



# REVISTA INGENIO

## Modelación de un muro y losa de reacción para ensayos cuasi-estáticos, aplicando el método de elementos finitos

### Modeling of a wall and reaction slab for quasi-static tests using the Finite Element method

Andreína Morillo | [iD](#) Centro de Investigación de la Vivienda/Escuela Politécnica Nacional (Ecuador)

Carla Toapanta | [iD](#) Centro de Investigación de la Vivienda/Escuela Politécnica Nacional (Ecuador)

Sigifredo Díaz | [iD](#) Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental/Escuela Politécnica Nacional (Ecuador)

Diego Arévalo | [iD](#) Centro de Investigación de la Vivienda/Escuela Politécnica Nacional (Ecuador)

Melisa Herrera | [iD](#) Centro de Investigación de la Vivienda/Escuela Politécnica Nacional (Ecuador)

Christian Gómez | [iD](#) Centro de Investigación de la Vivienda/Escuela Politécnica Nacional (Ecuador)

#### ARTICLE HISTORY

Received: 19/10/2023

Accepted: 01/12/2023

#### PALABRAS CLAVE

Modelación, método de elementos finitos (MEF), sistema de reacción, muro, losa, ampliación.

#### KEY WORDS

Modeling, finite element method (FEM), reaction system, wall, slab, expansion.

#### RESUMEN

Para realizar ensayos cuasi-estáticos en elementos estructurales se utilizan sistemas de reacción conformados por losas y muros. La presente investigación permitió conocer el estado actual de una estructura con un sistema de reacción compuesto por una losa y un muro en forma de «L». Se emplearon programas computacionales para su revisión y las características mecánicas de los materiales colocadas en el modelo matemático fueron obtenidas a través de ensayos experimentales. Los resultados obtenidos evidencian que la capacidad actual de la estructura es mayor a la demanda, adicionalmente, para el sistema de reacción se determinó la carga máxima que resiste. A partir de la verificación de la estructura existente se propone el diseño de la ampliación del muro de reacción con una capacidad máxima de 490 [kN] y de la infraestructura del CIV con un área aproximada de 400 [m<sup>2</sup>], lo cual generará un aporte científico al servicio de la sociedad.

#### ABSTRACT

To carry out quasi-static tests on structural elements, reaction systems made up of slabs and walls are employed. The present investigation allowed us to know the current state of a structure with a reaction system composed of a slab and an “L”-shaped wall. Computer programs were used for its review and the mechanical characteristics of the materials placed in the mathematical model were obtained through experimental tests. The results obtained show that the current capacity of the structure is greater than the demand; additionally, for the reaction system, the maximum load it resists was determined. Based on the verification of the existing structure, the design of the expansion of the reaction wall with a maximum capacity of 490 [kN] and the CIV infrastructure with an approximate area of 400 [m<sup>2</sup>] is proposed, which will generate a contribution scientist at the service of society.

#### NOMENCLATURA

CIV: Centro de Investigación de la Vivienda  
MEF: Método de elementos finitos  
C<sub>SR</sub>: Carga viva correspondiente a la fuerza del gato hidráulico y marco de carga en el sistema de reacción  
V<sub>D</sub>: Cortante basal dinámico  
V<sub>E</sub>: Cortante basal estático

$\rho_t$ : Cuantía transversal  
 $\rho_l$ : Cuantía longitudinal  
A<sub>s</sub>: Área del acero de refuerzo [cm<sup>2</sup>]  
A<sub>cv</sub>: Área bruta de la sección transversal [cm<sup>2</sup>]  
f'<sub>c</sub>: Resistencia a compresión del concreto [MPa]  
f<sub>y</sub>: Resistencia a la fluencia del acero [MPa]

#### I. INTRODUCCIÓN

En muchas partes del mundo, el diseño y construcción de estructuras tienen la tendencia a usar procedimientos que imponen criterios empíricos en el análisis; esto

depende del uso que se le vaya a dar a cada tipo de edificación [1].

Este problema se afronta mediante el desarrollo de técnicas y productos innovadores que mejoren la

industria de construcción [2]. Con este propósito se crearon varios laboratorios alrededor del mundo enfocados en la investigación (teórica-experimental) y avance de la ingeniería estructural. A continuación, se presentan algunos de estos laboratorios.

