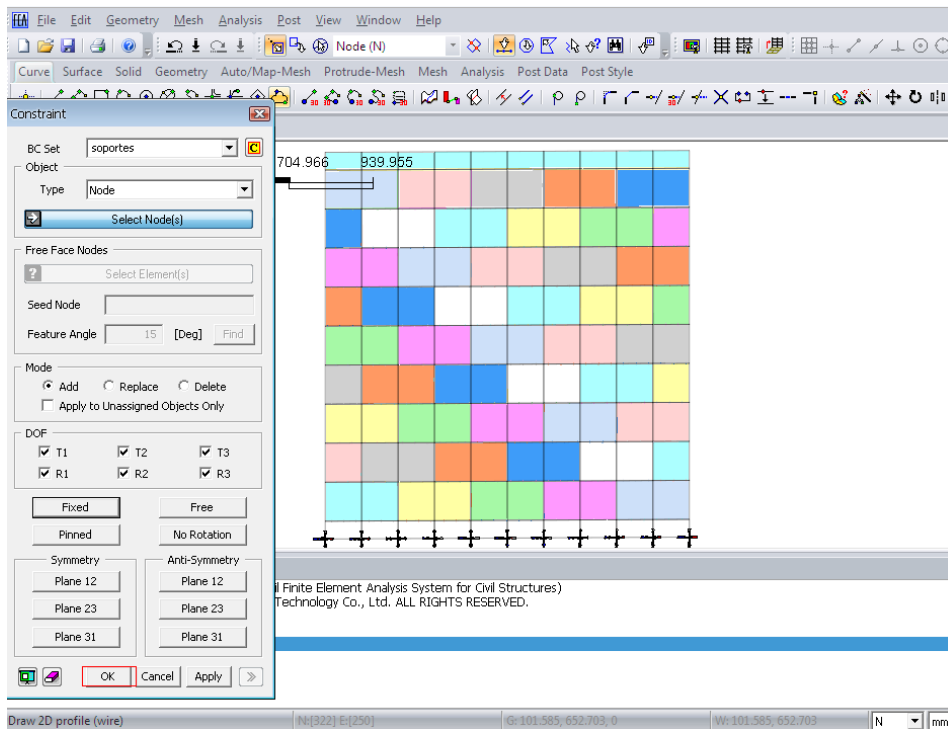
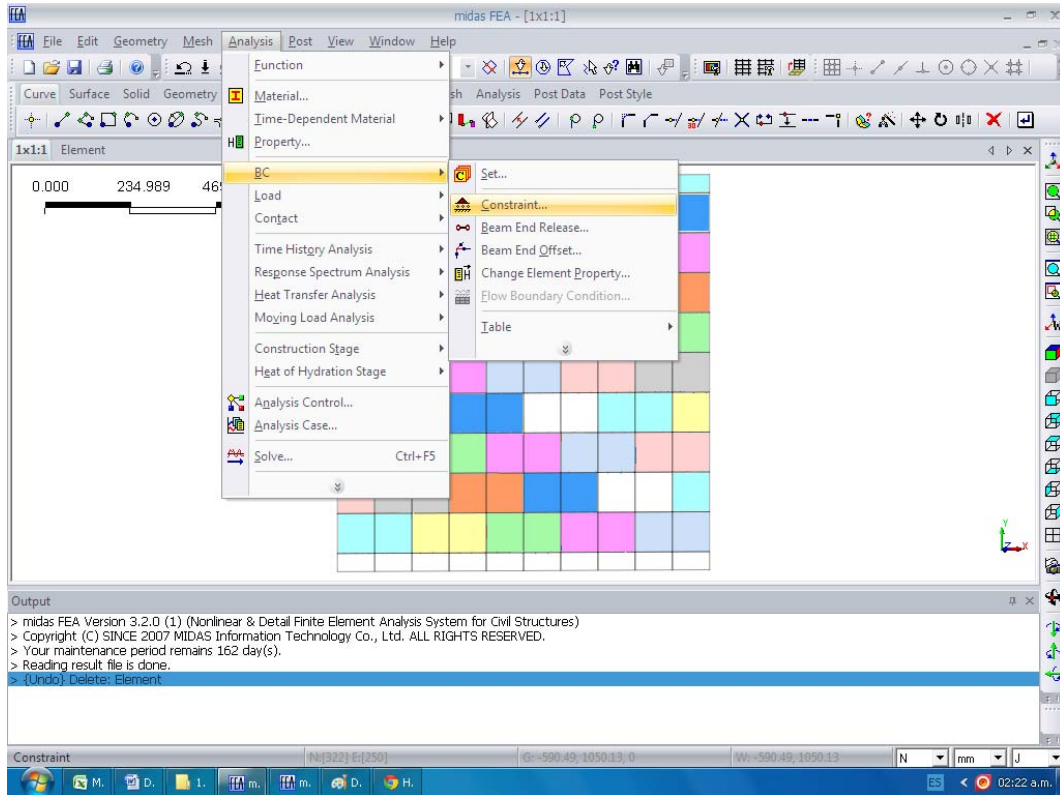




