

**CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE UN MURO CONSTRUIDO CON
VARIACIONES EN LA CALIDAD Y TIPOLOGÍA DE LAS UNIDADES DE
MAMPOSTERÍA**

**MAIRON MIRANDA MARZOLA
OLGA LUCIA ROJAS ESPARZA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2014

**CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE UN MURO CONSTRUIDO CON
VARIACIONES EN LA CALIDAD Y TIPOLOGÍA DE LAS UNIDADES DE
MAMPOSTERÍA**

MAIRON MIRANDA MARZOLA

OLGA LUCIA ROJAS ESPARZA

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Civil**

Director

GUSTAVO CHIO CHO

Ingeniero Civil, MsC, PhD.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-MECÁNICAS**

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

BUCARAMANGA

2014

*A Dios primeramente por habernos dado
vida y salud para terminar con éxito
esta importante etapa*

*A nuestros padres y hermanos por todo
su apoyo incondicional*

*A nuestro director de proyecto Gustavo
Chio por su paciencia, tiempo dedicado
y conocimientos aportados*

*A todas aquellas personas que de forma
directa o indirecta influyeron para que
este proyecto se hiciese realidad.*

CONTENIDO

	Pag
<i>INTRODUCCIÓN</i>	20
1. <i>MARCO TEÓRICO</i>	21
1.1. MAMPOSTERÍA ESTRUCTURAL	21
1.1.1. Unidad de mampostería	21
1.1.2. Mortero de pega	21
1.2. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MAMPOSTERÍA	22
1.2.1. Resistencia a la compresión de la mampostería	22
1.2.2. Módulo de elasticidad de la mampostería	24
1.2.3. Módulo de Cortante de la mampostería	24
1.3. CLASIFICACIÓN DE LA MAMPOSTERÍA ESTRUCTURAL	25
1.3.1. Mampostería de muros confinados	25
1.3.2. Mampostería no reforzada	26
1.4. ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL - ANÁLISIS PUSHOVER	26
1.4.1. Curva de comportamiento o capacidad	28

1.5. NIVEL DE DESEMPEÑO DE UNA ESTRUCTURA	29
1.6. Modelo matemático	30
1.6.1. Método de la diagonal equivalente	30
<i>2. ANÁLISIS</i>	<i>34</i>
2.1. PROPIEDADES GENERALES DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES	34
2.2. PROPIEDADES DE LA MAMPOSTERÍA	36
2.3. MODELAMIENTO DE MURO CONFINADO ESTÁNDAR IDEALIZADO COMO PUNTAL	39
2.4. MODELAMIENTO DE MURO CONFINADO ESTÁNDAR TIPO SHELL	42
2.5. COMPARACIÓN CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE MURO CONFINADO ESTÁNDAR IDEALIZADO COMO PUNTAL Y MURO CONFINADO ESTÁNDAR TIPO SHELL	44
2.6. CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE UN MURO CONFINADO CON VARIACIONES EN LA RESISTENCIA DE LAS UNIDADES DE MAMPOSTERÍA	45
2.7. CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE UN MURO CONFINADO CON VARIACIONES EN LA RESISTENCIA DEL MORTERO DE PEGA.	49
2.8. CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE UN MURO CONFINADO CON VARIACIONES EN LA TIPOLOGÍA DE LAS UNIDADES DE MAMPOSTERÍA	50
2.9. CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE UN MURO NO CONFINADO CON VARIACIONES EN LA RESISTENCIA, MORTERO DE PEGA Y TIPOLOGÍA DE LAS UNIDADES DE MAMPOSTERÍA	53
2.9.1. Variaciones en la resistencia	54

2.9.2. Variaciones en la resistencia del mortero de pega	57
2.9.3. Variación en la tipología de las unidades de mampostería	58
3. <i>ANÁLISIS DE RESULTADOS</i>	60
3.1. MUROS CONFINADOS	61
3.1.1. Variación en la resistencia de las unidades de mampostería	61
3.1.2. Variación en la resistencia del mortero de pega	62
3.1.3. Variación en la tipología de las unidades de mampostería	63
3.2. MUROS NO CONFINADOS	63
3.2.1. Variación en la resistencia de las unidades de mampostería	64
3.2.2. Variación en la resistencia del mortero de pega	64
3.2.3. Variación en la tipología de las unidades de mampostería	65
4. <i>CONCLUSIONES</i>	66
5. <i>RECOMENDACIONES</i>	69
<i>BIBLIOGRAFÍA</i>	70

LISTA DE TABLAS

	Pag
Tabla 1. <i>Clasificación de los morteros de pega por propiedad. Fuente: NSR-10.</i>	22
Tabla 2. <i>Resistencia mínima de las unidades para muros de mampostería confinada. Fuente: NSR-10</i>	26
Tabla 3. <i>Ecuaciones para determinar el ancho equivalente del puntal.</i>	33
Tabla 4. <i>Propiedades generales del concreto para vigas y columnas.</i>	35
Tabla 5. <i>Acero de refuerzo suministrado.</i>	36
Tabla 6. <i>Parámetros para el cálculo de $f'm$, E_m y G_m.</i>	37
Tabla 7. <i>Parámetros calculados de la mampostería.</i>	37
Tabla 8. <i>Parámetros para el cálculo del ancho equivalente por el modelo de Bazán.</i>	40
Tabla 9. <i>Cálculo del ancho equivalente por el modelo de Bazan.</i>	41
Tabla 10. <i>Modelo tipo Shell-layered/Nonlinear como dos diagonales a compresión.</i>	43
Tabla 11. <i>Propiedades de las unidades de mampostería.</i>	51
Tabla 12. <i>Modelo tipo Shell-layered/Nonlinear para muro no confinado.</i>	53

Tabla 13. <i>Punto de desempeño y relación de resistencias (variación $f'm$, muro confinado).</i>	61
Tabla 14. <i>Punto de desempeño y relación de resistencias (Variación $f'cp$, muro confinado).</i>	62
Tabla 15. <i>Punto de desempeño y relación de resistencias en la mampostería para un muro confinado</i>	63
Tabla 16. <i>Punto de desempeño y relación de resistencias (Variación $f'm$, muro no confinado).</i>	64
Tabla 17. <i>Punto de desempeño y relación de resistencias (Variación $f'cp$, muro no confinado).</i>	65
Tabla 18. <i>Punto de desempeño y relación de resistencias en la mampostería para un muro no confinado</i>	65

LISTA DE FIGURAS

	Pag
Figura 1. <i>Relaciones esfuerzo-deformación para el mortero, las unidades y los paneles de mampostería, Paulay y Priestley (1992).</i>	23
Figura 2. <i>Esquema del procedimiento usado para el análisis pushover.</i>	27
Figura 3. <i>Ejemplo de una curva de comportamiento o capacidad.</i>	29
Figura 4. <i>Modelo matemático general con mampostería incorporada.</i>	31
Figura 5. <i>Propiedades geométricas del puntal de mampostería.</i>	31
Figura 6. <i>Idealización del modelo a evaluar.</i>	34
Figura 7. <i>Vista general del modelo de pórtico utilizado.</i>	35
Figura 8. <i>Dimensiones unidad de mampostería de arcilla (H-15).</i>	36
Figura 9. <i>Modelo predeterminado de curva esfuerzo-deformación de la mampostería.</i>	38
Figura 10. <i>Curva de esfuerzo-deformación de la mampostería con f'_m [Mpa]= 2.6.</i>	39
Figura 11. <i>Modelo de muro confinado idealizado como puntal.</i>	41

Figura 12. Curva de comportamiento modelo de muro confinado idealizado como puntal, análisis pushover de SAP2000 [kN,m].	42
Figura 13. Curva de comportamiento de modelos de mampostería confinada tipo Shell divididos en 4, 16,36 y 64 partes iguales.	43
Figura 14. Modelo final tipo Shell con 64 divisiones (8x8) tomado para análisis..	44
Figura15. Superposición curvas de comportamiento de muro confinado estándar idealizado como puntal y muro confinado estándar tipo Shell.	45
Figura 16. Esquematización de la variación en la resistencia de las unidades de mampostería	46
Figura 17. Curva de comportamiento de un muro confinado que contiene unidades de mampostería de resistencia $f'_{cu} = 5\text{MPa}$	47
Figura 18. Curva de comportamiento de un muro confinado que contiene unidades de mampostería de resistencia $f'_{cu} = 3$ en su parte superior y $f'_{cu} = 5$ en su inferior.	47
Figura 19. Curva de comportamiento de un muro confinado que contiene unidades de mampostería de resistencia $f'_{cu} = 5$ en su parte superior y $f'_{cu} = 3$ en su inferior.	47
Figura 20. Curva de comportamiento de un muro confinado que contiene unidades de mampostería de resistencia $f'_{cu} = 1$ en su parte superior y $f'_{cu} = 5$ en su inferior.	48
Figura 21. Curva de comportamiento de un muro confinado que contiene unidades de mampostería de resistencia $f'_{cu} = 5$ en su parte superior y $f'_{cu} = 1$ en su inferior.	48

Figura 22. Curva de comportamiento de un muro confinado que contiene unidades de mampostería de resistencia $f'_{cu} = 1$ en su parte superior y $f'_{cu} = 3$ en su inferior.	48
Figura 23. Curva de comportamiento de un muro confinado que contiene unidades de mampostería de resistencia $f'_{cu} = 3$ en su parte superior y $f'_{cu} = 1$ en su inferior.	49
Figura 24. Curva de comportamiento de un muro confinado que contiene variaciones en el mortero de pega f'_{cp} en su parte superior e inferior.	50
Figura 25. Dimensiones tolete de arcilla.	51
Figura 26. Curva de comportamiento de un muro confinado que contiene variaciones en la tipología de las unidades de mampostería (mitad inferior = tolete de arcilla $f'_{cu} = 15 \text{ MPa}$, mitad superior = H-15 $f'_{cu} = 3 \text{ MPa}$).	51
Figura 27. Curva de comportamiento de un muro confinado que contiene variaciones en la tipología de las unidades de mampostería (mitad inferior = H-15 $f'_{cu} = 3 \text{ MPa}$, mitad superior = tolete de arcilla $f'_{cu} = 15 \text{ MPa}$).	52
Figura 28. Curvas de comportamiento comparativas de un muro confinado que contiene variaciones en la tipología de las unidades de mampostería.	52
Figura 29. Esquematación de la variación en la resistencia de las unidades de mampostería, muro sin confinar.	53
Figura 30. Curva de comportamiento de un muro no confinado que contiene unidades de mampostería de resistencia $f'_{cu} = 5$	54
Figura 31. Curva de comportamiento de un muro no confinado que contiene unidades de mampostería de resistencia $f'_{cu} = 3$ en su parte superior y $f'_{cu} = 5$ en su inferior.	54

Figura 32. Curva de comportamiento de un muro no confinado que contiene unidades de mampostería de resistencia $f'_{cu} = 1$ en su parte superior y $f'_{cu} = 5$ en su inferior.	55
Figura 33. Curva de comportamiento de un muro no confinado que contiene unidades de mampostería de resistencia $f'_{cu} = 5$ en su parte superior y $f'_{cu} = 1$ en su inferior.	55
Figura 34. Curva de comportamiento de un muro no confinado que contiene unidades de mampostería de resistencia $f'_{cu} = 5$ en su parte superior y $f'_{cu} = 3$ en su inferior.	56
Figura 35. Curva de comportamiento de un muro no confinado que contiene unidades de mampostería de resistencia $f'_{cu} = 3$ en su parte superior y $f'_{cu} = 1$ en su inferior.	56
Figura 36. Curva de comportamiento de un muro no confinado que contiene unidades de mampostería de resistencia $f'_{cu} = 1$ en su parte superior y $f'_{cu} = 3$ en su inferior.	57
Figura 37. Curva de comportamiento de un muro no confinado que contiene variaciones en el mortero de pega f'_{cp} en su parte superior e inferior.	57
Figura 38. Curva de comportamiento de un muro no confinado que contiene variaciones en la tipología de las unidades de mampostería (mitad inferior = tolete de arcilla $f'_{cu} = 15 \text{ MPa}$, mitad superior = H-15 $f'_{cu} = 3 \text{ MPa}$).	58
Figura 39. Curva de comportamiento de un muro no confinado que contiene variaciones en la tipología de las unidades de mampostería (mitad inferior = H-15 $f'_{cu} = 3 \text{ MPa}$, mitad superior = tolete de arcilla $f'_{cu} = 15 \text{ MPa}$).	58
Figura 40. Curvas de comportamiento comparativas de un muro no confinado que contiene variaciones en la tipología de las unidades de mampostería	59

Figura 41. <i>Espectro de diseño considerado en el análisis.</i>	60
Figura 42. <i>Superposición curva de comportamiento y espectro de diseño.</i>	60
Figura 43. <i>Cortante basal vs relación de resistencias de la mampostería $f'm1/f'm2$ en un muro confinado.</i>	62
Figura 44. <i>Cortante basal vs relación de resistencias de la mampostería $f'm1/f'm2$ en un muro confinado.</i>	63
Figura 45. <i>Cortante basal vs relación de resistencias de la mampostería $f'm1/f'm2$ en un muro no confinado</i>	64
Figura 46. <i>Cortante basal vs relación de resistencias de la mampostería $f'm1/f'm2$ en un muro no confinado</i>	65

RESUMEN

TITULO: CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE UN MURO CONSTRUIDO CON VARIACIONES EN LA CALIDAD Y TIPOLOGÍA DE LAS UNIDADES DE MAMPOSTERÍA*

AUTORES: MAIRON MIRANDA MARZOLA
OLGA LUCÍA ROJAS ESPARZA**

PALABRAS CLAVE: Pushover, mampostería, curva de comportamiento, puntal, punto de desempeño.

