

DISEÑO DE MURO ESTRUCTURAL DE CONCRETO REFORZADO CON  
SECCIÓN TRANSVERSAL EN T

CAMILO ANDRÉS RINCÓN SILVA

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

2019

DISEÑO DE MURO ESTRUCTURAL DE CONCRETO REFORZADO CON  
SECCIÓN TRANSVERSAL EN T

CAMILO ANDRÉS RINCÓN SILVA

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

DIRECTOR

ÁLVARO VIVIESCAS JAIMES

PH.D. EN INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN

CODIRECTOR

CARLOS FELIPE ORDUZ SUÁREZ

INGENIERO CIVIL

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

BUCARAMANGA

2019

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Grupo INME de la Universidad Industrial de Santander, adscrito a la escuela de Ingeniería Civil, que lleva a cabo actualmente el proyecto de investigación con código 1895 “Estudio del Comportamiento Sísmico de Edificaciones Tipo Túnel en Zonas de Alta Amenaza Sísmica. Fase 1” financiado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la UIS.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN .....	13
1. OBJETIVOS.....	15
1.1 OBJETIVO GENERAL .....	15
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
2. MUROS ESTRUCTURALES .....	16
2.1. FORMAS DE FALLA EN MUROS ESTRUCTURALES ESBELTOS .....	18
2.2 MUROS ESTRUCTURALES CON SECCIÓN EN T .....	20
2.3 ANÁLISIS ESTÁTICO NO-LINEAL .....	21
3. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES .....	23
3.1 AGREGADOS.....	23
3.2 CEMENTO .....	27
3.3 ACERO .....	28
4. DISEÑO DEL MURO .....	33
4.1 DISEÑO DE LA MEZCLA DE CONCRETO .....	33
4.2 DISEÑO DEL REFUERZO.....	38
5. ANÁLISIS ESTÁTICO NO-LINEAL Y REVISIÓN DEL DISEÑO .....	43
6. RESPUESTA DEL MURO ANTE CARGA CÍCLICA REVERSIBLE.....	47
7. CONCLUSIONES .....	54
BIBLIOGRAFÍA.....	55

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Granulometría del agregado grueso. ....	24
Tabla 2. Granulometría del agregado fino. ....	26
Tabla 3. Asentamientos recomendados para diferentes tipos de construcción. ....	33
Tabla 4. Propiedades físicas de los agregados y cemento. ....	34
Tabla 5. Cantidad aproximada de agua y aire atrapado para un concreto sin aire incorporado. ....	35
Tabla 6. Resistencia requerida promedio. ....	35
Tabla 7. Relación agua-cemento en función de la resistencia requerida. ....	36
Tabla 8. Volumen de agregado grueso por unidad de volumen del concreto. ....	37
Tabla 9. Cantidades corregidas por metro cúbico (1m <sup>3</sup> ) de concreto. ....	38
Tabla 10. Fuerzas y refuerzo de muros diseñados. ....	41
Tabla 11. Dimensiones del muro TW1.2. ....	44

## LISTA DE ILUSTRACIONES

	Pág.
Ilustración 1. Secciones transversales comunes de muros estructurales. ....	17
Ilustración 2. Muro estructural esbelto (a) y robusto (b). ....	17
Ilustración 3. Falla por flexión. ....	18
Ilustración 4. Falla por corte. ....	19
Ilustración 5. Falla por deslizamiento en la junta de construcción. ....	19
Ilustración 6. Efecto de la distribución del corte en el ala para una sección transversal en T con el ala a tracción. ....	20
Ilustración 7. Curva de capacidad. ....	22
Ilustración 8. Muestras de agregado grueso después de ponerlas en el horno ....	24
Ilustración 9. Muestras de agregado grueso antes de sumergirlo por 24 horas. ...	24
Ilustración 10. Muestras de agregado en el horno. ....	25
Ilustración 11. Máquina de Los Ángeles. ....	25
Ilustración 12. Muestras de agregado fino después de ponerlas en el horno. ....	26
Ilustración 13. Muestras de agregado fino antes de sumergirlo por 24 horas. ....	26
Ilustración 14. Molde para el ensayo y varilla de apisonamiento. ....	27
Ilustración 15. Muestras de agregado fino comparada con la escala colorimétrica de Gardner. ....	27
Ilustración 16. Queroseno en el frasco de Le Chatelier. ....	28
Ilustración 17. Barra de 3/8" al finalizar el ensayo de tensión. ....	29
Ilustración 18. Gráfica de esfuerzo-deformación de las barras de 3/8" ....	30
Ilustración 19. Barra de 1/4" al finalizar el ensayo de tensión. ....	30
Ilustración 20. Malla electrosoldada de 6mm al finalizar el ensayo de tensión. ....	31
Ilustración 21. Geometría del muro TW1.1. ....	39
Ilustración 22. Distribución del refuerzo en planta del muro TW1.1. ....	42
Ilustración 23. Diagrama de interacción muro TW1.1. ....	42
Ilustración 24. Distribución de cargas laterales: (a) uniforme, (b) triangular, (c) parabólica. ....	43

Ilustración 25. Curva de capacidad muro TW1.1. ....	44
Ilustración 26. Distribución del refuerzo en planta del muro TW1.2 .....	45
Ilustración 27. Diagrama de interacción del muro TW1.2 .....	46
Ilustración 28. Curva de capacidad muro final. ....	46
Ilustración 29. Elemento sólido CHX60.....	48
Ilustración 30. Refuerzo embebido. ....	48
Ilustración 31. Modelo constitutivo Popovics/Mander. ....	48
Ilustración 32. Modelo constitutivo Menegotto y Pinto. ....	49
Ilustración 33. Modelo del espécimen : (a) concreto, (b) refuerzo, (c) cargas y apoyos. ....	50
Ilustración 34. Protocolo de desplazamientos basado en derivas.....	51
Ilustración 35. Curva de histéresis muro TW1.2. ....	51
Ilustración 36. Patrón de agrietamiento para una deriva del 0.5%: (a) desplazamiento negativo, (b) desplazamiento positivo.....	52
Ilustración 37. Patrón de agrietamiento para una deriva del 1.0%: (a) desplazamiento negativo, (b) desplazamiento positivo.....	53
Ilustración 38. Patrón de agrietamiento para una deriva del 2.0%: (a) desplazamiento negativo, (b) desplazamiento positivo.....	53

## **LISTA DE ANEXOS**

**(Ver anexos adjuntos en el CD y pueden ser visualizados en la Base de Datos de la Biblioteca UIS)**

Anexo A. Datos de caracterización de los materiales

Anexo B. Plano de construcción del muro

Anexo C. Modelo en SAP 2000, 2019

Anexo D. Modelo en DIANA FEA BV (v20)

## RESUMEN

**TÍTULO:** DISEÑO DE MURO ESTRUCTURAL DE CONCRETO REFORZADO CON SECCIÓN TRANSVERSAL EN T.\*

**AUTOR:** CAMILO ANDRÉS RINCÓN SILVA.\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Análisis estático no-lineal, Carga cíclica reversible, Método de elementos finitos, Muros esbeltos, Sección transversal en T.

### DESCRIPCIÓN:

En este documento se presenta el diseño de un muro estructural de concreto reforzado con sección transversal en T, característico de edificaciones construidas mediante el sistema tipo túnel en la ciudad de Bucaramanga (Colombia). Para esto, se caracterizaron los materiales para el diseño de la mezcla de concreto, además del acero de refuerzo y la malla electrosoldada del muro, de acuerdo con la normativa colombiana. Por otra parte, se diseñó el refuerzo del muro de acuerdo con el Reglamento Colombiano de construcción Sismo Resistente NSR-10. Realizando un análisis estático no-lineal se observó que, para garantizar la resistencia en la dirección más débil del muro, en el otro sentido se obtiene una capacidad superior a la requerida. Empleando un modelo de elementos finitos se obtuvo que, ante la acción de carga cíclica reversible, el espécimen llegó a desplazamientos similares en ambos sentidos, pero su capacidad en fuerza es bastante menor cuando el ala está a compresión. Este documento corresponde al informe de actividades de la pasantía de investigación realizada con el Grupo INME, con el fin de apoyar el desarrollo del proyecto de investigación 1895 de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión VIE, denominado “Estudio del Comportamiento Sísmico de Edificaciones Tipo Túnel en Zonas de Alta Amenaza Sísmica. Fase 1”.

---

\* Trabajo de Grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Álvaro Viviescas Jaimes, Ing. Civil, Ph. D. Codirector: Carlos Felipe Orduz Suárez, Ing. Civil.

## ABSTRACT

**TITLE:** DESIGN OF REINFORCED CONCRETE SHEAR WALL WITH T-SHAPED CROSS SECTION.\*

**AUTHOR:** CAMILO ANDRÉS RINCÓN SILVA.\*\*

**KEYWORDS:** Finite elements method, Reversible cyclic load, Static non-linear analysis, Thin walls, T-shaped cross section.

### DESCRIPTION:

This document presents the design of a reinforced concrete structural wall with a T-shaped cross section, characteristic of buildings constructed using the tunnel type system in the city of Bucaramanga (Colombia). Therefore, the materials required for the wall's concrete mix, the reinforcing steel and the welded mesh were tested in accordance with Colombian current regulations. In addition, the wall reinforcement was designed in accordance with NSR-10 regulations. Performing a non-linear static analysis, it was observed that, in order to guarantee resistance in the weakest direction of the wall, in the other direction a capacity greater than required is obtained. Using a finite element model, it was obtained that, against the reversible cyclic loading action, the specimen reached similar displacements in both directions, but its capacity in force is much lower when the flange is compressed. This document corresponds to the report of activities of the research internship carried out with the INME Group, in order to support the development of the Vice-Rector for Research and Extension VIE research project "Study of the Seismic Behavior of Tunnel-type Buildings in Areas of High Seismic Threat. Phase 1" ID 1895.

---

\* Bachelor Thesis.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Álvaro Viviescas Jaimes, Ing. Civil, Ph. D. Codirector: Carlos Felipe Orduz Suárez, Ing. Civil.

## INTRODUCCIÓN

El rápido crecimiento poblacional se ha traducido en un importante aumento de la demanda de vivienda que, sumado a la limitada extensión de ciudades como Bucaramanga y el alto costo de los terrenos, ha generado en los últimos años un incremento en la construcción de edificaciones en altura en esta y otras ciudades de Colombia como Armenia, Cali y Medellín, entre otras. El sistema más empleado para este fin es el de muros de carga, en el cual los muros estructurales son los encargados de resistir las cargas verticales y laterales, como se indica en la NSR-10<sup>1</sup>.

El sistema constructivo tipo túnel es una técnica industrializada compuesta por muros delgados y losas de espesor similar al de los muros, que son construidos simultáneamente con formaleta ubicada vertical y horizontalmente (formando un túnel)<sup>2</sup>. Durante los últimos años, el uso de este sistema para la construcción de edificaciones en Bucaramanga (Colombia) ha evidenciado un notorio crecimiento; sin embargo, eventos sísmicos ocurridos en años recientes en países como Chile y Nueva Zelanda han llamado la atención de la industria de la construcción, debido a que se observaron comportamientos inesperados en estructuras con características similares a las construidas en Bucaramanga<sup>3 4</sup>.

