



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**



## **EVALUACIÓN DEL DESARROLLO DE GRIETAS EN MUROS DE ALBAÑILERÍA ARMADA SOMETIDOS A CARGAS CÍCLICAS**

POR

**Gonzalo Alberto Lema Valenzuela**

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título de Ingeniero Civil

Profesor Guía  
Sebastián Calderón Díaz

Mayo de 2023  
Concepción (Chile)

## RESUMEN

En Chile, el 53% de las estructuras residenciales están construidas en albañilería (albañilería confinada y albañilería armada), siendo empleada generalmente en viviendas (de uno a dos pisos) y en edificios de viviendas sociales (de hasta cuatro pisos). El tipo de albañilería armada utilizada en Chile (y en otros países de Latinoamérica) es la albañilería armada parcialmente rellena con refuerzo horizontal embebido en las juntas. Este tipo de albañilería puede considerarse relativamente poco estudiada, pues la mayoría de los estudios y ensayos respecto a muros de albañilería armada se han enfocado en tipologías de albañilería usuales en Norteamérica (albañilería armada con vigas materializada dentro del muro). Ambas tipologías presentan distintos comportamientos cuando se someten a fuerzas de corte, por lo que se hace necesario profundizar en el entendimiento del comportamiento de muros de albañilería armada que siguen la práctica chilena.

En la presente investigación se busca estudiar el comportamiento de este tipo de muros de albañilería armada, específicamente, en el desarrollo del daño superficialmente visible (agrietamiento) en estos elementos estructurales cuando son sometidos a un ensayo de cargas cíclicas. Para esto, se estudian relaciones entre parámetros de respuesta de un muro (desplazamiento horizontal, carga horizontal aplicada, drift, entre otros) y parámetros de daño superficialmente visibles. Se estudia también la capacidad de recuperación que presentan los muros, la cual se entiende como la capacidad que tiene un muro para volver a su estado inicial y cerrar grietas visibles en ellos. También, se propone en la investigación una relación que, utilizando parámetros de medición de daño superficialmente visible (razón de agrietamiento total presente en el muro en estado descargado), permite estimar el nivel de daño alcanzado de un muro sometido a cargas cíclicas, empleando como variable independiente a la relación de aspecto.

De este estudio se observa que muros con una baja relación de aspecto (altura/alto,  $H/L$ , de 0.55) presentan una mayor cantidad de daño superficialmente visible en todas las etapas del ensayo, respecto a muros con relaciones de aspecto mayores. Se observa que muros con relación de aspecto cuadrada ( $H/L=0.82$ ) presentan la menor cantidad de daño superficialmente visible, respecto a muros con baja y alta relación de aspecto. Se observa que los muros con una mejor capacidad de recuperación son los muros con relación de aspecto cuadrada, seguidos por muros con una alta relación de aspecto. Los muros con una baja relación de aspecto presentan una capacidad de recuperación inferior. Respecto a

la relación propuesta entre relación de aspecto y valores límites del parámetro de daño superficialmente visible, se indica que la estimación de nivel de daño alcanzado por un muro (DS4: Nivel de daño de corte moderado y DS5: Nivel de daño de corte severo) presenta un 79% de precisión, y muestra ser un método conservador pues, en la totalidad de estados de nivel de daño que no logró estimar correctamente, el método otorga un nivel de daño superior al efectivamente alcanzado.

## **ABSTRACT**

In Chile, 53% of the residential structures are built of masonry (confined masonry and reinforced masonry), being typically employed on one to two floors dwellings and in social dwellings structures up to four floors. The type of reinforced masonry generally employed in Chile (and in other countries

of Latin America) is the bed joint reinforced partially grouted reinforced masonry (BJR-PG-RM). This type of masonry can be considered scarcely studied masonry typology since most studies and tests regarding reinforced masonry are focused on masonry typologies commonly used in North America (bond-beam reinforced masonry). Both typologies show different behaviors when subjected to in-plane loads, which generated the need to deepen the understanding of the behavior of Chilean reinforced masonry shear walls (BJR-PG-RM).

In the present research, it is the behavior of BJR-PG-RM shear walls is studied, specifically, the surface visible damage development (cracking) when they are subjected to in-plane cyclic loads. It is intended to link the demand parameters of the wall (horizontal displacement, horizontally applied load, drift, among others) and surface visible damage parameters. The recovery capacity that the studied walls show is also assessed, which is understood as the capacity of a wall to return to its initial state (i.e., when visible cracks close). Besides, the surface visible damage progression is investigated in walls that reach the drift allowed by the Chilean code of seismic design NCh433Of96Mod2009 (maximum amount between mass centers of successive floors of 2‰). It is proposed in this research a relation that allows estimating the damage level reached by a wall subjected to in-plane cyclic loads, employing surface visible damage parameters (total cracking ratio in an unloaded wall). The aspect ratio is the independent variable of this relationship.

From this study, it is observed that walls with a low aspect ratio (height to length,  $H/L$ , of 0.55) show a greater quantity of visible surface damage in all the test stages than higher aspect relations. It is observed that squared walls ( $H/L = 0.82$ ) show the smallest surface visible damage in comparison to squat and slender walls. Additionally, it is also observed that the wall with a better recovery capacity is the squared wall, followed by the slender wall ( $H/L = 1.35$ ). The squat wall ( $H/L = 0.55$ ) was the one that exhibited the shortest recovery capacity. Also, it is observed that if a wall presents any kind of visible surface damage (related to in-plane loads), it has already reached the allowable drift of the Chilean code of seismic design NCh433Of96Mod2009.

Regarding the proposed relation between the aspect relation and the limit values of surface visible damage parameters, it can be indicated that the estimation of the damage level reached by a wall (DS4: Moderate shear damage level and DS5: Sever shear damage level) is associated to a 79% of precision. It is worth mentioning that the proposed relation is conservative because the wrongly estimated damage levels overestimated the actual damage level exhibited by walls.



## ÍNDICE DE CONTENIDOS

|                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....                                                                                                      | 1  |
| 1.1 Motivación .....                                                                                                              | 1  |
| 1.2 Objetivo General .....                                                                                                        | 2  |
| 1.3 Objetivos Específicos .....                                                                                                   | 2  |
| 1.4 Metodología de trabajo.....                                                                                                   | 2  |
| CAPÍTULO 2 ALBAÑILERÍA ARMADA .....                                                                                               | 3  |
| 2.1 Introducción.....                                                                                                             | 3  |
| 2.2 Contexto y desempeño albañilería en Chile .....                                                                               | 4  |
| 2.3 Análisis de carga lateral en muros de corte de albañilería armada .....                                                       | 5  |
| 2.4 Evaluación de daño en muros de albañilería .....                                                                              | 8  |
| 2.5 Conclusiones.....                                                                                                             | 17 |
| CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA.....                                                                                                       | 18 |
| 3.1 Introducción.....                                                                                                             | 18 |
| 3.2 Caracterización y parámetros ensayo de muros BJR-PG-RM sometidos a cargas cíclicas .....                                      | 19 |
| 3.3 Detección y medición de grietas a partir de inspección de imágenes .....                                                      | 22 |
| 3.3.1 Espesor máximo de grieta.....                                                                                               | 25 |
| 3.3.2 Razón de agrietamiento total.....                                                                                           | 27 |
| 3.3.3 Razón de agrietamiento diagonal .....                                                                                       | 28 |
| 3.4 Evaluación, Caracterización y relación de la evolución del desarrollo de grietas con parámetros de respuesta .....            | 32 |
| 3.5 Formulación ecuación para definición de límites de nivel de daño .....                                                        | 35 |
| 3.6 Validación ecuación propuesta para definición de límites de nivel de daño mediante parámetros superficialmente visibles ..... | 37 |
| 3.7 Conclusiones.....                                                                                                             | 38 |
| CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS.....                                                                                             | 39 |
| 4.1 Introducción.....                                                                                                             | 39 |
| 4.2 Evaluación del desarrollo del daño en ensayo de muros BJR-PG-RM sometidos a cargas cíclicas .....                             | 39 |
| 4.2.1 Espesor máximo de grieta.....                                                                                               | 39 |
| 4.2.2 Razón de agrietamiento total.....                                                                                           | 41 |
| 4.2.3 Razón de agrietamiento diagonal .....                                                                                       | 51 |
| 4.3 Definición de nivel de daño mediante parámetros de medición de daño superficialmente visible .....                            | 57 |
| 4.3.1 Formulación para estimación de nivel de daño mediante razón de agrietamiento total ....                                     | 60 |

---

|                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.4 Validación formulación para definición de nivel de daño mediante parámetros de medición de daño superficialmente visible ..... | 61 |
| 4.5 Conclusiones .....                                                                                                             | 64 |
| CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES .....                                                                                                      | 66 |
| CAPÍTULO 6 REFERENCIAS .....                                                                                                       | 68 |
| CAPÍTULO 7 ANEXOS .....                                                                                                            | 69 |
| Anexo 7.1 Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible .....                                                              | 69 |
| Anexo 7.2 Otros resultados relevantes .....                                                                                        | 70 |

**ÍNDICE DE TABLAS**

|                                                                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 3.1 Parámetros de diseño de muros de corte ensayados .....                                                                                                          | 19 |
| Tabla 3.2 Relación píxel/mm para cada ensayo .....                                                                                                                        | 22 |
| Tabla 3.3 Parámetros muro de validación CLBW04 .....                                                                                                                      | 37 |
| Tabla 4.1 Resumen de resultados para razón de agrietamiento total para etapas estudiadas de muros en estado de carga y muros descargados .....                            | 44 |
| Tabla 4.3 Parámetros de respuesta y parámetros de medición de daño superficialmente visible para estados límites de definición de daño en muros estudiados.....           | 57 |
| Tabla 4.4 Parámetros de diseño muro CLBW04 incorporado para validación y muros considerados en estudio (CLBW01, CLBW02 y CLBW03).....                                     | 62 |
| Tabla 4.5 Descripción de daño y parámetros de medición de daño superficialmente visible muro CLBW04 incorporado para validación.....                                      | 62 |
| Tabla 4.6 Nivel de daño real y estimación de nivel de daño mediante parámetros de medición de daño superficialmente visible puntos de validación en todos los muros ..... | 63 |
| Tabla 7.1 Comparación resultados obtenidos mediante Modelo de puntal de compresión diagonal y resultados obtenidos de forma experimental.....                             | 70 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1 Tipología muro BJR-PG-RM (Calderón, 2021) .....                                                                                                                                            | 4  |
| Figura 2.2 Fallas por corte en edificio conjunto Las Dunas, Iquique. (Valdebenito et al., 2015) .....                                                                                                 | 5  |
| Figura 2.3 Modo de falla por fuerzas de corte con agrietamiento diagonal en muros de albañilería armada (Voon & Ingham, 2007) .....                                                                   | 7  |
| Figura 2.4 Modelo de puntal de compresión diagonal y entramado de acero (Dillon, 2015) .....                                                                                                          | 8  |
| Figura 2.5 Daño superficialmente visible representativo de daño moderado (DS4) y daño severo (DS5) en muro de albañilería armada de unidades de hormigón (Ramirez, 2021) .....                        | 10 |
| Figura 2.6 Representación daño severo (DS5) muro BJR-PG-RM con cuantía de refuerzo horizontal $\rho_h = 0.08\%$ .....                                                                                 | 11 |
| Figura 2.7 Comparación comportamiento histerético muros de albañilería armada (unidades de arcilla) con alta y baja cuantía de refuerzo horizontal (Sandoval et al., 2018).....                       | 12 |
| Figura 2.8 Formas de propagación de grietas en muros de albañilería armada BJR-PG-RM .....                                                                                                            | 13 |
| Figura 2.9 Curva de fragilidad basada en NDS para muros BJR-PG-RM con unidades de arcilla (Calderón et al., 2022) .....                                                                               | 16 |
| Figura 2.10 Curva de fragilidad basada en SDR para muros BJR-PG-RM con unidades de arcilla (Calderón et al., 2022) .....                                                                              | 16 |
| Figura 3.1 Diagrama de flujo metodología .....                                                                                                                                                        | 19 |
| Figura 3.2 Parámetros de diseño de muros de corte ensayados .....                                                                                                                                     | 21 |
| Figura 3.3 Disposición sensores desplazamiento horizontal .....                                                                                                                                       | 21 |
| Figura 3.4 Proceso de extracción mapa de agrietamiento .....                                                                                                                                          | 24 |
| Figura 3.5 Mapa de agrietamiento con enumeración .....                                                                                                                                                | 25 |
| Figura 3.6 Representación cálculo espesor máximo de grieta.....                                                                                                                                       | 26 |
| Figura 3.7 Área agrietada para un cuerpo de grieta .....                                                                                                                                              | 27 |
| Figura 3.8 Mapa áreas agrietadas .....                                                                                                                                                                | 28 |
| Figura 3.9 Parámetro de medición de daño superficialmente visible: Razón de agrietamiento total                                                                                                       | 28 |
| Figura 3.10 Esquema de puntal de compresión diagonal propuesto .....                                                                                                                                  | 29 |
| Figura 3.11 Ilustración parámetro razón de agrietamiento diagonal.....                                                                                                                                | 30 |
| Figura 3.12 Área agrietada interna para un cuerpo de grieta (píxeles rojos).....                                                                                                                      | 31 |
| Figura 3.13 Curva histerética muro tipo BJR-PG-RM con definición de niveles de daño .....                                                                                                             | 36 |
| Figura 4.1 Espesor máximo de grieta en distintas etapas de aplicación de carga horizontal para (a) Muro CLBW01, (b) Muro CLBW02 y (c) Muro CLBW03. ....                                               | 40 |
| Figura 4.2 Espesor máximo de grieta en distintas etapas de aplicación de carga horizontal según relación de aspecto .....                                                                             | 41 |
| Figura 4.3 Primera aparición de daño para muros estudiados .....                                                                                                                                      | 42 |
| Figura 4.4 Razón de agrietamiento total en estado descargado v/s relación de aspecto en distintas etapas de aplicación de carga horizontal .....                                                      | 42 |
| Figura 4.5 Razón de agrietamiento total en estado descargado y en estado de cargado respecto a razón de carga horizontal máxima aplicada para (a) Muro CLBW01, (b) Muro CLBW02 y (c) Muro CLBW03..... | 45 |

|                                                                                                                                                                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4.6 Razón de agrietamiento total en estado descargado y en estado cargado respecto al Drift y al Drift normalizado para (a) y (b) Muro CLBW01, (c) y (d) Muro CLBW02 y (e) y (f) Muro CLBW03 respectivamente. ....                        | 47 |
| Figura 4.7 Comparación razón de agrietamiento total en estado descargado para muros CLBW01, CLBW02 y CLBW03 respecto a la razón de carga horizontal máxima aplicada.....                                                                         | 49 |
| Figura 4.8 Comparación razón de agrietamiento total en estado descargado muros CLBW01, CLBW02 y CLBW03 respecto al drift presentado .....                                                                                                        | 49 |
| Figura 4.9 Capacidad de recuperación muros estudiados respecto a: (a) razón de carga horizontal máxima aplicada y (b) drift normalizado 100% RMc .....                                                                                           | 50 |
| Figura 4.10 Proporción de área agrietada presente en área de puntal de compresión diagonal respecto a relación de aspecto para muros que ya alcanzaron el 100% de su resistencia máxima en dirección de carga.....                               | 52 |
| Figura 4.11 Razón de agrietamiento diagonal en estado descargado v/s relación de aspecto para distintas etapas de avance de aplicación de carga horizontal .....                                                                                 | 52 |
| Figura 4.12 Razón de agrietamiento diagonal (DCR) v/s razón de carga horizontal máxima aplicada para (a) Muro CLBW01, (b) Muro CLBW02, (c) Muro CLBW03 y (d) comparación de muros sometidos a estudio.....                                       | 54 |
| Figura 4.13 Área agrietada interna respecto a razón de carga horizontal máxima aplicada para (a) Muro CLBW01, (b) Muro CLBW02, (c) Muro CLBW03, y respecto a drift de entrepiso para para (d) Muro CLBW01, (e) Muro CLBW02, (f) Muro CLBW03..... | 56 |
| Figura 4.14 Comparación muros estudiados para (a) Área agrietada interna respecto a razón de carga horizontal máxima aplicada y (b) Área agrietada interna respecto a drift de entrepiso. ....                                                   | 56 |
| Figura 4.15 Curva histerética muro CLBW01 con caracterización de estados de daño .....                                                                                                                                                           | 58 |
| Figura 4.16 Curva histerética muro CLBW02 con caracterización de estados de daño .....                                                                                                                                                           | 59 |
| Figura 4.17 Curva histerética muro CLBW03 con caracterización de estados de daño .....                                                                                                                                                           | 59 |
| Figura 4.18 Relación propuesta para estimación de nivel de daño mediante razón de agrietamiento total en estado descargado (TCRu) .....                                                                                                          | 61 |
| Figura 4.19 Validación estimación de nivel de daño mediante parámetro de razón de agrietamiento total en estado descargado (TCRu) para todos los puntos.....                                                                                     | 64 |
| Figura 7.1 Mapas de agrietamiento de referencia para muro CLBW01 en (a) primera aparición de daño, (b) 98% de razón de carga horizontal máxima aplicada y (c) 100% de razón de carga horizontal máxima aplicada.....                             | 71 |
| Figura 7.2 Mapas de agrietamiento de referencia para muro CLBW02 en (a) primera aparición de daño, (b) 98% de razón de carga horizontal máxima aplicada y (c) 100% de razón de carga horizontal máxima aplicada.....                             | 74 |
| Figura 7.3 Mapas de agrietamiento de referencia para muro CLBW03 en (a) primera aparición de daño, (b) 96% de razón de carga horizontal máxima aplicada y (c) 100% de razón de carga horizontal máxima aplicada.....                             | 75 |
| Figura 7.4 Razón de agrietamiento diagonal en estado descargado (DCRu) v/s drift observado para (a) Muro CLBW01, (b) Muro CLBW02, (c) Muro CLBW03 y (d) comparación de muros sometidos a estudio.....                                            | 78 |

**GLOSARIO**

|                                   |                                                                                                                                                                                                |
|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Muro BJR-PG-RM</i>             | : Muro de albañilería armada parcialmente rellena con refuerzo horizontal embebido en las juntas (por sus siglas en inglés: BJR-PG-RM <i>bed joint reinforced partially grouted masonry</i> ). |
| <i>DS4</i>                        | : Nivel de daño moderado de corte.                                                                                                                                                             |
| <i>DS5</i>                        | : Nivel de daño severo de corte.                                                                                                                                                               |
| <i>RMc</i>                        | : Razón de resistencia máxima                                                                                                                                                                  |
| $V_n$                             | : Resistencia máxima de corte de diseño (kN).                                                                                                                                                  |
| $\rho_{h\ min}$                   | : Cuantía de refuerzo horizontal (%)                                                                                                                                                           |
| $\rho_{h\ min}$                   | : Cuantía de refuerzo horizontal mínima NCh1928Of.1993Mod2009 (%)                                                                                                                              |
| <i>TCRu</i>                       | : Razón de agrietamiento total en estado descargado.                                                                                                                                           |
| <i>TCRl</i>                       | : Razón de agrietamiento total en estado cargado.                                                                                                                                              |
| <i>DCRu</i>                       | : Razón de agrietamiento diagonal en estado descargado.                                                                                                                                        |
| <i>DCRl</i>                       | : Razón de agrietamiento diagonal en estado cargado.                                                                                                                                           |
| $\Delta_{NCh443}$                 | : Drift de entrepiso del 2% en el centro de masa, según definición de Art. 5.9.2 NCh433.Of96Mod2009 (INN 2009).                                                                                |
| <i>Drift 100% RMc</i>             | : Drift observado al alcanzar el 100% de razón de carga horizontal máxima aplicada en dirección de carga positiva.                                                                             |
| <i>Drift normalizado 100% RMc</i> | : Drift normalizado respecto al drift observado al alcanzar el 100% de razón de carga horizontal máxima aplicada en dirección de carga positiva.                                               |

## CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

### 1.1 Motivación

En Chile, el 53% de las estructuras residenciales están construidas en albañilería (albañilería confinada y albañilería armada) (Hube et al., 2017), material empleado generalmente en viviendas de 1 a 2 pisos y edificios de viviendas sociales de hasta 4 pisos. El tipo de albañilería armada utilizada en Chile (y en otros países de Latinoamérica) es la albañilería armada parcialmente rellena con refuerzo horizontal embebido en las juntas (por sus siglas en inglés: BJR-PG-RM *bed joint reinforced partially grouted masonry*). Este tipo de albañilería puede considerarse relativamente poco estudiada, pues la mayoría de los estudios y ensayos respecto a muros de albañilería armada se han enfocado en albañilería armada con vigas materializadas dentro del compuesto, y denominadas bond-beams (BBR -RM por sus siglas en inglés *Bond-Beam Reinforced-Reinforced Masonry*), la que se utiliza completa o parcialmente rellena. Ambas tipologías mencionadas presentan un comportamiento distinto dentro del plano (por ejemplo, cuando se someten a cargas cíclicas de corte). Por lo anterior, es necesario enfocarse a la práctica chilena y, ante esta necesidad, se busca profundizar el entendimiento del comportamiento de muros de BJR-PG-RM.

Parte importante en el estudio del comportamiento de muros BJR-PG-RM es la evaluación del desarrollo de grietas generadas en estos muros cuando son sometidos a cargas cíclicas, debido a que podría existir un vínculo entre la caracterización de estas grietas con el estado de daño presente en estos muros. Este análisis de daño superficialmente visible (agrietamiento) no ha sido abarcado en profundidad en la literatura y se presenta como una potencial línea de investigación.

Se presenta en esta línea de investigación una oportunidad para profundizar en el entendimiento de esta tipología de muros y en el desempeño sísmico de estructuras basadas en esta tipología ante sismos de moderada y severa intensidad en el país. Al analizar estructuras basadas en esta tipología de muros, como, por ejemplo, el complejo de edificios “Villa Cordillera” en la ciudad de Rancagua, el cual luego del terremoto de Maule de 2010 ( $M_w=8.8$ ) presentó daños severos en más de 100 edificios (declarados inhabitables y con orden de demolición), es que se observa que es posible mejorar el desempeño sísmico en estas estructuras ante sismos de moderada y severa intensidad en el país.

## 1.2 Objetivo General

El objetivo general de esta memoria de título corresponde a:

“Evaluar la relación existente entre parámetros de daño superficialmente observables en muros de albañilería armada sometidos a cargas cíclicas con el estado de daño máximo alcanzado.”

## 1.3 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos de esta memoria son:

- i. Evaluar del desarrollo de grietas y evolución del daño en muros de albañilería armada sometidos a cargas cíclicas mediante criterios de daño superficialmente visible
- ii. Correlacionar nivel de daño superficialmente visible con historial de esfuerzos y parámetros de respuesta de un muro de albañilería armada.
- iii. Formular relación(es) para estimar el nivel de daño alcanzado mediante parámetros de daño superficialmente observables en muros de albañilería armada.
- iv. Validación de formulación propuesta en caso práctico

## 1.4 Metodología de trabajo

La metodología de trabajo consideró cuatro etapas: La primera etapa consta de una revisión del estado del arte en cuanto a comportamiento de muros de albañilería armada ante cargas cíclicas y evaluación del daño generado por este tipo de cargas. Luego, en la segunda etapa, se evalúa del desarrollo de grietas en muros BJR-PG-RM sometidos a cargas cíclicas. Luego como tercera etapa se evalúa y se correlaciona este desarrollo de grietas con parámetros de respuesta del muro y con niveles de daño definidos en el estado del arte, para acercar conceptos de desempeño sísmico. Como cuarta etapa se propone una relación para estimar el nivel de daño mediante parámetros de daño superficialmente visibles.

## CAPÍTULO 2 ALBAÑILERÍA ARMADA

### 2.1 Introducción

La albañilería es un material compuesto por unidades de albañilería (e.g., ladrillo de arcilla, bloques de concreto) unidas por mortero, y que puede incluir tanto refuerzo de acero vertical como refuerzo de acero horizontal entre hiladas sucesivas de unidades. Cuando un muro contiene todos los elementos recién mencionados, se considera un muro de albañilería armada parcialmente rellena con refuerzo horizontal embebido en las juntas (BJR-PG-RM, por sus siglas en inglés *Bed-Joint-Reinforcement Partially Grouted Reinforced Masonry*).

Actualmente, este tipo de material se utiliza principalmente en muros de corte, los cuales tienen la función de resistir las solicitaciones producidas por fuerzas horizontales, como podrían ser las aceleraciones provocadas por un evento sísmico. Por lo tanto, en países sujetos a una frecuente actividad sísmica es que se recurre a estos muros de corte como elementos estructurales sismorresistentes.

Dada la baja altura (y relación de aspecto) de los muros de albañilería armada empleados en Chile, el diseño de muros de corte es controlado principalmente por fuerzas en el mismo plano (fuerzas de corte), inducidas por eventos sísmicos. Dada la sismicidad local se remarca la importancia de comprender el comportamiento de este tipo de elementos estructurales ante solicitaciones laterales dentro del plano.

En el presente capítulo se realiza una revisión de antecedentes referidos al contexto e importancia de la albañilería, el comportamiento de muros de albañilería ante fuerzas cíclicas de corte y una revisión de ensayos realizados que permiten mejorar la comprensión de este tipo de elemento estructural.

## 2.2 Contexto y desempeño albañilería en Chile

Este tipo de material compuesto empleado en muros de corte es el más utilizado en la construcción de viviendas en Chile de acuerdo con datos del censo de 2012 analizados en 2016 (Hube, 2017). En específico, 53% de las estructuras de viviendas están materializadas en albañilería, siendo un porcentaje importante de ellas estructuras de viviendas sociales. Mayormente, este tipo de construcciones corresponde a viviendas de uno y dos pisos y estructuras habitacionales sociales de hasta cuatro pisos, con estructuración basadas en muros de BJR-PG-RM. Usualmente en el país, este tipo de elementos se construyen con unidades de arcilla cocida multi-perforada o bloques huecos de concreto de acuerdo con su disponibilidad en el lugar de construcción. Además, se usan barras de acero de refuerzo vertical colocadas en los huecos verticales más grandes, las que son embebidas en hormigón de relleno (o *grout*, del inglés), y refuerzo horizontal de elementos prefabricados de acero tipo escalerilla. Cabe destacar que mayormente se rellenan con hormigón de relleno sólo los huecos que presentan refuerzo vertical, lo que se denomina relleno parcial, tal como se muestra en la Figura 2.1

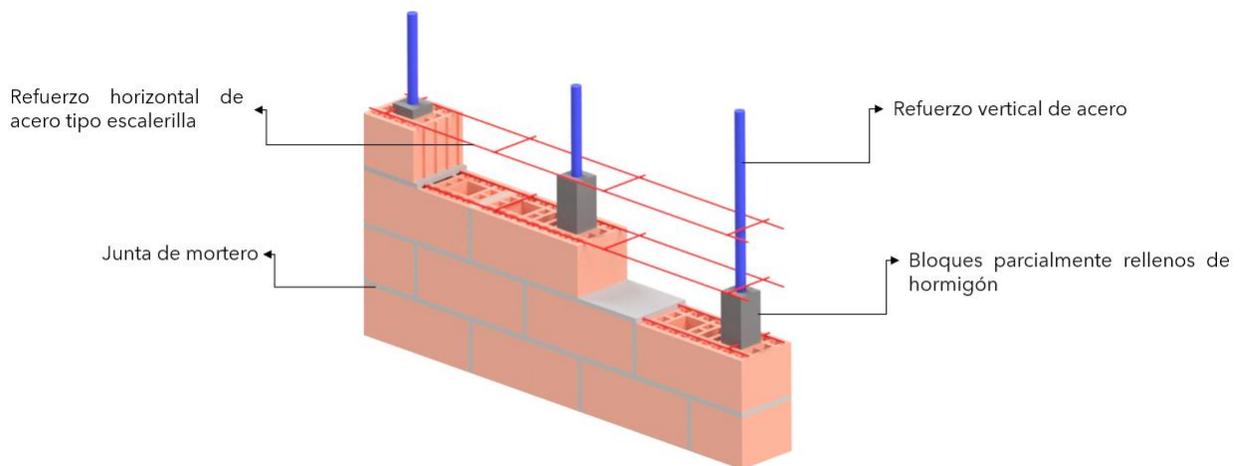


Figura 2.1 Tipología muro BJR-PG-RM (Calderón, 2021)

Este tipo de configuración se observa usualmente en Chile y Latinoamérica. Pese a que existe información, estudios y ensayos respecto a su comportamiento, todavía existe espacio para una profundización del conocimiento sobre su comportamiento. En particular, es de interés estudiar la relación entre el nivel de daño superficialmente observable con el nivel de daño alcanzado en un muro, conociendo así el historial de esfuerzos de un muro de albañilería armada sometido a cargas cíclicas.

Abordar estas temáticas es importante, sobre todo en la realidad chilena en la cual se tiene que los elementos están regularmente sometidos a eventos sísmicos (i.e., cargas cíclicas). De hecho, gran parte de los ensayos y estudios sobre este tipo de albañilería se han realizado en Chile, motivados por la evidencia de su susceptibilidad a daños moderados y severos ante fuertes eventos sísmico. Un ejemplo de ello es lo expuesto por Núñez (2010), en donde se estudiaron los daños en los edificios de albañilería de Villa Cordillera, Comuna de Rancagua, para el terremoto de Maule del 27 de febrero de 2010 (magnitud  $M_w=8.8$ ). En dicho estudio, se encontraron daños severos en 103 de los 110 edificios estudiados. Esto se repite al revisar el trabajo de Valdebenito et al. (2015), en donde se analizan los daños provocados en edificios de albañilería dos a cinco pisos, por el terremoto de Iquique del 1 de abril de 2014 (magnitud  $M_w=8.2$ ), en donde se encontraron niveles de daño moderados a severos en cuatro de los ocho edificios estudiados, correspondiéndose a daños asociados a fallas por corte, los cuales se pueden apreciar en la Figura 2.2



(a)



(b)

Figura 2.2 Fallas por corte en edificio conjunto Las Dunas, Iquique. (Valdebenito et al., 2015)

### 2.3 Análisis de carga lateral en muros de corte de albañilería armada

Los análisis de cargas laterales en muros tienen el objetivo de representar el comportamiento de un elemento cuando es sometido a cargas laterales en su plano, como es un caso de importancia en Chile debido a su alta actividad sísmica. En el caso de las estructuraciones típicas chilenas basadas en muros de corte, se tiene que estos elementos estructurales son los encargados de transmitir las cargas sísmicas

entre los diafragmas de cada piso, y eventualmente a las fundaciones. Entonces, es de interés conocer cómo se comportan estos muros y como los parámetros de diseño (y condiciones de borde) de sus elementos constitutivos influyen en la resistencia que presentan cuando son sometidos a cargas sísmicas. Estos parámetros de diseño y condiciones de borde de sus elementos constitutivos consisten principalmente en la relación de aspecto, la carga axial, el refuerzo horizontal y el refuerzo vertical.