DESCRIPCIÓN: Se presentan los análisis y resultados del estudio de muros que contienen variaciones en la calidad y tipología de las unidades de mampostería. El estudio se realiza mediante un modelamiento no lineal (Pushover), haciendo uso de un programa de análisis estructural, en este caso SAP2000. En este estudio se analizan las variaciones en los cortantes basales mediante el análisis de las respectivas curvas de comportamiento, de muros confinados y no confinados, que varían en altura la resistencia y tipología de sus unidades de mampostería. Para llevar a cabo el modelamiento en SAP2000 se plantea inicialmente un modelo guía de muro, simulado por el método del puntal o diagonal equivalente, que se utilizará con el fin de calibrar un modelo final tipo Shell modelado según los parámetros guías de SAP2000, para usarlo como base en el estudio de los muros. Finalmente, se analizan los resultados (curvas de comportamiento) obtenidos de cada uno de los muros, este análisis se realiza obteniendo el cortante en cada punto de desempeño para los modelos realizados en cada variación (resistencia de las unidades de mampostería, resistencia del mortero de pega y tipología de las unidades), tanto para el caso confinado como para el no confinado, y luego se relaciona en una curva de comparación entre dicho cortante y la relación de resistencias contenidas en el muro.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Gustavo Chio Cho, Ingeniero Civil, PhD.

ABSTRACT

TITLE: CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE UN MURO CONSTRUIDO CON VARIACIONES EN LA CALIDAD Y TIPOLOGÍA DE LAS UNIDADES DE MAMPOSTERÍA*

AUTHORS: MAIRON MIRANDA MARZOLA
OLGA LUCÍA ROJAS ESPARZA**

KEYWORDS: Pushover, masonry, behavior curve, strut, performance point.

DESCRIPTION: The analysis and results of the walls study that contains variations in quality and typology of the masonry units are presented. The study is carried out by a means of a non-linear model (pushover), and using a structural analysis program, in this case SAP2000. In this study, the variations in the base shear are analyzed through the analysis of the corresponding behavior curves from confined and non-confined walls that vary the resistance and typology of their masonry units in height. In order to carry out this model in SAP2000, a wall guide model is provided, which is simulated by the equivalent strut or diagonal method that will be used to calibrate a final Shell-like model which is modeled according to the SAP2000 guide parameters. It will be used as a base in the walls study. Finally, the results (performance curves) obtained from each of the walls are analyzed, the analysis is performed by obtaining the shear at each performance point to the models carried out in each variation (resistance of masonry units, mortar paste resistance and type of units), for the confined case as well as for the unconfined one, and then it relates to a comparison curve between this shear and the resistance ratio contained in the wall.

* Work Degree

** Faculty of Engineering Physics and Mechanics. School of Civil Engineering. Director: Gustavo Chio Cho, Civil Engineer, PhD.

INTRODUCCIÓN

El objetivo de este artículo es mostrar los resultados del análisis no lineal de un muro de mampostería, confinado y no confinado, construido con variaciones en la resistencia y tipología de sus unidades de mampostería. Los estudios serán realizados mediante el modelamiento en un programa de análisis estructural por el método no lineal (Pushover), destacando variaciones en las propiedades del material tales como resistencia, dimensiones de las unidades de mampostería y la resistencia en el mortero de pega, para finalmente establecer las curvas de comportamiento obtenidas para cada variación y hacer las respectivas interpretaciones, usando como punto de partida el cortante basal correspondiente al punto de desempeño y la relación de resistencias a la compresión presentes en el muro.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. MAMPOSTERÍA ESTRUCTURAL

La mampostería estructural es un sistema constructivo tradicional que consiste en un material compuesto por unidades de albañilería, en este caso ladrillos, asentadas con mortero. Tienen además la característica de soportar cargas en su plano adicionales a su peso propio.

1.1.1. Unidad de mampostería La unidad de mampostería o ladrillo es sin duda la pieza fundamental en este sistema, se define como un mampuesto de forma octaédrica que se fabrica con una variedad de materiales como barro, arcilla, pizarra o la mezcla de estos. Para las construcciones de mampostería estructural, las unidades de mampostería que se utilizan están fabricadas en concreto, cerámica, piedra o material sílico-calcáreo. También se clasifican por el tipo de perforación, es decir, vertical, horizontal y sin perforación (o sólidas).

1.1.2. Mortero de pega Los morteros son mezclas de materiales cementantes, agregado fino y agua, su función esta en unir las unidades de mamposteria. Deben tener buena plasticidad, consistencia y ser capaces de retener el agua minima para la hidratación del cemento, y, además, garantizar su adherencia con las unidades de mampostería para desarrollar su acción cementante.

El Reglamento Colombiano de Construccion sismo-resistente hace una clasificación de los morteros teniendo en cuenta su propiedad y proporción. En la Tabla 1 se muestra esta clasificación únicamente por propiedad.

Tabla 1. Clasificación de los morteros de pega por propiedad.

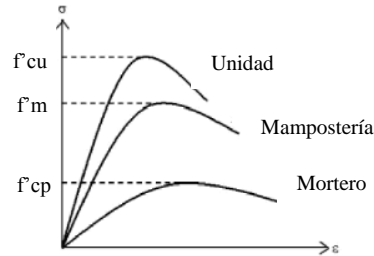
Mortero tipo	Especificación de los morteros por propiedad		
	Resistencia mínima a la compresión f'_{cp} [MPa]	Flujo en (%)	Retención Mínima de Agua
H	22.5	115 – 125	75%
M	17.5	115 – 125	75%
S	12.5	110 – 120	75%
N	7.5	105 – 115	75%

Fuente: Reglamento Colombiano de Construcción Sismo resistente, Título D.

1.2. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MAMPOSTERÍA

2.2.1. Resistencia a la compresión de la mampostería La mampostería trabaja de forma óptima ante esfuerzos de compresión, esto se debe a que las unidades y el mortero tienen características esfuerzo-deformación diferentes, por lo tanto, al ser sometidos a un mismo esfuerzo, se produce una interacción entre ambos donde las unidades restringen las deformaciones del mortero, esto ocasiona que en el mortero se produzcan esfuerzos de compresión de dirección transversal, y en las unidades, esfuerzos transversales de tracción. Este fenómeno provoca que la resistencia a la compresión de la mampostería se encuentre por debajo de la resistencia de las unidades aisladas como se muestra en la figura 1.

Figura 1. Relaciones esfuerzo-deformación para el mortero, las unidades y los paneles de mampostería, Paulay y Priestley (1992).



El Reglamento Colombiano de Construcción Sismo resistente especifica tres procedimientos para determinar la resistencia a la compresión de la mampostería: por medio de registros históricos, por determinación experimental sobre muretes de prueba y por medio de ensayos sobre materiales individuales. Este último método se basa en la calidad de los materiales empleados, en este caso, cuando no se puede determinar mediante ensayos de muretes, el valor de f'_m se puede determinar mediante la siguiente expresión:

$$R_m = \left(\frac{2h}{75+2h}\right) f'_{cu} + \left(\frac{50k_p}{75+2h}\right) f'_{cp} \leq 0.8f'_{cu} \quad (1)$$

$$f'_m = 0.75R_m \quad (2)$$

Donde:

f'm = resistencia nominal a la compresión de la mampostería, MPa

f'cu = resistencia especificada a la compresión de la unidad de mampostería medida sobre área neta, MPa

f'cp = resistencia especificada a la compresión del mortero de pega, MPa

h = altura de la unidad de mampostería, en mm

kp = factor de corrección por absorción de la unidad, adimensional

kp = 1.4 para unidades de concreto,

$k_p = 0.8$ para unidades de arcilla o sílico- calcáreas

2.2.2. Módulo de elasticidad de la mampostería Las propiedades de deformación, tanto de las unidades aisladas como del mortero, juegan un papel crucial en la determinación exacta del módulo de elasticidad de la mampostería.

El Reglamento Colombiano de Construcción Sismo resistente, cuando hay ausencia de los valores experimentales, determina los siguientes:

Para mampostería en concreto

$$E_m = 900f'_m \leq 20000 \text{ MPa} \quad (3)$$

Para mampostería en arcilla

$$E_m = 750f'_m \leq 20000 \text{ MPa} \quad (4)$$

2.2.3. Módulo de Cortante de la mampostería El módulo de cortante (G_m) es una propiedad muy importante para evaluar la rigidez lateral de los muros. Las NTC-mampostería 2004 y el Reglamento Colombiano de construcción Sismo resistente determinan el siguiente valor de cortante:

$$G_m = 0.4E_m \quad (5)$$

Además, la relación entre el coeficiente de Poisson y el módulo de cortante para materiales isótropos compresibles se determina de la siguiente manera:

$$G_m = \frac{E_m}{2(1+\nu_m)} \quad (6)$$

1.3. CLASIFICACIÓN DE LA MAMPOSTERÍA ESTRUCTURAL

La mampostería estructural puede ser clasificada en mampostería de muros diafragma, muros confinados, reforzada, parcialmente reforzada y no reforzada según el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo resistente (NSR-10). Para el caso de este proyecto, se estudiarían dos de estos tipos, la mampostería de muros confinados y la no reforzada.

2.3.1. Mampostería de muros confinados Es la construcción con base en piezas de mampostería unidas por medio de mortero, reforzada de manera principal con elementos de concreto reforzado construidos alrededor del muro, confinándolo y que cumple los requisitos del capítulo D.10 del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo resistente NSR-10. Este sistema estructural se clasifica, para efectos de diseño sismo resistente, como uno de los sistemas con capacidad moderada de disipación de energía en el rango inelástico (DMO).

La mampostería de muros confinados se debe construir utilizando unidades de concreto, de arcilla cocida o sílico-calcareas. Las unidades de mampostería pueden ser de perforación vertical, de perforación horizontal o macizas.

2.3.1.1. Valores mínimos para la resistencia de las unidades, f'_{cu} Las unidades de mampostería que se empleen en la construcción de muros de mampostería confinada deben tener al menos las resistencias mínimas que se dan en la siguiente tabla.

Tabla 2. Resistencia mínima de las unidades para muros de mampostería confinada.

Tipo de Unidad	f'cu (MPa)
Tolete de arcilla	15
Bloque de perforación horizontal de arcilla	3
Bloque de perforación vertical de concreto o de arcilla (sobre área neta)	5

Fuente: Reglamento Colombiano de Construcción Sismo resistente, Título D.

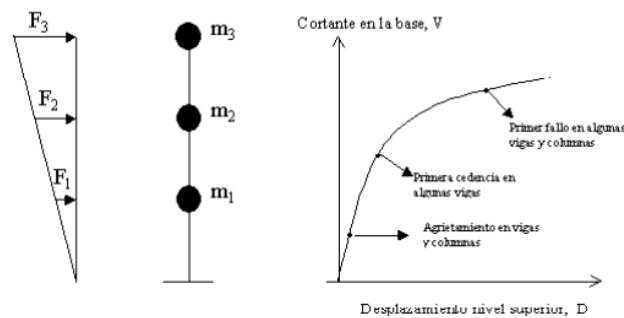
2.3.2. Mampostería no reforzada Es la construcción con base en piezas de mampostería unidas por medio de mortero que no cumple las cuantías mínimas de refuerzo establecidas para la mampostería parcialmente reforzada. Debe cumplir los requisitos del capítulo D.9 del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo resistente NSR-10. Este sistema estructural se clasifica, para efectos de diseño sismo resistente, como uno de los sistemas con capacidad mínima de disipación de energía en el rango inelástico (DMI).

2.4. ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL - ANÁLISIS PUSHOVER

Este método es desarrollado como una herramienta de análisis indispensable para satisfacer la necesidad de los ingenieros por comprender cada vez más el comportamiento de las estructuras en el rango inelástico, considerando que los métodos tradicionales de análisis lineales no son suficientemente precisos. El análisis estático no lineal es una técnica simple y eficiente para estudiar la capacidad, resistencia- deformación, de una estructura bajo una distribución esperada de fuerzas inerciales, consiste en que primero actúan las cargas gravitacionales en la estructura produciéndose las primeras deformaciones, luego pasan a actuar las cargas laterales que se incrementan, paso a paso, en una dirección hasta que se forma la primera rótula plástica y se presenta una redistribución de rigidez de la estructura, y así prosigue un proceso iterativo hasta

que la estructura falla totalmente. Así se obtiene una gráfica, que muestran el corte basal V , relacionado con el desplazamiento en el nivel superior. Utilizando este procedimiento es posible identificar la secuencia de agrietamiento, cedencia y fallo de los componentes, los estados límites de servicio y la historia de deformaciones y cortantes de la estructura que corresponde a la curva de capacidad. En la figura 2 se muestra un esquema del procedimiento general del análisis pushover.