---

<sup>1</sup> MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. NSR-10. Bogotá, 2010.

<sup>2</sup> AREVALO Angie, GONZALEZ Milton. "Estudio Del Comportamiento Estructural De Muros Delgados En Concreto Reforzado Típicos Del Sistema Estructural Tipo Túnel". Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2018.

<sup>3</sup> SAN BARTOLOMÉ Ángel, QUIJUN Daniel, SILVA Wilson. "Comentarios relativos al tipo de falla en los muros de concreto de edificios chilenos en el sismo del 27 de febrero de 2010". Concreto y cemento. Investigación y desarrollo, 2011, vol. 3, no 1, p. 36-48.

<sup>4</sup> BRICEÑO Adriana, CARRERAS Nelson. "Análisis y diseño de muros estructurales de concreto, considerando las experiencias de los terremotos de Chile 2010 y Nueva Zelanda 2011". Tesis de pregrado de Ingeniería Civil. Universidad Católica Andrés Bello. Caracas, 2013.

Una vez se realiza el diseño garantizando la resistencia en la dirección más débil del muro, se obtiene que en el otro sentido presenta una capacidad muy superior a la requerida al realizar el análisis estático no-lineal. Esto se debe a que, para esta configuración, el refuerzo se concentra de manera importante en el ala, lo que le proporciona mucha mayor resistencia al muro cuando esta se somete a tracción. De igual manera, mediante el modelo de elementos finitos, se aprecia que, aunque el espécimen llega a desplazamientos similares en ambos sentidos, su capacidad en fuerza es bastante menor cuando el ala está a compresión.

## 1. OBJETIVOS

### 1.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar un muro estructural de concreto reforzado con sección transversal en T para apoyar el desarrollo del proyecto de investigación “Estudio del comportamiento sísmico de edificaciones tipo túnel en zonas de alta amenaza sísmica. Fase 1” con código 1895 en la VIE.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar los materiales que se emplearán para el diseño del muro: cemento, agregados fino y grueso, acero de refuerzo y malla electro-soldada; de acuerdo con las normas del Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC.
- Diseñar la mezcla de concreto del muro de acuerdo con la norma del American concrete Institute ACI 211.
- Diseñar el refuerzo del muro de acuerdo con el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo-Resistente NSR10.
- Realizar un Análisis Estático No-Lineal (Pushover) para determinar la capacidad del muro, con el fin de revisar su diseño, de manera que este no supere la capacidad de los equipos del Laboratorio de Estructuras.
- Emplear un modelo numérico para determinar la respuesta del muro ante carga cíclica reversible, a partir de un protocolo de desplazamientos para distintos niveles de deriva.

## 2. MUROS ESTRUCTURALES

Los muros estructurales de concreto reforzado son ampliamente utilizados en proyectos de edificaciones sismorresistentes, debido a que sus características destacadas de elevada rigidez y ductilidad le permiten resistir de forma eficiente las cargas laterales generadas por las acciones sísmicas y de viento, limitando los desplazamientos laterales de la estructura y permitiendo gran disipación de energía en las zonas diseñadas para tal fin<sup>5</sup>. Los muros estructurales tienen la característica de presentar un espesor muy pequeño en comparación con el resto de sus dimensiones, y se pueden clasificar según su sección transversal, relación de aspecto y comportamiento<sup>6</sup>.

De acuerdo con su sección transversal los muros más típicos se muestran en la Figura 1. En algunas ocasiones los muros poseen elementos extremos con la intención de obtener una mejor unión con los elementos de borde, para dar estabilidad a muros con almas angostas y proporcionar un confinamiento más efectivo del concreto en la zona de articulación plástica<sup>7</sup>.

---

<sup>5</sup> BRICEÑO Adriana, CARRERAS Nelson. Op. Cit.

<sup>6</sup> LOPEZ Jordy, MORENO Jorge. "Evaluación Experimental Del Comportamiento Biaxial De Muros En Concreto Reforzado". Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2017.

<sup>7</sup> ALCOCER Sergio. "Comportamiento y Diseño de estructuras de concreto reforzado: Muros Estructurales". Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). México D.F., 1995.

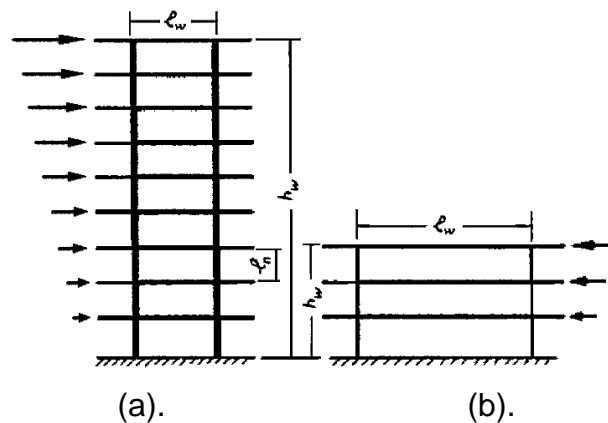
Dada su relación de aspecto (altura del muro/longitud del muro), se distinguen dos categorías: muros esbeltos, con relaciones de aspecto mayores a dos y muros robustos para relaciones de aspecto menores o iguales a dos, (Figura 2)<sup>8</sup>.

Ilustración 1. Secciones transversales comunes de muros estructurales.



Fuente: ALCOCER Sergio. "Comportamiento y Diseño de estructuras de concreto reforzado: Muros Estructurales". Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). México D.F., 1995.

Ilustración 2. Muro estructural esbelto (a) y robusto (b).



Fuente: ALCOCER Sergio. "Comportamiento y Diseño de estructuras de concreto reforzado: Muros Estructurales". Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). México D.F., 1995.

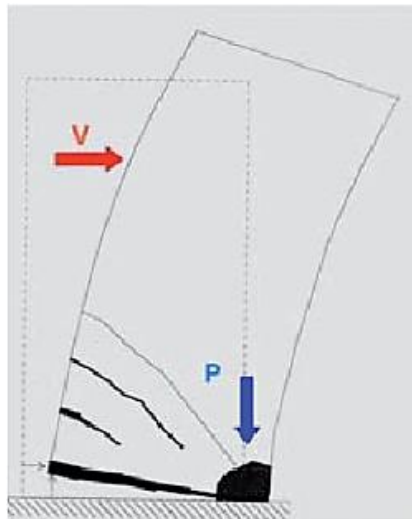
---

<sup>8</sup> ALCOCER Sergio. Op. Cit.

## 2.1. FORMAS DE FALLA EN MUROS ESTRUCTURALES ESBELTOS

Un prerequisite para el diseño de muros estructurales dúctiles es que la fluencia del refuerzo de flexión en zonas de articulación plástica definidas controle la resistencia, las deformaciones inelásticas y la capacidad de deformación de toda la estructura. De esta manera, la principal fuente de disipación de energía será la plastificación del refuerzo a flexión, normalmente en la base del muro (Figura 3). Se deben prevenir los modos de falla producidos por tracción diagonal o a compresión diagonal causados por el cortante (Figura 4), así como falla por deslizamiento a lo largo de las juntas de construcción (Figura 5) o fallas por adherencia a lo largo de los empalmes y anclajes<sup>9</sup>.

Ilustración 3. Falla por flexión.

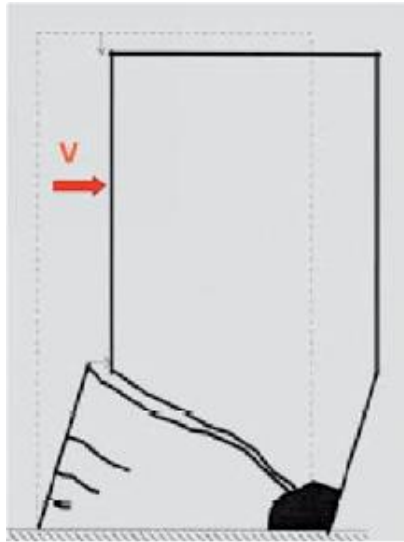


Fuente: SAN BARTOLOMÉ, Ángel. QUIJUN, Daniel. SILVA, Wilson. Comentarios relativos al tipo de falla en los muros de concreto de edificios chilenos en el sismo del 27 de febrero de 2010. Concreto y cemento. Investigación y desarrollo, 2011, vol. 3, no 1, p. 36-48.

---

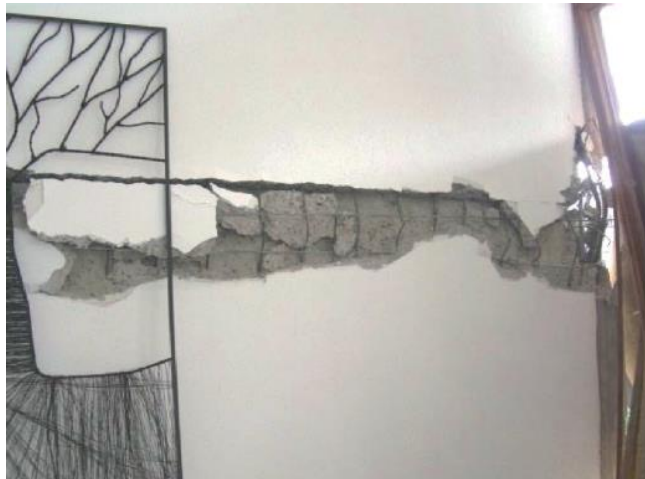
<sup>9</sup> BRICEÑO Adriana, CARRERAS Nelson. Op. Cit.

Ilustración 4. Falla por corte.



Fuente: SAN BARTOLOMÉ, Ángel. QUIJUN, Daniel. SILVA, Wilson. Comentarios relativos al tipo de falla en los muros de concreto de edificios chilenos en el sismo del 27 de febrero de 2010. Concreto y cemento. Investigación y desarrollo, 2011, vol. 3, no 1, p. 36-48.

Ilustración 5. Falla por deslizamiento en la junta de construcción.

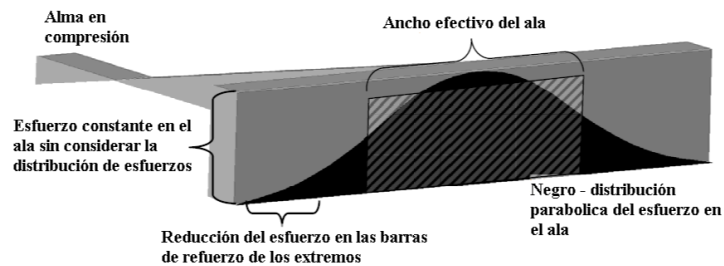


Fuente: SAN BARTOLOMÉ, Ángel. QUIJUN, Daniel. SILVA, Wilson. Comentarios relativos al tipo de falla en los muros de concreto de edificios chilenos en el sismo del 27 de febrero de 2010. Concreto y cemento. Investigación y desarrollo, 2011, vol. 3, no 1, p. 36-48.