En España, el Laboratorio de Construcción de la Universidad de Coruña se encamina al desarrollo de la investigación y estudio de construcción mediante el análisis experimental. Este laboratorio se conforma por un muro de reacción, losa de carga, pórtico de gran luz, prensa MTS, actuadores hidráulicos, banco de pretensado, entre otros [3].

En México, el Laboratorio de Estructuras y Materiales de la UNAM fue creado en el año 1956 y se ha destacado por estudiar novedosos sistemas constructivos y validar varios procedimientos de diseño. Cuenta con equipos para realizar ensayos, entre los que se menciona una losa de ensayos, muro de reacción, gatos hidráulicos, marco de carga dinámico, grúa, actuadores dinámicos, marcos metálicos, entre otros [4].

En Colombia, el Laboratorio de Estructuras Alejandro Sandino Pardo se orienta al aprendizaje, la investigación y al desarrollo nacional e internacional, a través de la evaluación de elementos y sistemas estructurales. Se constituye por una nave principal, en la que se encuentra: el muro de reacción en forma de «L» y la losa de reacción; además, posee puentes grúas, un marco de carga y actuadores dinámicos [5].

También en Colombia se encuentra ubicado el Laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad de los Andes, en el cual se realizan ensayos con modelos estructurales en tamaño real o a escala, permitiendo el desarrollo de investigación experimental de elementos y sistemas estructurales. Se conforma por un muro de reacción en forma de «L» y una losa de reacción, además, tiene un puente grúa, máquinas universales, marco de ensayos y actuadores hidráulicos [6].

En Ecuador, el Centro de Investigación de la Vivienda (CIV) de la Escuela Politécnica Nacional, fue creado en el año 2002 para atender las necesidades habitacionales, mediante la aplicación de conocimientos e investigaciones teóricas y experimentales, basándose en los códigos de construcción vigentes para garantizar soluciones viables, reales y confiables dirigidas al beneficio de la sociedad [7].

La infraestructura del CIV cuenta con una edificación conformada por un sistema de pórticos de hormigón armado y una cubierta con perfiles de acero laminados en caliente. Además, posee un sistema de reacción que incluye, un muro en forma de «L» de espesor de 60 (cm) y una losa de 80 (cm). Entre los principales equipos que posee para realizar los ensayos están: un marco de carga de 981 (kN), gatos hidráulicos de 981

(kN) y 1962 (kN), sistemas de adquisición de datos y medidores de deformación.

La demanda de estudios requeridos al CIV, así como el área total actual del centro para el desarrollo de investigaciones y la atención a las actividades de apoyo a la docencia, servicios especializados y vinculación con la sociedad, han sobrepasado la capacidad de la infraestructura del centro.

En este contexto, es necesario realizar la evaluación de la infraestructura existente, así como del sistema de reacción que lo conforman para verificar su correcto funcionamiento. Adicionalmente, se diseñará la ampliación del muro de reacción (para una capacidad máxima de 490 (kN)) y la infraestructura del CIV, partiendo de los análisis y prediseño de todos sus elementos.

Este tipo de estructuras que estarán sometidas a esfuerzos puntuales requieren un análisis minucioso y discreto como el método de elementos finitos (MEF).

Para modelar la estructura se aplica el método de elementos finitos, el mismo que permite la implementación de modelos computacionales complejos que posibilitan el análisis y diseño adecuado de los sistemas estructurales a evaluar [8].

Se emplea como base teórica normativa nacional NEC-15 [9] e INEN [10], en conjunto con normativa internacional como la ASCE 41-17 [11], ACI 318-19 [12], ASTM C39 [13], ASTM C42 [14], ASTM C-805 [15] y ASTM D2850-15 [16] para la revisión y diseño de los elementos estructurales, así como para la realización de ensayos experimentales.

## 2. MÉTODO

### 2.1. INVESTIGACIÓN PRELIMINAR / MODELACIÓN DE LA ESTRUCTURA EXISTENTE

Partiendo de la recopilación inicial de información existente se presentan los valores empleados para las distintas etapas: ensayos, modelación, interpretación de resultados, diseño, verificación y ejecución de productos finales, que facilitan la representación de la estructura de acuerdo con las características reales actuales.