La presencia de una mayor carga axial genera una mayor resistencia friccional a lo largo de las grietas que se producen por corte, favoreciendo el incremento de disipación de energía y origina un aumento en la resistencia al corte (Matsumura, 1988). También se ha encontrado que a medida que aumenta el refuerzo vertical de acero el muro desarrolla un mayor número de grietas de menor ancho, no concentrando el daño en una zona y mejorando el comportamiento ante esfuerzos de corte (Tomazevic, 1999). Así mismo, el parámetro de cuantía de acero horizontal influye en la resistencia ante esfuerzos de corte, reduciendo la degradación de rigidez y mejora la integridad estructural de los muros (Matsumura, 1988). En el caso de la relación de aspecto se presenta también un aumento en la resistencia al corte a medida que la relación de aspecto disminuye.

El modo de falla que domina en esta tipología de muros se caracteriza por una falla frágil de agrietamiento diagonal debido a fuerzas de corte, tal como se puede observar en la Figura 2.3. Este modo de falla se caracteriza por una limitada capacidad de disipación de energía, rápida degradación de rigidez y rápido deterioro de resistencia después de alcanzada su capacidad máxima lateral (Ramirez, 2021), debido a su tipo de falla frágil, caracterizada por alcanzar un nivel de daño severo, con desprendimiento de recubrimiento, aplastamiento de unidades, rotura de armadura horizontal, deslizamiento de unidades y fracturas.

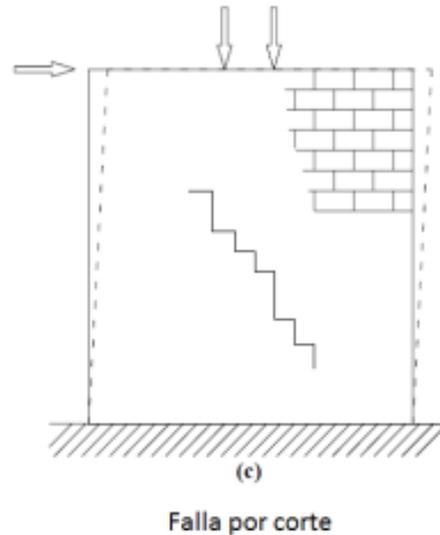
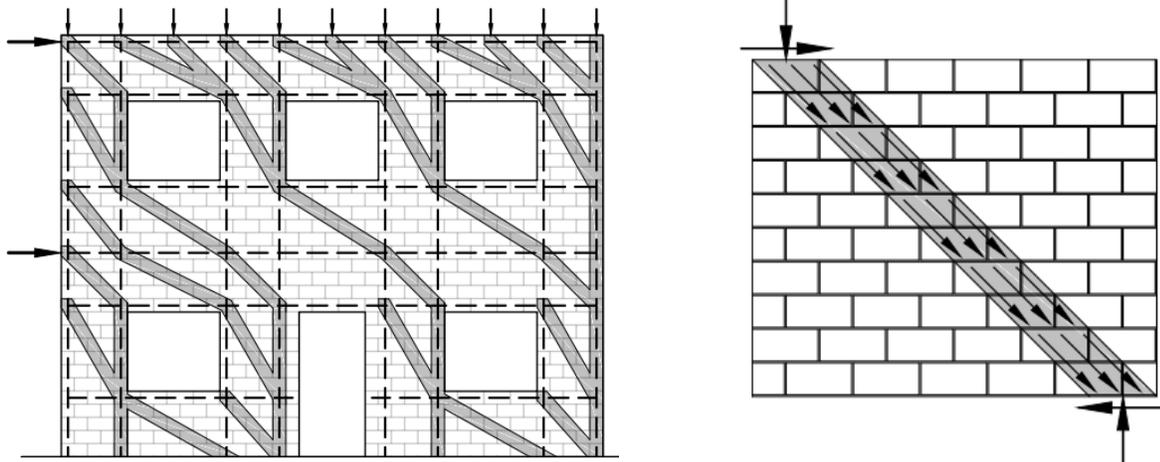


Figura 2.3 Modo de falla por fuerzas de corte con agrietamiento diagonal en muros de albañilería armada (Voon & Ingham, 2007)

Para analizar cómo se distribuyen las fuerzas de corte a las que son sometidos los muros de corte de albañilería armada se han simplificado modelos que representen el comportamiento de resistencia lateral de estos. El modelo de puntal de compresión diagonal es un modelo que simplifica el sistema resistente lateral de un muro de corte de albañilería armada a un reticulado. La albañilería que conforma los muros se reduce a elementos diagonales equivalentes, que trabajan a compresión, y a entramados de acero que nacen y llegan a estos elementos diagonales equivalentes para transmitir las tensiones de tracción. En la Figura 2.4 (a) se observa el modelo de puntal de compresión diagonal (Dillon, 2015) para estructuras de albañilería armada (los puntales de compresión diagonales se representan mediante elementos sombreados, y el entramado de acero se representa mediante líneas punteadas). En la Figura 2.4 (b) se presenta la distribución de la fuerza de compresión en la sección transversal del muro a través del modelo simplificado de puntal de compresión prismático (Dillon, 2015).



(a) Modelo puntal de compresión diagonal estructura de albañilería armada

(b) Modelo puntal de compresión diagonal en muro de corte de albañilería armada

Figura 2.4 Modelo de puntal de compresión diagonal y entramado de acero (Dillon, 2015)

Se observa en el estudio de (Dillon, 2015) en donde se analizaron los resultados obtenidos para 37 muros de albañilería armada de la literatura, que la estimación de resistencia última de muros de corte de albañilería armada mediante el modelo de puntal de compresión diagonal muestra un 83% de exactitud (Se pueden consultar estos resultados en la Tabla 7.1 de anexos).

Se observa de esta revisión del estado del arte, que podría existir una correlación entre la formación de daño superficialmente visible y el área superficial de un puntal de compresión diagonal prismático.

## 2.4 Evaluación de daño en muros de albañilería

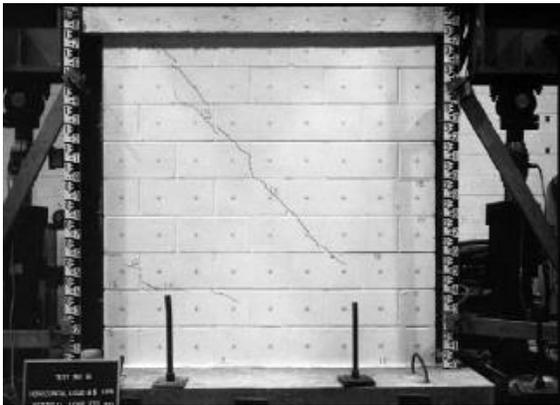
En la literatura, se han estudiado funciones de caracterización de la fragilidad basadas en datos experimentales para evaluar el daño en muros de corte BJR-PG-RM sujetos a cargas sísmicas en el plano. Estas curvas tienen el objetivo de representar la respuesta de estructuras, cuantificada mediante parámetros de demanda de ingeniería (EDPs, del inglés Engineering Demand Parameters), y que estiman la probabilidad de alcanzar diferentes niveles de daño en elementos estructurales (no

estructurales también). En estos estudios de funciones de fragilidad (Murcia-Delso & Shing, 2012), se consideran dos niveles de daño que describen el daño por fuerzas de corte: el nivel de daño moderado de corte diagonal (DS4) y el nivel de daño severo de corte diagonal (DS5). Se utilizan como parámetros de demanda de ingeniería el drift (desplazamiento entre dos pisos consecutivos, respecto a la altura entre pisos) y a la demanda normalizada de corte (demanda de corte respecto a la estimación de resistencia máxima calculada). El comportamiento ante fuerzas de corte de muros de albañilería armada es un comportamiento más bien frágil (sobre todo en muros con baja relación de aspecto o bajas cuantías de refuerzo horizontal), y la primera aparición de grietas diagonales de corte importantes pueden ser consideradas como indicador de daño moderado, en donde el muro no podrá tomar mucha más carga o deformación antes de presentar un decaimiento en la carga resistida. El nivel de daño severo comienza cuando el muro alcanza su resistencia límite de corte, presentando desde ese punto un decaimiento en su resistencia (Murcia-Delso & Shing, 2012). Superficialmente, un muro de albañilería armada en nivel de daño severo presenta grietas diagonales anchas (considerable cantidad de grietas de corte en dirección de carga positiva y dirección de carga negativa) y aplastamiento o separación en los pies de muro. Se puede observar el daño representativo para nivel de daño moderado y nivel de daño severo en la Figura 2.5 (a) y (b) respectivamente.

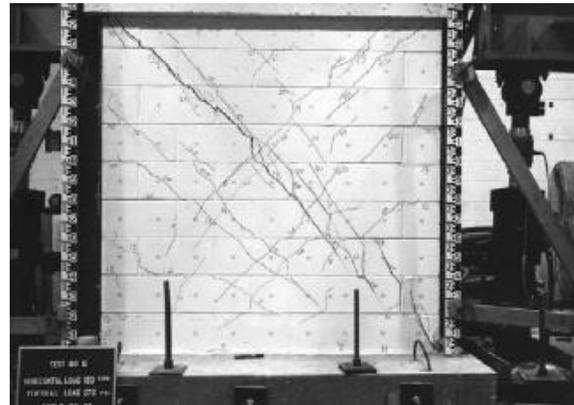
Cabe recalcar que estos criterios de clasificación de nivel de daño están basados en el esfuerzo y costos de reparación y reconstrucción, ya que muros que presenten un nivel de daño moderado (DS4) pueden ser reparados mediante métodos tales como inyecciones epóxicas, inyecciones de mortero, reemplazo de unidades de albañilería, entre otras. Sin embargo, en muros que presenten un nivel de daño severo (DS5) la reparación o reemplazo parcial del muro puede no ser la decisión más eficiente económicamente, y en general es necesario un reemplazo del elemento estructural completo.

También es de interés notar que algunos de los muros analizados en este ensayo no poseen refuerzo horizontal, ocurriendo una notoria primera aparición de una primera grieta diagonal que se expande en espesor. Este comportamiento se observa en la Figura 2.5, en donde se observa en un muro con bajo refuerzo horizontal ( $\rho_h = 0.0026$ ) en nivel de daño moderado (DS4) la aparición de una grieta principal, que aumenta su espesor hasta llegar al decaimiento de la resistencia en el nivel de daño severo (DS5). Notar que este comportamiento también se ve influenciado debido a que las unidades de albañilería de este muro son de hormigón, y no de arcilla, lo que en general muestra un comportamiento más rígido y frágil. Sin embargo, el comportamiento en albañilería de unidades de

ladrillo cerámico también presenta esta tendencia, tal como se analizará más adelante en este mismo capítulo.



(a) Daño moderado (DS4)



(b) Daño severo (DS5)

Figura 2.5 Daño superficialmente visible representativo de daño moderado (DS4) y daño severo (DS5) en muro de albañilería armada de unidades de hormigón (Ramirez, 2021)

Este comportamiento, en donde una grieta aumenta de espesor considerablemente, se trata de evitar al emplear cuantías más altas de refuerzo horizontal pues, al existir una discontinuidad en el muro de albañilería (grieta) se activa el refuerzo horizontal y se comienza a transmitir el esfuerzo de corte, no dejando que esta grieta que se empieza a formar siga prolongándose hasta llevar a la falla al muro. De esta forma, se busca que las grietas se distribuyan de forma relativamente uniforme en la superficie del muro. Se presenta en la Figura 2.6, una representación de nivel de daño severo en un muro de albañilería armada (de ladrillo cerámico) con una alta cuantía de acero ( $\rho_h = 0.08\%$ ), superior a la mínima propuesta en el Art. 6.4.3.1 NCh1928Of.1993Mod2009 ( $\rho_{h\ min} = 0.06\%$ ), en donde se observa que las grietas se distribuyen de forma relativamente uniforme en la superficie del muro.

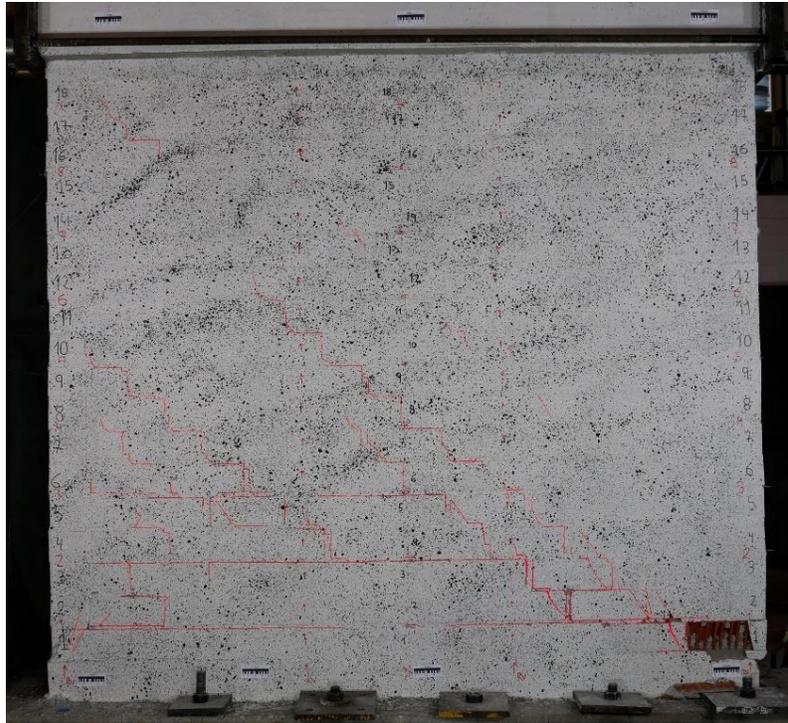


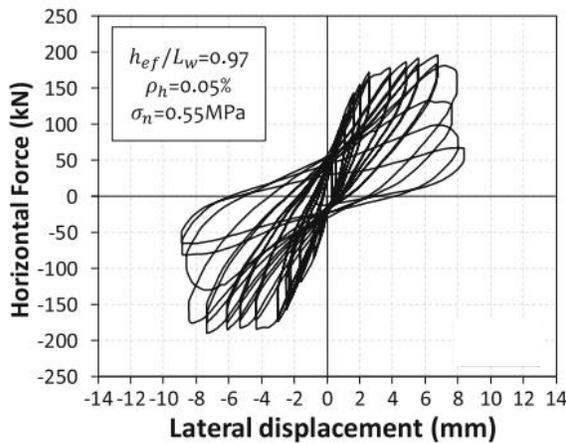
Figura 2.6 Representación daño severo (DS5) muro BJR-PG-RM con cuantía de refuerzo horizontal

$$\rho_h = 0.08\%$$

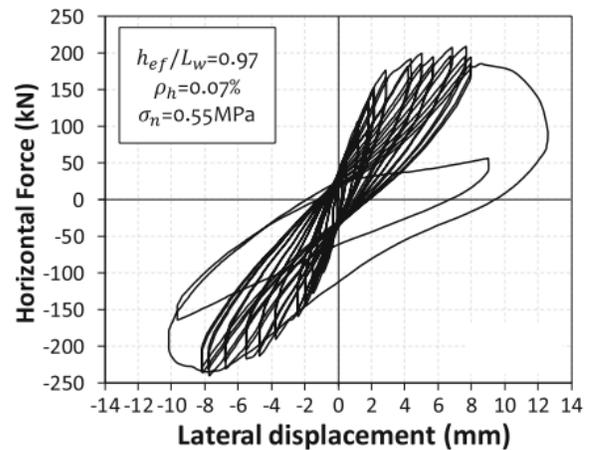
Se presentan brevemente los ensayos de cargas cíclicas en muros BJR-PG-RM de escala completa realizados por (Sandoval et al., 2018), en donde se estudiaron las influencias del refuerzo horizontal. Se sometieron a estudio los muros ‘W1’ y ‘W2’, de relación de aspecto cuadrado, y en que el único parámetro distintivo es la cuantía horizontal:  $\rho_h = 0.05\%$  y  $\rho_h = 0.07\%$  respectivamente. Se observa que el muro ‘W1’ alcanza una fuerza lateral máxima de 193 kN, mientras que el muro ‘W2’ alcanza una fuerza lateral máxima de 225 kN. La resistencia máxima la alcanzan en un 0.37% drift para el muro ‘W1’ y 0.4% drift para el muro ‘W2’. Se observa que luego de alcanzar un estado de pérdida de resistencia, se llega a un colapso repentino, atribuido a la ruptura simultánea de gran parte del refuerzo horizontal. También es de interés notar que el muro ‘W2’ presentó una mejor distribución del patrón de agrietamiento en la superficie del muro, el cual junto el incremento de un 16% en la resistencia máxima lateral, y de un incremento de un 10% en el desplazamiento lateral (respecto al muro ‘W1’), son resultados consistentes con el aumento en la cuantía de refuerzo horizontal.

Se puede observar la influencia de aumentar la cuantía de refuerzo horizontal en muros de albañilería armada en la Figura 2.7, en donde se muestra el comportamiento histerético fuerza-desplazamiento para el muro ‘W1’ con una menor cuantía de refuerzo horizontal ( $\rho_h = 0.05\%$ ) (a), y para el muro

‘W2’ con una mayor cuantía de refuerzo horizontal ( $\rho_h = 0.07\%$ ) (b). Se debe notar que el ensayo acabó luego aplicar 24 y 26 ciclos respectivamente.



(a) Muro “W1” con cuantía de refuerzo horizontal  $\rho_h = 0.05\%$



(b) Muro “W2” con cuantía de refuerzo horizontal  $\rho_h = 0.07\%$

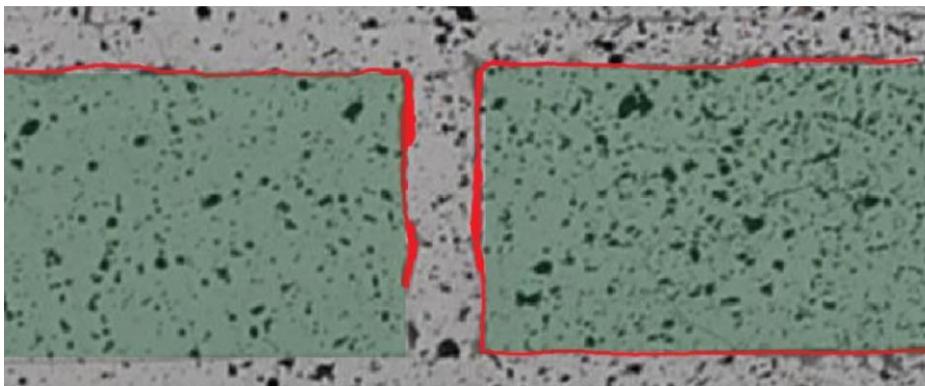
Figura 2.7 Comparación comportamiento histerético muros de albañilería armada (unidades de arcilla) con alta y baja cuantía de refuerzo horizontal (Sandoval et al., 2018)

Se observan también los estudios sobre refuerzos verticales en muros de albañilería armada (de unidades de hormigón), en donde (Voon & Ingham, 2007) notaron que a medida que se incrementa el refuerzo vertical de acero se incrementa la resistencia al esfuerzo de corte y también se presenta un comportamiento similar al provocado por el refuerzo horizontal, en donde las grietas se desarrollan en mayor número y no así en una grieta principal de gran espesor y longitud que atraviesa de puntal a pie de compresión. Conclusiones similares se han alcanzado en Dhanasekar & Haider (2011), para muros de albañilería armada de unidades de ladrillo cerámico, en donde se estudiaron los efectos del espaciamiento del refuerzo vertical. En este estudio se encontró que cuando el espaciamiento entre el refuerzo vertical central es menor a 1000 mm, se exhiben grietas diagonales sin un daño significativo en la zona central del muro. En cuanto a muros con espaciamientos mayores del refuerzo vertical (mayores a 1000 mm), se presentó una grieta tipo “X” en el centro del panel, típico de muros sin presencia de refuerzo.

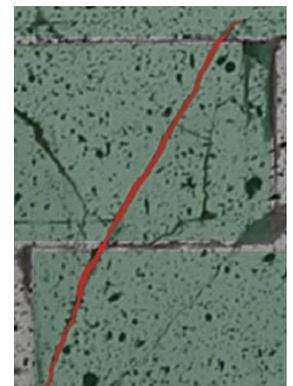
Como se ha indicado, se pueden presentar distintos tipos de daños debido a la selección de parámetros de diseño, pudiendo encontrar desarrollos de grietas más súbitos y concentrados, con una rápida

degradación de resistencia a corte, o también un desarrollo más gradual y distribuido, con una degradación de resistencia también gradual.

Respecto a la generación de grietas, se observa que la evolución de daño típico de muros BJR-PG-RM sometidos a esfuerzos cíclicos de corte es mediante agrietamientos diagonales predominantes que se propagan de forma escalonada principalmente, a través de la interfaz ladrillo-mortero (se observa en rojo en la Figura 2.8 (a) un ejemplo de este tipo de grietas), o de forma diagonal que atraviesan el ladrillo (se observa en rojo en la Figura 2.8 (b) un ejemplo de este tipo de grietas). En ocasiones, también se pueden presentar ambas formas de propagación de grietas.



(a) Propagación de grieta de forma escalonada a través de interfaz ladrillo-mortero



(b) Propagación de grieta diagonal atravesando unidades

Figura 2.8 Formas de propagación de grietas en muros de albañilería armada BJR-PG-RM

Se analiza también los estudios de (Calderón et al., 2022) en donde se evalúan los niveles de daño propuestos anteriormente por (Murcia-Delso & Shing, 2012) y en donde se desarrollan funciones actualizadas de fragilidad para muros de albañilería armada basadas en parámetros de demanda (EDP: Engineering demand parameters) del muro tales como el desplazamiento relativo entre pisos (SDR: Story Drift Ratio) o la demanda normalizada de corte (NDS: Normalized Diagonal Shear Demand), las cuales son definidas a continuación:

$$SDR = \frac{H_d}{H_m} \quad (2-1)$$

En donde:

$SDR$ : Story Drift Ratio (Desplazamiento relativo entre piso) (mm/mm)

$H_d$ : Desplazamiento relativo horizontal (mm)

$H_m$ : Altura muro (mm)

$$NDSD = \frac{V}{V_n} \quad (2-2)$$

$NDSD$ : Normalized Diagonal Shear Demand (Demanda normalizada de corte diagonal) (kN/kN)

$V$ : Fuerza horizontal aplicada (kN)

$V_n$ : Resistencia máxima de corte de diseño (kN)

Cabe recalcar que la resistencia máxima de corte diseño se calcula mediante la proposición de ecuación de diseño (Calderón et al., 2022) considerando la contribución de las unidades de albañilería, del refuerzo horizontal, del refuerzo vertical y de la carga axial aplicada.

$$V_n = V_m + V_p + V_{sh} + V_{sv} \quad (2-3)$$

$$V_m = \alpha_m A_n \sqrt{f_{m,n}} \quad (2-4)$$

$$\alpha_m = \left( c_1 + c_2 \frac{h_{ef}}{L_w} \right) \geq 0 \quad (2-5)$$

$$V_p = \alpha_p P \quad (2-6)$$

$$\alpha_p = \left( c_3 + c_4 \left( \frac{h_{ef}}{L_w} \right)^{-1} \right) \geq 0 \quad (2-7)$$

$$V_{sh} = c_5 \frac{A_{shh}}{h_w} f_{yh} * \min(h_w, L_w) \quad (2-8)$$

$$V_{sv} = c_6 A_{svt} f_{yv} \quad (2-9)$$

En donde:

$V_n$ : Resistencia máxima de corte (diseño) (MPa)

$V_m$ : Contribución de resistencia de corte albañilería (MPa)

$V_p$ : Contribución de resistencia de corte carga axial (MPa)

$V_{sh}$ : Contribución de resistencia de corte refuerzo horizontal (MPa)

$V_{sv}$ : Contribución de resistencia de corte refuerzo vertical (MPa)

$A_n$ : Área sección transversal ( $mm^2$ )

$f_{m,n}$ : Resistencia a la compresión albañilería (MPa)

$d_v$ : Profundidad efectiva muro (mm)

M: Momento flector aplicado (N\*mm)

P: Carga axial aplicada (MPa)

V: Carga de corte (MPa)

$A_{shh}$ : Área total de refuerzo horizontal ( $mm^2$ )

$A_{shv}$ : Área total de refuerzo vertical ( $mm^2$ )

$f_{yh}$ : Resistencia última refuerzo horizontal (MPa)

$f_{yv}$ : Resistencia última refuerzo vertical (MPa)

Además, se debe cumplir

$$V_m \geq V_p \quad (2-10)$$

$$V_m + V_P \geq V_{sh} + V_{sv} \tag{2-11}$$

Se presentan entonces las curvas de fragilidad obtenidas por (Calderón et al., 2022), las cuales fueron ajustadas para las distintas relaciones de aspecto considerando las observaciones de una mayor rigidez y comportamiento frágil en muros de baja relación de aspecto.

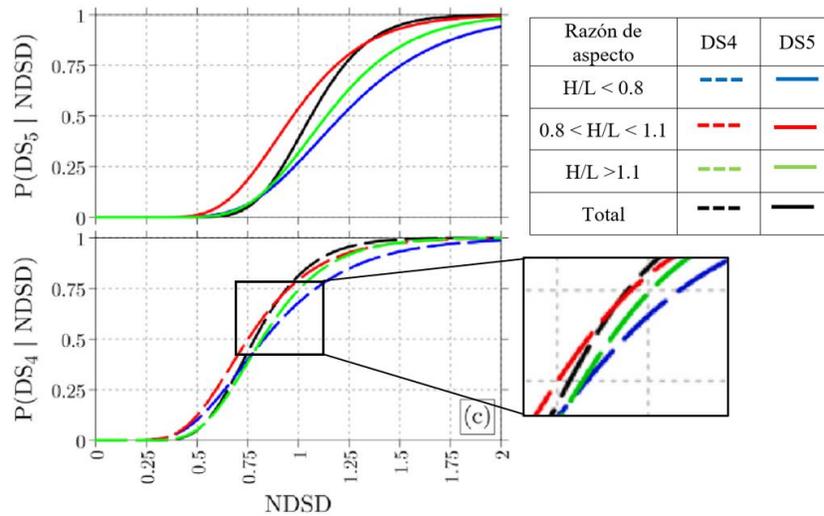


Figura 2.9 Curva de fragilidad basada en NDSd para muros BJR-PG-RM con unidades de arcilla (Calderón et al., 2022)

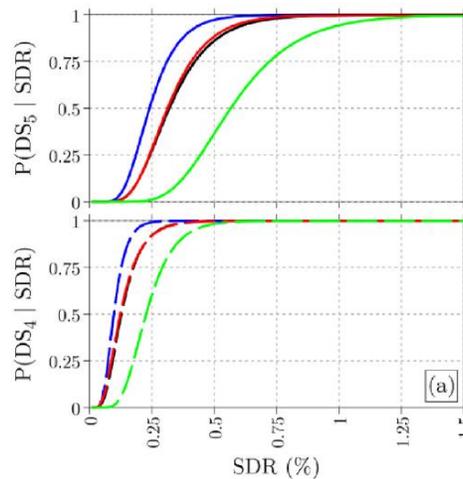


Figura 2.10 Curva de fragilidad basada en SDR para muros BJR-PG-RM con unidades de arcilla (Calderón et al., 2022)

De estas curvas de fragilidad se obtiene la probabilidad de encontrar un nivel de daño moderado (DS4) o nivel de daño severo (DS5) de acuerdo con los parámetros de respuesta observados de demanda normalizada de corte diagonal (NDSD) y drift de entrepiso (SDR). Esta relación se plantea de acuerdo con la relación de aspecto de un muro, debido a que este es un parámetro de diseño de gran influencia en la respuesta sísmica (Calderón et al., 2022). Se observa en este estudio que la representación del daño severo DS5 mediante la normalización de la demanda de corte (NDSD) presenta un comportamiento menos fluctuante respecto al drift de entrepiso. Se observa también, en la figura 2.9, la curva de fragilidad para la probabilidad de encontrar un nivel de daño moderado (DS4) en muros respecto a la demanda normalizada de corte diagonal, encontrando al mismo nivel de NDSD, una menor probabilidad de nivel de daño DS4 para muros de baja relación de aspecto. Esto se puede atribuir a que son muros con un comportamiento rígido y frágil, con una alta resistencia al corte. A su vez, se observa que la diferencia respecto a la curva de fragilidad (basada en NDSD) que no considera relación de aspecto no es amplia, lo cual se puede atribuir a que la relación empleada para calcular la resistencia estimada de corte ( $V_n$ , de la Ec. ( 2-3)) representa de forma acertada la influencia de la relación de aspecto en la resistencia estimada de corte  $V_n$ .

## 2.5 Conclusiones

Se concluye de la revisión del estado del arte la importancia que existe en profundizar en el conocimiento del comportamiento de muros BJR-PG-RM sometidos a cargas cíclicas laterales. Se observa, que podría existir una relación entre la formación de daño superficialmente visible (formación de grietas) con el nivel de daño alcanzado por un muro BJR-PG-RM sometido a cargas cíclicas, y con el historial de esfuerzos al que ha sido sometido. Debido a este posible vínculo es que vislumbra la oportunidad de profundizar en el conocimiento del comportamiento de estos muros antes cargas cíclicas, mediante la caracterización de la formación de grietas de un muro, y en la búsqueda de parámetros de daño superficialmente visibles que permitan relacionarlos con el estado de daño alcanzado en estos muros. Esta línea de investigación no ha sido abarcada en profundidad en la literatura y se presenta como una potencial línea de investigación.

## CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

### 3.1 Introducción

En el presente capítulo se presenta la metodología con la que se estudia el desarrollo de grietas en ensayos de carga cíclica de muros de BJR-PG-RM de unidades de ladrillo cerámico multi-perforado. En el presente estudio se analizan fotografías realizadas durante el transcurso de tres ensayos cíclicos de muros de BJR-PG-RM efectuados en estudios anteriores (Calderón et al., 2021). En dichos estudios se ha analizado la influencia de diferentes parámetros de diseño en los parámetros de respuesta del muro, tales como la cuantía de refuerzo horizontal, cuantía de refuerzo vertical, carga de compresión axial y relación de aspecto, naciendo la inquietud de profundizar en el conocimiento del progreso del daño en los muros ensayados en dicho estudio, e identificar niveles de daño a partir del daño superficialmente observable en ellos. Para esto se busca identificar parámetros de nivel de daño superficialmente observables en estos y vincularlos con parámetros de respuesta y con niveles de daño alcanzados. Para esto, las fotografías realizadas durante el transcurso de los ensayos son procesadas para detectar y medir la evolución de grietas, y a partir de esto, proponer parámetros de nivel de daño superficialmente visible. A la vez, ellos son correlacionados con el historial de esfuerzos y parámetros de respuesta de un muro. Luego, con dichos resultados, se busca proponer una formulación que permita definir el estado de nivel de daño en que se encuentra un muro post acción sísmica (DS4: Daño moderado o DS5: Daño severo) respecto a parámetros de nivel de daño superficialmente visibles.