## 2.2 MUROS ESTRUCTURALES CON SECCIÓN EN T

Para la realización del diseño del muro de concreto reforzado con sección transversal en T se consideraron varias investigaciones en elementos estructurales con sección transversal en T donde se ha encontrado que, cuando el ala de la sección se encuentra a tracción, los esfuerzos en esta se distribuyen de forma parabólica. Esto provoca deformaciones que conducen a que el refuerzo más alejado del alma soporte menos carga que el refuerzo cercano al alma (Figura 6). Esto reduce los esfuerzos en el refuerzo más lejano de la unión alma-ala y provoca una reducción en la capacidad de flexión de la sección en comparación con la suposición de un ala totalmente efectiva<sup>10 11 12</sup>.

Ilustración 6. Efecto de la distribución del corte en el ala para una sección transversal en T con el ala a tracción.



Fuente: BRUEGGEN Beth. "Performance of T-shaped reinforced concrete structural walls under multi-directional loading". Doctoral dissertation. University of Minnesota, 2009.

<sup>10</sup> WALLACE John. "Evaluation of UBC-94 provisions for seismic design of RC structural walls". Earthquake Spectra, 1996, vol. 12, no 2, p. 327-348.

<sup>11</sup> MOEHLE Jack. "Displacement-based design of RC structures subjected to earthquakes". Earthquake Spectra, 1992, vol. 8, no 3, p. 403-428.

<sup>12</sup> BRUEGGEN Beth. "Performance of T-shaped reinforced concrete structural walls under multi-directional loading". Doctoral dissertation. University of Minnesota, 2009.

De acuerdo con lo anterior, diferentes autores han recomendado limitar el ancho efectivo del ala que debe considerarse para el análisis y diseño de este tipo de secciones. Así, el UBC-94 requería que el ancho efectivo del ala no excediera el 10% de la altura del muro<sup>13</sup>. En 1996, basándose en ensayos a dos muros con sección transversal en T, Wallace recomienda aumentar ese límite hasta el 25% de la altura del muro para representar adecuadamente el comportamiento y reducir la probabilidad de fallas por corte<sup>14</sup>. Esta recomendación es la que finalmente se adopta en la NSR-10.

### 2.3 ANÁLISIS ESTÁTICO NO-LINEAL

El análisis estático no-lineal es una alternativa práctica para encontrar la respuesta de una estructura más allá del rango elástico, en lugar de un análisis dinámico no-lineal, que puede llegar a requerir una capacidad computacional muy alta y tiempo de procesamiento elevado. Dentro del análisis estático no-lineal es ampliamente usada la técnica del *Pushover* para encontrar la curva de capacidad de las estructuras ante acciones sísmicas. Esta curva relaciona el cortante basal con el desplazamiento lateral en la cima de la estructura (Figura 7)<sup>15</sup>.

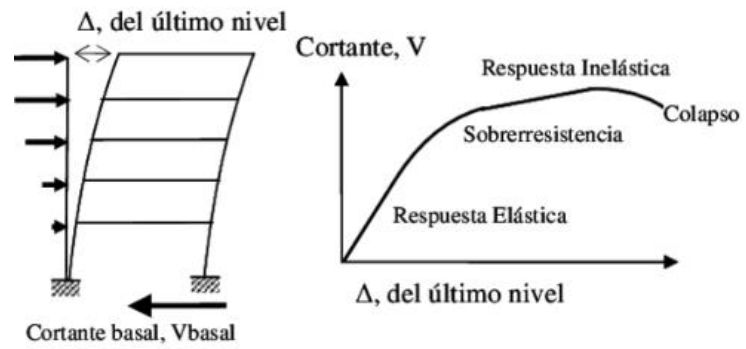
---

<sup>13</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE OF BUILDING OFFICIALS. Uniform Building Code. UBC-94. Whittier, CA. 1994.

<sup>14</sup> BRUEGGEN Beth. Op. Cit.

<sup>15</sup> AGUIAR Roberto. Análisis sísmico por desempeño. Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército, 2003, vol. 342.

Ilustración 7. Curva de capacidad.



Fuente: AGUIAR Roberto. Análisis sísmico por desempeño. Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército, 2003, vol. 342.

### 3. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

A continuación, se presenta la caracterización de los materiales: agregados grueso y fino, cemento, acero de refuerzo y malla electrosoldada. Se emplearon las normas del Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC. Se tomaron tres muestras por ensayo. Ver anexo A.

#### 3.1 AGREGADOS

Se realizaron los ensayos correspondientes a las siguientes normas: NTC 77<sup>16</sup>, NTC 92<sup>17</sup>, NTC 176<sup>18</sup>, NTC 221<sup>19</sup>, NTC 237<sup>20</sup>, NTC 1776<sup>21</sup>, NTC 98<sup>22</sup>, NTC 127<sup>23</sup>.

3.1.1 Agregado grueso. El material presentó un tamaño máximo nominal (TMN) de 1/2" (12.7mm). Se obtuvo un contenido de humedad promedio 1.15%. La densidad aparente promedio fue de 2.7g/cm<sup>3</sup> y un porcentaje de absorción promedio de 0.33%. El peso unitario compactado promedio fue de 1550.31kg/m<sup>3</sup>. Además, el material presentó un porcentaje de pérdida promedio de 27.06%, menor al porcentaje de pérdida admisible (50%).

---

<sup>16</sup> Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. Concretos. Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos. Bogotá, 2018.

<sup>17</sup> Ibíd., Ingeniería Civil y Arquitectura. Método de ensayo para determinar por secado el contenido total de humedad de los agregados. Bogotá, 1994.

<sup>18</sup> Ibíd., Ingeniería Civil y Arquitectura. Método de ensayo para determinar la densidad y absorción del agregado grueso. Bogotá, 1995.

<sup>19</sup> Ibíd., Ingeniería Civil y Arquitectura. Método de ensayo para determinar la determinación de la densidad volumétrica (masa unitaria) y vacíos en agregados. Bogotá, 2019.

<sup>20</sup> Ibíd., Ingeniería Civil y Arquitectura. Método de ensayo para determinar la resistencia al desgaste por abrasión e impacto de agregados gruesos menor de 37,5 mm, utilizando la Máquina de Los Ángeles. Bogotá, 2012.

<sup>21</sup> Ibíd., Ingeniería Civil y Arquitectura. Método de ensayo para determinar la densidad y absorción del agregado fino. Bogotá, 1995.

<sup>22</sup> Ibíd., Concretos. Método de ensayo para determinar las impurezas orgánicas en agregado fino para concreto. Bogotá, 2000.

<sup>23</sup> Ibíd., Cementos. Método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico. Bogotá, 2017.

Tabla 1. Granulometría del agregado grueso.

Tamiz (in)	Abertura (mm)	%Retenido Acumulado	%Pasa
1"	25.4	0	100
3/4"	19.05	0	100
1/2"	12.7	46.89	53.11
3/8"	9.52	69.49	30.51
No.4	4.75	93.21	6.79
Fondo		99.75	0.25

Ilustración 8. Muestras de agregado grueso después de ponerlas en el horno



Ilustración 9. Muestras de agregado grueso antes de sumergirlo por 24 horas.



Ilustración 10. Muestras de agregado en el horno.



Ilustración 11. Máquina de Los Ángeles.



3.1.2 Agregado fino. Este material presentó en promedio un módulo de finura (MF) de 3.09. Se obtuvo un contenido de humedad promedio 5.8%. La densidad aparente promedio fue de  $2.55\text{g/cm}^3$  y un porcentaje de absorción promedio de 2.03%. El peso unitario compactado promedio fue de  $1610.85\text{kg/m}^3$ . Además, se encontró que las tres muestras de agregado fino presentan la escala 1 de Gardner, que es admisible.

Tabla 2. Granulometría del agregado fino.

Tamiz (in)	Abertura (mm)	%Retenido Acumulado	%Pasa
No.4	4.75	5.17	94.83
No.8	2.36	11.62	88.38
No.16	1.18	28.77	71.23
No.30	0.60	74.68	25.32
No.50	0.30	89.99	10.01
No.100	0.149	97.58	2.42
No.200	0.074	98.96	1.04
Fondo		99.76	0.24

Ilustración 12. Muestras de agregado fino después de ponerlas en el horno.



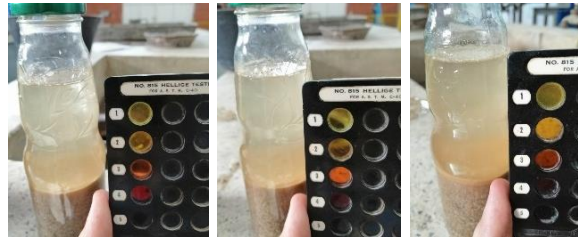
Ilustración 13. Muestras de agregado fino antes de sumergirlo por 24 horas.



Ilustración 14. Molde para el ensayo y varilla de apisonamiento.



Ilustración 15. Muestras de agregado fino comparada con la escala colorimétrica de Gardner.



### 3.2 CEMENTO

El cemento provisto fue CEMEX de uso general (Tipo I) y se obtuvo una densidad promedio de  $2.99\text{g/cm}^3$ .

Ilustración 16. Queroseno en el frasco de Le Chatelier.



### 3.3 ACERO

Se realizó el ensayo de tensión, cuya finalidad es obtener las propiedades mecánicas de resistencia a la tracción y resistencia a la fluencia, además determinar la curva de esfuerzo-deformación del material<sup>24</sup>. Se realizó el ensayo de tensión de seis probetas de acero de refuerzo, tres de 3/8” y tres 1/4” y tres probetas de malla electrosoldada de 6mm de diámetro

La caracterización de las barras de acero de refuerzo y de la malla electrosoldada se realizó de acuerdo con las siguientes normas: NTC 2289<sup>25</sup>, NTC 3353<sup>26</sup>, NTC 5806<sup>27</sup>.

---

<sup>24</sup> CABRERA Andrés, KOLLER Mario. “Comportamiento a tracción del acero estructural, según norma NTC 2289, de diferentes fabricantes de acero de refuerzo en el mercado”. Trabajo de Grado. Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Civil. Bogotá, 2017.

<sup>25</sup> Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. Barras corrugadas y lisas de acero de baja aleación para refuerzo de concreto. Bogotá, 2015.

<sup>26</sup> *Ibíd.*, Definiciones y métodos para los ensayos mecánicos de productos de acero. Bogotá: ICONTEC, 2019.

<sup>27</sup> *Ibíd.*, Alambre de acero liso y grafilado y mallas electrosoldadas para refuerzo de concreto. Bogotá: ICONTEC, 2019.

Para las barras de acero de refuerzo de 3/8" se obtuvo que la resistencia a la tracción promedio es 648MPa y la resistencia a la fluencia promedio es 465MPa (Figura 18). Por su parte, para las barras de acero de refuerzo de 1/4" se obtuvo que la resistencia a la tracción promedio es 646MPa y la resistencia a la fluencia promedio es 496MPa (Figura 20).

Ilustración 17. Barra de 3/8" al finalizar el ensayo de tensión.



Ilustración 18. Gráfica de esfuerzo-deformación de las barras de 3/8”.