En la figura 1, se observa la estructura existente modelada en un software computacional utilizando el MEF. De acuerdo con Álvarez [17], Aravena [18], Turcios [19] y Casanova [20] el MEF representa un enfoque de aproximación aplicado a problemas de ingeniería. Su fundamento radica en la conversión de un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto, un proceso conocido como discretización del modelo; lo que permite un análisis

individual de cada componente para luego ensamblar el sistema completo.

Como resultado, este proceso proporciona datos cruciales, como desplazamientos, distribución de momentos de flexión y torsión, así como fuerzas cortantes, permitiendo una comprensión profunda del comportamiento estructural [21].

En este caso se emplean elementos tipo frame y shell para su representación, los cuales están relacionados con los análisis y el cálculo computacional requerido [9].

Para una mayor precisión se genera un modelo con mallado uniforme que se empleará para la distribución de cargas, evitando cambios bruscos de geometría y que permita repartir las cargas en todo el elemento. Este tipo de procesamiento permite alcanzar mayor exactitud en los resultados [22] (ver Figura 1).

## 2.2. DATOS PROCESADOS

Para definir la resistencia a compresión del hormigón  $f'_c$ , se realizan ensayos de compresión de núcleos de hormigón, [13] [14] y esclerómetro, [15] en 14 elementos estructurales, obteniendo los valores promedios de la tabla (ver Tabla 1).

En el caso del módulo de elasticidad se trabaja con fórmulas aproximadas, características de los materiales del Ecuador, basándose en estudios nacionales, [23] y en las recomendaciones que establece el ACI 318-19, [12] la misma que se trabaja en ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) con la ecuación equivalente a  $12.500 * \sqrt{f'_c}$  y en (MPa) con como se observa en la tabla (ver Tabla 2).

Para determinar las propiedades mecánicas del suelo se realizan ensayos de contenido de humedad [24], clasificación de suelos [25], límite líquido [26], límite plástico [26], índice de plasticidad [26], ensayos de compresión simple [27] y triaxial UU s/SAT [16]. El esfuerzo admisible  $\sigma_{adm}$  se toma con un factor de seguridad de 3 [11] y el coeficiente de balasto de acuerdo con lo que recomienda Bowles [28] (ver Tabla 3).

La mampostería es de ladrillo, para la cual se considera un módulo de elasticidad  $E_m$  entre  $350f'_m$  y  $1000f'_m$  según Grijalva & Narváez [29] y el valor de  $f'_m$  se obtiene de la INEN 3049 [10], (ver Tabla 4). Estos valores se emplean para la calibración del modelo [30] variando el módulo de elasticidad de la mampostería, para obtener un período aproximado al determinado en el ensayo de vibraciones ambientales [31] realizado en la estructura.

## 2.3. VERIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES

Se realizan 11 combinaciones de carga de acuerdo con lo que se establece en la NEC-15 [9] y ACI 318-19. [12] Además de los modelos computacionales se realiza la ve-

rificación manual para corroborar los resultados provenientes de los análisis.

Para todos los elementos estructurales se constata el armado actual existente a partir de planos estructurales del año 1998. En las vigas se realiza la verificación a flexión y corte, y se comparan los resultados con las condiciones mínimas requeridas por el ACI 318-19. [12] Para las columnas se emplean diagramas de interacción para evaluar la capacidad a flexión y compresión, paso que se realiza para cada elemento existente. Además, se realiza la revisión del refuerzo transversal, confinamiento y capacidad a corte, acorde con lo que establece la normativa. [11, 12]

Para la losa se verifica la demanda y capacidad actual a través de revisiones a flexión y corte. Además, se realiza el análisis de las dimensiones mínimas necesarias en las secciones para garantizar un comportamiento adecuado. La cimentación se evalúa con ayuda de dos programas computacionales, considerando las acciones resultantes en las columnas y con ayuda de resortes que simulen la interacción suelo-estructura para revisiones a: flexión, corte unidireccional y bidireccional, deformaciones y esfuerzos en el suelo, como se muestra en la figura (ver Figura 2).