Figura 2. Esquema del procedimiento usado para el análisis pushover.



Fuente: Pérez Leal Eduwin. Alternativas para el diseño sísmico de edificios altos de mampostería [Tesis de maestría]. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia-Michoacán 2011.

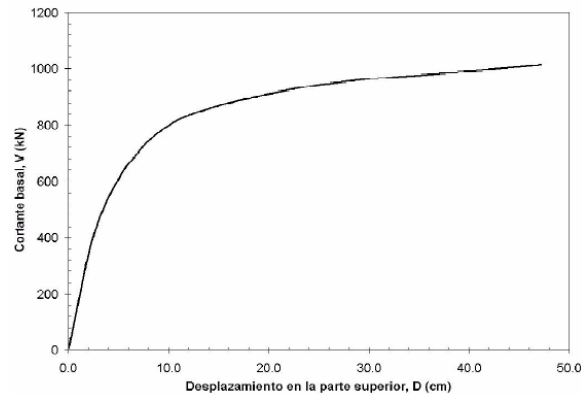
No obstante, es importante tener en cuenta que, aunque este procedimiento se basa en los desplazamientos y trata la no linealidad, tiene algunas limitaciones fundamentales que deben ser consideradas en la aplicación e interpretación de los resultados, a continuación se describen algunas de estas limitaciones:

- Existe un consenso general en que el daño estructural es función tanto de la deformación como de la energía. El procedimiento utilizado en el análisis pushover implícitamente asume que el daño depende solo de la deformación lateral de la estructura, despreciando los efectos de duración y disipación de la energía acumulada. Por lo tanto, la aplicabilidad de esta medida del daño es algo simplista, particularmente para estructuras no dúctiles.

- El análisis pushover se centra sólo en energía de deformación de una estructura, con lo cual, este procedimiento puede conducir a despreciar la energía asociada a las componentes dinámicas de las fuerzas, es decir, la energía cinética y la energía de amortiguamiento viscoso.
- Los efectos de torsión producidos por las variaciones de resistencia y rigidez no pueden ser considerados con un análisis pushover, debido a que es un análisis en dos dimensiones.
- El patrón de cargas solo considera fuerzas sísmicas laterales e ignora por completo la carga sísmica vertical.
- Los cambios progresivos en las propiedades modales que ocurren en la estructura cuando experimenta cedencia no lineal cíclica durante un sismo, no son considerados en este tipo de análisis.

2.4.1. Curva de comportamiento o capacidad Para evaluar la capacidad y comportamiento inelástico de la edificación se construye una curva que representa la variación del cortante basal y los desplazamientos del último piso debido a la aplicación de cargas laterales que van incrementando monolíticamente (ver figura 3). El modelo matemático de la estructura se modifica, teniendo en cuenta la formación de rotulas plásticas, la degradación de la rigidez y la pérdida de resistencia de los elementos.

Figura 3. Ejemplo de una curva de comportamiento o capacidad.



Fuente: Pérez Leal Eduwin. Alternativas para el diseño sísmico de edificios altos de mampostería [Tesis de maestría]. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia-Michoacán 2011.

La edificación responde a la aplicación de las cargas, desplazándose lateralmente hasta que alcanza un valor de desplazamiento máximo ($\Delta_{m\acute{a}x.}$). El par de valores Δ y V (Cortante Basal), representan un punto en la curva de capacidad de la edificación, de manera que para determinar otros puntos se carga la estructura nuevamente con fuerzas mayores y así hasta generar un mecanismo de colapso de la estructura.

2.5. NIVEL DE DESEMPEÑO DE UNA ESTRUCTURA

Durante los últimos años se ha identificado que los parámetros más relevantes en el diseño de una estructura son los desplazamientos y las deformaciones, por lo tanto, se ha promovido el uso de espectros de respuesta en el formato (S_a vs S_d), porque poseen una gran ventaja debido a que la capacidad y la demanda pueden superponerse en un mismo diagrama, permitiendo una solución gráfica del nivel de desempeño de una estructura, que es útil para el análisis de vulnerabilidad y daño sísmico de una estructura.

Para comparar directamente la demanda con la capacidad de la estructura, ambos parametros se convierten a un grupo de coordenadas espectrales usando las características dinámicas del modo fundamental, que representa la estructura como un sistema de un solo grado de libertad; a esta representación se le conoce con el nombre de *espectro capacidad*. La demanda sísmica se representa por medio de un espectro inelástico en formato (S_a vs S_d), que considera la respuesta no lineal de la estructura. El espectro inelástico se obtiene a partir de la reducción del espectro elástico lineal, por medio de un amortiguamiento histerético equivalente. Para determinar el punto de desempeño de la estructura se superponen los espectros de demanda y capacidad sísmica. Este punto debe cumplir con las siguientes condiciones: 1) debe estar sobre el espectro de capacidad para representar a la estructura en un determinado desplazamiento y 2) debe estar sobre el espectro de demanda (reducido a partir del espectro elástico) que representa la demanda no lineal en el mismo desplazamiento estructural.

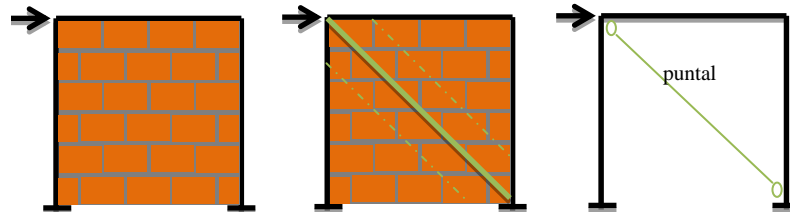
2.6. MODELO MATEMÁTICO

Cuando se incorpora la mampostería en el análisis sísmico de estructuras, se genera un gran cambio en la matriz de rigidez, teniendo en cuenta que esta ahora contendrá el aporte estructural del pórtico como de la mampostería, es por esto que se hace necesario el planteamiento de un modelo matemático que simule de forma ideal el comportamiento del conjunto estructural. Existen tres modelos matemáticos que simulan este comportamiento: el método de la columna ancha o análoga, el método de la diagonal equivalente y el método simplificado. En el presente trabajo se hará énfasis en el método de la diagonal equivalente.

2.6.1. Método de la diagonal equivalente A lo largo de los años, diversos autores han realizado estudios para determinar la mejor manera en que la mampostería actúa con el marco estructural y se ha determinado que la mejor

manera de representar el comportamiento de esta es reemplazarla por un puntal que trabaje sólo a compresión axial (ver figura 4).

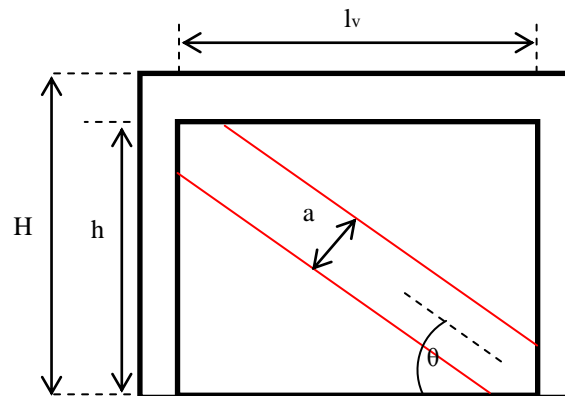
Figura 4. Modelo matemático general con mampostería incorporada.



2.6.1.1. Modelos para determinar el ancho equivalente del puntal

Stafford Smith en 1962, en base a varios experimentos y estudios analíticos determinó que el ancho equivalente del puntal normalmente varía entre el 10% y el 25% de la longitud del puntal, existen además otras expresiones de diversos autores para determinar el valor del ancho equivalente a teniendo en cuenta algunos parámetros geométricos mostrados en la figura 5.

Figura 5. Propiedades geométricas del puntal de mampostería.



Holmes (1961): El primer modelo para determinar el ancho equivalente del puntal fue realizado por Holmes en 1961. A pesar de obtener muy buenos resultados en cuanto a la determinación de fuerzas, las deflexiones presentadas siempre se mostraban más bajas de lo real.

Mainstone (1971): Mainstone descubrió que la falta de adherencia de la mampostería y la variación de las propiedades elásticas pueden provocar una gran variación en el comportamiento normal de la estructura. Fue el primero en adoptar el parámetro de rigidez equivalente λ .

Bazán (1980): Determinó, a diferencia de Mainstone que el parámetro de rigidez equivalente era una relación directa entre las propiedades de las columnas adyacentes y las propiedades de corte de la mampostería.

Liauw y Kwan (1984): Estos investigadores realizaron muchos estudios de modelos a escala de la diagonal equivalente en pórticos de hormigón armado, pero únicamente trabajaron para θ igual a 25° y 50° , que, según sus publicaciones, son los ángulos más comunes en la práctica de la ingeniería.

Paulay y Priestley (1992): Estos investigadores consideraron un valor más conservador en el cálculo del ancho efectivo de la diagonal, este resulta ideal para propósitos de diseño.

FEMA (1997): En la guía FEMA-273, se propone una expresión para determinar el ancho equivalente del puntal. El parámetro de rigidez equivalente λ se determina con la ecuación de Mainstone.

Tabla 3. Ecuaciones para determinar el ancho equivalente del puntal.

Ecuaciones generales	$L = \sqrt{l_v^2 + h^2}$ (7)
Modelo de Holmes	$\alpha = \frac{L}{3}$ (8)
Modelo de Mainstone	$\lambda = \left[\frac{E_m t \text{sen} 2\theta}{4E_c I_{col} h} \right]^{\frac{1}{4}}$ (9)
	$\alpha = 0.16\lambda^{-0.3} L$ (10)
Modelo de Bazán	$G_m = 0.4E_m$ (11)
	$A_m = l_v t$ (12)
	$\lambda = \frac{E_c A_c}{G_m A_m}$ (13)
	$\alpha = (0.35 + 0.022\lambda)h$ (14)
Modelo de Liauw y Kwan	$\alpha = \frac{0.95h \cos\theta}{\sqrt{\lambda H}}$ (15)
Modelo de Paulay y Priestley	$\alpha = \frac{L}{4}$ (16)
Modelo de la FEMA	$\alpha = 0.175 (\lambda H)^{-0.4} L$ (17)

Donde:

L = longitud de la diagonal equivalente

lv = luz libre de la viga

h = altura de la mampostería

Em = módulo de elasticidad de la mampostería

θ = ángulo cuya tangente viene dada por la relación h/lv

Ec = módulo de elasticidad de las columnas

Icol = momento de inercia promedio de las columnas adyacentes

Ac = área promedio de las columnas adyacentes

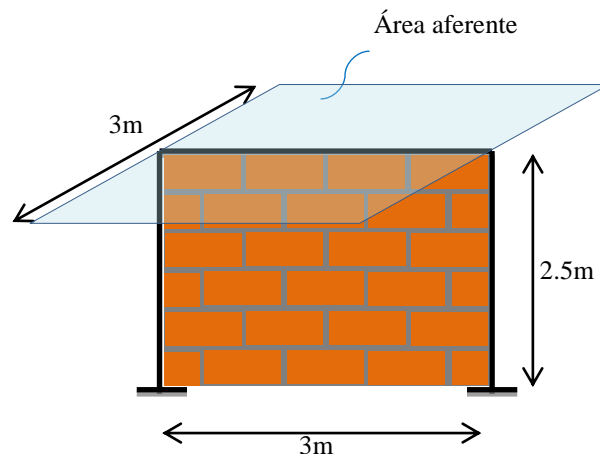
Gm = módulo de corte de la mampostería

Am = área de la sección transversal de la mampostería

3. ANÁLISIS

Inicialmente se realizaron dos modelos estándares, un modelo de muro confinado idealizado como puntal y modelado como *Frame* y otro modelo de muro confinado tipo *Shell*, con el fin de realizar una calibración del muro tipo *Shell* y a partir de ese muro estándar realizar las variaciones correspondientes para su respectivo análisis. A los modelos mencionados se les aplicó una carga lineal de 15 kN/m, correspondientes a las cargas muertas en un área aferente de nueve metros cuadrados: peso de la placa, muros y acabados, como se aprecia en la figura 6. Además, cabe destacar que los parámetros usados para los elementos de confinamiento no fueron variados en los diferentes modelos.