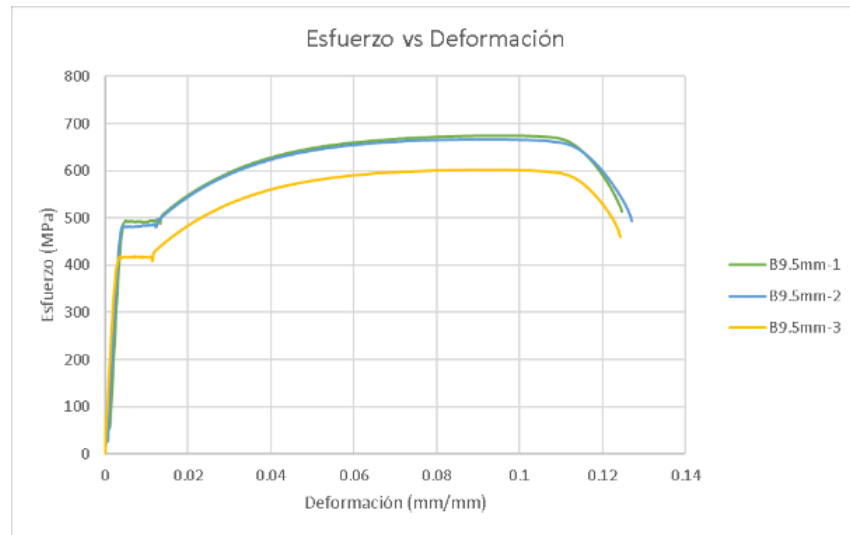
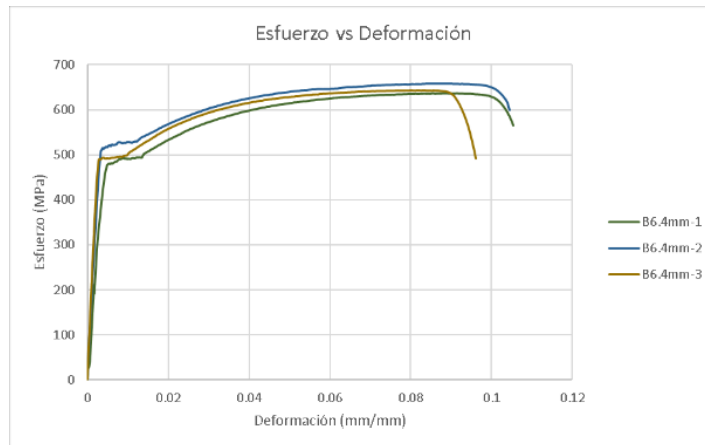


Ilustración 19. Barra de 1/4" al finalizar el ensayo de tensión.



Gráfico 1. Gráfica de esfuerzo-deformación de las barras de 1/4".

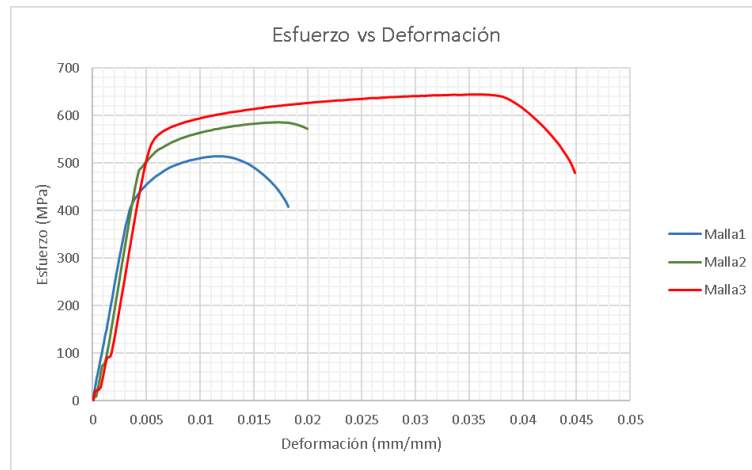


Finalmente, se ensayaron tres probetas de malla electrosoldada de 6mm. Se determinó que la resistencia a la tracción fue de 587MPa y a la fluencia de aproximadamente 530MPa.

Ilustración 20. Malla electrosoldada de 6mm al finalizar el ensayo de tensión.

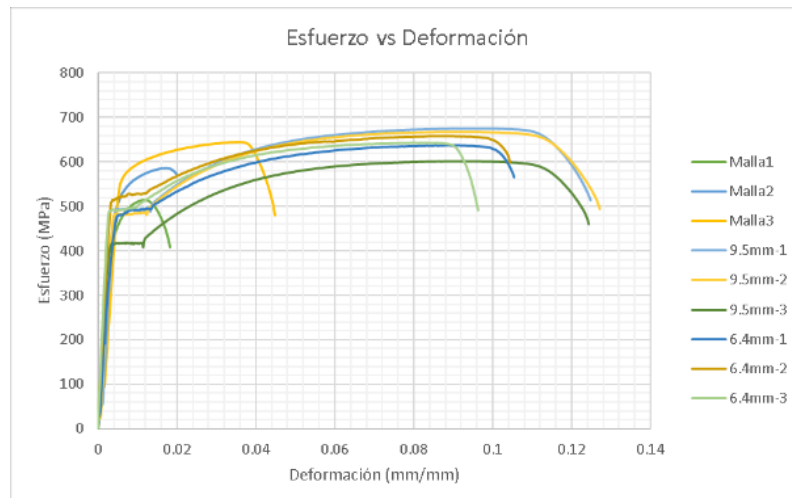


Gráfico 2. Gráfica de esfuerzo-deformación de las probetas de la malla electrosoldada de 6mm.



En la Figura 23 se muestra la gráfica esfuerzo-deformación de las nueve probetas de acero ensayadas, se aprecia la mayor ductilidad y la presencia de un escalón de fluencia que tuvieron las barras de refuerzo en comparación con las muestras de la malla electrosoldada.

Gráfico 3. Gráfica de esfuerzo-deformación de las nueve probetas ensayadas



## 4. DISEÑO DEL MURO

### 4.1 DISEÑO DE LA MEZCLA DE CONCRETO

El diseño de la mezcla de concreto se hizo de acuerdo con el *American Concrete Institute* ACI 211.1-91. Para este diseño se requirió conocer previamente: la resistencia especificada ( $f'c$ ), el asentamiento (*slump*) y las propiedades de los agregados y el cemento<sup>28</sup>.

La mezcla se diseñó para  $1\text{m}^3$  de concreto con resistencia especificada de 21MPa (3000psi) y asentamiento de 4" de acuerdo con la Tabla 3, para muros.

Tabla 3. Asentamientos recomendados para diferentes tipos de construcción.

Tipos de construcción	Asentamiento (in)	
	Máximo	Mínimo
Zapatas y muros de cimentación reforzados	3	1
Zapatas, cajones y muros de subestructuras sin refuerzo	3	1
Vigas y muros reforzados	4	1
Columnas de edificios	4	1
Pavimentos y losas	3	1
Concreto masivo	2	1

Fuente: AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete. ACI Standard 211.1. Farmington Hills, MI. 1991.

---

<sup>28</sup> AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete. ACI Standard 211.1. Farmington Hills, MI. 1991.

Las propiedades físicas de los materiales determinados en el numeral anterior se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Propiedades físicas de los agregados y cemento.

Propiedades físicas de los agregados	Agregado fino	Agregado grueso
Peso unitario compactado [kg/m <sup>3</sup> ]	1610.85	1550.31
Densidad aparente [g/cm <sup>3</sup> ]	2.55	2.71
Contenido de humedad (%W) [%]	5.80	1.15
Porcentaje de absorción (%Abs) [%]	2.03	0.33
Módulo de finura	3.09	-
TMN	-	1/2"
Densidad del cemento [g/cm <sup>3</sup> ]	2.99	

Primero, se determinó la cantidad aproximada de agua para la mezcla y de aire atrapado para un concreto sin aire incorporado en función del asentamiento y el tamaño máximo nominal de agregado grueso, a partir de la Tabla 5. Para este caso la cantidad de agua fue 365lb/yd<sup>3</sup> (216kg/m<sup>3</sup>) y la cantidad de aire atrapado 2.5%.

Tabla 5. Cantidad aproximada de agua y aire atrapado para un concreto sin aire incorporado.

Agua (lb/yd <sup>3</sup> ) de concreto para los tamaños máximos nominales de agregados indicados					
Asentamiento (in)	3/8	1/2	3/4	1	1-1/2
Concretos sin aire incorporado					
1 a 2	350	335	315	300	275
3 a 4	385	365	340	325	300
6 a 7	410	385	360	340	315
Cantidad aproximada de aire atrapado (%)	3	2.5	2	1.5	1

Fuente: AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete. ACI Standard 211.1. Farmington Hills, MI. 1991.

Luego, se calculó la resistencia requerida ( $f'_{cr}$ ). Cuando no se dispone de datos estadísticos o registros de producción se emplea la Tabla 6 para determinar dicha resistencia<sup>29</sup>. En este caso el  $f'_c$  fue de 21MPa (3000psi), por lo tanto, usando la respectiva ecuación se obtuvo un  $f'_{cr}$  es de 29.3MPa (4200psi).

Tabla 6. Resistencia requerida promedio.

Resistencia especificada a compresión (psi)	Resistencia promedio requerida a compresión (psi)
$f'_c < 3000$	$f'_{cr} = f'_c + 1000$
$3000 \leq f'_c \leq 5000$	$f'_{cr} = f'_c + 1200$
$f'_c > 5000$	$f'_{cr} = 1.10f'_c + 700$

Fuente: AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI Comitee 318. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. Farmington Hills, MI, 2008.

<sup>29</sup> AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI Comitee 318. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. Farmington Hills, MI, 2008.

Para la cantidad de cemento requerida se determinó la relación agua-cemento (a/c) a partir de la Tabla 7. En este caso fue necesario interpolar y se obtuvo un valor de relación agua-cemento de 0.553. Conociendo la cantidad de agua requerida se determinó la cantidad de cemento, obteniendo un valor de 390.40kg.

Tabla 7. Relación agua-cemento en función de la resistencia requerida.

Resistencia a compresión a los 28 días (psi)	Relación agua-cemento, por peso	
	Concreto sin aire incorporado	Concreto con aire incorporado
6000	0.41	-
5000	0.48	0.40
4000	0.57	0.48
3000	0.68	0.59
2000	0.82	0.74

Fuente: AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete. ACI Standard 211.1. Farmington Hills, MI. 1991.

Posteriormente, se determinó el volumen de agregado grueso por unidad de volumen del concreto ( $b/b_0$ ) en función del módulo de finura del agregado fino y el tamaño máximo nominal, a partir de la Tabla 8. De acuerdo con el módulo de finura de 3.09, se obtuvo un valor de  $b/b_0$  igual a 0.521.

Tabla 8. Volumen de agregado grueso por unidad de volumen del concreto.