## 2.4. REVISIÓN DEL SISTEMA DE REACCIÓN

El sistema de reacción se encuentra modelado en el software computacional mediante elementos área tipo Shell, los cuales tienen un mallado dividido en cuadrados de 20 (cm) x 20 (cm), con la finalidad de facilitar la conexión con los demás elementos y optimizar el cálculo computacional. A continuación, en la figura 3, se observa el sistema de reacción modelado (ver Figura 3).

Las combinaciones utilizadas para la revisión del sistema de reacción son 11, las cuales se toman de las recomendaciones del ACI 318-19 [12]. En este caso, la carga viva que actúa en el muro de reacción y losa de reacción es la fuerza del gato hidráulico y marco de carga, respectivamente.

## 2.5. MURO Y LOSA DE REACCIÓN

La revisión del muro y losa de reacción se realiza mediante la generación de varios modelos matemáticos, en los cuales se toman en cuenta: las cargas del gato hidráulico en el muro, las cargas del marco de carga en la losa, las diferentes ubicaciones en donde actuarán las cargas o fuerzas y el armado existente que se especifica en los planos estructurales.

Las cargas del gato hidráulico y del marco de carga se distribuyen en el área tipo Shell de cada elemento estructural, de acuerdo con el mallado del modelo matemático y las dimensiones de las placas que se utilizan en ellos. Las dimensiones de las placas y las fuerzas aplicadas se especifican en la tabla (ver Tabla 5).

**Tabla 1.**

*Resistencia a la compresión de los elementos estructurales*

Resistencia adoptada	Unidad	Vigas y columnas	Muro	Losa de reacción
$f'_c$	(MPa)	24	21	36

**Tabla 2.**

*Módulo de elasticidad de los elementos estructurales existentes*

Módulo de elasticidad	Unidad	Vigas y columnas	Muro	Losa de reacción
$E$	(MPa)	18990,50	17763,98	23258,51

**Tabla 3.**

*Información del suelo*

Parámetro		Unidad	Valor
Esfuerzo admisible	$\sigma_{adm}$	(kN/m <sup>2</sup> )	187,08
Coeficiente de balasto	$K$	(kN/m <sup>3</sup> )	2244,45

**Tabla 4.**

*Parámetros empleados para la mampostería*

Parámetro		Unidad	Valor
Módulo de elasticidad	$E_m$	(MPa)	13.720
Resistencia a compresión del ladrillo	$f'_m$	(MPa)	13,72

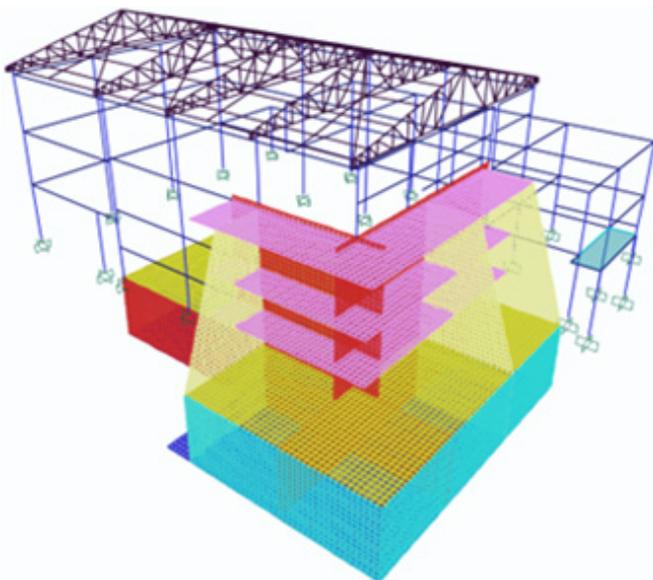
**Tabla 5.**

*Dimensiones de las placas que se usan en la losa y muro de reacción y cargas aplicadas*

Elemento estructural	Placas (cm)	Carga (kN)
Muro de reacción	20x20	981 y 1961
	30x30	
	70x70	
Losa de reacción	40x40	981
	30x30	