Se presenta el siguiente programa de trabajo para ilustrar las etapas recién mencionadas.

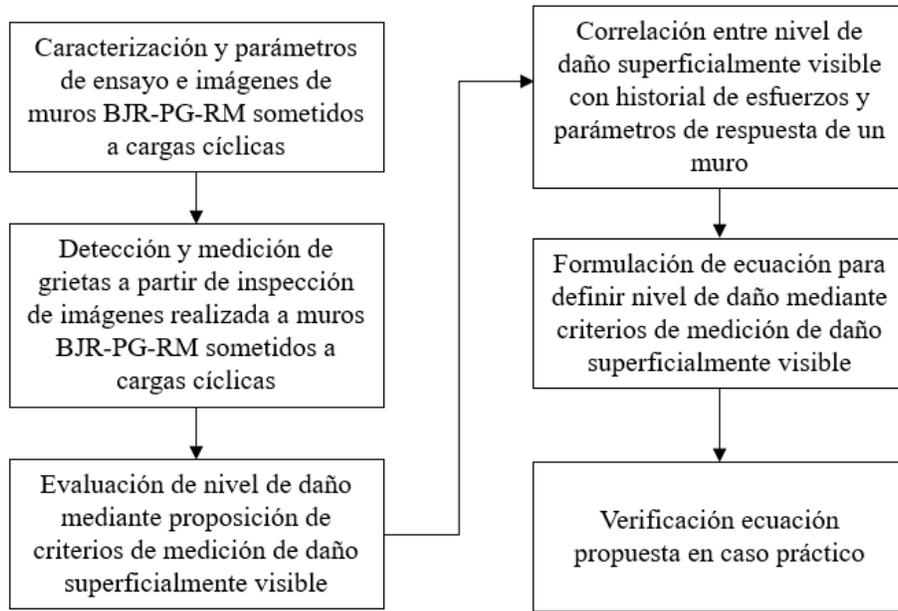


Figura 3.1 Diagrama de flujo metodología

### 3.2 Caracterización y parámetros ensayo de muros BJR-PG-RM sometidos a cargas cíclicas

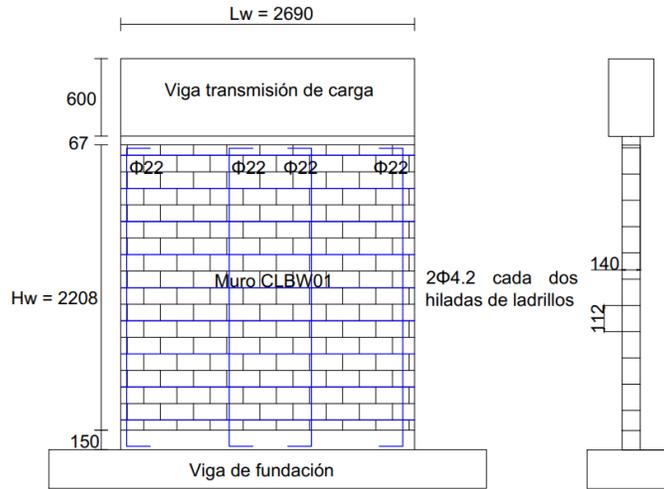
Se presentan la caracterización de los ensayos de tres muros de corte BJR-PG-RM de escala completa con unidades de multiperforados de arcilla sometidos a cargas cíclicas (Calderón et al., 2021). Estos muros presentan distinta relación de aspecto, siendo sometidos a estudio los muros CLBW01, CLBW02 y CLBW03. El muro CLBW01 un muro con relación de aspecto relativamente cuadrado ( $H/L=0.82$ ), el muro CLBW02 un muro con una baja relación de aspecto ( $H/L= 0.55$ ) y el muro CLBW03 un muro con relación de aspecto esbelto ( $H/L = 1.35$ ).

El diseño de los muros cumple con las disposiciones de la actual normativa chilena para albañilería armada NCh1928Of1993 modificada en 2009 (Calderón et al., 2021).

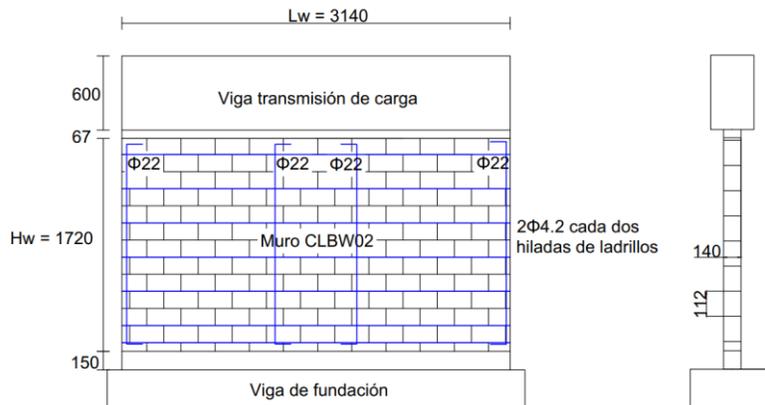
Se presenta en la Tabla 3.1 y en la Figura 3.2 la caracterización y parámetros de diseño de los tres muros de corte sometidos a estudio.

Tabla 3.1 Parámetros de diseño de muros de corte ensayados

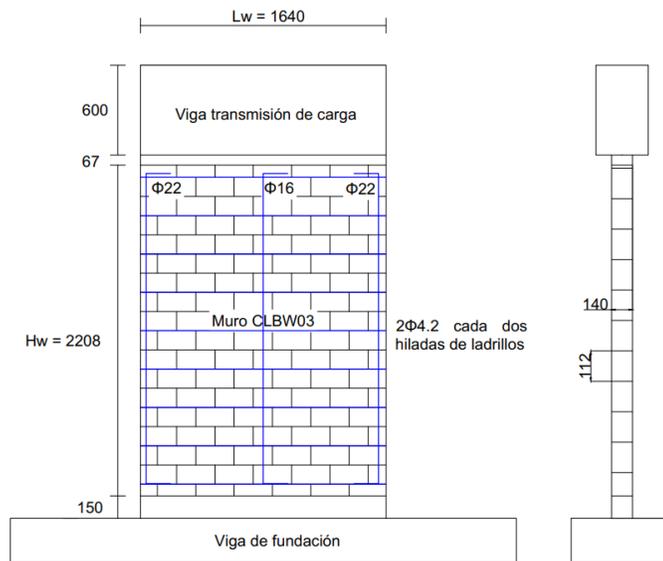
| Muro   | Largo (mm) | Altura (mm) | Relación de aspecto | Area (mm <sup>2</sup> ) | Espesor (mm) | Altura de ladrillo (mm) | Espesor de junta (mm) | Resistencia a la compresión del mortero (MPa) | Resistencia a la compresión unidad (MPa) | Carga axial (% $\sigma_{fin}$ ) | Cuantía de refuerzo horizontal (%) | Cuantía de refuerzo vertical (%) |
|--------|------------|-------------|---------------------|-------------------------|--------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| CLBW01 | 2690       | 2208        | 0.82                | 5939520                 | 140          | 112                     | 10                    | 17.36                                         | 10.19                                    | 5                               | 0.081                              | 0.4                              |
| CLBW02 | 3140       | 1720        | 0.55                | 5400800                 |              |                         |                       |                                               |                                          |                                 |                                    | 0.35                             |
| CLBW03 | 1640       | 2208        | 1.35                | 3621120                 |              |                         |                       |                                               |                                          |                                 |                                    | 0.5                              |
| CLBW04 | 2690       | 2226        | 0.83                | 5987940                 |              |                         |                       |                                               |                                          |                                 |                                    | 71                               |



(a) Diseño muro CLBW01



(b) Diseño muro CLBW02



(c) Diseño muro CLBW03

Figura 3.2 Parámetros de diseño de muros de corte ensayados

Se presenta en la Figura 3.3 la disposición de sensores de desplazamiento horizontal. Se sigue la misma disposición para los muros CLBW01, CLBW02 y CLBW03, en donde los sensores de desplazamiento horizontal se emplazan en la primera y última corrida de ladrillos.

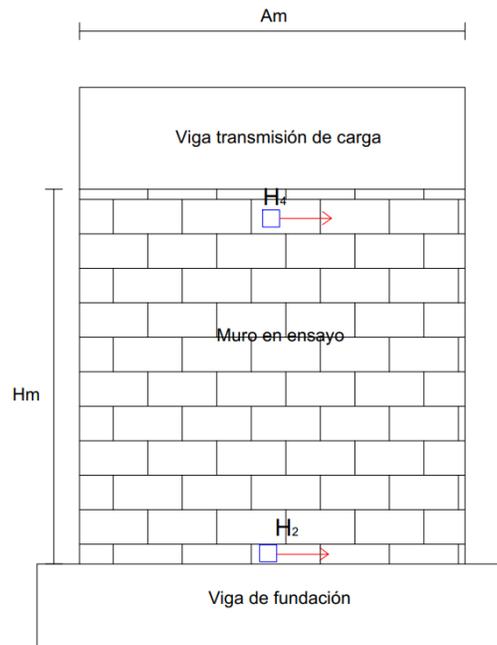


Figura 3.3 Disposición sensores desplazamiento horizontal

Los muros fueron construidos utilizando unidades de arcilla multi-perforados de 290 mm de largo, 140 mm de espesor y 120 mm de alto (con orificios centrales cuadrados de 56 mm). Los muros se fundaron sobre una viga de hormigón armado en forma de T de 450 mm de altura y ancho máximo de 680 mm. Además, en la parte superior se les materializó una viga de conexión de 600 mm de altura y 350mm de ancho de hormigón armado.

El ensayo de estos muros fue realizado mediante un actuador hidráulico, el cual impone desplazamientos cuasi-estáticos. Los muros se conectaron al actuador con cuatro barras de acero de alta resistencia de 36 mm de diámetro lo suficientemente rígida para no sufrir deformaciones relevantes al transmitir la fuerza al muro. Estos desplazamientos impuestos son definidos como una función del desplazamiento relativo (deformación horizontal sobre la altura del muro o drift) en concordancia con los protocolos propuestos por FEMA 461 (Federal Emergency Management Agency) para test cíclico cuasi-estático.

Cabe destacar que estos muros presentan cuantías superiores a la mínima de la norma NCh1928Of.1993Mod2009 ( $\rho_{h\ min} = 0.05\%$ ), por lo que se podría esperar un desarrollo de grietas distribuido en la superficie del muro y no presentar una sola grieta diagonal que aumenta de espesor a medida que se aplican mayores desplazamientos horizontales, pues se espera que se activen las enfierraduras horizontales impidiendo la concentración de la deformación en una sola grieta y la falla repentina del muro. Por eso, los muros son adecuados para realizar un seguimiento de su daño superficialmente visible. Para este seguimiento, fueron capturadas fotografías durante el transcurso de cada ensayo. Estas fotografías fueron realizadas por una cámara réflex Canon EOS 700D, la cual fue emplazada frente a la superficie del muro sobre un trípode firme, con el fin de limitar los movimientos no deseados en las imágenes caracterizadas. Las fotografías fueron realizadas con una apertura bastante cerrada de F/11, para asegurar un buen enfoque en toda la superficie del muro. La resolución de las fotografías es de 6000 x 4000 pixeles, la cual lleva a las relaciones píxel/mm que se observan en la Tabla 3.2. Esta relación píxel/mm dictará el espesor de grieta mínimo que es visible para inspección en este estudio.

Tabla 3.2 Relación píxel/mm para cada ensayo

| Muro              | CLBW01 | CLBW02 | CLBW03 |
|-------------------|--------|--------|--------|
| Relación píxel/mm | 0.7502 | 0.8704 | 0.6526 |

### 3.3 Detección y medición de grietas a partir de inspección de imágenes

La detección y medición de grietas se efectúa mediante la realización de mapas de agrietamiento y su posterior procesamiento de resultados. Estos mapas de agrietamiento son una matriz de las coordenadas de las entidades de grieta visibles en distintas etapas del ensayo. Para la obtención de estos mapas de agrietamiento se consideran las grietas visibles en las imágenes capturadas durante la realización de cada ensayo, las cuales se esbozan por sobre la imagen original, generando una nueva capa de las mismas dimensiones que la imagen original, pero que solo contiene las grietas visibles.

Cabe destacar que el proceso se realiza en pixeles, por lo que luego es necesario transformarlo a la dimensión adecuada empleando la relación píxel/mm de cada fotografía, las cuales tienen una distinta

relación pixel/mm para cada ensayo y determina el espesor mínimo de grieta que es visible para la investigación. Se presenta la relación píxel/mm para cada ensayo en la Tabla 3.2.

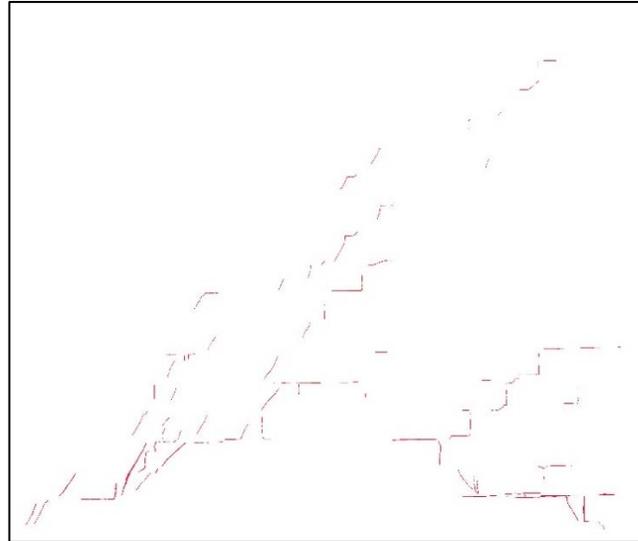
Estos mapas de agrietamiento se obtienen para las etapas más relevantes del ensayo. Las etapas más relevantes son consideradas como las etapas de mayor desplazamiento horizontal aplicado en el sentido positivo (actuador empujando) y las etapas de reposo entre ciclos. Los mapas de agrietamientos de estas etapas relevantes permiten conocer el comportamiento de las entidades de grieta y su evolución a lo largo del ensayo, logrando observar el desarrollo del daño en el muro a lo largo del ensayo, los cambios entre las etapas de carga y de reposo e información histórica del daño acumulado de un ensayo.

Para la tarea de identificación de la cinemática de grietas y de su evolución a lo largo del ensayo cíclico tratan las imágenes adoptando los siguientes pasos:

- 1) Se trazan las grietas visibles sobre el muro de forma manual en un programa de edición de imagen. En esta investigación se utiliza GIMP 2.10.34 (del inglés: *GNU Image Manipulation Program*), el cual es un software de código abierto para edición y manipulación de imágenes. Las grietas se trazan sobre una capa separada a la de la fotografía. Este proceso se muestra en la Figura 3.4 (a)
- 2) Se extrae sólo la capa del mapa de agrietamiento. Este proceso se muestra en la Figura 3.4 (b)
- 3) Una vez se tiene el mapa de agrietamiento aislado, se convierte la imagen a escala de grises. Este paso a imagen en escala de grises se puede observar en la Figura 3.4 (c).
- 4) Se genera imagen binaria. Cabe mencionar que es necesario pasar por el punto 3 para poder transformar el mapa de agrietamiento en una imagen binaria, pues, se necesitan valores definidos en los píxeles que denoten las entidades de grieta. El mapa de agrietamiento binario, el cual es considerado como una matriz de valores lógicos, es requerido como input para las distintas funciones que presenta Matlab. Este paso a imagen binaria se puede observar en la Figura 3.4 (d)



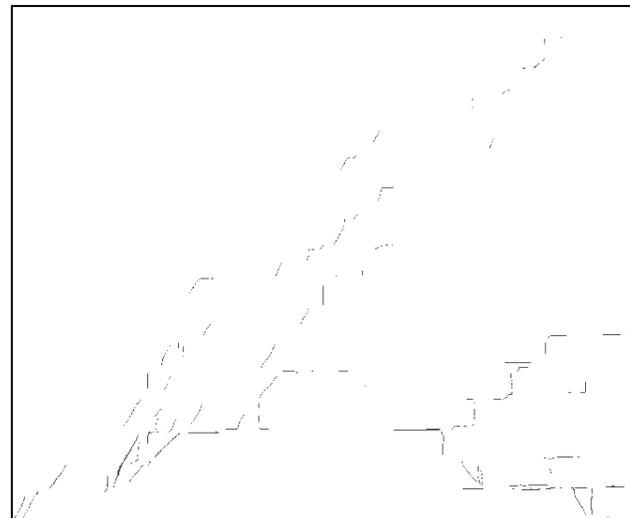
(a) Imagen de muro CLBW01 con capa mapa de agrietamiento trazado



(b) Mapa de agrietamiento aislado



(c) Mapa de agrietamiento en escala de grises



(d) Mapa de agrietamiento binario

Figura 3.4 Proceso de extracción mapa de agrietamiento

- 5) Se procesa cada imagen. Esto se realiza en MATLAB R2023a. El programa identifica automáticamente la evolución de las grietas durante el ensayo. Para esta tarea, se utilizan las funciones “bwconncomp” y “bwlabel”, las cuales permiten agrupar las unidades (píxeles) que pertenecen a una misma grieta y enumerándola respectivamente, dotando a cada entidad de

grieta de propiedades tales como la ubicación, centroide, límites, largo y área de un cuerpo de grieta, así como una identificación para cada cuerpo de grieta.

- 6) Aunando los pasos recién mencionados se obtiene el mapa de agrietamiento binario que se presenta en la Figura 3.5, con su respectiva enumeración. Cabe mencionar que, para delimitar la longitud de cada grieta y forma de cada entidad de grieta, el mapa es sometido a un proceso de eliminación de nudos de grietas (puntos donde desembocan dos o más grietas), los cuales se observan en la figura con un círculo rojo.

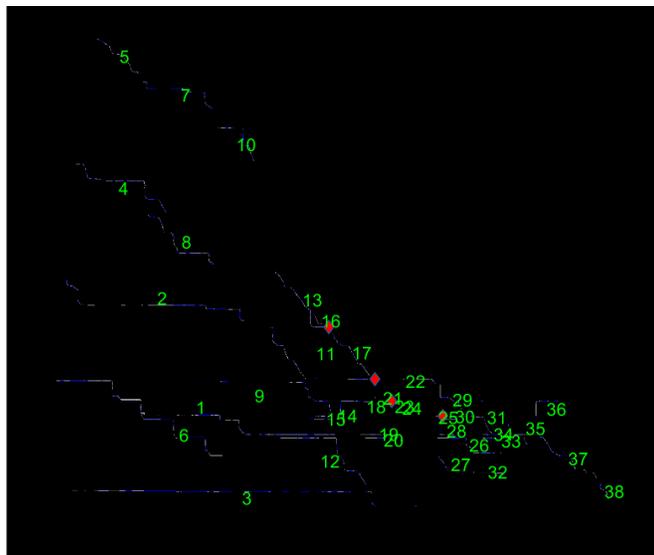


Figura 3.5 Mapa de agrietamiento con enumeración

Con la información que se obtiene de cada entidad de grieta se pueden extraer parámetros relevantes para el estudio de la evolución del daño en las distintas etapas de ensayo un muro de albañilería armada sometido a cargas cíclicas, en específico, las que serán abordadas en el estudio: el espesor máximo de las grietas presentes en cada etapa y el área agrietada que genera cada entidad de grieta. Estos son descritos en las siguientes secciones.

### 3.3.1 Espesor máximo de grieta

Para extraer el espesor máximo de cada de grieta se requiere primeramente conocer el perímetro de cada grieta, para luego recorrer todos los puntos pertenecientes a la grieta y conocer los límites del

espesor en cada punto de la grieta, es decir, el perímetro exterior de la grieta (demarcado en azul en la Figura 3.6). También es necesario conocer el esqueleto de cada grieta, el cual consiste en los píxeles centrales de una entidad de grieta (demarcado en negro en la Figura 3.6). Para el cálculo del espesor máximo, se calculan las distancias entre los puntos del esqueleto (puntos centrales) y el perímetro de la grieta (límites de la grieta). Esta distancia se calcula en cada punto del esqueleto y considera la longitud (en píxeles) en ocho diferentes direcciones: hacia la derecha, hacia la derecha y abajo, hacia abajo, hacia abajo e izquierda, hacia la izquierda, hacia la izquierda y arriba, hacia arriba y hacia arriba y a la derecha. Estas direcciones se pueden observar en la Figura 3.6, en donde se muestra la representación binaria de un cuerpo de grieta y las direcciones principales desde un punto del esqueleto de la grieta.

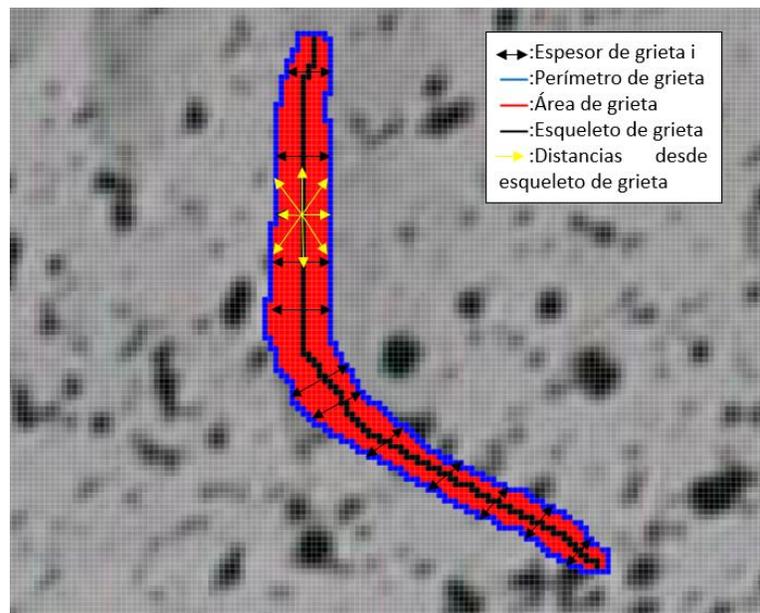


Figura 3.6 Representación cálculo espesor máximo de grieta

Para el cálculo de espesor máximo,  $s$ , en donde encontrando la dirección en donde esta distancia es menor, se considera que el espesor es el doble de esa distancia. Luego, se busca el máximo de todos los espesores medidos a lo largo del cuerpo de grieta.

Este proceso permite conocer la cantidad de píxeles en cada dirección desde el centro de la grieta hasta el perímetro de esta. Para el cálculo del espesor en cada punto del esqueleto de grieta, se consideran dos direcciones desde el esqueleto hasta el perímetro de esta (como, por ejemplo, derecha e izquierda, o arriba y abajo), identificando y almacenando el menor valor en las dos direcciones

seleccionadas para cada grieta, obteniendo el espesor en ese punto de la grieta. Luego, para obtener el espesor máximo de cada grieta, se extrae el mayor valor de espesor calculado para esa grieta. Se selecciona la grieta de mayor espesor en cada etapa de medición, en toda la superficie del muro, como parámetro de medición de daño superficialmente visible.

### 3.3.2 Razón de agrietamiento total

El área agrietada para cada etapa se considera como la suma de las áreas de los polígonos rectangulares que encierran cada entidad de grieta. Este polígono resulta ser el mínimo rectángulo que encierra totalmente los límites de cada grieta y denota la sección del muro afectada por el respectivo cuerpo de grieta. Se presenta en la Figura 3.7 el área de polígono rectangular para una grieta dada.

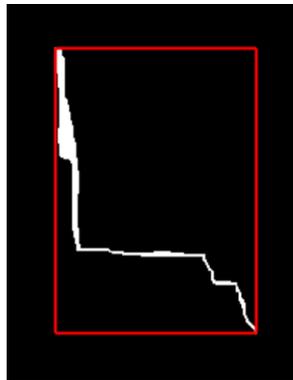


Figura 3.7 Área agrietada para un cuerpo de grieta

El área total agrietada de cada imagen tratada se establece como la unión de las áreas agrietadas de cada grieta, cuidando de no contabilizar doblemente aquellas áreas que se superponen.

Luego se calcula la razón de agrietamiento total (TCR, de su sigla en inglés: *Total Cracking Ratio*) como la razón entre el área agrietada total de cada imagen tratada respecto al área total del muro.

$$\text{Razón de agrietamiento total} = \frac{\sum_{i=1}^n A_{g,i}}{A_t}$$

En donde:

$A_{g,i}$ : Área agrietada de cuerpo de grieta  $i$  ( $mm^2$ ).

$A_t$ : Área frontal del muro  $\left(\frac{h_w}{L_w}\right)$  ( $mm^2$ ).

n: Número total de grietas.

Se presenta en la Figura 3.8 el mapa áreas agrietadas totales de un muro en su respectivo estado de carga y en la Figura 3.9 una ilustración que representa la razón de agrietamiento total, en donde se muestra en recuadros rojos las áreas individuales de cada grieta sobre el área total del muro (demarcada en rojo más claro).



Figura 3.8 Mapa áreas agrietadas



Figura 3.9 Parámetro de medición de daño superficialmente visible: Razón de agrietamiento total

### 3.3.3 Razón de agrietamiento diagonal

Basado en la existencia de modelos de puntal de compresión, se establece solo considerar las grietas que están contenidas en el área diagonal. También se incluye sólo la porción contenida dentro de esta área diagonal para aquellas grietas que desbordan la zona en cuestión. Para el cálculo de las áreas agrietadas individuales, se sigue el mismo procedimiento descrito en la sección 3.3.1.

El puntal de compresión diagonal se determina de distintas formas en la literatura, tomando en cuenta distintos parámetros del muro. Sin embargo, para fines prácticos en donde existirán ocasiones en que no se conocerán mayores parámetros del muro fuera de las visibles (altura del muro y su largo), se

establece como criterio considerar las siguientes dimensiones del puntal de compresión diagonal. La Figura 3.10 presenta un esquema del puntal de compresión diagonal.

$$H_{PCD} = \frac{1}{4} H_m$$

$$E_{PCD} = \frac{1}{4} A_m$$

Donde:

$H_{PCD}$ : Altura puntal de compresión diagonal ( $mm$ ).

$E_{PCD}$ : Ancho puntal de compresión diagonal ( $mm$ ).

$H_m$ : Altura total muro ( $mm$ ).

$A_m$ : Ancho de muro ( $mm$ ).

Consecuentemente, el área de este puntal de compresión diagonal ( $A_{pcd}$ ) viene dada por la relación de aspecto del muro de la siguiente forma:

$$A_{PCD} = H_m A_m - \left(\frac{3}{4}\right)^2 H_m A_m = \frac{7}{16} H_m A_m$$

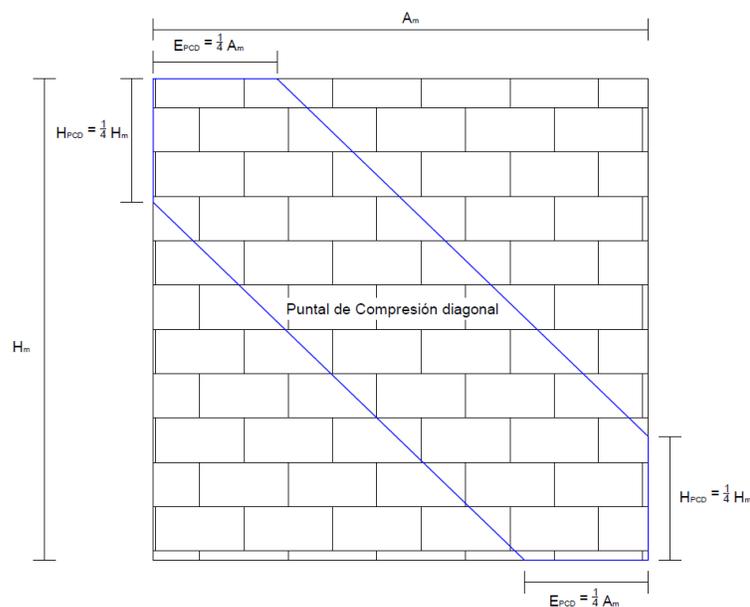


Figura 3.10 Esquema de puntal de compresión diagonal propuesto

Ya definido el puntal de compresión diagonal para cada muro, se procede a definir el concepto de razón de agrietamiento diagonal, calculada como.

$$\text{Razón de agrietamiento diagonal} = \frac{\bigcup_{i=1}^n (A_{g,i} \cap A_{PCD})}{A_{PCD}}$$

En donde:

$A_{g,i}$  : Área agrietada de cuerpo de grieta  $i$  ( $mm^2$ ).

$A_{PCD}$ : Área del puntal de compresión diagonal ( $mm^2$ ).

En la Figura 3.11 se representa la razón de agrietamiento diagonal, en donde se muestra en recuadros rojos las áreas individuales de cada grieta presente en el puntal de compresión diagonal sobre el área del puntal de compresión (demarcada en rojo más claro).

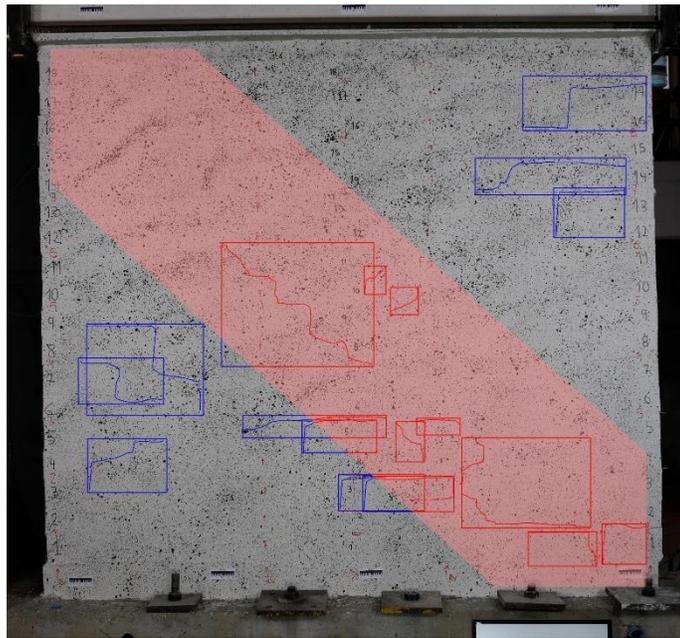


Figura 3.11 Ilustración parámetro razón de agrietamiento diagonal

### 3.3.4 Área agrietada interna

Se obtiene el área agrietada interna para cada etapa de medición ( $A_{interna} (mm^2)$ ). El área agrietada interna se define como el área superficial que ocupan todos los cuerpos de grieta. En la Figura 3.12 se observa una grieta demarcada en el mapa de agrietamiento con pixeles rojos. La suma de todos los pixeles rojos en una imagen (o, en otras palabras, de todas las grietas presentes en la imagen) representa el área agrietada interna de cada etapa de medición (en  $px^2$ ).