Tamaño máximo nominal del agregado (in)	Volumen de agregado grueso, seco y compactado por unidad de volumen de concreto para diferentes módulos de finura del agregado fino			
	2.40	2.60	2.80	3.00
3/8	0.50	0.48	0.46	0.44
1/2	0.59	0.57	0.55	0.53
3/4	0.66	0.64	0.62	0.60
1	0.71	0.69	0.67	0.65
1-1/2	0.75	0.73	0.71	0.69

Fuente: AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete. ACI Standard 211.1. Farmington Hills, MI. 1991.

Conocido el peso unitario compactado del agregado grueso y la relación  $b/b_0$  se calculó la cantidad requerida de este para la muestra, la cual fue de 807.71kg. Luego, se calculó el volumen de los materiales a partir de su masa y densidad.

A partir de la densidad medida del cemento se obtuvo un volumen de  $0.131\text{m}^3$ . En el caso del agua, asumiendo la densidad igual a  $1\text{g/cm}^3$ , se obtuvo un volumen de  $0.216\text{m}^3$ . Para el agregado grueso se determinó un volumen de  $0.298\text{m}^3$ . Como se determinó anteriormente, de acuerdo con la Tabla 5, el volumen del aire constituye el  $0.025\text{m}^3$ . La sumatoria de estos volúmenes es igual a  $0.670\text{m}^3$ , por lo tanto, el volumen de agregado fino es igual a  $0.330\text{m}^3$ , que equivale a 842.48kg.

Debido a que las propiedades físicas con las que se determinaron las cantidades anteriores se obtuvieron a partir de materiales secos, y considerando que los agregados en su estado natural contienen cierta cantidad de agua, se realizó la corrección por humedad de los agregados.

Para el agregado grueso se obtuvo una masa corregida de 817kg y para el agregado fino de 891.34kg. Luego, se determinó el agua efectiva debida al aporte de agua por la humedad de los agregados.

Se determinó un aporte de agua del agregado grueso de 31.76kg y el agregado fino de 6.62kg. El agua efectiva fue igual a 177.62kg o 177.62L. Las cantidades para 1m<sup>3</sup> de concreto se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Cantidades corregidas por metro cúbico (1m<sup>3</sup>) de concreto.

Cemento	390.40	kg
Agua	177.62	L
AF	891.34	kg
AG	817.00	kg

## 4.2 DISEÑO DEL REFUERZO

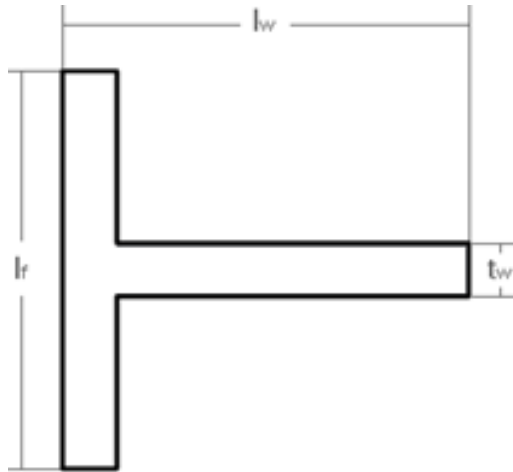
El diseño del muro estructural de concreto reforzado con sección T, característico de esta tipología en Bucaramanga, se realizó siguiendo lo establecido en la NSR-10 para un diseño con capacidad especial de disipación de energía (DES)<sup>30</sup>.

Se definieron las siguientes dimensiones iniciales del muro TW1.1: longitud del alma ( $l_w$ ) de 1300mm, longitud del ala ( $l_f$ ) de 1300mm, altura del muro ( $h_w$ ) de 2700mm y espesor ( $t_w$ ) de 150mm, garantizando la esbeltez del muro con una relación de aspecto de 2.08.

---

<sup>30</sup> MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Op. Cit.

Ilustración 21. Geometría del muro TW1.1.



Para las cargas de diseño se tuvo en cuenta la capacidad de los actuadores *MTS* disponibles en el laboratorio de Estructuras y que solo se requiera el 80% de esta, la carga axial última ( $N_u$ ) fue de 329kN, el cortante último ( $V_u$ ) 400kN y el momento último ( $M_u$ ) 1080kN.m.

Para el diseño de fuerzas cortantes horizontales en el plano del muro, la altura efectiva se consideró igual a  $0.8l_w$  (C.11.9.4), obteniendo un valor de 1040mm.

Se realizó el chequeo del cortante máximo permitido en cualquier sección horizontal en el plano del muro descrito en C.11.9.3 y el cortante máximo permitido en muros estructurales C.21.9.4.1, obteniendo un valor de  $V_{umáx}$  igual a 445kN.

Se determinó la resistencia al cortante proporcionada por el concreto ( $V_c$ ) mediante las fórmulas planteadas en C.11.9.6 y se comparó con el valor máximo permitido (C.11.9.5) que en este caso fue mayor al calculado, por lo tanto,  $V_c$  es igual a 114kN. Se emplearon 2 capas de refuerzo según lo estipulado en C.21.9.2.3.

Dado que  $V_u$  es mayor a  $0.5\phi V_c$  (C.11.9.8), el refuerzo del muro para resistir el cortante se diseñó según C.11.9.9. Para el refuerzo transversal, la resistencia a cortante proporcionada por el refuerzo de cortante ( $V_s$ ) requerida fue de 419kN (C.11.1.1) y mediante C.11.9.9.1 se determinó la cuantía de refuerzo transversal ( $\rho_t$ ) igual a  $0.0042\text{mm}^2/\text{mm}^2$ . Según C.11.9.9.2 y C.21.9.2.1 la cuantía de refuerzo transversal mínima fue  $0.0025\text{mm}^2/\text{mm}^2$ , por tanto, se suministró el refuerzo según la cuantía calculada. El refuerzo propuesto fue de 2 capas de malla electrosoldada de diámetro de 8mm cada 150mm. Se chequeó el espaciamiento máximo ( $s_{t\text{máx}}$ ) según C.11.9.9.3 y C.21.9.2.1, obteniendo un valor de 260mm, que cumplió con el espaciamiento propuesto.

Para el refuerzo longitudinal se determinó la cuantía de refuerzo longitudinal ( $\rho_l$ ) según C.11.9.9.4 igual a  $0.0029\text{mm}^2/\text{mm}^2$  y se comparó con la cuantía mínima estipulada en C.21.9.2.1 igual a  $0.0025\text{mm}^2/\text{mm}^2$ , por tanto, se suministró el refuerzo según la cuantía calculada. Se propuso un refuerzo igual que el refuerzo transversal para efectos de construcción, es decir, 2 capas de malla electrosoldada con diámetro 8mm cada 150mm. Se chequeó el espaciamiento máximo ( $s_{l\text{máx}}$ ) según C.11.9.9.5 y C.21.9.2.1, obteniendo un valor de 450mm, lo cual cumplió con el espaciamiento propuesto.

A través de C.21.9.6.2(a) y C.21.9.6.3 se determinó que es necesario el uso de elementos especiales de borde, cuyo refuerzo debe extenderse verticalmente desde la sección crítica por una distancia no menor que 1.3m conforme lo planteado en C.21.9.6.2(b). A partir de C.21.9.6.4(a) se determina que el elemento de borde debe extenderse horizontalmente desde la fibra extrema en compresión hasta una distancia no menor de 371mm. Se propone que esta distancia sea 400mm.

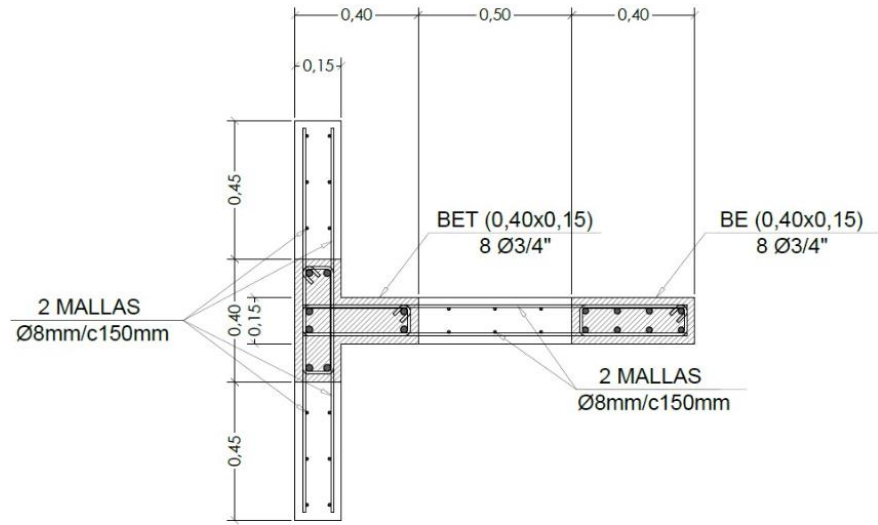
Para el diseño a flexión se recurrió a C.21.9.5. Para la primera condición, que genera un momento negativo, se obtuvo una cuantía de  $0.0136\text{mm}^2/\text{mm}^2$ . El refuerzo propuesto fue de 8 barras No.6, con estribos cerrados de confinamiento No.3 cada 50mm. Cuando el ala se encuentra en tensión, el ancho efectivo del ala debe extenderse desde la cara del alma una distancia igual al 25% de la altura total del muro (C.21.9.5.2) lo que representa un ancho efectivo de 1.50m que es superior al ancho del alma, por lo tanto, para este caso el ancho efectivo es el ancho del ala. Para esta condición, se obtuvo una cuantía de  $0.0012\text{mm}^2/\text{mm}^2$ . El refuerzo propuesto fue de 8 barras No.6, con estribos cerrados de confinamiento No.3 cada 50mm.

De acuerdo con C.21.6.3.1, la cuantía longitudinal para elementos sometidos a flexión y carga axial no debe ser menor al 1% ni mayor al 4%. En la Tabla 10 se presentan los resultados obtenidos. En la Figura 25 se presenta la distribución del refuerzo en planta.

Tabla 10. Fuerzas y refuerzo de muros diseñados.