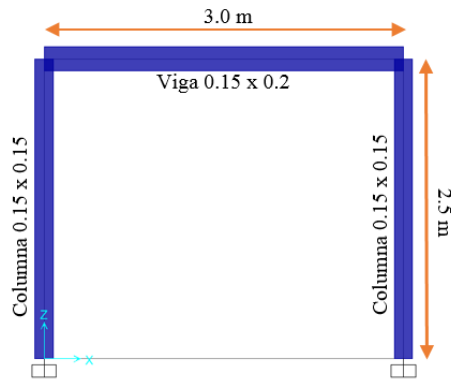
Figura 6. Idealización del modelo a evaluar.



3.1. PROPIEDADES GENERALES DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES

Se tomaron medidas típicas de vigas y columnas de concreto encontradas comúnmente en viviendas de dos pisos construidas con mampostería confinada, columnas (0.15 x 0.15) y viga (0.15 x 0.2), de igual manera se trabajó con un pórtico común de 3.0m de separación horizontal y 2.5m de altura (distancias medidas centro a centro de vigas y columnas) como se muestra en la figura 7.

Figura 7. Vista general del modelo de pórtico utilizado.



Las propiedades del concreto utilizado fueron establecidas de acuerdo a las comúnmente encontradas en las construcciones locales de mampostería confinada, en donde en la mayoría de casos la resistencia a la compresión ronda el mínimo establecido por el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo resistente, la curva esfuerzo deformación usada fue la establecida por el método de Takeda y que se encuentra por defecto en SAP2000, en cuanto al refuerzo, se suministraron barras longitudinales No3 tanto en vigas como en columnas y estribos de confinamiento No 2, las principales propiedades utilizadas están tabuladas a continuación:

Tabla 4 Propiedades generales del concreto para vigas y columnas.

Resistencia a la compresión - f'_c (Mpa)	17,5
Módulo de elasticidad (Mpa)	19667
Densidad (kN/m^3)	24

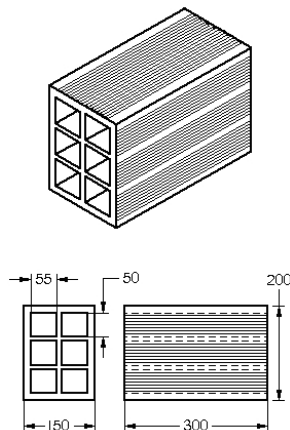
Tabla 5. Acero de refuerzo suministrado.

Viga (0.15 x 0.2)	
Refuerzo longitudinal	Refuerzo transversal
Superior : 2 barras No 3	1 e # 2 @ 0.15m
Inferior : 2 barras No 3	
Columna (0.15 x 0.15)	
Refuerzo longitudinal	Refuerzo transversal
4 barras No 3 (sobre toda el área)	1 e # 2 @ 0.15m
Recubrimiento (m)	0.04

3.2. PROPIEDADES DE LA MAMPOSTERÍA

Las unidades de mampostería a utilizar serán de arcilla con las siguientes dimensiones:

Figura 8. Dimensiones unidad de mampostería de arcilla (H-15).



Fuente: Recurso electrónico: <http://Ladrillosytubos.com/>.

En cuanto a la resistencia a la compresión, módulo de elasticidad y módulo de cortante de la mampostería se utilizaron los siguientes parámetros para su cálculo:

Tabla 6. *Parámetros para el cálculo de $f'm$, E_m y G_m .*

h [mm]	200
f'_{cu} [Mpa]	5
K_p	0,8
f'_{cp} [Mpa]	7,5

Cabe resaltar que se utilizó la resistencia mínima a la compresión (f'_{cp}) definida por la norma para un mortero tipo N y un K_p de 0.8 por ser unidades de mampostería de arcilla.

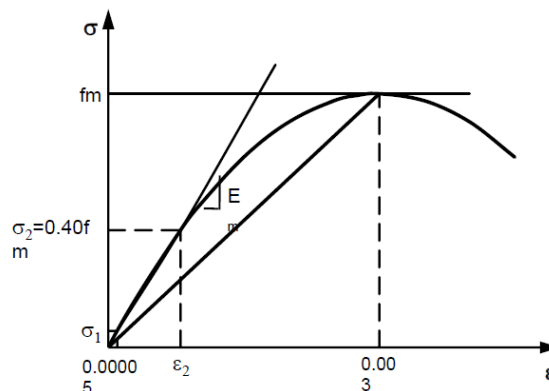
Realizado el cálculo siguiendo el procedimiento anteriormente definido por la norma se obtuvieron los siguientes valores:

Tabla 7. *Parámetros calculados de la mampostería.*

R_m	3.4
Resistencia de la mampostería a la compresión - (Ecuación 2)	
$f'm$ [Mpa]	2.6
Módulo de elasticidad - (Ecuación 4)	
E_m [Mpa]	1916.7
Módulo de cortante - (Ecuación 5)	
G_m [Mpa]	766.7
Módulo de poisson – (Ecuación 6)	
ν	0.25

Establecidos los parámetros de resistencia y diferentes módulos de la mampostería se procede definir el comportamiento de la misma mediante la determinación de la curva esfuerzo – deformación. Para determinar la curva esfuerzo-deformación se utilizó un modelo de curva ya predeterminado mediante ensayos y procesos experimentales realizados en la Universidad Autónoma de México relacionado en la figura 9.

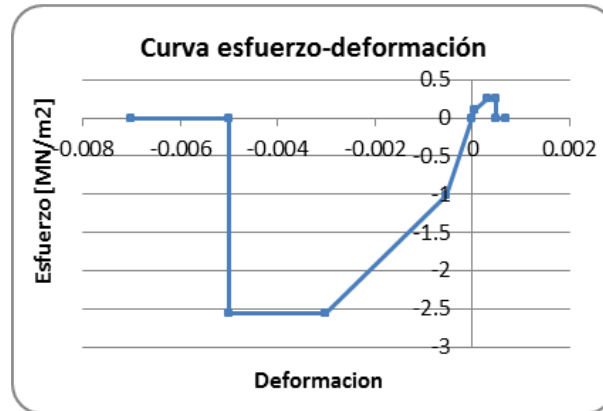
Figura 9. Modelo predeterminado de curva esfuerzo-deformación de la mampostería



Fuente: Taveras Montero Manuel. Revisión de las recomendaciones para modelar y analizar estructuras de mampostería confinada ante carga lateral [Tesis de maestría]. Universidad Autónoma de México, México 2008.

Tomando como base la anterior curva es posible trazar mediante el análisis la curva esfuerzo-deformación de la mampostería, teniendo en cuenta que se asumió un comportamiento a tensión mínimo correspondiente al 10% de los valores a compresión. El formato utilizado es el mismo que el usado por el programa SAP2000 en donde en el primer cuadrante se grafican los valores a tensión y en el tercer cuadrante los valores a compresión (ver figura 10).

Figura 10. Curva de esfuerzo-deformación de la mampostería con f'_m [Mpa]= 2.6.



Calculadas todas las propiedades correspondientes a la mampostería es posible crear los modelos a analizar en SAP2000 y crear un tipo de material con dichas propiedades para luego ser asignado al elemento *frame* que simula el puntal o a los *Shell* que simulan los muros de mampostería. Se realiza el mismo procedimiento siempre que se modifique cualquier parámetro de la mampostería.

3.3. MODELAMIENTO DE MURO CONFINADO ESTÁNDAR IDEALIZADO COMO PUNTAL

Establecido el pórtico base a utilizar y las principales propiedades de la mampostería se procede a modelarla mediante el método del puntal. Primeramente es necesario analizar qué ancho equivalente de puntal tomar de acuerdo a todos los métodos inicialmente mencionados, para ello se tienen en cuenta los parámetros que son usados por cada método a la hora de realizar dicho cálculo.

Se descarta el uso del modelo de Liaw y Kwan por ser este práctico únicamente para $\theta=25^\circ$ o 50° , teniendo en cuenta que en el caso en estudio el ángulo no corresponde a ninguno de estos dos valores. Por otro lado los modelos de

Holmes, Paulay y Priestley no tienen en cuenta ningún parámetro en relación a las propiedades de la mampostería y finalmente los métodos de Mainstone y FEMA aunque tienen en cuenta el módulo de elasticidad como propiedad de la mampostería no relacionan la sección total transversal de la misma.

De este modo se optó por usar el método de Bazán pues además de tener en cuenta propiedades del pórtico y parámetros del material como el módulo de cortante, considera la sección transversal de la mampostería. Además, la expresión para calcular el módulo de cortante (G_m) en este método, es igual a la consideración que supone la norma NSR-10, lo que nos brinda cierta confiabilidad en cuanto al uso del método.

Los parámetros a usar para el cálculo del ancho equivalente por el método de Bazán son los siguientes:

Tabla 8. *Parámetros para el cálculo del ancho equivalente por el modelo de Bazán.*

COLUMNA	
a [m]	0.15
b [m]	0.15
f'c [MPa]	17.5
Ec [Mpa]	19661.5
MURO	
lv [m]	2.85
t (espesor mamp. [m])	0.15
Gm (Mpa)	766.7
Em [Mpa]	1916.7
h [m]	2.3

Con dichos parámetros se procede al cálculo del ancho equivalente (a), obteniendo los siguientes resultados:

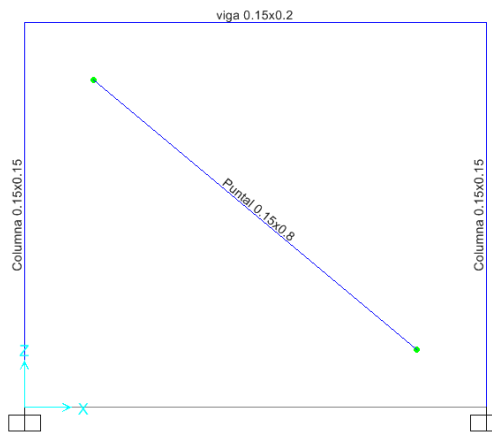
Tabla 9. Cálculo del ancho equivalente por el modelo de Bazan.

MODELO DE BAZAN	
Am [m] - (Ecuación 12)	0.43
λ - (Ecuación 13)	1.35
a [m] - (Ecuación 14)	0.87

Para efectos de cálculo y con el fin de brindarle seguridad a el diseño se redondeó el valor del ancho equivalente **a = 0,8 m**.

Con todos los parámetros necesarios ya determinados es posible realizar el modelo en el programa de análisis SAP2000 (ver figura 11). Al elemento tipo frame que simula el puntal se le deben asignar todas las propiedades correspondientes a la mampostería y debe ser modelado con el espesor normal del muro y el ancho equivalente previamente calculado.

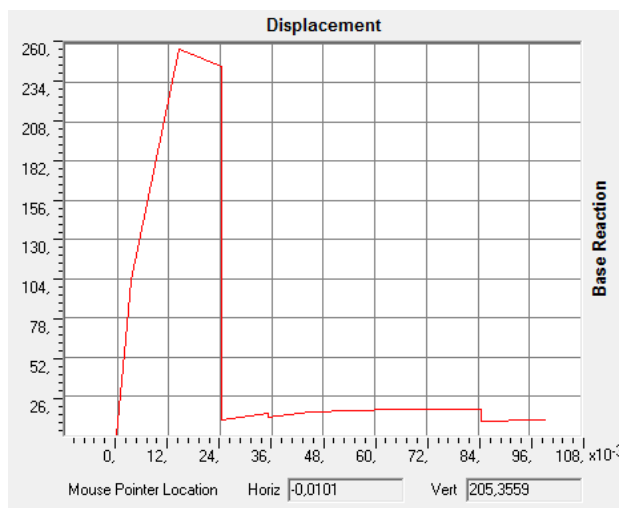
Figura 11. Modelo de muro confinado idealizado como puntal.



Terminado el modelo, se proceden realizar los respectivos casos de carga dentro del programa de análisis SAP2000, es necesario realizar un caso de cargas

gravitacionales no lineales (CGNL) en donde se consideran los efectos de las cargas muertas y por ultimo un caso de carga PUSHOVER que será el encargado de realizar el análisis estático no lineal. Realizados los casos de carga se corre el modelo y se obtiene la curva de comportamiento correspondiente (ver figura 12).

Figura 12. Curva de comportamiento modelo de muro confinado idealizado como puntal, análisis pushover de SAP2000 [kN,m].



3.4. MODELAMIENTO DE MURO CONFINADO ESTÁNDAR TIPO SHELL

Se procedió a modelar la mampostería dentro del programa de análisis SAP2000 como elementos de área tipo Shell, este paso fue una de las acciones más importantes a lo largo del proyecto pues se tuvo que incursionar dentro de los manuales y la forma de análisis del programa con el fin de indagar como hacer que los elementos de área tipo Shell actuaran como un puntal que trabaje solo axialmente y a compresión y la manera de asignar las propiedades de no linealidad. Para esto se utilizaron los elementos de área Shell-Layered/Nonlinear y se ajustaron de acuerdo a lo establecido en los manuales.

