



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL

MODELACIÓN Y ANÁLISIS NO-LINEAL DE ALBAÑILERÍA ARMADA CHILENA UTILIZANDO MÉTODOS DE ELEMENTOS FINITOS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

SEBASTIÁN IGNACIO NÚÑEZ CONTRERAS

PROFESOR GUÍA:

THOMAS STURM MOREIRA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

FRANCISCO HERNADEZ PRADO

FELIPE LEYTON FLORES

SANTIAGO DE CHILE

2018

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil,
mención Estructuras y Construcción
Por: Sebastián Núñez Contreras
Fecha: 08-01-2018
Profesor Guía: Thomas Sturm Moreira

MODELACIÓN Y ANÁLISIS NO-LINEAL DE ALBAÑILERÍA ARMADA CHILENA UTILIZANDO MÉTODOS DE ELEMENTOS FINITOS

Chile es uno de los países más sísmicos del mundo, con un sismo de magnitud 8.0 cada 10 años dentro del país. Estos sismos generan daños variados dependiendo del tipo y materialidad utilizada. De manera recíproca, se puede estimar los daños esperados en estructuras para sismos según su magnitud mediante métodos de modelación variado. La realización de modelación requiere la correcta caracterización de los materiales en programas computacionales, para lograr una simulación válida del comportamiento del material.

La albañilería es un material ampliamente usado en el país, siendo utilizado en cerca de un 40% de las estructuras al año 2002, y en el mundo. Como material de construcción es uno de los más antiguos a nivel mundial, pudiendo encontrarse estructuras existentes desde las primeras épocas de la historia. Es debido a lo anterior que la albañilería presenta gran variabilidad histórica, variabilidad que se incluye a la propia de la fabricación del material observada entre materiales de un país y otro. Debido a lo anterior se debe utilizar ensayos con materiales existentes dentro del país, y de igual manera, la modelación debe seguir los resultados obtenidos en esos ensayos.

Los ensayos utilizados fueron recopilados por Marín (2009) y realizados por Sepúlveda (2003) donde se estudió la influencia de la armadura en la resistencia a la carga lateral de un muro corto de albañilería armada. En estos ensayos se obtuvo la curva de capacidad (o de carga horizontal vs deformación), así como detalle del estado de fisuración en la carga máxima. En este estudio se calibran los modelos de materiales para replicar esos resultados experimentales.

La calibración se realizó en el software DIANA FEA. Se estudió un modelo de material llamado *Rankine Hill anisotropy*, que puede ser utilizado en albañilería y otros materiales anisotrópicos y no lineales.

Se muestra igualmente un análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo de *Rankine Hill*, antes de entregar los resultados de la calibración, los parámetros utilizados, y curvas de capacidad, así como el comportamiento del muro de corte.

DEDICATORIA

Esta memoria está dedicada a mis padres Sylvia y José, mi novia Nicole, a Antonio Ponce, guía espiritual y amigo, a Alonso mi ahijado y sus padres y a mi abuela Silvia. De igual manera este trabajo se encuentra dedicado a ese hijo que viene en camino y que con tantas ansias estamos esperando.

AGRADECIMIENTOS

Gracias primeramente a Dios por todo lo dado a lo largo de estos años de estudio, las oportunidades, la fortaleza y la fe.

Gracias a mis padres, por su apoyo, cariño y amor durante todos mis años de vida, por darme una vida que he podido disfrutar plenamente. Gracias a Nicole Latorre, mi novia, quien me ha apoyado desde que nos conocimos, y ha hecho mi vida aún mejor de lo que era. No puedo dejar de mencionar a Jacob y su familia por todo su aprecio y apoyo durante los momentos fáciles y difíciles que pude encontrar durante estos años.

Gracias al profesor Thomas por toda su disposición y paciencia. Sus comentarios son gran parte de lo que puede encontrarse en este trabajo.

Finalmente, gracias al CSN por el financiamiento de esta Memoria de Título.

TABLA DE CONTENIDO

1.	Introducción	1
1.1	Resumen	1
1.2	Motivación.....	1
1.3	Objetivos	2
1.3.1	Objetivos Generales	2
1.3.2	Objetivos específicos	2
1.4	Organización de la memoria.....	2
2.	Revisión Bibliográfica	3
2.1	Contexto Sísmico	3
2.1.1	Tectónica de Placas.....	3
2.1.2	Subducción Nazca-Sudamericana.....	4
2.1.3	Mecanismos de Falla Sísmica.....	6
2.2	Albañilería.....	7
2.2.1	Antecedentes Generales	7
2.2.2	Unidad de albañilería	8
2.2.3	Historia de la albañilería	10
2.2.4	Marco Normativo de Albañilería Armada	12
2.3	Modelación y análisis de albañilería	14
2.3.1	Modelación de albañilería.....	14
2.3.2	Métodos de modelación ante cargas laterales.....	16
3.	Antecedentes Experimentales	18
3.1	Introducción.....	18
3.2	Descripción del programa experimental.....	18
3.3	Descripción de muros sometidos a ensayo.....	19
3.4	Materiales utilizados en la construcción de los muros.....	20
3.4.1	Ladrillos Cerámicos	20
3.4.2	Mortero de Pega.....	20
3.4.3	Grout de Relleno de Huecos	21
3.4.4	Barras de Refuerzo Vertical.....	21
3.4.5	Barras de Refuerzo Horizontal.....	21
3.4.6	Propiedades básicas de la albañilería	22
3.5	Ensayo de los muros.....	22
3.6	Resultados de ensayos	24

3.7	Descripción de los resultados de ensayo para la calibración.....	25
4.	Métodos de modelación de material	30
4.1	DIANA FEA.....	30
4.1.1	Campo de aplicación.....	30
4.2	Elementos estructurales utilizados	30
4.2.1	Barras de Refuerzo.....	30
4.2.2	Vigas de hormigón.....	31
4.2.3	Paño de albañilería.....	32
4.3	Modelo de material utilizado para hormigón	33
4.4	Modelo de material utilizado para acero	35
4.5	Modelo anisotrópico Rankine-Hill.....	35
4.5.1	Base Teórica.....	36
4.5.2	Mejoras al modelo Rankine-Hill.....	39
5.	Análisis de Sensibilidad y resultados.....	45
5.1	Desarrollo del modelo estructural.	45
5.1.1	Desarrollo de modelo.....	45
5.1.2	Procedimiento de análisis.....	54
5.2	Realización de análisis de sensibilidad.	54
5.3	Resultados	63
5.4	Discusión.....	70
6.	Conclusiones	74
7.	Bibliografía	75

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Terremotos de magnitud considerable (Jorquera, 2014).	7
Tabla 2: Posibles aplicaciones de distintos según tipo de unidad (Gallegos, 2005).....	9
Tabla 3: Clasificación por grados de ladrillos cerámicos (NCh 169. Of2001).....	10
Tabla 4: Distribución de ensayos de Muros de Albañilería Armada (Marín, 2009).....	18
Tabla 5: Características y propiedades de la unidad de albañilería (Marín, 2009).....	20
Tabla 6: Resultados de ensayos RILEM de mortero de pega (Marín, 2009).....	20
Tabla 7: ensayos de compresión cilíndrica de grout de relleno (Marín, 2009).....	21
Tabla 8: Resistencias características del acero de Refuerzo Vertical (Marín, 2009).....	21
Tabla 9: Resistencias características del acero de armadura de corte (Marín, 2009).	22
Tabla 10: Propiedades básicas de la albañilería (Marín, 2009).	22
Tabla 11: Resumen de resultados de ensayos (Marín, 2009).....	25
Tabla 12: Parámetros utilizados en modelo de material <i>Total strain crack</i>	34
Tabla 13: valores para curva tensión-deformación del acero.	35
Tabla 14: parámetros de modelo <i>Rankine Hill anisotropy</i>	36
Tabla 15: nombre y tipo de material utilizados en modelo.....	46
Tabla 16: parámetros elásticos de la albañilería	47
Tabla 17: parámetros elásticos de hormigón.....	47
Tabla 18: parámetros elásticos del acero.	47
Tabla 19: propiedades geométricas utilizadas.	48
Tabla 20: parámetros para propiedades de barras de refuerzo.....	48
Tabla 21: Parámetros de propiedad V40/30.5.....	49
Tabla 22: Sets de carga.	50
Tabla 23: Clase y modelo de material REF.	51
Tabla 24: Clase y modelo de material HOR.	51
Tabla 25: Clase y modelo de material ALB.....	52
Tabla 26: Parámetros utilizados en material HOR.....	53
Tabla 27: Parámetros de modelo de material para albañilería inicial.	55
Tabla 28: Resumen de modificaciones para análisis de sensibilidad.....	56
Tabla 29: Parámetros de muro de albañilería final.	64

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Placas Tectónicas (Kious y Tilling, 1996).	3
Figura 2: Esquema de subducción placa oceánica-continental, similar a Nazca-Sudamericana (Kious y Tilling, 1996).....	4
Figura 3: Sección vertical de sismicidad en latitud 22°S (Madariaga, 1998).....	5
Figura 4: Sección vertical de sismicidad en latitud 30°S (Madariaga, 1998).....	5
Figura 5: Sección vertical de sismicidad en latitud 35°S (Madariaga, 1998).....	6
Figura 6: Dimensiones de diseño según NCh1928 (Curso CI5223 de la FCFM, 2016).....	14
Figura 7: Esquema de procedimiento <i>Pushover</i> (Mora <i>et al.</i> , 2006).	16
Figura 8: Curvas de capacidad para distintas distribución de cargas (Mora <i>et al.</i> , 2006)	17
Figura 9: Geometría y forma de muros ensayados (Marín, 2009).	19
Figura 10: Unidad de ladrillo cerámico (Marín, 2009).....	20
Figura 11: Marco de carga de ensayos (Marín, 2009).	23
Figura 12: Plan de deformaciones utilizado por Sepúlveda (2003) (Marín, 2009).....	23
Figura 13: Patrón de fisuración al momento de carga máxima de MLC-04-CA01 (Marín, 2009).	26
Figura 14: Curva de histéresis de muro MLC-04-CA01 (Marín, 2009).	26
Figura 15: Curva envolvente de muro MLC-04-CA01 (Marín, 2009).	27
Figura 16: Patrón de fisuración al momento de la carga máxima MLC-04-CA02 (Marín, 2009).27	
Figura 17: Curva de histéresis de muro MLC-04-CA02 (Marín, 2009).	28
Figura 18: Curva envolvente de muro MLC-04-CA02 (Marín, 2009).	28
Figura 19: Comparación de envolventes de muros considerados para calibración.	29
Figura 20: Elemento <i>truss</i> (DIANA User's Manual, 2017).	31
Figura 21: Elemento <i>beam</i> (DIANA User's Manual, 2017).	31
Figura 22: Representación de L7BEN (DIANA Manual's User, 2017).....	32
Figura 23: Elemento <i>Plane Stress</i> y esquema de cargas (DIANA User's Manual, 2017).	32
Figura 24: Elemento Q8MEM (DIANA User's Manual, 2017).....	33
Figura 25: curva tensión-deformación para tracción.	34
Figura 26: Curva tensión-deformación para compresión.....	34
Figura 27: Curva tensión-deformación del acero.....	35

Figura 28: Condiciones de fluencia Rankine-Hill (DIANA User's Manual, 2017).....	37
Figura 29: ley de <i>Hardening-Softening</i> para el criterio de fluencia de Hill (DIANA User's Manual, 2017)	38
Figura 30: el criterio de Rankine súper-hiperbólico (DIANA User's Manual, 2017).....	40
Figura 31: Resultados experimentales y de modelo (Lourenço <i>et al.</i> , 2017).....	42
Figura 32: Diagrama de carga-deformación de W1, experimental y numérico (Lourenço <i>et al.</i> , 1998).	43
Figura 33: Diagrama de carga-deformación de W2, experimental y numérico (Lourenço <i>et al.</i> , 1998).	43
Figura 34: Diagrama de carga-deformación de W4, experimental y numérico (Lourenço <i>et al.</i> , 1998).	44
Figura 35: Geometría con refuerzo horizontal resaltado.	45
Figura 36: Geometría con refuerzo vertical resaltado.....	45
Figura 37: Geometría con borde de albañilería resaltado.	46
Figura 38: Geometría con viga de hormigón resaltada.	46
Figura 39: Propiedades geométricas de muro de albañilería.	49
Figura 40: Modelo <i>post-mesh</i>	50
Figura 41: Modelo en <i>MIDAS</i> previo a ser exportado a <i>DIANA</i>	51
Figura 42: Curva de tensión-deformación unitaria de material REF.	52
Figura 43: Curvas de tensión-def. unitaria en tracción y compresión (DIANA User's Manual, 2017).	53
Figura 44: Curva carga-deformación de caso base.	55
Figura 45: Comparación entre caso base y caso modificado 1, se pasó de un Módulo de Young de 6400 N/mm^2 a 3200 N/mm^2	57
Figura 46: Comparación entre caso base y caso modificado 2, la resistencia a tracción cambio de $0,28\text{ N/mm}^2$ a $0,5\text{ N/mm}^2$ para ambos ejes.....	58
Figura 47: Comparación entre caso base y caso modificado 3, la resistencia a la compresión cambió de $6,4\text{ N/mm}^2$ a $3,2\text{ N/mm}^2$	58
Figura 48: Comparación entre caso base y caso modificado 4. Las energías de fractura en tracción pasan de $0,037$ y $0,105\text{ N/mm}$ a $0,025$ y $0,081\text{ N/mm}$	59
Figura 49: Comparación entre caso base y caso modificado 5, donde la energía de fractura en compresión pasa de 6 y 8 N/mm a 3 y 4 N/mm por eje.	60

Figura 50: Comparación entre caso base y caso modificado 5'. Se pasa a una energía de fractura de 2,5 y 3,7 N/mm por eje.	60
Figura 51: Comparación de caso base y caso modificado 6. La resistencia a la tracción residual relativa pasó de un 0,01 a un 0,1.....	61
Figura 52: Comparación de caso base con caso modificado 7, donde el parámetro m pasa de 32 a 4.....	62
Figura 53: Comparación de caso base con caso modificado 8. El parámetro n pasa de 16 a 2.	62
Figura 54: comparativa entre muros MLC-04 y modelo de los mismos en <i>DIANA</i>	65
Figura 55: Curva de capacidad de simulación de muro.	66
Figura 56: Desplazamiento del muro en carga máxima.....	67
Figura 57: deformación unitaria en dirección XX durante la carga máxima.....	68
Figura 58: tensiones principales de tracción durante la carga lateral máxima.....	68
Figura 59: tensiones principales de compresión durante la carga máxima.....	69
Figura 60: deformación unitaria de acero de refuerzo en momento de carga máxima.....	70
Figura 61: Curva envolvente de muro MLC-03-CA01.....	71
Figura 62: Curva envolvente de muro MLC-03-CA02.....	71
Figura 63: Curva de carga-deformación de modelo de verificación.....	72
Figura 64: Curva de capacidad de modelo con resistencia a compresión modificada.....	72
Figura 65: Resultados del modelo y resultados experimentales.	73
Figura 66: Resultados experimentales y de modelo (Lourenço <i>et al.</i> , 2017).....	117
Figura 67: Diagrama de carga-deformación de W1, experimental y numérico (Lourenço <i>et al.</i> , 1998).	118
Figura 68: Estado último de muro W1 (Lourenço <i>et al.</i> , 1998).....	118
Figura 69: Resultado numérico de muro W1. En (a) se tiene la deformación última, en (b) se tiene la distribución de fisuras y grietas del muro. (Lourenço <i>et al.</i> , 1998).	119
Figura 70: Diagrama de carga-deformación de W2, experimental y numérico (Lourenço <i>et al.</i> , 1998).	119
Figura 71: Estado último de muro W2 (Lourenço <i>et al.</i> , 1998).....	120
Figura 72: Resultado numérico de muro W2. En (a) se tiene la deformación última, en (b) se tiene la distribución de fisuras y grietas del muro. (Lourenço <i>et al.</i> , 1998).	120
Figura 73: Diagrama de carga-deformación de W4, experimental y numérico (Lourenço <i>et al.</i> , 1998).	121

Figura 74: Estado último de muro W4 (Lourenço <i>et al.</i> , 1998).....	121
Figura 75: Resultado numérico de muro W4. En (a) se tiene la deformación última, en (b) se tiene la distribución de fisuras y grietas del muro. (Lourenço <i>et al.</i> , 1998).	122

1. Introducción

1.1 Resumen

En este trabajo se busca entregar herramientas que permitan estudiar el comportamiento de estructuras de albañilería armada ante acciones sísmicas en Chile. La caracterización de la albañilería es una etapa clave de la modelación de estructuras, debido a que es esta la que permite la realización de futuros análisis que logren representar el comportamiento de las mismas.

Se realizó una calibración de la albañilería siguiendo los resultados obtenidos en ensayos de muros de corte de albañilería armada de fabricación nacional. Para lograr la calibración se realizará un modelo en Elementos Finitos (*FEM*) en el programa DIANA. En este modelo se considerarán tanto las características anisotrópicas, así como el comportamiento post *peak* (i.e. la no-linealidad de la albañilería).

Los resultados de esta modelación podrán ser utilizados en el desarrollo de modelos de estructuras de albañilería más complejas, como edificios habitacionales, utilizando FEM.

1.2 Motivación

Este trabajo de memoria se enmarca en los estudios de fragilidad para estructuras chilenas bajo el cofinanciamiento del Centro Sismológico Nacional (*CSN*).

Chile es un país altamente sísmico (Madariaga, 1998), por lo que los desarrollos de estudios de fragilidad buscan estimar una relación entre los daños esperados y la magnitud de una serie de sismos. En el marco del estudio de fragilidad asociado, se consideran varios materiales y métodos constructivos de acuerdo a lo observado en el país. Las estructuras habitacionales de albañilería, material que se considera en el presente trabajo, son las más comunes en el país de acuerdo a información entregada por el Instituto Nacional de Estadísticas (*INE*), así como también es ampliamente utilizada a nivel mundial (Matthys y Noland, 1989).

La albañilería es un material heterogéneo y ortotrópico, y presenta una gran variabilidad de sus características mecánicas dependiendo del lugar, método de fabricación de los elementos que conforman la albañilería, y época y método de construcción, por lo que la calibración de sus propiedades mecánicas para el uso con FEM debe realizarse con ensayos locales. Los ensayos que se usaron fueron realizados por Sepúlveda (2003) y recopilados por Marín (2009).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos Generales

Calibrar un modelo de material adecuado para la modelación de albañilería armada chilena para realizar modelaciones en FEM. En particular se utiliza el *software* DIANA FEA.

1.3.2 Objetivos específicos

Determinar el modelo de material a utilizar basado en una calibración, así como lograr representar adecuadamente una curva de carga-deformación para muros de albañilería armada. También se busca determinar si el modelo de material obtenido es válido para realización de modelos y análisis de mayor complejidad.

1.4 Organización de la memoria

El segundo capítulo corresponde a una recopilación de antecedentes obtenidos de la bibliografía utilizada durante el desarrollo del trabajo. Esta revisión bibliográfica incluye temas que configuran todo el contexto de este trabajo: contexto sísmico, la historia de la albañilería, la normativa nacional de albañilería armada, y métodos numéricos de análisis de capacidad y comportamiento de estructuras.

El tercer capítulo es una descripción de los ensayos de Sepúlveda del año 2003. Esta serie de ensayos fue recopilada por Marín (2009), donde también detalló otros ensayos de muros de albañilería.

El cuarto capítulo profundiza sobre el método de modelación de la albañilería armada, la que se realizó el software DIANA FEA, así como de la modelación del muro de corte utilizado. La calibración, si bien se realizó en un software, puede ser utilizada tanto en otro software como en rutinas FEM específicas. Se detalla de igual manera la sintaxis de cada uno de los materiales y elementos. Se da la base teórica del modelo original de material utilizado para la albañilería, así como algunas de las mejoras al modelo de material implementadas.

En el quinto capítulo se realiza un análisis de sensibilidad de cada uno de los parámetros del modelo de material así como la exposición de los resultados finales de la calibración, junto a observaciones realizadas a los mismos.

El capítulo final expone las conclusiones del proceso de calibración del modelo de material.

2. Revisión Bibliográfica

2.1 Contexto Sísmico

La sismicidad en Chile es considerada una de las más altas del mundo (CSN, 2017). Se registra un sismo de magnitud 8.0 o mayor cada 10 años en alguna zona del país así como también ocurrieron 4000 sismos de magnitud mayor 5.0 en el país en un lapso de 35 años (Madariaga, 1998). Debido a lo anterior es que se tiene al país como uno de los más sísmicos del mundo, ubicados dentro del cinturón de fuego del Pacífico.

La razón para esta alta sismicidad viene de la Tectónica de Placas, y particularmente la interacción de las placas de Nazca y Sudamericana. Esta interacción genera un proceso subductivo donde la placa de Nazca subduce bajo la placa Sudamericana.

2.1.1 Tectónica de Placas.

La tierra se compone de varias capas geológicas en su interior. De estas la exterior es llamada Corteza, de un espesor de 30 km en promedio. Esta estructura no es homogénea. En realidad la corteza terrestre se encuentra fragmentada en estructuras llamadas placas tectónicas (Kious and Tilling, 1996). La distribución de las placas tectónicas es la que se muestra en la siguiente figura:

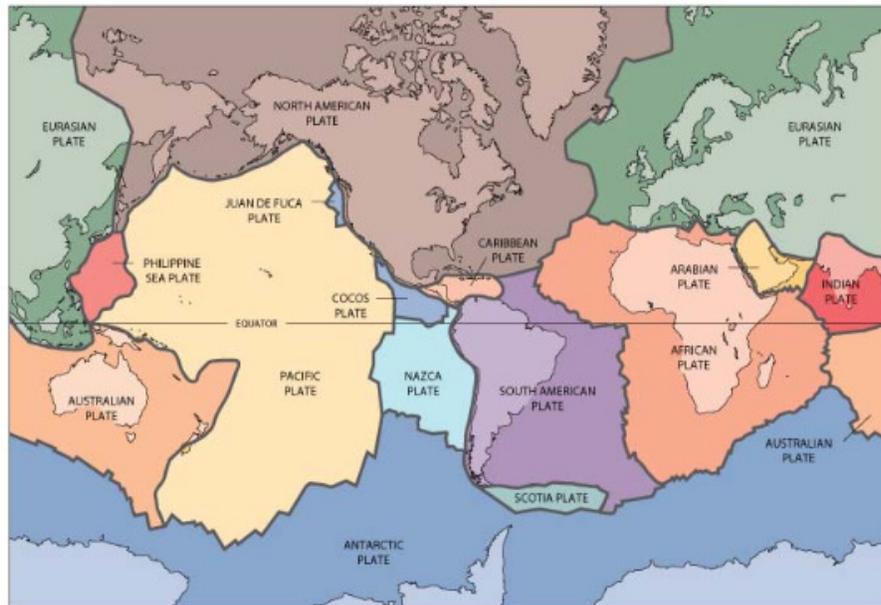


Figura 1: Placas Tectónicas (Kious y Tilling, 1996).

La dinámica de las placas tectónicas da lugar a 4 diferentes tipos de borde para cada una de las placas (Kious and Tilling, 1996). De estos, los observados en Chile y su costa son los siguientes:

- Borde Convergente: Se aprecia en lugares donde dos placas se mueven en direcciones contrarias y hace el límite entre ambas. Pueden darse varios tipos de interacciones dependiendo del tipo de corteza que haga contacto. Cuando una de las placas se hunde bajo la otra se está en presencia de una zona de subducción, como la observada en las costas chilenas. En este tipo de bordes es donde se destruye parte de la corteza terrestre.

- Borde Transformante: Limite donde placas se mueven de forma paralela. Usualmente conectan dos zonas divergentes. Aquí no ocurre ni creación ni destrucción de corteza terrestre. Se puede apreciar en la interacción entre placa Nazca y Antártica.

2.1.2 Subducción Nazca-Sudamericana

La subducción se genera al tener una placa más densa que la otra que se hunde bajo otra, como se observa en la Figura 2. En el caso observado en las costas chilenas la placa Nazca subduce bajo la Sudamericana. La velocidad de convergencia se estima entre 6 a 8 cm/año (Jorquera, 2014).

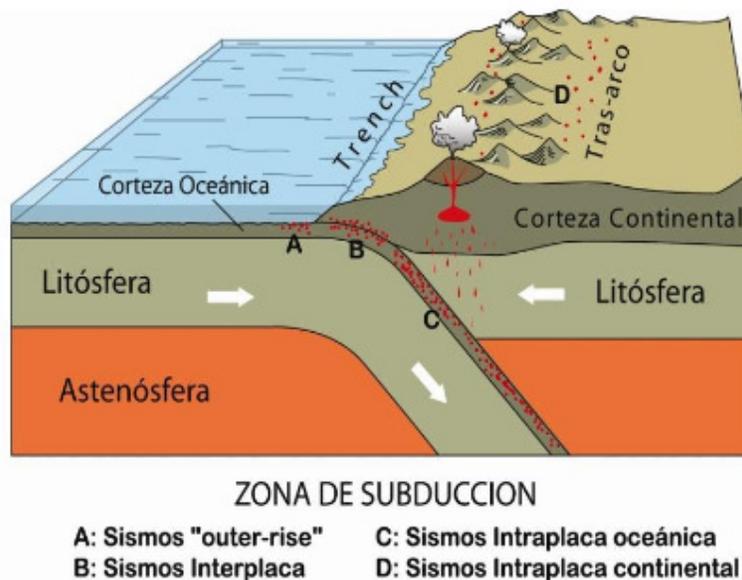


Figura 2: Esquema de subducción placa oceánica-continental, similar a Nazca-Sudamericana (Kious y Tilling, 1996)

De acuerdo a lo descrito por Madariaga (1998) la subducción no se desarrolla de manera uniforme: Barazangi y Isacks (1976) encontraron que la placa Nazca tiene varios segmentos de características subductivas distintas. Tres de ellas se encuentran entre el sur de Perú y la península de Taitao. La longitud y ángulos de subducción de cada uno de los segmentos son variables. Barazangi y Isacks (1976) describieron cada uno de los segmentos.

El primer segmento, observado en la Figura 3, comprende entre los 15° y 27° Sur: su ángulo de subducción es normal, comprendiendo entre 25° y 30°. Este segmento influye fuertemente en la configuración geográfica del Norte Grande. Se aprecia que a partir de los 50 kilómetros de profundidad la zona de Benioff es casi perfectamente recta. La sismicidad se observa hasta los 300 km de profundidad aproximadamente (Madariaga, 1998).

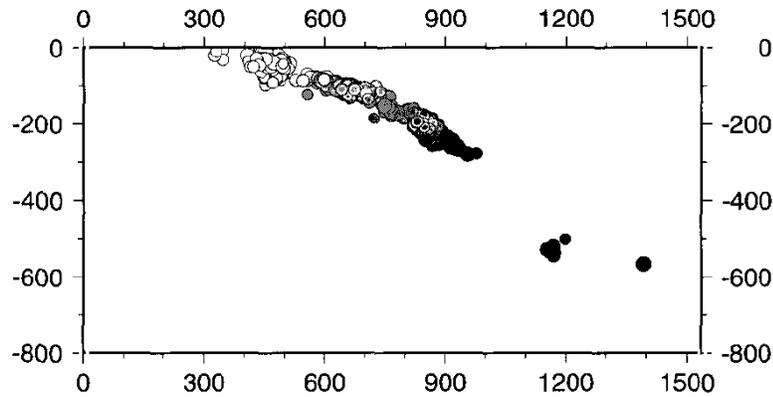


Figura 3: Sección vertical de sismicidad en latitud 22°S (Madariaga, 1998).

El segundo segmento en tanto, comprende desde los 26° hasta los 33° Sur: con un ángulo de subducción menor, de 10°, configurando lo que se conoce como subducción *Flat Slab*. Esta sección está ligada al arco de Juan Fernández y es la que configura la formación de los Valles Centrales, entre otras estructuras notables. Como se puede apreciar en la Figura 4, en este segmento la zona de Benioff tiene un comienzo similar al visto en el primer segmento, aunque a partir de los 60 km la subducción se comporta de forma casi horizontal. La extensión de esta zona casi horizontal se extiende más allá de las Cordillera de los Andes. La ausencia de volcanes en este segmento se explica por el poco espacio disponible para que se genere lava en cantidades suficientes. Después de cierta distancia desde la fosa se vuelve a un ángulo de subducción más cercana a ángulos normales (Madariaga, 1998).

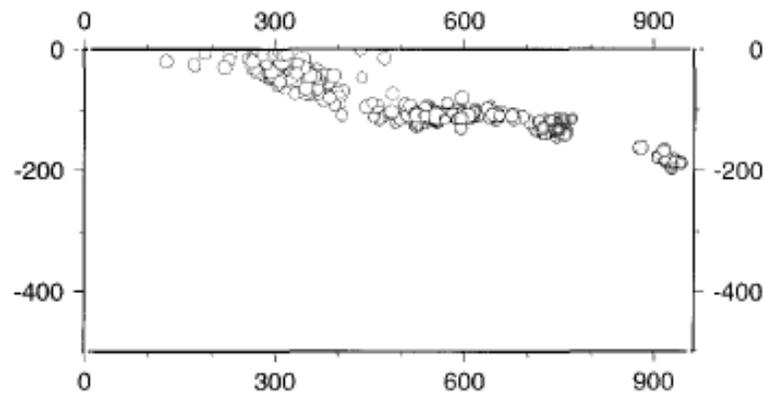


Figura 4: Sección vertical de sismicidad en latitud 30°S (Madariaga, 1998).

El tercer segmento, y el más austral, es el que comienza a partir de los 33° sur, llegando hasta la península del Taitao, se puede observar una sección vertical en la Figura 5. Este segmento vuelve al ángulo de subducción normal de unos 30°. Aquí se aprecia una disminución de los sismos intraplaca de profundidad intermedia, así como también la sismicidad disminuye en la medida que se avanza hacia el sur. Una excepción es toda la sismicidad asociada al terremoto de Valdivia de 1960 (Madariaga, 1998).

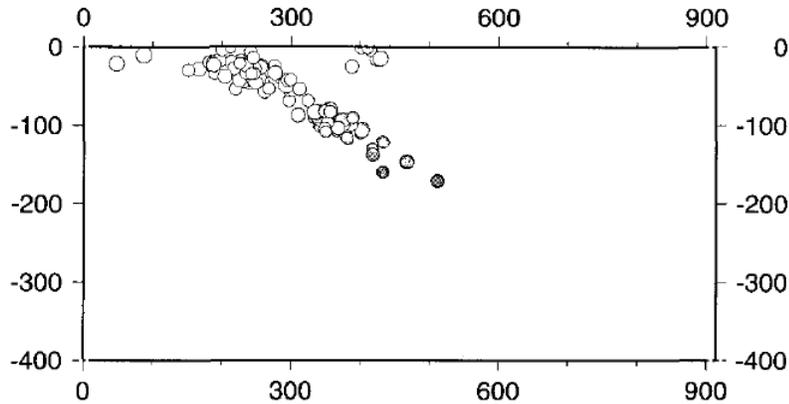


Figura 5: Sección vertical de sismicidad en latitud 35°S (Madariaga, 1998).

2.1.3 Mecanismos de Falla Sísmica.

Los mecanismos de generación de terremotos son variados (Ver Figura 2), pudiendo encontrarse sismos dentro de cada una de las placas a nivel superficial, posterior la zona de contacto en la placa subductiva y en la zona de contacto entre placas (Madariaga, 1998; Leyton *et al.*, 2010).

Como sismos superficiales tenemos los sismos corticales de la placa Sudamericana y los sismos Outer-Rise en la placa Nazca. Según Madariaga (1998), estos sismos no habían sido demasiado estudiados.

Los sismos dentro de la placa Sudamericana tienen hasta 30 km de profundidad (Leyton *et al.*, 2010). Estos sismos ocurren en torno a la Cordillera de los Andes y son generados por los esfuerzos de la placa Sudamericana convergiendo hacia la subducción. Estos esfuerzos son también los responsables del alzamiento de la cordillera de los Andes (CSN, 2017).

Los sismos Outer-Rise se generan debido a la flexión de la placa Nazca en su ingreso a la subducción (Madariaga, 1998). Ocurren cuando la placa oceánica trata de moverse, pero debido a la fricción entre las placas Nazca y Sudamericana, ese movimiento no ocurre. Suelen tener magnitudes menores que 8.0 (CSN, 2017).

Los sismos intraplaca dentro de la placa Nazca, posterior a la zona de contacto entre las placas Nazca y Sudamericana, corresponden a fallas de tipo Normal, cuya profundidad oscila entre los 60 (Madariaga, 1998) y 200 km (Leyton *et al.*, 2010), excepcionalmente puede darse sismos hasta unos 600 km (Madariaga, 1998; CSN, 2017). Estos sismos ocurren debido al peso de la placa además de un fuerte acoplamiento entre ambas placas. El potencial de daño de estos sismos es mayor que el de un sismo interplaca de la misma magnitud (CSN, 2017). Los terremotos de Chillán del año 1939 y otro cerca de La Ligua, en 1965, son de este tipo (CSN, 2017).

De acuerdo al CSN (2017) los sismos interplaca son sismos que ocurren en la zona de contacto entre placas. La mayor cantidad de terremotos de magnitud considerable son de este tipo. Las placas se encuentran trabadas, lo que genera una alta fuerza de roce entre las placas. Un sismo se genera cuando las fuerzas que generan el movimiento continuo de las placas son mayores que esas fuerzas de roce. La magnitud del terremoto es proporcional tanto al área

que se desplaza como a la distancia que se desplaza. Pueden llegar a generar tsunamis que alcanzan la costa de Japón. Adicionalmente se sabe que son fallas de tipo inversa que se generan hasta 60 km de profundidad (Madariaga, 1998) o 50 km (Leyton *et al.*, 2010).

Tabla 1: Terremotos de magnitud considerable (Jorquera, 2014).

Lugar	Año	Tipo	Magnitud
Valparaíso	1906	Interplaca	7,9 (Ms)
Copiapó	1918	Interplaca	8,2 (Ms)
Vallenar	1922	Interplaca	8,5 (Mw)
Talca	1928	Interplaca	8,3 (Ms)
Chillán	1939	Intraplaca	8,3 (Ms)
Ovalle	1943	Interplaca	8,2 (Mw)
Las Melosas	1958	Cortical	7,3 (Ml)
Valdivia	1960	Interplaca	9,5 (Mw)
La Ligua	1965	Intraplaca	7,4 (Ms)
Valparaíso	1985	Interplaca	8,0 (Mw)
Arica	1987	Intraplaca	7,1 (Ms)
Antofagasta	1995	Interplaca	8,0 (Mw)
Punitaqui	1997	Intraplaca	7,1 (Mw)
Tarapacá	2005	Intraplaca	7,8 (Mw)
Tocopilla	2007	Interplaca	7,7 (Mw)
Maule	2010	Interplaca	8,8 (Mw)

Es importante recordar que la distribución de la población no es regular a lo largo del país, por lo mismo el riesgo sísmico no se distribuye uniformemente (Madariaga, 1998).

2.2 Albañilería

2.2.1 Antecedentes Generales

La albañilería es uno de los principales materiales de construcción de estructuras habitacionales en Chile. De acuerdo al censo del año 2002 un 38,62% de las estructuras habitacionales correspondían a albañilería de ladrillo (INE, 2002).

De igual manera, es uno de los principales materiales de construcción a nivel mundial. En India, de acuerdo al Censo de 2001, un 84,7% de los 249 millones de viviendas son de albañilería, mientras que un 44,9% (equivalente a unos 111,9 millones de viviendas) son estructuras que tienen unidades de ladrillo cerámico (Anand, 2008). En México, según lo obtenido en el censo del año 2000, de 22 millones de unidades residenciales, el 80% utilizó algún tipo de albañilería para su construcción (Terán *et al.*, 2009). Finalmente, se tiene que a nivel mundial el 70% de los edificios es de algún tipo de albañilería (Matthys y Noland, 1989).

De acuerdo a Gallegos (2005) la albañilería se compone de al menos dos elementos básicos: Unidad y Mortero. La albañilería se trata de un material de unidades débilmente

asentadas, por lo cual se tiene que es un material heterogéneo y anisotrópico. La resistencia a la compresión se encuentra controlada por la unidad, mientras que la resistencia a la tracción se suele relacionar a la adhesión entre las unidades y el mortero.

El mismo autor indica algunas de las dificultades que ha tenido el desarrollo de la ingeniería a nivel global. Este poco desarrollo histórico de la ingeniería se observa en el hecho de que producto de “recetas empíricas” los muros fueron construyéndose cada vez más gruesos. Otra dificultad importante encontrada, en comparación con otros materiales es la presencia de diferencias significativas entre albañilería de país a país, generando que la tecnología y su ingeniería no sea adaptable entre países (Gallegos, 2005).

La forma más común en la que se encuentra la albañilería es en forma de muro. La albañilería se emplea principalmente como elementos estructurales o de contención de pequeña escala.

De similar manera, la forma más común en la que falla la albañilería es a través del agrietamiento. Este ocurre debido a cargas que inducen esfuerzos de tracción en el material. Es esperable que las grietas se ubiquen en la interfaz unidad-mortero, pero debido a las interacciones dentro del material, las grietas suelen atravesar tanto la unidad como el mortero (Gallegos, 2005).

De acuerdo a Gallegos (2005) la forma en la que se puede controlar la tracción dentro de la albañilería es mediante la inclusión de refuerzos, ya sea mediante pilares y cadenas, configurando lo que sería la albañilería confinada; o mediante la colocación de armadura dentro del muro, correspondiendo a la albañilería armada.

Un factor importante en la disminución de daños es la mantención de las estructuras, esto debido a que los daños, usualmente debido a sismos, es acumulativo (Gallegos, 2005).

2.2.2 Unidad de albañilería

Uno de los componentes elementales de la albañilería es la unidad. Existen varios materiales con los que se pueden elaborar estas unidades. Entre estos materiales se encuentran la arcilla, el hormigón y mezcla de sílice y cal.