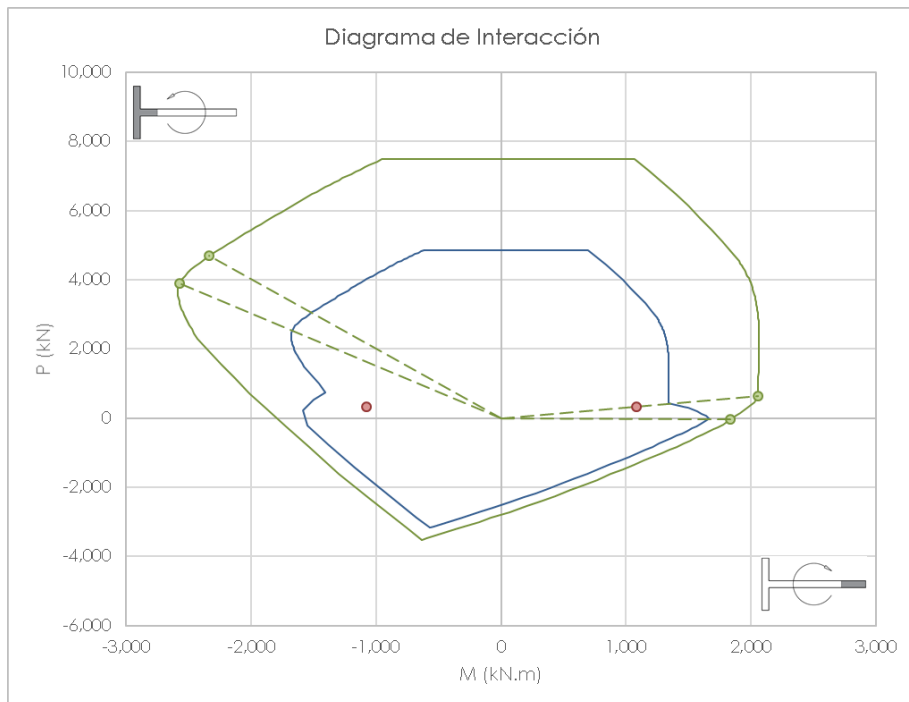
#	TW1.1
$l_w$ [mm]	1300
$V_u$ [kN]	400 (80%)
$N_u$ [kN]	329
Malla	8mm @ 150mm
$M_u$ [kN.m]	1080
$B_{eM-}$	8 No.6 / 400mm
$B_{eM+}$	8 No.6 / 400mm
$\rho_{M-}$	3.8%
$\rho_{M+}$	2.3%

Ilustración 22. Distribución del refuerzo en planta del muro TW1.1.



Muro TW1.1

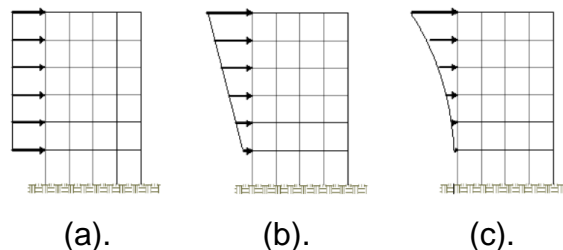
Ilustración 23. Diagrama de interacción muro TW1.1.



## 5. ANÁLISIS ESTÁTICO NO-LINEAL Y REVISIÓN DEL DISEÑO

Este análisis consiste en llevar una estructura al colapso mediante la aplicación de un patrón de cargas laterales incrementales aplicadas en la misma dirección. En este análisis, se considera el desplazamiento en la cima de la estructura ( $\delta$ ) como la variable de control que dependerá de las fuerzas aplicadas sobre la estructura y cuya suma es igual al cortante basal ( $V$ ). La relación entre las variables  $V$  y  $\delta$  es la curva de capacidad<sup>31</sup>. Para las cargas laterales aplicadas a la estructura se emplean fuerzas laterales similares a las fuerzas sísmicas estáticas equivalentes. Estas fuerzas siguen la forma del modo fundamental de vibración o una distribución más sencilla, que puede ser uniforme, triangular o parabólica (Figura 27)<sup>32</sup>.

Ilustración 24. Distribución de cargas laterales: (a) uniforme, (b) triangular, (c) parabólica.



Fuente: POMA DE LA CRUZ Jose Luis. "Software educativo para la automatización del análisis no lineal estático Pushover en estructuras de concreto armado". Tesis para optar el grado de Magíster en Ingeniería Civil. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, 2018.

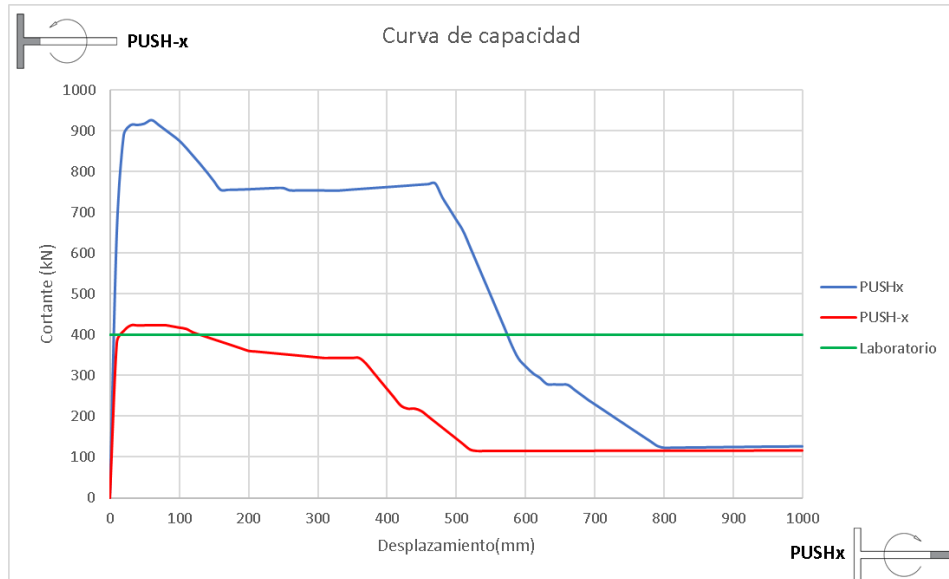
Se realizó un análisis Pushover empleando el software SAP2000 para determinar la curva de capacidad del muro TW1.1. Se determinó que la capacidad de este muro supera al actuador del laboratorio, como se observa en la Figura 28. Por lo tanto, se rediseñó el muro, de tal manera que su capacidad fuera inferior a la del actuador.

---

<sup>31</sup> VARGAS Yeudy, et al. "Evaluación probabilista de la capacidad, fragilidad y daño sísmico de edificios de hormigón armado". Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería, 2013, vol. 29, no 2, p. 63-78.

<sup>32</sup> POMA DE LA CRUZ Jose Luis. "Software educativo para la automatización del análisis no lineal estático Pushover en estructuras de concreto armado". Tesis para optar el grado de Magíster en Ingeniería Civil. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, 2018.

Ilustración 25. Curva de capacidad muro TW1.1.



Se modificó la geometría del muro. Las medidas finales se muestran en la Tabla 11. Adicionalmente, se propuso suministrar el refuerzo en las cuantías mínimas requeridas por NSR-10<sup>33</sup>.

Tabla 11. Dimensiones del muro TW1.2.

$l_w$ [mm]	1000
$l_f$ [mm]	1000
$h_w$ [mm]	2700
$t_w$ [mm]	150
$h_w/l_w$	2.70

<sup>33</sup> MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Op. Cit.

Dentro de los requerimientos mínimos se tiene que, para el refuerzo transversal y longitudinal, la cuantía mínima es de  $0.0025\text{mm}^2/\text{mm}^2$  (capítulo C.21). Se propusieron 2 mallas electrosoldadas de 6.0mm cada 150mm. Para los elementos de borde se propuso, para momento negativo 6 barras No.3, con estribos cerrados de confinamiento No.2 cada 50mm. Esto es una cuantía de 1%, lo cual cumple con C.21.6.3.1. Para momento positivo se propusieron 10 barras No.3, con estribos cerrados de confinamiento No.2 cada 50mm. Esto es una cuantía de 1%. En la Figura 29 se presenta el detallado del refuerzo del muro TW1.2.

El plano para la construcción del espécimen se adjunta en el anexo B. En la Figura 30 se muestra el diagrama de interacción del muro y, en la curva de capacidad en la Figura 31, obtenida por medio de un *Pushover* del muro, se aprecia que la capacidad del actuador es superior a la del muro TW1.2. Ver anexo C.