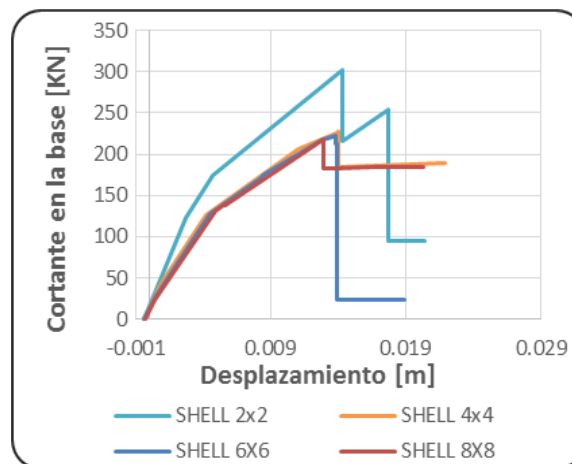
Tabla 10. Modelo tipo Shell-layered/Nonlinear como dos diagonales a compresión. Fuente: [4].

Layer	Type	Material	th	d	ang	n	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}
1	Membr	Conc	18.00	0.	45°	1	N	-	-
2	Membr	Conc	18.00	0.	-45°	1	N	-	-

Para este proyecto, y simulando el comportamiento de la mampostería, se tomó sólo una diagonal a compresión, se asignó el ángulo de la horizontal con respecto a la diagonal del pórtico en análisis y se estableció el material especificado con las propiedades de la mampostería especificado anteriormente (Curva esfuerzo – deformación específica del material).

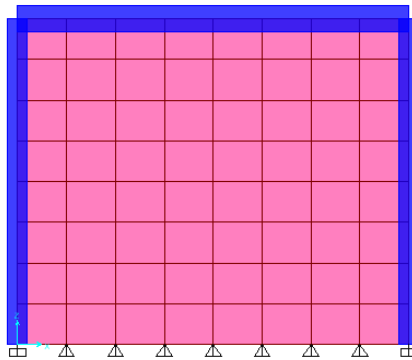
De esta manera se obtuvo el modelo completo y listo para ser ejecutado. Se dividió el área del muro en 4, 16, 36 y 64 partes iguales con el fin de analizar las curvas de comportamiento resultantes en cada caso y resolver que modelo definitivo tomar (ver figura 13).

Figura 13. Curva de comportamiento de modelos de mampostería confinada tipo Shell divididos en 4, 16,36 y 64 partes iguales.



Después de realizar el análisis de las curvas de comportamiento resultantes se observó que luego de dividir el muro en 16 partes, el comportamiento de la estructura se mantuvo igual casi en su totalidad, por esto se tomó para el análisis el modelo con mayor divisiones (64 partes – 8x8, ver figura 14) con el fin de obtener mayor precisión en los resultados.

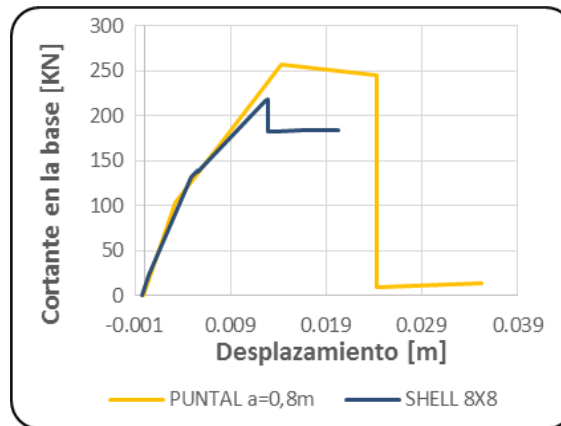
Figura 14. *Modelo final tipo Shell con 64 divisiones (8x8) tomado para análisis.*



3.5. COMPARACIÓN CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE MURO CONFINADO ESTÁNDAR IDEALIZADO COMO PUNTAL Y MURO CONFINADO ESTÁNDAR TIPO SHELL

Obtenidas las curvas de comportamiento de los modelos a calibrar se procedió a superponerlas con el fin de analizar qué tanta discrepancia hay entre los mismos (ver figura 15). Cabe resaltar que el modelo guía es el de puntal, pues este método ya ha sido verificado previamente con innumerables ensayos de laboratorio y mundialmente aceptado.

Figura15. Superposición curvas de comportamiento de muro confinado estándar idealizado como puntal y muro confinado estándar tipo Shell.

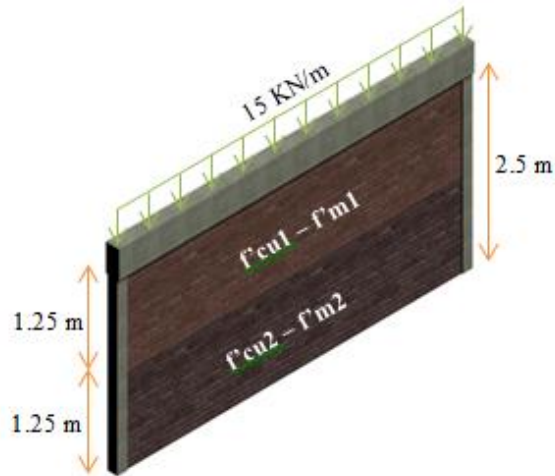


El comportamiento de las dos curvas es similar en los tramos de interés, es decir hasta los puntos máximos de falla, cabe resaltar que no se tiene en cuenta el comportamiento de las curvas luego de la falla porque no es el fin de este proyecto estudiar el comportamiento de los muros después de este punto, por ende se hará uso del modelo tipo Shell con 64 divisiones como base para realizar los análisis con las modificaciones en las propiedades pertinentes.

3.6. CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE UN MURO CONFINADO CON VARIACIONES EN LA RESISTENCIA DE LAS UNIDADES DE MAMPOSTERÍA

Establecido el modelo *Shell* final a utilizar se proceden a realizar las variaciones correspondientes a la resistencia en las unidades de mampostería. Cabe resaltar que para realizar esta variación la altura del muro se dividió en la mitad, es decir, en la mitad superior del muro se asignó un valor $f'cu_1$ y en la mitad inferior un valor $f'cu_2$ (ver figura 16).

Figura 16. Esquematización de la variación en la resistencia de las unidades de mampostería



El valor f'_{cu} se varió asumiendo inicialmente un valor de resistencia para la unidad de mampostería de 5 MPa y a partir de este se disminuyó a 3 MPa, que es el valor mínimo establecido por el Reglamento Colombiano de Construcción Sismoresistente, y 1 MPa. Cabe destacar que para el estudio se tomaron estos valores de resistencia críticos teniendo en cuenta que el problema en estudio corresponde a viviendas en las que generalmente no se cumplen los requisitos mínimos expuestos en la NSR-10. Así, se generaron los modelos en SAP, haciendo los cambios correspondientes para cada una de las mitades del muro y se obtuvieron 6 curvas de comportamiento que se relacionan a continuación.

Figura 17. Curva de comportamiento de un muro confinado que contiene unidades de mampostería de resistencia $f'_{cu} = 5\text{MPa}$

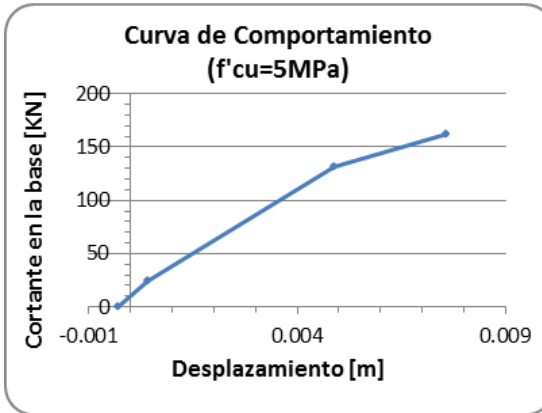


Figura 18. Curva de comportamiento de un muro confinado que contiene unidades de mampostería de resistencia $f'_{cu} = 3$ en su parte superior y $f'_{cu} = 5$ en su inferior.

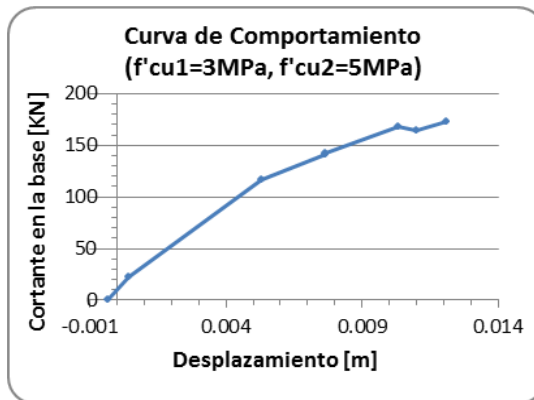


Figura 19. Curva de comportamiento de un muro confinado que contiene unidades de mampostería de resistencia $f'_{cu} = 5$ en su parte superior y $f'_{cu} = 3$ en su inferior.

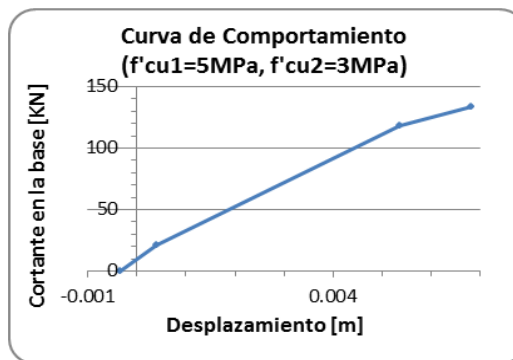


Figura 20. Curva de comportamiento de un muro confinado que contiene unidades de mampostería de resistencia $f'_{cu} = 1$ en su parte superior y $f'_{cu} = 5$ en su inferior.

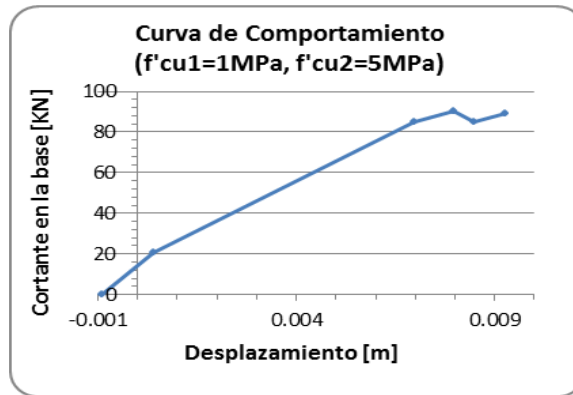


Figura 21. Curva de comportamiento de un muro confinado que contiene unidades de mampostería de resistencia $f'_{cu} = 5$ en su parte superior y $f'_{cu} = 1$ en su inferior.

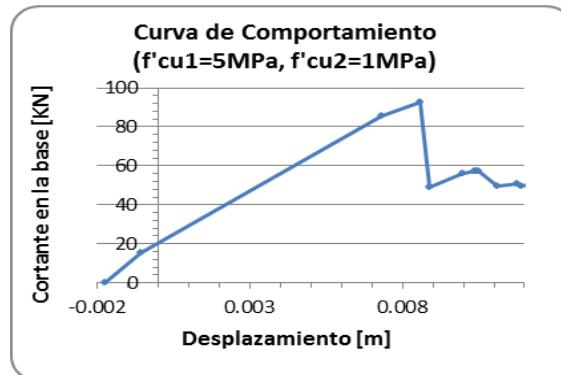


Figura 22. Curva de comportamiento de un muro confinado que contiene unidades de mampostería de resistencia $f'_{cu} = 1$ en su parte superior y $f'_{cu} = 3$ en su inferior.

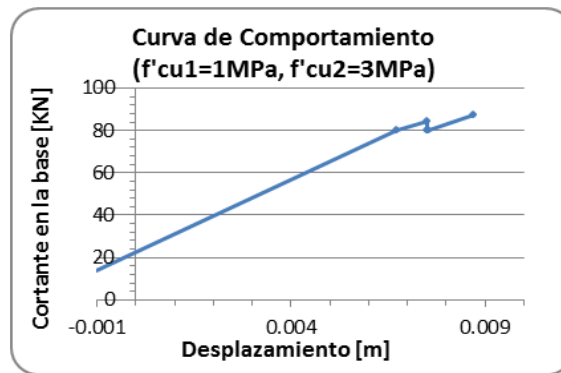
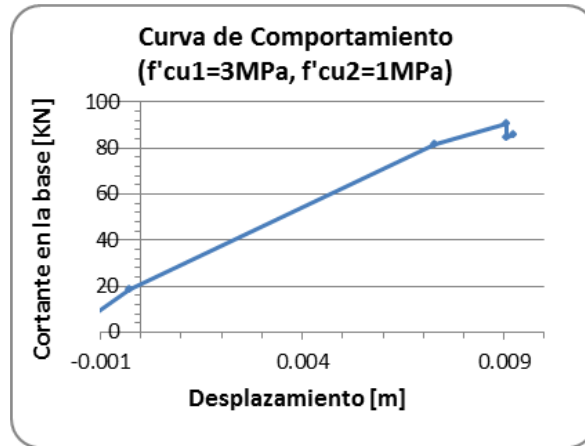


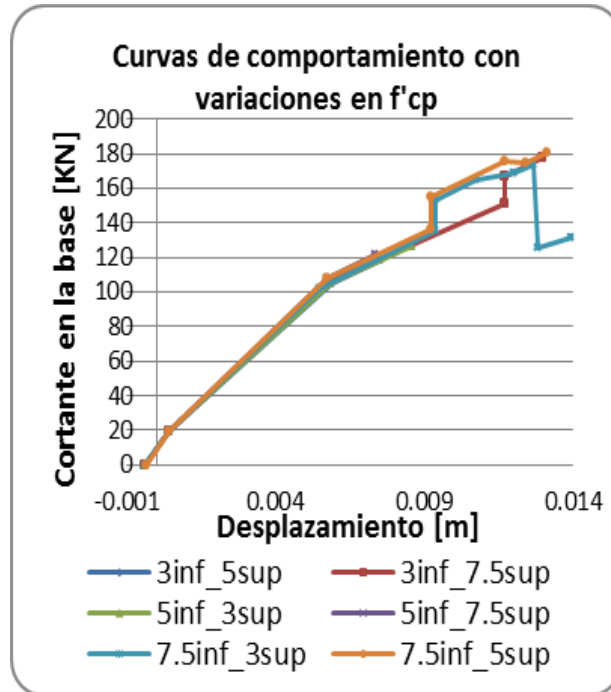
Figura 23. Curva de comportamiento de un muro confinado que contiene unidades de mampostería de resistencia $f'_{cu} = 3$ en su parte superior y $f'_{cu} = 1$ en su inferior.