Las unidades de albañilería se clasifican principalmente de acuerdo a la relación de la superficie de la cara de asiento y las aberturas presentes en la misma. También se puede clasificar las unidades de albañilería de acuerdo al material de fabricación.

La clasificación de las unidades de albañilería dada por Gallegos (2005) es la que sigue:

- Unidades sólidas o macizas: Los alvéolos en la cara de asiento no alcanzan más de un 30% del área de la sección bruta. El 30% del área de la sección bruta marca un límite entre un comportamiento dúctil o frágil de la albañilería cuando trabaja a compresión.
- Unidades huecas: En este caso, los alvéolos ocupan más de un 30% del área bruta. Adicionalmente, estos alvéolos son de dimensiones que permiten el llenado con hormigón líquido. Cuando la albañilería es llenada completamente con hormigón, se puede tratar como albañilería sólida.
- Unidades perforadas: Los alvéolos también ocupan más de un 30% del área bruta de la unidad, pero en este caso el reducido tamaño de los alvéolos no permite el llenado con hormigón

- Unidades tubulares: En este caso, las perforaciones no se realizan a la cara de asiento. La cantidad de área que ocupan los alvéolos es variable. Se tratan como unidades sólidas.

Además de dar clasificación de unidades de albañilería, Gallegos entrega limitaciones en la aplicación estructural de cada uno de estos tipos de albañilería y en que aplicación su uso es óptimo.

Tabla 2: Posibles aplicaciones de distintos según tipo de unidad (Gallegos, 2005)

Tipo	Posibilidad de aplicación			
	Muro en zona sísmica		Muro en zona no sísmica	
	Portante	No portante	Portante	No portante
Sólida	Óptima	Aplicable, pero muy pesada y costosa	Óptima para cargas elevadas	Óptima
Hueca	No aplicable tal cual. Óptima si se llenan alvéolos con concreto líquido.	Óptima	Aplicable	Óptima
Perforada	No aplicable, salvo que el área alveolar sea 30% o menos del área bruta.	Óptima	Aplicable	Óptima
Tubular	No aplicable	Óptima	No aplicable	Óptima

De igual manera, en la norma chilena NCh 169. Of2001 *Ladrillos cerámicos – Clasificación y requisitos* se realiza una clasificación de las unidades de ladrillos cerámicos de acuerdo a la cantidad y tipo de perforaciones.

De acuerdo a esta norma, la clasificación es la siguiente:

- Ladrillos macizos hechos a máquina (MqM): Unidades macizas sin perforaciones ni huecos.
- Ladrillos perforados hechos a máquina (MqP): Unidades que poseen perforaciones y huecos, regularmente distribuidos, cuyo volumen es inferior al 50% del volumen bruto o total.
- Ladrillos huecos hechos a máquina (MqH): Unidades que poseen huecos y perforaciones, regularmente distribuidos, cuyo volumen es mayor o igual al 50% del volumen bruto o total.

Adicionalmente, se clasifican las unidades de acuerdo a su resistencia individual en 3 grados. Esta clasificación, entregada en la misma NCh 169, es la siguiente:

Tabla 3: Clasificación por grados de ladrillos cerámicos (NCh 169. Of2001)

Requisitos mecánicos	Grados de ladrillos cerámicos						
	1		2		3		
	Clases de ladrillos cerámicos						
	MqM	MqP	MqH	MqP	MqH	MqP	MqH
Resistencia a la compresión, mínima [Mpa]	15	15	15	11	11	5	5
Absorción de agua, máxima [%]	14	14	14	16	16	18	18
Adherencia, mínima [Mpa] {área neta}	0,4	0,4	0,4	0,35	0,35	0,30	0,35

Las unidades de arcilla, también llamadas ladrillos (cerámicos) se fabrican utilizando sílice y alúmina. Su fabricación se realiza con métodos de moldeo, con asistencia de presión y por extrusión. Lo anterior da una gran variabilidad a las unidades de arcilla.

2.2.3 Historia de la albañilería

Las primeras apariciones de la albañilería se dieron en la prehistoria, cuando se apilaron rocas para protegerse de condiciones adversas. Las condiciones en aquella época impidieron que se difundiera esta nueva tecnología de manera dinámica (Gallegos, 2005).

Luego, la llegada de las primeras civilizaciones sedentarias permitió avanzar en el desarrollo de la albañilería, permitiendo la aparición de morteros como el barro y, más adelante, de unidades creadas: barro secando al sol. Al momento del surgimiento de la escritura (4000 AC aproximadamente), este era el estado del arte.

El próximo gran avance en la tecnología de la albañilería llegaría de mano de la cultura sumeria y la inclusión de moldes para la elaboración de unidades uniformes. Lo anterior permitió una mayor libertad en términos de acomodación de unidades, dando oportunidades a construcciones monumentales (como el Zigurat de Uruk, ver Imagen 1). Estas construcciones lograron ser aún más grandes cuando el adobe dejó de ser secado al sol para ser secado al horno.



Imagen 1: Zigurat de Ur con su fachada reconstruida (sobrehistoria.com)

En Egipto y Grecia, ante la limitación de materia prima para el desarrollo de unidades como en otras civilizaciones, utilizaron material obtenido desde canteras. Mientras las canteras egipcias eran las más abundantes, las griegas tenían materiales de mejor calidad, como el mármol (que era utilizado como revestimiento).

Fueron los romanos los que agregaron la racionalidad a la utilización de la albañilería. Debido a sus limitadas canteras, debieron utilizar tanto las canteras egipcias como las griegas, y además tenían conocimiento de la albañilería sumeria. Combinando todos los conocimientos anteriores junto a la utilización de los primeros morteros de cemento y una apropiada racionalidad, se logró un gran avance en nuevos sistemas constructivos: mejorar la calidad de los cimientos implicó que la construcción de muros se volvió más simple, además permitió el desarrollo del arco, bóveda y cúpula.



Imagen 2: Acueducto de Segovia (nationageographic.com.es)

Durante la Edad Media, la albañilería permaneció sin grandes avances en Europa. Aun así, se utilizó en Londres, para evitar la propagación de incendios; en castillos y fortificaciones. También tuvo un uso amplio en la construcción de mezquitas en la cultura árabe y en la gran muralla china. La llegada de colonos a América trajo el ladrillo cerámico hasta el continente.

La llegada de la revolución industrial propició el inicio de la mirada científica en la albañilería. En 1813 Brunel propuso la inclusión de refuerzos en la albañilería, aunque no incluyó métodos de diseño. El uso de albañilería reforzada se volvió a retomar en 1889, cuando Cottacin patentó un método de albañilería reforzada, y a principios de 1900 se comenzó con la realización de ensayos buscando el desarrollo de métodos de diseño de albañilería.

En Chile en tanto, hasta la llegada de los españoles, la albañilería se realizaba con materiales rocosos existentes. Tanto los materiales como las costumbres de construcción cambiaron gracias a los españoles.

Más al sur, desde Copiapó hasta Concepción, dominó el adobe como material para la albañilería durante unos 300 años, hasta el siglo XVIII. La albañilería solo era utilizada en estructuras públicas de alta importancia y en las residencias de los ciudadanos más adinerados.

La evolución de la albañilería nacional se dio durante el siglo XX, con la introducción de nuevas modalidades constructivas, así como de normas de diseño.

La albañilería confinada entró en los años 30 al país (OGCU, 1936). Los beneficios de esta método constructivo fueron vistos en el terremoto de Chillan de 1939, donde hubo alto grado de destrucción salvo en las pocas casas de albañilería confinada existentes. La albañilería armada fue traída desde Estados Unidos durante los años 70.

Ambas modalidades constructivas se encuentran normadas por el INN. Mientras la NCh2123 se encarga de regular el diseño y cálculo de la albañilería confinada, la NCh1928 se encarga de regular el diseño y cálculo de albañilería armada.

2.2.4 Marco Normativo de Albañilería Armada

En Chile, los requisitos para el diseño y cálculo de la albañilería armada están regulados por la norma NCh1928.Of1993 Mod. 2009.

Una de las consideraciones indicadas en las disposiciones de diseño indica que la albañilería armada, a pesar de ser un material particulado, actúa como un todo para resistir las sollicitaciones.

De igual manera se aceptan las hipótesis de que secciones planas permanece planas, que los módulos de elasticidad permanecen constantes (comportamiento elástico) y que hay adherencia entre armadura y albañilería mediante hormigón de relleno.

La tensión de diseño f'_m que se utiliza en el proceso de diseño corresponde a la resistencia prismática de proyecto de la albañilería. Las tensiones admisibles pueden aumentarse en un 33,3% cuando se tenga combinación de cargas eventuales con peso propio y sobrecargas.

Las tensiones admisibles, así como los módulos de elasticidad vienen indicados por la misma norma NCh1928.

Debido a que la albañilería no resiste tracción axial, se coloca armadura de acero para resistir estas cargas.

La compresión de muros debe resistir lo indicado expresamente en la norma. Esto es, respetar las siguientes fórmulas:

- a) $F_a = 0,2 f'_m \left[1 - \left(\frac{h}{40 t} \right)^3 \right]$, en construcciones con inspección especializada;
- b) $F_a = 0,1 f'_m \left[1 - \left(\frac{h}{40 t} \right)^3 \right]$, en construcciones sin inspección especializada

donde:

- f'_m es la resistencia a la compresión prismática de la albañilería;
- h es el menor valor entre distancia de pandeo vertical y distancia entre soportes laterales;
- t corresponde al espesor del muro; y

- F_a es la resistencia a la compresión del muro.

La resistencia a la flexión se determina considerando los supuestos indicados en el punto 5.1 de la norma. También se debe tener en consideración la existencia de huecos de albañilería sin llenar en la zona comprimida. Adicionalmente, se debe dimensionar elementos considerando la flexión y el esfuerzo axial actuando de manera conjunta sobre un muro. Las tensiones solicitantes deben ser menores que las tensiones admisibles de diseño. Para la flexo-compresión, sólo se debe utilizar el 50% de la carga sísmica.

La resistencia al corte se determina de acuerdo a las fórmulas indicadas en la norma, cumpliendo además que las tensiones solicitantes sean menores que las tensiones admisibles. Para el corte derivado de acciones sísmicas en albañilería de ladrillo cerámico, se debe diseñar las armaduras considerando solo el 80% del corte originado por carga sísmica.

La fórmula que permite calcular la tensión de corte solicitante según la norma es la siguiente:

a) $v = \frac{V}{b \cdot d}$

Mientras que la armadura de corte se debe determinar de acuerdo a la siguiente fórmula:

b) $A_v = \frac{1,1 \cdot V \cdot s}{F_s \cdot d}$

La armadura longitudinal debe tener un diámetro mínimo de 8 mm, mientras que su diámetro máximo corresponde a la mitad de la menor dimensión del hueco de un ladrillo. La armadura horizontal tiene un diámetro mínimo de 4 mm.

El espesor de los muros resistentes de albañilería debe ser igual a 1/25 del menor valor entre la altura y ancho libre del muro. De igual forma, el espesor no puede ser menor de 14 cm.

El área de la armadura en los muros debe ser mayor o igual a 0,06% de la sección bruta en la dirección de la armadura. De todas formas, la suma de los porcentajes de la armadura horizontal y vertical debe ser mayor o igual que 0,15%. Solo se deben considerar armaduras que se extiendan por todo el ancho y el alto del muro. El diámetro mínimo de armaduras de repartición debe ser de 8 mm, aunque en los bordes este aumenta a los 12 mm.

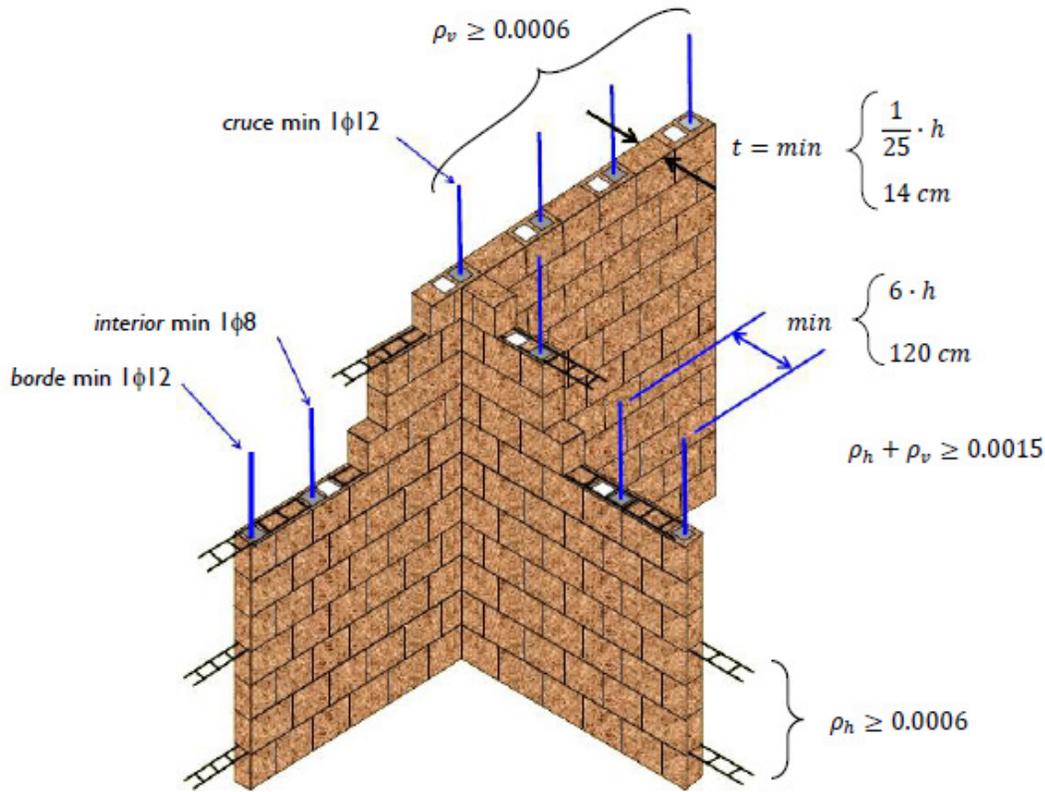


Figura 6: Dimensiones de diseño según NCh1928 (Curso CI5223 de la FCFM, 2016)

2.3 Modelación y análisis de albañilería

Este segmento se puede clasificar en dos grandes secciones. La primera sección corresponde a la modelación de la albañilería propiamente tal en sistemas computacionales mientras que la segunda busca presentar algunos métodos de análisis computacional.

2.3.1 Modelación de albañilería.

Las soluciones a problemas estructurales obtenidas mediante análisis presentan incertidumbres. Estas incertidumbres se pueden dividir en al menos 2 categorías: las de origen aleatorio y las de origen epistémico (Facchini *et al.*, 2017). Mientras las fallas de origen aleatorio hacen referencia a todas las posibles fallas que son inherentes a los materiales, métodos constructivos y similares, las fallas de origen epistémico hacen referencia a la falta de conocimiento apropiado, tanto de las características propias de los materiales, como sus propiedades mecánicas y geométricas. Para poder obtener soluciones válidas, y que por lo mismo sean representativas, es importante considerar la anisotropía presente en la albañilería (Cecchi y Tralli, 2012).

Debido a que la albañilería es un material particulado y heterogéneo, se puede realizar modelaciones considerando cada una de las unidades, así como las propiedades correspondientes del mortero de pega, lo que incluye efectos de fricción y deslizamiento (Cecchi y Tralli, 2012)

que deben de ser considerados igualmente. La anisotropía, así como la modelación de cada unidad de la estructura consume mucho tiempo y recursos computacionales (Brozovsky y Maluchova, 2015).

Aun cuando la albañilería corresponde a un material particulado y heterogéneo, esta puede ser modelada en forma simplificada como material continuo (Cecchi y Tralli, 2012), de igual forma como se hace con hormigón. Las normas chilenas de albañilería también utilizan este enfoque. Lo anterior es correcto en estructuras de forma regular y por lo tanto, podría no resultar idóneo en estructuras de forma compleja (Brozovsky y Maluchova, 2015). Dicha modelación como medio continuo requiere que en caso de ser necesario, se realice el llenado total de huecos de la albañilería, algo que permite utilizar los principios del corte en el hormigón armado (Dhanasekar, 2011).

Otro elemento importante es el hecho que la albañilería no es un material homogéneo a lo largo del tiempo, ni lo es tampoco en distintas ubicaciones, aún en un periodo específico de tiempo (Brozovsky y Maluchova, 2015). Lo anterior corresponde al hecho de que en un mismo espacio de tiempo la albañilería tiene distintas propiedades dependiendo del lugar donde esta es fabricada. Incluso dentro de un mismo país, en una misma empresa se observa cierta variabilidad (Gallegos, 2005). De igual manera, en un lugar determinado, a lo largo del tiempo la albañilería muestra también una alta variabilidad (Brozovsky y Maluchova) por lo que la caracterización del material debe considerar la situación específica de determinada de la estructura analizada. Lo anterior implica que los ensayos utilizados deben considerar específicamente la situación local actual.

En cuanto al comportamiento de estructuras, Dhanasekar (2011) señala que la carga lateral es la que más daños ocasiona a muros de albañilería, aunque estos resisten bien las cargas gravitacionales. Adicionalmente, agrega que estructuras de albañilería no siempre están bien diseñadas, y cuando lo están no siempre están bien construidas. En particular, sobre las viviendas sociales de albañilería en Chile Marín (2009) señala que de acuerdo a Sierra (2002) *“las viviendas señaladas son frecuentemente reforzadas con niveles de cuantía menores a los establecidos por la norma chilena NCh 1928.Of93”*.

Con respecto al corte y la influencia de las armaduras en la albañilería armada, indica que es la armadura horizontal la que ofrece resistencia al corte lateral, con un aporte no significativo de la armadura vertical. De manera equivalente, para el corte vertical la resistencia adicional es aportada por la armadura vertical, mientras que la armadura horizontal tiene un aporte despreciable. Se puede asumir un comportamiento ante el corte similar al hormigón cuando se tiene llenado total de huecos, aunque cuando esa condición no se cumple, el comportamiento de la albañilería no es bien comprendido (Dhanasekar, 2011).

Hay 3 tipos de fallas principales: falla por corte con grieta diagonal, deslizamiento por corte y aplastamiento de la albañilería por flexión (Dhanasekar, 2011).

Si bien se asegura que la falla por corte con grietas diagonales es una falla frágil, algunos ensayos muestran que algunos muros que fallan diagonalmente por corte pueden ser deformados más de un 1%, comportándose de una forma más dúctil (Dhanasekar, 2011).

2.3.2 Métodos de modelación ante cargas laterales.

La modelación ante eventos sísmicos es compleja, debido a que no existe sólo un método (Mora *et al.*, 2006). Dos de los métodos principales de modelación son el análisis *tiempo-historia* y el análisis *pushover*.

El análisis *tiempo-historia* trabaja con una carga dinámica, por lo que entrega una solución para cada uno de los instantes de tiempo. Lo anterior implica la utilización de muchos recursos de cálculo y de una carga dinámica. Es importante entregar resultados que sean representativos del movimiento o aceleración del suelo del evento en estudio (Mora *et al.*, 2006).

Una de las complicaciones que presenta este método es la reconstrucción periódica que requieren tanto las matrices de rigidez como de amortiguamiento cada vez que un elemento supere el límite de fluencia (Mora *et al.*, 2006).

El análisis *pushover* en tanto, calcula la capacidad de un edificio mediante cargas estáticas laterales incrementales. Para lo anterior se tiene dos conceptos claves: la capacidad y la demanda. Mientras la capacidad es propia de la estructura, y por lo mismo es constante durante el análisis, la demanda no es constante, y corresponde al conjunto de fuerzas externas que actúan sobre la estructura a analizar. Esta demanda varía según el sismo a utilizar. Como el sismo corresponde a una carga dinámica, la relación de carga dinámica a estática se hace utilizando los espectros de respuesta (Mora *et al.*, 2006).

La evaluación de capacidad mediante este método conlleva el desarrollo de una curva de capacidad como el visto en la Figura 7. Esta curva se obtiene al graficar el corte basal y el desplazamiento observado en el nivel más alto de la estructura (último piso en caso de un edificio de varios pisos). Esta curva se construye con cargas laterales incrementales. El fin de la evaluación se considera cuando se llega a un punto de no convergencia tras haber alcanzado la carga máxima (Mora *et al.*, 2006).

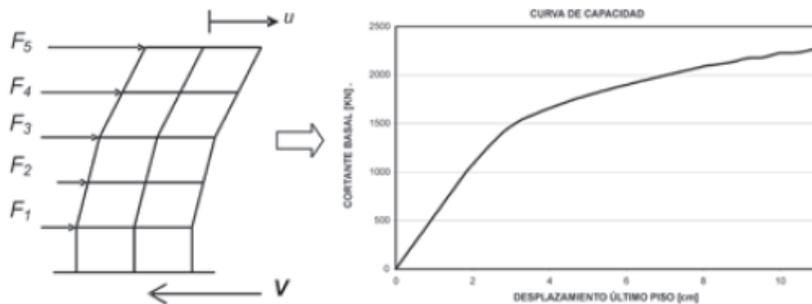


Figura 7: Esquema de procedimiento *Pushover* (Mora *et al.*, 2006).

Las cargas laterales en estructuras de varios niveles de aplicación de carga pueden ser variadas. Algunas de estas distribuciones son *Uniforme*, *ELF* (equivalent lateral force) y *triangular invertida*. La curva de capacidad depende de la distribución de cargas seleccionada. Siendo similares en comportamiento la distribución triangular con la distribución ELF (Mora *et al.*, 2006).

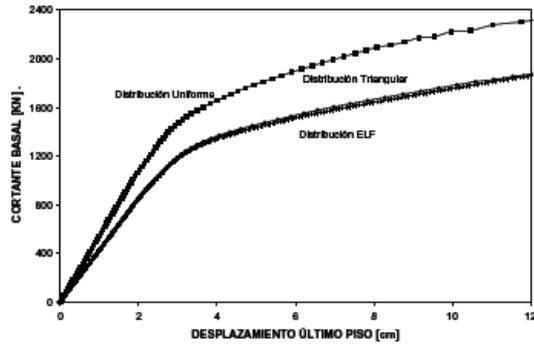


Figura 8: Curvas de capacidad para distintas distribución de cargas (Mora *et al.*, 2006)

Como forma de corregir algunas de las deficiencias del método *Pushover* tradicional, es que Chopra y Goel (2001) propusieron un procedimiento llamado *Pushover modal*. Este método es una combinación de ambas metodologías previas. Se implementa el análisis *Pushover* para cada modo de la estructura; para luego reducir el sistema de N grados de libertad a N sistemas de un solo grado de libertad. Al final del procedimiento simplemente se combina cada uno de los aportes modales.

La comparación de ambos métodos *Pushover*, tradicional y modal, con respecto a un caso base desarrollado considerando el análisis tiempo-historia, indicó que el mayor error con respecto al caso base vino de parte del análisis *pushover* tradicional, aunque la repetición del método utilizando más de un modo disminuyó el error del análisis *pushover* (Mora *et al.*, 2006).

Acciones adicionales que permitirán disminuir el error del análisis con *pushover* son principalmente la no utilización de distribución de cargas uniforme. El incluir dos o tres modos de la estructura también puede hacer disminuir el error de análisis *pushover*. Puede haber complicaciones con la utilización de no linealidad, generando un aumento del error del análisis *pushover* (Mora *et al.*, 2006).

Mora *et al.* (2006) indican que debido a su menor utilización de recursos y bajo índice de error comparado con el análisis *tiempo-historia*, el método de *pushover* utilizando varios modos es la que presenta la mejor solución global para análisis de estructuras ante eventos sísmicos.

3. Antecedentes Experimentales

3.1 Introducción

Como se mencionó previamente, las estructuras de albañilería son las que se encuentran en mayor proporción en el país.

Adicionalmente las viviendas frecuentemente son reforzadas utilizando niveles de cuantía que son menores a los indicados por la NCh 1928.Of93 (Sierra, 2002).

La situación anterior generó que entidades como el *Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón* (ICH), impulsara el desarrollo de estudios para conocer el comportamiento de albañilería reforzada con bajos niveles de cuantía.

Para cumplir el objetivo se llevaron a cabo tres etapas. La primera etapa correspondió a resultados experimentales previos y existentes, además de obtener recomendaciones de acuerdo al desempeño sísmico. La segunda etapa fue la etapa en la que se materializaron ensayos de muros cortos donde se les sometió a cargas verticales (solicitud frecuente) y cargas horizontales (eventuales).

A continuación se mostrará el procedimiento experimental y los resultados de uno de los ensayos realizados en la segunda etapa. Se utilizaron los resultados de esta etapa al ser unos de los más recientes existentes utilizando albañilería de ladrillo cerámico. El ensayo realizado buscó evaluar el efecto de la cantidad de refuerzo horizontal de acero en la albañilería. Este programa experimental fue desarrollado por Sepúlveda (2003) y usado por Marín (2009).

3.2 Descripción del programa experimental

De acuerdo a lo señalado por Marín (2009), el programa experimental comprendió la realización de 16 ensayos. Los muros se conformaron de albañilería armada de ladrillo cerámico a escala natural, con dimensiones de paño de albañilería de 200 cm de alto y 197,5 cm de ancho. Estos muros fueron sometidos a carga lateral cíclica incremental.

Los ensayos se distribuyeron de la siguiente manera, de acuerdo a lo señalado en la Tabla 4:

Tabla 4: Distribución de ensayos de Muros de Albañilería Armada (Marín, 2009).

Refuerzo horizontal (N° de escalerillas)	Cuantía de refuerzo horizontal ρ_h	Muros sin carga axial (SA)	Muros con carga axial (CA)
-----	0,000	2	2
2E(phi)4.2mm	0,002	2	2
3E(phi)4.2mm	0,003	2	2
4E(phi)4.2mm	0,004	---	2
Cantidad de muros		6	8

La altura de los muros correspondió a 220 cm, y se buscó además tener una relación de aspecto (H/I) cercana a 1. La geometría y dimensión de los muros fue condicionada por el ICH, con el objetivo de representar de la mejor forma tanto las características como las condiciones que pueden afectar a los muros de viviendas de albañilería armada.

3.3 Descripción de muros sometidos a ensayo

Para la identificación de los muros ensayados se usó la siguiente nomenclatura:

MLC-0X-YYZZ

donde:

- **MLC** corresponde a “*muro de ladrillos cerámicos*”,
- **0X** corresponde al número de escalerillas de refuerzo horizontal,
- **YY** indica si el muro se encuentra sometido a carga axial (CA: con carga axial) o no (SA: sin carga axial), y
- **ZZ** es el número de muro correlativo de las mismas características.

La razón $M/(Vd)$ en los ensayos correspondió a 0,95. Lo anterior se puede ver en la siguiente figura, y es equivalente a:

$$h/d = 187,5 \text{ cm} / 197,5 \text{ cm} = 0,95 \quad (3.1)$$

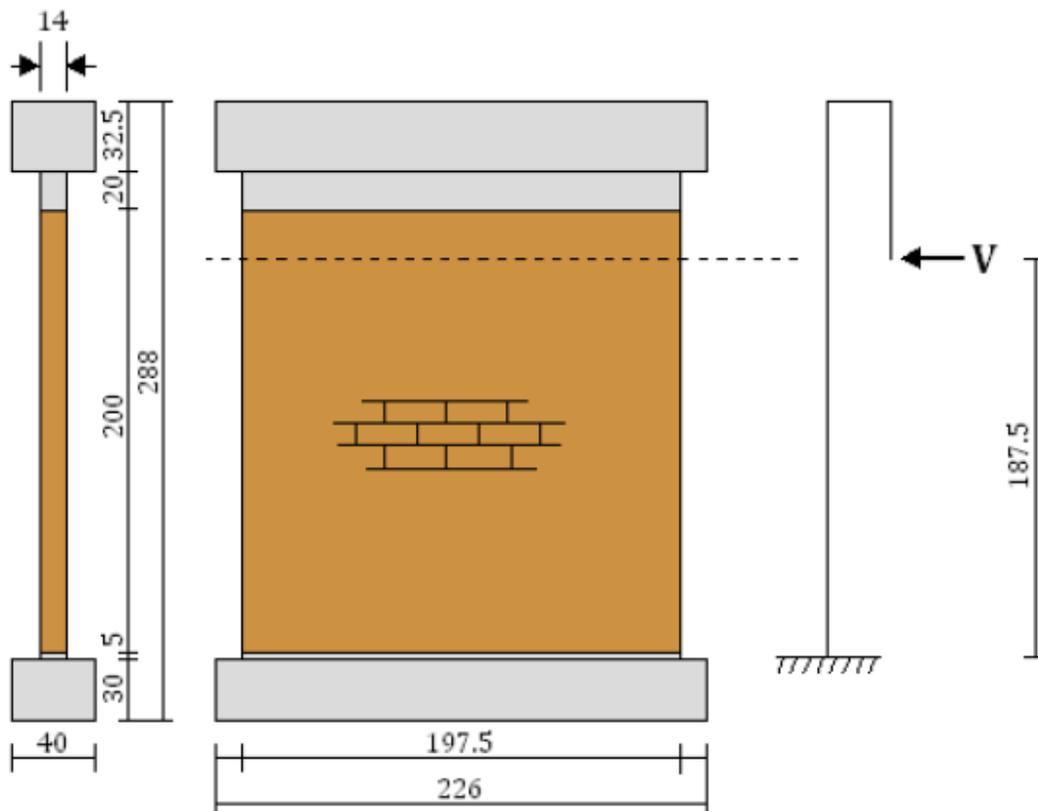


Figura 9: Geometría y forma de muros ensayados (Marín, 2009).

Los muros fueron construidos monóticamente sobre bases de hormigón armado. Lo anterior se realizó buscando facilitar su traslado y montaje en el marco de ensayo.

3.4 Materiales utilizados en la construcción de los muros.

A continuación se presentarán los materiales utilizados, así como también sus características y propiedades. El laboratorio de Ingeniería Estructural y Geotecnia de la *Pontificia Universidad Católica de Chile* fue el lugar donde los ensayos fueron llevados a cabo.

3.4.1 Ladrillos Cerámicos

Estas unidades corresponden al tipo *Gran Titán Reforzado Hueco (GTRH)* fabricadas por la empresa Princesa. Más detalles de las unidades de albañilería se detallan en la Tabla 5:

Tabla 5: Características y propiedades de la unidad de albañilería (Marín, 2009).

Tipo de unidad	Gran Titán Reforzado Hueco
Clasificación según NCh169	clase MqP, grado 1
largo x ancho x alto [cm]	29 x 14 x 11,2
Resistencia a la compresión [kgf/cm²]	288,4 + 32
porcentaje de huecos	46%



Figura 10: Unidad de ladrillo cerámico (Marín, 2009).

3.4.2 Mortero de Pega

Se utilizó *Mezcla para Pegar*, tipo M10 como el mortero para pegar las unidades de ladrillo cerámico. Este mortero es comercializado por la empresa Presec.

El espesor de aplicación correspondió a 13 mm, lo que implica un escantillón aproximado de 12,5 cm.

Los resultados de ensayos RILEM aplicados al material son los detallados en la Tabla 6:

Tabla 6: Resultados de ensayos RILEM de mortero de pega (Marín, 2009).

Muros Asociados		Tensión promedio de rotura a flexotracción [kgf/cm²]	Tensión promedio de rotura a compresión [kgf/cm²]
MLC-00-SA01	MLC-00-SA02	47,8	185,7
MLC-00-CA01	MLC-00-CA02		
MLC-01-SA01	MLC-02-SA01	48,3	175,8
MLC-02-SA02	MLC-02-CA01		
MLC-02-CA02	MLC-02-CA03	34,7	152,5
MLC-03-SA01	MLC-03-SA02	36,4	168,5
MLC-04-CA01	MLC-04-CA02	45,3	142,2

Para el ensayo a flexotracción se utilizaron tres prismas de 16 x 4 x 4 cm, mientras que para el ensayo a compresión se utilizaron seis prismas de 8 x 4 x 4 cm.

3.4.3 Grout de Relleno de Huecos

El grout utilizado también era comercializado por la empresa Presec, y en este caso se utilizó *HomeCrete, Concreto Preparado*, tipo *Relleno de Tensores*.

Los resultados de ensayos de compresión cilíndrica son los siguientes:

Tabla 7: ensayos de compresión cilíndrica de grout de relleno (Marín, 2009)

Muros Asociados		P _{max} promedio [tonf]	f' _c promedio [kgf/cm ²]
MLC-00-SA01	MLC-00-SA02	12,2	252,5
MLC-00-CA01	MLC-00-CA02		
MLC-01-SA01	MLC-02-SA01	12,3	261,7
MLC-02-SA02	MLC-02-CA01		
MLC-02-CA02	MLC-02-CA03	8,0	165,6
MLC-03-SA01	MLC-03-SA02	7,7	160,1
MLC-03-CA01	MLC-03-CA02	7,3	149,2
MLC-04-CA01	MLC-04-CA02	11,3	232,8

3.4.4 Barras de Refuerzo Vertical

Todos los muros de albañilería ensayados fueron reforzados verticalmente. Para lo anterior se utilizaron dos barras por borde: una $\phi 22$ y una $\phi 18$.

Las barras se ubicaron en los huecos más extremos, siendo ubicada la $\phi 22$ en el hueco exterior mientras que la $\phi 18$ se ubicó en el hueco interior contiguo al ya mencionado. Al utilizar armaduras de borde mayores a la norma se aumenta la resistencia a la flexión del muro, pasando a controlar la resistencia al corte del muro.

Las resistencias características del acero utilizado en el refuerzo vertical se detallan de la siguiente forma, según se indica en la Tabla 8:

Tabla 8: Resistencias características del acero de Refuerzo Vertical (Marín, 2009).

tipo de acero	A63-42H
Resistencia promedio a la fluencia [kgf/cm ²]	4760
Resistencia promedio a la rotura [kgf/cm ²]	7653

3.4.5 Barras de Refuerzo Horizontal

La armadura horizontal es la encargada de trabajar como armadura de corte del muro. La materialización se llevó a cabo con escalerillas electro-soldadas: 2 barras longitudinales, de diámetro 4,2 mm, unidas cada 30 cm por barras transversales.

Las resistencias del acero utilizado como armadura de corte son indicadas en la Tabla 9, mostrada a continuación:

Tabla 9: Resistencias características del acero de armadura de corte (Marín, 2009).

tipo de acero	AT56-50H
Resistencia promedio a la fluencia [kgf/cm ²]	6104
Resistencia promedio a la rotura [kgf/cm ²]	6598

3.4.6 Propiedades básicas de la albañilería

A diferencia de los materiales anteriores, en este caso fue Sepúlveda (2003) quien realizó ensayos de prismas y muretes cada 2 muros construidos (Marín, 2009).

Los resultados obtenidos en cada ensayo, así como sus muros asociados y el total observado en la albañilería son:

Tabla 10: Propiedades básicas de la albañilería (Marín, 2009).

Muros asociados	f' _m [kgf/cm ²]	τ' _m [kgf/cm ²]	E _m [kgf/cm ²]	G _m [kgf/cm ²]
MLC-00-SA01 MLC-00-SA02	111,3	8,7	45330	14679
MLC-00-CA01 MLC-00-CA02	106,4	7,9	51632	10468
MLC-01-SA01 MLC-02-SA01	110,1	7,1	46747	10258
MLC-02-SA02 MLC-02-CA01	114,5	5,9	43292	6408
MLC-02-CA02 MLC-02-CA03	120,2	9,9	-----	20884
MLC-03-SA01 MLC-03-SA02	118,7	5,9	59880	5775
MLC-03-CA01 MLC-03-CA02	86,2	5,2	59859	11369
MLC-04-CA01 MLC-04-CA02	120,2	8,4	64704	9890
Valores Promedio	111,0	7,4	53063	11216

Los prismas fueron construidos apilando cinco unidades de ladrillo, el escantillón fue de 12,5 cm y su esbeltez de 4,4. Para obtener el módulo de Young se considera la pendiente de la recta tangente a la curva carga-deformación al 50% de la carga máxima.

En tanto las dimensiones de los muretes son 74x75 cm (alto x largo). El módulo de corte se definió como el módulo de la secante de la curva de carga vs distorsión angular al 45% de la carga máxima.

3.5 Ensayo de los muros

De acuerdo a Marín (2009), los ensayos de cada uno de los muros fue realizada en un marco de carga, el que tenía capacidad de aplicar una carga vertical constante de 100 tonf y una carga lateral en forma cíclica de hasta 100 tonf.

Debido a que se buscaba representar los muros de corte en un estado de voladizo, el pantógrafo se desactivó. Este elemento estaba encargado de mantener la viga en posición horizontal, siendo utilizado para representar un doble empotramiento del muro. El movimiento horizontal y vertical no es impedido por el pantógrafo en caso de estar activado.

Para la realización de los ensayos se aplicó deformaciones controladas. Estas deformaciones fueron aplicadas por ambos gatos hidráulicos horizontales. La altura a la que fueron dispuestos ambos gatos hidráulicos fue la correspondiente al punto de inflexión del muro (187,5 cm).

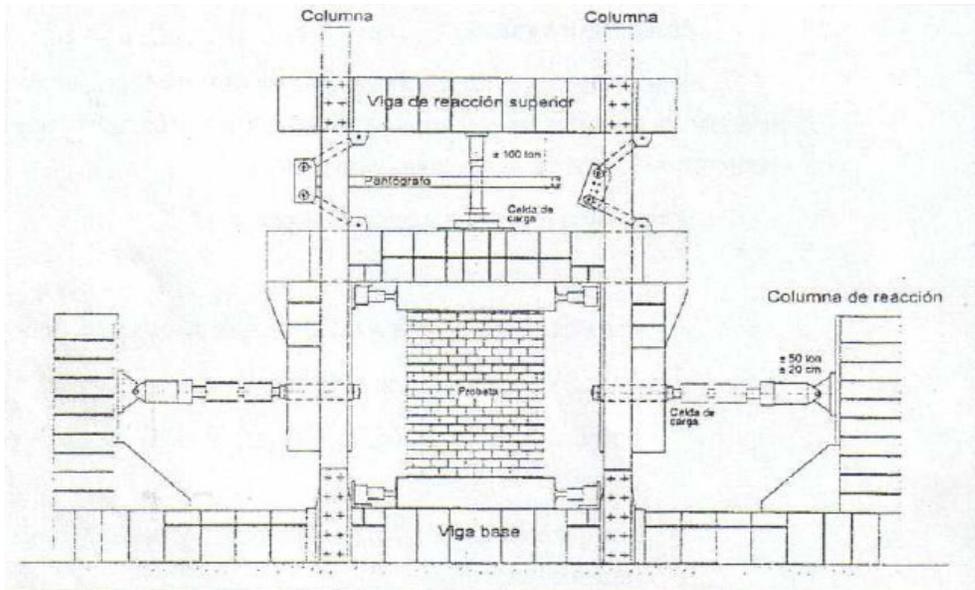


Figura 11: Marco de carga de ensayos (Marín, 2009).