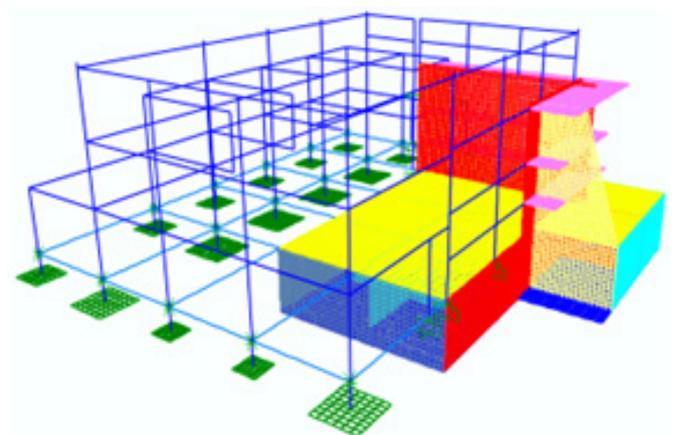
**Figura 1.**

*Estructura existente (CIV)*



**Figura 2.**

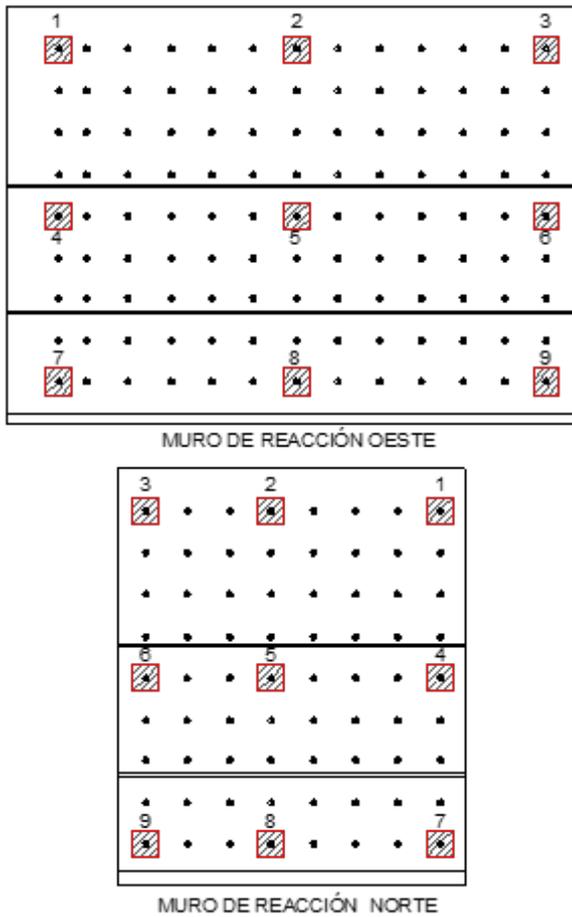
*Estructura existente (CIV)*



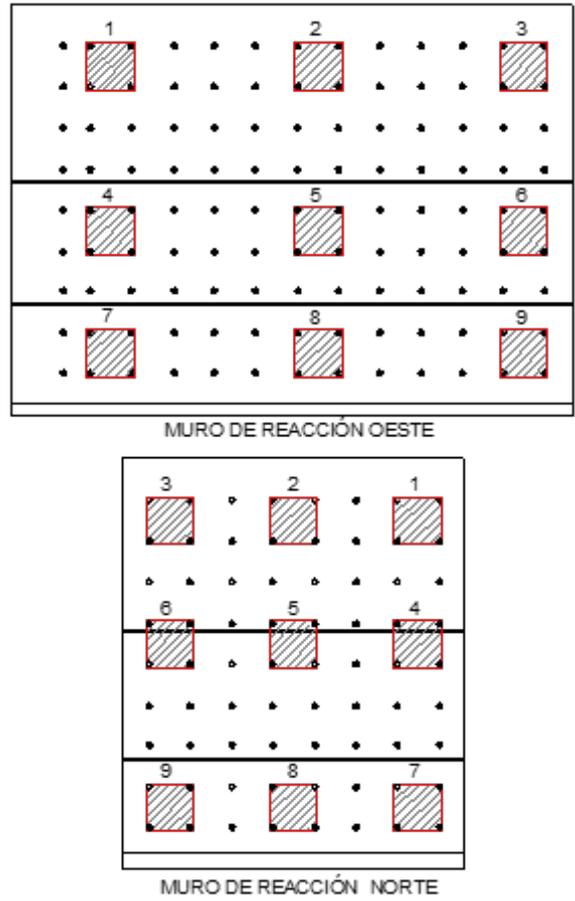
**Figura 3.**  
Sistema de reacción modelado