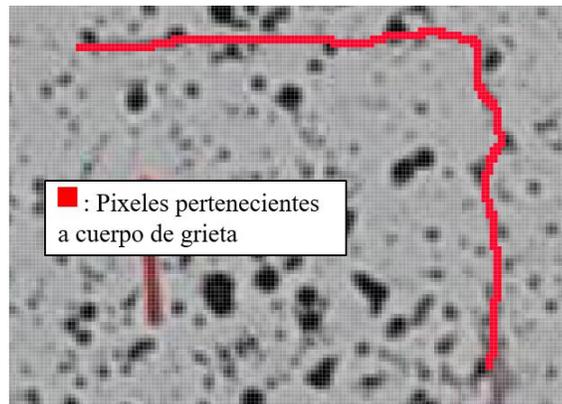


Figura 3.12 Área agrietada interna para un cuerpo de grieta (pixeles rojos)

En la ecuación ( 3-1 ) se presenta la formulación que permite obtener el área agrietada interna (en  $px^2$ ) para cada etapa de medición. En la ecuación ( 3-3) se presenta la conversión a área agrietada interna en unidad de  $mm^2$ .

$$A_{interna,j} (px^2) = \bigcup_{i=1}^n px_i \quad (3-1)$$

Donde

$px_i$  : Suma de pixeles rojos pertenecientes a cada cuerpo de grieta.

$n$  : Numero de grietas en etapa de medición  $j$ .

$$A_{interna} (mm^2) = A_{interna} (px^2) * FC^2 \quad (3-2)$$

Donde:

$FC$  : Factor de conversión de pixeles a milímetros para cada muro.

### 3.4 Evaluación, Caracterización y relación de la evolución del desarrollo de grietas con parámetros de respuesta

En el presente estudio se busca analizar las distintas relaciones existentes entre parámetros de respuesta de un muro con el nivel de daño presentado en el muro, el cual es evaluado mediante el espesor máximo de grietas y las razones de agrietamiento total y diagonal.

Con este fin, se analizan las siguientes relaciones entre los parámetros de respuesta de los ensayos de muros sometidos a cargas cíclicas con el nivel de daño observado del muro.

- Relación fuerza horizontal - Criterios de medición de daño superficialmente visible.
- Relación NDS - Criterios de medición de daño superficialmente visible.
- Relación esfuerzo de corte - Criterios de medición de daño superficialmente visible.
- Relación desplazamientos relativos - Criterios de medición de daño superficialmente visible.
- Relación deformaciones - Criterios de medición de daño superficialmente visible.
- Relación drift - Criterios de medición de daño superficialmente visible.

Para obtener los esfuerzos de corte  $\tau$ , la fuerza horizontal medida  $F_h$  en el ensayo se divide por el área bruta de la sección transversal.

$$\tau = \frac{F_h}{A_{st}} = \frac{F_h}{A_m t_m} \quad (3-3)$$

Donde:

$\tau$  : Esfuerzo de corte (MPa).

$F_h$  : Fuerza horizontal medida (kN).

$A_{st,g}$ : Área bruta de sección transversal muro ( $mm^2$ ).

$A_m$ : Ancho muro ( $mm$ ).

$t_m$ : Espesor muro (mm)

Para obtener el desplazamiento en cada etapa del ensayo, se extraen los datos entregados por los sensores  $H_4$  y  $H_2$ , ubicados según la disposición de la Figura 3.3 para cada muro. El sensor  $H_2$  está emplazado en la primera línea de ladrillos para controlar el deslizamiento del muro respecto de la viga de fundación, y el sensor  $H_4$  está emplazado en la última línea de ladrillos y entrega el desplazamiento total del muro. Para obtener el desplazamiento real del muro en donde se controla el desplazamiento por deslizamiento en la primera línea de ladrillos se obtiene sustrayendo el desplazamiento de deslizamiento.

$$H_d = H_4 - H_2 \quad (3-4)$$

Donde:

$H_d$  : Desplazamiento relativo horizontal muro (mm).

$H_4$  : Desplazamiento en ultima línea de ladrillos (mm).

$H_2$  : Desplazamiento en primera línea de ladrillos (mm).

El drift de entrepiso es definido como el desplazamiento relativo a cada piso y viene dado por la siguiente relación:

$$Drift = \frac{H_d}{H_m} \quad (3-5)$$

En donde:

$Drift$  : Desplazamiento relativo entre piso (mm/mm).

$H_d$ : Desplazamiento relativo horizontal (mm).

$H_m$ : Altura muro (mm).

Se define también como parámetro de demanda una normalización de la fuerza horizontal aplicada respecto a la resistencia lateral máxima, denominado NDSD (Normalized Diagonal Shear Demand).

$$NDSD = \frac{V}{V_n} \quad (3-6)$$

Donde:

$NDS$  : Normalized Diagonal Shear Demand (Demanda normalizada de corte diagonal) (mm/mm).

$V$ : Fuerza horizontal aplicada (kN).

$V_n$ : Resistencia máxima de diseño de corte (kN).

Para el cálculo de la resistencia máxima de diseño de corte se emplea la ecuación de diseño propuesta por Calderón et al. (2022) considerando la contribución de las unidades de albañilería, del refuerzo horizontal, del refuerzo vertical y de la carga axial aplicada (Ec.( 2-3 )).

Se define como parámetro de normalización respecto a la carga horizontal aplicada a cada muro, a la normalización de la carga horizontal aplicada en cada etapa respecto a la carga horizontal aplicada cuando este alcanza su resistencia máxima. Este parámetro se denomina Razón de resistencia máxima (%RMc)

$$\%RMc = \frac{\text{Carga horizontal aplicada}_i}{\text{Carga horizontal}_{max}} \quad (3-7)$$

Donde:

$\text{Carga horizontal aplicada}_i$  : Carga horizontal aplicada en etapa i (kN).

$\text{Carga horizontal}_{max}$  : Carga horizontal aplicada cuando un muro alcanza su resistencia máxima (kN).

Se define como parámetro de normalización respecto al drift de cada muro, a la normalización del drift medido en cada etapa respecto al drift alcanzado al alcanzar la resistencia máxima. Este parámetro se denomina Drift normalizado al 100% RMc ( $\text{Drift normalizado}_{100\% RMc}$ ).

$$\text{Drift normalizado}_{100\% RMc} = \frac{\text{Drift}_i}{\text{Drift}_{100\% RMc}} \quad (3-8)$$

Donde:

$\text{Drift normalizado}_{100\% RMc}$  : Drift normalizado respecto al drift observado al alcanzar el 100% de su resistencia máxima (mm/mm).

$\text{Drift}_i$  : Drift medido en etapa i (mm/mm).

$Drift_{100\% RMC}$  : Drift medido al alcanzar el 100% de razón de resistencia máxima (mm/mm).

### 3.5 Formulación ecuación para definición de límites de nivel de daño

Para la formulación de una ecuación para la definición de nivel de daño, se busca definir los límites de daño que denotan si un muro se encuentra en daño leve, daño moderado (DS4) o daño severo (DS5) siguiendo las definiciones de Murcia-Delso (2012) y Calderón et al. (2022), añadiendo el estado de daño leve como el nivel de daño que no representa mayor peligro para la estructura.

**Daño moderado (DM o DS4):** Es el nivel de daño en donde el muro se espera que todavía pueda resistir cargas más altas y aumentar su deformación antes de presentar un decaimiento en la carga resistida. En este nivel de daño se presentan grietas importantes que tienden a cerrar al retirar la carga, pero se observa una mayor cantidad de grietas visibles en estado descargado. Se considera como límite inferior de este nivel de daño el punto donde se presenta la primera aparición de daño superficialmente visible, y como límite superior el punto de aplicación del 98% de la resistencia máxima. En este nivel de daño se consideran reparaciones necesarias tales como inyecciones epóxicas o inyecciones de mortero tanto en grietas como en aberturas verticales, reemplazo de unidades de albañilería, empleo de mallas de geotextil o mallas de acero, entre otras reparaciones más importantes.

**Daño severo (DS o DS5):** Es el nivel de daño en donde el muro alcanza la resistencia máxima de corte y no puede tomar más carga, ya que sólo queda el periodo de decaimiento de la resistencia. En este último nivel de daño todavía se presentan grietas que se cierran al retirar la carga, pero se observa un daño considerable en estado descargado, con una extensión importante de grietas, aplastamiento de unidades, deslizamiento, desprendimiento de revestimiento. En este nivel de daño es necesario reemplazar el muro. La extensión del daño que se considera como límite inferior de este nivel de daño es el alcanzar el 98% de la resistencia máxima. Se observa que no se considera el 100% de la resistencia máxima de corte con el fin de optar por un criterio conservador ya que el nivel de daño que se observa al alcanzar el 100% de la resistencia máxima de corte es un daño que se produce cuando el muro presenta un comportamiento no lineal y por tanto es difícil de predecir niveles de daño luego de alcanzada la resistencia máxima, sobre todo en estructuras compuestas como lo son los muros de albañilería armada. Por tanto, con el fin de optar por un criterio conservador, se opta por definir el

límite inferior de nivel de daño severo (DS5) como la etapa en que se alcanza aproximadamente el 98% de la resistencia máxima en dirección de carga.

Se representan estos niveles de daño en la Figura 3.13, en donde se observa lo que podría ser la envolvente de capacidad de un muro tipo BJR-PG-RM con la definición de los límites de estos niveles de daño en cuanto a los parámetros de respuesta (%RMc: Razón de resistencia respecto a resistencia máxima y drift observado) observados en cada nivel de daño.

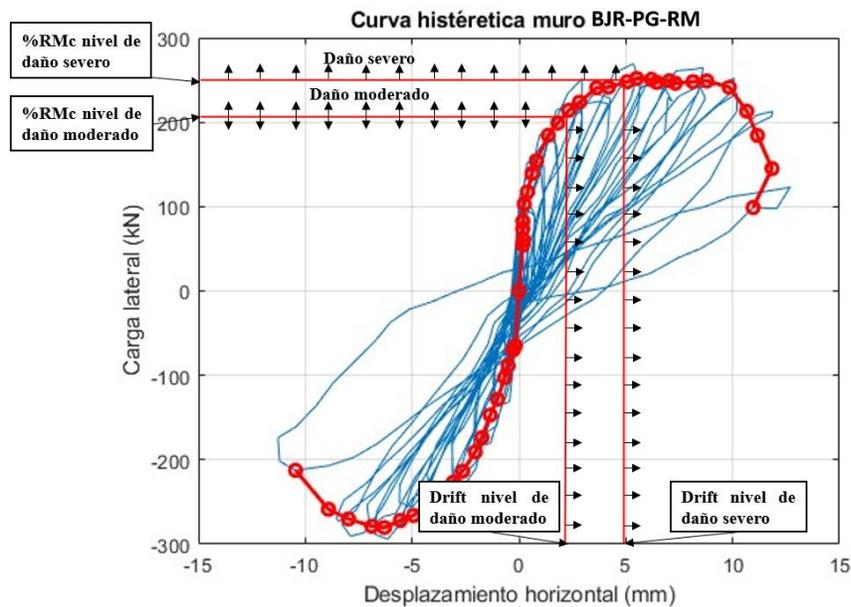


Figura 3.13 Curva histéretica muro tipo BJR-PG-RM con definición de niveles de daño

Se propone una formulación que busca predecir los niveles de daño alcanzados en un muro mediante criterios de daño superficialmente visibles (de ahora en adelante, SDP: Surface Damage Parameters), los cuales pueden ser la razón de agrietamiento total, la razón de agrietamiento diagonal o el espesor máximo de grieta. Se ajusta una expresión a los resultados del análisis de las imágenes empleando el método de los mínimos cuadrados en donde arbitrariamente se busca la función que mejor se ajuste al daño visible en los muros mediante el criterio de determinación estadística de los mínimos cuadrados.

Esta función limite se define en función de la relación de aspecto por ser el único aspecto variado en este estudio, con la siguiente forma:

$$SDP_{DS4} = f\left(\frac{H}{L}\right) \rightarrow \text{Límite nivel de daño DS4}$$

$$SDP_{DS5} = g \left( \frac{H}{L} \right) \rightarrow \text{Límite nivel de daño DS5}$$

Donde f y g son funciones arbitrarias, a definir, basadas en la relación de aspecto de cada muro, y ajustadas para cada criterio de daño superficialmente visible.

### 3.6 Validación ecuación propuesta para definición de límites de nivel de daño mediante parámetros superficialmente visibles

Para la validación de la ecuación propuesta se utiliza una base de datos de 15 puntos de medición de los tres muros estudiados (CLBW01, CLBW02 y CLBW03) y de un cuarto muro que se agrega a la batería de ensayo, el muro CLBW04. Estos puntos se refieren a 15 etapas de medición en distintos instantes de los ensayos realizados, de los cuales fueron calculados sus parámetros de respuesta y sus parámetros de medición de daño superficialmente visible. El muro CLBW04 se agrega al estudio sólo a modo de validación de los resultados (no fue empleado en el ajuste de las relaciones propuestas) para un muro con una relación de aspecto cuadrada y con parámetros de diseño similares al muro CLBW01 pero que sin embargo utiliza otra unidad de albañilería más baja que la utilizada en los ensayos ya estudiados.

Tabla 3.3 Parámetros muro de validación CLBW04

| Muro   | Largo (mm) | Altura (mm) | Relación de aspecto | Area (mm <sup>2</sup> ) | Espesor (mm) | Altura de ladrillo (mm) | Espesor de junta (mm) | Resistencia a la compresión del mortero (MPa) | Resistencia a la compresión unidad (MPa) | Carga axial (% sigma/fm) | Cuantía de refuerzo horizontal (%) | Cuantía de refuerzo vertical (%) |
|--------|------------|-------------|---------------------|-------------------------|--------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| CLBW04 | 2690       | 2226        | 0.83                | 5987940                 | 140          | 71                      | 10                    | 17.36                                         | 7.62                                     | 5                        | 0.080                              | 0.4                              |

Para la validación se incorporan las etapas de reposo para un 84%, 93% y 100% de la resistencia máxima, los cuales según los límites definidos en la metodología presentan un nivel de daño moderado, y severo respectivamente de acuerdo con los límites establecidos en la metodología.

Este proceso se realiza para distintas etapas de medición de los muros estudiados, en donde previamente se conoce el nivel de daño alcanzado en el muro a partir de estudios previos (Calderón et al. 2021), y se compara la precisión que presenta esta formulación para estimar el nivel de daño alcanzado mediante estos parámetros de medición de nivel de daño superficialmente visible.

### **3.7 Conclusiones**

Se busca con la metodología descrita el investigar parámetros de medición de daño superficialmente visible que permitan conocer el comportamiento y evolución de grietas en muros de albañilería armada BJR-PG-RM sometidos a cargas cíclicas. Estos parámetros podrían ser indicadores del historial de esfuerzos de esfuerzos de un muro e incluso una herramienta para estimar el nivel de daño alcanzado por un muro luego de un evento sísmico.

## **CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS**

### **4.1 Introducción**

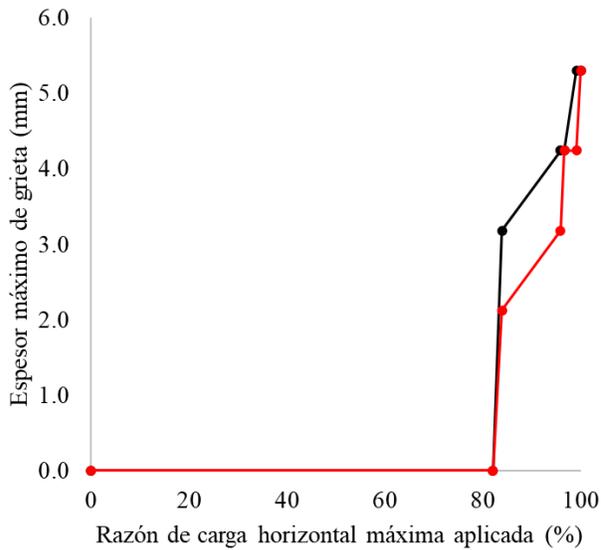
En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la evaluación del desarrollo del daño en los tres muros de albañilería armada sometidos a cargas cíclicas que abarca la investigación. Esta evaluación del daño se realiza mediante el análisis de los parámetros de medición de daño superficialmente visible definidos en la metodología: espesor máximo de grieta, razón de agrietamiento total y razón de agrietamiento diagonal. Posteriormente se presentan los resultados para la correlación del nivel de daño (daño moderado y daño severo) con los parámetros de medición de daño superficialmente visible, seleccionando el que mejor representa la evolución del daño superficialmente visible del muro (el cual resulta ser la razón de agrietamiento total) y definiendo una formulación para lograr estimar el nivel de daño de un muro sometido a una acción sísmica mediante el parámetro de medición de daño superficialmente visible seleccionado.

### **4.2 Evaluación del desarrollo del daño en ensayo de muros BJR-PG-RM sometidos a cargas cíclicas**

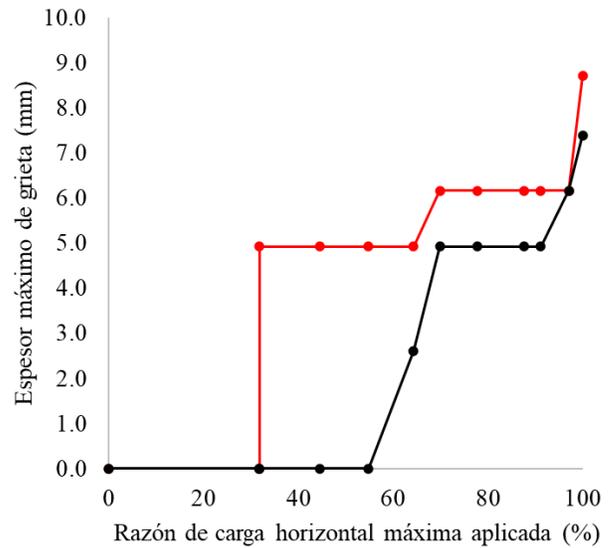
A continuación, se presentan los resultados para la evaluación del desarrollo del daño en los muros estudiados para los distintos parámetros de medición de daño superficialmente visible definidos.

#### **4.2.1 Espesor máximo de grieta**

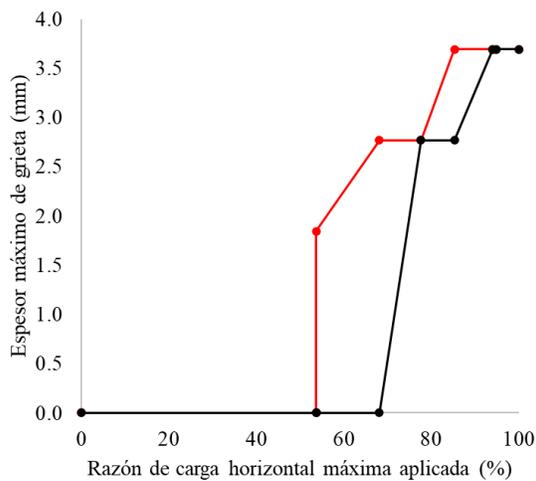
En la Figura 4.1 (a), (b) y (c) se presentan los resultados obtenidos para el análisis del espesor máximo de grieta respecto al avance de aplicación de la fuerza horizontal para los muros CLBW01, CLBW02 y CLBW03, respectivamente. Al comparar los resultados de los distintos muros, se observa que no se presenta un aumento progresivo en el espesor máximo de grieta en cada muro que permita estimar el nivel de daño en el que se encuentran. Incluso al alcanzar el 100% de la resistencia máxima en dirección de carga no se observa una brecha importante en el crecimiento de este espesor máximo de grieta que permita identificar el nivel de daño alcanzado por este muro.



(a) Muro CLBW01



(b) Muro CLBW02



(c) Muro CLBW03

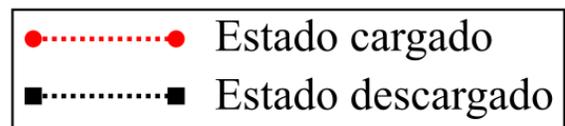


Figura 4.1 Espesor máximo de grieta en distintas etapas de aplicación de carga horizontal para (a) Muro CLBW01, (b) Muro CLBW02 y (c) Muro CLBW03.

Lo que sí se observa, es que para los muros CLBW01, CLBW02 y CLBW03 al 100% de su resistencia máxima en dirección de carga se pueden esperar espesores de grietas mayores a 5 mm, 7 mm y 3.5 mm respectivamente. Esta descripción del daño superficialmente visible podría ser un parámetro complementario a otro parámetro que represente de mejor manera la evolución del daño

superficialmente visible en el estudio para caracterizar a un muro que ya alcanzó el 100% de su resistencia máxima o que se encuentra con un elevado daño moderado. Es de interés notar que esta baja consistencia en los resultados para espesor máximo de grieta se puede atribuir a que al ser muros armados tanto vertical como horizontalmente, se desarrolla un daño distribuido en toda la superficie del muro producto de la activación del refuerzo, y no una sola grieta principal cuyo espesor aumenta progresivamente en proporción al desplazamiento máximo aplicado.

La Figura 4.2 presenta una comparación del espesor máximo de grieta entre los muros sometidos a estudio en estado de reposo (estado en donde el daño se hace superficialmente visible luego de una acción sísmica). En la figura se puede observar que los muros con relación de aspecto rectangular y esbelto presentan espesores de grieta máximos relativamente similares, y que en el muro con baja relación de aspecto se observa una tendencia a presentar espesores máximos de grieta superiores a los otros tipos de muro.

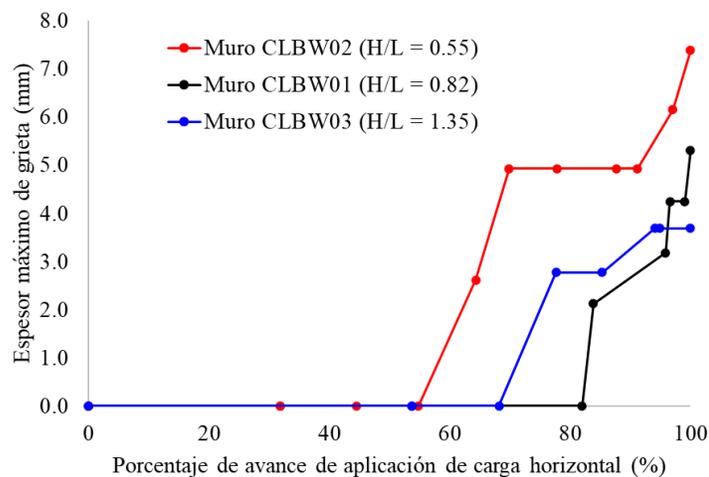


Figura 4.2 Espesor máximo de grieta en distintas etapas de aplicación de carga horizontal según relación de aspecto

#### 4.2.2 Razón de agrietamiento total

La Figura 4.3 muestra en qué nivel de resistencia del muro (respecto a su resistencia máxima) se presenta la primera aparición de daño para los distintos muros estudiados (daño observable cuando el muro es descargado).

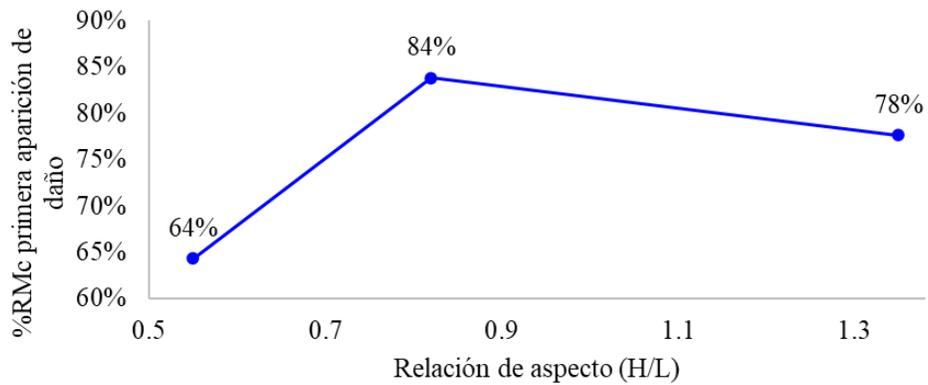


Figura 4.3 Primera aparición de daño para muros estudiados

Se observa que, para los muros cuadrados y esbeltos, el daño comienza en niveles similares de resistencia de estos, lo que corresponde a un valor cercano al 80% de carga horizontal máxima resistida. Por otra parte, el muro con baja relación de aspecto comienza a presentar daño al alcanzar el 64% de su carga horizontal máxima resistida.

En la Figura 4.4 se observa la razón de agrietamiento total en estado de reposo (luego de que se retira la carga horizontal de cada incremento de carga) para los instantes de primera aparición de daño, cuando se aplica un 98% de la carga horizontal máxima resistida y cuando se aplica un 100% de la carga horizontal máxima resistida para los muros CLBW01, CLBW02 y CLBW03.

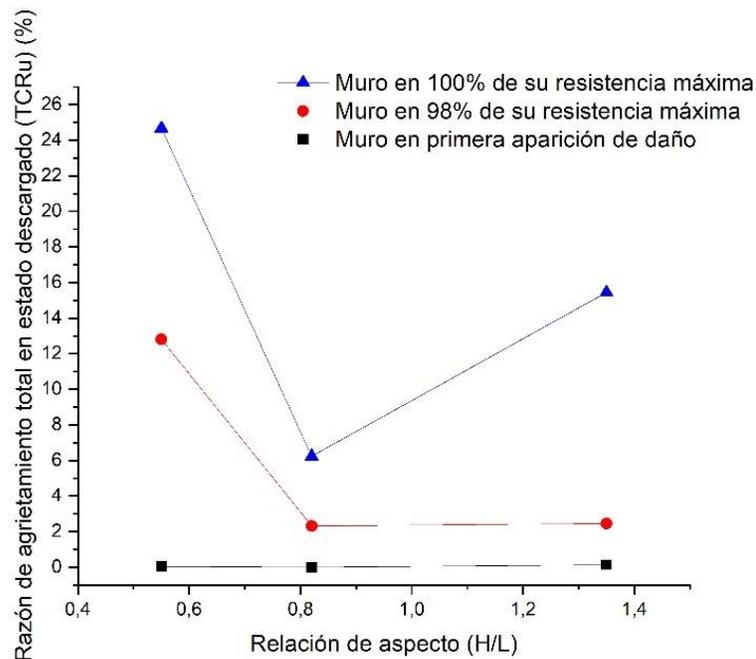


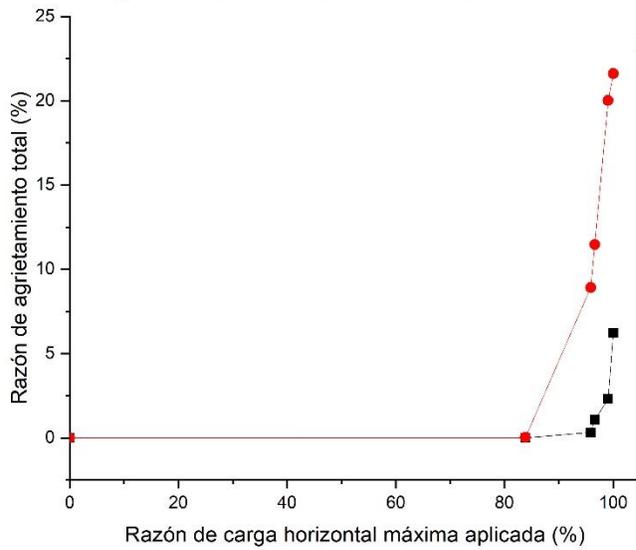
Figura 4.4 Razón de agrietamiento total en estado descargado v/s relación de aspecto en distintas etapas de aplicación de carga horizontal

De estos resultados se observa una notable progresión de la razón de agrietamiento total (para estado descargado) a medida que se incrementa la carga horizontal máxima aplicada para todos los muros, encontrando una brecha relevante en cada muro cuando este llega al 100% de su resistencia máxima en la dirección de carga. Se identifica también que el muro que presenta una mayor razón de agrietamiento total (en estado descargado) es el muro con baja relación de aspecto, el que presenta una mayor cantidad de daño en etapas más tempranas del ensayo. Además, este muro acumula más daño en su superficie previo a alcanzar el 100% de su resistencia máxima en dirección de carga. En cuanto al muro esbelto, se observa una diferencia importante en la razón de agrietamiento total al alcanzar el 100% de su resistencia máxima, muy superior a la observada en el muro cuadrado. Esto se puede atribuir a un deterioro mucho más abrupto del muro esbelto al llegar a su resistencia máxima, presentando una mayor propagación del daño en una menor porción del área superficial del muro. En el caso del muro cuadrado, como se mencionó anteriormente, este muestra la menor razón de agrietamiento al alcanzar el 100% de su resistencia máxima respecto a todos los muros sometidos a estudio, lo cual mantiene relación con la hipótesis de que los muros con relación de aspecto cuadrado presentan un comportamiento más dúctil que el muro de baja relación de aspecto, y más eficiente que el muro esbelto (con relación al mecanismo resistente de corte), según se discute en Calderón et al (2022).

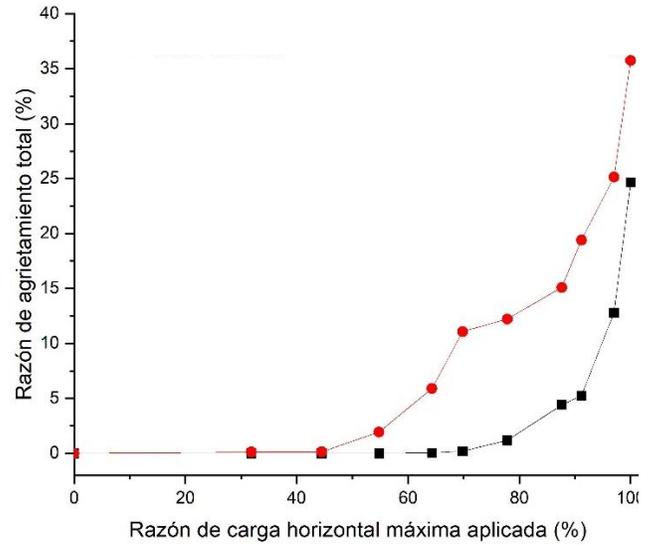
La Tabla 4.1 presenta la evolución de la razón de agrietamiento total respecto a la aplicación de carga horizontal para los muros sometidos a estudio cuando se encuentran en estado descargado (TCRu, por su sigla en inglés: Total Cracking Ratio in the Unloaded state), como para estado cargado (TCRI, por su sigla en inglés: Total Cracking Ratio in the Loaded state). Esto busca comparar el daño máximo que presentó el muro y que ya no es visible cuando se retira la carga. Estos resultados se presentan de forma gráfica en la Figura 4.5, en donde se compara para cada muro el avance en la razón de agrietamiento total respecto al avance de la fuerza horizontal aplicada.