Las deformaciones fueron aplicadas cíclicamente, como se puede observar en la Figura 12, de manera creciente hasta llegar a la rotura. Por cada nivel de deformación se realizaron dos ciclos. Las deformaciones máximas establecidas en el programa son 24 mm, que no necesariamente fueron obtenidas. El plan de deformaciones utilizado en los ensayos fue el siguiente:

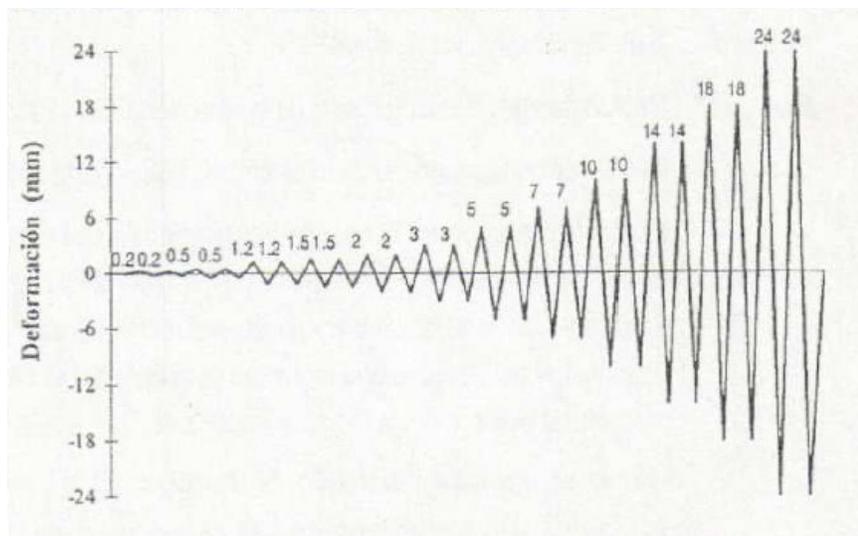


Figura 12: Plan de deformaciones utilizado por Sepúlveda (2003) (Marín, 2009).

3.6 Resultados de ensayos

Los ensayos realizados por Sepúlveda en el año 2003 mostraron que el comportamiento de los muros ante cargas laterales cíclicas se puede dividir en al menos dos comportamientos diferenciables.

El primer comportamiento corresponde a uno elástico. De acuerdo a Marín (2009) este comportamiento se extiende hasta la aparición de las primeras grietas diagonales.

El segundo corresponde al comportamiento no lineal del muro. En esta etapa se hace evidente el aporte del refuerzo horizontal tanto en la resistencia máxima al corte como al nivel de agrietamiento del muro y la distribución de las grietas (Marín, 2009).

Dentro de esta segunda etapa se pueden encontrar dos sub-etapas, la primera llamada endurecimiento o *hardening* donde la carga soportada por el muro aumenta en la medida que se aumenta la deformación, aunque en una tasa menor a la vista en la etapa elástica; la segunda etapa, en tanto, corresponde a la relajación o *softening*, donde la carga soportada por el muro disminuye en la medida que se aumenta la deformación. El límite para estas dos etapas viene marcado por la carga máxima que resiste el muro junto a la deformación asociada a la misma.

Un resumen de los resultados fue realizado por Marín (2009), siguiendo los resultados obtenidos por Sepúlveda (2003). En este resumen se incluyen variables como el refuerzo horizontal y la carga axial promedio. Adicionalmente se describe la fuerza de corte y deformación para cada dirección para dos estados puntuales del muro. Las deformaciones fueron medidas en el extremo superior de muro.

El estado correspondiente a la primera fisura diagonal importante se definió cuando una fisura abarcaba el 70% o más de las hiladas.

Tabla 11: Resumen de resultados de ensayos (Marín, 2009).

Muro	Variables			Sentido de la fuerza	1° Fisura diagonal importante		Carga máxima [tonf]	
	Refuerzo de corte	Cuántia de refuerzo	Carga axial promedio		dh	V	dh	V
	N° de escalerillas	[1/1000]	[tonf]		[mm]	[tonf]	[mm]	[tonf]
MLC-00-SA01	0	0,0	0,0	+	1,40	7,02	4,82	8,65
				-	1,48	8,26	1,48	8,26
MLC-00-SA02	0	0,0	0,0	+	1,66	7,76	1,66	7,76
				-	1,67	8,56	4,81	8,95
MLC-00-CA01	0	0,0	17,4	+	1,65	10,73	4,98	12,70
				-	1,53	12,11	1,53	12,11
MLC-00-CA02	0	0,0	17,7	+	1,65	8,89	5,11	11,21
				-	1,46	11,06	4,52	11,48
MLC-01-SA01	1	0,1	0,0	+	1,59	6,91	6,67	9,31
				-	1,52	7,18	4,81	9,80
MLC-02-SA01	2	0,2	0,0	+	1,65	7,10	7,08	11,17
				-	2,21	8,59	7,00	11,40
MLC-02-SA02	2	0,2	0,0	+	1,89	8,41	7,00	11,16
				-	1,38	8,64	6,78	12,19
MLC-03-SA01	3	0,3	0,0	+	2,02	8,78	9,50	14,19
				-	1,98	9,91	7,08	14,08
MLC-03-SA02	3	0,3	0,0	+	3,08	10,76	7,03	11,81
				-	1,78	10,21	3,80	12,70
MLC-02-CA01	2	0,2	17,6	+	1,77	11,21	7,09	14,19
				-	1,50	11,84	6,97	14,47
MLC-02-CA02	2	0,2	17,5	+	1,95	11,37	3,90	15,14
				-	1,85	11,99	4,60	13,63
MLC-02-CA03	2	0,2	16,8	+	2,45	12,82	4,96	13,27
				-	1,94	12,00	5,06	13,29
MLC-03-CA01	3	0,3	17,0	+	2,52	13,63	6,96	16,80
				-	1,03	11,48	7,05	15,80
MLC-03-CA02	3	0,3	16,8	+	2,05	10,28	8,08	16,40
				-	1,63	10,53	8,33	15,40
MLC-04-CA01	4	0,4	16,9	+	1,85	10,83	6,75	15,50
				-	1,50	11,28	6,98	14,11
MLC-04-CA02	4	0,4	17,2	+	2,01	9,96	8,39	17,44
				-	2,76	13,90	6,62	15,57

3.7 Descripción de los resultados de ensayo para la calibración

Debido a que existían varios muros disponibles, se optó por simular los muros con mayor cuantía de acero, que aún siendo menor, es la más cercana al valor mínimo especificado por norma. Luego, los muros elegidos correspondieron a los muros MLC-04-CA01 y MLC-04-CA02.

Los resultados de los ensayos, que corresponden a una representación del patrón de fisuración del muro al momento de la carga máxima, así como también la curva de histéresis y su envolvente, son los siguientes:

Muro MLC-04-CA01:

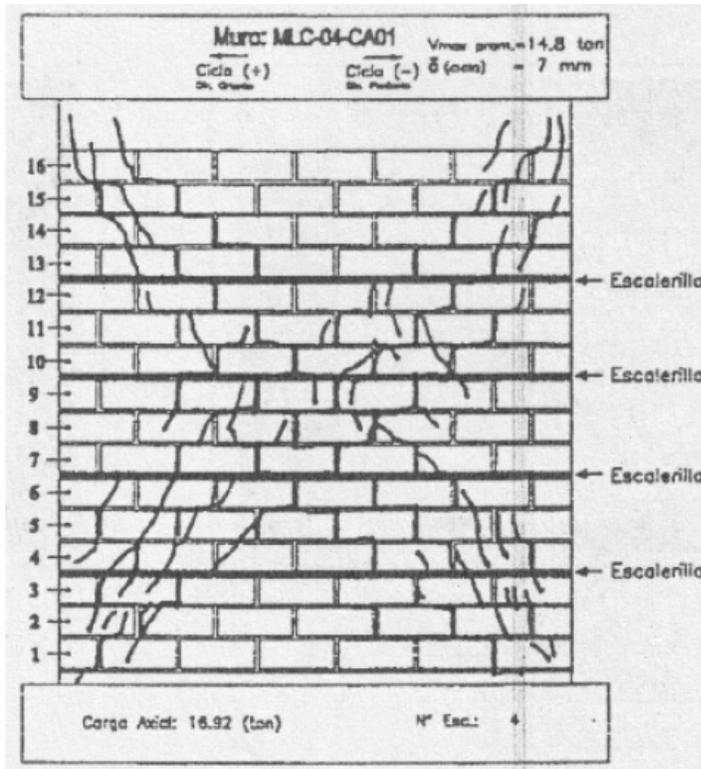


Figura 13: Patrón de fisuración al momento de carga máxima de MLC-04-CA01 (Marín, 2009).

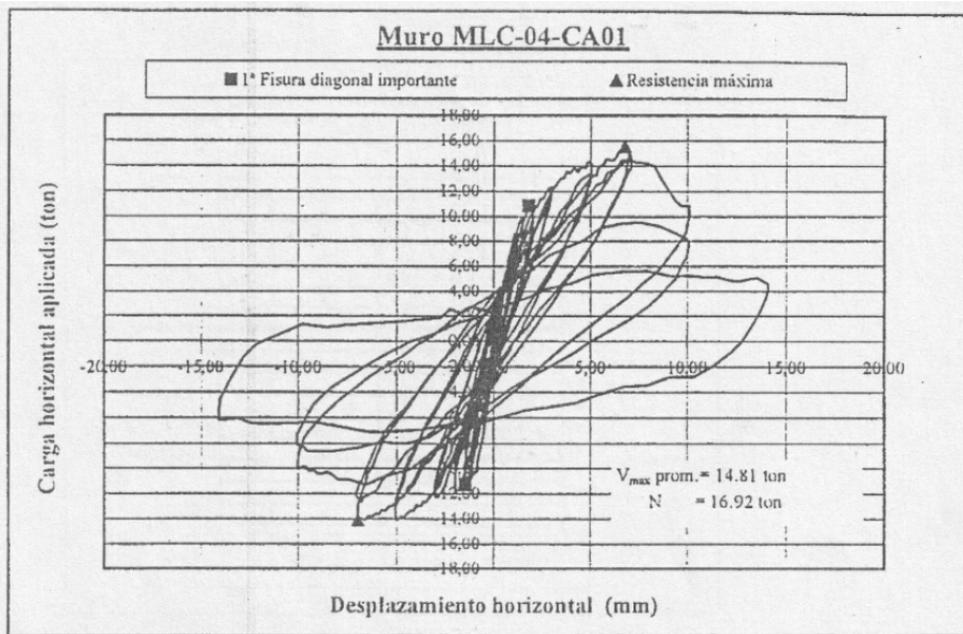


Figura 14: Curva de histéresis de muro MLC-04-CA01 (Marín, 2009).

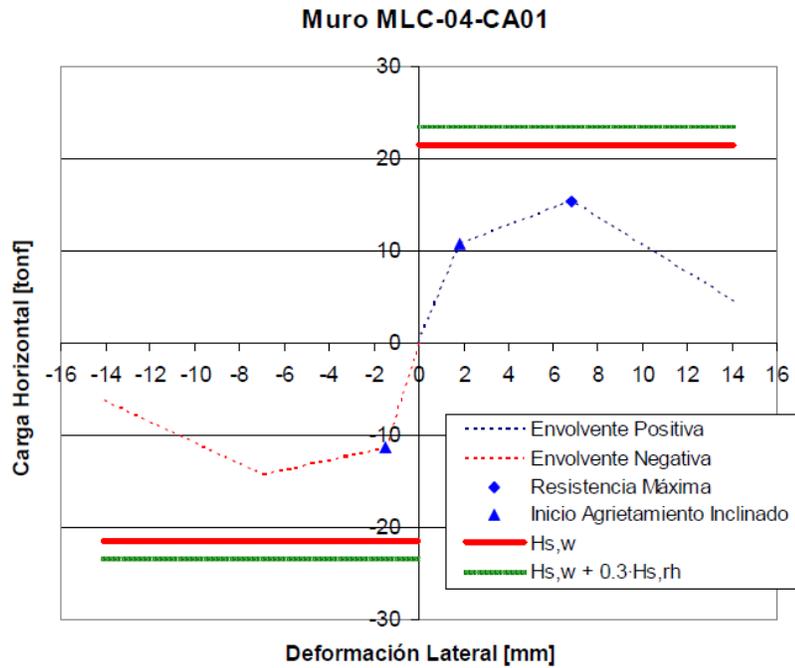


Figura 15: Curva envolvente de muro MLC-04-CA01 (Marín, 2009).

Muro MLC-04-CA02:

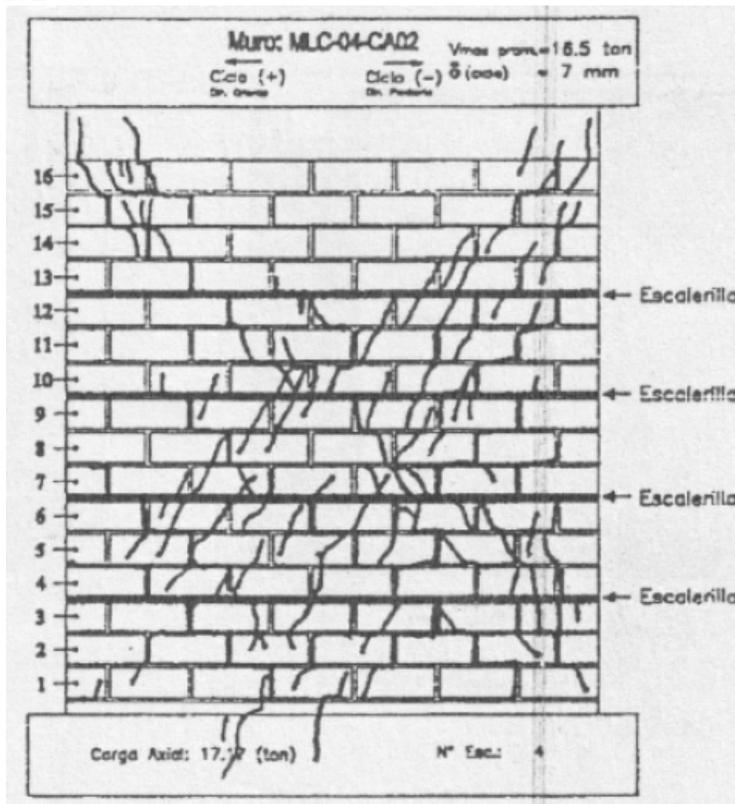


Figura 16: Patrón de fisuración al momento de la carga máxima MLC-04-CA02 (Marín, 2009).

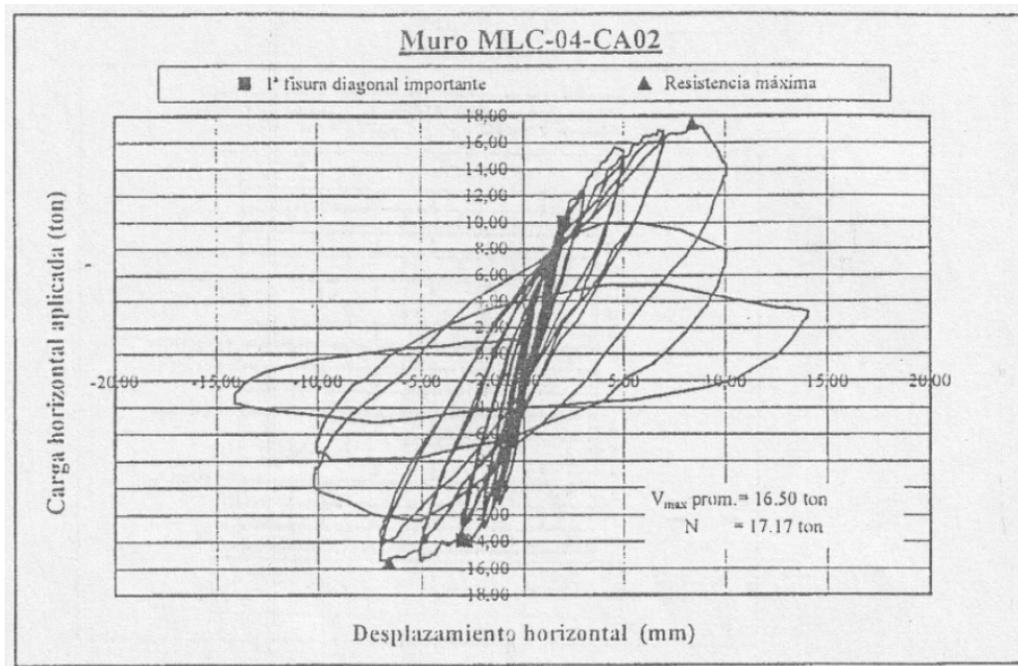


Figura 17: Curva de histéresis de muro MLC-04-CA02 (Marín, 2009).

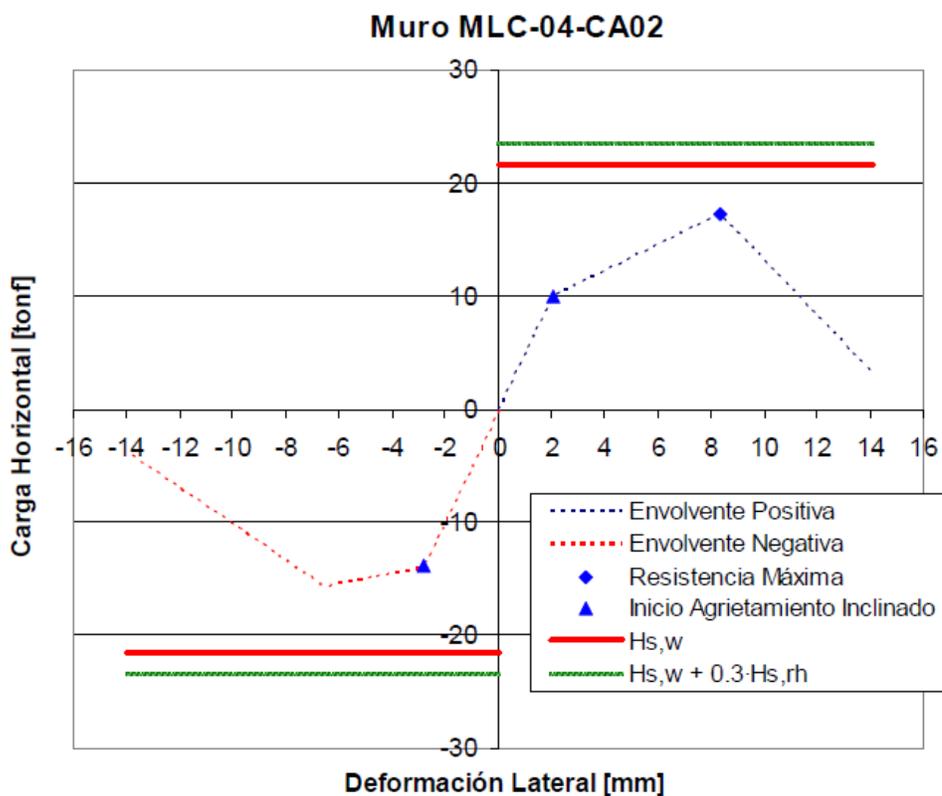


Figura 18: Curva envoltente de muro MLC-04-CA02 (Marín, 2009).

Adicionalmente, se presenta una comparativa de ambas curvas de manera simultánea. En esta se puede ver como la principal diferencia está en la carga máxima y la deformación asociada

a esta, por lo que el muro MLC-04CA01 presenta un menor decaimiento posterior a la carga máxima.

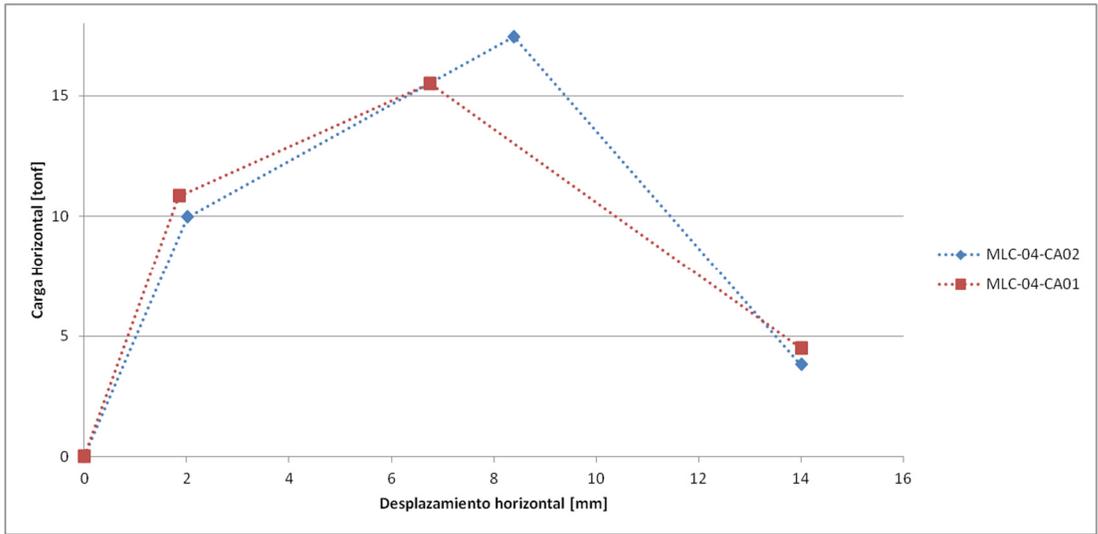


Figura 19: Comparación de envolventes de muros considerados para calibración.

Si bien ambos tienen un comportamiento dúctil, con un claro tramo donde ocurre *hardening* y el posterior *softening*, la ligeramente mayor ductilidad del muro MLC-04-CA01 es un factor a considerar. Además, en términos de carga máxima, el muro MLC-04-CA01 presenta la situación más desfavorable, siendo un 88% de la carga máxima del muro MLC-04-CA02.

4. Métodos de modelación de material

El trabajo desarrollado en esta memoria conlleva la utilización de algunos métodos para la modelación.

El trabajo se centró principalmente en trabajar con la modelación utilizando el criterio de plasticidad de Mohr-Coulomb y el modelo Rankine-Hill anisotrópico. Estos modelos serán descritos en el presente capítulo, y fueron desarrollados en el código de elementos finitos DIANA V10.1.

4.1 DIANA FEA

El software DIANA FEA¹ es descrito en el User's Manual (2017) como un código de elementos finitos de propósito general. Este código se encuentra basado en el Método de desplazamientos (DIANA es el acrónimo de "*DI*splacement method *ANA*lyser").

4.1.1 Campo de aplicación

Diana es un software de elementos finitos multipropósito. Posee amplias librerías tanto de elementos, materiales como de procedimientos.

Sus capacidades están principalmente desarrolladas en el análisis no lineal de hormigón y suelos. DIANA ha sido utilizado en el diseño de puentes, presas, plataformas marítimas, etc., así como en investigaciones en varias universidades. Se puede analizar un amplio rango de aspectos de los materiales. Los procesos de generación de calor y endurecimiento del hormigón pueden ser simulados. Análisis lineales y no-lineales pueden ser llevados a cabo.

El análisis no lineal es definido como uno de los puntos fuertes de DIANA. Aparte de todos los modelos de materiales disponibles, se puede agregar efectos como desarrollo de temperatura en el tiempo o madurez de materiales.

De igual manera se tiene una serie de materiales predefinidos. De estos materiales, se trabajará con *Hormigón*, *Acero* y *Albañilería*.

4.2 Elementos estructurales utilizados

Debido a que el modelo estructural consideraba la utilización de vigas, acero de refuerzo y un paño de albañilería, es necesario definir el tipo de materiales que será utilizado para el desarrollo del modelo estructural en DIANA FEA.

4.2.1 Barras de Refuerzo

Para los elementos de refuerzo se consideró la utilización de elementos tipo *truss*². Estos elementos son tales que tienen dos dimensiones menores que la dimensión mayor (o principal), con solo un grado de libertad (DOF) en la dirección axial, y por lo tanto no desarrolla esfuerzos de flexión ni de corte. La variable básica de los elementos *truss* es u_x .

¹ <https://dianafea.com/manuals/d101/Diana.html>

² <https://dianafea.com/manuals/d101/ElmLib/node29.html>

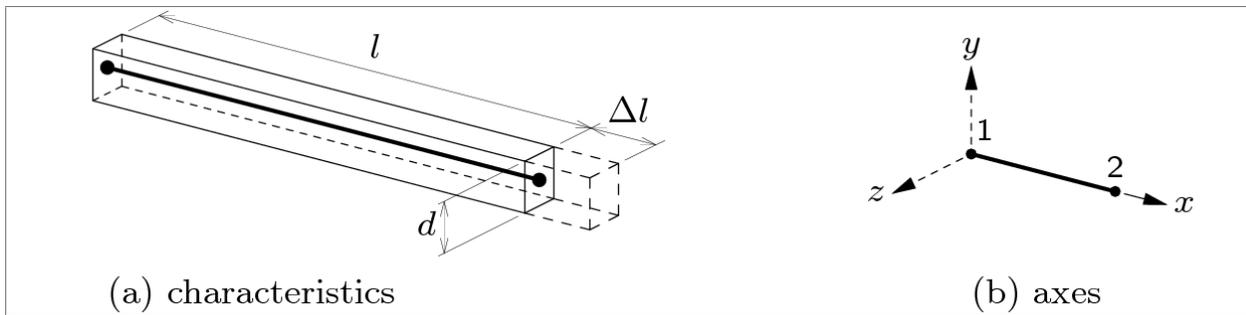


Figura 20: Elemento *truss* (DIANA User's Manual, 2017).

En particular, el elemento utilizado dentro del tipo *truss* corresponde al llamado elemento L2TRU. Este elemento es directamente integrado de dos nodos y puede ser utilizado tanto en modelos de 2 y 3 dimensiones.

4.2.2 Vigas de hormigón

Para las vigas se utilizaron los elementos tipo *beam*³, los que deben cumplir la misma condición geométrica que los elementos *truss*, aunque en este caso si contemplan DOF perpendiculares al elemento y de giro, pudiendo desarrollar esfuerzos de corte, flexión y torsión.

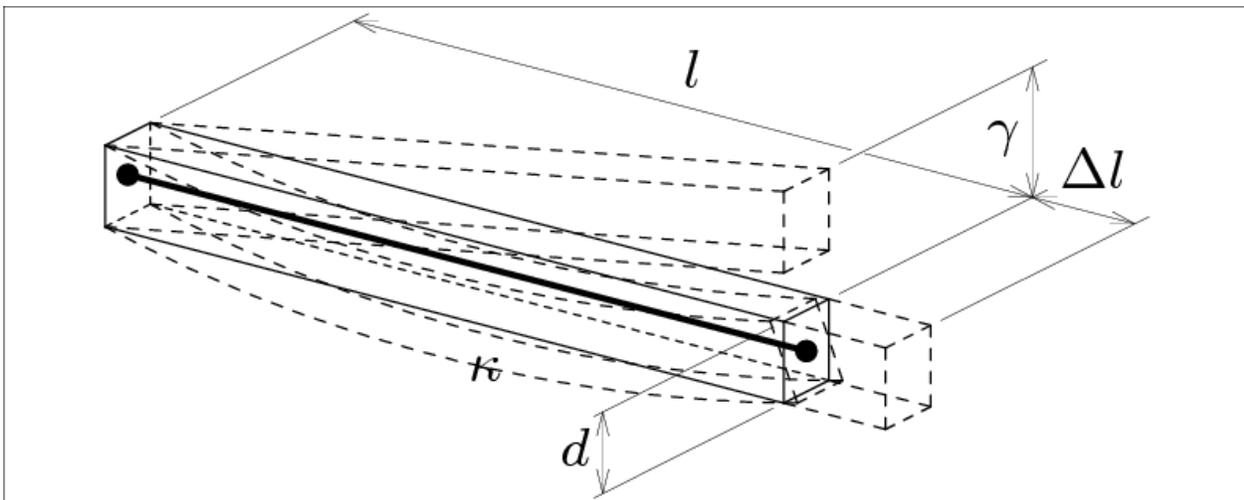


Figura 21: Elemento *beam* (DIANA User's Manual, 2017).

Existen tres clases de elementos *beam*, aunque solo la segunda clase es utilizada en el desarrollo del modelo. Los elementos de la clase II de *beam* son integrados numéricamente en su sección transversal a lo largo del eje. En los elementos de esta clase, solo se considera la carga en los nodos, de igual manera que las deformaciones y las tensiones de esfuerzo son determinadas en estos puntos. La deformación debido al corte no se toma en cuenta, además se supone que secciones planas permanecen planas y perpendiculares al eje de la viga (Teoría de Bernoulli).

Para el caso específico en estudio, se utilizó el elemento L7BEN. Este elemento es recto, compuesto por 2 nodos. Las variables básicas son las traslaciones u_x y u_y , así como la rotación \varnothing_z en los nodos.

³ <https://dianafea.com/manuals/d101/ElmLib/node56.html>

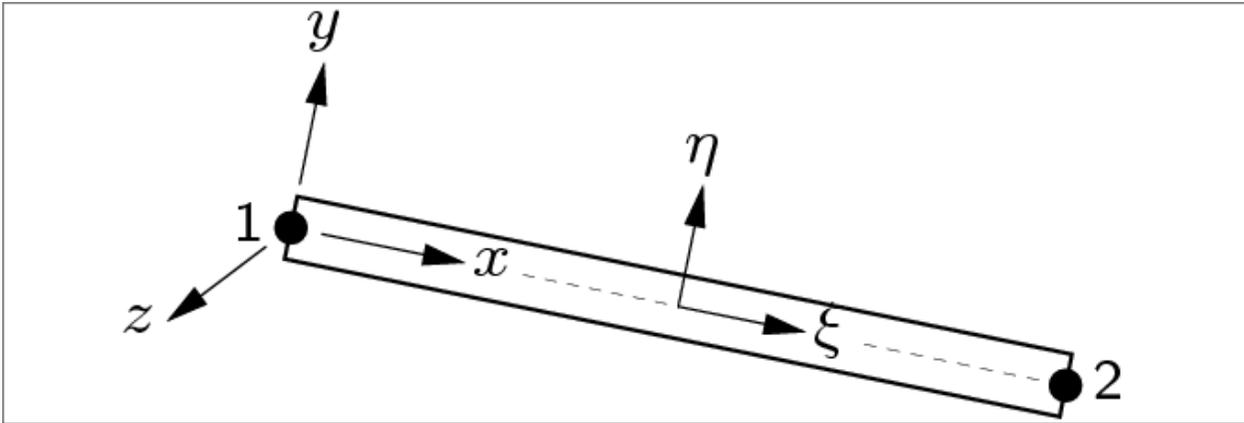


Figura 22: Representación de L7BEN (DIANA Manual's User, 2017).

4.2.3 Paño de albañilería

Finalmente se utilizaron elementos *Plane Stress*⁴ para representar el paño de albañilería, ya que no consideran cargas fuera del plano, siendo óptimas para modelaciones en dos dimensiones. Estos elementos deben cumplir condiciones tanto con respecto a la forma como a las cargas que actúan sobre este elemento.

La condición de forma conlleva que estos elementos deben ser planos, es decir, que los nodos deben estar en un plano, que no sea curvo. Además, se requiere que estos elementos sean delgados (*thin*): el espesor t debe ser pequeño en comparación con las otras dimensiones del elemento.

La condición de cargas significa que éstas deben actuar solamente en el plano del elemento. Lo anterior conlleva que los elementos *Plane Stress* una tensión nula en la componente perpendicular a la cara de los mismos, es decir $\sigma_{zz} = 0$.

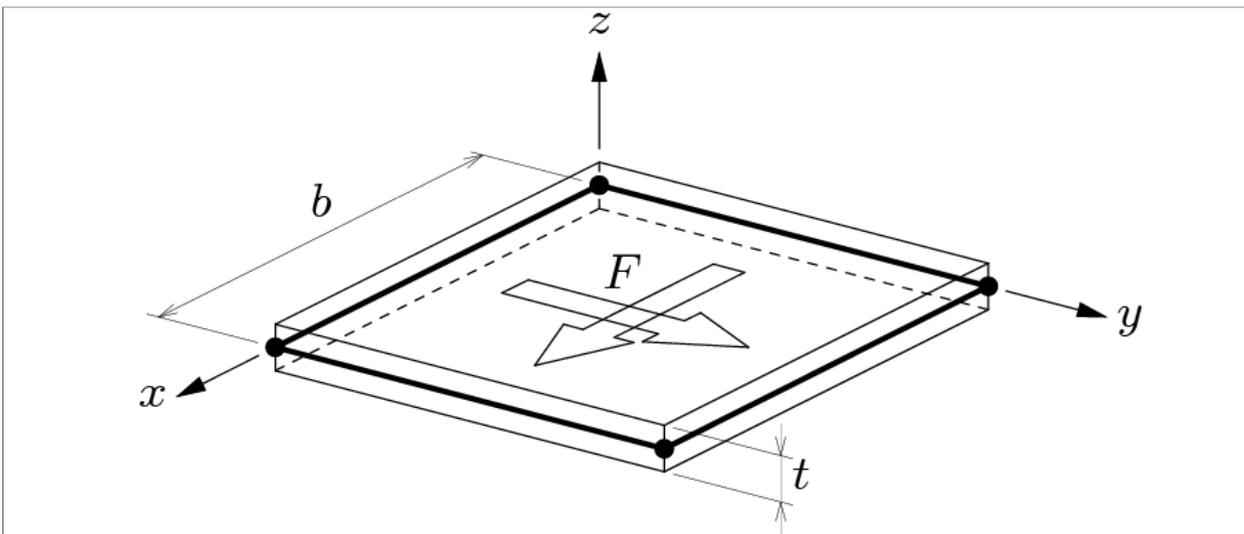


Figura 23: Elemento *Plane Stress* y esquema de cargas (DIANA User's Manual, 2017).

⁴ <https://dianafea.com/manuals/d101/ElmLib/node100.html>

Debido a que el muro contiene 4 bordes, y por lo mismo 4 vértices, se decidió utilizar un elemento que contenga 4 nodos. Dicho elemento es el Q8MEM.

El elemento Q8MEM es uno del tipo *Plane Stress*, y se define como un cuadrilátero isoparamétrico de cuatro nodos, en el que cada nodo posee 2 DOF. Se basa en interpolación lineal e integración de Gauss. Su variables básicas son u_x y u_y .

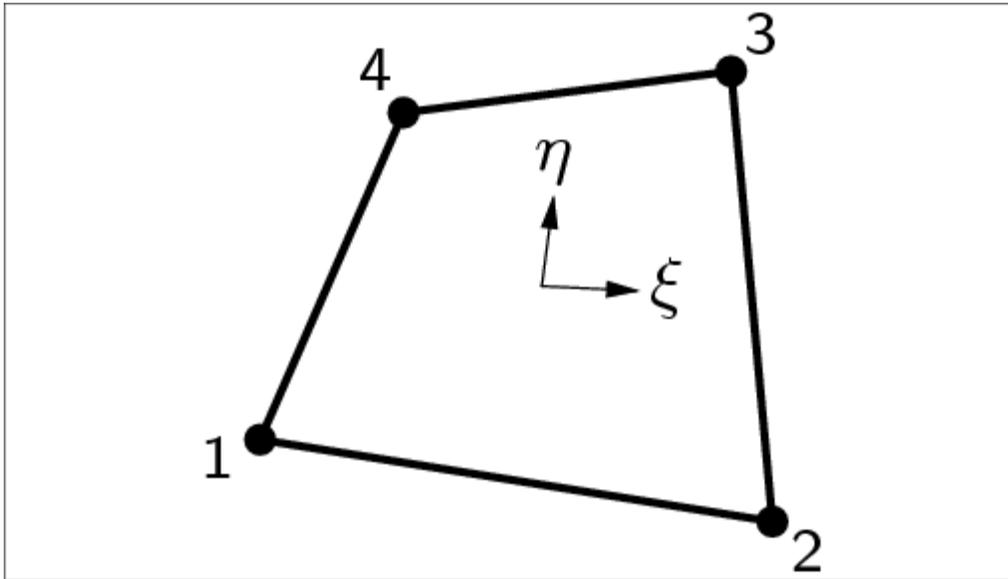


Figura 24: Elemento Q8MEM (DIANA User's Manual, 2017).

4.3 Modelo de material utilizado para hormigón

En este caso se utiliza un modelo constitutivo basado en deformaciones unitarias totales. En el software se le llama “*Total Strain crack model*”⁵. Este modelo describe el comportamiento tanto en tracción como en compresión de un material con base en una relación tensión-deformación unitaria.

El input del *Total Strain crack model* tiene dos secciones: (1) propiedades elásticas de un material y (2) definición del comportamiento del material tanto a tracción, como corte y compresión. Este comportamiento puede seguir curvas de tensión-deformación según sea deseado.

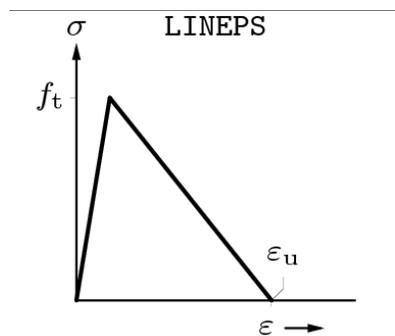
Las propiedades elásticas que pueden ser definidas en la utilización del modelo son:

- Módulo de Young,
- Coeficiente de Poisson, y
- Coeficiente de expansión térmica.