3.7. CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE UN MURO CONFINADO CON VARIACIONES EN LA RESISTENCIA DEL MORTERO DE PEGA.

Con el fin de generar una discretización en el mortero de pega y analizar el comportamiento del muro cuando el mortero en la parte superior es diferente al que se aplica en la inferior se realizaron diferentes modelos en los que se variaron los valores de resistencia f'_{cp} para obtener las curvas de comportamiento correspondientes. Los valores f'_{cp} correspondientes a la resistencia del mortero se variaron a partir del valor mínimo de resistencia $f_{cp}=7.5\text{MPa}$, dado por la NSR-10, y disminuyendo a partir de este a 5 MPa y 3 MPa (ver figura 24).

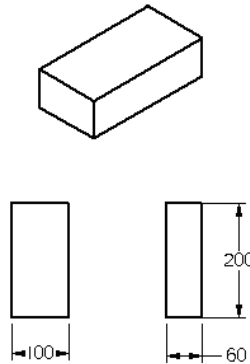
Figura 24. Curva de comportamiento de un muro confinado que contiene variaciones en el mortero de pega f'_{cp} en su parte superior e inferior.



3.8. CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE UN MURO CONFINADO CON VARIACIONES EN LA TIPOLOGÍA DE LAS UNIDADES DE MAMPOSTERÍA

En la variación de la tipología se tomaron dos unidades de mampostería, el ladrillo cerámico H-15 y el tolete de arcilla (ver figura 25), con resistencias f'_{cu} de 3 MPa y 15 MPa respectivamente, teniendo en cuenta que estas equivalen al valor mínimo dictado por el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo resistente. El valor de la resistencia del mortero de pega f'_{cp} se mantuvo para los dos modelos en 7.5 MPa que corresponden también al valor mínimo asignado por la NSR-10.

Figura 25. Dimensiones tolete de arcilla.



Fuente: Recurso electrónico: <http://Ladrillosytubos.com/>.

Tabla 11. Propiedades de las unidades de mampostería

Tipo de Unidad	f'cu [Mpa]	f'cp [Mpa]	f'm [Mpa]
Tolete	15	7.5	6176
H-15	3	7.5	1666

Figura 26. Curva de comportamiento de un muro confinado que contiene variaciones en la tipología de las unidades de mampostería (mitad inferior = tolete de arcilla $f'cu=15MPa$, mitad superior = H-15 $f'cu=3 MPa$).

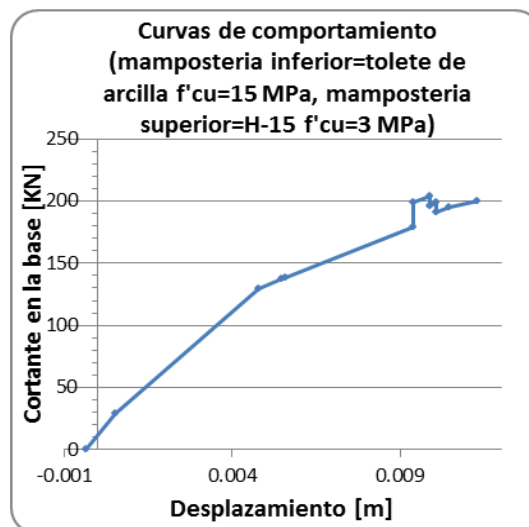


Figura 27. Curva de comportamiento de un muro confinado que contiene variaciones en la tipología de las unidades de mampostería (mitad inferior = H-15 $f'_{cu}=3$ MPa, mitad superior = tolete de arcilla $f'_{cu}=15$ MPa).

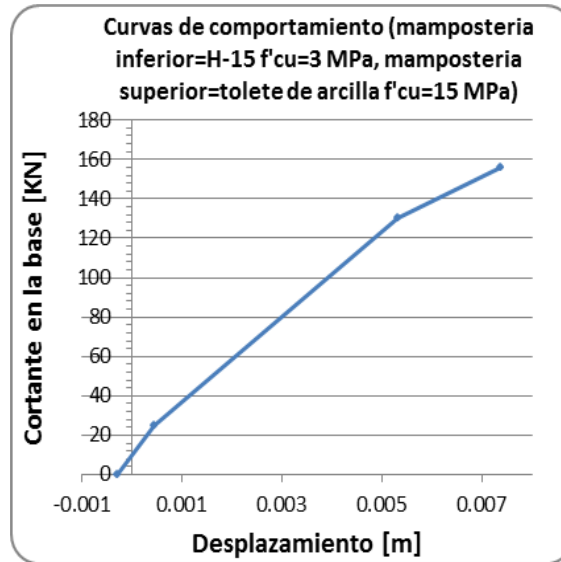
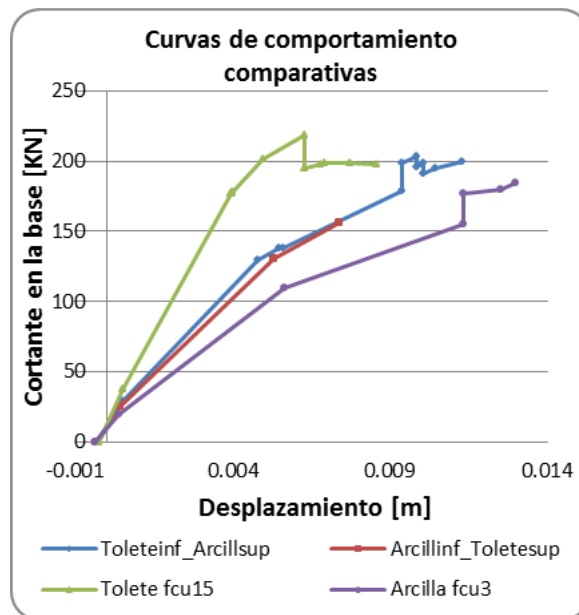


Figura 28. Curvas de comportamiento comparativas de un muro confinado que contiene variaciones en la tipología de las unidades de mampostería.



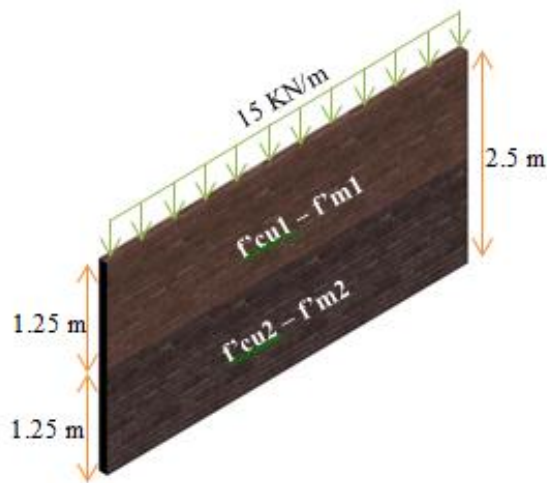
3.9. CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE UN MURO NO CONFINADO CON VARIACIONES EN LA RESISTENCIA, MORTERO DE PEGA Y TIPOLOGÍA DE LAS UNIDADES DE MAMPOSTERÍA

Para el modelo no confinado las variaciones realizadas fueron exactamente las mismas que en el caso confinado, sin embargo fue necesario modificar las propiedades de los muros tipo Shell-layered/Nonlinear creados en el programa de análisis de manera que el comportamiento ya no sea el de un puntal como normalmente se comporta un muro confinado. Para realizar estas variaciones se tuvo en cuenta la teoría y los ajustes establecidos en los manuales de SAP2000 para trabajar la no linealidad de un muro no confinado:

Tabla 12. Modelo tipo Shell-layered/Nonlinear para muro no confinado.

Layer	Type	Material	th	d	ang	n	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}
1	Shell	Ceramico	0.15	0	0°	5	N	N	N

Figura 29. Esquematación de la variación en la resistencia de las unidades de mampostería, muro sin confinar.



3.9.1. Variaciones en la resistencia

Figura 30. Curva de comportamiento de un muro no confinado que contiene unidades de mampostería de resistencia $f'_{cu} = 5$.

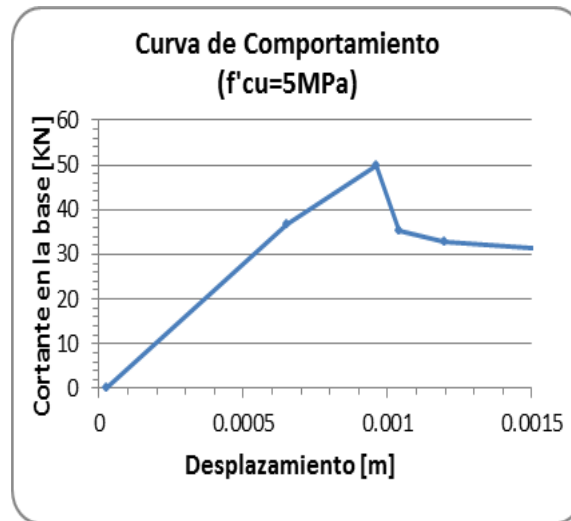


Figura 31. Curva de comportamiento de un muro no confinado que contiene unidades de mampostería de resistencia $f'_{cu} = 3$ en su parte superior y $f'_{cu} = 5$ en su inferior.

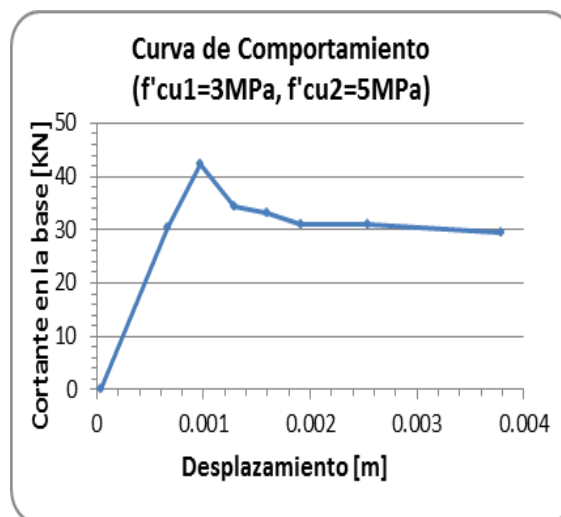


Figura 32. Curva de comportamiento de un muro no confinado que contiene unidades de mampostería de resistencia $f'_{cu} = 1$ en su parte superior y $f'_{cu} = 5$ en su inferior.

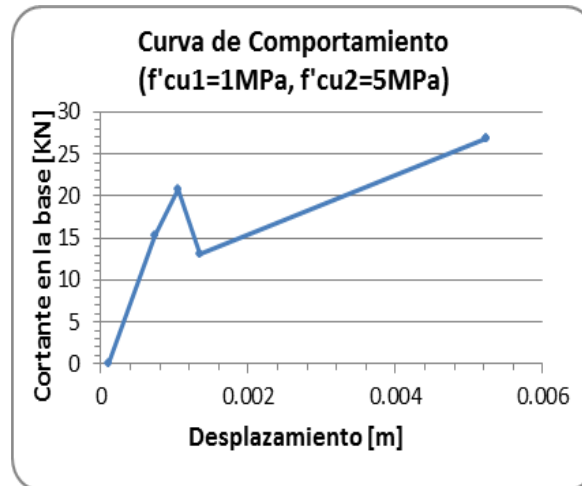


Figura 33. Curva de comportamiento de un muro no confinado que contiene unidades de mampostería de resistencia $f'_{cu} = 5$ en su parte superior y $f'_{cu} = 1$ en su inferior.