Tabla 4.1 Resumen de resultados para razón de agrietamiento total para etapas estudiadas de muros en estado de carga y muros descargados

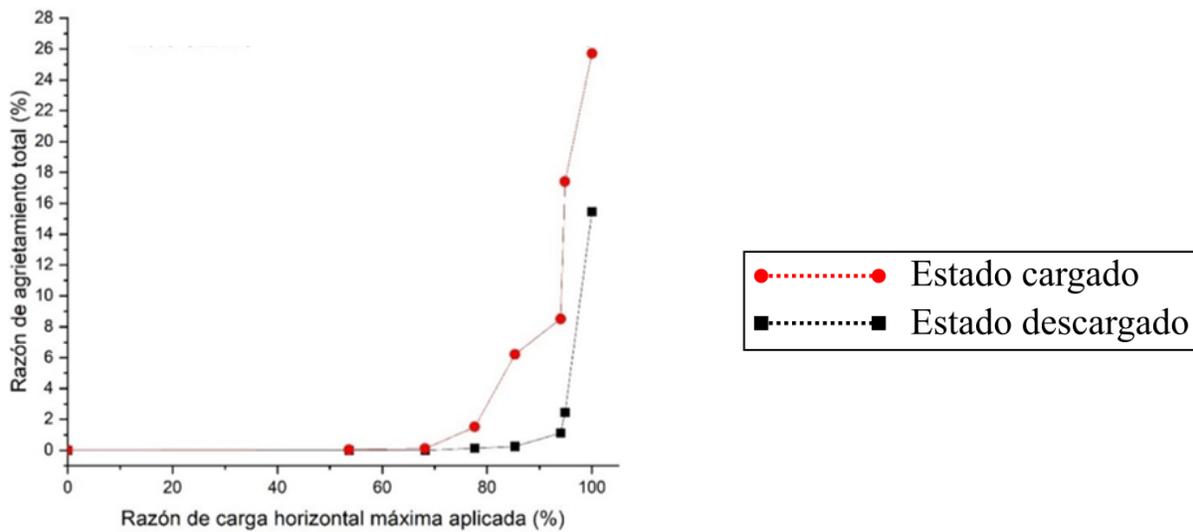
| Muro                     | Carga horizontal aplicada (kN) | NDS D (%) | Razón de carga horizontal máxima (%) | Desplazamiento horizontal (mm) | Drift (mm/mm) | Drift normalizado (Drift/Drift 100% RMc) (%) | Razón de agrietamiento total en estado descargado TCRu (%) | Razón de agrietamiento total en estado cargado TCRI (%) |
|--------------------------|--------------------------------|-----------|--------------------------------------|--------------------------------|---------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| CLBW01<br>Vn:266.4<br>kN | 0                              | 0%        | 0%                                   | 0.0                            | 0.0000        | 0%                                           | 0.00%                                                      | 0.00%                                                   |
|                          | 235                            | 88%       | 84%                                  | 2.7                            | 0.0012        | 34%                                          | 0.00%                                                      | 0.03%                                                   |
|                          | 268                            | 101%      | 96%                                  | 3.8                            | 0.0017        | 47%                                          | 0.33%                                                      | 8.92%                                                   |
|                          | 271                            | 102%      | 97%                                  | 4.9                            | 0.0022        | 61%                                          | 1.07%                                                      | 11.47%                                                  |
|                          | 277                            | 104%      | 99%                                  | 6.6                            | 0.0030        | 82%                                          | 2.32%                                                      | 20.01%                                                  |
|                          | 280                            | 105%      | 100%                                 | 8.1                            | 0.0037        | 100%                                         | 6.24%                                                      | 21.60%                                                  |
|                          | 258                            | 97%       | 92%                                  | 9.5                            | 0.0043        | 118%                                         | 10.30%                                                     | 24.77%                                                  |
|                          | 215                            | 81%       | 77%                                  | 10.3                           | 0.0046        | 127%                                         | 16.07%                                                     | 26.55%                                                  |
| 126                      | 47%                            | 45%       | 12.2                                 | 0.0055                         | 151%          | 21.78%                                       | 34.37%                                                     |                                                         |
| CLBW02<br>Vn:298.3<br>kN | 0                              | 0%        | 0%                                   | 0.0                            | 0.0000        | 0%                                           | 0.00%                                                      | 0.00%                                                   |
|                          | 134                            | 45%       | 32%                                  | 1.6                            | 0.0009        | 15%                                          | 0.00%                                                      | 0.12%                                                   |
|                          | 187                            | 63%       | 44%                                  | 2.3                            | 0.0013        | 22%                                          | 0.00%                                                      | 0.14%                                                   |
|                          | 230                            | 77%       | 55%                                  | 3.2                            | 0.0019        | 31%                                          | 0.00%                                                      | 1.95%                                                   |
|                          | 270                            | 90%       | 64%                                  | 4.0                            | 0.0024        | 39%                                          | 0.04%                                                      | 5.92%                                                   |
|                          | 293                            | 98%       | 70%                                  | 5.2                            | 0.0030        | 50%                                          | 0.21%                                                      | 11.08%                                                  |
|                          | 327                            | 110%      | 78%                                  | 6.2                            | 0.0036        | 60%                                          | 1.19%                                                      | 12.22%                                                  |
|                          | 368                            | 123%      | 88%                                  | 7.2                            | 0.0042        | 70%                                          | 4.41%                                                      | 15.10%                                                  |
|                          | 383                            | 128%      | 91%                                  | 8.1                            | 0.0047        | 78%                                          | 5.26%                                                      | 19.40%                                                  |
|                          | 407                            | 136%      | 97%                                  | 9.0                            | 0.0052        | 87%                                          | 12.81%                                                     | 25.13%                                                  |
| 420                      | 141%                           | 100%      | 10.3                                 | 0.0060                         | 100%          | 24.68%                                       | 35.74%                                                     |                                                         |
| 330                      | 111%                           | 79%       | 10.9                                 | 0.0063                         | 105%          | 43.35%                                       | 59.99%                                                     |                                                         |
| CLBW03<br>Vn:163.6<br>kN | 0                              | 0%        | 0%                                   | 0.0                            | 0.0000        | 0%                                           | 0.00%                                                      | 0.00%                                                   |
|                          | 87                             | 53%       | 54%                                  | 3.8                            | 0.00173       | 31%                                          | 0.00%                                                      | 0.04%                                                   |
|                          | 111                            | 68%       | 68%                                  | 5.0                            | 0.00228       | 41%                                          | 0.00%                                                      | 0.11%                                                   |
|                          | 126                            | 77%       | 78%                                  | 6.4                            | 0.00292       | 52%                                          | 0.14%                                                      | 1.52%                                                   |
|                          | 138                            | 85%       | 85%                                  | 8.0                            | 0.00361       | 65%                                          | 0.25%                                                      | 6.21%                                                   |
|                          | 153                            | 93%       | 94%                                  | 9.4                            | 0.00424       | 76%                                          | 1.11%                                                      | 8.52%                                                   |
|                          | 154                            | 94%       | 95%                                  | 10.9                           | 0.00492       | 88%                                          | 2.46%                                                      | 17.41%                                                  |
|                          | 162                            | 99%       | 100%                                 | 12.3                           | 0.00556       | 100%                                         | 15.45%                                                     | 25.72%                                                  |
|                          | 150                            | 92%       | 93%                                  | 13.6                           | 0.0062        | 111%                                         | 20.19%                                                     | 30.92%                                                  |
| 89                       | 54%                            | 55%       | 16.0                                 | 0.0072                         | 130%          | 23.09%                                       | 33.33%                                                     |                                                         |



(a) Muro CLBW01



(b) Muro CLBW02



(c) Muro CLBW03

Figura 4.5 Razón de agrietamiento total en estado descargado y en estado de cargado respecto a razón de carga horizontal máxima aplicada para (a) Muro CLBW01, (b) Muro CLBW02 y (c) Muro CLBW03.

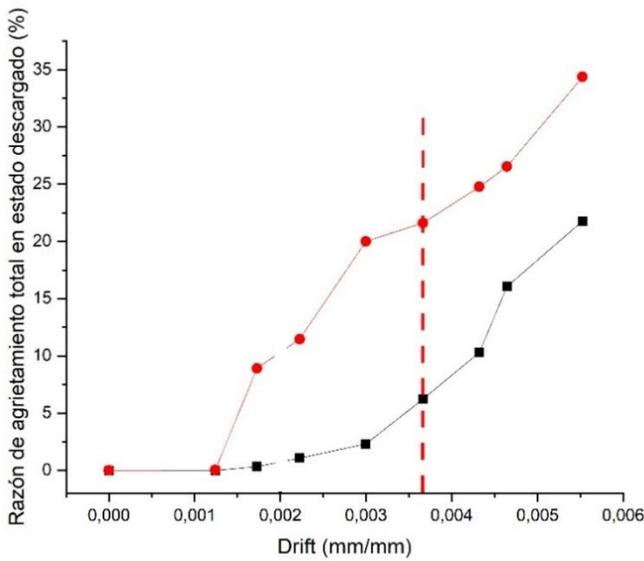
Los resultados muestran un aumento progresivo de la razón de agrietamiento en todos los muros una vez que observa la primera aparición de daño en el muro en estado descargado. Lo anterior es de esperarse pues, un muro desarrolla un mayor agrietamiento a medida que es sometido a cargas horizontales mayores. Se reconoce también en todos los muros que el daño superficialmente visible que aparece en etapas tempranas del ensayo es “recuperado” por el muro, ya que no es visible cuando el muro es descargado. Esta capacidad de recuperación del daño va disminuyendo a medida que

avanza el ensayo, ya que cada vez se aprecia más daño superficialmente visible al volver al estado de reposo (descargado). Es de interés entonces analizar esta capacidad de recuperación que tienen los muros luego de que son descargados, la cual se estudiará más adelante en esta sección.

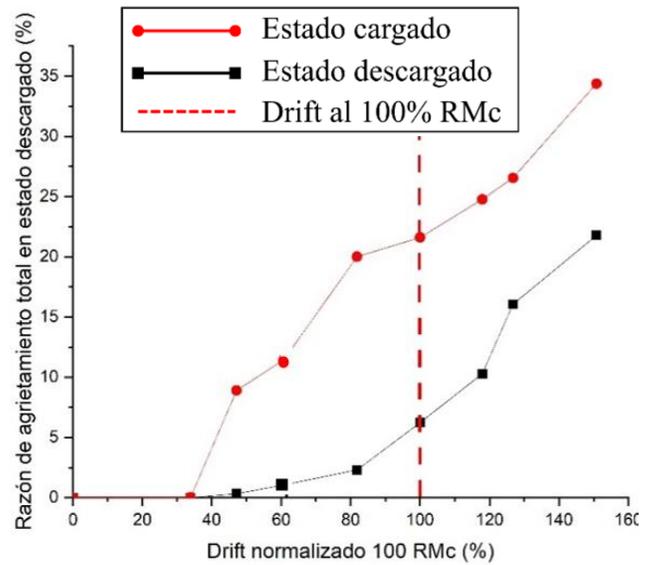
Por otro lado, es posible notar que en las etapas previas a alcanzar el 100% de su resistencia máxima, el muro con baja relación de aspecto presenta una razón de agrietamiento total notoriamente superior en cada etapa en comparación a los muros cuadrado y esbelto.

Se aprecia que en el muro CLBW01, de relación de aspecto cuadrado, el daño superficialmente visible en estado descargado es notoriamente inferior al daño superficialmente visible alcanzado cuando el muro está cargado. Este comportamiento es relativamente similar en el muro CLBW03, aunque este muro al alcanzar el 100% de su RMc (Resistencia máxima en dirección de carga) presenta un aumento importante en su razón de agrietamiento total respecto al muro cuadrado. Esto último se puede atribuir a un desarrollo del daño menos distribuido en la superficie del muro respecto al muro cuadrado. En cuanto al muro CLBW02, se observa que en todas las etapas presenta un daño superior tanto en estado cargado como en estado descargado respecto a los muros CLBW01 y CLBW03.

Se presenta también en las Figura (a), (c) y (e) la evolución de la razón de agrietamiento total para los muros en estado descargado y para los muros en estado cargado respecto al drift alcanzado, mientras que las Figura (b), (d) y (f) presentan el mismo parámetro pero respecto a un drift normalizado, lo que corresponde al drift alcanzado dividido por el drift alcanzado al alcanzar 100% de la RMc.

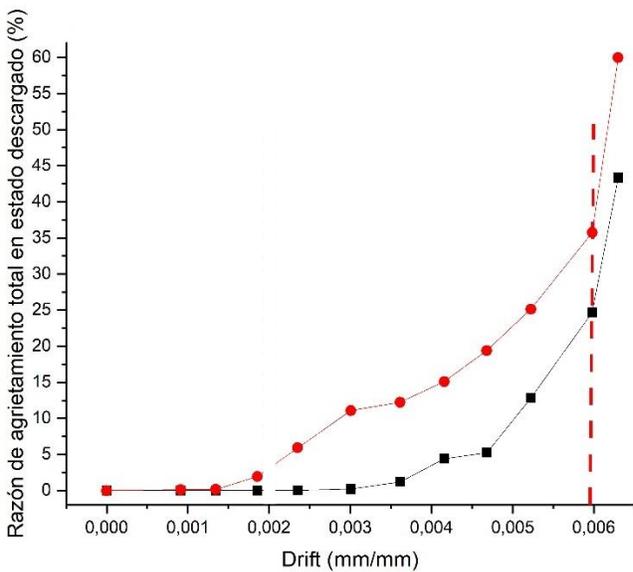


(a) Drift Muro CLBW01

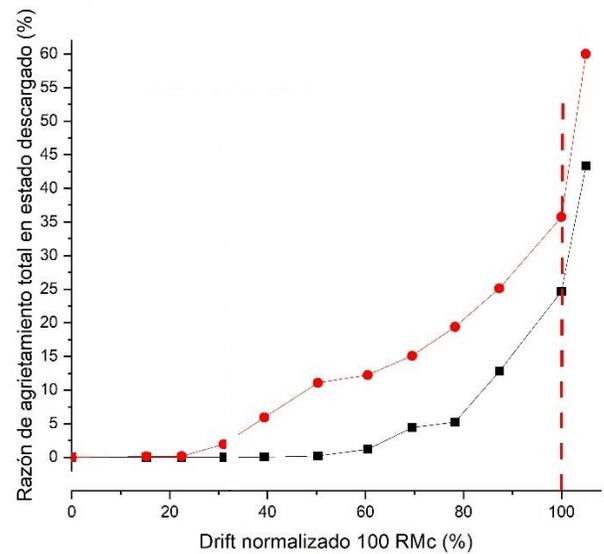


(b) Drift normalizado Muro CLBW01

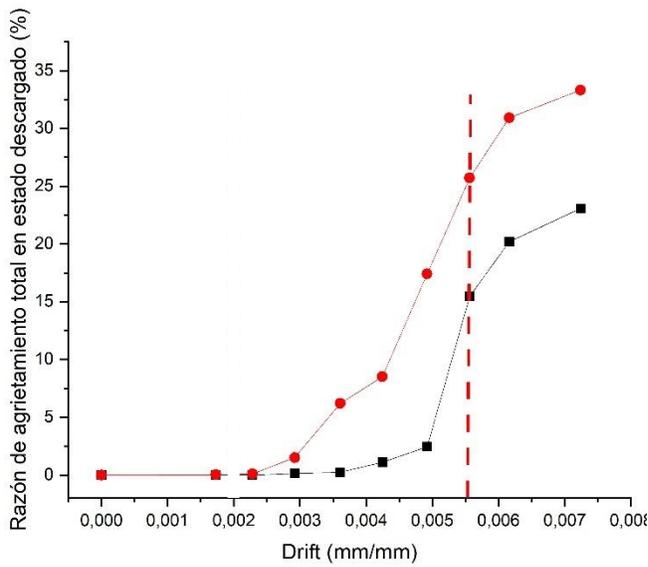
Figura 4.6 Razón de agrietamiento total en estado descargado y en estado cargado respecto al Drift y al Drift normalizado para (a) y (b) Muro CLBW01, (c) y (d) Muro CLBW02 y (e) y (f) Muro CLBW03 respectivamente.



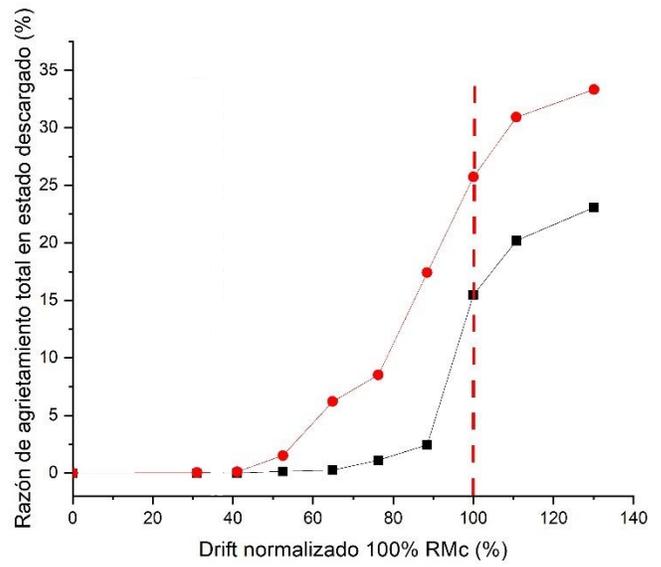
(c) Drift Muro CLBW02



(d) Drift normalizado Muro CLBW02



(e) Drift Muro CLBW03



(f) Drift normalizado Muro CLBW03

Figura 4.6 (continuación) Razón de agrietamiento total en estado descargado y en estado cargado respecto al Drift y al Drift normalizado para (a) y (b) Muro CLBW01, (c) y (d) Muro CLBW02 y (e) y (f) Muro CLBW03 respectivamente.

Se observa de este análisis respecto al drift que el muro CLBW01 comienza a presentar daño (en estado descargado) al alcanzar un drift del 0.0015 mm/mm, para luego evolucionar rápidamente al llegar a un drift del 0.0037 mm/mm cuando alcanza su resistencia máxima, momento en el que alcanza un nivel de daño severo. Respecto al muro CLBW02, se observa que el daño se comienza a presentar (en estado descargado) cuando el muro alcanza un drift del 0.0025 mm/mm, desarrollando el daño superficialmente visible hasta llegar a un drift del 0.006 mm/mm al alcanzar su resistencia máxima. Para el muro CLBW03 se observa que el daño se comienza a presentar (en estado descargado) cuando el muro alcanza un drift del 0.003 mm/mm, desarrollando el daño superficialmente visible hasta llegar a un drift del 0.0056 mm/mm al alcanzar la resistencia máxima en dirección de carga, presentando un comportamiento similar al muro CLBW02, pero con una menor razón de agrietamiento total visible en cada etapa del ensayo.

La Figura 4.7 presenta una comparación de agrietamiento total que cada muro desarrolla respecto a la razón entre la carga horizontal aplicada y la resistencia experimental de cada muro. avance de la fuerza horizontal en dirección de carga y al drift presentado. En esta comparación se observa que el muro CLBW01 es el muro que presenta un menor daño superficialmente visible al alcanzar el 100% de su resistencia máxima y en todas las etapas antes de llegar a este punto. El muro CLBW02, de baja

relación de aspecto, es el muro que presenta mayor daño superficialmente visible en todas las etapas del ensayo. El muro esbelto presenta un comportamiento intermedio entre el muro de relación de aspecto cuadrada y el muro de baja relación de aspecto.

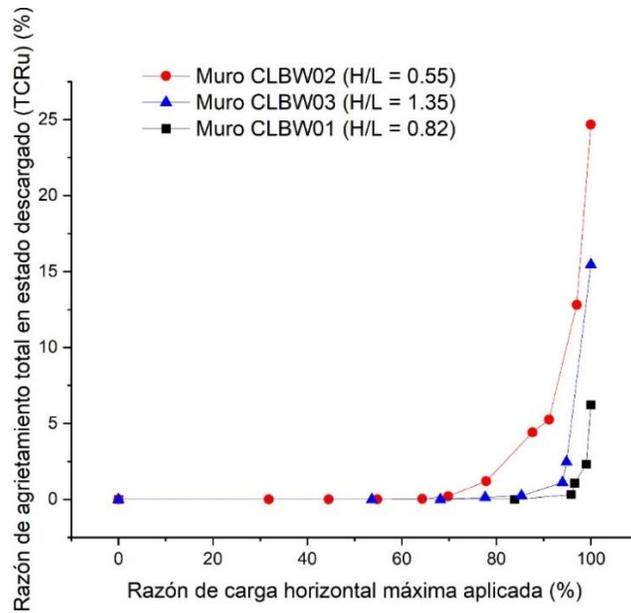


Figura 4.7 Comparación razón de agrietamiento total en estado descargado para muros CLBW01, CLBW02 y CLBW03 respecto a la razón de carga horizontal máxima aplicada

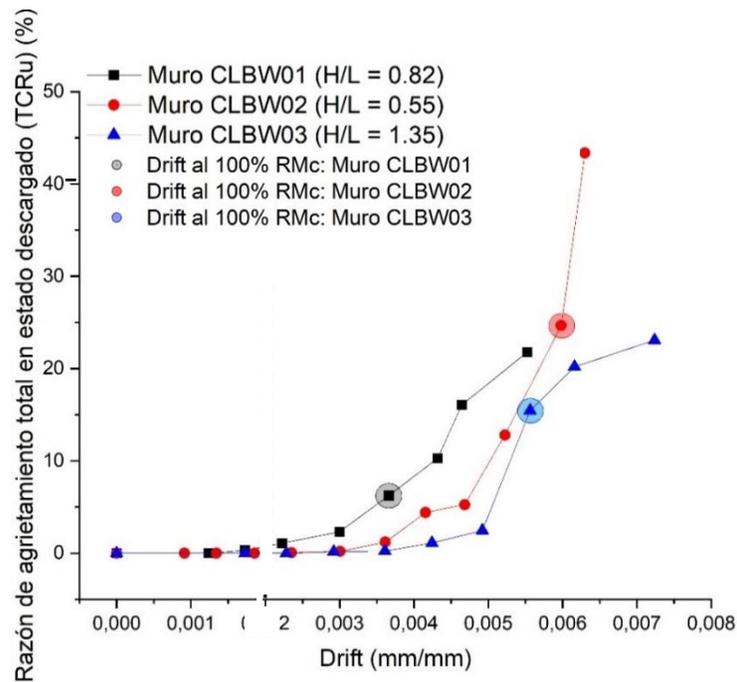


Figura 4.8 Comparación razón de agrietamiento total en estado descargado muros CLBW01, CLBW02 y CLBW03 respecto al drift presentado

La Figura 4.8 presenta una comparación de la razón de agrietamiento total que cada muro desarrolla respecto al drift alcanzado por cada muro. Se observa en el muro CLBW01 que el daño se desarrolla de forma progresiva hasta llegar a la falla (i.e., sobrepasar su resistencia). En el caso del muro CLBW02 se observa que la probeta presentó mayor drift antes de mostrar un incremento en la razón de agrietamiento en estado descargado en comparación con el muro CLBW01. Sin embargo, el incremento de la razón de agrietamiento reproducida por el muro CLBW02 es mucho más abrupto que lo observado en el muro CLBW01, lo cual se puede asociar a las grandes cargas que resiste y a su baja altura. En el caso del muro CLBW03, de relación de aspecto esbelta, se observa que es en el que el agrietamiento se produce a mayor desplazamiento.

La Figura 4.9 muestra la capacidad de recuperación de los muros sometidos a estudio respecto a la carga aplicada (presentada normalizada por la resistencia lateral experimental de cada muro) (Figura 4.9 (a)), y respecto al drift alcanzado (presentado como normalizado por el drift de carga máxima), Por capacidad de recuperación se entiende la razón entre el área agrietada cargada y descargada, lo que entrega una medida de la capacidad que tiene un muro para volver a su estado inicial (i.e., su capacidad para cerrar las grietas superficialmente visibles una vez que se retira la carga que provoca el agrietamiento). Se debe notar que vez agrietado un muro, el cierre de grietas meramente visual (puede disminuir su área agrietada), mas no mecánico.

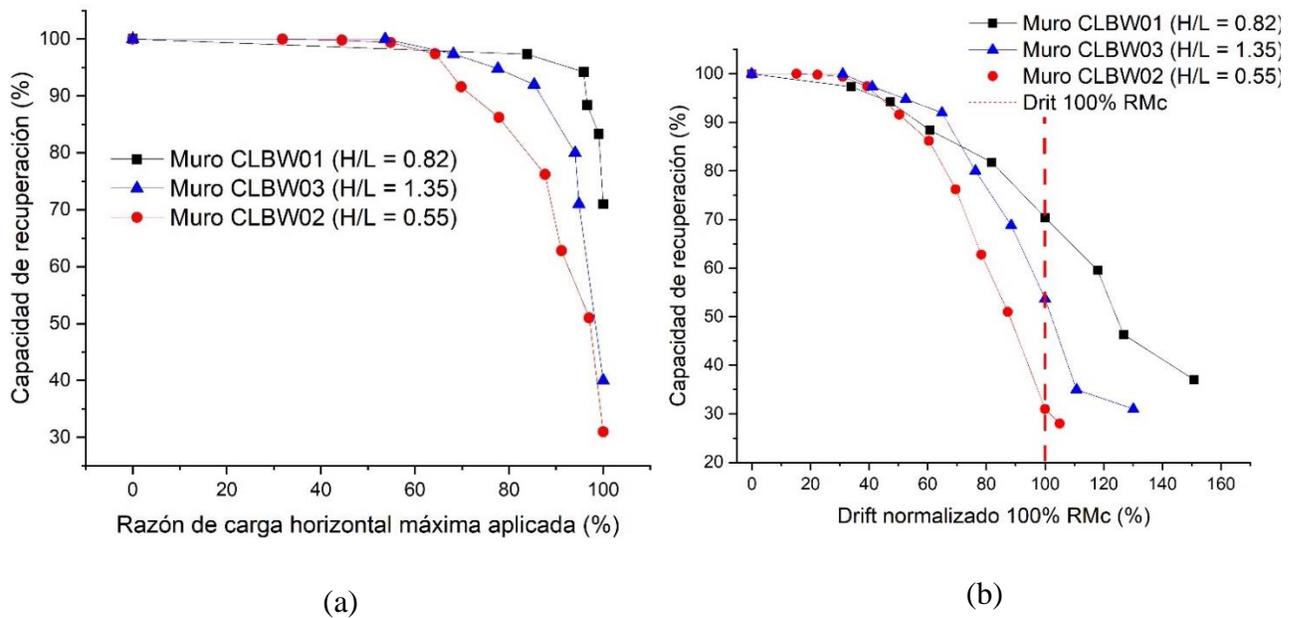


Figura 4.9 Capacidad de recuperación muros estudiados respecto a: (a) razón de carga horizontal máxima aplicada y (b) drift normalizado 100% RMc

De la Figura 4.9 (a) se observa, en concordancia con los resultados anteriores, que el muro con relación de aspecto cuadrado (CLBW01) es el muro que presenta una mejor capacidad de recuperación en todas las etapas de aplicación de carga horizontal, seguido por el muro esbelto (CLBW03) y finalmente el muro con baja relación de aspecto (CLBW02), el cual es el muro que presenta un decaimiento considerablemente mayor de su capacidad de recuperación en todas las etapas del ensayo. De la Figura 4.9 (b), respecto al análisis de drift normalizado, se observa nuevamente que el muro con relación de aspecto cuadrado es el muro con la mejor capacidad de recuperación al alcanzar el 100% de su drift normalizado. Nuevamente el muro con baja relación de aspecto es el muro que presenta mayor decaimiento en su capacidad de recuperación al alcanzar el 100% de su RMc. Las razones para estos resultados se explican al observar que el muro con relación de aspecto cuadrado CLBW01 es el muro que presenta una mejor distribución del daño en la superficie del muro, mientras el muro con relación de aspecto esbelta CLBW03 presenta un daño concentrado en una porción de su superficie. Por otra parte, el muro con baja relación de aspecto CLBW02 es el muro que muestra una menor ductilidad y rigidez.

#### **4.2.3 Razón de agrietamiento diagonal**

Primeramente, se analizan los resultados obtenidos sobre la proporción del área agrietada total que se encuentra contenida en el área del puntal de compresión diagonal cuando el muro alcanza el 100% de su resistencia máxima en dirección de carga. Estos resultados, por relación de aspecto, se presentan en la Figura 4.10. Se observa que el muro con relación de aspecto cuadrado es el que presenta una mejor correlación respecto al modelo de puntal de compresión diagonal, pues es el que presenta un mayor valor al llegar al 100% de su resistencia máxima. Es posible notar la baja idoneidad encontrada para este criterio en los muros estudiados con baja y alta relación de aspecto, ya que estos llegan a un valor del parámetro de 39% y 63 respectivamente. Considerando que el parámetro de agrietamiento de la zona diagonal no es adecuado en muros con relación de aspecto distantes a la cuadrada, el resto de los resultados asociados a este parámetro se presenta resumidamente.

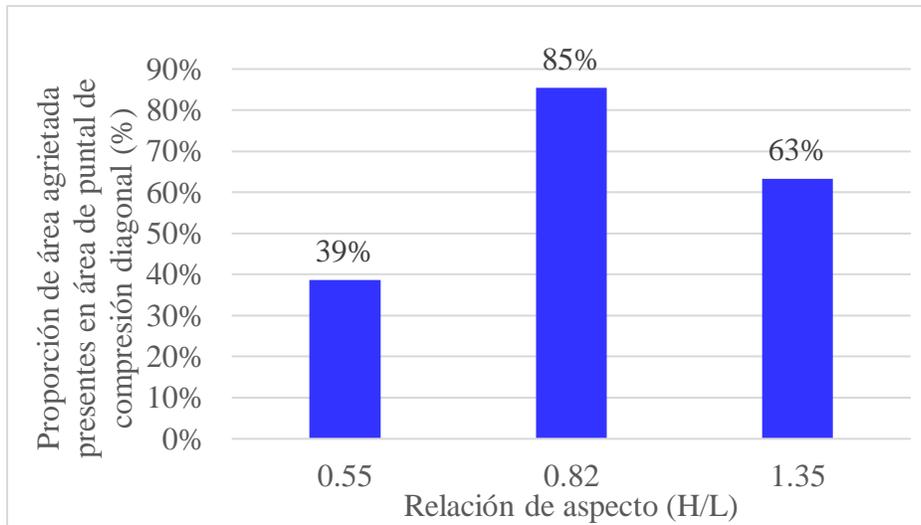


Figura 4.10 Proporción de área agrietada presente en área de puntal de compresión diagonal respecto a relación de aspecto para muros que ya alcanzaron el 100% de su resistencia máxima en dirección de carga.