De todos los parámetros mencionados, solo el módulo de Young es un parámetro obligatorio.

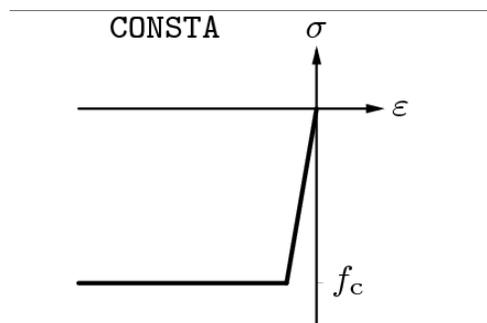
⁵ <https://dianafea.com/manuals/d101/MatLib/node87.html>

El comportamiento a tracción y compresión del modelo de material deben ser ingresados de manera tal que siga alguna de las curvas tensión-deformación conocidas. Para las cargas de tracción se utilizó una curva de tensión-deformación de *softening* lineal basada en la deformación última⁶, mientras que para la compresión se utilizó el comportamiento elasto-plástico perfecto⁷.



(d) linear, ultimate strain based

Figura 25: curva tensión-deformación para tracción.



(b) ideal

Figura 26: Curva tensión-deformación para compresión.

Luego, a modo de resumen, para a utilización se deben utilizar los siguientes parámetros observados en la Tabla 12:

Tabla 12: Parámetros utilizados en modelo de material *Total strain crack*.

Parámetro	Observaciones
módulo de Young	parámetro obligatorio
módulo de Poisson	parámetro opcional
Coef. de expansión térmica	parámetro opcional
comportamiento en tracción	se debe ingresar tipo de curva y parámetros asociados a ese tipo de curva
comportamiento en compresión	se debe entregar tipo de curva y los parámetros asociados a la misma
tensión de fluencia	se debe ingresar para cada tipo de curva de manera independiente
deformación unitaria última	sólo se ingresa para curva en tracción utilizada
tensión residual	ingresar parámetro para curva de tracción utilizada

Adicionalmente se puede definir como cambia el comportamiento de corte del material una vez que este está fisurado, además de poder describir el efecto de fisuración lateral o de confinamiento lateral.

⁶ <https://dianafea.com/manuals/d101/MatLib/node89.html>

⁷ <https://dianafea.com/manuals/d101/MatLib/node90.html>

Debido a su extensión, estos comportamientos no serán detallados, aunque información disponible está en el manual de usuario de DIANA (2017).

4.4 Modelo de material utilizado para acero

El acero se utilizará solamente como barras de refuerzo dentro de la albañilería. Luego, se considera que los elementos de acero solamente serán sometidos a carga axial. Además, se debe tener en cuenta el comportamiento no-lineal del acero.

Lo anterior implica la utilización de un modelo de material uniaxial no-lineal⁸. En este modelo, se entrega el diagrama tensión-deformación del material. Se pueden entregar hasta 25 puntos de la curva. La construcción de la curva se debe realizar partiendo tensiones asociadas a la compresión y terminando en tensiones asociadas a la tracción. Se considera 0,0019 como el límite de fluencia.

Los valores utilizados para la curva de tensión-deformación son dados en la Tabla 13:

Tabla 13: valores para curva tensión-deformación del acero.

deformación unitaria [-]	tensión [N/mm ²]
-0,2	-765
-0,0019	-500
0	0
0,0019	500
0,2	765

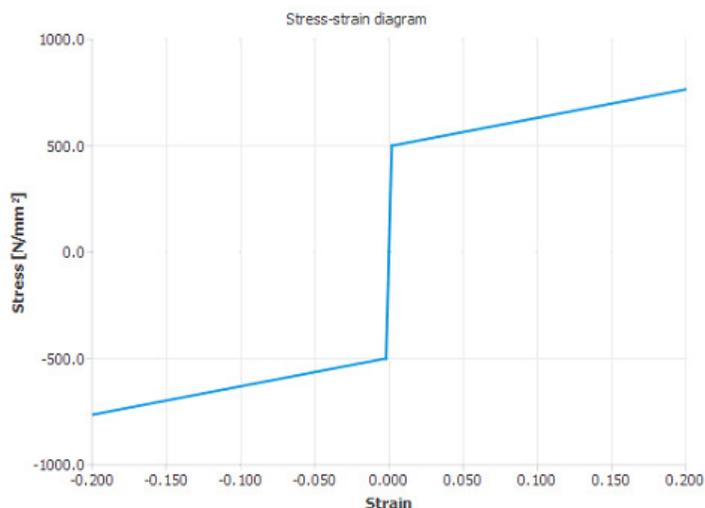


Figura 27: Curva tensión-deformación del acero.

4.5 Modelo anisotrópico Rankine-Hill

Este modelo es usualmente aplicado en albañilería, aunque se debe tener en cuenta que no es exclusivo para este material. Entre los materiales ortotrópicos a los que se puede aplicar este

⁸ <https://dianafea.com/manuals/d101/MatLib/node52.html>

modelo se tienen también: roca fracturada, materiales conformados por capas o materiales reforzados con fibras.

El modelo Rankine-Hill⁹ entrega el comportamiento de *softening* en tracción (criterio de fluencia de Rankine) y el comportamiento de *hardening* y posterior *softening* en compresión (criterio de fluencia de Hill).

Como se observa en la Tabla 14, los parámetros incluidos en este modelo de material son:

Tabla 14: parámetros de modelo Rankine Hill anisotropy.

Parámetro	Observaciones
módulo de Young	parámetro obligatorio
módulo de Corte G	parámetro opcional
módulo de Poisson	parámetro opcional
resistencia a la tracción	se debe incluir de manera independiente para cada eje
resistencia a la compresión	independiente para cada eje
energía de fractura para criterio de Rankine	independiente para cada eje, representa energía de falla para tracción
energía de fractura para criterio de Hill	independiente para cada eje, representa energía de falla para compresión
ancho de fisuras	se puede asumir de acuerdo al área o volumen del elemento
Límite de deformación plástica	deformación plástica observada en la mayor tensión de compresión
resistencia residual relativa	entre el 1% y 10%
parámetro m de súper-hipérbolo de Rankine Hill	valor debe estar entre 2 y 32
parámetro n de súper-hipérbolo de Rankine	valor debe estar entre 2 y 32

Parte del fondo teórico detrás de este modelo de material se describe a continuación, en 4.5.1.

4.5.1 Base Teórica¹⁰

El modelo fue formulado en 3 documentos. El primero corresponde a una tesis doctoral de Lourenço (1996); Lourenço, Rots y Blaauwendraad (1998) y Lourenço, De Borst y Rots (1997).

Este modelo puede capturar diferentes resistencias y características de *softening* en direcciones ortogonales. Se basa en una plasticidad compuesta de varias superficies. Estas superficies se derivan de los criterios de fluencia de Rankine (para tracción) y Hill (para compresión), tal como se puede ver en la Figura 28 que se muestra a continuación.

⁹ <https://dianafea.com/manuals/d101/MatLib/node76.html>

¹⁰ <https://dianafea.com/manuals/d101/MatLib/node326.html#RanHil>

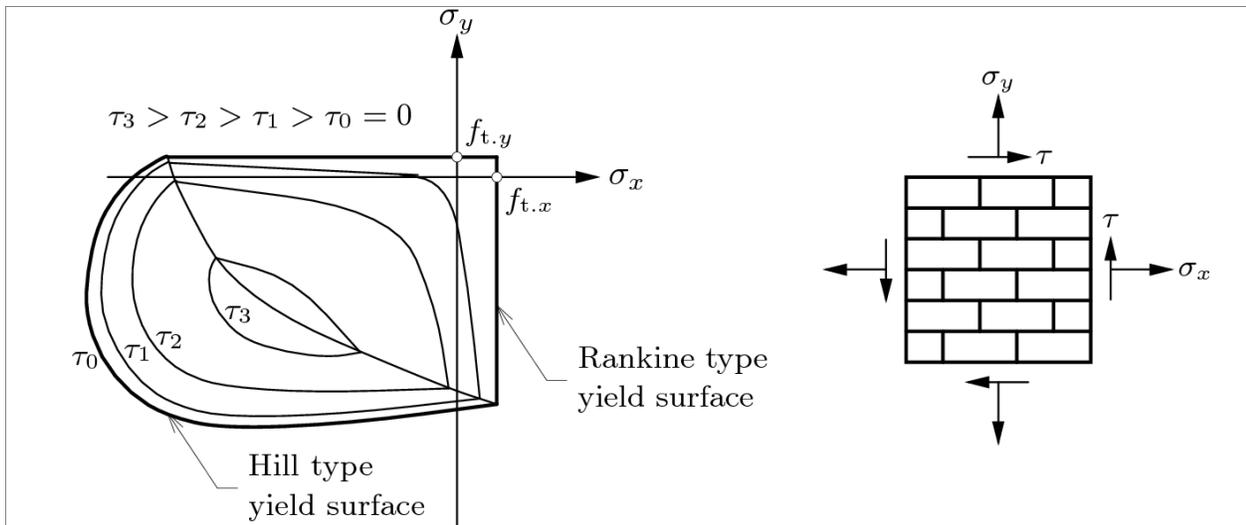


Figura 28: Condiciones de fluencia Rankine-Hill (DIANA User's Manual, 2017)

Criterio de Rankine:

El valor del criterio de Rankine, utilizado para la tracción, depende de los parámetros de resistencia a la tracción en cada una de las direcciones (estas pueden ser distintas) y de resistencia al corte puro. Otros valores necesarios son entregados en la formulación del método, o de las condiciones de carga de los elementos.

El *softening* se asume de forma exponencial, y se asume que ocurre en direcciones ortogonales. Este *softening* ocurre de manera independiente para cada dirección y depende de la resistencia a la tracción y al trabajo inelástico de la tracción.

La energía disipada es regularizada al asumir que el trabajo inelástico se distribuye uniformemente sobre un largo h . Este largo h está relacionado al área de un elemento finito A_e por medio de un parámetro α_h , que tiene un valor de 1 para elementos cuadráticos y $\sqrt{2}$ para elementos lineales. El tamaño h del material está limitado con el objetivo de evitar problemas a nivel constitutivos del material.

Hay dos métodos de regularización alternativos. El primero de ellos es un modelo de fisuración viscosa, mientras que el segundo es un modelo de tasa de fisuración de Wu y Bazant derivado del concepto de energía de activación.

Criterio de Hill:

El criterio de Hill corresponde a un elipsoide rotado y centrado en el espacio de las tensiones.

La superficie de fluencia muestra el *hardening*, que es descrito de acuerdo a una regla parabólica. A continuación, el *softening* ocurre siguiendo un comportamiento parabólico, que luego pasa a ser exponencial.

El comportamiento previamente descrito se puede observar en la Figura 29, que se muestra a continuación:

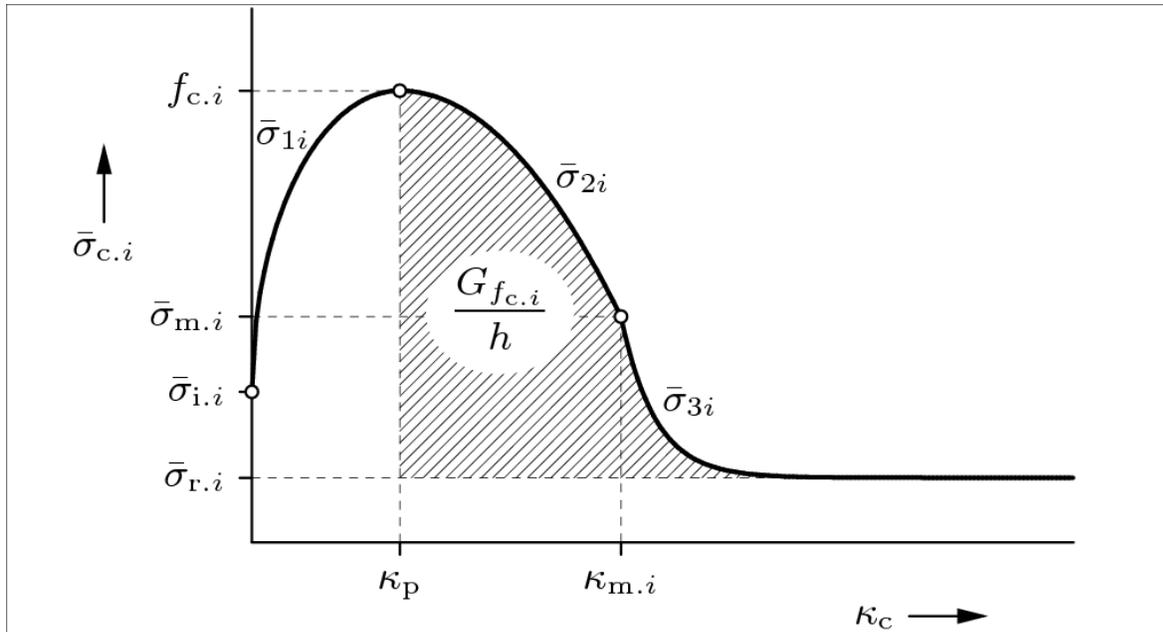


Figura 29: ley de *Hardening-Softening* para el criterio de fluencia de Hill (DIANA User's Manual, 2017)

Las tensiones máximas de compresión $f_{c,x}$ y $f_{c,y}$ son alcanzadas simultáneamente. Lo anterior corresponde a un *hardening* isotrópico hasta el límite de deformación plástica κ_p .

Aun teniendo lo anterior, el proceso de *softening* es anisotrópico. Lo anterior es debido a que se utilizan distintas energías de fractura en direcciones ortogonales. Estas energías son representadas como $G_{f_{c,x}}$ y $G_{f_{c,y}}$. Adicionalmente, y siguiendo la notación dada en la figura anterior, se tienen relaciones de todos los valores de tensión con la tensión máxima respectiva. Las relaciones de estas tensiones son:

$$\bar{\sigma}_{i,i} = \frac{1}{3} f_{c,i} \quad (4.1)$$

$$\bar{\sigma}_{m,i} = \frac{1}{2} f_{c,i} \quad (4.2)$$

$$\bar{\sigma}_{r,i} = \frac{1}{7} f_{c,i} \quad (4.3)$$

donde i representa la dirección x o y , según corresponda.

Cada uno de los puntos no señalados, así como la descripción algebraica de las tres curvas, está descrito basado en las 4 tensiones mencionadas (la tensión máxima de compresión, y las 3 determinadas por las expresiones).

4.5.2 Mejoras al modelo Rankine-Hill

Ciertas mejoras fueron incluidas al modelo del criterio de fluencia de Rankine-Hill por van der Meer (2013).

Algunos problemas del criterio de fluencia de Rankine-Hill descrito en la sección anterior son:

- El criterio de Rankine presenta un ápice, generando un punto singular. Esto hace que una de las matrices utilizadas en cálculo no se encuentre bien definida.
- La convergencia del algoritmo de plasticidad multisuperficial siguiendo el enfoque de Koiter no es óptimo con un modelo que considera el *hardening/softening* de un material.

Luego, las mejoras que se implementaron al modelo para solucionar estos problemas fueron:

- Modificación del criterio de Rankine a uno de tipo súper-hiperbólico. Lo anterior redondeó el vértice, eliminando el punto singular existente.
- La utilización de la teoría de super-cuádricas, las superficies de ambos tipos de criterios (Rankine y Hill) son combinadas en una superficie única. Lo anterior implica que el uso del enfoque de Koiter no es necesario.

A continuación se describirán cada una de estas mejoras por separado, así como su fondo teórico. Si bien hay más mejoras implementadas en el modelo, estas no se desarrollarán debido a que no implica cambios en los parámetros modificables al realizar una calibración.

Criterio de fluencia de Rankine súper-hiperbólico

En el vértice que se observa en la Figura 30 se tiene un gradiente indefinido. Lo anterior se puede corregir si el criterio de Rankine original es remplazado por media hipérbola.

La hipérbola tiene como asíntotas los valores $\sigma_x = f_{tx}$ y $\sigma_y = f_{ty}$ y la distancia entre la intersección de estas asíntotas y la hipérbola viene definida por el parámetro μ .

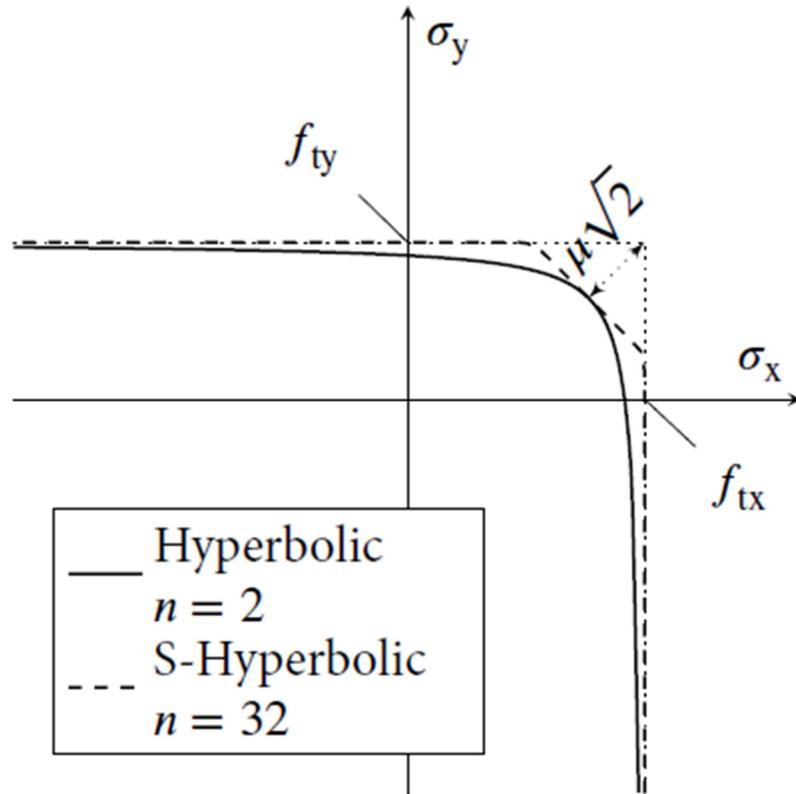


Figura 30: el criterio de Rankine súper-hiperbólico (DIANA User's Manual, 2017)

Ahora, este tipo de criterio hiperbólico (que es el observado en la imagen anterior cuando $n=2$) puede generar problemas en cómo se comporta la plastificación por tensión axial en la dirección x debido a que se inducen tensiones de compresión en la dirección y .

El problema ya mencionado se puede superar si se modifica la hipérbola para ser una curva súper-cuadrática, reemplazando la potencia de 2 por la n -ésima potencia.

Lo anterior implica que la tensión de tracción no pueda ser nula durante el procedimiento de *softening*, por lo que una tensión residual $5^{\mu}/2$ es elegida. Debido a que esta tensión residual es la misma para ambas direcciones, el valor de μ se debe basar en la menor de las resistencias a tracción:

$$\frac{5^{\mu}}{2} = \mu_{tol} \min(f_{tx}, f_{ty}) \quad (4.4)$$

lo que es equivalente a:

$$\mu = \frac{2\mu_{tol}}{5} \min(f_{tx}, f_{ty}) \quad (4.5)$$

y en donde μ_{tol} es un parámetro definido que corresponde al *ratio* entre la resistencia residual y la resistencia inicial en la dirección más débil.

Superficie única para el criterio de fluencia Rankine-Hill

El enfoque de Koiter para una plasticidad multi-superficial en el *hardening/softening* no es óptimo. Y por lo mismo, como alternativa se propuso aplica la teoría de súper-cuádricas para tener solo una superficie de criterio de fluencia. Esta única superficie debe contener ambas superficies.

Esta mejora conlleva la utilización del parámetro n de la curva súper-hiperbólica de Rankine Hill, entregada como parámetro del modelo de *Rankine Hill anisotropy*.

Validación de modelo de Rankine-Hill

Uno de los procesos requeridos es el de la validación del modelo del material, algo que el mismo autor que desarrollo el modelo, en asociación con otros dos autores, llevó a cabo. Esta validación fue realizada por Lourenço *et al.* (1998).

En esta validación se logró realizar comparaciones tanto en lo que corresponde a los parámetros del material como al comportamiento de muros de albañilería, en distintas configuraciones, sometidos a ensayos de muro de corte.

En los ensayos de los parámetros de material se probaron varias direcciones de aplicación de las cargas principales.

Los resultados asociados a la comparación de parámetros de material entregaron los resultados mostrados en la Figura 31 que se muestra a continuación. En esta figura se aprecia la correlación existente entre el modelo numérico del material y los resultados experimentales.

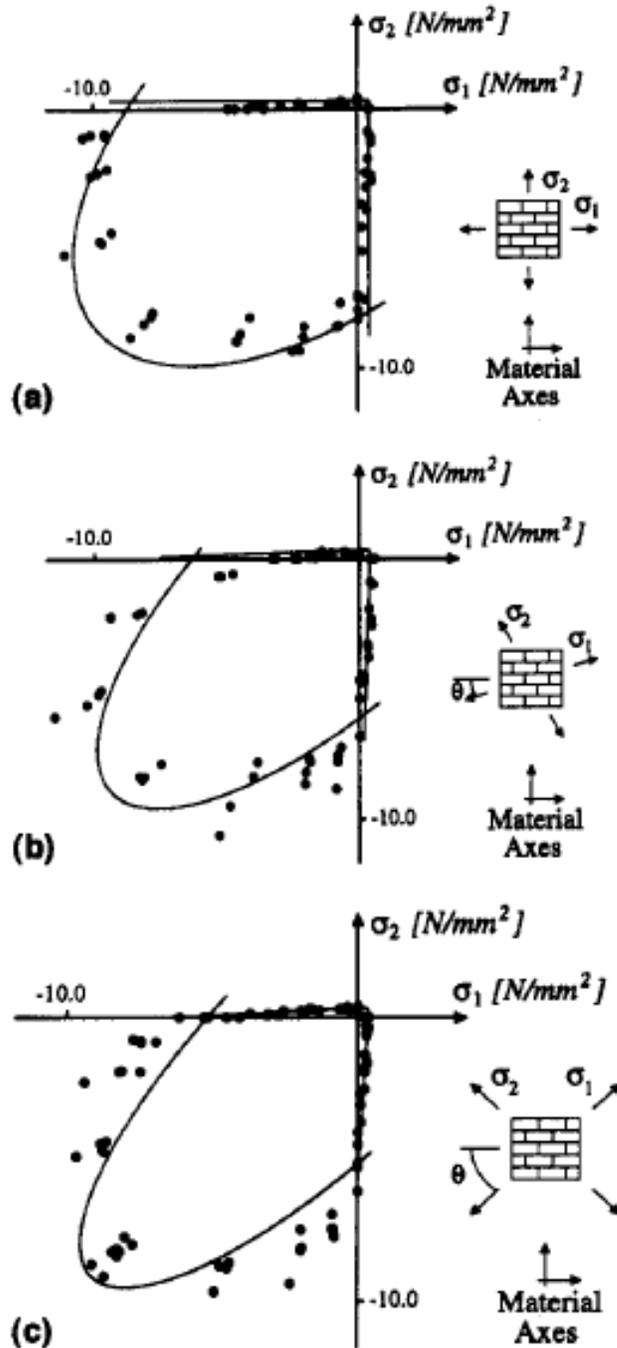


Figura 31: Resultados experimentales y de modelo (Lourenço *et al.*, 2017)

Se tienen 3 ensayos de muros, con sus respectivas modelaciones y análisis computacionales, los que serán descritos a continuación. Todos los ensayos utilizaron muros de idénticas dimensiones, muros a los que se les fueron cambiando las cargas verticales aplicadas. Estos ensayos fueron realizados por Ganz y Thürlimann en 1984 (Lourenço *et al.*, 1998). De acuerdo a los autores de esta validación, estos ensayos están bien valorados para fines de validación de modelos.

El primer ensayo, correspondiente al muro W1, presentó el siguiente comportamiento en el diagrama de carga-deformación:

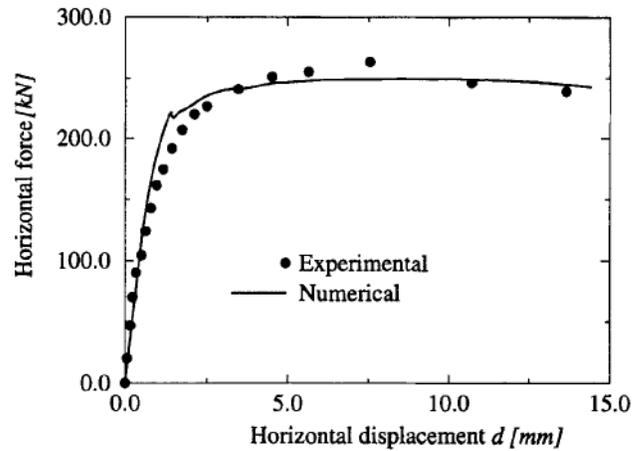


Figura 32: Diagrama de carga-deformación de W1, experimental y numérico (Lourenço *et al.*, 1998).

El segundo muro utilizado fue el W2, cuyo diagrama de carga-deformación es el siguiente:

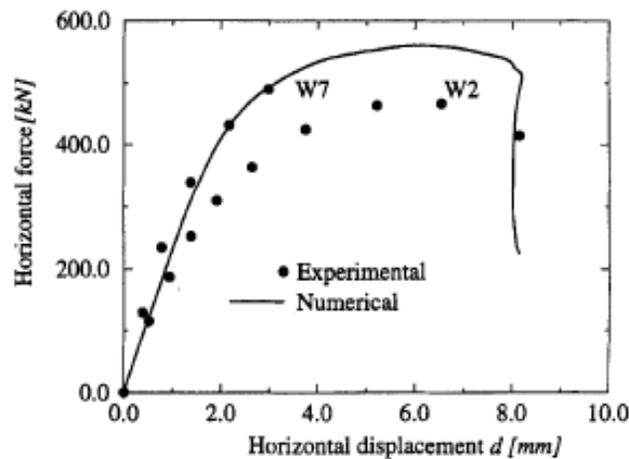


Figura 33: Diagrama de carga-deformación de W2, experimental y numérico (Lourenço *et al.*, 1998).

Se debe notar que se incluye también la curva experimental W7, esto es debido a que problemas en la base, conocidos durante el experimento del muro W2, implicaron que aparecieran fisuras y se disminuyera su resistencia máxima.

Finalmente, el último muro modelado fue el W4, el diagrama de carga-deformación experimental y numérico es el siguiente:

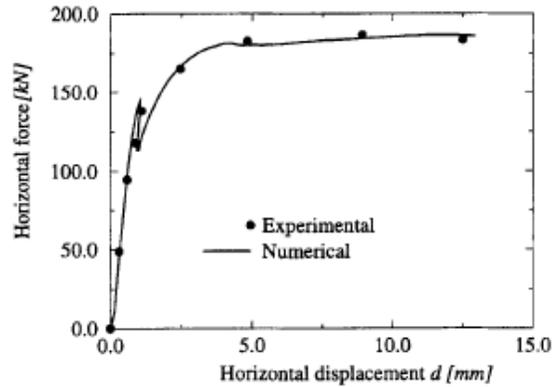


Figura 34: Diagrama de carga-deformación de W4, experimental y numérico (Lourenço *et al.*, 1998).

Finalmente, los autores Lourenço, Rots y Blaauwendraad (1998) señalan:

“A comparison between numerical and experimental results is also given. It is shown that the proposed anisotropic model is able to predict effectively the behavior of masonry structures, with both ductile and brittle failure modes, as well as sufficiently accurate collapse load values”.

Lo anterior implica que este modelo es válido para ser utilizado, y que en caso de se tenga un experimento realizado de manera apropiada, puede ser utilizado para determinar, vía ingeniería inversa, los parámetros constitutivos del material.

5. Análisis de Sensibilidad y resultados

En el presente capítulo se expondrá el desarrollo del modelo, así como el análisis de sensibilidad del mismo ante la alteración de cada uno de los parámetros del modelo de material utilizado.

5.1 Desarrollo del modelo estructural.

El modelo fue desarrollado en el software *DIANA FEA*, con la utilización del software auxiliar *MIDAS FX+ for DIANA* para la modelación.

5.1.1 Desarrollo de modelo

Las primeras etapas del procedimiento se desarrollaron en el software *MIDAS*. Estas etapas se pueden dividir de la siguiente forma:

- Representación geométrica del modelo,
- Definir materiales y parámetros mecánicos de los mismos,
- Definir propiedades geométricas y tipo de elemento geométrico,
- Aplicar un mesh (mallado) sobre geometría y asignar propiedades geométricas según corresponda, y
- Aplicar condiciones de borde y cargas según corresponda.

Representación geométrica del modelo:

En esta etapa se representaron los elementos que componen el muro de corte de los ensayos. Se utilizó líneas para representar la ubicación de las barras de refuerzo y la viga, mientras que el paño de albañilería se representó mediante una superficie. A continuación se indicarán elementos geométricos y su uso deseado posterior.

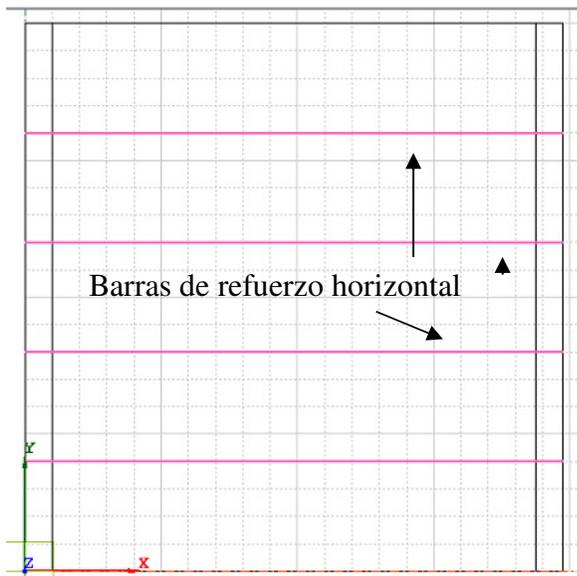


Figura 35: Geometría con refuerzo horizontal resaltado.

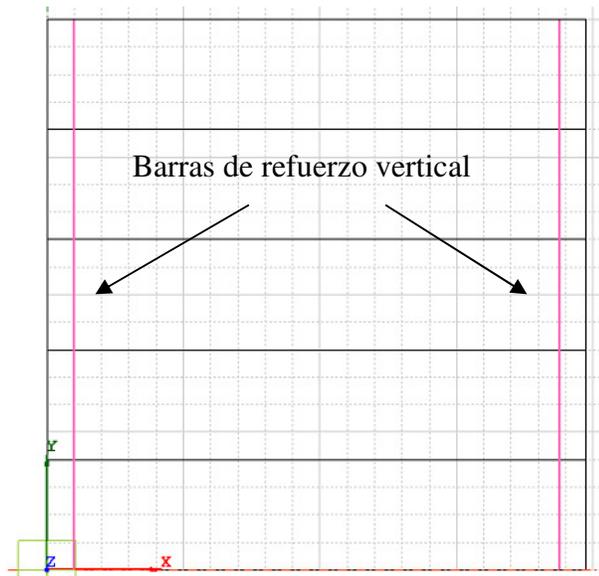


Figura 36: Geometría con refuerzo vertical resaltado.

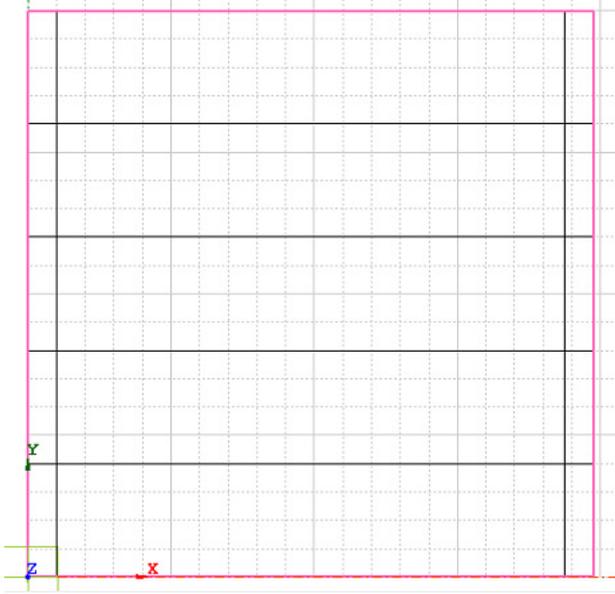


Figura 37: Geometría con borde de albañilería resaltado.

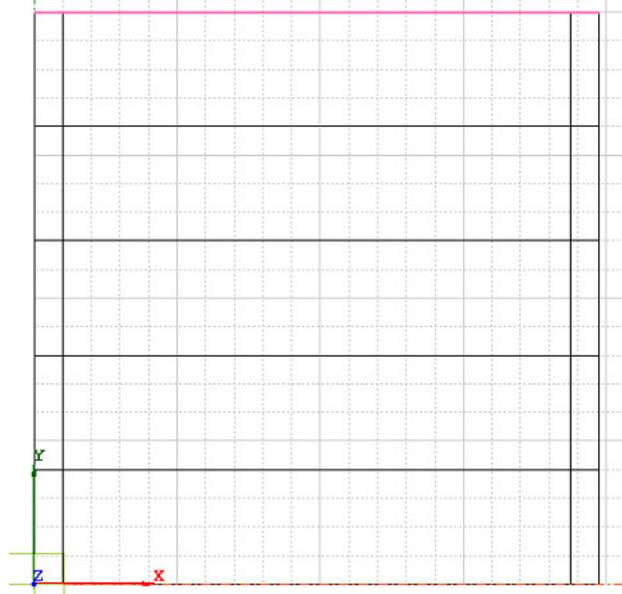


Figura 38: Geometría con viga de hormigón resaltada.

Como se puede apreciar, se incluyen todos los elementos observados en los muros utilizados en los ensayos. De igual manera, el alto y el ancho del paño de albañilería, así como la ubicación de los refuerzos horizontales y verticales. La viga de hormigón no se ubicó en la posición real, sino que se ubicó en el borde superior del paño de albañilería, unos centímetros bajo la posición real.

La viga inferior no se incluyó, en su lugar se asumió una condición de borde rígida.

Las dos barras verticales de cada borde se modelaron como una sola barra, de manera unificada. Lo anterior se decidió considerando que las barras trabajan solo ante cargas axiales, siendo utilizado solo el parámetro geométrico del área.

Definir materiales:

A continuación, en la Tabla 15: nombre y tipo de material utilizados en modelo. Tabla 15 se muestra el listado de materiales definidos para el modelo de análisis:

Tabla 15: nombre y tipo de material utilizados en modelo.

Nombre	tipo de material
ALB	3D ortotrópico
HOR	isotrópico
REF	isotrópico

Como se observa, se tienen dos materiales isotrópicos (HOR, que corresponde al hormigón y REF, que corresponde al acero de refuerzo) y un material ortotrópico (ALB, que corresponde a la albañilería).

Luego, como se ve en la Tabla 16, el detalle de las propiedades elásticas con las que se definió la albañilería es:

Tabla 16: parámetros elásticos de la albañilería

Parámetro	Valor
módulo elástico 11	6400 N/mm ²
módulo elástico 22	6400 N/mm ²
módulo elástico 33	6400 N/mm ²
módulo de corte 12	990 N/mm ²
módulo de corte 23	990 N/mm ²
módulo de corte 31	990 N/mm ²
radio de Poisson 12	0,2
radio de Poisson 23	0,2
radio de Poisson 31	0,2
Densidad de masa	2,00E-06 N/mm ³ /g

Los valores del módulo de elasticidad y corte fueron estimados de acuerdo a lo señalado por Marín (2009).

El detalle de las propiedades elásticas del hormigón es el siguiente:

Tabla 17: parámetros elásticos de hormigón.

parámetro	Valor
módulo elástico	20000 N/mm ²
radio de Poisson	0,3
módulo de corte	7692,308 N/mm ²
densidad de masa	2,50E-06 N/mm ³ /g

Se consideró que se estaba utilizando un hormigón de tipo H20.

Finalmente, los parámetros del acero de refuerzo son los siguientes:

Tabla 18: parámetros elásticos del acero.

parámetro	Valor
módulo elástico	210000 N/mm ²
radio de Poisson	0,3
módulo de corte	80769,231 N/mm ²
densidad de masa	2,79E-06 N/mm ³ /g

En este caso, el módulo elástico utilizado fue el típico asociado al acero.

Definir propiedades geométricas de los elementos:

En la sección sobre la geometría del modelo se especificó de qué forma se representarían cada uno de los elementos que integran el muro de corte. Se tiene que elementos con una dimensión muy superior a las otras dos se representa como una línea, como ocurre con barras de refuerzo y viga, donde se representa gráficamente la dimensión dominante; y que los elementos con una dimensión menor que las otras dos se representan como una superficie, como es el caso de un muro. Las propiedades de materiales utilizadas se muestra en la Tabla 19.

Tabla 19: propiedades geométricas utilizadas.

Nombre	tipo de geometría	sub tipo de geometría
MALB	2D	<i>2D Plane Stress</i>
V140/32.5	1D	<i>Beam</i>
Ref Vertical	1D	<i>Truss</i>
Ref Horizontal	1D	<i>Truss</i>

Aquí se definen de manera específica los elementos estructurales, permitiendo además asociarlos con un material dentro de la lista de los previamente definidos.

Las barras de refuerzo, al trabajar solo con cargas axiales, requieren el área transversal solamente. Los parámetros de la barra de refuerzo vertical y horizontal se tienen en la Tabla 20.

Tabla 20: parámetros para propiedades de barras de refuerzo.

Parámetro	Valor
Material	REF
área de sección transversal vertical	379,94 mm ²
área de sección transversal vertical horizontal	27,695 mm ²

La viga, en tanto, al trabajar ante cargas axiales, de corte y de momento, requiere que se defina el momento de inercia I de la sección. Lo anterior puede realizarse de manera directa, o entregando la forma de la sección. Adicionalmente, junto a las propiedades de la sección de la viga se definió el punto de inserción de la misma, el punto de la sección por donde pasa la línea definida en la sección de geometría.