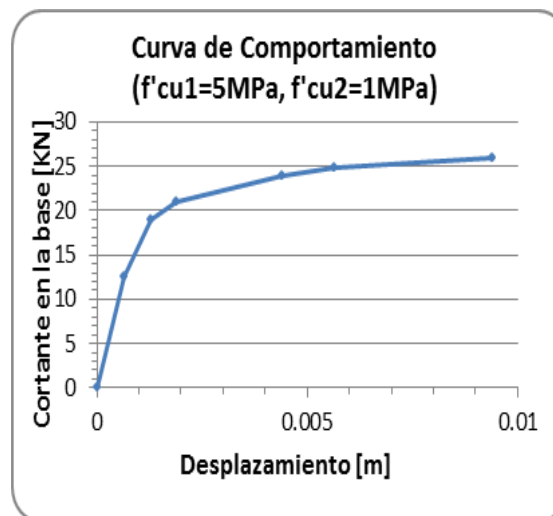


Figura 34. Curva de comportamiento de un muro no confinado que contiene unidades de mampostería de resistencia $f'_{cu} = 5$ en su parte superior y $f'_{cu} = 3$ en su inferior.

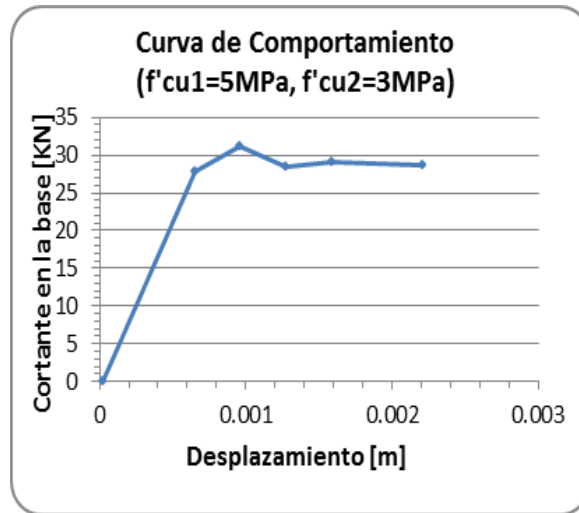


Figura 35. Curva de comportamiento de un muro no confinado que contiene unidades de mampostería de resistencia $f'_{cu} = 3$ en su parte superior y $f'_{cu} = 1$ en su inferior.

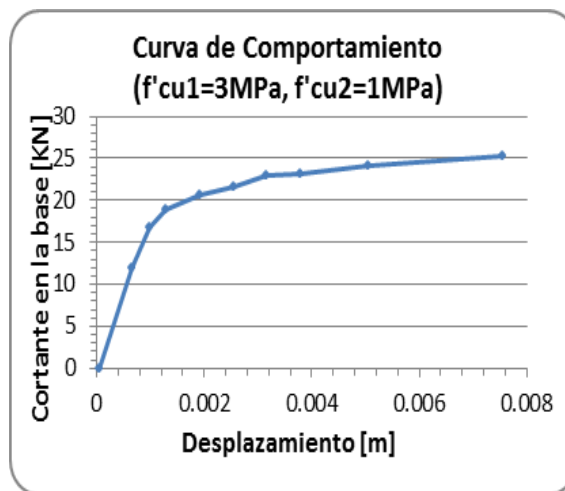
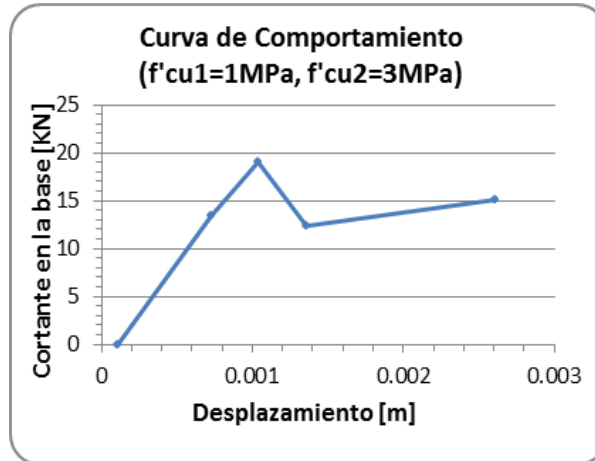
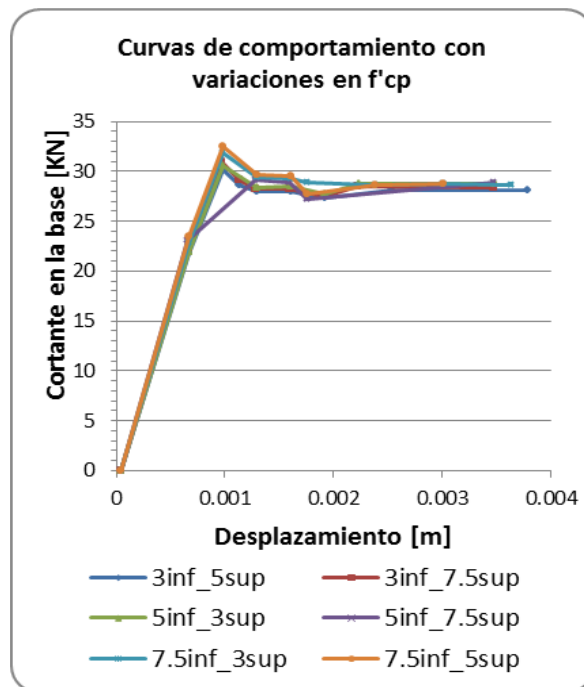


Figura 36. Curva de comportamiento de un muro no confinado que contiene unidades de mampostería de resistencia $f'_{cu} = 1$ en su parte superior y $f'_{cu} = 3$ en su inferior.



3.9.2. Variaciones en la resistencia del mortero de pega

Figura 37. Curva de comportamiento de un muro no confinado que contiene variaciones en el mortero de pega f'_{cp} en su parte superior e inferior.



3.9.3. Variación en la tipología de las unidades de mampostería

Figura 38. Curva de comportamiento de un muro no confinado que contiene variaciones en la tipología de las unidades de mampostería (mitad inferior = tolete de arcilla $f'_{cu}=15\text{MPa}$, mitad superior = H-15 $f'_{cu}=3\text{MPa}$).

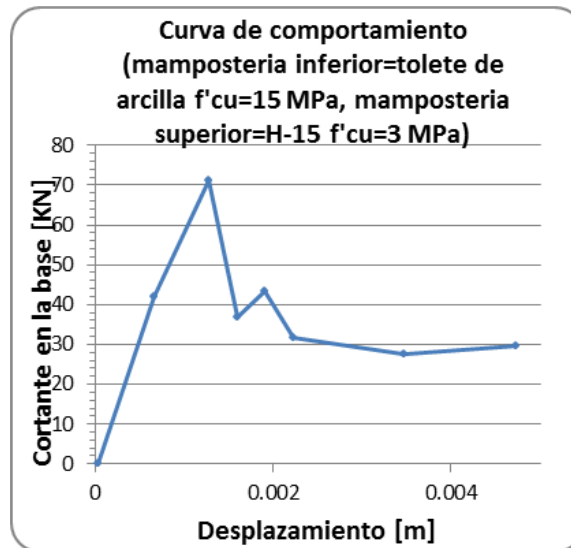


Figura 39. Curva de comportamiento de un muro no confinado que contiene variaciones en la tipología de las unidades de mampostería (mitad inferior = H-15 $f'_{cu}=3\text{MPa}$, mitad superior = tolete de arcilla $f'_{cu}=15\text{MPa}$).

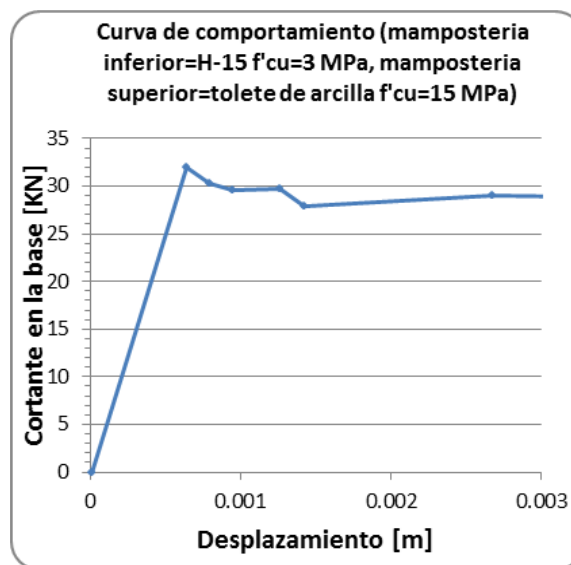
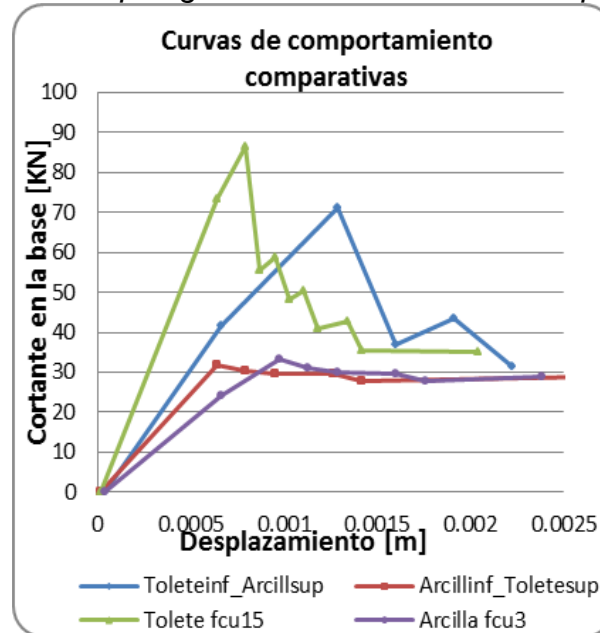


Figura 40. Curvas de comportamiento comparativas de un muro no confinado que contiene variaciones en la tipología de las unidades de mampostería.



4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Obtenidas todas las curvas de comportamiento se procede a realizar el análisis de cada caso, para esto es necesario obtener el punto de desempeño de cada curva en particular. El punto de desempeño es obtenido cruzando cada curva con el espectro de diseño seleccionado, para el caso del proyecto se tomó un espectro de diseño para la zona sísmica de Bucaramanga con suelo tipo D y coeficiente de importancia 1. El programa SAP2000 permite ingresar el espectro de diseño característico y cruzarlo con cada curva de comportamiento obtenida.

Figura 41. *Espectro de diseño considerado en el análisis.*

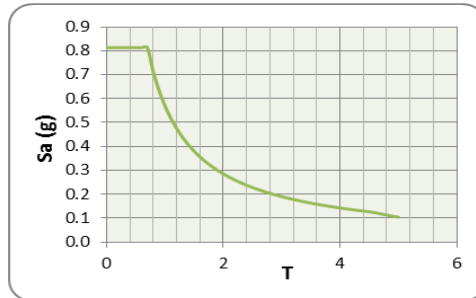
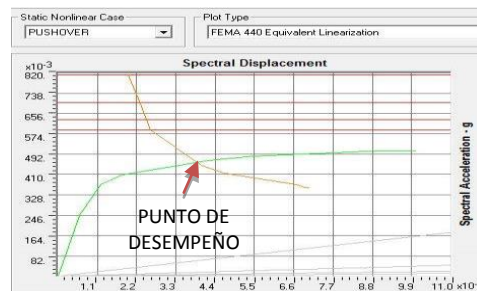


Figura 42. *Superposición curva de comportamiento y espectro de diseño.*



El análisis realizado se centrará en la resistencia al cortante en cada caso y consiste básicamente en tomar el cortante obtenido en cada punto de desempeño

para los modelos realizados en cada variación (resistencia de las unidades, resistencia de mortero de pega y tipología de las unidades) tanto para el caso confinado como para el no confinado y relacionarlo en una gráfica con la variación de $f'm1/ f'm2$, donde $f'm1$ corresponde a la resistencia a la compresión del muro superior y $f'm2$ al inferior respectivamente. De esta manera se puede determinar que tanto varía la capacidad de cada muro en función de la relación o variación de las resistencias en sus unidades.