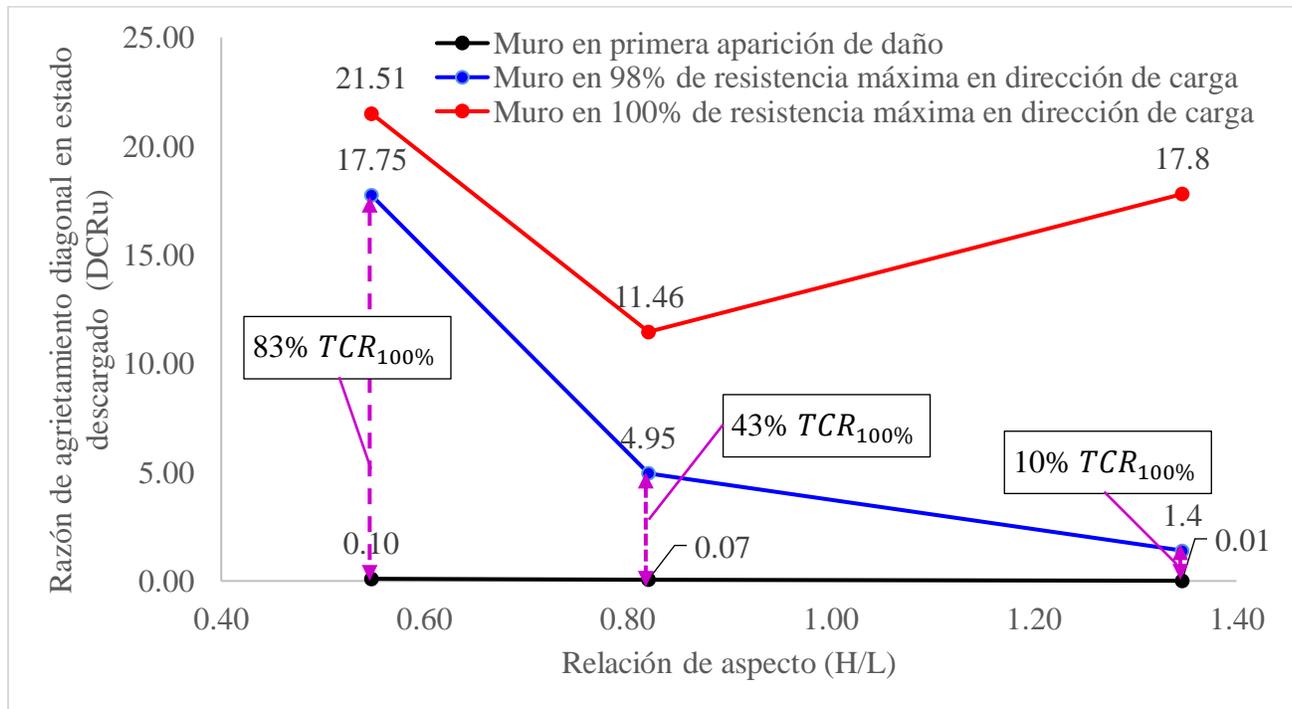


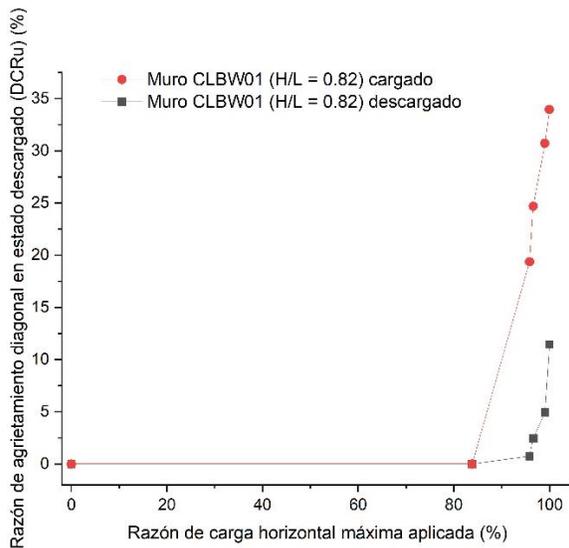
Figura 4.11 Razón de agrietamiento diagonal en estado descargado v/s relación de aspecto para distintas etapas de avance de aplicación de carga horizontal

En cuanto a la razón de agrietamiento diagonal en estado descargado, se observa un comportamiento similar a la razón de agrietamiento total en estado descargado, ya que muestra un progresivo aumento para cada muro luego de la primera aparición de daño descargado y hasta que se aplica una carga equivalente al 98% de su resistencia máxima, para luego mostrar un incremento considerable cuando

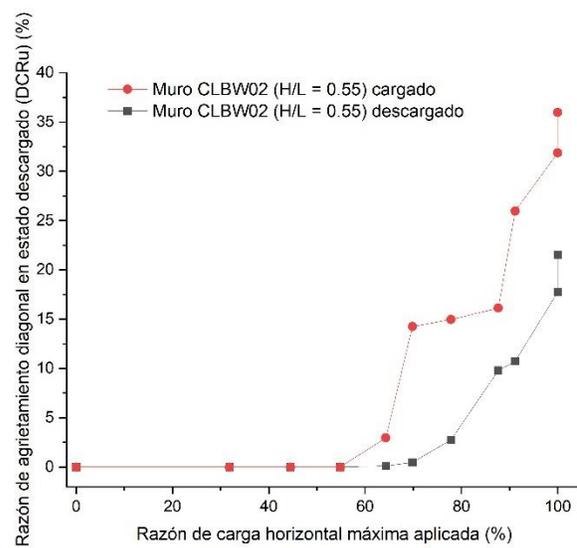
los muros CLBW01 y CLBW03 alcanzan el 100% de su resistencia máxima. Esta diferencia es menor en el caso del muro CLBW02 debido a que gran parte del daño se desarrolla en etapas tempranas del ensayo. En concreto, se observa en la Figura 4.11 que para el muro con baja relación de aspecto CLBW02, el 83% del área agrietada al alcanzar el 100% de su resistencia máxima es área agrietada ya existente antes de alcanzar este nivel de daño. En comparación, se encuentra que el área agrietada ya existente antes de alcanzar el 100% de su resistencia máxima, para los muros cuadrado y esbelto, es del 43% y 10% respectivamente.

Se puede observar en mayor profundidad el comportamiento de cada muro estudiado en la Figura 4.12, donde se compara el estado cargado con el descargado. Se observa, al igual que en la razón de agrietamiento total, como el muro CLBW02 (de baja relación de aspecto) presenta una mayor razón de agrietamiento en todas las etapas que los otros dos muros. En cuanto a los muros CLBW01 y CLBW03, se observa que presentan un comportamiento muy similar antes de que el muro CLBW03 alcance el 100% de su RMc. Esto se puede atribuir a que el muro esbelto presenta mayor parte de su área agrietada fuera del área diagonal en comparación al muro CLBW01, en donde la mayor cantidad del agrietamiento se concentra en la diagonal.

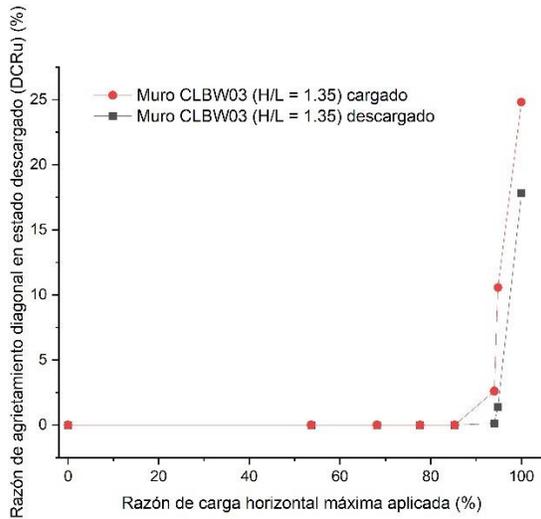
Cabe destacar que la Figura 7.4 de anexos presenta mayores resultados sobre este parámetro.



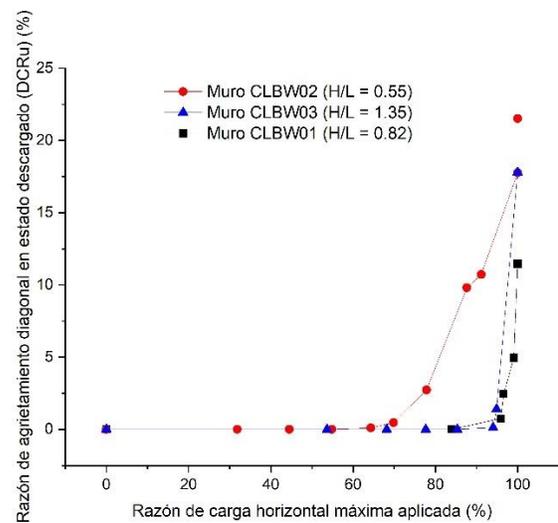
(a) Muro CLBW01



(b) Muro CLBW02



(c) Muro CLBW03

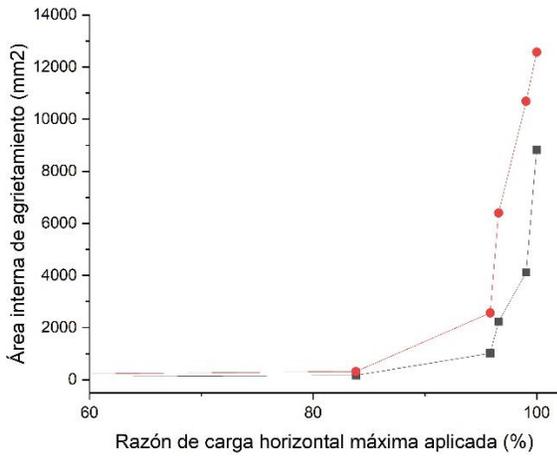


(d) Comparación de muros sometidos a estudio

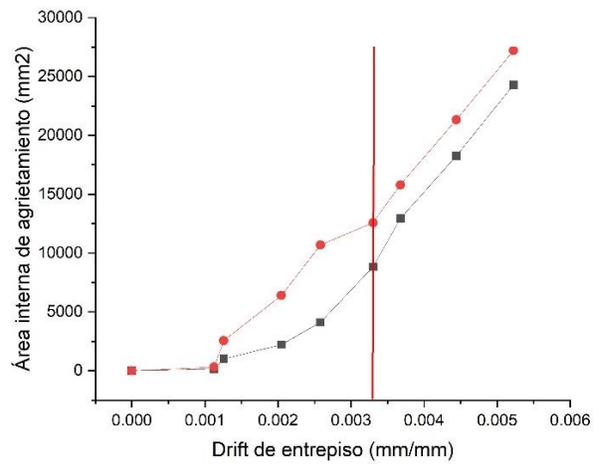
Figura 4.12 Razón de agrietamiento diagonal (DCR) v/s razón de carga horizontal máxima aplicada para (a) Muro CLBW01, (b) Muro CLBW02, (c) Muro CLBW03 y (d) comparación de muros sometidos a estudio

#### 4.2.4 Área agrietada interna

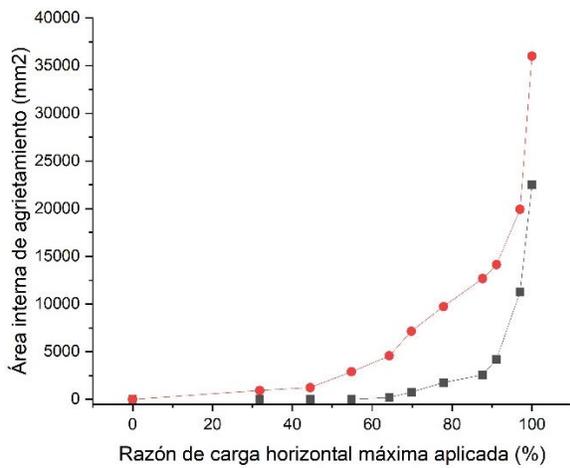
En la Figura 4.13 se observa el área interna agrietada de cada muro estudiado, tanto para razón de carga horizontal máxima aplicada ((a), (b) y (c)) como para drift de entrepiso ((d), (e) y (f)). En la Figura 4.14 se presenta una comparación entre los muros estudiados para el área agrietada interna en estado descargado respecto a la razón de carga horizontal máxima. Se observa un comportamiento similar al observado en la razón de agrietamiento total, presentando una área agrietada interna superior en el muro de baja relación de aspecto CLBW02, seguido por el muro esbelto CLBW03, y finalmente, el muro CLBW01.



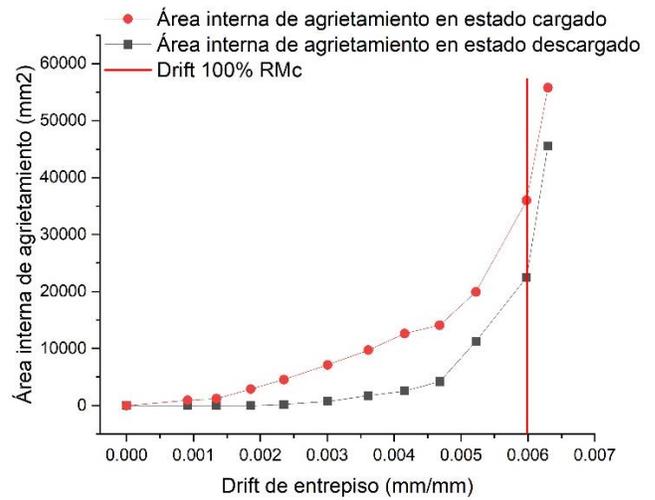
(a) Área agrietada interna respecto a razón de carga horizontal máxima aplicada Muro CLBW01



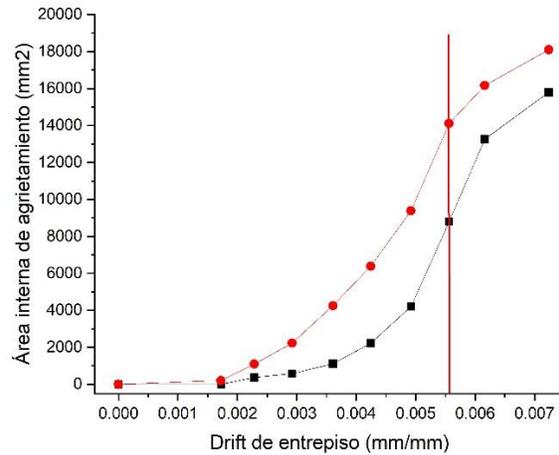
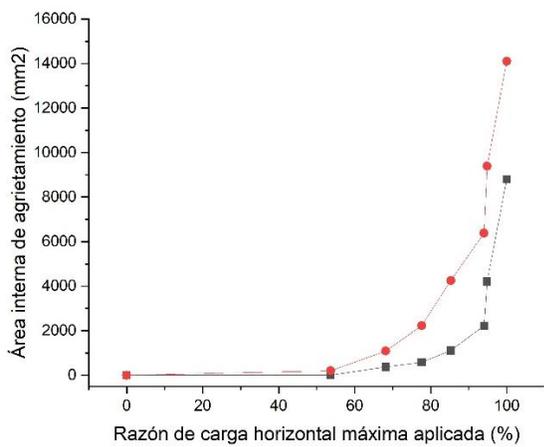
(d) Área agrietada interna respecto a drift de entrepiso Muro CLBW01



(b) Área agrietada interna respecto a razón de carga horizontal máxima aplicada Muro CLBW02



(e) Área agrietada interna respecto a drift de entrepiso Muro CLBW02



(c) Área agrietada interna respecto a razón de carga horizontal máxima aplicada Muro CLBW03

(f) Área agrietada interna respecto a drift de entrepiso Muro CLBW03

Figura 4.13 Área agrietada interna respecto a razón de carga horizontal máxima aplicada para (a) Muro CLBW01, (b) Muro CLBW02, (c) Muro CLBW03, y respecto a drift de entrepiso para para (d) Muro CLBW01, (e) Muro CLBW02, (f) Muro CLBW03

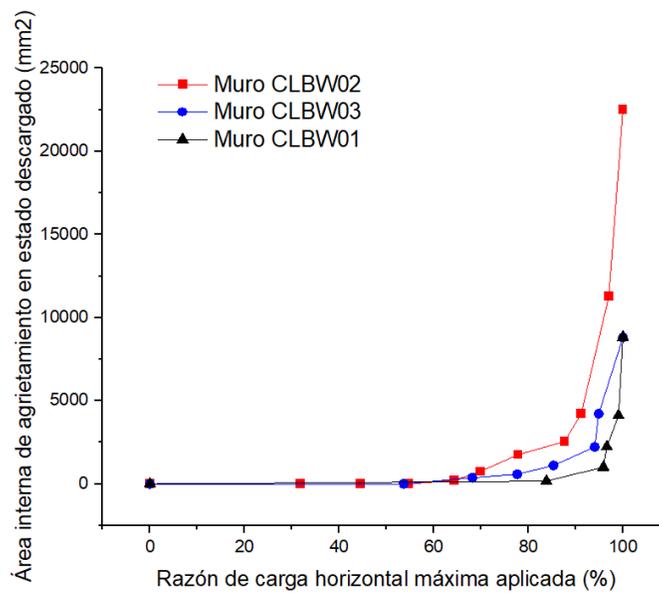


Figura 4.14 Comparación muros estudiados para (a) Área agrietada interna respecto a razón de carga horizontal máxima aplicada y (b) Área agrietada interna respecto a drift de entrepiso.

### 4.3 Definición de nivel de daño mediante parámetros de medición de daño superficialmente visible

Para la propuesta de formulación primeramente se presentan las curvas histeréticas para cada muro en donde se identifican los niveles de daño para falla de corte basados en la definición de la literatura. Los estados de daño empleados en este trabajo son:

- **Nivel de daño moderado**, corresponde a la primera aparición de daño superficialmente visible en el muro en estado de reposo
- **Nivel de daño severo**, corresponde a cuando el muro alcanza el 96-98% de su resistencia máxima. Esto difiere de lo propuesto en la literatura, donde se define este punto cuando la carga lateral alcanza un 100% de la resistencia máxima del muro. La modificación se justifica en el hecho de que, debido a que al alcanzar el 100% de su resistencia máxima, un muro presenta un daño superficialmente visible variable y con un patrón de formación de formación de grietas muy distribuido, por lo que se elige el último punto estudiado antes de alcanzar este límite en donde todavía se presenta un comportamiento y patrón de agrietamiento que correlaciona mejor con un incremento de los estados anterior.

Las figuras Figura 4.155, Figura 4.166 y Figura 4.177 presentan dichas curvas histeréticas para los muros CLBW01, CLBW02 y CLBW03 en respectivamente. Para la curva histerética de cada muro se caracterizan los estados de daño mediante parámetros de respuesta de un muro (aplicación de carga máxima, desplazamiento horizontal y drift) y criterios de medición de daño superficialmente visible (razón de agrietamiento total, razón de agrietamiento diagonal y espesor máximo de grieta) tanto para el muro en estado cargado como para el muro descargado. Respecto al criterio de medición de daño superficialmente visible, es posible indicar que el parámetro en estado cargado se asocia al valor máximo alcanzado, y en el estado descargado se puede asociar a los niveles de daño superficialmente observables luego de una acción sísmica. La Tabla 4.2 presenta los valores asociados a esta caracterización de estados de daño para los muros estudiados. Cabe destacar que la simbología empleada en las figuras Figura 4.155, Figura 4.166 y Figura 4.177 se describen en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Parámetros de respuesta y parámetros de medición de daño superficialmente visible para estados límites de definición de daño en muros estudiados

| Muro                                                        | CLBW01                          |        |        | CLBW02                          |        |        | CLBW03                          |        |        |
|-------------------------------------------------------------|---------------------------------|--------|--------|---------------------------------|--------|--------|---------------------------------|--------|--------|
| Relación de aspecto                                         | 0.82                            |        |        | 0.55                            |        |        | 1.35                            |        |        |
| % RM                                                        | Primera aparición de daño (84%) | 98%    | 100%   | Primera aparición de daño (64%) | 97%    | 100%   | Primera aparición de daño (78%) | 96%    | 100%   |
| NDS                                                         | 0.88                            | 1.04   | 1.05   | 0.90                            | 1.36   | 1.41   | 0.77                            | 0.94   | 0.99   |
| Desplazamiento horizontal (Hd) (mm)                         | 2.48                            | 5.7    | 7.29   | 4.05                            | 8.99   | 10.29  | 6.45                            | 10.86  | 12.28  |
| Deformación horizontal ( $\delta$ ) (mm/mm)                 | 0.0009                          | 0.0021 | 0.0027 | 0.0013                          | 0.0029 | 0.0033 | 0.0039                          | 0.0066 | 0.0075 |
| Drift (mm/mm)                                               | 0.0011                          | 0.0026 | 0.0033 | 0.0024                          | 0.0052 | 0.006  | 0.0029                          | 0.0049 | 0.0056 |
| Espesor máximo de grieta en reposo (mm)                     | 2.1                             | 4.2    | 4.2    | 2.6                             | 4.9    | 6.2    | 2.8                             | 3.7    | 3.7    |
| Espesor máximo de grieta alcanzado (mm)                     | 3.2                             | 5.3    | 5.3    | 4.9                             | 6.2    | 8.7    | 2.8                             | 3.7    | 3.7    |
| Razón de agrietamiento total en estado descargado (TCRu)    | 0.0013                          | 2.32   | 6.24   | 0.04                            | 12.81  | 24.68  | 0.14                            | 2.46   | 15.45  |
| Razón de agrietamiento total cargado (TCRI)                 | 0.03                            | 20.01  | 21.60  | 5.92                            | 25.13  | 35.74  | 1.52                            | 17.41  | 25.72  |
| Razón de agrietamiento diagonal en estado descargado (DCRu) | 0.00                            | 4.95   | 11.46  | 0.10                            | 17.75  | 21.51  | 0.00                            | 1.40   | 17.80  |
| Razón de agrietamiento diagonal cargado (DCRI)              | 0.00                            | 30.71  | 33.96  | 2.96                            | 31.88  | 35.98  | 0.00                            | 10.57  | 24.81  |

**Muro en 84 % de resistencia máxima en dirección de carga (240 kN)**  
 TCRu = 0.001 % ( 0.03 % TCRI)  
 DCRu = 0.00 % ( 0.00 % DCRI)  
 Hd = 2.7 mm  
 max<sub>width</sub> = 3.2 mm (espesor máximo histórico 4.2 mm)  
 Drift = 0.0011 mm/mm

**Muro en 98 % de resistencia máxima en dirección de carga (275 kN)**  
 TCRu = 2.32 % (20.01 % TCRI)  
 DCRu = 4.95 % (30.71 % DCRI)  
 Hd = 6.6 mm  
 max<sub>width</sub> = 4.2 mm (espesor máximo histórico 5.3 mm)  
 Drift = 0.0026 mm/mm

**Muro en 100% de resistencia máxima en dirección de carga (280 kN)**  
 TCRu = 6.24 % (21.60 % TCRI)  
 DCRu = 11.46 % (33.96 % DCRI)  
 Hd = 8.1 mm  
 max<sub>width</sub> = 4.2 mm (espesor máximo histórico 5.3 mm)  
 Drift = 0.0033 mm/mm

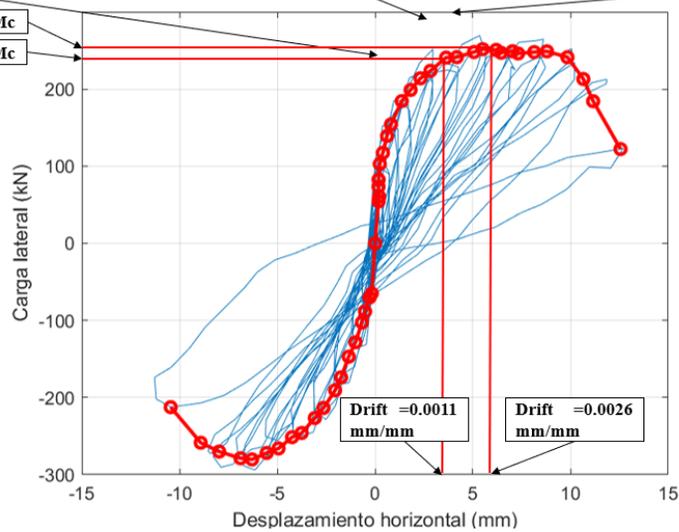


Figura 4.15 Curva histerética muro CLBW01 con caracterización de estados de daño

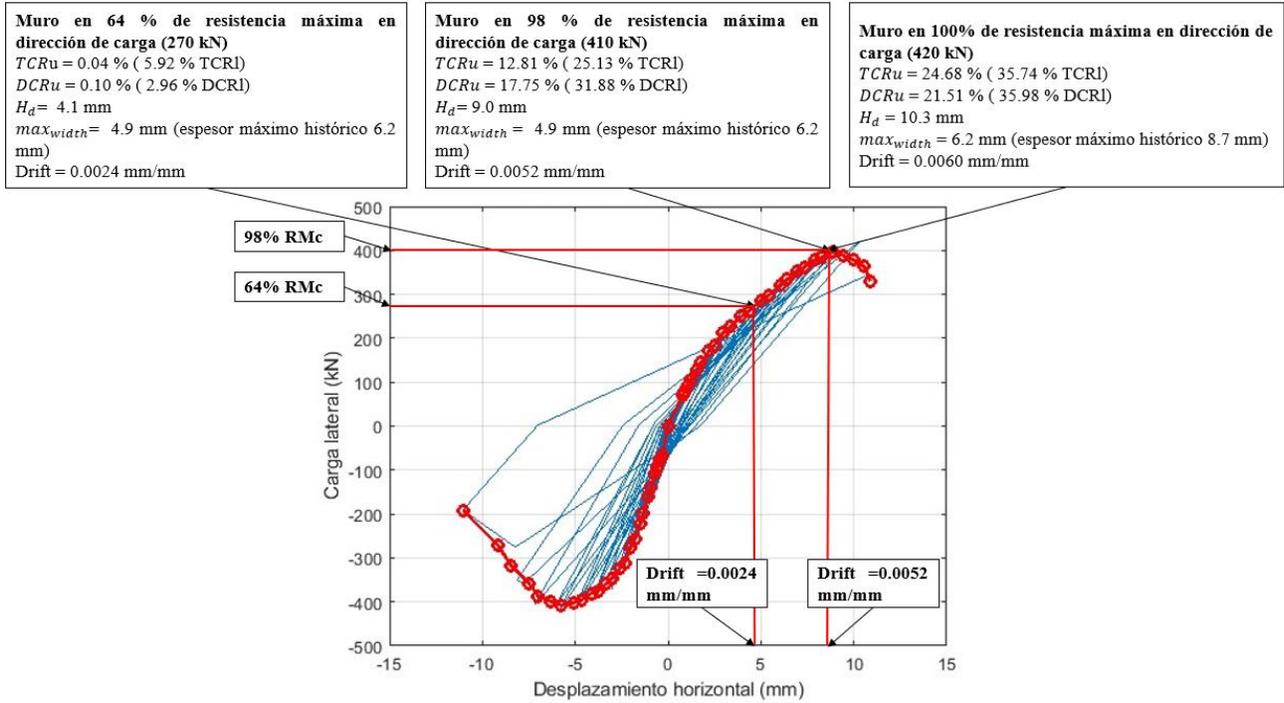


Figura 4.16 Curva histerética muro CLB02 con caracterización de estados de daño

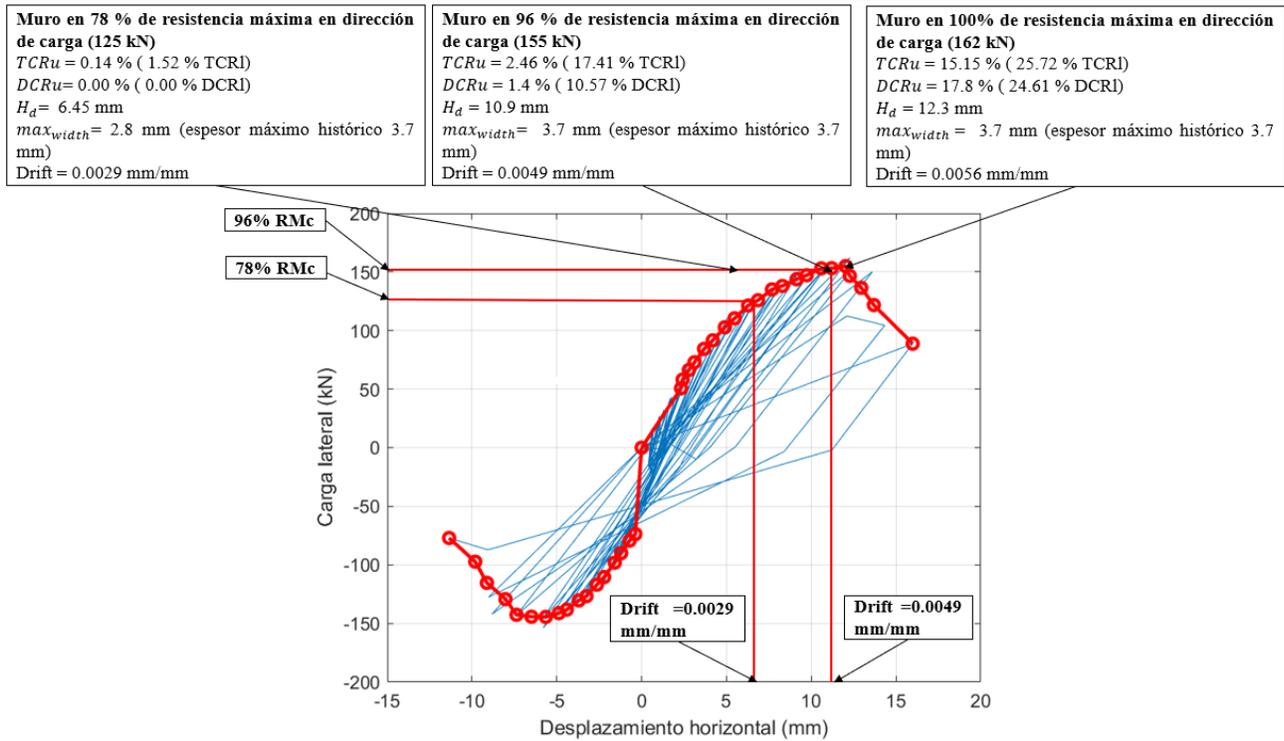


Figura 4.17 Curva histerética muro CLB03 con caracterización de estados de daño

Una vez caracterizados los estados límites de definición de daño, se propone emplear el criterio de medición de daño superficialmente observables para estimación de nivel de daño (nivel de daño

moderado y nivel de daño severo) que experimentó un muro. En particular, se utiliza la razón de agrietamiento total en estado descargado (TCRu) debido a que muestra una mejor correlación con el cómo se desarrolla el agrietamiento en los muros estudiados. No se considera una formulación para el espesor máximo de grieta pues no se encontró una progresión de daño consistente bajo este criterio, ni tampoco para la razón de agrietamiento diagonal pues, tampoco se observa que las grietas se desarrollen solo en el área diagonal. Estos dos comportamientos son atribuibles a que son muros con cuantías de refuerzo horizontal mayores a la mínima, por lo que se observa un agrietamiento más distribuido en la superficie del muro que en un muro que no presenta refuerzo horizontal.