Tabla 21: Parámetros de propiedad V40/30.5.

Parámetro	Valor
Material	HOR
Altura	325 Mm
Ancho	400 Mm
punto de inserción	centro en la base
tipo de sección	rectangular sólida

El muro en tanto ya tiene definidos el alto y el ancho, faltando el espesor del mismo. Este espesor debe ser entregado de manera directa al software.

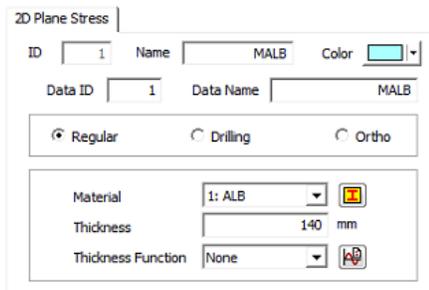


Figura 39: Propiedades geométricas de muro de albañilería.

Mesh sobre geometría:

El proceso de *mesh* sobre el modelo genera dos efectos. El primero de estos efectos es el de dividir cada uno de sus elementos en subelementos de menor dimensión. Mientras más fino sea el mallado del modelo, más elementos, más DOF se generan y por lo tanto el modelo adquiere mayor flexibilidad. Un *mesh* más fino aumenta utilización de recursos, aunque tiene a mejorar los resultados. El segundo de estos efectos es la asignación de los materiales a cada uno de los elementos geométricos según corresponda.

El mallado en este modelo se realizó dividiendo tanto horizontal como verticalmente el mismo en 20 partes iguales, quedando elementos de áreas de 9,875x9,375 cm. Los materiales fueron asignados de acuerdo a lo señalado en la sección “Representación geométrica del modelo:”. El resultado del mallado es el siguiente:

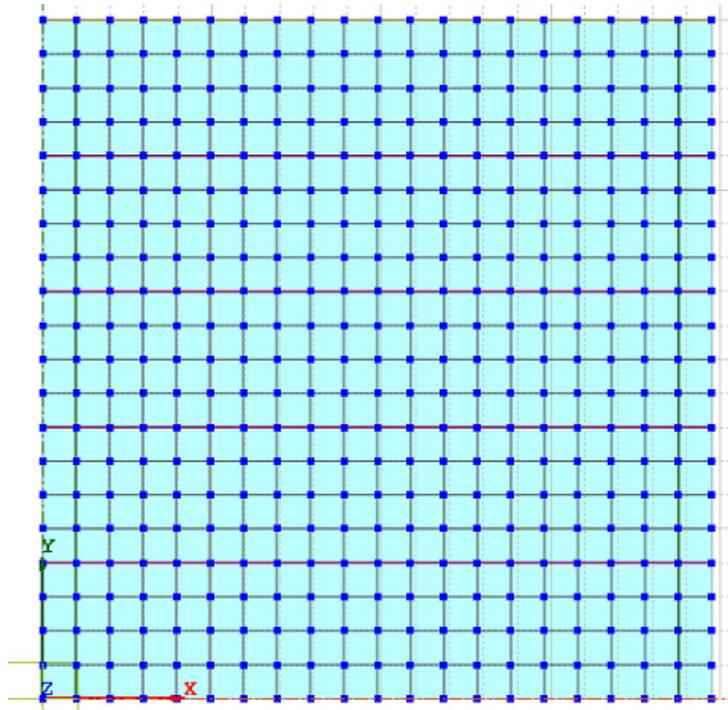


Figura 40: Modelo post-mesh.

Definir cargas y condiciones de borde:

La primera etapa es la de establecer el nombre de los set de cargas y de condiciones de borde. El set de las condiciones de borde se llamara BASE mientras que los set de cargas son los mostrados a continuación en la Tabla 22:

Tabla 22: Sets de carga.

nombre de set de carga	descripción
PP	Corresponde al peso propio, determinado utilizando la densidad y la aceleración de gravedad (9,81 m/s ²).
VERT	Corresponde a la carga vertical de 17 tonf aplicada sobre la viga de hormigón.
LAT	Corresponde a la carga lateral, aplicada en el extremo superior izquierdo. Se utiliza un valor estándar de 1 tonf.

Una vez definidos los set de carga y los de condiciones de borde, se procede a aplicar cada una de las cargas y condiciones de borde. La aplicación de las cargas se debe realizar a los nodos. La carga de peso propio en cambio, requiere definir la aceleración de gravedad.

De igual manera a como se realiza la asignación de cargas a los nodos, la asignación de condiciones de borde se realiza utilizando el procedimiento anterior: determinar las condiciones

de borde que serán utilizadas, y luego asignar las mismas a los nodos deseados. Se utilizaron condiciones de borde rotuladas, que en su conjunto funcionan como un empotrado del muro. Se restringe el movimiento en las direcciones x , y y z .

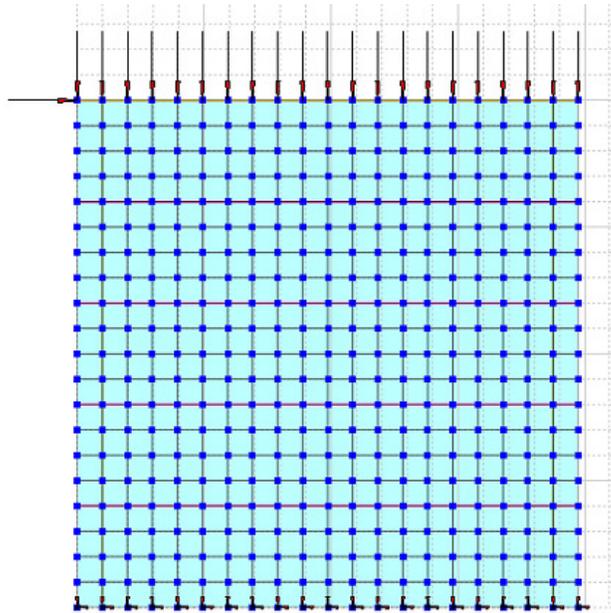


Figura 41: Modelo en *MIDAS* previo a ser exportado a *DIANA*.

Asignación de modelos de material

En esta etapa se debe realizar un mayor detallamiento de las propiedades de los materiales, así como seleccionar el modelo de material que será utilizado para la albañilería.

Como se puede ver en la Tabla 23, para el material REF utilizado en los refuerzos horizontales y verticales, se tiene:

Tabla 23: Clase y modelo de material REF.

Material	REF
Clase	Reinforcements and Pile foundations
Modelo de material	Uniaxial nonlinear

El material HOR, que es utilizado en la viga de hormigón, tiene los parámetros indicados en la Tabla 24.

Tabla 24: Clase y modelo de material HOR.

Material	HOR
Clase	Concrete and Masonry
Modelo de material	Total strain based crack model

La albañilería en tanto tiene el nombre de ALB, y la clase y modelo elegidos son mostrados en la Tabla 25.

Tabla 25: Clase y modelo de material ALB.

Material	ALB
Clase	Concrete and Masonry
Modelo de material	Rankine Hill anisotropy

También se utilizó un modelo de criterio Mohr-Coulomb, que fue desechado al no describir adecuadamente el comportamiento de la albañilería.

Mayor detalle de cada uno de estos modelos de material se encuentra en el capítulo 4. Ahí se incluye la sintaxis, y en el caso del modelo anisotropía Rankine Hill, se incluye la base teórica del modelo de material.

Una vez definido lo anterior, corresponde definir los parámetros de los materiales.

El primer material cuyos parámetros serán definidos es el acero de refuerzo REF. El material REF, como ya ha sido mencionado, utiliza el modelo de material *Uniaxial nonlinear elasticity*. Este modelo de material permite dibujar la curva tensión-deformación unitaria del mismo de manera manual. Los valores utilizados en la curva son indicados en la Tabla 13.

Como se puede observar, se tienen los valores de la curva de estrés-deformación unitaria. La misma presentada gráficamente es:

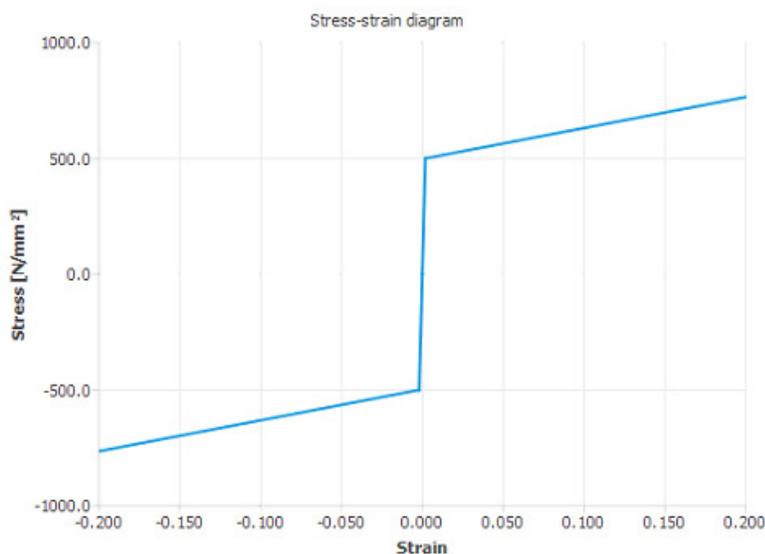


Figura 42: Curva de tensión-deformación unitaria de material REF.

El material HOR utiliza el modelo *Total Strain based crack model*. Este modelo de material permite definir los parámetros de 5 comportamientos: Lineal, *Total strain based crack* y comportamiento en tracción, compresión y corte.

El detalle de las propiedades lineales del material, mostrado en la Tabla 26, es el siguiente:

Tabla 26: Parámetros utilizados en material HOR.

parámetro	Valor
parámetros lineales	
Módulo de Young	2000 N/mm ²
radio de Poisson	0,25
densidad de masa	2,50E-09 T/mm ³
modelo Total Strain based crack model	
orientacion y ancho de fisuras	por defecto (<i>fixed</i>)
comportamiento en tracción	
curva utilizada	linea-deformación última
resistencia a tracción	2 MPa
deformación ultima	0,003
resistencia residual	0,2 MPa
comportamiento en compresión	
curva utilizada	elasto-plástica perfecta
comportamiento en corte	
función de retención constante	10 %

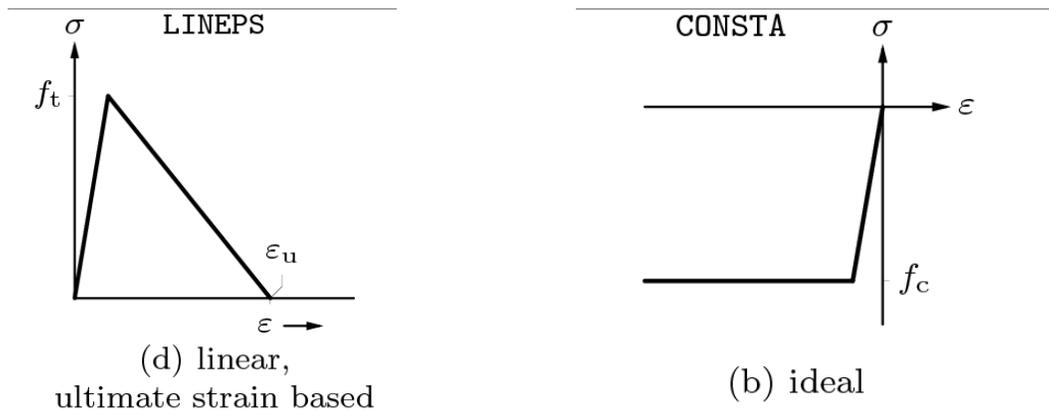


Figura 43: Curvas de tensión-def. unitaria en tracción y compresión (DIANA User's Manual, 2017).

Finalmente, el comportamiento de la albañilería se define utilizando el modelo *Rankine Hill anisotropy*. Mayor detalle del mismo será dado en la sección de análisis de sensibilidad del modelo mencionado, en el capítulo 5.

5.1.2 Procedimiento de análisis

Adicionalmente, debido a que en los ensayos *puhsover* la carga lateral es incrementada de manera secuencial, también se debe definir la secuencia de pasos que será utilizada en la modelación.

El proceso de carga se realizó en tres etapas.

La primera etapa corresponde a la aplicación de la carga correspondiente al peso propio de la estructura. La aplicación de la misma se realizó en 10 pasos, con un valor de carga relativa de 0,1 de la carga de peso propio asignada. El máximo número de iteraciones permitidas es de 10. Se utilizó el método Newton-Raphson regular.

La segunda etapa corresponde a la aplicación de la carga vertical de 17 *tonf* sobre la viga. Se utilizaron 20 pasos de carga, con un valor relativo con respecto a la carga final de 0,05. De igual forma, se permitió un máximo de 10 iteraciones por paso, y se utilizó el método Newton-Raphson regular.

La tercera etapa corresponde a la aplicación de la carga horizontal. En este caso, la carga aplicada sobre el nodo tiene un valor de 1 *tonf*. Se realizaron un total de 1180 pasos de carga para el modelo final (la cantidad de pasos es variable), con un tamaño de paso de 0,1 de la carga aplicada sobre el nodo (lo que corresponde a 0,1 *tonf* por paso). En este caso, a diferencia de las otras dos etapas, se utilizó un *arc length control*, mediante el método de plano normal actualizado con control regular.

Al igual que en la primera y segunda etapa, se permitió un máximo de 10 iteraciones, y se utilizó el método Newton-Raphson regular en las mismas.

En todas las etapas, el método de solución utilizado fue el Sparse Cholesy, con una tolerancia de 10^{-8} . De similar manera, la convergencia se realizó considerando solo desplazamiento y fuerzas.

5.2 Realización de análisis de sensibilidad.

El modelo *Rankine Hill anisotropy* presenta dos segmentos en los que sus parámetros deben ser definidos. Estos segmentos corresponden a las propiedades lineales del material y las propiedades de anisotropía Rankine Hill. Cada segmento en detalle fue explicado y profundizado en el capítulo previo.

Las propiedades iniciales al momento de realizar el análisis de sensibilidad son las siguientes:

Tabla 27: Parámetros de modelo de material para albañilería inicial.

Parámetro	Valor		
propiedades de material elástico			
Módulo de Young (E)	6400	6400	N/mm ²
Módulo de Corte (G)	990		N/mm ²
radio de Poisson (ν)		0,2	
densidad de masa (ρ)	2,00E-09		T/mm ³
Anisotropía Rankine Hill			
resistencia a la tracción ($f_{t,i}$)	0,28	0,28	N/mm ²
resistencia a la compresión ($f_{c,i}$)	6,4	6,4	N/mm ²
energía de fractura en tracción ($G_{f_{t,i}}$)	0,037	0,105	N/mm
crack rate dependecy	sin crack rate dependecy		
energía de fractura en compresión ($G_{f_{c,i}}$)	6,0	8,0	N/mm
inclusión de mejoras implementadas			
resistencia residual a tracción relativa	0,01		
parámetro m súper-hiperbólico de Rankine Hill	32		
parámetro n súper-hiperbólico de Rankine	16		

Adicionalmente, la curva de carga-deformación resultante al realizar el análisis del modelo utilizando los parámetros indicados en la Tabla 27 es la siguiente:

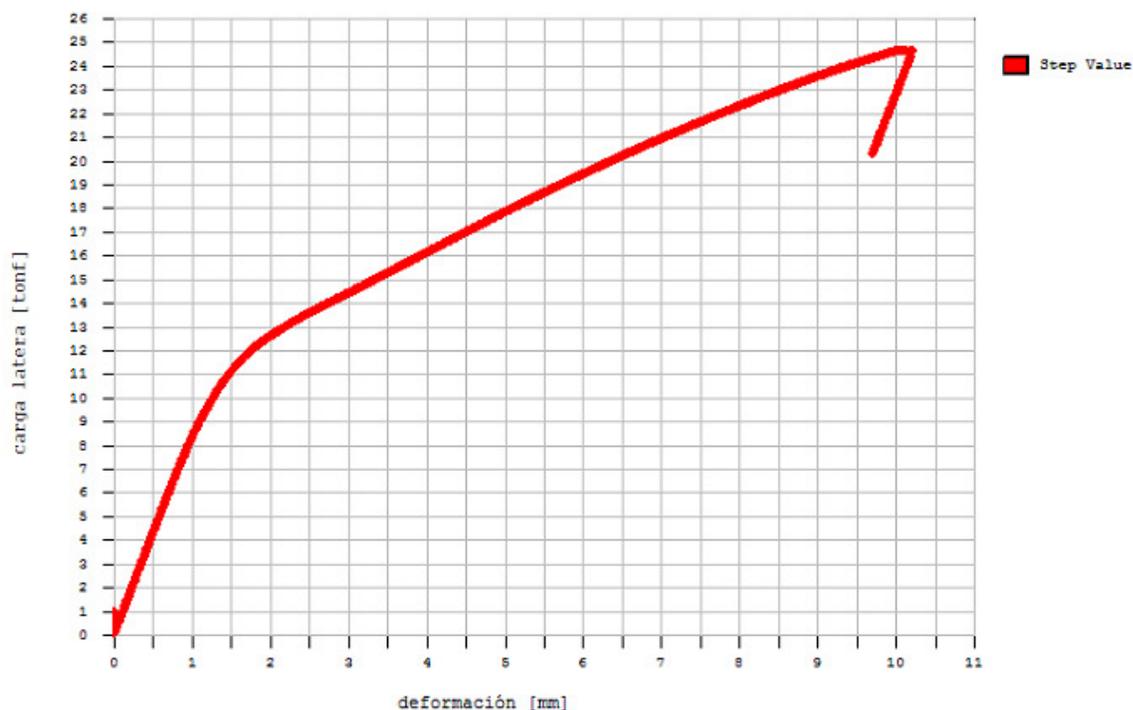


Figura 44: Curva carga-deformación de caso base.

Se debe notar que se tiene una falla frágil. El pasó de carga utilizado fue de 0,1 *tonf* por iteración. Se realizaron 970 pasos de carga lateral.

Un resumen de las modificaciones realizadas al caso base se presentan en la mostrada a continuación:

Tabla 28: Resumen de modificaciones para análisis de sensibilidad.

caso	Observaciones
caso base	Ver Tabla 27
caso 1	se redujo módulo de Young de 6400 [N/mm ²] por eje a 3200 [N/mm ²]
caso 2	cambia resistencia a tracción de 0,28 [N/mm ²] por eje a 0,5 [N/mm ²] por eje
caso 3	cambia resistencia a compresión de 6,4 [N/mm ²] a 3,2 [N/mm ²]
caso 4	se modifica energía de fractura en tracción de 0,037 y 0,105 [N/mm] a 0,025 y 0,081 [N/mm]
caso 5	se modifica energía de fractura e compresión de 6,0 y 8,0 por eje a 3,0 y 4,0 por eje
caso 5 '	se disminuyó energías de fractura a 2,5 y 3,7 [N/mm] por eje
caso 6	se cambió resistencia residual de 0,01 a 0,1
caso 7	se modifica parámetro m de súper-hipérbolo de Rankine Hill de 32 a 4
caso 8	se modifica parámetro n de súper-hipérbolo de Rankine de 16 a 2

Propiedades lineales del material

Las propiedades lineales son el módulo de Young, el índice de Poisson y la densidad (de masa). Adicionalmente se incluyó el módulo de corte. Como afecta cada uno de estos parámetros la curva de carga-deformación (o de capacidad) es conocida. Principalmente, los módulos de Young y de corte son los que define la relación entre carga y deformación elástica, por lo que modificar estos parámetros modifica esa relación. A mayores valores, la deformación es menor.

En el siguiente caso, se modificó solamente el valor del módulo de Young de 6400 *N/mm²* en cada eje a 3200 *N/mm²* en cada eje. Tanto la curva del caso como el caso modificado 1.

Los resultados gráficos verifican lo indicado previamente. Adicionalmente, se redujo levemente la resistencia máxima del muro. Se sigue manteniendo la falla frágil.

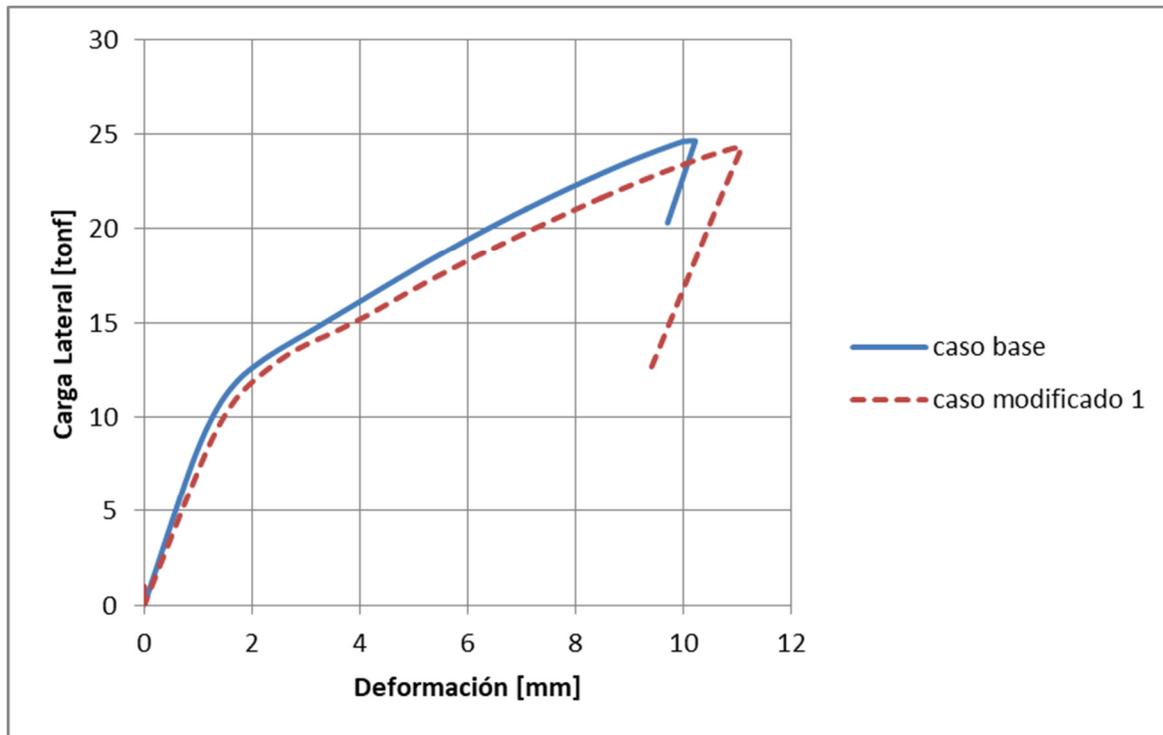


Figura 45: Comparación entre caso base y caso modificado 1, se pasó de un Módulo de Young de 6400 N/mm^2 a 3200 N/mm^2 .

Propiedades de anisotropía Rankine Hill

La anisotropía tiene varios parámetros, aunque estos se pueden subagrupar basados en su efecto en la curva de capacidad del muro.

Los parámetros de resistencia a la tracción y compresión afectan mayormente el límite entre el comportamiento elástico y el *hardening*.

Los parámetros de energía de fractura tanto a tracción como a compresión modifican principalmente la carga máxima que resiste el muro y la deformación asociada al muro. En este caso, la energía de fractura a compresión es la que más influencia tiene en la ubicación de este punto.

Finalmente los parámetros de resistencia residual, y los parámetros m y n que definen superficies super-hiperbólicas de acuerdo a lo visto en la base teórica, modifican principalmente la forma en la que se comportan las curvas tanto de *hardening* como de *softening*.

El caso modificado 2 modifica la resistencia a la tracción de 0.28 N/mm^2 para cada eje a 0.5 N/mm^2 para cada eje. Solo se pudo ejecutar 840 pasos de carga lateral. El resultado obtenido se muestra en la figura mostrada a continuación.

Se puede observar el cambio en el punto donde el muro cambia del régimen lineal al de *hardening*. Adicionalmente, se modifica el comportamiento en el segmento inicial del régimen de *hardening*.

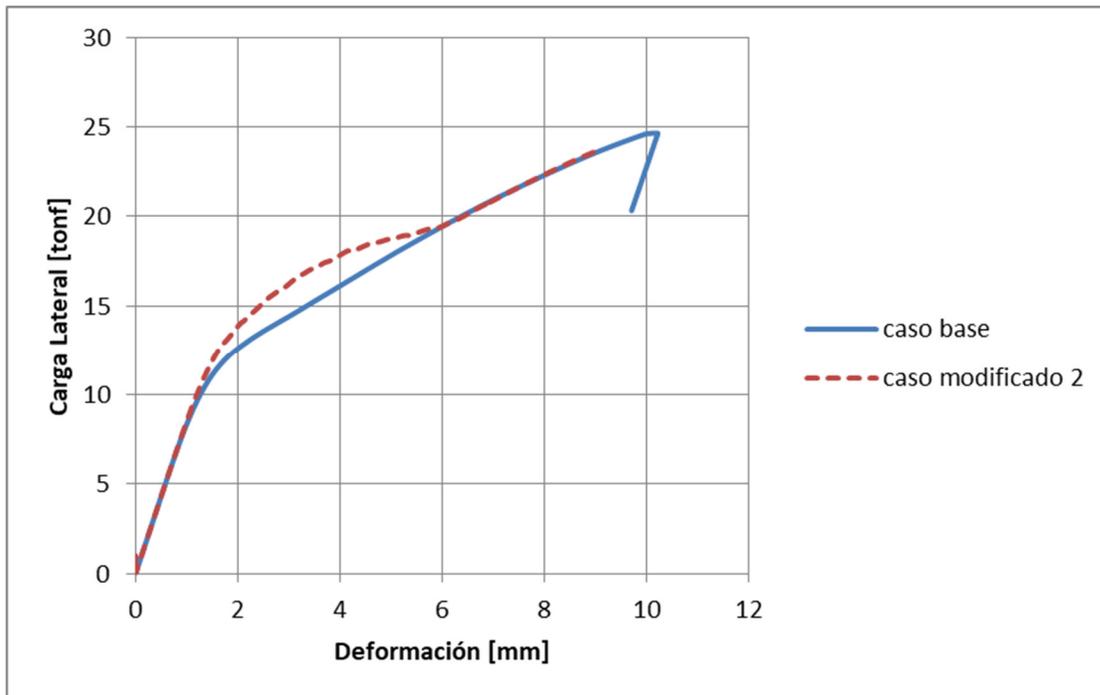


Figura 46: Comparación entre caso base y caso modificado 2, la resistencia a tracción cambio de $0,28 \text{ N/mm}^2$ a $0,5 \text{ N/mm}^2$ para ambos ejes.

En el caso modificado 3 se modificará solo la resistencia a la compresión, que pasará de $6,4 \text{ N/mm}^2$ por eje a $3,2 \text{ N/mm}^2$ respectivamente. Los resultados obtenidos para la comparación son:

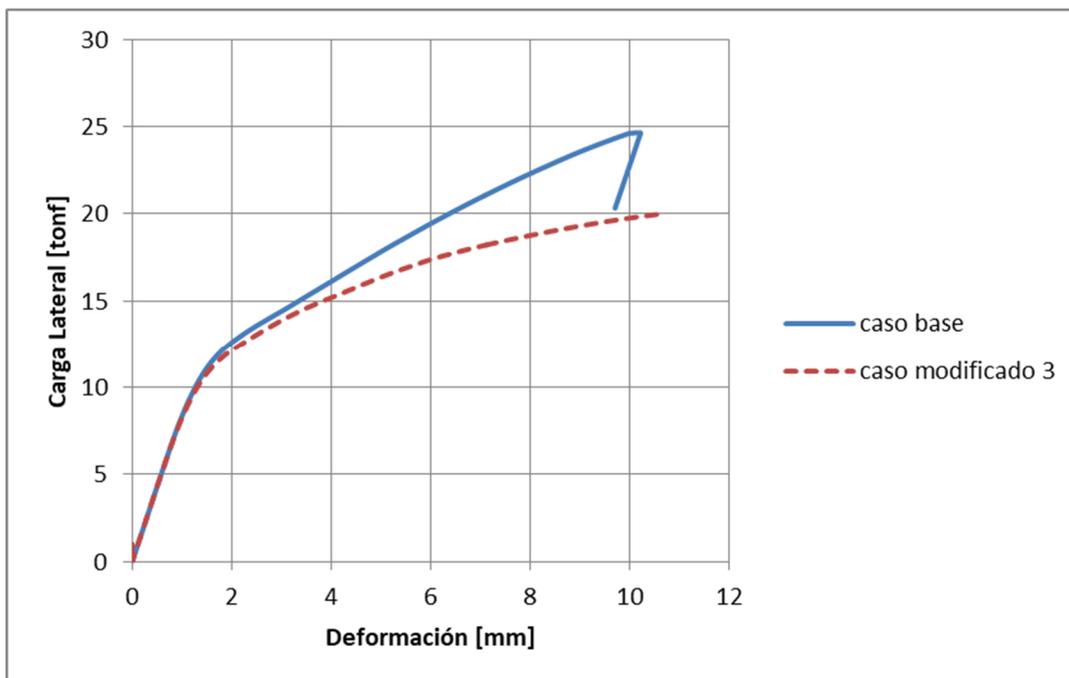


Figura 47: Comparación entre caso base y caso modificado 3, la resistencia a la compresión cambió de $6,4 \text{ N/mm}^2$ a $3,2 \text{ N/mm}^2$.

En este caso, si bien se observa que la curva cambia de régimen antes, el mayor cambio se observa en el comportamiento observado en el régimen de *hardening*. Se utilizaron 970 pasos de carga lateral. No se llegó a la carga máxima del muro de albañilería.

El cuarto caso modifica las energías de fractura en tracción de 0,037 y 0,105 N/mm por eje a 0,025 y 0,081 N/mm respectivamente. Los resultados de esta comparación son los siguientes:

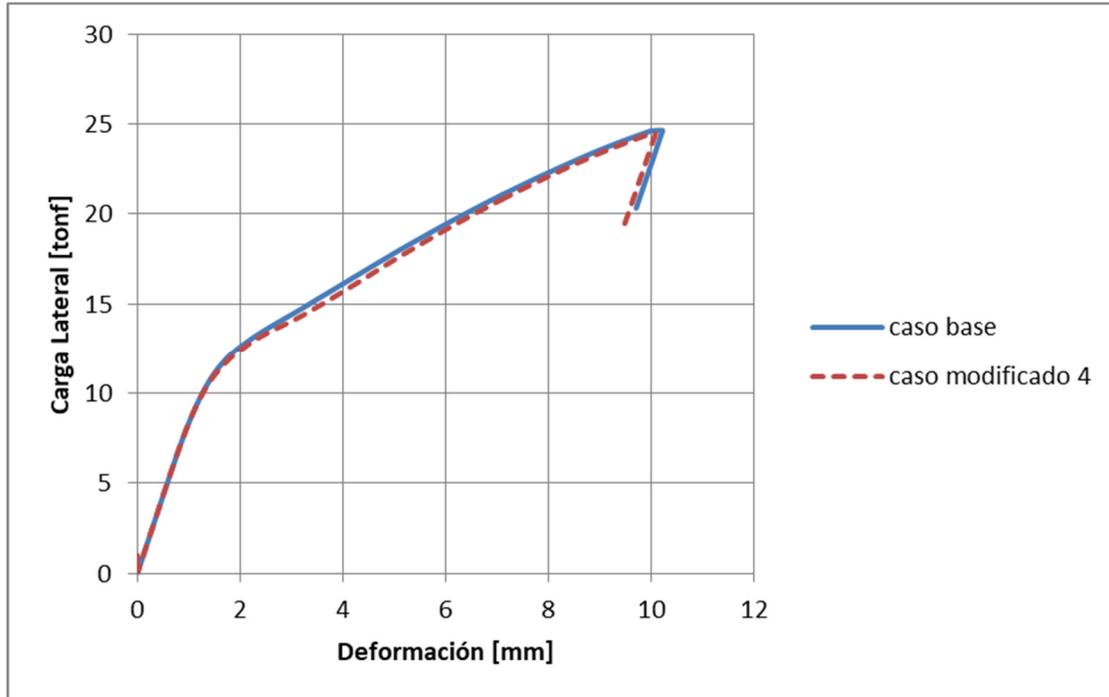


Figura 48: Comparación entre caso base y caso modificado 4. Las energías de fractura en tracción pasan de 0,037 y 0,105 N/mm a 0,025 y 0,081 N/mm .

En el caso anterior se observa que el momento inicial de *hardening* se modifica levemente. También se modifica ligeramente la resistencia máxima del muro. Es importante notar que pequeñas modificaciones pueden ocasionar problemas en la convergencia del modelo.

En el caso modificado 5 se modifica la energía de fractura en compresión, que pasa de 6 y 8 N/mm por eje a 3 y 4 N/mm por eje respectivamente. Los resultados graficados junto al caso base son los siguientes:

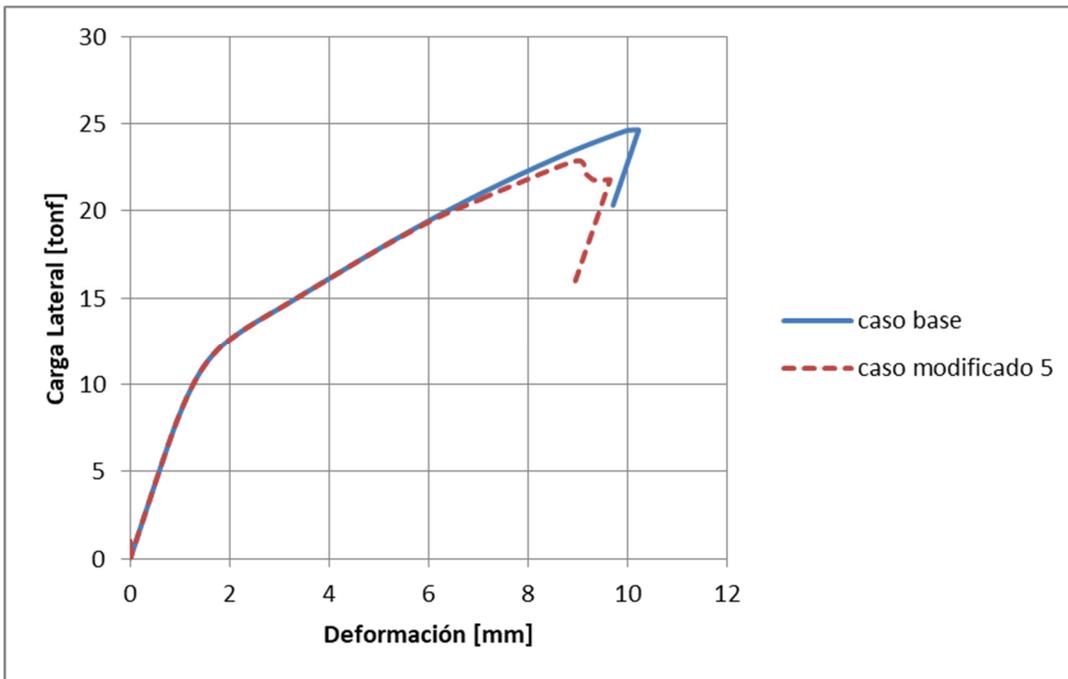


Figura 49: Comparación entre caso base y caso modificado 5, donde la energía de fractura en compresión pasa de 6 y 8 N/mm a 3 y 4 N/mm por eje.

Aquí se observa el cambio en la parte final del *hardening*, que desemboca en el *softening* posterior, además de una disminución de la resistencia máxima del muro. Se observa un fenómeno asociable a fallas locales del muro antes de la ocurrencia de la falla frágil.

Se realizó un segundo análisis del caso modificado 5 disminuyendo a 2.5 y 3.7 N/mm respectivamente. Los resultados entregan lo siguiente:

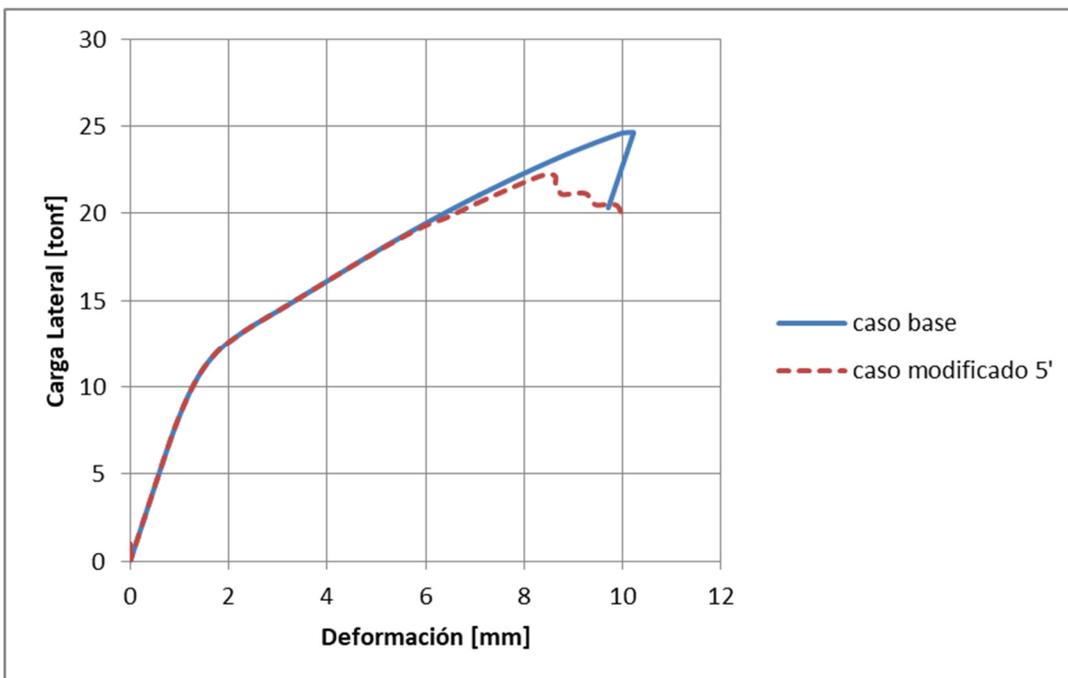


Figura 50: Comparación entre caso base y caso modificado 5'. Se pasa a una energía de fractura de 2,5 y 3,7 N/mm por eje.