4.1. MUROS CONFINADOS

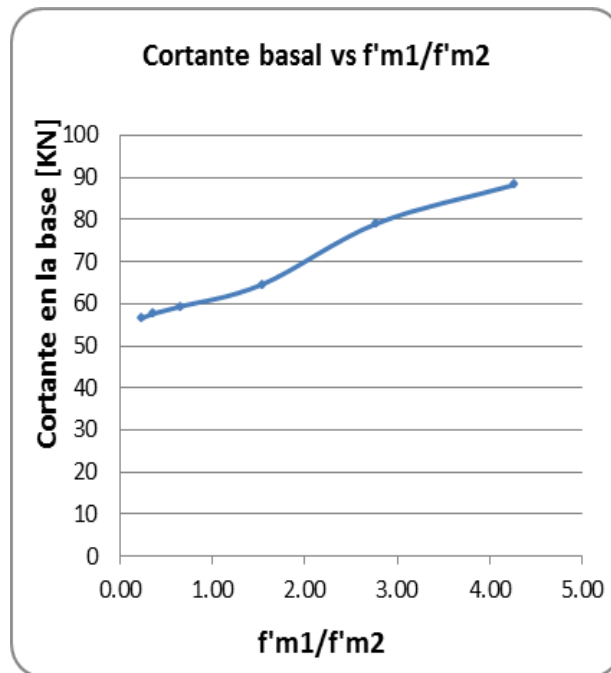
Para cada situación se establece una tabla en donde se presentan los resultados y cálculos relevantes en cada variación para luego graficar.

4.1.1. Variación en la resistencia de las unidades de mampostería

Tabla 13. *Punto de desempeño y relación de resistencias (variación $f'm$, muro confinado).*

$f'cu1$ [MPa] (sup)	$f'cu2$ [MPa] (inf)	$f'm1/f'm2$	Punto de desempeño	
			V [KN]	D [m]
1	5	0.23	56.677	4.09E-03
1	3	0.36	57.645	3.23E-03
3	5	0.65	59.348	2.33E-03
5	3	1.53	64.562	2.61E-03
3	1	2.78	79.101	6.96E-03
5	1	4.26	87.787	7.75E-03

Figura 43. Cortante basal vs relación de resistencias de la mampostería $f'm1/f'm2$ en un muro confinado.



4.1.2. Variación en la resistencia del mortero de pega

Tabla 14. Punto de desempeño y relación de resistencias (Variación f'_{cp} , muro confinado).

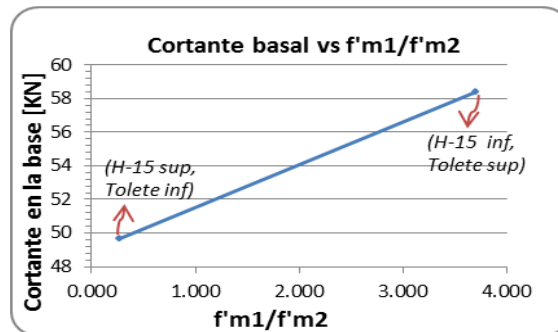
f'_{cp1} [MPa] (sup)	f'_{cp2} [MPa] (inf)	$f'm1/f'm2$	Punto de desempeño	
			V [KN]	D [m]
3	7.5	0.88	70.234	4.35E-03
5	7.5	0.93	70.585	3.49E-03
3	5	0.94	73.575	3.88E-03
5	3	1.06	74.142	3.91E-03
7.5	5	1.07	72.121	3.59E-03
7.5	3	1.14	73.436	3.76E-03

4.1.3. Variación en la tipología de las unidades de mampostería

Tabla 15. Punto de desempeño y relación de resistencias en la mampostería para un muro confinado

Variación	$f'm1/f'm2$, superior/inferior	Punto de desempeño	
		V [KN]	D [m]
H-15 superior, Tolete inferior	0.270	49.668	1.39E-03
Tolete superior, H-15 inferior	3.707	58.418	2.01E-03

Figura 44. Cortante basal vs relación de resistencias de la mampostería $f'm1/f'm2$ en un muro confinado.



4.2. MUROS NO CONFINADOS

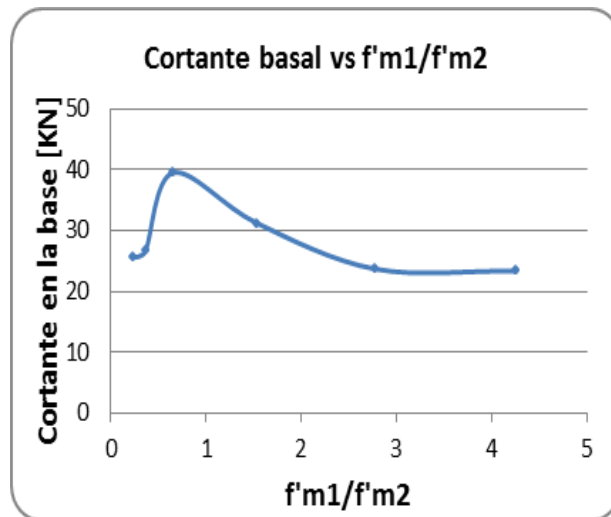
Para cada situación se establece una tabla en donde se presentan los resultados y cálculos relevantes en cada variación para luego graficar.

4.2.1. Variación en la resistencia de las unidades de mampostería

Tabla 16. Punto de desempeño y relación de resistencias (Variación $f'm$, muro no confinado).

$f'cu$ [MPa] (sup)	$f'cu2$ [MPa] (inf)	$f'm1/f'm2$	Punto de desempeño	
			V [KN]	D [m]
1	5	0.23	25.543	5.40E-03
1	3	0.36	26.597	6.16E-03
3	5	0.65	39.47	9.02E-03
5	3	1.53	31.184	9.67E-04
3	1	2.78	23.664	4.43E-03
5	1	4.26	23.352	3.87E-03

Figura 45. Cortante basal vs relación de resistencias de la mampostería $f'm1/f'm2$ en un muro no confinado



4.2.2. Variación en la resistencia del mortero de pega

Tabla 17. Punto de desempeño y relación de resistencias (Variación f'_{cp} , muro no confinado).

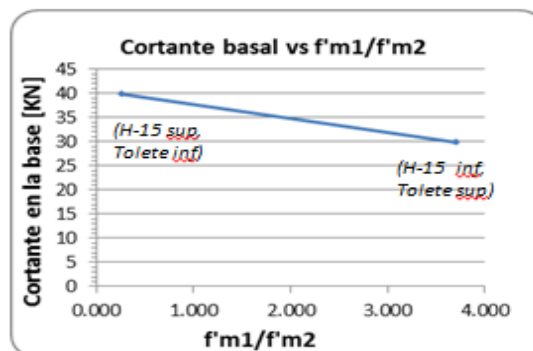
f'_{cp1} [MPa] (sup)	f'_{cp2} [MPa] (inf)	$f'm1/ f'm2$	Punto de desempeño	
			V [KN]	D [m]
3	7.5	0.88	30.095	1.20E-03
5	7.5	0.93	30.938	1.15E-03
3	5	0.94	28.942	1.22E-03
5	3	1.06	28.303	1.22E-03
7.5	5	1.07	29.185	1.32E-03
7.5	3	1.14	28.792	1.20E-03

4.2.3. Variación en la tipología de las unidades de mampostería

Tabla 18. Punto de desempeño y relación de resistencias en la mampostería para un muro no confinado.

Variación	$f'm1/f'm2$, superior /inferior	Punto de desempeño	
		V [KN]	D [m]
H-15 superior, Tolete inferior	0.270	39.889	6.31E-04
Tolete superior, H-15 inferior	3.707	29.894	8.84E-04

Figura 46. Cortante basal vs relación de resistencias de la mampostería $f'm1/f'm2$ en un muro no confinado.



5. CONCLUSIONES

- Se realizó la comparación entre el método del puntal y el modelo tipo Shell sugerido por los manuales de SAP2000, donde se observó la similitud hasta el punto de falla entre el comportamiento de ambos modelos (figura 15). Este análisis nos aportó una base confiable para el uso de los parámetros adoptados por las guías de SAP2000.
- Cuando se varía la resistencia de las unidades de mampostería en altura de un muro confinado se observan dos diferentes comportamientos, en el primer caso cuando la unidad de mampostería que se encuentra en la mitad superior posee una resistencia a la compresión mayor que la unidad que se encuentra en la mitad inferior, el cortante basal correspondiente al punto de desempeño obtenido mediante las curvas de comportamiento es mayor, para el segundo caso cuando la mampostería con resistencia mayor se encuentra en la parte inferior, el cortante disminuye (figura 43). Este resultado se da por el comportamiento de la mampostería como puntal, es decir, siendo la parte superior del muro la que recibe la fuerza aplicada por el pushover, el cortante basal aumenta cuando la mampostería de relleno cercana a ese punto crítico tiene mayor resistencia a la compresión.
- En el caso de la mampostería no confinada, el comportamiento se da de forma contraria al de los muros confinados. El cortante basal correspondiente al punto de desempeño es mayor cuando las unidades de mampostería de mayor resistencia se encuentran en la mitad inferior del muro y las de menor resistencia en la parte superior. Además, se observa un pico en la gráfica cuando la relación de resistencias, f'_{m1}/f'_{m2} , se acerca a 1 (figura 45).

- El comportamiento de la mampostería no confinada cuando se varía la resistencia de las unidades se da de esta manera porque a diferencia del caso confinado, la mampostería no se comporta como puntal, y al estar simplemente apoyada el cortante basal correspondiente al punto de desempeño dependerá de la resistencia en su base. No obstante, cuando la resistencia de la mampostería en la parte superior del muro es muy pequeña en comparación con la inferior, el muro puede presentar falla frágil, en ese caso el cortante obtenido es menor.
- Al variar el mortero de pega tanto en muros sin confinar como confinados, las curvas de comportamiento y el desempeño de la estructura no varían significativamente, esto porque el valor de la resistencia a la compresión no tiene cambios importantes debido a que el valor de la resistencia del mortero, aunque aporta, no es un factor significativo para f'_m (figuras 24 y 37).
- De la variación en altura de la tipología de las unidades de mampostería para el muro confinado estudiado se observó una diferencia importante de 15% en el valor del cortante del punto de desempeño. Se obtuvo un valor mayor para el caso en que el tolete de arcilla ($f'_{cu}=15$ MPa) estaba ubicado en la mitad superior del muro y menor cuando la unidad de mampostería H-15 ($f'_{cu}=3$ MPa) se encontraba ubicado en la franja superior. Este comportamiento fue el esperado teniendo en cuenta los resultados del primer estudio en el que se varió la resistencia de las unidades de mampostería (figura 44).
- En el caso en el que se variaron los tipos de unidades de mampostería para el muro no confinado, la diferencia en el valor del cortante del punto de desempeño fue de 25%. El comportamiento fue contrario respecto al muro

confinado, en este caso el valor de cortante fue mayor cuando el tolete de arcilla estaba ubicado en la parte inferior del muro (figura 46).

6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda hacer el análisis de un modelo completo de vivienda para determinar el porcentaje en el que varía o aumenta la resistencia de los muros cuando se hace una evaluación en conjunto.
- Se recomienda hacer el análisis de un modelo de dos o más niveles con el fin de determinar que tanta discrepancia hay con el comportamiento de un modelo de un solo nivel.
- Se recomienda realizar calibración con el modelo no confinado con el fin de evaluar que tanta convergencia hay entre la propuesta del programa de análisis SAP2000 y un modelo matemático ya garantizado.

BIBLIOGRAFÍA

ARÉVALO PEREZ Juan, BERMÚDEZ FLOREZ William. Niveles de daño a partir de un análisis pushover para una estructura aporticada de concreto reforzado Trabajo de grado Ingeniero Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, 2007.

LÓPEZ J., S. Oller, E. Oñate. Cálculo del comportamiento de la mampostería mediante elementos finitos. Primera edición, Barcelona, España 1998.

MARULANDA OCAMPO Francisco, Modelación con elementos finitos de muros de mampostería estructural ortogonales. Trabajo de maestría en Ingeniería Civil. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2012

ROSALES M. y Otros. Simulación numérica del efecto de carga lateral sobre un panel de mampostería confinado. En: Mecánica Computacional. 2004. Vol 23, p. 717-732

ORDUÑA y A.G. AYALA. Análisis no lineal de mampostería confinada sujeto a cargas laterales. D.F. México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2001.

PÉREZ LEAL Eduwin. Alternativas para el diseño sísmico de edificios altos de mampostería Trabajo de maestría en Ingeniería Civil. Morelia-Michoacán: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2011.

Reglamento Colombiano de Construcción Sismo-resistente NSR-10. Título D

SANTANDER PABON Luis, PACHECO REYES Renne. Patología de la construcción en las comunas nororientales del municipio de Floridablanca Trabajo de grado Ingeniero Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, 2011.

Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural (SMIE). Edificaciones de Mampostería para vivienda, Segunda edición. México 2002.

TAVERAS MONTERO Manuel. Revisión de las recomendaciones para modelar y analizar estructuras de mampostería confinada ante carga lateral Trabajo de maestría en Ingeniería Civil. México: Universidad Autónoma de México, 2008.

TENA COLUNGA, G. RIVERA HERNÁNDEZ, J. VERGARA SÁNCHEZ. Estimación de la rigidez lateral elástica de muros con aberturas Accidentes e Infraestructura Civil. En: Rev. Int. de Desastres Naturales . Vol 11(2), p.135.

CORNEJO VÁZQUEZ T., HERNÁNDEZ BARRIOS H., Resistencia lateral de estructuras de mampostería confinada. En: Ingeniería, vol 17, No 3, p. 179-190. Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, México.