Ilustración 26. Distribución del refuerzo en planta del muro TW1.2

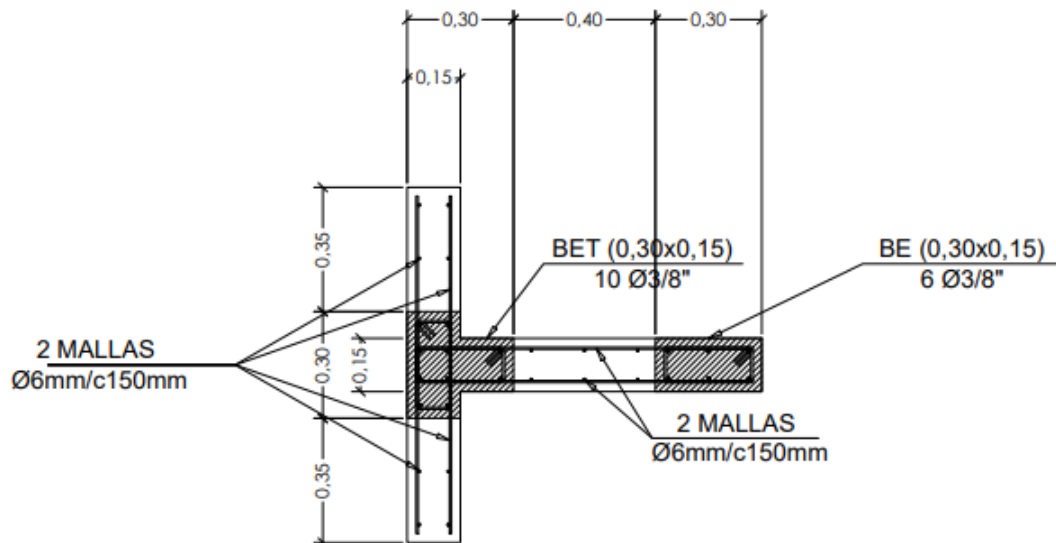


Ilustración 27. Diagrama de interacción del muro TW1.2

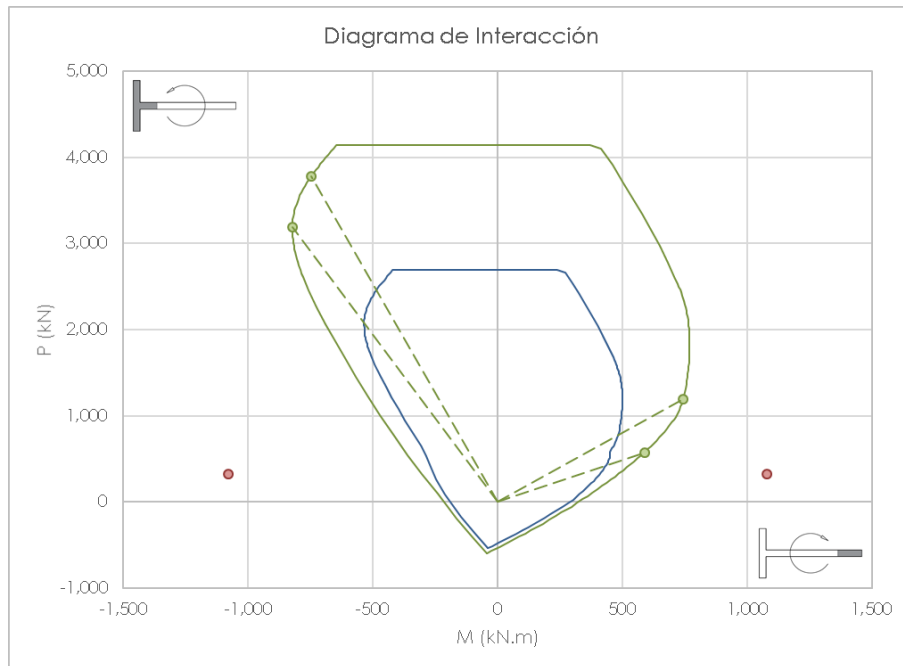
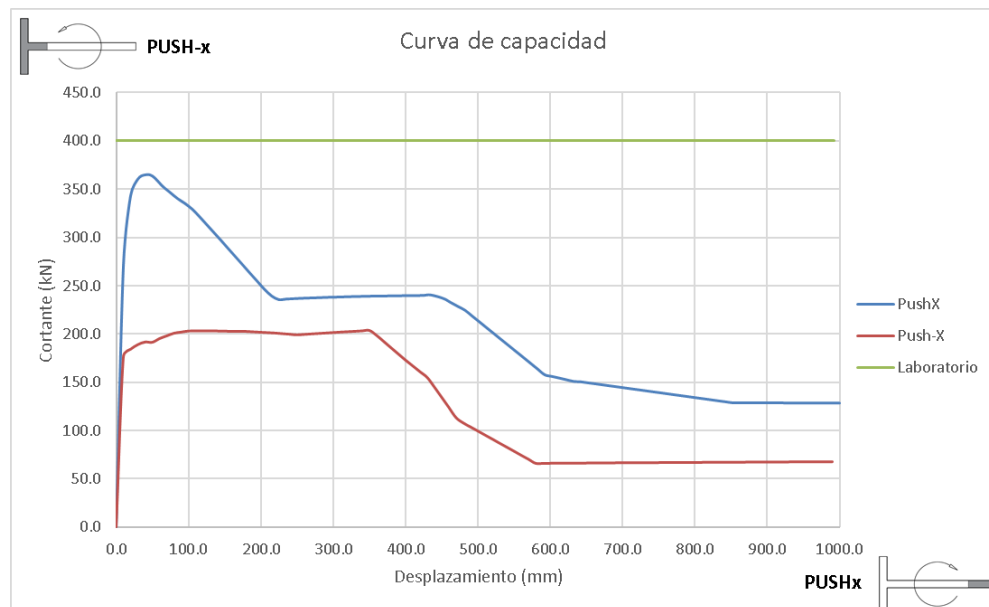


Ilustración 28. Curva de capacidad muro final.



## 6. RESPUESTA DEL MURO ANTE CARGA CÍCLICA REVERSIBLE

Se empleó el software *DIANA FEA BV*® para la elaboración de un modelo detallado por el método de elementos finitos (MEF) del espécimen de muro de concreto reforzado, como se explica a continuación.

Se utilizó el elemento sólido CHX60, de veinte nodos, que se muestra en la Figura 32. El refuerzo del espécimen se modeló de manera discreta mediante elementos línea embebidos en los elementos sólidos, como se muestra en la Figura 33. De esta manera, para el cálculo de las deformaciones del refuerzo, el modelo emplea el campo de desplazamiento de los elementos que lo contienen.

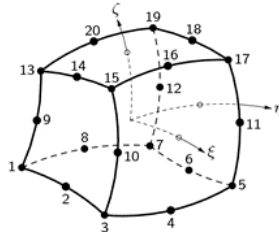
Se empleó para el concreto el *Total Strain Crack Model* disponible en *DIANA*. Este es un modelo constitutivo basado en la deformación total que describe el comportamiento a la tracción y a la compresión con una relación de esfuerzo-deformación y es usado para representar el comportamiento de los elementos de concreto. Este modelo constitutivo basado en la deformación total se desarrolla de acuerdo con la Teoría Modificada de Campo de Compresión<sup>34</sup>. Para incorporar las propiedades del concreto confinado en los elementos de borde del muro se implementó en el modelo la curva de esfuerzo-deformación del modelo constitutivo de Popovics/Mander, que se muestra en la Figura 34. El comportamiento de la sección no confinada se modeló utilizando la relación esfuerzo-deformación del concreto no confinado<sup>35</sup>.

---

<sup>34</sup> DASHTI Farhad, DHAKAL Rajesh, PAMPANIN Stefano. "Comparative in-plane pushover response of a typical RC rectangular wall designed by different standards". *Earthquakes and Structures*, 2014, vol. 7, no 5, p. 667-689.

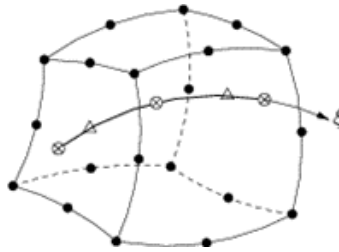
<sup>35</sup> *Ibíd.*

Ilustración 29. Elemento sólido CHX60.



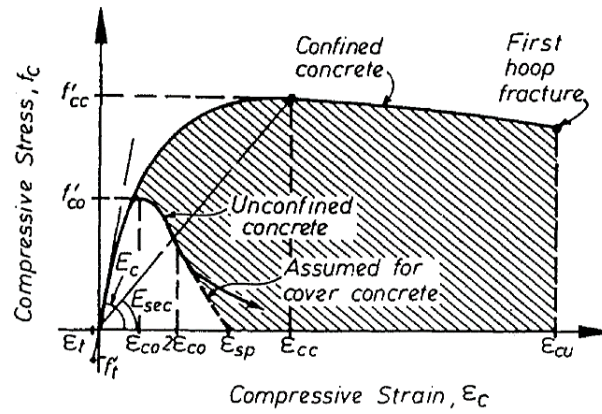
Fuente: DIANA FEA BV, User's Manual

Ilustración 30. Refuerzo embebido.



Fuente: DIANA FEA BV, User's Manual

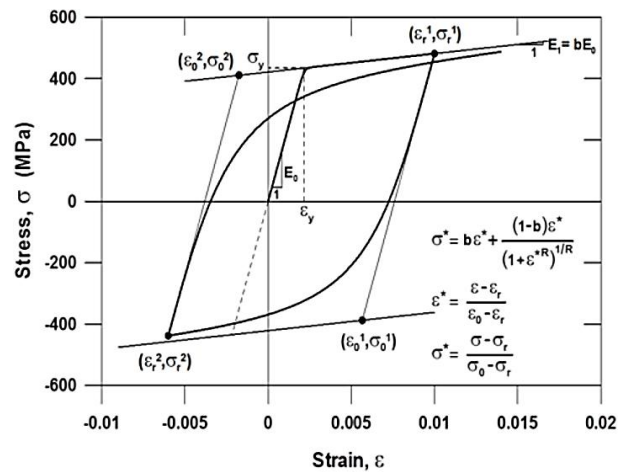
Ilustración 31. Modelo constitutivo Popovics/Mander.



Fuente: MANDER John, PRIESTLEY Michael, PARK R. "Theoretical stress-strain model for confined concrete". Journal of structural engineering, 1988, vol. 114, no 8, p. 1804-1826.

Las barras de refuerzo se modelaron como refuerzo embebido. En este planteamiento los elementos línea que representan las barras de refuerzo están perfectamente embebidas en los elementos estructurales. El software *DIANA* ignora el espacio ocupado por las barras de refuerzo embebidas, esto quiere decir que el elemento estructural no disminuye su rigidez ni su masa. Las deformaciones producidas en el refuerzo se calculan a partir del campo de desplazamiento de los elementos estructurales<sup>36</sup>. La curva esfuerzo-deformación del acero de refuerzo se definió utilizando el modelo constitutivo de Menegotto y Pinto, que se muestra en la Figura 35.

Ilustración 32. Modelo constitutivo Menegotto y Pinto.

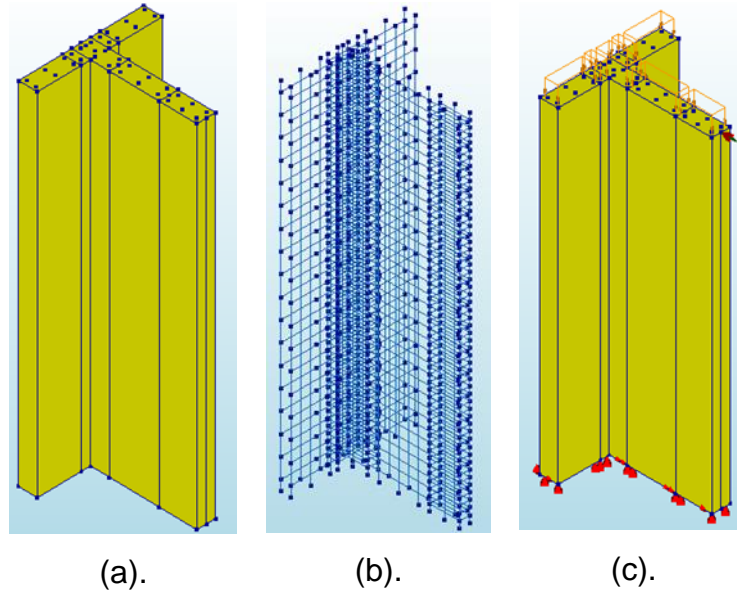


Fuente: MENEGOTTO M., Pinto P. "Method of Analysis for Cyclically Loaded R.C. Plane Frames Including Changes in Geometry and Non-Elastic Behavior of Elements under Combined Normal Force and Bending". Proc. of IABSE symposium on resistance and ultimate deformability of structures acted on by well-defined repeated loads, 1973, p. 15-22.

<sup>36</sup> DASHTI Farhad, DHAKAL Rajesh, PAMPANIN Stefano. Op. Cit.

En la Figura 36 se muestra el modelo del espécimen del muro TW1.2 en el software *DIANA*. Ver anexo D.

Ilustración 33. Modelo del espécimen : (a) concreto, (b) refuerzo, (c) cargas y apoyos.



Para el protocolo de carga lateral, se aplicaron ciclos de desplazamiento, basado en derivas de 0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 1.0; 1.5; y 2.0%, como se muestra en la Figura 37.

En la Figura 38 se muestra la curva de histéresis obtenida a partir del modelo en el software *DIANA*. Los desplazamientos negativos corresponden a la compresión del ala y los desplazamientos positivos a la compresión del alma. Puede observarse que, aunque el espécimen llega a desplazamientos similares en ambos sentidos, su capacidad en fuerza es bastante menor cuando el ala está a compresión. Esto se debe a que el área de ala, por ser mucho mayor que la del alma, puede soportar mayor compresión sin necesidad de presentar grandes deformaciones.

Ilustración 34. Protocolo de desplazamientos basado en derivas.