#### 4.3.1 Formulación para estimación de nivel de daño mediante razón de agrietamiento total

Para estimar el nivel de daño mediante el criterio de medición de daño superficialmente visible de razón de agrietamiento total en estado descargado (TCRu), se propone una función que corresponde al límite de cada estado de daño. La función se obtiene por interpolación potencial ajustada por método de mínimos cuadrados a la razón de agrietamiento total en estado descargado (TCRu) para los puntos de primera aparición de daño de cada muro, para la estimación de nivel de daño moderado, y de 96%-98% de aplicación de carga horizontal máxima de cada muro, para la estimación de nivel de daño severo. Ambas funciones utilizan como variable independiente la relación de aspecto  $H/L$ .

Para estimar la razón de agrietamiento total en estado descargado (TCRu) correspondiente al nivel de daño moderado (DS4) se ajusta la ecuación ( 4-1 ), la cual es una interpolación potencial con coeficiente de determinación  $R^2 = 0.88$  para la razón de agrietamiento total en estado descargado que presenta un muro que presenta este nivel de daño, es decir, que se observa su primera aparición de daño superficialmente visible en estado descargado.

$$TCR_{DS4} = 0.08 \left( \frac{H}{L} \right)^{1.34} \quad (4-1)$$

Para estimar la razón de agrietamiento total en estado descargado asociada a un nivel de daño severo (DS5) se propone la interpolación potencial, encontrada en la ecuación ( 4-2 ) con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.87$ , la cual interpola los puntos del 96%-98% de aplicación de carga horizontal máxima, respecto a la relación de aspecto, para cada muro estudiado.

$$TCR_{DS5} = 3.11 \left(\frac{H}{L}\right)^{-1.76} \quad (4-2)$$

En la Figura 4.18 se examina la representación gráfica de las ecuaciones recién propuestas para la definición de límites de estado de daño, que permite estimar el estado de daño de un muro sometido a una acción sísmica mediante la razón de agrietamiento total observada.

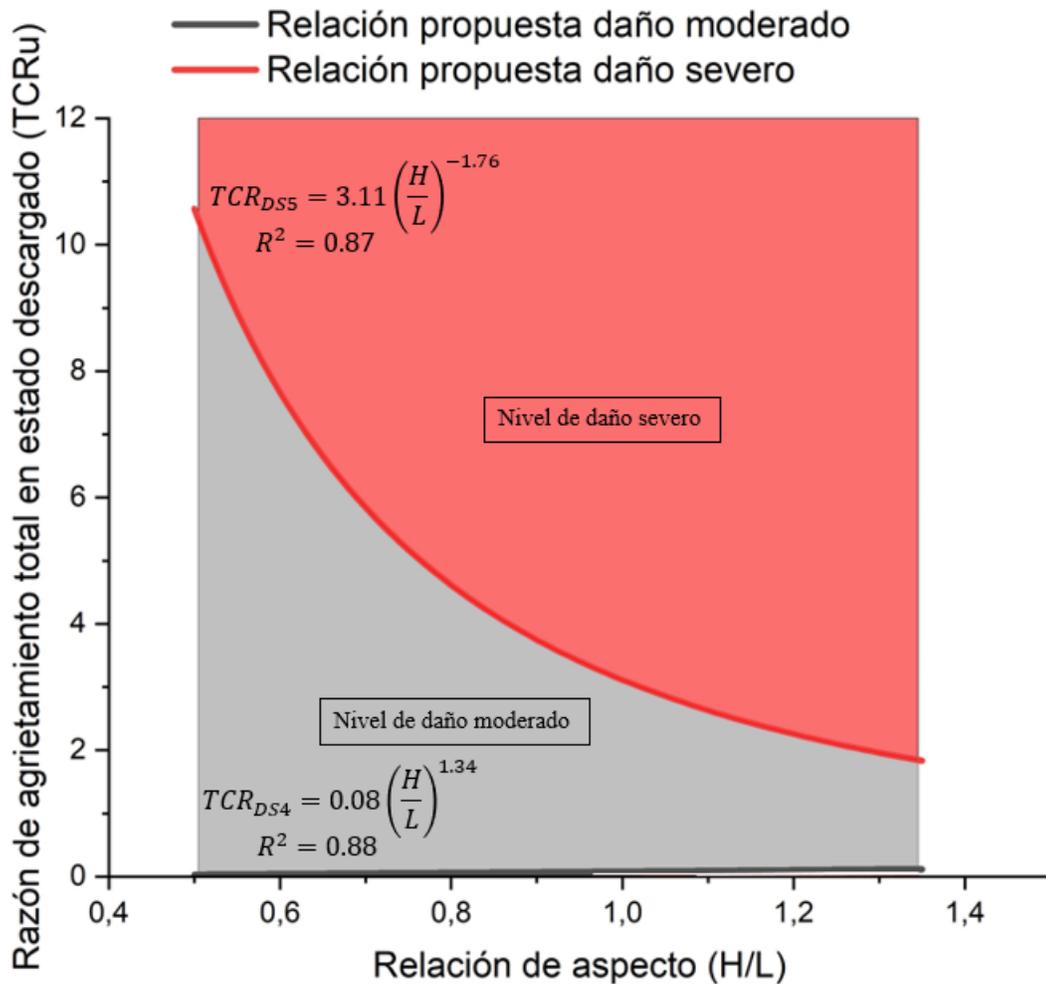


Figura 4.18 Relación propuesta para estimación de nivel de daño mediante razón de agrietamiento total en estado descargado (TCRu)

#### 4.4 Validación formulación para definición de nivel de daño mediante parámetros de medición de daño superficialmente visible

Para la validación de las relaciones anteriormente propuestas, se analiza un nuevo muro, codificado como CLBW04. El muro CLBW04 presenta parámetros de diseño muy similares al muro CLBW01, siendo el principal parámetro distintivo la altura de unidades de albañilería empleadas, los cuales son

de 71 mm de altura. La Tabla 4.3 resume los parámetros de diseño de este muro CLBW04 y de los otros muros considerados en el estudio. Se debe notar que el muro CLBW04 se incorpora sólo para validación y no fue incluido en el ajuste de las expresiones. En este proceso de validación se trata de emular los resultados y conclusiones que se obtendrían cuando se lleve a la práctica la metodología propuesta para evaluar el daño de un muro luego de un evento sísmico.

Tabla 4.3 Parámetros de diseño muro CLBW04 incorporado para validación y muros considerados en estudio (CLBW01, CLBW02 y CLBW03)

| Muro   | Largo (mm) | Altura (mm) | Relación de aspecto | Area (mm <sup>2</sup> ) | Espesor (mm) | Altura de ladrillo (mm) | Espesor de junta (mm) | Resistencia a la compresión del mortero (MPa) | Resistencia a la compresión unidad (MPa) | Carga axial (% $\sigma$ /fm) | Cuánta de refuerzo horizontal (%) | Cuánta de refuerzo vertical (%) |
|--------|------------|-------------|---------------------|-------------------------|--------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| CLBW01 | 2690       | 2208        | 0.82                | 5939520                 | 140          | 112                     | 10                    | 17.36                                         | 10.19                                    | 5                            | 0.081                             | 0.4                             |
| CLBW02 | 3140       | 1720        | 0.55                | 5400800                 | 140          | 112                     | 10                    | 17.36                                         | 10.19                                    | 5                            | 0.081                             | 0.35                            |
| CLBW03 | 1640       | 2208        | 1.35                | 3621120                 | 140          | 112                     | 10                    | 17.36                                         | 10.19                                    | 5                            | 0.081                             | 0.5                             |
| CLBW04 | 2690       | 2226        | 0.83                | 5987940                 | 140          | 71                      | 10                    | 17.36                                         | 7.62                                     | 5                            | 0.081                             | 0.4                             |

Para el muro CLBW04 se consideran los puntos solicitados al 84%, 93% y 100% de su resistencia máxima. Esta selección de puntos se debe a que, de acuerdo con los resultados experimentales, al alcanzar el 84% RMc ya se observa la primera aparición de daño, y por tanto ya se encuentra en nivel de daño moderado, al alcanzar el 93% RMc todavía sigue siendo un muro en nivel de daño moderado, y al alcanzar el 100% RMc es un muro que ya alcanzó su resistencia máxima y se encuentra en nivel de daño severo. La Tabla 4.4 presenta la descripción del daño encontrado en este muro en conjunto con los parámetros de medición de daño superficialmente visibles de razón de agrietamiento total.

Tabla 4.4 Descripción de daño y parámetros de medición de daño superficialmente visible muro CLBW04 incorporado para validación

| Valores experimentales (muro en reposo)                     |                                                            |                                                            |                                                              |
|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Muro CLBW04                                                 | Muro al 84% de resistencia máxima                          | Muro al 93% de resistencia máxima                          | Muro al 100% de resistencia máxima                           |
| Razón de agrietamiento total en estado descargado (TCRu)    | 1.32                                                       | 3.56                                                       | 11.38                                                        |
| Razón de agrietamiento diagonal en estado descargado (DCRu) | 0.27                                                       | 1.88                                                       | 13.38                                                        |
| Descripción de daño                                         | Nivel de daño DS4: Muro luego de primera aparición de daño | Nivel de daño DS4: Muro luego de primera aparición de daño | Nivel de daño DS5: Muro que ya alcanzó su resistencia máxima |

A su vez, se incorporan en la validación puntos de medición intermedios obtenidos para los muros estudiados (CLBW01, CLBW02 y CLBW03), tanto para dirección de carga positiva como para dirección de carga negativa, para poder obtener una verificación más amplia. En la Tabla 4.5 se

compara el nivel de daño experimental con el nivel de daño estimado mediante parámetros de medición de daño superficialmente visible.

Tabla 4.5 Nivel de daño real y estimación de nivel de daño mediante parámetros de medición de daño superficialmente visible puntos de validación en todos los muros

| Muro          | Relación de aspecto (H/L) | % RM en cada dirección de carga | Razón de agrietamiento total en estado descargado (TCRu) (%) | Nivel de daño experimental | Nivel de daño estimado en base a razón de agrietamiento total en estado descargado (TCRu) |
|---------------|---------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| CLBW04        | 0.83                      | 1                               | 11.38                                                        | DS5                        | DS5                                                                                       |
|               | 0.83                      | 0.93                            | 3.56                                                         | DS4                        | DS4                                                                                       |
|               | 0.83                      | 0.84                            | 1.32                                                         | DS4                        | DS4                                                                                       |
| CLBW01        | 0.82                      | 1.00                            | 6.24                                                         | DS5                        | DS5                                                                                       |
|               | 0.82                      | 0.97                            | 1.07                                                         | DS4                        | DS4                                                                                       |
|               | 0.82                      | 0.96                            | 0.33                                                         | DS4                        | DS4                                                                                       |
|               | 0.82                      | 0.84                            | 0.33                                                         | DS4                        | DS4                                                                                       |
| CLBW01 (Pull) | 0.82                      | 0.94                            | 5.49                                                         | DS4                        | DS5                                                                                       |
|               | 0.82                      | 1.00                            | 7.32                                                         | DS5                        | DS5                                                                                       |
| CLBW02        | 0.55                      | 1.00                            | 24.68                                                        | DS5                        | DS5                                                                                       |
|               | 0.55                      | 0.97                            | 12.81                                                        | DS4                        | DS5                                                                                       |
|               | 0.55                      | 0.91                            | 5.26                                                         | DS4                        | DS4                                                                                       |
|               | 0.55                      | 0.78                            | 1.19                                                         | DS4                        | DS4                                                                                       |
|               | 0.55                      | 0.69                            | 0.21                                                         | DS4                        | DS4                                                                                       |
| CLBW02 (Pull) | 0.55                      | 0.90                            | 5.87                                                         | DS4                        | DS4                                                                                       |
|               | 0.55                      | 0.96                            | 7.48                                                         | DS4                        | DS4                                                                                       |
|               | 0.55                      | 1.00                            | 18.30                                                        | DS5                        | DS5                                                                                       |
| CLBW03        | 1.35                      | 1.00                            | 15.45                                                        | DS5                        | DS5                                                                                       |
|               | 1.35                      | 0.95                            | 2.46                                                         | DS4                        | DS5                                                                                       |
|               | 1.35                      | 0.94                            | 1.10                                                         | DS4                        | DS4                                                                                       |
|               | 1.35                      | 0.78                            | 0.14                                                         | DS4                        | DS4                                                                                       |
| CLBW03 (Pull) | 1.35                      | 0.88                            | 2.15                                                         | DS4                        | DS5                                                                                       |
|               | 1.35                      | 0.96                            | 3.50                                                         | DS4                        | DS5                                                                                       |
|               | 1.35                      | 1.00                            | 5.53                                                         | DS5                        | DS5                                                                                       |

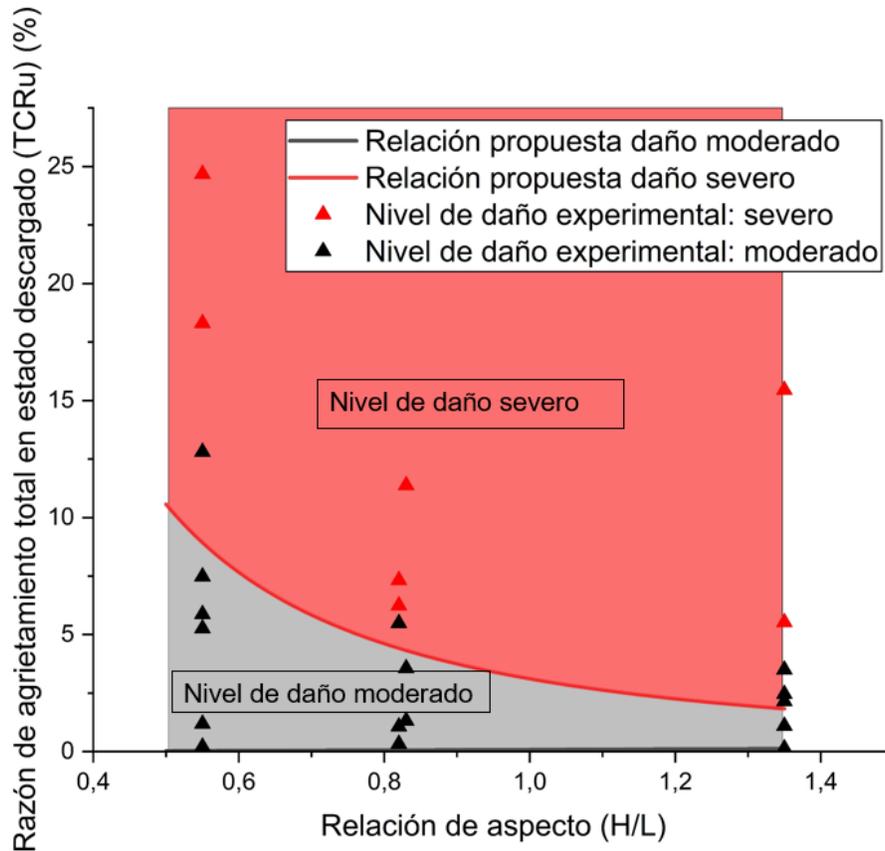


Figura 4.19 Validación estimación de nivel de daño mediante parámetro de razón de agrietamiento total en estado descargado (TCRu) para todos los puntos

La Figura 4.19 muestra los resultados presentados en la Tabla 4.5, con el fin de validar la formulación basada en TCRu. De los resultados, se obtiene que 19 de 24 estados de nivel de daño conocidos se estimaron correctamente, lo que entrega una precisión del 79%. Se observa que el modelo muestra un criterio conservador en todos los puntos no fueron estimados correctamente, pues ningún nivel de daño experimental severo fue estimado incorrectamente, sino que sólo estados de nivel de daño experimental moderado muy cercanos a nivel de daño severo fueron incorrectos. Los estados de nivel de daño que no se estimaron correctamente se encontraban sometidos a un 94% de resistencia máxima en promedio.

#### 4.5 Conclusiones

Se concluye que la razón de agrietamiento total en estado descargado (TCRu) es un criterio que permite identificar la progresión del daño superficialmente visible en muros sometidos a cargas

cíclicas. Permite también identificar la influencia del parámetro de diseño de relación de aspecto. Se observa que, un muro con baja relación de aspecto es un muro que presenta una mayor cantidad de daño superficialmente visible que muros con una relación de aspecto mayor. También se observan resultados interesantes al introducir el término de capacidad de recuperación, el cual es un parámetro que permite conocer la capacidad de un muro para “recuperar” el daño máximo alcanzado cuando fue cargado, es decir, existe una parte del área agrietada que ya no es visible cuando el muro es descargado. En estos resultados se observa que el muro con baja relación de aspecto es el muro con peor comportamiento, disminuyendo su capacidad de recuperación de forma más pronunciada y temprana respecto a los muros con relación de aspecto cuadrada y esbelta.

El muro con mejor comportamiento y que presenta una menor cantidad de daño superficialmente visible es el muro con relación de aspecto cuadrado. Es el muro que presenta una mejor capacidad de recuperación en todas las etapas del ensayo.

También se concluye que la formulación propuesta para estimar el nivel de daño de un muro luego de ser sometido a una acción sísmica basada en el criterio de razón de agrietamiento total muestra una buena correlación con el nivel de daño experimental (79% de precisión en una muestra de 24 puntos)

## CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES

Existe la necesidad de profundizar en el entendimiento del desarrollo del daño de muros de albañilería armada sometidos a cargas cíclicas. Se ha propuesto entonces una metodología para medir y estimar el nivel de daño superficialmente visible en muros de albañilería armada (BJR-PG-RM) de ladrillo multi-perforado de arcilla (MPCLB, del inglés *Multi-Perforated Clay Brick*) sometidos a cargas cíclicas. Esta metodología se basa en la inspección y esbozo manual de mapas de agrietamiento en imágenes capturadas durante la realización de ensayo de cargas cíclicas. En la presente investigación, se aplicó esta metodología a tres muros BJR-PG-RM de MPCLB sometidos a cargas cíclicas, los cuales contaban como parámetro distintivo a la relación de aspecto. Se midió e inspeccionó el nivel de daño superficialmente visible para estos muros, proponiendo parámetros de medición de daño superficialmente visible (siendo el que entrega mejores resultados la razón de agrietamiento total en estado descargado (TCRu)). Estos resultados se correlacionan con parámetros de respuesta del muro y se ajustan expresiones que permiten estimar el nivel de daño alcanzado por un muro luego de ser sometido a una acción sísmica en base a su razón de agrietamiento total en estado descargado (TCRu), para muros con distinta relación de aspecto.

En cuanto a los resultados, se concluye que un muro de baja relación de aspecto presenta una mayor cantidad de daño superficialmente visible respecto a muros con relación de aspecto cuadrada y esbelta en cada etapa de carga. A su vez, el muro con baja relación de aspecto es también el muro que se daña en etapas más tempranas (comienza a presentar daño al aplicar el 64% de su resistencia máxima en dirección de carga) y el muro que presenta una peor capacidad de recuperación en todas las etapas de evolución de su resistencia. En contraposición, el muro con un mejor comportamiento es el muro con relación de aspecto cuadrado, presentando una menor cantidad de daño superficialmente visible en todas las etapas del ensayo, con una mejor capacidad de recuperación y con una primera aparición de daño en etapas más avanzadas (comienza a presentar daño al aplicar el 84% de su resistencia máxima en dirección de carga). El muro esbelto, en general, presenta un comportamiento aproximadamente intermedio entre el muro con relación de aspecto cuadrado y el muro con baja relación de aspecto.

Se concluye que el criterio de medición de daño superficialmente visible que representa mejor el nivel de daño del muro es la razón de agrietamiento total en estado descargado (TCRu), pues es el criterio en que se puede observar de manera más consistente el desarrollo del daño. En cuanto al espesor de grieta, no se considera como un factor representativo pues, no aumenta consistentemente a medida

que se aumenta la aplicación de la carga horizontal. Esto se atribuye a que los muros estudiados presentan cuantías horizontales superiores a la mínima, lo que no permite que una sola grieta principal se desarrolle en su espesor. A su vez, la razón de agrietamiento diagonal también se descarta como factor representativo en el estudio pues, las grietas no se desarrollan sólo en la zona diagonal, sobre todo en muros con relaciones de aspecto lejanas a la cuadrada.

Se propone una formulación con el fin utilizar a la razón de agrietamiento total en estado descargado presente en muros luego de estar sometidos a una acción sísmica (TCRu) como criterio que permita estimar el nivel de daño en que se encuentra o alcanzó el muro. El criterio varía en función de la relación de aspecto del muro evaluado. Esta formulación se somete a una validación para estados de nivel de daño experimental de los muros sometidos a estudio y de un muro adicional agregado para fines de validación. Se obtuvo una precisión del 79%, y que la metodología es conservadora pues, los únicos estados de nivel de daño se asignaron a una calificación de daño peor (i.e. severo cuando debía ser moderado).

Según lo expuesto en este trabajo, se considera que la razón de agrietamiento total (TCRI y TCRu) presente en muros sometidos a cargas cíclicas es un parámetro de interés que permite estudiar el desarrollo del daño superficialmente visible, la relación de este daño superficialmente visible con parámetros de respuesta de un muro y la influencia de distintos parámetros de diseño en la evolución del daño. Se ha demostrado la capacidad de la metodología para ser una herramienta útil para estimar el historial de solicitaciones y nivel de daño de un muro que ha sido sometido a una acción sísmica, abriendo una línea de investigación y profundización en el conocimiento del daño producido por acciones sísmicas y una forma de conocer el historial de solicitaciones de un muro.

Se presenta como oportunidad de investigación, el emplear la metodología para procesar resultados de más muros. Esto es útil para calibración de la propuesta y para extender este análisis a otros parámetros de diseño. Se presenta también la oportunidad de estudiar distintos tipos de unidad y materialidades. Respecto a la metodología, se observa que se pueden realizar propuestas para una mayor automatización del proceso. Esta automatización presenta oportunidades de eficiencia en el proceso de datos y en la mejora de la precisión de estos, limitando los errores humanos propios de un trabajo manual e inspección visual.

**CAPÍTULO 6 REFERENCIAS**

- Calderón, S., Vargas, L., Sandoval, C., Araya-Letelier, G., & Milani, G. (2022). Shear design equation and updated fragility functions for partially grouted reinforced masonry shear walls. *Journal of Building Engineering*, 50. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104097>
- Calderón, S., Sandoval, C., Araya-Letelier, G., Inzunza, E., & Arnau, O. (2021). Influence of different design parameters on the seismic performance of partially grouted masonry shear walls. *Engineering Structures*, 239. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112058>
- Dhanasekar, M., & Haider, W. (2011). Effect of spacing of reinforcement on the behaviour of partially grouted masonry shear walls. *Advances in Structural Engineering*, 14(2). <https://doi.org/10.1260/1369-4332.14.2.281>
- Dillon, P. (2015). *Shear Strength Prediction Methods for Grouted Masonry Shear Walls*. Brigham Young University.
- Matsumura, A. (1988). Shear Strength of Reinforced Masonry Walls. *Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering*.
- Murcia-Delso, J., & Shing, P. B. (2012). Fragility Analysis of Reinforced Masonry Shear Walls. *Earthquake Spectra*, 28(4). <https://doi.org/10.1193/1.4000075>
- Núñez, M. (2010). *ANÁLISIS DE LOS DAÑOS PROVOCADOS POR EL TERREMOTO DEL 27 DE FEBRERO DE 2010 A LOS EDIFICIOS DE VILLA CORDILLERA, COMUNA DE RANCAGUA*. Universidad de Chile.
- Ramirez, P. (2021). *ANALISIS DE FRAGILIDAD SISMICA DE EDIFICACIONES DE ALBAÑILERIA ARMADA DE BLOQUES DE HORMIGON PARCIALMENTE RELLENOS*. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Sandoval, C., Calderon, S., & Almazan, J. L. (2018). Experimental cyclic response assessment of partially grouted reinforced clay brick masonry walls. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(7). <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0308-x>
- Valdebenito, G., Alvarado, D., Sandoval, C., & Aguilar, V. (2015). Terremoto Iquique Mw = 8.2 – 01 Abril 2014: Daño observado y efectos de sitio en estructuras de albañilería. *Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica*.
- Voon, K. C., & Ingham, J. M. (2007). Design Expression for the In-Plane Shear Strength of Reinforced Concrete Masonry. *Journal of Structural Engineering*, 133(5). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(2007\)133:5\(706\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(2007)133:5(706))

## CAPÍTULO 7 ANEXOS

### Anexo 7.1 Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) constituyen un llamamiento universal a la acción para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y mejorar las vidas y las perspectivas de las personas en todo el mundo. Se considera que el presente trabajo de memoria de título contribuye a los siguientes Objetivos de Desarrollo Sostenible.

- ODS-9: Industria, Innovación e Infraestructura

| <b>Vinculación</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>El presente trabajo de memoria de título contribuye al objetivo de desarrollo sustentable de Industria, Innovación e Infraestructura. Esto, al entregar nuevos conocimientos y herramientas que permiten profundizar en el comportamiento de muros de albañilería armada, de unidades de acilla multi-perforada (ampliamente empleados en la práctica chilena), cuando son sometidos a cargas cíclicas. La investigación realizada permite profundizar, específicamente, en cómo se desarrolla el daño superficialmente visible en estos elementos estructurales, entregando conocimientos y herramientas útiles que buscan perfeccionar la ingeniería e infraestructura del país.</p> |

## Anexo 7.2 Otros resultados relevantes

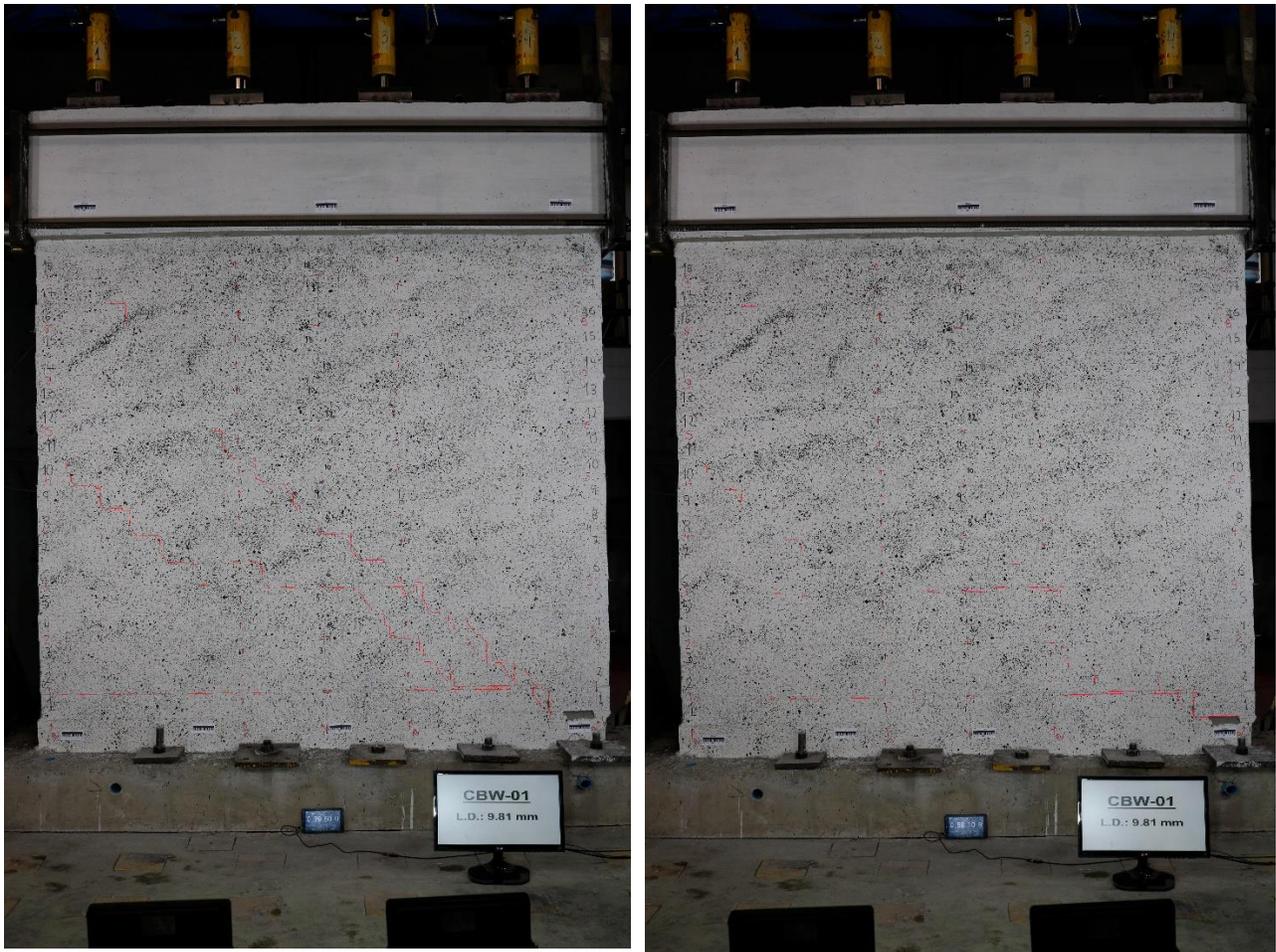
Tabla 7.1 Comparación resultados obtenidos mediante Modelo de puntal de compresión diagonal y resultados obtenidos de forma experimental

| Estudio               | Espécimen                  | Resistencia de corte última experimental (kN)<br>$V_{exp}$ | Resistencia de corte última modelo puntal compresión (kN)<br>$V_n$ | $\frac{V_{exp}}{V_n}$ |
|-----------------------|----------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| Hidalgo et al. (1978) | HCBR-21-3                  | 121                                                        | 137                                                                | 0.88                  |
|                       | HCBR-21-5                  | 212                                                        | 268                                                                | 0.79                  |
|                       | HCBR-21-7                  | 211                                                        | 267                                                                | 0.79                  |
| Chen et al. (1978)    | HCBL-11-5                  | 208                                                        | 152                                                                | 1.37                  |
|                       | HCBL-11-8                  | 164                                                        | 111                                                                | 1.48                  |
|                       | HCBL-11-10                 | 212                                                        | 174                                                                | 1.22                  |
|                       | HCBR-11-5                  | 197                                                        | 217                                                                | 0.91                  |
|                       | HCBR-11-9                  | 191                                                        | 135                                                                | 1.41                  |
|                       | HCBR-11-11                 | 205                                                        | 291                                                                | 0.70                  |
|                       | Yancey and Scribner (1989) | R2                                                         | 144                                                                | 187                   |
| R4                    |                            | 146                                                        | 173                                                                | 0.84                  |
| R5                    |                            | 151                                                        | 188                                                                | 0.80                  |
| R6                    |                            | 151                                                        | 176                                                                | 0.86                  |
| R7                    |                            | 161                                                        | 181                                                                | 0.89                  |
| R9                    |                            | 169                                                        | 188                                                                | 0.90                  |
| R10                   |                            | 192                                                        | 188                                                                | 1.02                  |
| R11                   |                            | 160                                                        | 185                                                                | 0.86                  |
| Schulz et al. (1998)  | 2                          | 261                                                        | 312                                                                | 0.84                  |
|                       | 4                          | 254                                                        | 232                                                                | 1.09                  |
|                       | 6                          | 176                                                        | 159                                                                | 1.11                  |
|                       | 8                          | 243                                                        | 312                                                                | 0.78                  |
|                       | 10                         | 270                                                        | 232                                                                | 1.16                  |
|                       | 12                         | 211                                                        | 159                                                                | 1.33                  |
| Voon (2007)           | A5                         | 139                                                        | 151                                                                | 0.92                  |
|                       | A6                         | 93                                                         | 121                                                                | 0.77                  |
| Minaie (2009)         | PCL 1                      | 318                                                        | 327                                                                | 0.97                  |
| Nolph (2010)          | PG085-24                   | 296                                                        | 241                                                                | 1.23                  |
|                       | PG085-32                   | 260                                                        | 234                                                                | 1.11                  |
|                       | PG085-48                   | 223                                                        | 202                                                                | 1.10                  |
|                       | PG120-48                   | 229                                                        | 202                                                                | 1.13                  |
|                       | PG169-48                   | 204                                                        | 200                                                                | 1.02                  |
| Elmaprunk (2010)      | PG127-24                   | 376                                                        | 302                                                                | 1.25                  |
|                       | PG127-32                   | 323                                                        | 297                                                                | 1.09                  |
|                       | PG127-48                   | 224                                                        | 271                                                                | 0.83                  |
|                       | PG127-48I                  | 237                                                        | 271                                                                | 0.87                  |
|                       | PG180-48                   | 250                                                        | 271                                                                | 0.92                  |
|                       | PG254-48                   | 269                                                        | 271                                                                | 0.99                  |