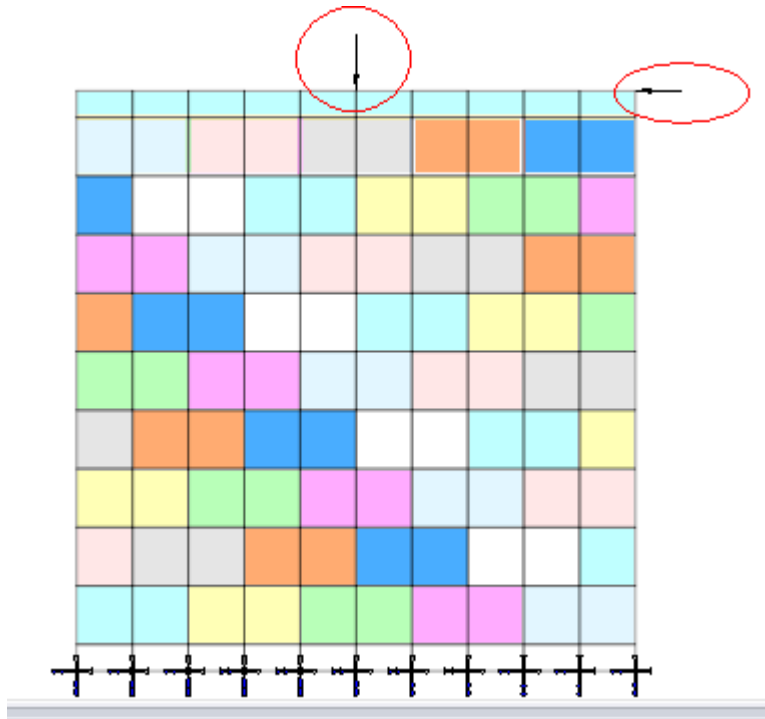
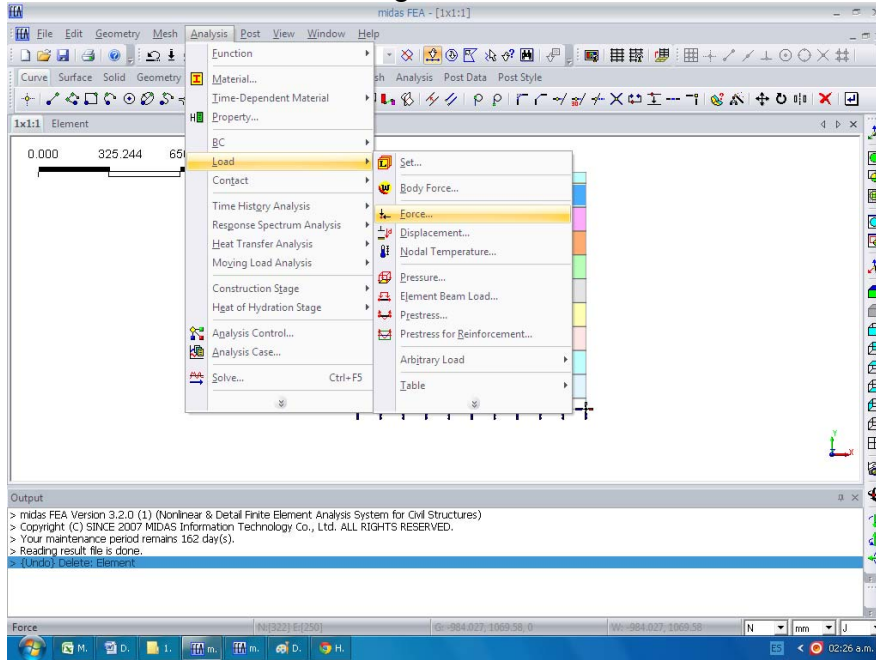
5. Después definimos las interfaces tanto horizontales como verticales.