En este caso se logra apreciar adicionalmente una tendencia que podría ser asociable al *softening*. La forma del *softening* observada puede deberse a los valores m y n del modelo Rankine Hill.

En el caso modificado 6 se alteró la resistencia a la tracción residual de un valor relativo de 0.01 a 0.1. Los resultados del análisis y la comparación con el caso base se muestra en el gráfico siguiente.

De ahí se puede observar cómo se aumenta levemente la carga máxima del muro, así como también aumenta la rigidez durante el *hardening*, lo que disminuye la deformación máxima que sufre el muro antes de la falla frágil.

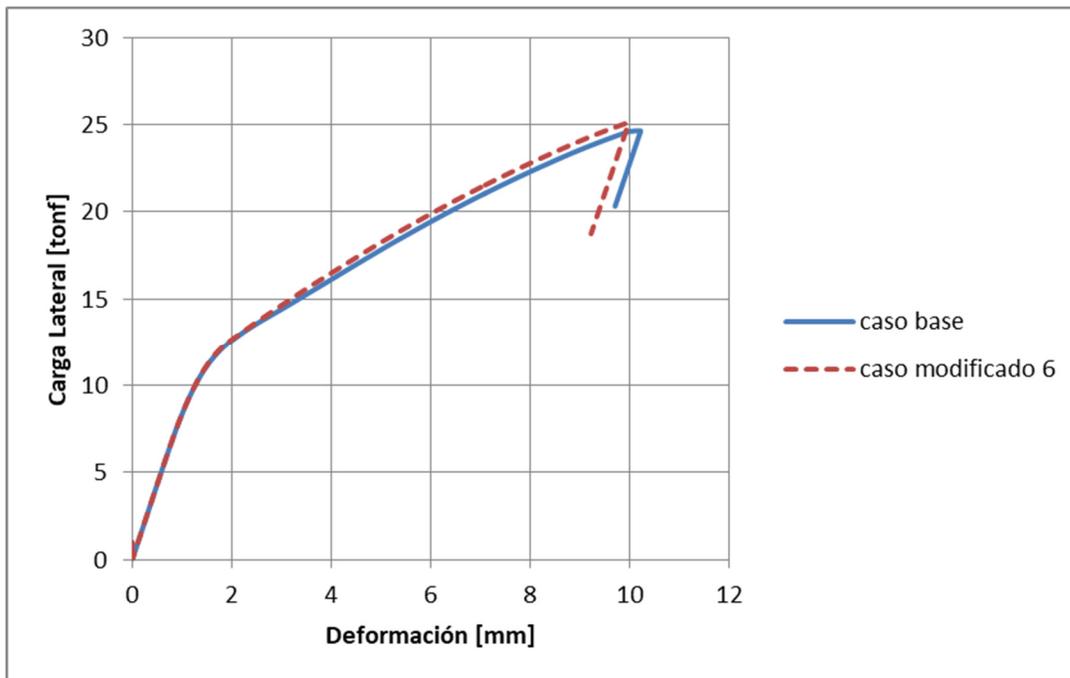


Figura 51: Comparación de caso base y caso modificado 6. La resistencia a la tracción residual relativa pasó de un 0,01 a un 0,1.

El caso modificado 7 cambia el parámetro m correspondiente al criterio súper-hiperbólico de Rankine-Hill pasando del valor 32 a uno de 4. La modificación realizada altera de manera considerable el comportamiento del *hardening* en la curva. Debido a la configuración de otros parámetros, el proceso de *softening* no se aprecia, pero de acuerdo a la teoría, la modificación debiese afectar de igual manera el proceso señalado.

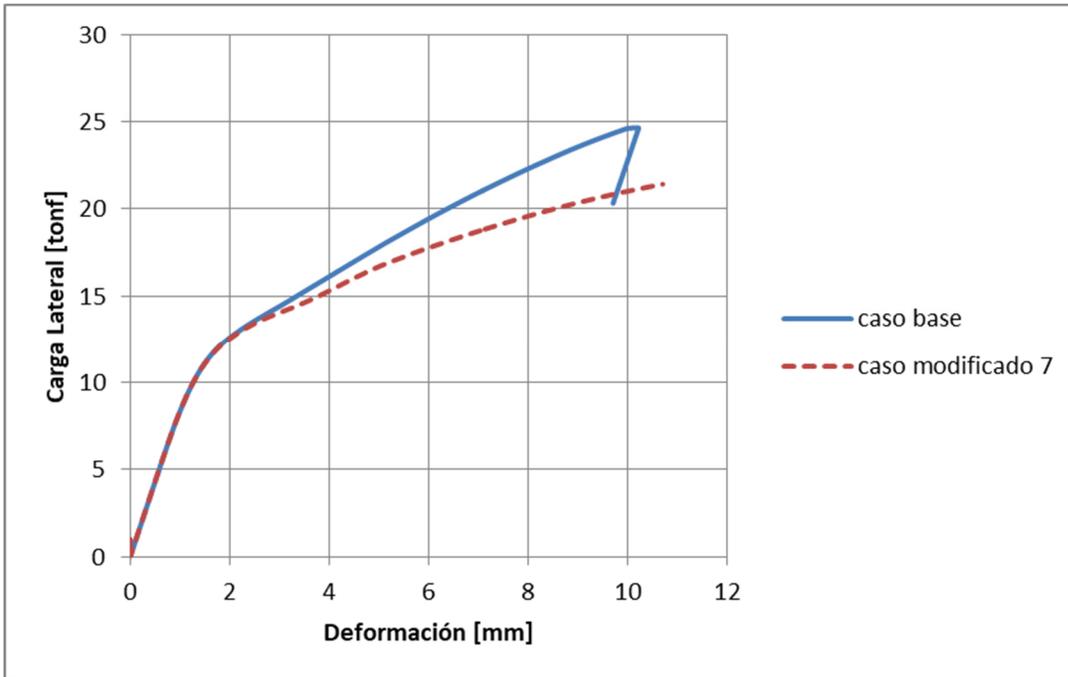


Figura 52: Comparación de caso base con caso modificado 7, donde el parámetro m pasa de 32 a 4.

Finalmente, el caso modificado 8 altera el valor del parámetro de Hill n , el nuevo valor utilizado es de 2, siendo el original 16. Aquí se observa la aparición de un plató previo a la falla frágil, surgiendo cierta ductilidad del muro. El parámetro súper-hiperbólico de Hill modifica el comportamiento posterior a de la carga máxima, alterando mínimamente el comportamiento de la curva en los tramos lineal y de *hardening*.

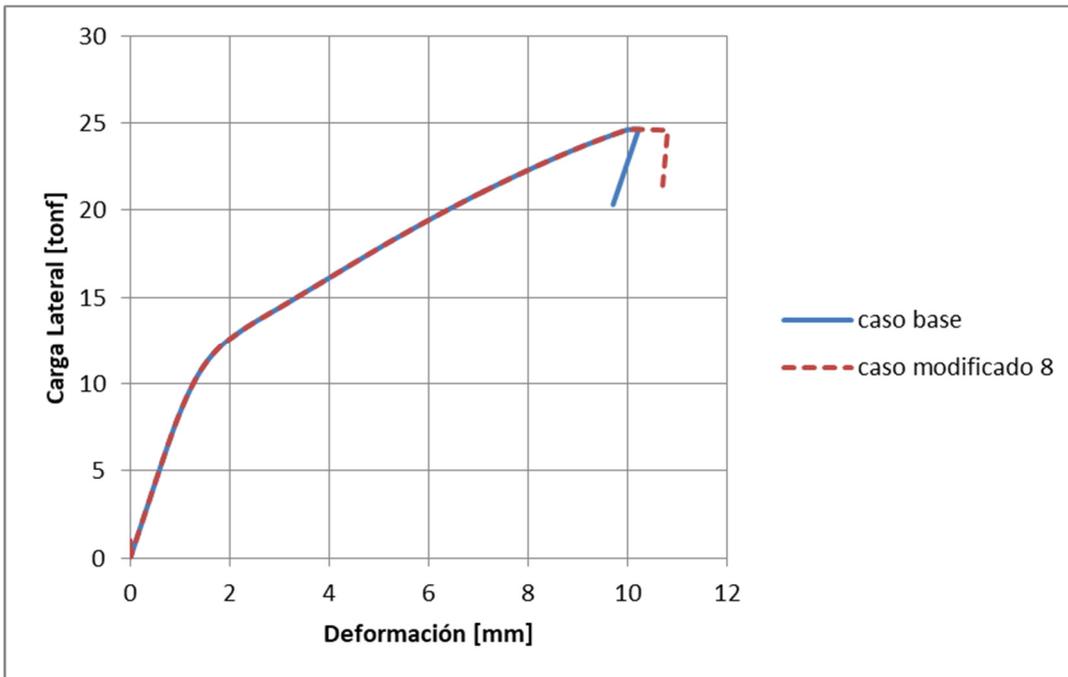


Figura 53: Comparación de caso base con caso modificado 8. El parámetro n pasa de 16 a 2.

5.3 Resultados

Una vez realizado el análisis de sensibilidad, se inicia la calibración del comportamiento elástico lineal del muro de corte. Lo anterior implica modificar los parámetros del Módulo de Young, de corte y el radio de Poisson.

Posteriormente se debe trabajar con el límite entre el comportamiento lineal y el *hardening*. Lo anterior se logra modificando las resistencias, tanto en tracción como en compresión. Parámetro n tiene influencia igualmente.

Finalmente, se debe calibrar el límite correspondiente a la carga máxima del muro. Para esto se debe trabajar modificando las energías de fractura, principalmente la correspondiente a la compresión, y los valores de los parámetros m y n .

Al modificar los parámetros, se modifica el comportamiento global del muro de corte, y su curva de capacidad, por lo que pequeños ajustes deben ser realizados para, por ejemplo, mantener bien representado el comportamiento elástico al cambiar los parámetros utilizados para calibrar la capacidad de carga lateral máxima del muro.

Luego, observando cómo modifica cada uno de los parámetros la curva de tensión-deformación del muro y realizando varias iteraciones, se llega al resultado en los parámetros de la albañilería considerando el criterio de Rankine Hill mostrado en la Tabla 29.

Tabla 29: Parámetros de muro de albañilería final.

Parámetro	Valor		
propiedades de material elástico			
Módulo de Young	6400	6400	N/mm ²
Módulo de Corte	800		N/mm ²
radio de Poisson	0,2		
densidad de masa	2,00E-09		T/mm ³
Anisotropía Rankine Hill			
resistencia a la tracción	0,28	0,28	N/mm ²
resistencia a la compresión	3,25	3,25	N/mm ²
energía de fractura en tracción	0,037	0,105	N/mm
crack rate dependecy	sin crack rate dependency		
energía de fractura en compresión	1,3	1,5	N/mm
inclusión de mejoras implementadas			
resistencia residual a tracción relativa	0,07		
parámetro m súper-hiperbólico de Rankine Hill	5		
parámetro n súper-hiperbólico de Rankine	30		

Y la curva de capacidad (o carga-deformación) obtenida de acuerdo a los resultados se muestra en la Figura 55.

Adicionalmente, se presenta una comparación entre la curva de capacidad del modelo y la observada en los ensayos recopilados por Marín (2009). La misma se tiene en la Figura 54.

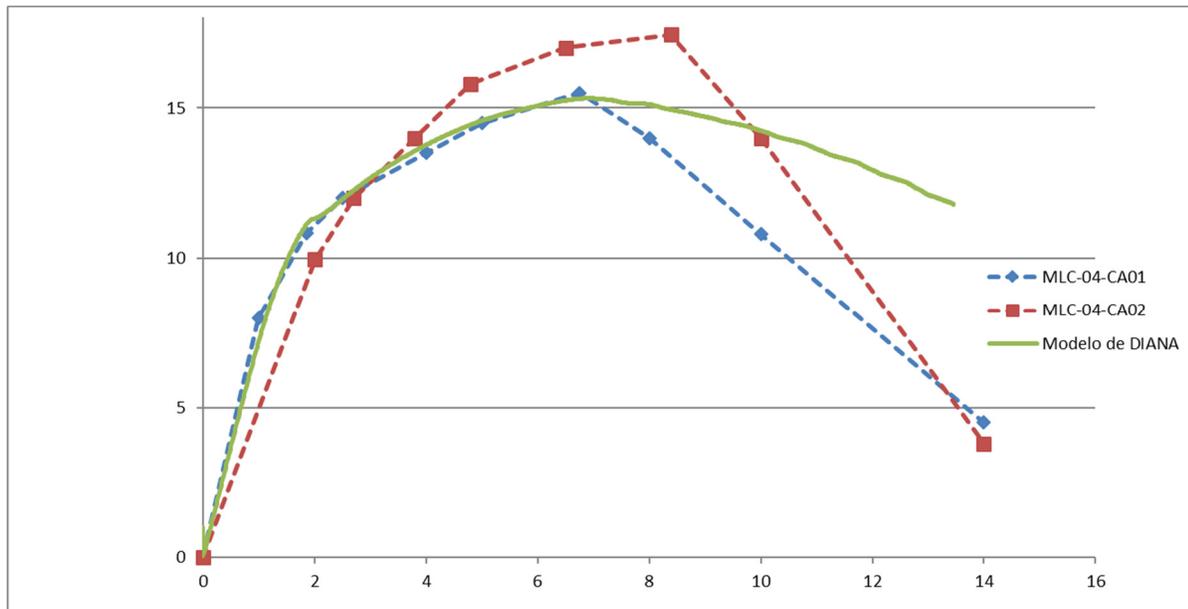


Figura 54: comparativa entre muros MLC-04 y modelo de los mismos en DIANA.

Como se puede apreciar, la curva de capacidad resultante del modelo numérico se aproxima a lo observado en el muro MLC-04-CA01.

Al observar la curva se puede observar cada una de las etapas de la curva: (i) el tramo lineal, que se extiende hasta aproximadamente unas 10 *tonf*, donde se comienzan a observar cambios en la curvatura del diagrama (ii) el tramo de *hardening*, que llega hasta la carga máxima aproximada de 15,5 *tonf* y una deformación aproximada de 6,8 *mm* y (iii) posteriormente, después de alcanzar la resistencia máxima del muro, comienza el proceso de *softening*.

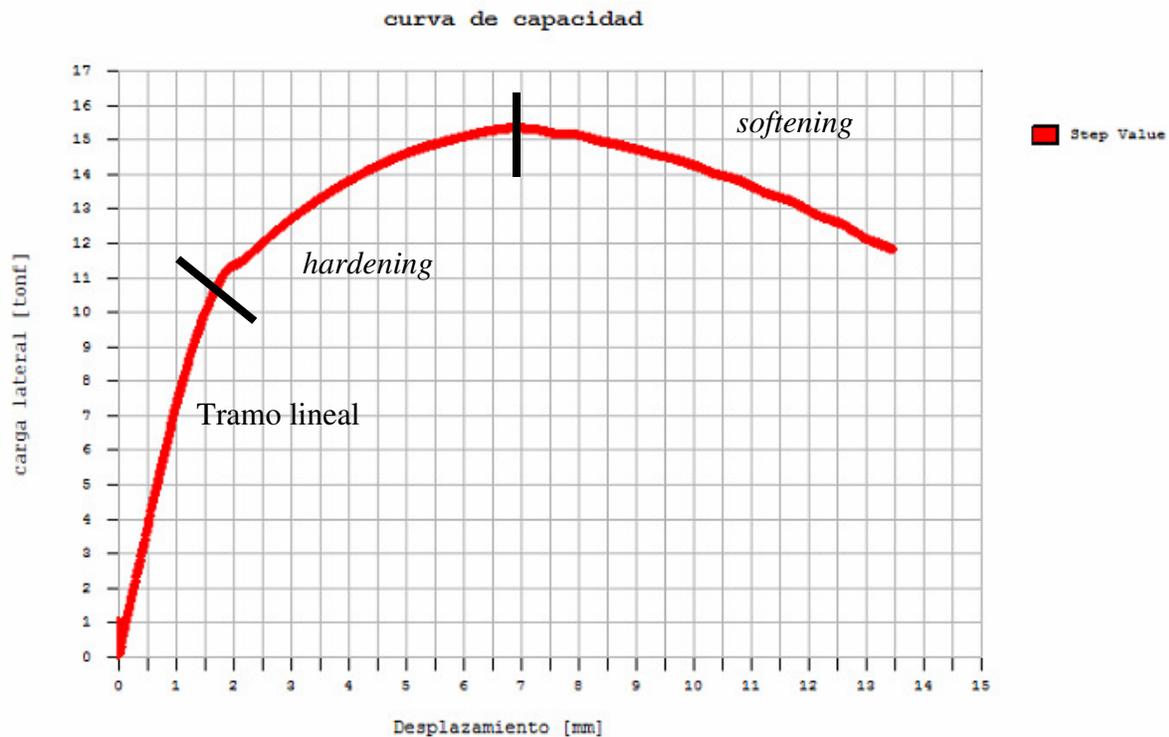


Figura 55: Curva de capacidad de simulación de muro.

El decaimiento o *softening* observado posterior al punto de carga máxima no logra ser bien capturado por el modelo. Lo anterior puede ser causado por la curva de tensión-deformación unitaria utilizada para el acero de refuerzo.

Los resultados mostrados a continuación fueron extraídos del *software* FX+ for DIANA. Las deformaciones se encuentran en *mm*, mientras que las tensiones se encuentran en N/mm^2 . Los porcentajes indicados en la columna central, inmediatamente a la derecha de la paleta de colores, corresponde al porcentaje de elementos que se encuentran entre los valores que rodean a determinado porcentaje.

La deformación del muro al momento de alcanzar la carga máxima entregada por el modelo es la siguiente:

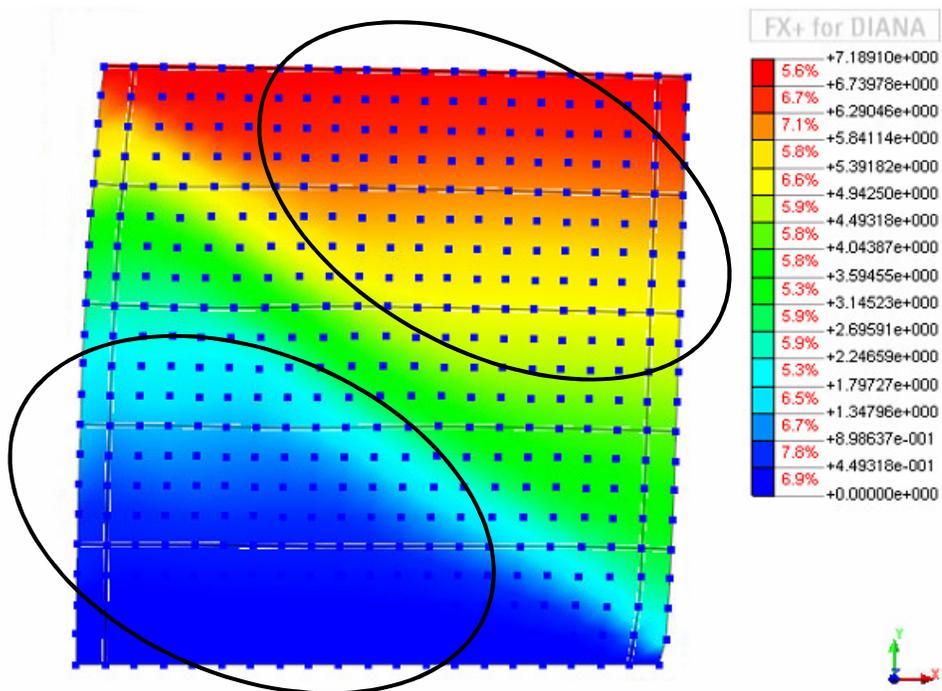


Figura 56: Desplazamiento del muro en carga máxima.

En la misma se observan dos grandes bloques de desplazamiento (el inferior con un menor desplazamiento en comparación con el superior, que muestra mayores desplazamientos, ver Figura 56), y de igual manera se puede predecir por qué sector cruza la principal fisura, siendo esta diagonal, correspondiendo a lo observado en el muro MLC-04-CA01 (muro con el cual la curva de capacidad del modelo tiene mayor similitud). Se requiere, aún así, más resultados: deformaciones unitarias, esfuerzos de tracción, etc.

Se tiene la deformación unitaria en la dirección XX en la Figura 57, la que indica que las mayores deformaciones unitarias se presentan en la dirección diagonal. La revisión de estas se muestra consistente con la suposición de la fisura diagonal.

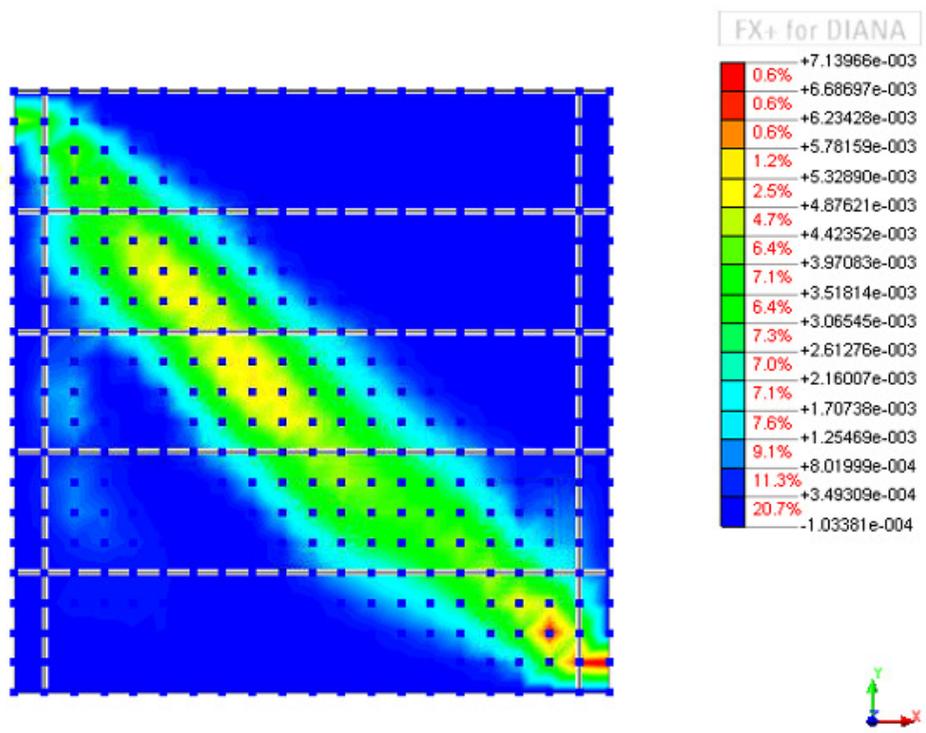


Figura 57: deformación unitaria en dirección XX durante la carga máxima.

También se cuenta con las tensiones principales en tracción del modelo numérico. Las que son presentadas en la Figura 58. Aquí se observa la nula tensión que existe en el momento de carga máxima en la diagonal, por lo que el muro no está trabajando, ni resistiendo este esfuerzo. Lo anterior es consistente con la existencia de fisuras diagonales.

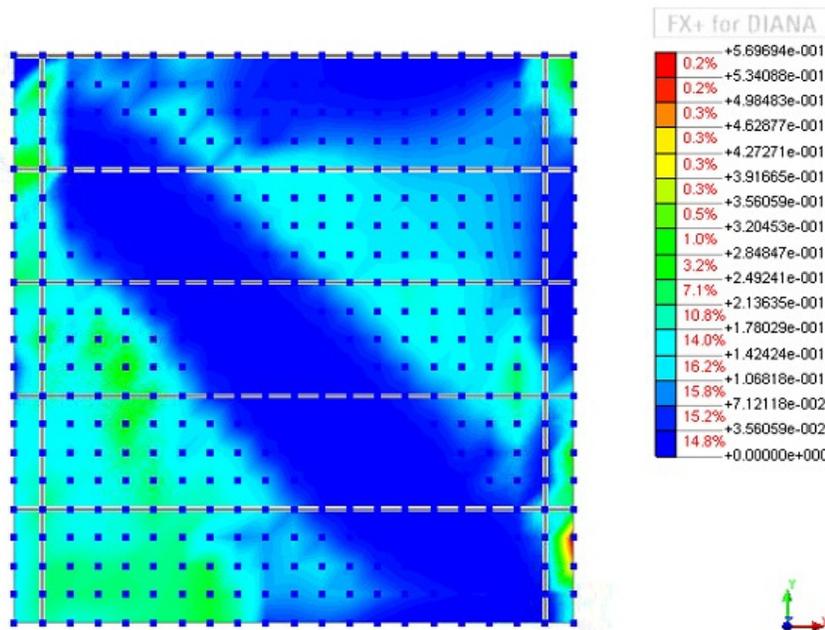


Figura 58: tensiones principales de tracción durante la carga lateral máxima.

También se tienen las tensiones principales de compresión, de las que se puede extraer principalmente el hecho de que las mayores compresiones están en el punto de aplicación de la carga lateral, y en el extremo opuesto (base derecha), donde la flexión comprime la base del muro. Observando los valores entregados, se tiene que el muro no falla por aplastamiento en el instante de carga máxima de acuerdo al modelo numérico. Lo anterior se puede observar en la .

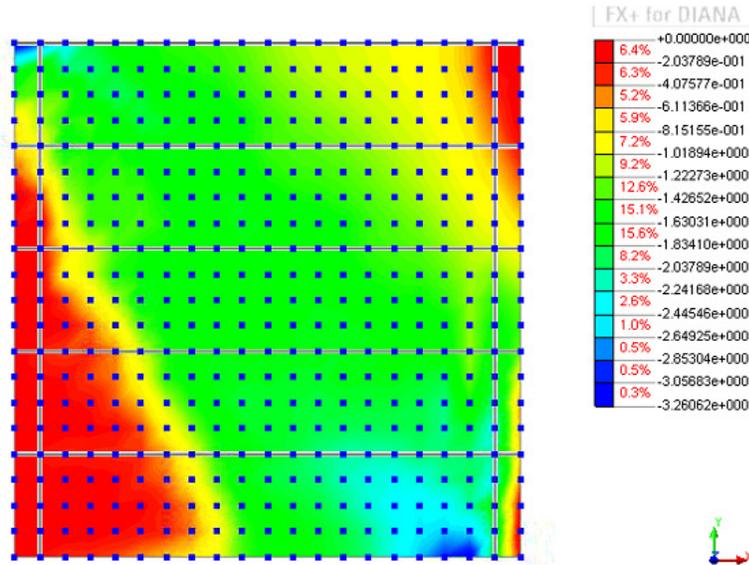


Figura 59: tensiones principales de compresión durante la carga máxima.

Finalmente, y para terminar de confirmar la idea previa de la fisura diagonal, se tiene la deformación unitaria del acero de refuerzo. La representación gráfica de la misma al momento de la carga máxima, nos permitirá observar en que lugares es más solicitada.

En la misma se puede observar como ciertos tramos de las barras de refuerzo sufren tracción, llegando además por sobre la deformación unitaria de fluencia (0,0019. Ver Tabla 13). Lo anterior permite decir dos cosas:

- Las barras de refuerzo están en el régimen de fluencia, lo que significa que las mismas sí están aportando ductilidad al muro.
- El aumento en la deformación unitaria se relaciona con aumento en las tensiones axiales. De acuerdo a la teoría de corte en hormigón, el acero de refuerzo trabaja cuando se tiene la presencia de fisuras, y que la tracción del acero ocurre en donde el mismo atraviesa la fisura. Se debe recordar que debido a la utilización de albañilería con llenado de huecos en el ensayo original, se considera que los principios de corte en hormigón armado pueden ser utilizados en la evaluación de esta albañilería armada.

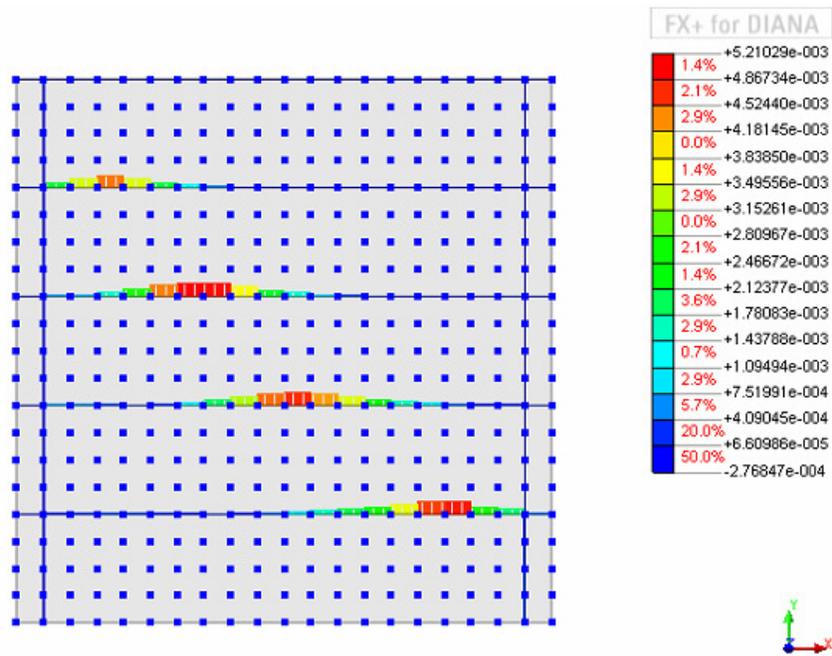


Figura 60: deformación unitaria de acero de refuerzo en momento de carga máxima.

5.4 Discusión

Los parámetros, si bien tuvieron un comportamiento estudiado en lo que respecta a la sensibilidad del modelo, a veces ligeros cambios significaban un cambio radical del comportamiento del modelo: por ejemplo, podría darse el cambio de un comportamiento de falla por corte, con cierta ductilidad, a un nuevo comportamiento frágil y elástico, donde gobernaba la falla por aplastamiento. Lo anterior se pudo observar en los análisis de sensibilidad realizados.

Parámetros como el módulo de Young se encuentran por sobre el mínimo de la norma, aunque también presentan valores cercanos a los obtenidos en los ensayos realizados por Sepúlveda. El valor del módulo de corte es aproximadamente un 20% menor al obtenido en los ensayos. Se debe observar que el valor del módulo de corte es menor al $0,3 \cdot E$ que indica la norma. Lo anterior se puede explicar sólo si la viga inferior, que fue modelada como una condición de borde empotrada, sufrió desplazamientos o levantamientos menores no informados.

La resistencia a la compresión se encuentra cerca del mínimo de la norma.

Adicionalmente, se realizó una verificación del modelo de material. El anterior se realizó considerando los muros MLC-02-CA02 y MLC-02-CA03. Las curvas envolventes de ambos muros se muestran en la Figura 61 y Figura 62.

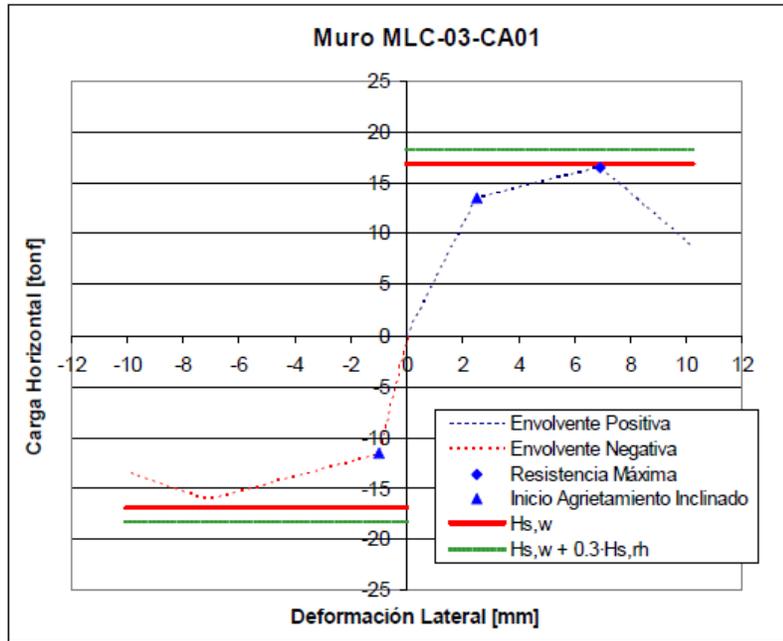


Figura 61: Curva envolvente de muro MLC-03-CA01.

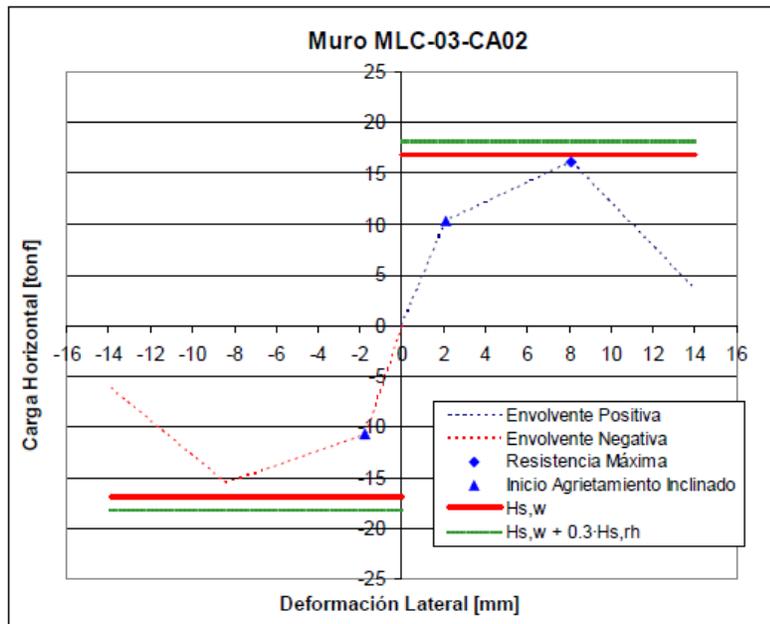


Figura 62: Curva envolvente de muro MLC-03-CA02.

De igual manera, utilizando los parámetros obtenidos de la calibración se tiene lo siguiente:

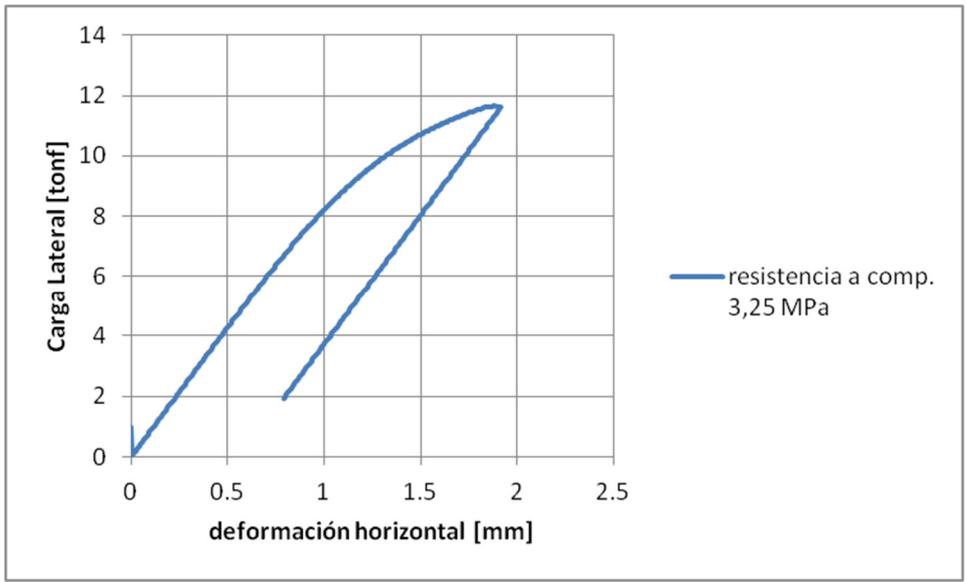


Figura 63: Curva de carga-deformación de modelo de verificación.

Se observa el comportamiento frágil (causado por fallas de aplastamiento de la albañilería, por compresión en la base del muro). Lo anterior indica que el modelo no parece representar bien la albañilería cuando esta se encuentra subreforzada.

De igual manera, se optó por realizar una modificación a la resistencia a la compresión, para observar el comportamiento del modelo.

Lo anterior entregó el resultado mostrado en Figura 64.

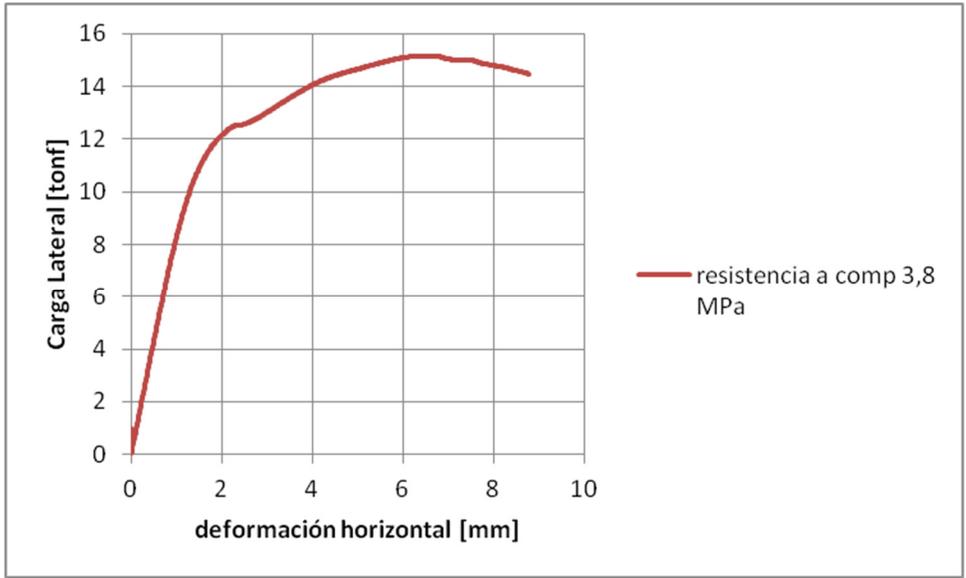


Figura 64: Curva de capacidad de modelo con resistencia a compresión modificada.