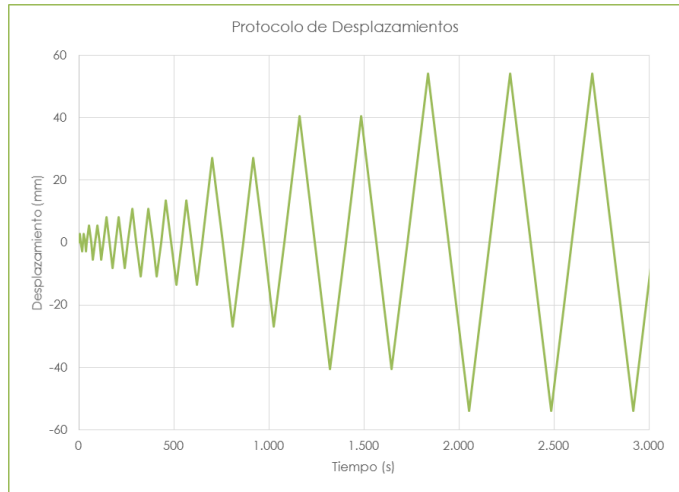
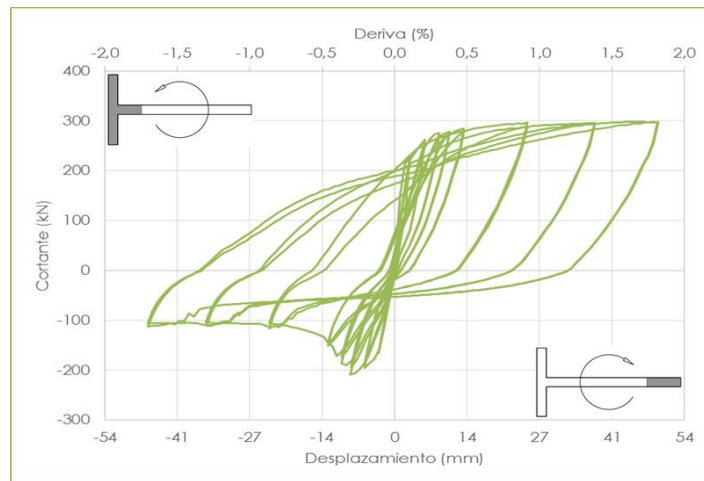


Ilustración 35. Curva de histéresis muro TW1.2.



Es preciso señalar que, aunque se emplearon los parámetros obtenidos de la caracterización del acero de refuerzo y la malla electrosoldada, se requiere la caracterización de la mezcla de concreto, al igual que determinar de forma experimental la respuesta del muro, con el fin de realizar la calibración de este modelo. No obstante, como una primera aproximación, previa a la realización de la campaña experimental, a partir del resultado obtenido del modelo, se puede esperar, que la capacidad de los equipos del laboratorio sea suficiente para completar el protocolo de carga propuesto y evidenciar los mecanismos de falla en el espécimen. En la Figura 39, 40 y 41 se muestra el patrón de agrietamiento esperado del espécimen, para el último ciclo para derivas del 0.5; 1.0 y 2.0% en cada sentido de aplicación de carga.

Ilustración 36. Patrón de agrietamiento para una deriva del 0.5%: (a) desplazamiento negativo, (b) desplazamiento positivo.

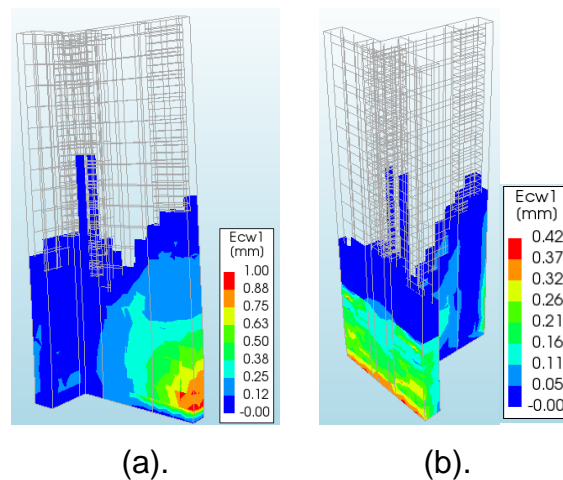


Ilustración 37. Patrón de agrietamiento para una deriva del 1.0%: (a) desplazamiento negativo, (b) desplazamiento positivo.

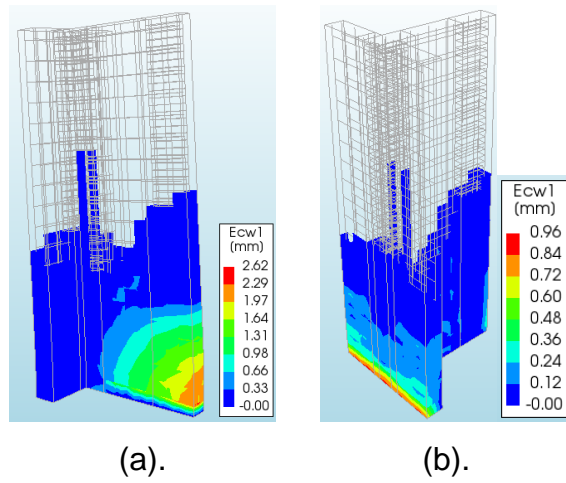
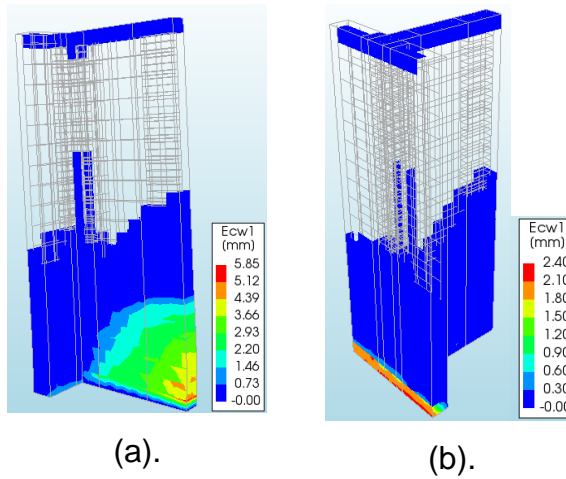


Ilustración 38. Patrón de agrietamiento para una deriva del 2.0%: (a) desplazamiento negativo, (b) desplazamiento positivo.



## 7. CONCLUSIONES

Se diseñó el refuerzo de un muro de concreto reforzado con sección transversal en T, de acuerdo con los requerimientos de la NSR-10, verificando su capacidad, a partir de un análisis estático no-lineal, y rediseñándolo para que su capacidad no exceda la de los equipos disponibles en el laboratorio.

Al garantizar la resistencia en la dirección más débil del muro, se obtiene que en el otro sentido presenta una capacidad muy superior a la requerida al realizar el análisis estático no-lineal. Esto se debe a que, para esta configuración, el refuerzo se concentra de manera importante en el ala, lo que le proporciona mucha mayor resistencia al muro cuando esta se somete a tracción

Ante la acción de carga cíclica reversible el espécimen llega a desplazamientos similares en ambos sentidos, pero su capacidad en fuerza es bastante menor cuando el ala está a compresión. Esto se debe a que el área de ala, por ser mucho mayor que la del alma, puede soportar mayor compresión sin necesidad de presentar grandes deformaciones.

Se empleó el método de elementos finitos para determinar la respuesta de un muro de concreto reforzado ante una carga cíclica reversible y su patrón de fisuración para distintos niveles de deriva. Para esto se emplearon los parámetros obtenidos experimentalmente, y otros disponibles en la literatura.

## BIBLIOGRAFÍA

AGUIAR Roberto. Análisis sísmico por desempeño. Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército, 2003, vol. 342.

ALCOCER Sergio. "Comportamiento y Diseño de estructuras de concreto reforzado: Muros Estructurales". Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). México D.F., 1995.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI Comimittee 318. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. Farmington Hills, MI, 2008. ----- Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete. ACI Standard 211.1. Farmington Hills, MI. 1991.

AREVALO Angie, GONZALEZ Milton. "Estudio Del Comportamiento Estructural De Muros Delgados En Concreto Reforzado Típicos Del Sistema Estructural Tipo Túnel". Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2018.

BRICEÑO Adriana, CARRERAS Nelson. "Análisis y diseño de muros estructurales de concreto, considerando las experiencias de los terremotos de Chile 2010 y Nueva Zelanda 2011". Tesis de pregrado de Ingeniería Civil. Universidad Católica Andrés Bello. Caracas, 2013.

BRUEGGEN Beth. "Performance of T-shaped reinforced concrete structural walls under multi-directional loading". Doctoral dissertation. University of Minnesota, 2009.

CABRERA Andrés, KOLLER Mario. “Comportamiento a tracción del acero estructural, según norma NTC 2289, de diferentes fabricantes de acero de refuerzo en el mercado”. Trabajo de Grado. Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Civil. Bogotá, 2017.

DASHTI Farhad, DHAKAL Rajesh, PAMPANIN Stefano. “Comparative in-plane pushover response of a typical RC rectangular wall designed by different standards”. *Earthquakes and Structures*, 2014, vol. 7, no 5, p. 667-689.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. Ingeniería Civil y Arquitectura. Alambre de acero liso y grafilado y mallas electrosoldadas para refuerzo de concreto. Bogotá. 2019.

----- Barras corrugadas y lisas de acero de baja aleación para refuerzo de concreto. Bogotá. 2015.

----- Cementos. Método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico. Bogotá, 2017.

----- Concretos. Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos. Bogotá, 2018.

----- Definiciones y métodos para los ensayos mecánicos de productos de acero. Bogotá, 2019.

----- Método de ensayo para determinar la determinación de la densidad volumétrica (masa unitaria) y vacíos en agregados. Bogotá. 2019.

----- Método de ensayo para determinar la densidad y absorción del agregado fino. Bogotá, 1995.

----- Método de ensayo para determinar la resistencia al desgaste por abrasión e impacto de agregados gruesos menor de 37,5 mm, utilizando la Máquina de Los Ángeles. Bogotá. 2012.

----- Método de ensayo para determinar por secado el contenido total de humedad de los agregados. Bogotá, 1994.

----- Método de ensayo para determinar la densidad y absorción del agregado grueso. Bogotá, 1995.

----- Método de ensayo para determinar las impurezas orgánicas en agregado fino para concreto. Bogotá, 2000.

LOPEZ Jordy, MORENO Jorge. “Evaluación Experimental Del Comportamiento Biaxial De Muros En Concreto Reforzado”. Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2017.

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. NSR-10. Bogotá, 2010.

MOEHLE Jack. “Displacement-based design of RC structures subjected to earthquakes”. Earthquake Spectra, 1992, vol. 8, no 3, p. 403-428.

POMA DE LA CRUZ Jose Luis. “Software educativo para la automatización del análisis no lineal estático Pushover en estructuras de concreto armado”. Tesis para optar el grado de Magíster en Ingeniería Civil. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, 2018.

SAN BARTOLOMÉ Ángel, QUIUN Daniel, SILVA Wilson. “Comentarios relativos al tipo de falla en los muros de concreto de edificios chilenos en el sismo del 27 de febrero de 2010”. Concreto y cemento. Investigación y desarrollo, 2011, vol. 3, no 1, p. 36-48.

INTERNATIONAL CONFERENCE OF BUILDING OFFICIALS. Uniform Building Code. UBC-94. Whittier, CA. 1994.

VARGAS Yeudy, et al. "Evaluación probabilista de la capacidad, fragilidad y daño sísmico de edificios de hormigón armado". Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería, 2013, vol. 29, no 2, p. 63-78.

WALLACE John. "Evaluation of UBC-94 provisions for seismic design of RC structural walls". Earthquake Spectra, 1996, vol. 12, no 2, p. 327-348.