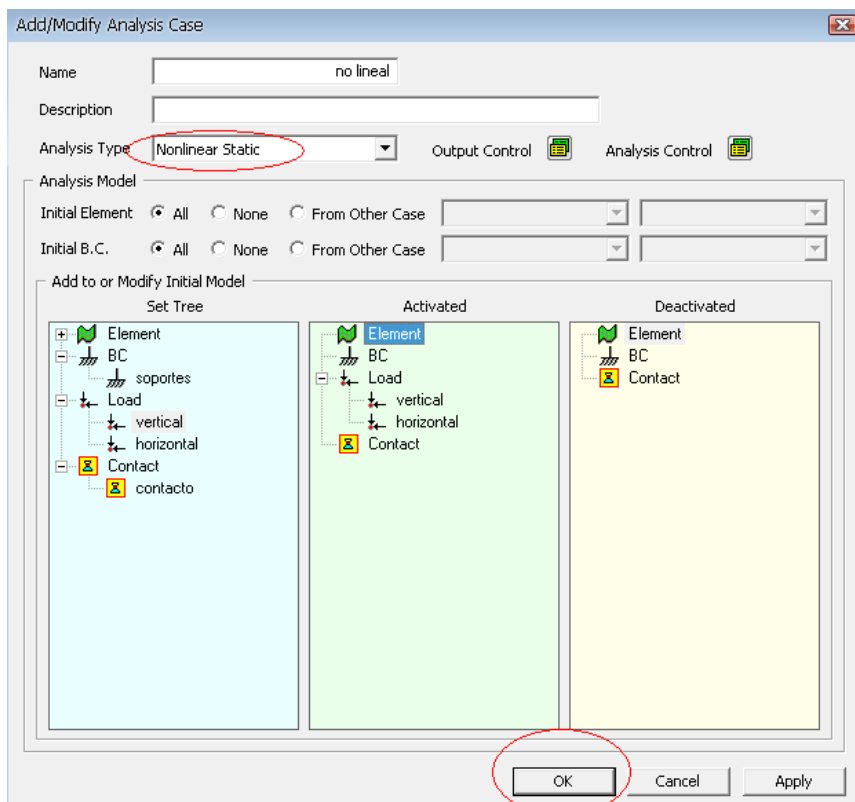
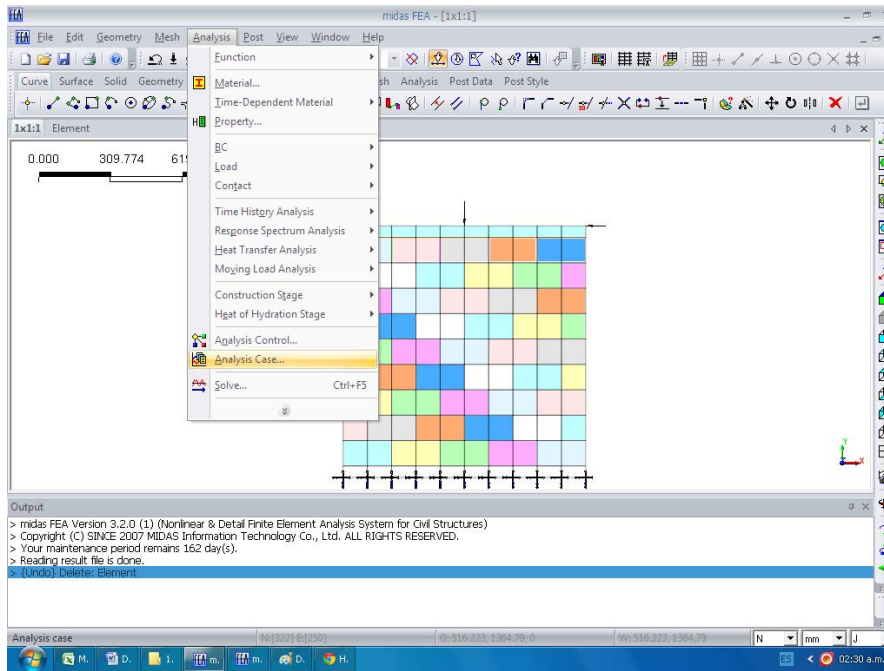
6. Lo siguiente es colocarle las restricciones al muro.



7. Introducimos las cargas.



8. Después de tener todo esto definimos el tipo de análisis que vamos a utilizar para correr el modelo.



9. Y finalmente lo corremos y obtenemos los resultados.