Lo que logra representar el comportamiento dúctil del muro.

La comparación entre los resultados experimentales y de cada uno de los modelos se muestra en la Figura 65.

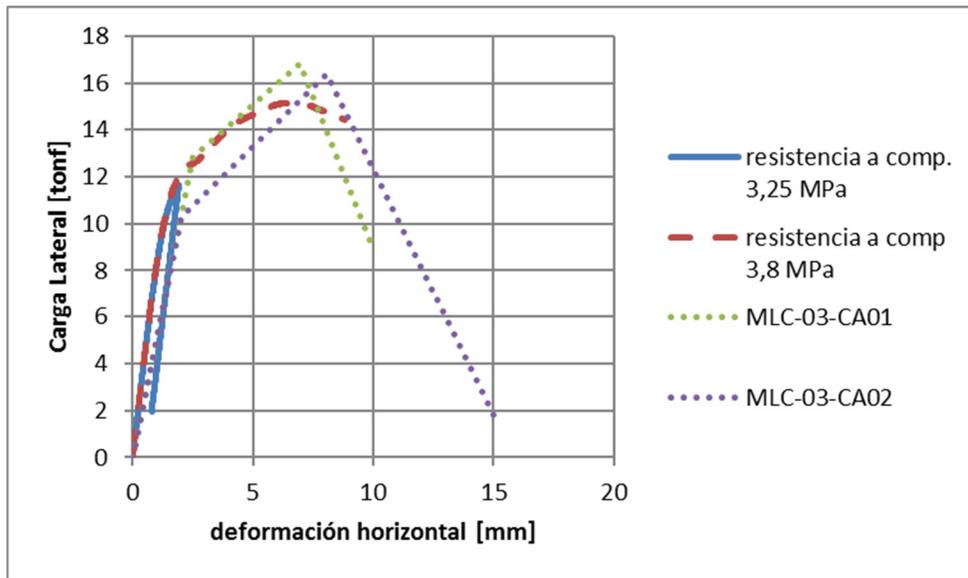


Figura 65: Resultados del modelo y resultados experimentales.

En la figura anterior se observa que el modelo representa bien el comportamiento lineal y de *hardening* de la albañilería, aunque se subestima la carga máxima que resiste el muro. Se debe aumentar la resistencia a la compresión del modelo para lograr el comportamiento deseado (es decir, lograr la falla por corte diagonal, y no por aplastamiento de la albañilería).

Se deben realizar verificaciones del material utilizando elementos estructurales con mayor cuantía de acero. Además, se debe revisar la influencia del acero, modificando las curvas de tensión-deformación utilizadas.

El modelo de Mohr-Coulomb se desechó debido a que no representaba de buena manera el comportamiento de la albañilería, ni del muro de corte analizado.

6. Conclusiones

La modelación de albañilería es compleja debido principalmente al hecho de ser un material anisotrópico. Además factores como el ser un material heterogéneo, compuesto de unidades y de material de pega (mortero), contribuyen a aumentar la complejidad de la modelación.

La elección de un modelo de material por sobre otros, el *Rankine Hill anisotropy*, recomendado para materiales anisotrópicos como la albañilería permitió simplificar la tarea al solo ser necesario concentrarse en la determinación de los parámetros del material que se distribuye en toda la extensión del elemento estructural, en vez de la elaboración de un micro-modelo de albañilería.

Etapa importante en la calibración fue determinar de qué manera afecta la variación de cada uno de los parámetros a la curva de capacidad del modelo desarrollado. El estudio de la teoría es fundamental en lo anterior, que después implica solo una verificación en los resultados durante el análisis de sensibilidad.

La curva de carga-deformación (o curva de capacidad) obtenida como resultado de la calibración logra representar de buena manera el comportamiento del muro de corte MLC-04-CA01 más que la del muro MLC-04-CA02, principalmente en lo que respecta al *hardening* y al comportamiento lineal. El muro representado es el que presenta menor resistencia máxima y menor deformación asociada, siendo por lo mismo la situación más restrictiva.

El *softening* no logra ser representado de manera exacta aún siendo una buena aproximación, aunque en este tramo la curva de capacidad pasa a ser controlada principalmente por la deformación. La representación no del todo correcta del *softening* podría generar complicaciones en lo que respecta a la redistribución de esfuerzos en simulaciones realizadas con varios elementos, como los ejes estructurales o estructuras 3D (viviendas). Se debe verificar la influencia de la curva del acero, utilizando una curva que incluya el *softening* observado en curvas de tensión-deformación del acero.

Aún cuando el *softening* no es representado adecuadamente, se cumple el objetivo de entregar parámetros que logren entregar el comportamiento de la albañilería armada chilena.

El mecanismo de falla del muro de albañilería es el corte diagonal, como se aprecia en las deformaciones unitarias en los elementos requeridos. Lo anterior se corresponde con el esquema de fisuración observado en el muro ensayado experimentalmente y con el mecanismo de falla deseado de acuerdo al comportamiento observado en los ensayos. El acero de refuerzo, al fluir, está aportando mayor ductilidad al muro de corte de albañilería armada. Se observa que los principios de corte del hormigón armado, donde el acero que atraviesa fisuras es el encargado de resistir el corte se ven reflejados en este caso, como se menciona en la bibliografía y normas señaladas, ya que la albañilería de referencia es de relleno completo de huecos.

Se espera que este modelo de material sea utilizado en la modelación y análisis de estructuras de albañilería armada más complejas, como edificios habitacionales de 3 o 4 pisos, ante cargas sísmicas también más complejas. La utilización de este modelo de material permitirá el desarrollo de modelos simplificados, los que a su vez podrán ser utilizados para la construcción de curvas de fragilidad en Chile.

7. Bibliografía

Afreen, A. (2017). State of Art Review: Behaviour of Masonry Structures under Gravity and Seismic Loads. *Intenational Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol 7, 202-214. Recuperado en <https://www.researchgate.net/publication/320893046>.

Bartoli, G.; Betti, M; Marra, A.; Monchetti, S. (2017). Bayesian model updating of historic masonry towers through dynamic experimental data. *Procedia Engineering*, vol 199, 1258-1263.

Cecchi, A; Tralli, A. (2012). A homogenized viscoelastic model for masonry structures. *International Journal of Solids and Structures*, vol 49, 1485-1496.

Centro Sismológico Nacional (2014). *Sismicidad y Terremotos en Chile*. Obtenido en http://www.csn.uchile.cl/wp-content/uploads/2014/06/001_terremotos_y_sismicidad_chile.pdf.

Dhanasekar, M (2011). Shear in Reinforced and Unreinforced Masonry: Response, Design and Construction. *Procedia Engineering*, vol 14, 2069-2076.

Facchini, L.; Betti, M.; Corazzi, R.; Cerisano Kovacevic, V. (2017). Nonlinear seismic behavior of historical masonry towers by means of different numerical models. *Procedia Enineering*, vol 199, 601-606.

Gallegos, H.; Casabonne, C. (2005). *Albañilería Estructural, tercera edición*. Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú: Fondo Editorial.

INE (2002). *Censo de Población y Vivienda 2002*. Chile. Recuperado de <http://redatam.ine.cl/cgi-bin/RpWebEngine.exe/PortalAction?&MODE=MAIN&BASE=CPCHL2KCOM&MAIN=WebServerMain.inl>.

INN (2001). *NCh 169. Of2001 Ladrillos cerámicos – Clasificación y requisitos*. Santiago, Chile.

INN (2009). *NCh 1928.Of1993 Mod. 2009. Albañilería armada – Requisitos para el diseño y cálculo*. Santiago, Chile.

Jorquera, R. (2014). *Catálogo de terremotos subductivos chilenos para la generación de curvas de fragilidad* (Tesis de pregrado). Universidad de Chile, Santiago. Recuperado de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/116425>.

Leyton, F.; Ruiz, S.; Sepúlveda S. (2010). Reevaluación del peligro sísmico probabilístico en Chile Central. *Andgeo*, vol 37 n°2, 455-472. Santiago.

Lourenço, P.; Rots, J.; Blaauwendraad, J. (1998). Continuum model for masonry: parameter estimation and validation. *Journal of Structural Engineering*, vol 124, 642-652.

Madariaga, R. (1998). Sismicidad de Chile. *Física de la Tierra*, vol 10, 221-258.

Maluchova, M.; Brozovsky, J. (2015). Estimation of initial elastic properties of 2D homogenised masonry model based on tensor scale indices. *Perspective in science*, vol 7, 195-199.

Marín, R. (2009). *Modelo puntal-tensor para determinar la resistencia al corte de muros de albañilería armada construidos con ladrillos cerámicos* (Tesis de Pregrado). Universidad de

Chile, Santiago. Recuperado de http://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2009/marin_r/html/index-frames.html.

Mihai, L.; Goriely, A. (2017). How to characterise a nonlinear elastic material? A review on nonlinear constitutive parameters in isotropic finite elasticity. *Proceedings of The Royal Society*. Recuperado en <https://www.researchgate.net/publication/320832545>.

Mitrovic, S.; Causevic, M. (abril, 2011). Comparison between non-linear dynamic and static seismic analysis of structures according to European and US provisions. *Bulletin of Earthquake Engineering*.

Mora, M.; Villalba, J.; Maldonado, E. (2006). Deficiencias, limitaciones, ventajas y desventajas de las metodologías de análisis sísmico no lineal. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, vol 5 (9), 59-74.

Santibañez, I.; Cembrano, J.; Garcia, T.; González, G.; Yáñez, G.; Arancibia, G.; (2015). Potencial Sismogénico de las Fallas Corticales en los Andes Chilenos. *XIV Congreso Geológico Chileno*, vol 1, páginas 352-254.

Sarhosis, V.; Milani, G.; Formisano, A.; Fabbrocino, F. (Noviembre, 2017). Evaluation of different approaches for the estimation of the seismic vulnerability of masonry towers. *Bulletin of Earthquake Engineering*.

Tilling, R.; Kious, W. (1996). *This Dynamic Earth: the Story of Plate Tectonics*. Estados Unidos de America: USGS Information Services.

ANEXO A: Código de modelo FEM

: Diana Datafile written by Diana 10.0

Translated from FX+ for DIANA neutral file (version 1.2.0).

'UNITS'

LENGTH MM

FORCE N

TEMPER CELSIU

'DIRECTIONS'

1	1.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2	0.00000E+00	1.00000E+00	0.00000E+00
3	0.00000E+00	0.00000E+00	1.00000E+00
4	0.00000E+00	-1.00000E+00	0.00000E+00

'MODEL'

GRAVDI 4

GRAVAC 9.81000E+03

'COORDINATES'

1	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2	9.87500E+01	0.00000E+00	0.00000E+00
3	1.97500E+02	0.00000E+00	0.00000E+00
4	2.96250E+02	0.00000E+00	0.00000E+00
5	3.95000E+02	0.00000E+00	0.00000E+00
6	4.93750E+02	0.00000E+00	0.00000E+00
7	5.92500E+02	0.00000E+00	0.00000E+00
8	6.91250E+02	0.00000E+00	0.00000E+00
9	7.90000E+02	0.00000E+00	0.00000E+00
10	8.88750E+02	0.00000E+00	0.00000E+00
11	9.87500E+02	0.00000E+00	0.00000E+00

12	1.08625E+03	0.00000E+00	0.00000E+00
13	1.18500E+03	0.00000E+00	0.00000E+00
14	1.28375E+03	0.00000E+00	0.00000E+00
15	1.38250E+03	0.00000E+00	0.00000E+00
16	1.48125E+03	0.00000E+00	0.00000E+00
17	1.58000E+03	0.00000E+00	0.00000E+00
18	1.67875E+03	0.00000E+00	0.00000E+00
19	1.77750E+03	0.00000E+00	0.00000E+00
20	1.87625E+03	0.00000E+00	0.00000E+00
21	1.97500E+03	0.00000E+00	0.00000E+00
22	1.97500E+03	1.00000E+02	0.00000E+00
23	1.97500E+03	2.00000E+02	0.00000E+00
24	1.97500E+03	3.00000E+02	0.00000E+00
25	1.97500E+03	4.00000E+02	0.00000E+00
26	1.97500E+03	5.00000E+02	0.00000E+00
27	1.97500E+03	6.00000E+02	0.00000E+00
28	1.97500E+03	7.00000E+02	0.00000E+00
29	1.97500E+03	8.00000E+02	0.00000E+00
30	1.97500E+03	9.00000E+02	0.00000E+00
31	1.97500E+03	1.00000E+03	0.00000E+00
32	1.97500E+03	1.10000E+03	0.00000E+00
33	1.97500E+03	1.20000E+03	0.00000E+00
34	1.97500E+03	1.30000E+03	0.00000E+00
35	1.97500E+03	1.40000E+03	0.00000E+00
36	1.97500E+03	1.50000E+03	0.00000E+00
37	1.97500E+03	1.60000E+03	0.00000E+00
38	1.97500E+03	1.70000E+03	0.00000E+00
39	1.97500E+03	1.80000E+03	0.00000E+00

40	1.97500E+03	1.90000E+03	0.00000E+00
41	1.97500E+03	2.00000E+03	0.00000E+00
42	1.87625E+03	2.00000E+03	0.00000E+00
43	1.77750E+03	2.00000E+03	0.00000E+00
44	1.67875E+03	2.00000E+03	0.00000E+00
45	1.58000E+03	2.00000E+03	0.00000E+00
46	1.48125E+03	2.00000E+03	0.00000E+00
47	1.38250E+03	2.00000E+03	0.00000E+00
48	1.28375E+03	2.00000E+03	0.00000E+00
49	1.18500E+03	2.00000E+03	0.00000E+00
50	1.08625E+03	2.00000E+03	0.00000E+00
51	9.87500E+02	2.00000E+03	0.00000E+00
52	8.88750E+02	2.00000E+03	0.00000E+00
53	7.90000E+02	2.00000E+03	0.00000E+00
54	6.91250E+02	2.00000E+03	0.00000E+00
55	5.92500E+02	2.00000E+03	0.00000E+00
56	4.93750E+02	2.00000E+03	0.00000E+00
57	3.95000E+02	2.00000E+03	0.00000E+00
58	2.96250E+02	2.00000E+03	0.00000E+00
59	1.97500E+02	2.00000E+03	0.00000E+00
60	9.87500E+01	2.00000E+03	0.00000E+00
61	0.00000E+00	2.00000E+03	0.00000E+00
62	0.00000E+00	1.90000E+03	0.00000E+00
63	0.00000E+00	1.80000E+03	0.00000E+00
64	0.00000E+00	1.70000E+03	0.00000E+00
65	0.00000E+00	1.60000E+03	0.00000E+00
66	0.00000E+00	1.50000E+03	0.00000E+00
67	0.00000E+00	1.40000E+03	0.00000E+00

68	0.00000E+00	1.30000E+03	0.00000E+00
69	0.00000E+00	1.20000E+03	0.00000E+00
70	0.00000E+00	1.10000E+03	0.00000E+00
71	0.00000E+00	1.00000E+03	0.00000E+00
72	0.00000E+00	9.00000E+02	0.00000E+00
73	0.00000E+00	8.00000E+02	0.00000E+00
74	0.00000E+00	7.00000E+02	0.00000E+00
75	0.00000E+00	6.00000E+02	0.00000E+00
76	0.00000E+00	5.00000E+02	0.00000E+00
77	0.00000E+00	4.00000E+02	0.00000E+00
78	0.00000E+00	3.00000E+02	0.00000E+00
79	0.00000E+00	2.00000E+02	0.00000E+00
80	0.00000E+00	1.00000E+02	0.00000E+00
81	9.87500E+01	1.00000E+02	0.00000E+00
82	9.87500E+01	2.00000E+02	0.00000E+00
83	9.87500E+01	3.00000E+02	0.00000E+00
84	9.87500E+01	4.00000E+02	0.00000E+00
85	9.87500E+01	5.00000E+02	0.00000E+00
86	9.87500E+01	6.00000E+02	0.00000E+00
87	9.87500E+01	7.00000E+02	0.00000E+00
88	9.87500E+01	8.00000E+02	0.00000E+00
89	9.87500E+01	9.00000E+02	0.00000E+00
90	9.87500E+01	1.00000E+03	0.00000E+00
91	9.87500E+01	1.10000E+03	0.00000E+00
92	9.87500E+01	1.20000E+03	0.00000E+00
93	9.87500E+01	1.30000E+03	0.00000E+00
94	9.87500E+01	1.40000E+03	0.00000E+00
95	9.87500E+01	1.50000E+03	0.00000E+00

96	9.87500E+01	1.60000E+03	0.00000E+00
97	9.87500E+01	1.70000E+03	0.00000E+00
98	9.87500E+01	1.80000E+03	0.00000E+00
99	9.87500E+01	1.90000E+03	0.00000E+00
100	1.97500E+02	1.00000E+02	0.00000E+00
101	1.97500E+02	2.00000E+02	0.00000E+00
102	1.97500E+02	3.00000E+02	0.00000E+00
103	1.97500E+02	4.00000E+02	0.00000E+00
104	1.97500E+02	5.00000E+02	0.00000E+00
105	1.97500E+02	6.00000E+02	0.00000E+00
106	1.97500E+02	7.00000E+02	0.00000E+00
107	1.97500E+02	8.00000E+02	0.00000E+00
108	1.97500E+02	9.00000E+02	0.00000E+00
109	1.97500E+02	1.00000E+03	0.00000E+00
110	1.97500E+02	1.10000E+03	0.00000E+00
111	1.97500E+02	1.20000E+03	0.00000E+00
112	1.97500E+02	1.30000E+03	0.00000E+00
113	1.97500E+02	1.40000E+03	0.00000E+00
114	1.97500E+02	1.50000E+03	0.00000E+00
115	1.97500E+02	1.60000E+03	0.00000E+00
116	1.97500E+02	1.70000E+03	0.00000E+00
117	1.97500E+02	1.80000E+03	0.00000E+00
118	1.97500E+02	1.90000E+03	0.00000E+00
119	2.96250E+02	1.00000E+02	0.00000E+00
120	2.96250E+02	2.00000E+02	0.00000E+00
121	2.96250E+02	3.00000E+02	0.00000E+00
122	2.96250E+02	4.00000E+02	0.00000E+00
123	2.96250E+02	5.00000E+02	0.00000E+00

124	2.96250E+02	6.00000E+02	0.00000E+00
125	2.96250E+02	7.00000E+02	0.00000E+00
126	2.96250E+02	8.00000E+02	0.00000E+00
127	2.96250E+02	9.00000E+02	0.00000E+00
128	2.96250E+02	1.00000E+03	0.00000E+00
129	2.96250E+02	1.10000E+03	0.00000E+00
130	2.96250E+02	1.20000E+03	0.00000E+00
131	2.96250E+02	1.30000E+03	0.00000E+00
132	2.96250E+02	1.40000E+03	0.00000E+00
133	2.96250E+02	1.50000E+03	0.00000E+00
134	2.96250E+02	1.60000E+03	0.00000E+00
135	2.96250E+02	1.70000E+03	0.00000E+00
136	2.96250E+02	1.80000E+03	0.00000E+00
137	2.96250E+02	1.90000E+03	0.00000E+00
138	3.95000E+02	1.00000E+02	0.00000E+00
139	3.95000E+02	2.00000E+02	0.00000E+00
140	3.95000E+02	3.00000E+02	0.00000E+00
141	3.95000E+02	4.00000E+02	0.00000E+00
142	3.95000E+02	5.00000E+02	0.00000E+00
143	3.95000E+02	6.00000E+02	0.00000E+00
144	3.95000E+02	7.00000E+02	0.00000E+00
145	3.95000E+02	8.00000E+02	0.00000E+00
146	3.95000E+02	9.00000E+02	0.00000E+00
147	3.95000E+02	1.00000E+03	0.00000E+00
148	3.95000E+02	1.10000E+03	0.00000E+00
149	3.95000E+02	1.20000E+03	0.00000E+00
150	3.95000E+02	1.30000E+03	0.00000E+00
151	3.95000E+02	1.40000E+03	0.00000E+00

152	3.95000E+02	1.50000E+03	0.00000E+00
153	3.95000E+02	1.60000E+03	0.00000E+00
154	3.95000E+02	1.70000E+03	0.00000E+00
155	3.95000E+02	1.80000E+03	0.00000E+00
156	3.95000E+02	1.90000E+03	0.00000E+00
157	4.93750E+02	1.00000E+02	0.00000E+00
158	4.93750E+02	2.00000E+02	0.00000E+00
159	4.93750E+02	3.00000E+02	0.00000E+00
160	4.93750E+02	4.00000E+02	0.00000E+00
161	4.93750E+02	5.00000E+02	0.00000E+00
162	4.93750E+02	6.00000E+02	0.00000E+00
163	4.93750E+02	7.00000E+02	0.00000E+00
164	4.93750E+02	8.00000E+02	0.00000E+00
165	4.93750E+02	9.00000E+02	0.00000E+00
166	4.93750E+02	1.00000E+03	0.00000E+00
167	4.93750E+02	1.10000E+03	0.00000E+00
168	4.93750E+02	1.20000E+03	0.00000E+00
169	4.93750E+02	1.30000E+03	0.00000E+00
170	4.93750E+02	1.40000E+03	0.00000E+00
171	4.93750E+02	1.50000E+03	0.00000E+00
172	4.93750E+02	1.60000E+03	0.00000E+00
173	4.93750E+02	1.70000E+03	0.00000E+00
174	4.93750E+02	1.80000E+03	0.00000E+00
175	4.93750E+02	1.90000E+03	0.00000E+00
176	5.92500E+02	1.00000E+02	0.00000E+00
177	5.92500E+02	2.00000E+02	0.00000E+00
178	5.92500E+02	3.00000E+02	0.00000E+00
179	5.92500E+02	4.00000E+02	0.00000E+00

180	5.92500E+02	5.00000E+02	0.00000E+00
181	5.92500E+02	6.00000E+02	0.00000E+00
182	5.92500E+02	7.00000E+02	0.00000E+00
183	5.92500E+02	8.00000E+02	0.00000E+00
184	5.92500E+02	9.00000E+02	0.00000E+00
185	5.92500E+02	1.00000E+03	0.00000E+00
186	5.92500E+02	1.10000E+03	0.00000E+00
187	5.92500E+02	1.20000E+03	0.00000E+00
188	5.92500E+02	1.30000E+03	0.00000E+00
189	5.92500E+02	1.40000E+03	0.00000E+00
190	5.92500E+02	1.50000E+03	0.00000E+00
191	5.92500E+02	1.60000E+03	0.00000E+00
192	5.92500E+02	1.70000E+03	0.00000E+00
193	5.92500E+02	1.80000E+03	0.00000E+00
194	5.92500E+02	1.90000E+03	0.00000E+00
195	6.91250E+02	1.00000E+02	0.00000E+00
196	6.91250E+02	2.00000E+02	0.00000E+00
197	6.91250E+02	3.00000E+02	0.00000E+00
198	6.91250E+02	4.00000E+02	0.00000E+00
199	6.91250E+02	5.00000E+02	0.00000E+00
200	6.91250E+02	6.00000E+02	0.00000E+00
201	6.91250E+02	7.00000E+02	0.00000E+00
202	6.91250E+02	8.00000E+02	0.00000E+00
203	6.91250E+02	9.00000E+02	0.00000E+00
204	6.91250E+02	1.00000E+03	0.00000E+00
205	6.91250E+02	1.10000E+03	0.00000E+00
206	6.91250E+02	1.20000E+03	0.00000E+00
207	6.91250E+02	1.30000E+03	0.00000E+00

208	6.91250E+02	1.40000E+03	0.00000E+00
209	6.91250E+02	1.50000E+03	0.00000E+00
210	6.91250E+02	1.60000E+03	0.00000E+00
211	6.91250E+02	1.70000E+03	0.00000E+00
212	6.91250E+02	1.80000E+03	0.00000E+00
213	6.91250E+02	1.90000E+03	0.00000E+00
214	7.90000E+02	1.00000E+02	0.00000E+00
215	7.90000E+02	2.00000E+02	0.00000E+00
216	7.90000E+02	3.00000E+02	0.00000E+00
217	7.90000E+02	4.00000E+02	0.00000E+00
218	7.90000E+02	5.00000E+02	0.00000E+00
219	7.90000E+02	6.00000E+02	0.00000E+00
220	7.90000E+02	7.00000E+02	0.00000E+00
221	7.90000E+02	8.00000E+02	0.00000E+00
222	7.90000E+02	9.00000E+02	0.00000E+00
223	7.90000E+02	1.00000E+03	0.00000E+00
224	7.90000E+02	1.10000E+03	0.00000E+00
225	7.90000E+02	1.20000E+03	0.00000E+00
226	7.90000E+02	1.30000E+03	0.00000E+00
227	7.90000E+02	1.40000E+03	0.00000E+00
228	7.90000E+02	1.50000E+03	0.00000E+00
229	7.90000E+02	1.60000E+03	0.00000E+00
230	7.90000E+02	1.70000E+03	0.00000E+00
231	7.90000E+02	1.80000E+03	0.00000E+00
232	7.90000E+02	1.90000E+03	0.00000E+00
233	8.88750E+02	1.00000E+02	0.00000E+00
234	8.88750E+02	2.00000E+02	0.00000E+00
235	8.88750E+02	3.00000E+02	0.00000E+00

236	8.88750E+02	4.00000E+02	0.00000E+00
237	8.88750E+02	5.00000E+02	0.00000E+00
238	8.88750E+02	6.00000E+02	0.00000E+00
239	8.88750E+02	7.00000E+02	0.00000E+00
240	8.88750E+02	8.00000E+02	0.00000E+00
241	8.88750E+02	9.00000E+02	0.00000E+00
242	8.88750E+02	1.00000E+03	0.00000E+00
243	8.88750E+02	1.10000E+03	0.00000E+00
244	8.88750E+02	1.20000E+03	0.00000E+00
245	8.88750E+02	1.30000E+03	0.00000E+00
246	8.88750E+02	1.40000E+03	0.00000E+00
247	8.88750E+02	1.50000E+03	0.00000E+00
248	8.88750E+02	1.60000E+03	0.00000E+00
249	8.88750E+02	1.70000E+03	0.00000E+00
250	8.88750E+02	1.80000E+03	0.00000E+00
251	8.88750E+02	1.90000E+03	0.00000E+00
252	9.87500E+02	1.00000E+02	0.00000E+00
253	9.87500E+02	2.00000E+02	0.00000E+00
254	9.87500E+02	3.00000E+02	0.00000E+00
255	9.87500E+02	4.00000E+02	0.00000E+00
256	9.87500E+02	5.00000E+02	0.00000E+00
257	9.87500E+02	6.00000E+02	0.00000E+00
258	9.87500E+02	7.00000E+02	0.00000E+00
259	9.87500E+02	8.00000E+02	0.00000E+00
260	9.87500E+02	9.00000E+02	0.00000E+00
261	9.87500E+02	1.00000E+03	0.00000E+00
262	9.87500E+02	1.10000E+03	0.00000E+00
263	9.87500E+02	1.20000E+03	0.00000E+00

264	9.87500E+02	1.30000E+03	0.00000E+00
265	9.87500E+02	1.40000E+03	0.00000E+00
266	9.87500E+02	1.50000E+03	0.00000E+00
267	9.87500E+02	1.60000E+03	0.00000E+00
268	9.87500E+02	1.70000E+03	0.00000E+00
269	9.87500E+02	1.80000E+03	0.00000E+00
270	9.87500E+02	1.90000E+03	0.00000E+00
271	1.08625E+03	1.00000E+02	0.00000E+00
272	1.08625E+03	2.00000E+02	0.00000E+00
273	1.08625E+03	3.00000E+02	0.00000E+00
274	1.08625E+03	4.00000E+02	0.00000E+00
275	1.08625E+03	5.00000E+02	0.00000E+00
276	1.08625E+03	6.00000E+02	0.00000E+00
277	1.08625E+03	7.00000E+02	0.00000E+00
278	1.08625E+03	8.00000E+02	0.00000E+00
279	1.08625E+03	9.00000E+02	0.00000E+00
280	1.08625E+03	1.00000E+03	0.00000E+00
281	1.08625E+03	1.10000E+03	0.00000E+00
282	1.08625E+03	1.20000E+03	0.00000E+00
283	1.08625E+03	1.30000E+03	0.00000E+00
284	1.08625E+03	1.40000E+03	0.00000E+00
285	1.08625E+03	1.50000E+03	0.00000E+00
286	1.08625E+03	1.60000E+03	0.00000E+00
287	1.08625E+03	1.70000E+03	0.00000E+00
288	1.08625E+03	1.80000E+03	0.00000E+00
289	1.08625E+03	1.90000E+03	0.00000E+00
290	1.18500E+03	1.00000E+02	0.00000E+00
291	1.18500E+03	2.00000E+02	0.00000E+00

292	1.18500E+03	3.00000E+02	0.00000E+00
293	1.18500E+03	4.00000E+02	0.00000E+00
294	1.18500E+03	5.00000E+02	0.00000E+00
295	1.18500E+03	6.00000E+02	0.00000E+00
296	1.18500E+03	7.00000E+02	0.00000E+00
297	1.18500E+03	8.00000E+02	0.00000E+00
298	1.18500E+03	9.00000E+02	0.00000E+00
299	1.18500E+03	1.00000E+03	0.00000E+00
300	1.18500E+03	1.10000E+03	0.00000E+00
301	1.18500E+03	1.20000E+03	0.00000E+00
302	1.18500E+03	1.30000E+03	0.00000E+00
303	1.18500E+03	1.40000E+03	0.00000E+00
304	1.18500E+03	1.50000E+03	0.00000E+00
305	1.18500E+03	1.60000E+03	0.00000E+00
306	1.18500E+03	1.70000E+03	0.00000E+00
307	1.18500E+03	1.80000E+03	0.00000E+00
308	1.18500E+03	1.90000E+03	0.00000E+00
309	1.28375E+03	1.00000E+02	0.00000E+00
310	1.28375E+03	2.00000E+02	0.00000E+00
311	1.28375E+03	3.00000E+02	0.00000E+00
312	1.28375E+03	4.00000E+02	0.00000E+00
313	1.28375E+03	5.00000E+02	0.00000E+00
314	1.28375E+03	6.00000E+02	0.00000E+00
315	1.28375E+03	7.00000E+02	0.00000E+00
316	1.28375E+03	8.00000E+02	0.00000E+00
317	1.28375E+03	9.00000E+02	0.00000E+00
318	1.28375E+03	1.00000E+03	0.00000E+00
319	1.28375E+03	1.10000E+03	0.00000E+00

320	1.28375E+03	1.20000E+03	0.00000E+00
321	1.28375E+03	1.30000E+03	0.00000E+00
322	1.28375E+03	1.40000E+03	0.00000E+00
323	1.28375E+03	1.50000E+03	0.00000E+00
324	1.28375E+03	1.60000E+03	0.00000E+00
325	1.28375E+03	1.70000E+03	0.00000E+00
326	1.28375E+03	1.80000E+03	0.00000E+00
327	1.28375E+03	1.90000E+03	0.00000E+00
328	1.38250E+03	1.00000E+02	0.00000E+00
329	1.38250E+03	2.00000E+02	0.00000E+00
330	1.38250E+03	3.00000E+02	0.00000E+00
331	1.38250E+03	4.00000E+02	0.00000E+00
332	1.38250E+03	5.00000E+02	0.00000E+00
333	1.38250E+03	6.00000E+02	0.00000E+00
334	1.38250E+03	7.00000E+02	0.00000E+00
335	1.38250E+03	8.00000E+02	0.00000E+00
336	1.38250E+03	9.00000E+02	0.00000E+00
337	1.38250E+03	1.00000E+03	0.00000E+00
338	1.38250E+03	1.10000E+03	0.00000E+00
339	1.38250E+03	1.20000E+03	0.00000E+00
340	1.38250E+03	1.30000E+03	0.00000E+00
341	1.38250E+03	1.40000E+03	0.00000E+00
342	1.38250E+03	1.50000E+03	0.00000E+00
343	1.38250E+03	1.60000E+03	0.00000E+00
344	1.38250E+03	1.70000E+03	0.00000E+00
345	1.38250E+03	1.80000E+03	0.00000E+00
346	1.38250E+03	1.90000E+03	0.00000E+00
347	1.48125E+03	1.00000E+02	0.00000E+00

348	1.48125E+03	2.00000E+02	0.00000E+00
349	1.48125E+03	3.00000E+02	0.00000E+00
350	1.48125E+03	4.00000E+02	0.00000E+00
351	1.48125E+03	5.00000E+02	0.00000E+00
352	1.48125E+03	6.00000E+02	0.00000E+00
353	1.48125E+03	7.00000E+02	0.00000E+00
354	1.48125E+03	8.00000E+02	0.00000E+00
355	1.48125E+03	9.00000E+02	0.00000E+00
356	1.48125E+03	1.00000E+03	0.00000E+00
357	1.48125E+03	1.10000E+03	0.00000E+00
358	1.48125E+03	1.20000E+03	0.00000E+00
359	1.48125E+03	1.30000E+03	0.00000E+00
360	1.48125E+03	1.40000E+03	0.00000E+00
361	1.48125E+03	1.50000E+03	0.00000E+00
362	1.48125E+03	1.60000E+03	0.00000E+00
363	1.48125E+03	1.70000E+03	0.00000E+00
364	1.48125E+03	1.80000E+03	0.00000E+00
365	1.48125E+03	1.90000E+03	0.00000E+00
366	1.58000E+03	1.00000E+02	0.00000E+00
367	1.58000E+03	2.00000E+02	0.00000E+00
368	1.58000E+03	3.00000E+02	0.00000E+00
369	1.58000E+03	4.00000E+02	0.00000E+00
370	1.58000E+03	5.00000E+02	0.00000E+00
371	1.58000E+03	6.00000E+02	0.00000E+00
372	1.58000E+03	7.00000E+02	0.00000E+00
373	1.58000E+03	8.00000E+02	0.00000E+00
374	1.58000E+03	9.00000E+02	0.00000E+00
375	1.58000E+03	1.00000E+03	0.00000E+00

376	1.58000E+03	1.10000E+03	0.00000E+00
377	1.58000E+03	1.20000E+03	0.00000E+00
378	1.58000E+03	1.30000E+03	0.00000E+00
379	1.58000E+03	1.40000E+03	0.00000E+00
380	1.58000E+03	1.50000E+03	0.00000E+00
381	1.58000E+03	1.60000E+03	0.00000E+00
382	1.58000E+03	1.70000E+03	0.00000E+00
383	1.58000E+03	1.80000E+03	0.00000E+00
384	1.58000E+03	1.90000E+03	0.00000E+00
385	1.67875E+03	1.00000E+02	0.00000E+00
386	1.67875E+03	2.00000E+02	0.00000E+00
387	1.67875E+03	3.00000E+02	0.00000E+00
388	1.67875E+03	4.00000E+02	0.00000E+00
389	1.67875E+03	5.00000E+02	0.00000E+00
390	1.67875E+03	6.00000E+02	0.00000E+00
391	1.67875E+03	7.00000E+02	0.00000E+00
392	1.67875E+03	8.00000E+02	0.00000E+00
393	1.67875E+03	9.00000E+02	0.00000E+00
394	1.67875E+03	1.00000E+03	0.00000E+00
395	1.67875E+03	1.10000E+03	0.00000E+00
396	1.67875E+03	1.20000E+03	0.00000E+00
397	1.67875E+03	1.30000E+03	0.00000E+00
398	1.67875E+03	1.40000E+03	0.00000E+00
399	1.67875E+03	1.50000E+03	0.00000E+00
400	1.67875E+03	1.60000E+03	0.00000E+00
401	1.67875E+03	1.70000E+03	0.00000E+00
402	1.67875E+03	1.80000E+03	0.00000E+00
403	1.67875E+03	1.90000E+03	0.00000E+00

404	1.77750E+03	1.00000E+02	0.00000E+00
405	1.77750E+03	2.00000E+02	0.00000E+00
406	1.77750E+03	3.00000E+02	0.00000E+00
407	1.77750E+03	4.00000E+02	0.00000E+00
408	1.77750E+03	5.00000E+02	0.00000E+00
409	1.77750E+03	6.00000E+02	0.00000E+00
410	1.77750E+03	7.00000E+02	0.00000E+00
411	1.77750E+03	8.00000E+02	0.00000E+00
412	1.77750E+03	9.00000E+02	0.00000E+00
413	1.77750E+03	1.00000E+03	0.00000E+00
414	1.77750E+03	1.10000E+03	0.00000E+00
415	1.77750E+03	1.20000E+03	0.00000E+00
416	1.77750E+03	1.30000E+03	0.00000E+00
417	1.77750E+03	1.40000E+03	0.00000E+00
418	1.77750E+03	1.50000E+03	0.00000E+00
419	1.77750E+03	1.60000E+03	0.00000E+00
420	1.77750E+03	1.70000E+03	0.00000E+00
421	1.77750E+03	1.80000E+03	0.00000E+00
422	1.77750E+03	1.90000E+03	0.00000E+00
423	1.87625E+03	1.00000E+02	0.00000E+00
424	1.87625E+03	2.00000E+02	0.00000E+00
425	1.87625E+03	3.00000E+02	0.00000E+00
426	1.87625E+03	4.00000E+02	0.00000E+00
427	1.87625E+03	5.00000E+02	0.00000E+00
428	1.87625E+03	6.00000E+02	0.00000E+00
429	1.87625E+03	7.00000E+02	0.00000E+00
430	1.87625E+03	8.00000E+02	0.00000E+00
431	1.87625E+03	9.00000E+02	0.00000E+00

432 1.87625E+03 1.00000E+03 0.00000E+00
433 1.87625E+03 1.10000E+03 0.00000E+00
434 1.87625E+03 1.20000E+03 0.00000E+00
435 1.87625E+03 1.30000E+03 0.00000E+00
436 1.87625E+03 1.40000E+03 0.00000E+00
437 1.87625E+03 1.50000E+03 0.00000E+00
438 1.87625E+03 1.60000E+03 0.00000E+00
439 1.87625E+03 1.70000E+03 0.00000E+00
440 1.87625E+03 1.80000E+03 0.00000E+00
441 1.87625E+03 1.90000E+03 0.00000E+00