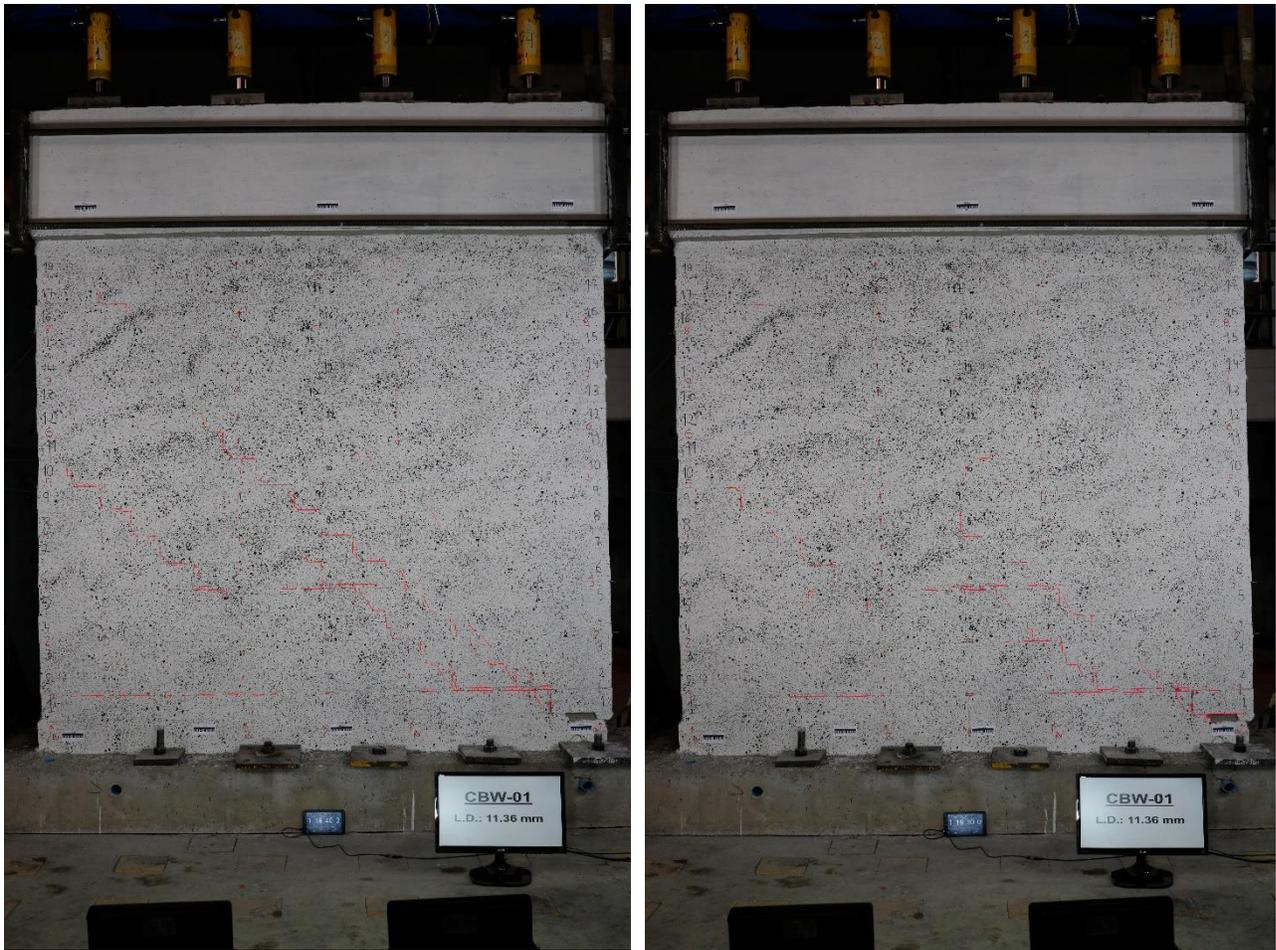
(a) Mapas de agrietamiento muro CLBW01 en estado de primera aparición de daño (estado cargado a la izquierda, y estado descargado a la derecha)

Figura 7.1 Mapas de agrietamiento de referencia para muro CLBW01 en (a) primera aparición de daño, (b) 98% de razón de carga horizontal máxima aplicada y (c) 100% de razón de carga horizontal máxima aplicada.



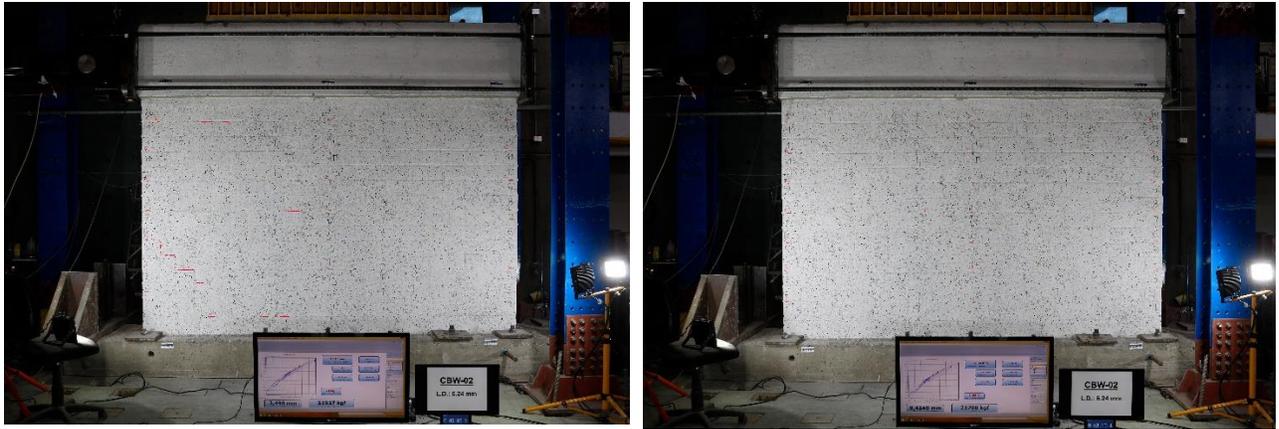
(b) Mapas de agrietamiento muro CLBW01 en 98% de razón de carga horizontal máxima (estado cargado a la izquierda, y estado descargado a la derecha)

Figura 7.1 (continuación) Mapas de agrietamiento de referencia para muro CLBW01 en (a) primera aparición de daño, (b) 98% de razón de carga horizontal máxima aplicada y (c) 100% de razón de carga horizontal máxima aplicada



(c) Mapas de agrietamiento muro CLBW01 en 100% de razón de carga horizontal máxima (estado cargado a la izquierda, y estado descargado a la derecha)

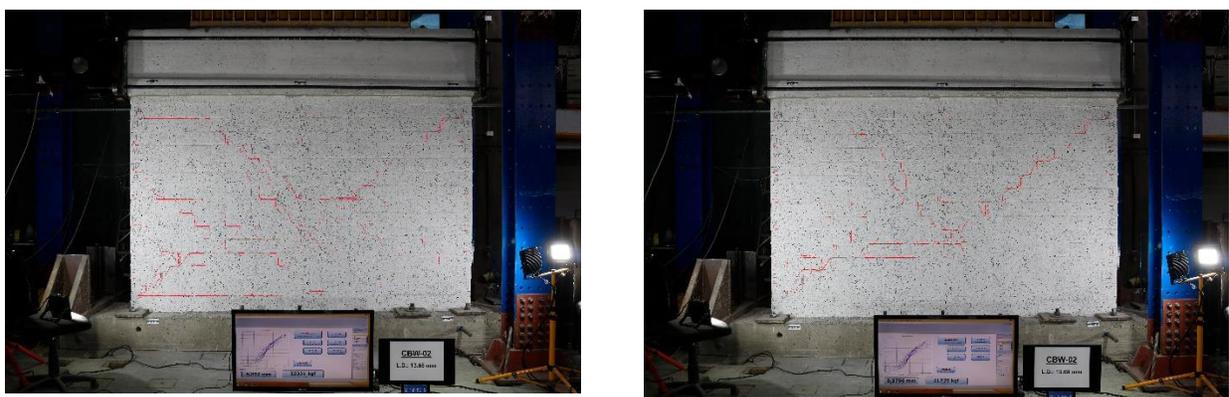
Figura 7.1 (continuación) Mapas de agrietamiento de referencia para muro CLBW01 en (a) primera aparición de daño, (b) 98% de razón de carga horizontal máxima aplicada y (c) 100% de razón de carga horizontal máxima aplicada



(a) Mapas de agrietamiento muro CLBW02 en estado de primera aparición de daño (estado cargado a la izquierda, y estado descargado a la derecha)

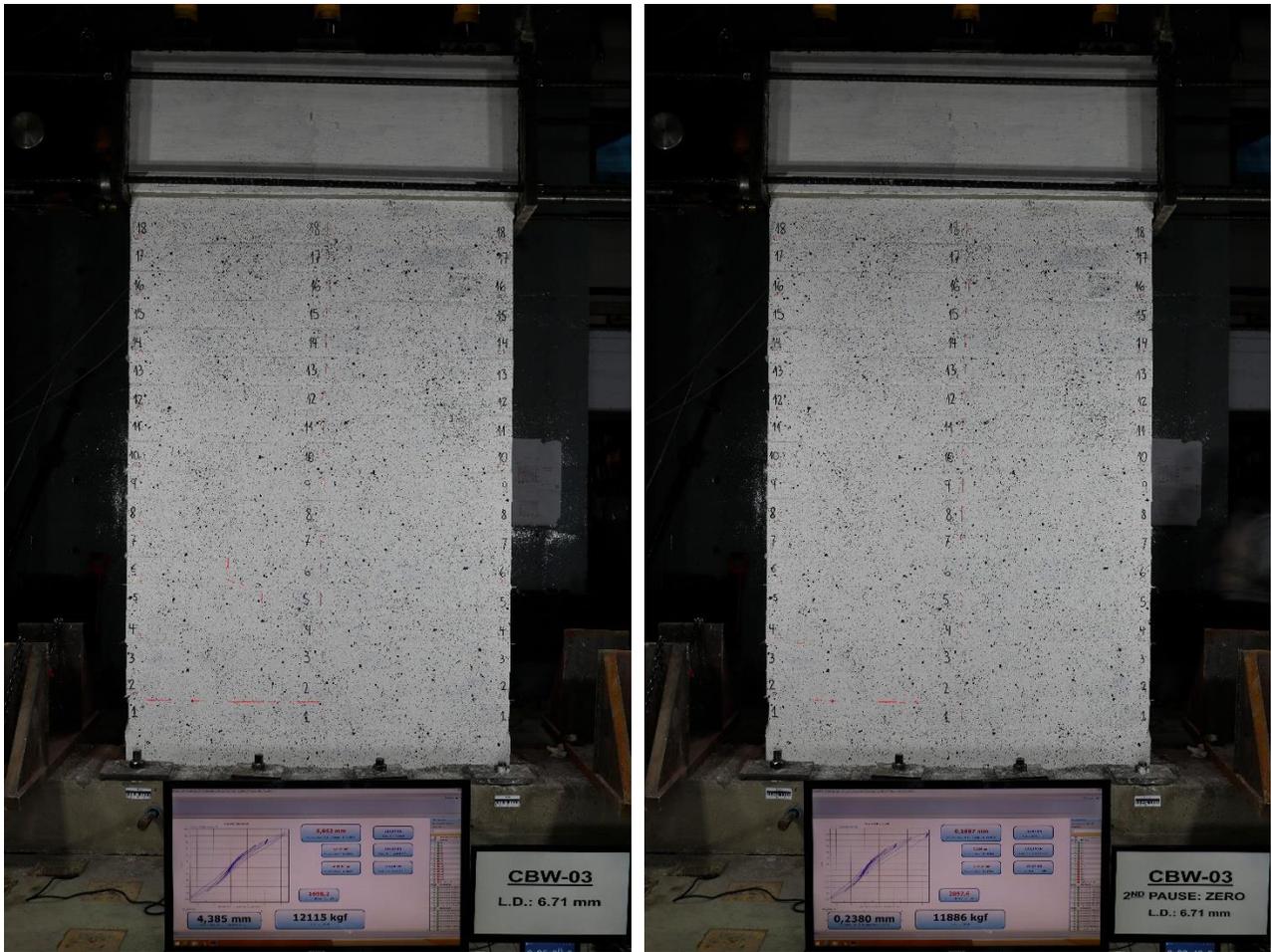


(b) Mapas de agrietamiento muro CLBW02 en 97% de razón de carga horizontal máxima (estado cargado a la izquierda, y estado descargado a la derecha)



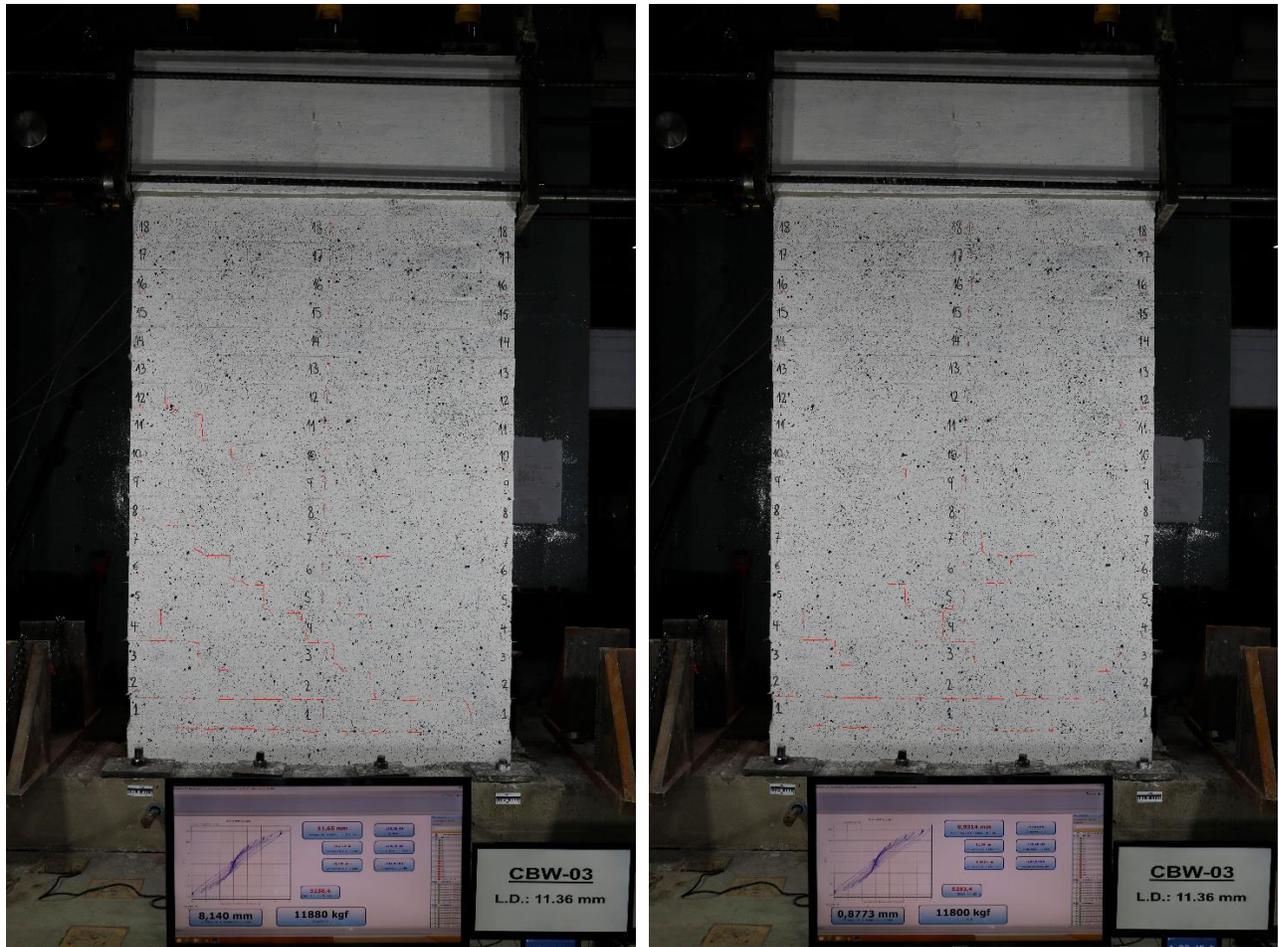
(c) Mapas de agrietamiento muro CLBW02 en 97% de razón de carga horizontal máxima (estado cargado a la izquierda, y estado descargado a la derecha)

Figura 7.2 Mapas de agrietamiento de referencia para muro CLBW02 en (a) primera aparición de daño, (b) 98% de razón de carga horizontal máxima aplicada y (c) 100% de razón de carga horizontal máxima aplicada



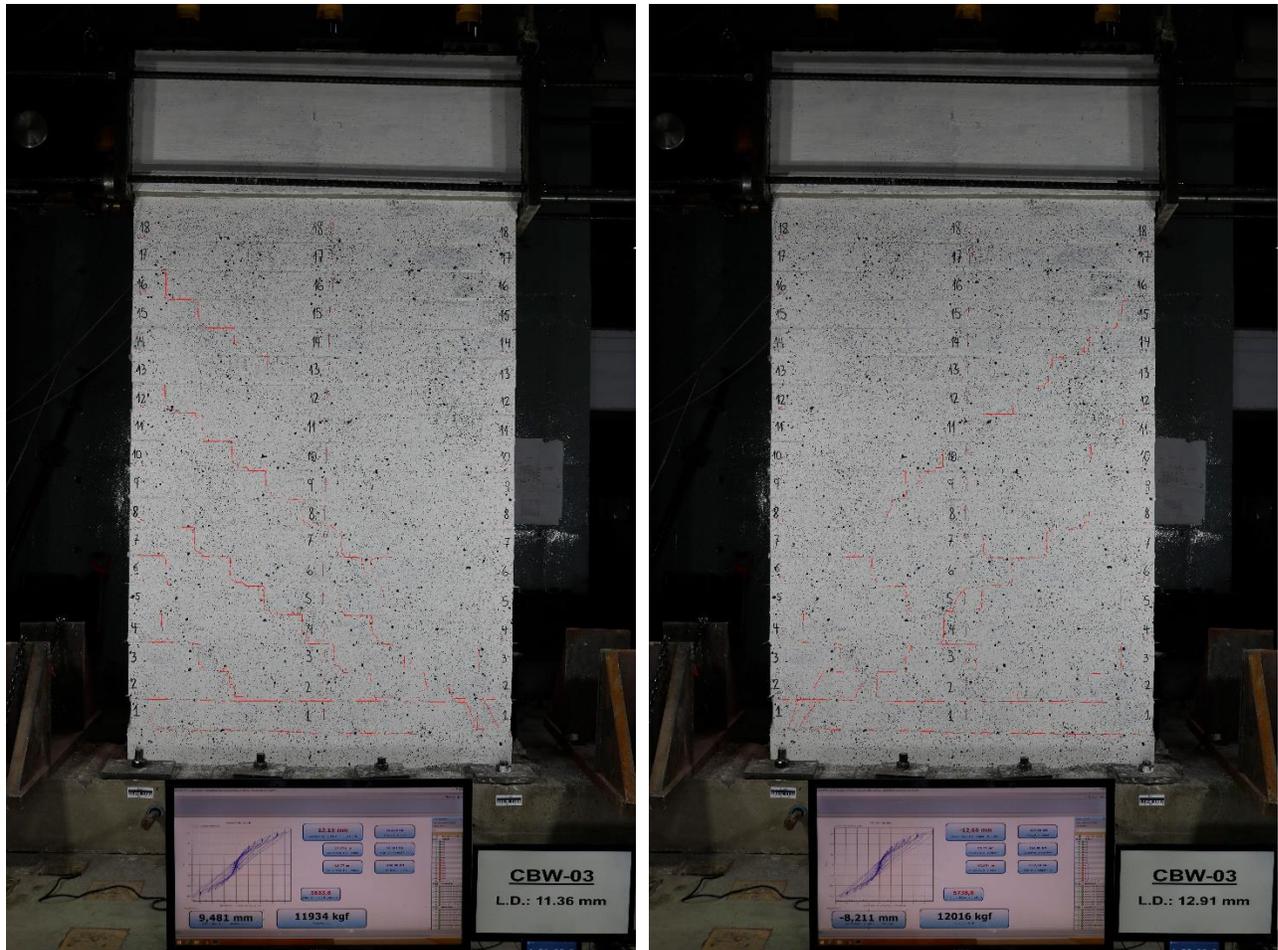
(a) Mapas de agrietamiento muro CLBW03 en estado de primera aparición de daño (estado cargado a la izquierda, y estado descargado a la derecha)

Figura 7.3 Mapas de agrietamiento de referencia para muro CLBW03 en (a) primera aparición de daño, (b) 96% de razón de carga horizontal máxima aplicada y (c) 100% de razón de carga horizontal máxima aplicada



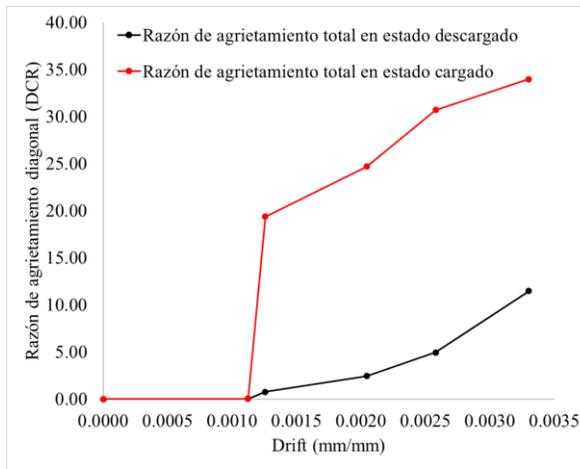
(b) Mapas de agrietamiento muro CLBW03 en 96% de razón de carga horizontal máxima (estado cargado a la izquierda, y estado descargado a la derecha)

Figura 7.3 Mapas de agrietamiento de referencia para muro CLBW03 en (a) primera aparición de daño, (b) 96% de razón de carga horizontal máxima aplicada y (c) 100% de razón de carga horizontal máxima aplicada

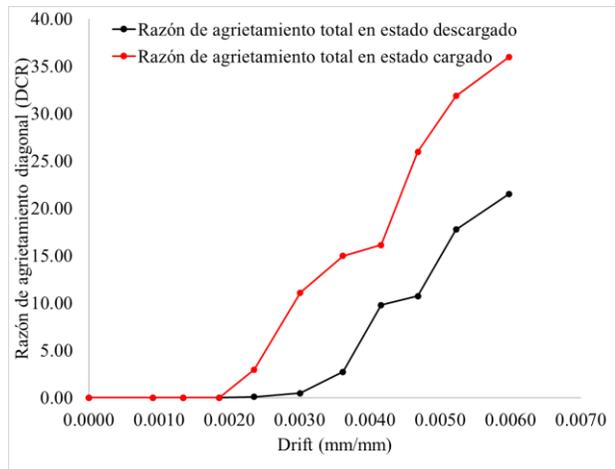


(c) Mapas de agrietamiento muro CLBW03 en 100% de razón de carga horizontal máxima (estado cargado a la izquierda, y estado descargado a la derecha)

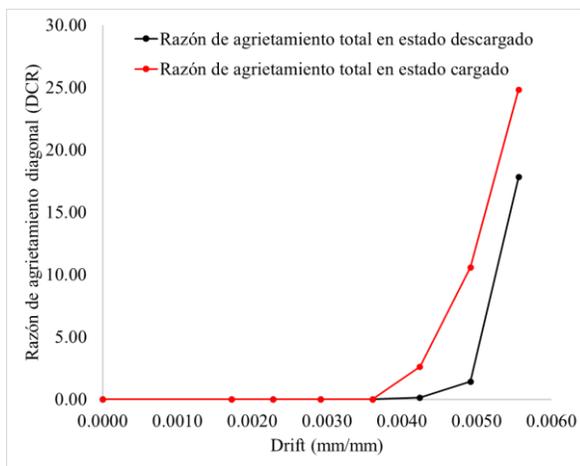
Figura 7.3 Mapas de agrietamiento de referencia para muro CLBW03 en (a) primera aparición de daño, (b) 96% de razón de carga horizontal máxima aplicada y (c) 100% de razón de carga horizontal máxima aplicada



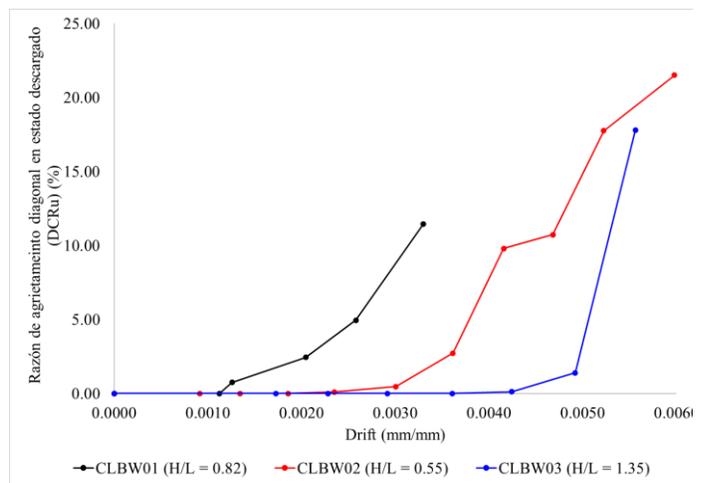
(a) Muro CLBW01



(b) Muro CLBW02



(c) Muro CLBW03



(d) Comparación muros CLBW01, CLBW02 y CLBW03

Figura 7.4 Razón de agrietamiento diagonal en estado descargado (DCRu) v/s drift observado para (a) Muro CLBW01, (b) Muro CLBW02, (c) Muro CLBW03 y (d) comparación de muros sometidos a estudio

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA  
RESUMEN DE MEMORIA DE TÍTULO**

**Departamento** : Departamento de Ingeniería Civil

**Carrera** : Ingeniería Civil

**Nombre del memorista** : Gonzalo Alberto Lema Valenzuela

**Título de la memoria** : EVALUACIÓN DEL DESARROLLO DE GRIETAS EN MUROS DE ALBAÑILERÍA ARMADA SOMETIDOS A CARGAS CÍCLICAS

**Fecha de la presentación oral** : -

**Profesor(es) Guía** : Sebastián Calderón Díaz

**Profesor(es) Revisor(es)** : Patricio Cendoya Hernández  
: Siva Avudaiappan

**Concepto** :

**Calificación** :

| <b>Resumen</b> |
|----------------|
|----------------|

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Existe la necesidad de profundizar en el conocimiento de la evolución del daño en muros de albañilería armada BJR-PG-RM de unidades de arcilla multi-perforadas. Específicamente, se encuentra un área no explorada de la evolución de daño en estos elementos estructurales: El estudio del daño superficialmente visible (agrietamiento). La presente memoria de título estudia la evolución del daño en estos elementos estructurales cuando son sometidos a cargas cíclicas. Esto se realiza mediante la proposición, definición y utilización de parámetros de medición de daño superficialmente visibles (agrietamiento). Se encuentra que la razón de agrietamiento total (área agrietada respecto al área superficial del muro) es un parámetro que permite vincular parámetros de respuesta de un muro con el nivel de daño superficialmente visible. Esto permite estudiar en mayor profundidad el comportamiento ante cargas cíclicas de dicho elemento estructural e incluso estimar el nivel de daño (DS4: nivel de daño moderado, o DS5: Nivel de daño severo) en que se encuentra luego de ser sometido a una acción sísmica.</p> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|