'MATERI'

1 NAME ALB

YOUNG 6.40000E+03 6.40000E+03

SHRMOD 8.00000E+02

MCNAME CONCR

MATMDL RH

ASPECT

POISON 2.00000E-01

DENSIT 2.00000E-09

YIELD RANHIL

MUTOL 7.00000E-02

SHEXPM 5.00000E+00

SHEXPN 3.00000E+01

TENSTR 2.80000E-01 2.80000E-01

COMSTR 3.25000E+00 3.25000E+00

GF1 3.70000E-02 1.05000E-01

GC 1.25000E+00 1.50000E+00

TOPEPS 1.20000E-03

2 NAME HOR

MCNAME CONCR

MATMDL TSCR

ASPECT

POISON 2.50000E-01

YOUNG 2.00000E+04

DENSIT 2.50000E-09

TOTCRK FIXED

SHRCRV CONSTA

BETA 1.00000E-01

TENCRV LINEPS

REDCRV NONE

POIRED NONE

TENSTR 2.00000E+00

EPSULT 3.00000E-03

RESTST 2.00000E-01

COMCRV CONSTA

CNFCRV NONE

COMSTR 2.00000E+01

7 NAME REF_BORDE

POISON 3.00000E-01

DENSIT 2.78500E-06

MCNAME REINFO

MATMDL UNIAXI

YOUNG 2.10000E+05

ELAST UNIAXI

EPSSIG -2.00000E-01 -7.65000E+02 -1.90000E-03 -5.00000E+02

0.00000E+00 0.00000E+00 1.90000E-03 5.00000E+02

2.00000E-01 7.65000E+02

ASPECT

'GEOMET'

1 NAME "V40/32.5"

RECTAN 3.25000E+02 4.00000E+02

ZAXIS 0.00000E+00 0.00000E+00 1.00000E+00

2 NAME "Ref_Vertical"

CROSSE 3.79940E+02

3 NAME "Ref_Horizontal"

CROSSE 2.76950E+01

4 NAME MALB

THICK 1.40000E+02

'DATA'

1 NAME "V40/32.5"

'ELEMENTS'

SET MALB

CONNECT

1 Q8MEM 1 2 81 80

2 Q8MEM 80 81 82 79

3 Q8MEM 79 82 83 78

4 Q8MEM 78 83 84 77

5 Q8MEM 77 84 85 76

6 Q8MEM 76 85 86 75

7 Q8MEM 75 86 87 74

8 Q8MEM 74 87 88 73

9 Q8MEM 73 88 89 72

10 Q8MEM 72 89 90 71

11 Q8MEM 71 90 91 70

12 Q8MEM 70 91 92 69
13 Q8MEM 69 92 93 68
14 Q8MEM 68 93 94 67
15 Q8MEM 67 94 95 66
16 Q8MEM 66 95 96 65
17 Q8MEM 65 96 97 64
18 Q8MEM 64 97 98 63
19 Q8MEM 63 98 99 62
20 Q8MEM 62 99 60 61
21 Q8MEM 2 3 100 81
22 Q8MEM 81 100 101 82
23 Q8MEM 82 101 102 83
24 Q8MEM 83 102 103 84
25 Q8MEM 84 103 104 85
26 Q8MEM 85 104 105 86
27 Q8MEM 86 105 106 87
28 Q8MEM 87 106 107 88
29 Q8MEM 88 107 108 89
30 Q8MEM 89 108 109 90
31 Q8MEM 90 109 110 91
32 Q8MEM 91 110 111 92
33 Q8MEM 92 111 112 93
34 Q8MEM 93 112 113 94
35 Q8MEM 94 113 114 95
36 Q8MEM 95 114 115 96
37 Q8MEM 96 115 116 97
38 Q8MEM 97 116 117 98
39 Q8MEM 98 117 118 99

40 Q8MEM 99 118 59 60
41 Q8MEM 3 4 119 100
42 Q8MEM 100 119 120 101
43 Q8MEM 101 120 121 102
44 Q8MEM 102 121 122 103
45 Q8MEM 103 122 123 104
46 Q8MEM 104 123 124 105
47 Q8MEM 105 124 125 106
48 Q8MEM 106 125 126 107
49 Q8MEM 107 126 127 108
50 Q8MEM 108 127 128 109
51 Q8MEM 109 128 129 110
52 Q8MEM 110 129 130 111
53 Q8MEM 111 130 131 112
54 Q8MEM 112 131 132 113
55 Q8MEM 113 132 133 114
56 Q8MEM 114 133 134 115
57 Q8MEM 115 134 135 116
58 Q8MEM 116 135 136 117
59 Q8MEM 117 136 137 118
60 Q8MEM 118 137 58 59
61 Q8MEM 4 5 138 119
62 Q8MEM 119 138 139 120
63 Q8MEM 120 139 140 121
64 Q8MEM 121 140 141 122
65 Q8MEM 122 141 142 123
66 Q8MEM 123 142 143 124
67 Q8MEM 124 143 144 125

68 Q8MEM 125 144 145 126
69 Q8MEM 126 145 146 127
70 Q8MEM 127 146 147 128
71 Q8MEM 128 147 148 129
72 Q8MEM 129 148 149 130
73 Q8MEM 130 149 150 131
74 Q8MEM 131 150 151 132
75 Q8MEM 132 151 152 133
76 Q8MEM 133 152 153 134
77 Q8MEM 134 153 154 135
78 Q8MEM 135 154 155 136
79 Q8MEM 136 155 156 137
80 Q8MEM 137 156 57 58
81 Q8MEM 5 6 157 138
82 Q8MEM 138 157 158 139
83 Q8MEM 139 158 159 140
84 Q8MEM 140 159 160 141
85 Q8MEM 141 160 161 142
86 Q8MEM 142 161 162 143
87 Q8MEM 143 162 163 144
88 Q8MEM 144 163 164 145
89 Q8MEM 145 164 165 146
90 Q8MEM 146 165 166 147
91 Q8MEM 147 166 167 148
92 Q8MEM 148 167 168 149
93 Q8MEM 149 168 169 150
94 Q8MEM 150 169 170 151
95 Q8MEM 151 170 171 152

96 Q8MEM 152 171 172 153
97 Q8MEM 153 172 173 154
98 Q8MEM 154 173 174 155
99 Q8MEM 155 174 175 156
100 Q8MEM 156 175 56 57
101 Q8MEM 6 7 176 157
102 Q8MEM 157 176 177 158
103 Q8MEM 158 177 178 159
104 Q8MEM 159 178 179 160
105 Q8MEM 160 179 180 161
106 Q8MEM 161 180 181 162
107 Q8MEM 162 181 182 163
108 Q8MEM 163 182 183 164
109 Q8MEM 164 183 184 165
110 Q8MEM 165 184 185 166
111 Q8MEM 166 185 186 167
112 Q8MEM 167 186 187 168
113 Q8MEM 168 187 188 169
114 Q8MEM 169 188 189 170
115 Q8MEM 170 189 190 171
116 Q8MEM 171 190 191 172
117 Q8MEM 172 191 192 173
118 Q8MEM 173 192 193 174
119 Q8MEM 174 193 194 175
120 Q8MEM 175 194 55 56
121 Q8MEM 7 8 195 176
122 Q8MEM 176 195 196 177
123 Q8MEM 177 196 197 178

124 Q8MEM 178 197 198 179
125 Q8MEM 179 198 199 180
126 Q8MEM 180 199 200 181
127 Q8MEM 181 200 201 182
128 Q8MEM 182 201 202 183
129 Q8MEM 183 202 203 184
130 Q8MEM 184 203 204 185
131 Q8MEM 185 204 205 186
132 Q8MEM 186 205 206 187
133 Q8MEM 187 206 207 188
134 Q8MEM 188 207 208 189
135 Q8MEM 189 208 209 190
136 Q8MEM 190 209 210 191
137 Q8MEM 191 210 211 192
138 Q8MEM 192 211 212 193
139 Q8MEM 193 212 213 194
140 Q8MEM 194 213 54 55
141 Q8MEM 8 9 214 195
142 Q8MEM 195 214 215 196
143 Q8MEM 196 215 216 197
144 Q8MEM 197 216 217 198
145 Q8MEM 198 217 218 199
146 Q8MEM 199 218 219 200
147 Q8MEM 200 219 220 201
148 Q8MEM 201 220 221 202
149 Q8MEM 202 221 222 203
150 Q8MEM 203 222 223 204
151 Q8MEM 204 223 224 205

152 Q8MEM 205 224 225 206
153 Q8MEM 206 225 226 207
154 Q8MEM 207 226 227 208
155 Q8MEM 208 227 228 209
156 Q8MEM 209 228 229 210
157 Q8MEM 210 229 230 211
158 Q8MEM 211 230 231 212
159 Q8MEM 212 231 232 213
160 Q8MEM 213 232 53 54
161 Q8MEM 9 10 233 214
162 Q8MEM 214 233 234 215
163 Q8MEM 215 234 235 216
164 Q8MEM 216 235 236 217
165 Q8MEM 217 236 237 218
166 Q8MEM 218 237 238 219
167 Q8MEM 219 238 239 220
168 Q8MEM 220 239 240 221
169 Q8MEM 221 240 241 222
170 Q8MEM 222 241 242 223
171 Q8MEM 223 242 243 224
172 Q8MEM 224 243 244 225
173 Q8MEM 225 244 245 226
174 Q8MEM 226 245 246 227
175 Q8MEM 227 246 247 228
176 Q8MEM 228 247 248 229
177 Q8MEM 229 248 249 230
178 Q8MEM 230 249 250 231
179 Q8MEM 231 250 251 232

180 Q8MEM 232 251 52 53
181 Q8MEM 10 11 252 233
182 Q8MEM 233 252 253 234
183 Q8MEM 234 253 254 235
184 Q8MEM 235 254 255 236
185 Q8MEM 236 255 256 237
186 Q8MEM 237 256 257 238
187 Q8MEM 238 257 258 239
188 Q8MEM 239 258 259 240
189 Q8MEM 240 259 260 241
190 Q8MEM 241 260 261 242
191 Q8MEM 242 261 262 243
192 Q8MEM 243 262 263 244
193 Q8MEM 244 263 264 245
194 Q8MEM 245 264 265 246
195 Q8MEM 246 265 266 247
196 Q8MEM 247 266 267 248
197 Q8MEM 248 267 268 249
198 Q8MEM 249 268 269 250
199 Q8MEM 250 269 270 251
200 Q8MEM 251 270 51 52
201 Q8MEM 11 12 271 252
202 Q8MEM 252 271 272 253
203 Q8MEM 253 272 273 254
204 Q8MEM 254 273 274 255
205 Q8MEM 255 274 275 256
206 Q8MEM 256 275 276 257
207 Q8MEM 257 276 277 258

208 Q8MEM 258 277 278 259
209 Q8MEM 259 278 279 260
210 Q8MEM 260 279 280 261
211 Q8MEM 261 280 281 262
212 Q8MEM 262 281 282 263
213 Q8MEM 263 282 283 264
214 Q8MEM 264 283 284 265
215 Q8MEM 265 284 285 266
216 Q8MEM 266 285 286 267
217 Q8MEM 267 286 287 268
218 Q8MEM 268 287 288 269
219 Q8MEM 269 288 289 270
220 Q8MEM 270 289 50 51
221 Q8MEM 12 13 290 271
222 Q8MEM 271 290 291 272
223 Q8MEM 272 291 292 273
224 Q8MEM 273 292 293 274
225 Q8MEM 274 293 294 275
226 Q8MEM 275 294 295 276
227 Q8MEM 276 295 296 277
228 Q8MEM 277 296 297 278
229 Q8MEM 278 297 298 279
230 Q8MEM 279 298 299 280
231 Q8MEM 280 299 300 281
232 Q8MEM 281 300 301 282
233 Q8MEM 282 301 302 283
234 Q8MEM 283 302 303 284
235 Q8MEM 284 303 304 285

236 Q8MEM 285 304 305 286
237 Q8MEM 286 305 306 287
238 Q8MEM 287 306 307 288
239 Q8MEM 288 307 308 289
240 Q8MEM 289 308 49 50
241 Q8MEM 13 14 309 290
242 Q8MEM 290 309 310 291
243 Q8MEM 291 310 311 292
244 Q8MEM 292 311 312 293
245 Q8MEM 293 312 313 294
246 Q8MEM 294 313 314 295
247 Q8MEM 295 314 315 296
248 Q8MEM 296 315 316 297
249 Q8MEM 297 316 317 298
250 Q8MEM 298 317 318 299
251 Q8MEM 299 318 319 300
252 Q8MEM 300 319 320 301
253 Q8MEM 301 320 321 302
254 Q8MEM 302 321 322 303
255 Q8MEM 303 322 323 304
256 Q8MEM 304 323 324 305
257 Q8MEM 305 324 325 306
258 Q8MEM 306 325 326 307
259 Q8MEM 307 326 327 308
260 Q8MEM 308 327 48 49
261 Q8MEM 14 15 328 309
262 Q8MEM 309 328 329 310
263 Q8MEM 310 329 330 311

264 Q8MEM 311 330 331 312
265 Q8MEM 312 331 332 313
266 Q8MEM 313 332 333 314
267 Q8MEM 314 333 334 315
268 Q8MEM 315 334 335 316
269 Q8MEM 316 335 336 317
270 Q8MEM 317 336 337 318
271 Q8MEM 318 337 338 319
272 Q8MEM 319 338 339 320
273 Q8MEM 320 339 340 321
274 Q8MEM 321 340 341 322
275 Q8MEM 322 341 342 323
276 Q8MEM 323 342 343 324
277 Q8MEM 324 343 344 325
278 Q8MEM 325 344 345 326
279 Q8MEM 326 345 346 327
280 Q8MEM 327 346 47 48
281 Q8MEM 15 16 347 328
282 Q8MEM 328 347 348 329
283 Q8MEM 329 348 349 330
284 Q8MEM 330 349 350 331
285 Q8MEM 331 350 351 332
286 Q8MEM 332 351 352 333
287 Q8MEM 333 352 353 334
288 Q8MEM 334 353 354 335
289 Q8MEM 335 354 355 336
290 Q8MEM 336 355 356 337
291 Q8MEM 337 356 357 338

292 Q8MEM 338 357 358 339
293 Q8MEM 339 358 359 340
294 Q8MEM 340 359 360 341
295 Q8MEM 341 360 361 342
296 Q8MEM 342 361 362 343
297 Q8MEM 343 362 363 344
298 Q8MEM 344 363 364 345
299 Q8MEM 345 364 365 346
300 Q8MEM 346 365 46 47
301 Q8MEM 16 17 366 347
302 Q8MEM 347 366 367 348
303 Q8MEM 348 367 368 349
304 Q8MEM 349 368 369 350
305 Q8MEM 350 369 370 351
306 Q8MEM 351 370 371 352
307 Q8MEM 352 371 372 353
308 Q8MEM 353 372 373 354
309 Q8MEM 354 373 374 355
310 Q8MEM 355 374 375 356
311 Q8MEM 356 375 376 357
312 Q8MEM 357 376 377 358
313 Q8MEM 358 377 378 359
314 Q8MEM 359 378 379 360
315 Q8MEM 360 379 380 361
316 Q8MEM 361 380 381 362
317 Q8MEM 362 381 382 363
318 Q8MEM 363 382 383 364
319 Q8MEM 364 383 384 365

320 Q8MEM 365 384 45 46
321 Q8MEM 17 18 385 366
322 Q8MEM 366 385 386 367
323 Q8MEM 367 386 387 368
324 Q8MEM 368 387 388 369
325 Q8MEM 369 388 389 370
326 Q8MEM 370 389 390 371
327 Q8MEM 371 390 391 372
328 Q8MEM 372 391 392 373
329 Q8MEM 373 392 393 374
330 Q8MEM 374 393 394 375
331 Q8MEM 375 394 395 376
332 Q8MEM 376 395 396 377
333 Q8MEM 377 396 397 378
334 Q8MEM 378 397 398 379
335 Q8MEM 379 398 399 380
336 Q8MEM 380 399 400 381
337 Q8MEM 381 400 401 382
338 Q8MEM 382 401 402 383
339 Q8MEM 383 402 403 384
340 Q8MEM 384 403 44 45
341 Q8MEM 18 19 404 385
342 Q8MEM 385 404 405 386
343 Q8MEM 386 405 406 387
344 Q8MEM 387 406 407 388
345 Q8MEM 388 407 408 389
346 Q8MEM 389 408 409 390
347 Q8MEM 390 409 410 391

348 Q8MEM 391 410 411 392
349 Q8MEM 392 411 412 393
350 Q8MEM 393 412 413 394
351 Q8MEM 394 413 414 395
352 Q8MEM 395 414 415 396
353 Q8MEM 396 415 416 397
354 Q8MEM 397 416 417 398
355 Q8MEM 398 417 418 399
356 Q8MEM 399 418 419 400
357 Q8MEM 400 419 420 401
358 Q8MEM 401 420 421 402
359 Q8MEM 402 421 422 403
360 Q8MEM 403 422 43 44
361 Q8MEM 19 20 423 404
362 Q8MEM 404 423 424 405
363 Q8MEM 405 424 425 406
364 Q8MEM 406 425 426 407
365 Q8MEM 407 426 427 408
366 Q8MEM 408 427 428 409
367 Q8MEM 409 428 429 410
368 Q8MEM 410 429 430 411
369 Q8MEM 411 430 431 412
370 Q8MEM 412 431 432 413
371 Q8MEM 413 432 433 414
372 Q8MEM 414 433 434 415
373 Q8MEM 415 434 435 416
374 Q8MEM 416 435 436 417
375 Q8MEM 417 436 437 418

376 Q8MEM 418 437 438 419
377 Q8MEM 419 438 439 420
378 Q8MEM 420 439 440 421
379 Q8MEM 421 440 441 422
380 Q8MEM 422 441 42 43
381 Q8MEM 20 21 22 423
382 Q8MEM 423 22 23 424
383 Q8MEM 424 23 24 425
384 Q8MEM 425 24 25 426
385 Q8MEM 426 25 26 427
386 Q8MEM 427 26 27 428
387 Q8MEM 428 27 28 429
388 Q8MEM 429 28 29 430
389 Q8MEM 430 29 30 431
390 Q8MEM 431 30 31 432
391 Q8MEM 432 31 32 433
392 Q8MEM 433 32 33 434
393 Q8MEM 434 33 34 435
394 Q8MEM 435 34 35 436
395 Q8MEM 436 35 36 437
396 Q8MEM 437 36 37 438
397 Q8MEM 438 37 38 439
398 Q8MEM 439 38 39 440
399 Q8MEM 440 39 40 441
400 Q8MEM 441 40 41 42

MATERIAL 1

GEOMETRY 4

DATA 1

SET VIGA

CONNECT

401 L7BEN 61 60

402 L7BEN 60 59

403 L7BEN 59 58

404 L7BEN 58 57

405 L7BEN 57 56

406 L7BEN 56 55

407 L7BEN 55 54

408 L7BEN 54 53

409 L7BEN 53 52

410 L7BEN 52 51

411 L7BEN 51 50

412 L7BEN 50 49

413 L7BEN 49 48

414 L7BEN 48 47

415 L7BEN 47 46

416 L7BEN 46 45

417 L7BEN 45 44

418 L7BEN 44 43

419 L7BEN 43 42

420 L7BEN 42 41

MATERIAL 2

GEOMETRY 1

DATA 1

SET REFV

CONNECT

421 L2TRU 2 81

422 L2TRU 81 82
423 L2TRU 82 83
424 L2TRU 83 84
425 L2TRU 84 85
426 L2TRU 85 86
427 L2TRU 86 87
428 L2TRU 87 88
429 L2TRU 88 89
430 L2TRU 89 90
431 L2TRU 90 91
432 L2TRU 91 92
433 L2TRU 92 93
434 L2TRU 93 94
435 L2TRU 94 95
436 L2TRU 95 96
437 L2TRU 96 97
438 L2TRU 97 98
439 L2TRU 98 99
440 L2TRU 99 60
441 L2TRU 20 423
442 L2TRU 423 424
443 L2TRU 424 425
444 L2TRU 425 426
445 L2TRU 426 427
446 L2TRU 427 428
447 L2TRU 428 429
448 L2TRU 429 430
449 L2TRU 430 431

450 L2TRU 431 432
451 L2TRU 432 433
452 L2TRU 433 434
453 L2TRU 434 435
454 L2TRU 435 436
455 L2TRU 436 437
456 L2TRU 437 438
457 L2TRU 438 439
458 L2TRU 439 440
459 L2TRU 440 441
460 L2TRU 441 42
MATERIAL 7
GEOMETRY 2
DATA 1
SET REFH
CONNECT
461 L2TRU 77 84
462 L2TRU 84 103
463 L2TRU 103 122
464 L2TRU 122 141
465 L2TRU 141 160
466 L2TRU 160 179
467 L2TRU 179 198
468 L2TRU 198 217
469 L2TRU 217 236
470 L2TRU 236 255
471 L2TRU 255 274
472 L2TRU 274 293

473 L2TRU 293 312
474 L2TRU 312 331
475 L2TRU 331 350
476 L2TRU 350 369
477 L2TRU 369 388
478 L2TRU 388 407
479 L2TRU 407 426
480 L2TRU 426 25
481 L2TRU 69 92
482 L2TRU 92 111
483 L2TRU 111 130
484 L2TRU 130 149
485 L2TRU 149 168
486 L2TRU 168 187
487 L2TRU 187 206
488 L2TRU 206 225
489 L2TRU 225 244
490 L2TRU 244 263
491 L2TRU 263 282
492 L2TRU 282 301
493 L2TRU 301 320
494 L2TRU 320 339
495 L2TRU 339 358
496 L2TRU 358 377
497 L2TRU 377 396
498 L2TRU 396 415
499 L2TRU 415 434
500 L2TRU 434 33

501 L2TRU 65 96
502 L2TRU 96 115
503 L2TRU 115 134
504 L2TRU 134 153
505 L2TRU 153 172
506 L2TRU 172 191
507 L2TRU 191 210
508 L2TRU 210 229
509 L2TRU 229 248
510 L2TRU 248 267
511 L2TRU 267 286
512 L2TRU 286 305
513 L2TRU 305 324
514 L2TRU 324 343
515 L2TRU 343 362
516 L2TRU 362 381
517 L2TRU 381 400
518 L2TRU 400 419
519 L2TRU 419 438
520 L2TRU 438 37
521 L2TRU 73 88
522 L2TRU 88 107
523 L2TRU 107 126
524 L2TRU 126 145
525 L2TRU 145 164
526 L2TRU 164 183
527 L2TRU 183 202
528 L2TRU 202 221

529 L2TRU 221 240
530 L2TRU 240 259
531 L2TRU 259 278
532 L2TRU 278 297
533 L2TRU 297 316
534 L2TRU 316 335
535 L2TRU 335 354
536 L2TRU 354 373
537 L2TRU 373 392
538 L2TRU 392 411
539 L2TRU 411 430
540 L2TRU 430 29

MATERIAL 7

GEOMETRY 3

DATA 1

'LOADS'

CASE 1

NAME PP

WEIGHT

CASE 2

NAME VERT

NODAL

41 FORCE 4 8.09500E+03
42 FORCE 4 8.09500E+03
43 FORCE 4 8.09500E+03
44 FORCE 4 8.09500E+03
45 FORCE 4 8.09500E+03
46 FORCE 4 8.09500E+03

47 FORCE 4 8.09500E+03
48 FORCE 4 8.09500E+03
49 FORCE 4 8.09500E+03
50 FORCE 4 8.09500E+03
51 FORCE 4 8.09500E+03
52 FORCE 4 8.09500E+03
53 FORCE 4 8.09500E+03
54 FORCE 4 8.09500E+03
55 FORCE 4 8.09500E+03
56 FORCE 4 8.09500E+03
57 FORCE 4 8.09500E+03
58 FORCE 4 8.09500E+03
59 FORCE 4 8.09500E+03
60 FORCE 4 8.09500E+03
61 FORCE 4 8.09500E+03

CASE 3

NAME LAT

NODAL

61 FORCE 1 1.00000E+04

'SUPPOR'

NAME BASE

/ 1-21 / TR 1

/ 1-21 / TR 2

/ 1-21 / TR 3

'END'

ANEXO B: Validación de modelo de anisotropía Rankine Hill

Uno de los procesos requeridos es el de la validación del modelo del material, algo que el mismo autor que desarrollo el modelo, en asociación con otros dos autores, llevó a cabo.

Esta validación fue realizada por Lourenço, Rots y Blaauwendraad (1998).

En esta validación se logró realizar comparaciones tanto en lo que corresponde a los parámetros del material como al comportamiento de muros de albañilería, en distintas configuraciones, sometidos a ensayos de muro de corte.

En los ensayos de los parámetros de material se probaron varias direcciones de aplicación de las cargas principales.

Los resultados asociados a la comparación de parámetros de material entregaron los resultados mostrados en la figura que se muestra a continuación. En esta figura se aprecia la correlación existente entre el modelo numérico del material y los resultados experimentales.

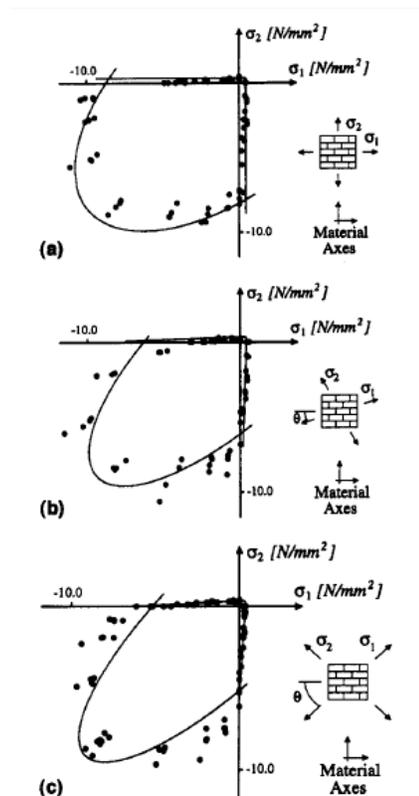


Figura 66: Resultados experimentales y de modelo (Lourenço *et al.*, 2017)

Se tienen 3 ensayos de muros, con sus respectivas modelaciones y análisis computacionales, los que serán descritos a continuación. Todos los ensayos utilizaron muros de idénticas dimensiones, muros a los que se les fueron cambiando las cargas verticales aplicadas. Estos ensayos fueron realizados en ETH Zurich, por Ganz y Thürlimann en 1984 (Lourenço *et al.*, 1998). De acuerdo a los autores de esta validación, estos ensayos están bien valorados para fines de validación de modelos.

El primer ensayo, correspondiente al muro W1, presentó el siguiente comportamiento en el diagrama de carga-deformación:

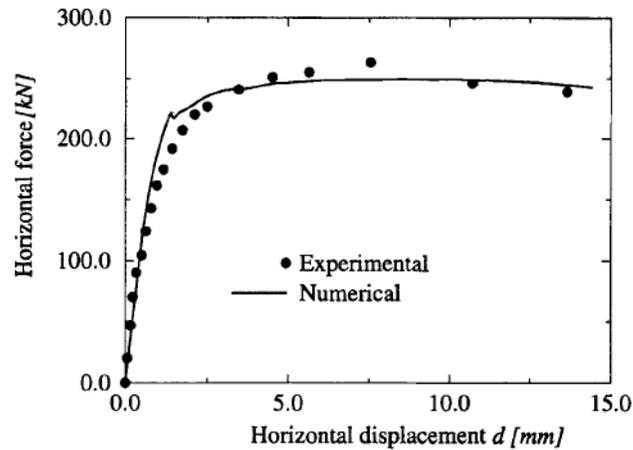


Figura 67: Diagrama de carga-deformación de W1, experimental y numérico (Lourenço *et al.*, 1998).

Adicionalmente se cuenta con el comportamiento del muro en su estado último, y de igual manera se tiene el comportamiento simulado por el modelo numérico. A continuación se entrega el estado último del muro.

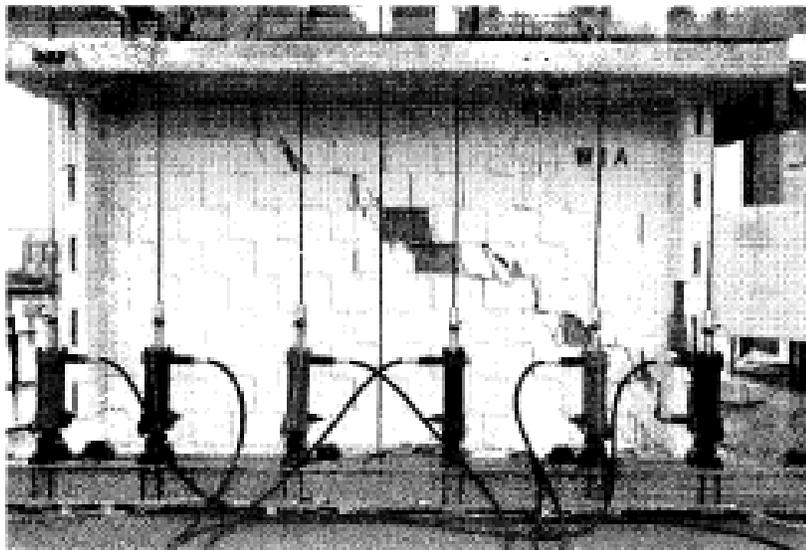


Figura 68: Estado último de muro W1 (Lourenço *et al.*, 1998).

El resultado entregado por la modelación muestra la deformación y la ubicación de las fisuras y grietas del muro W1, siendo obtenido lo siguiente:

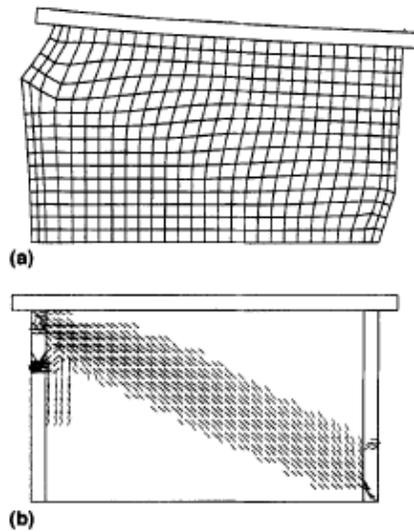


Figura 69: Resultado numérico de muro W1. En (a) se tiene la deformación última, en (b) se tiene la distribución de fisuras y grietas del muro. (Lourenço *et al.*, 1998).

El segundo muro utilizado fue el W2, cuyo diagrama de carga-deformación es el siguiente:

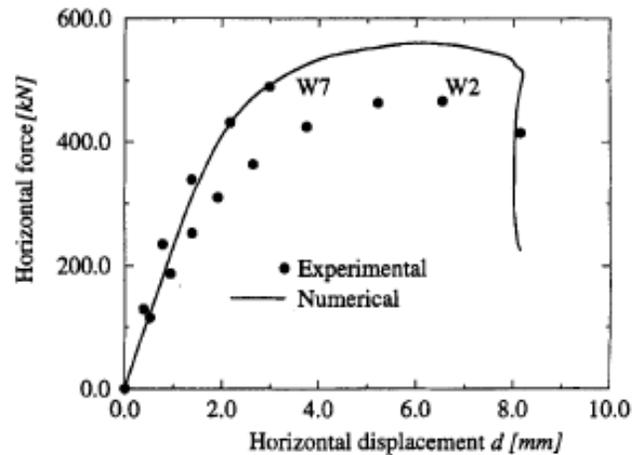


Figura 70: Diagrama de carga-deformación de W2, experimental y numérico (Lourenço *et al.*, 1998).

Se debe notar que se incluye también la curva experimental W7, esto es debido a que problemas en la base, conocidos durante el experimento del muro W2, implicaron que aparecieran fisuras y se disminuyera su resistencia máxima.

Adicionalmente, el estado último experimental es el siguiente:

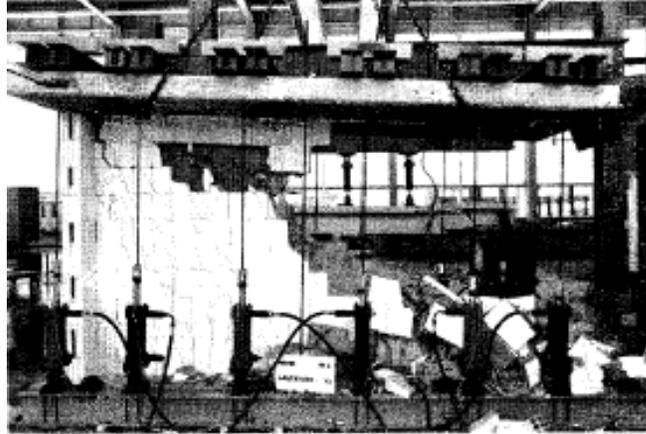


Figura 71: Estado último de muro W2 (Lourenço *et al.*, 1998).

Y al igual que en el caso del muro W1, se tiene la deformación y la fisuración esperada de acuerdo al modelo numérico.

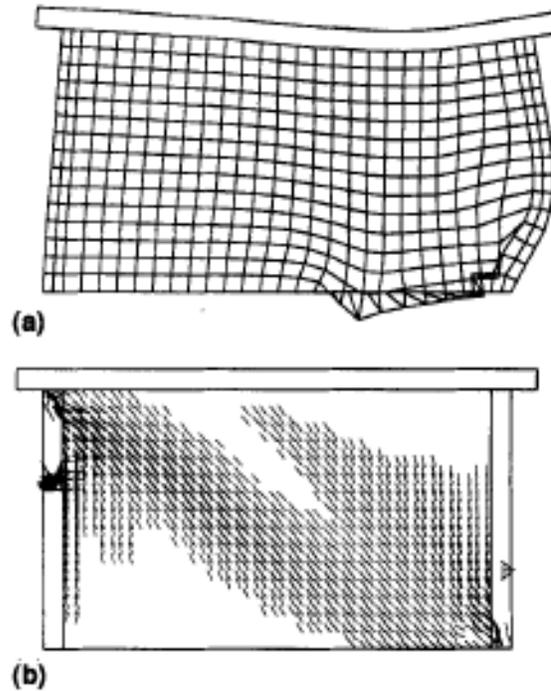


Figura 72: Resultado numérico de muro W2. En (a) se tiene la deformación última, en (b) se tiene la distribución de fisuras y grietas del muro. (Lourenço *et al.*, 1998).

Finalmente, el último muro modelado fue el W4, el diagrama de carga-deformación experimental y numérico es el siguiente:

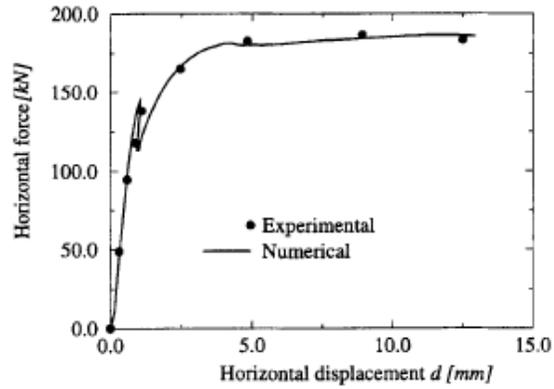


Figura 73: Diagrama de carga-deformación de W4, experimental y numérico (Lourenço *et al.*, 1998).

El estado último experimental obtenido fue el siguiente:

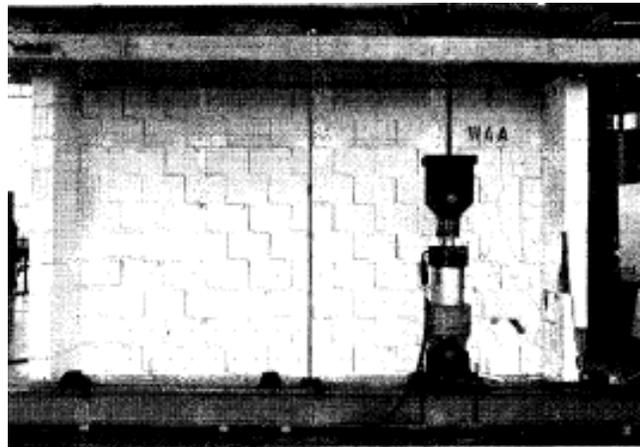


Figura 74: Estado último de muro W4 (Lourenço *et al.*, 1998).

Y los resultados obtenidos en deformación y fisuración utilizando el modelo numérico fueron los siguientes:

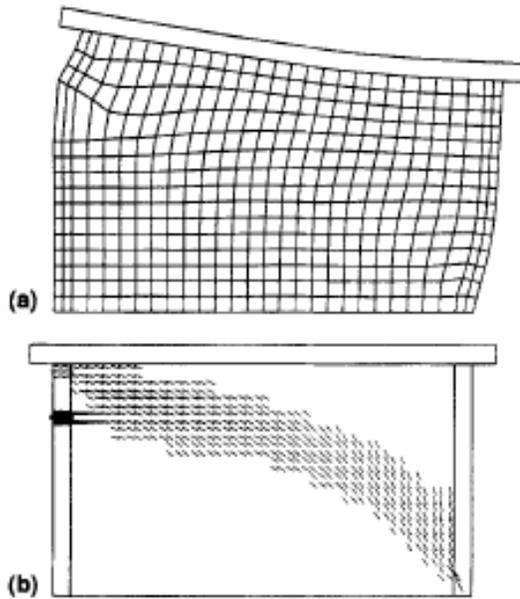


Figura 75: Resultado numérico de muro W4. En (a) se tiene la deformación última, en (b) se tiene la distribución de fisuras y grietas del muro. (Lourenço *et al.*, 1998).

Finalmente, los autores Lourenço, Rots y Blaauwendraad (1998) señalan:

“A comparison between numerical and experimental results is also given. It is shown that the proposed anisotropic model is able to predict effectively the behavior of masonry structures, with both ductile and brittle failure modes, as well as sufficiently accurate collapse load values”.

Lo anterior implica que este modelo es válido para ser utilizado, y que en caso de se tenga un experimento realizado de manera apropiada, puede ser utilizado para determinar, vía ingeniería inversa, los parámetros constitutivos del material.