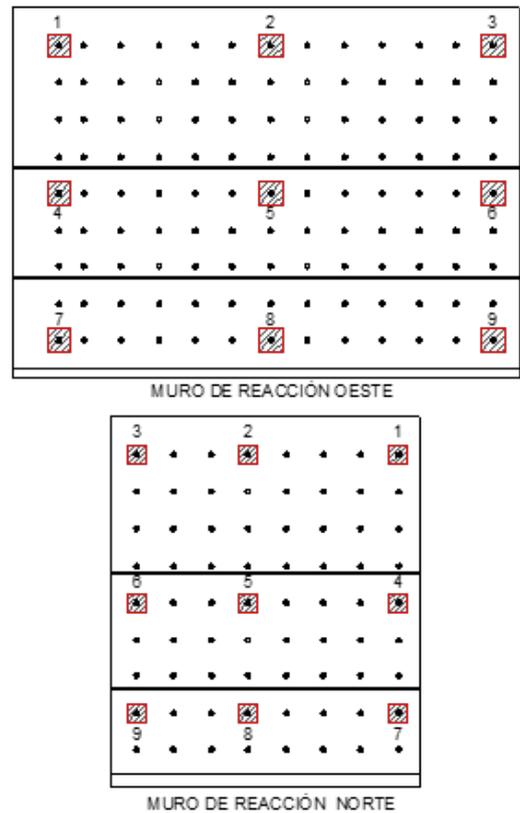
**Figura 5.**  
Ubicación de la placa 30 (cm) x 30 (cm) para la distribución de la carga en el muro de reacción este y norte, respectivamente



**Figura 4.**  
Ubicación de la placa 70 (cm) x 70 (cm) para la distribución de la carga en el muro de reacción oeste y norte, respectivamente



**Figura 6.**  
Ubicación de la placa 20 (cm) x 20 (cm) para la distribución de la carga en el muro de reacción oeste y norte, respectivamente



La ubicación de las placas en el muro de reacción oeste y norte son 9, las cuales se observan en la figuras 4-6 (ver Figuras 4-6); mientras que para la losa de reacción son 28 posiciones, como se muestran en la figura (ver Figura 7).

La capacidad a flexión y corte del muro y losa de reacción se muestra en la tabla 6, la misma que se obtiene considerando los aceros existentes en cada elemento de la estructura y mediante las ecuaciones 1 y 2 del ACI 318-19 [12] (ver Tabla 6).

$$\phi M_n = 0,9 * A_s * f_y * \left( d - \frac{A_s * f_y}{1,7 * f'_{c,b}} \right) \quad (1)$$

$$\phi V_n = \phi A_{cv} (0,17 \sqrt{f'_c} + \rho_t f_y); \phi = 0,75 \quad (2)$$

Se revisa el muro y losa de reacción comparando la capacidad existente con la demanda obtenida en los diferentes modelos matemáticos realizados, y considerando la flexión y el cortante. A continuación, en las tablas 7 y 8 se observa un ejemplo de los momentos y cortantes resultantes en los muros de reacción norte y oeste, en la ubicación 1 para cada tipo de placa (ver Tablas 7 y 8).

En la tabla 9 se presenta un ejemplo de momentos y cortantes de la losa de reacción para las placas de 30 (cm) x 30 (cm) y 40 (cm) x 40 (cm) en la ubicación 1. Los resultados son los mismos para ambos casos, porque se tiene una distribución de cargas igual para ambas placas, debido al mallado realizado en el modelo matemático para el sistema de reacción (ver Tabla 9).

## 2.6. CONTRAFUERTE

La revisión mediante el MEF de los contrafuertes se realizó con la ayuda del software estructural, para lo cual se tomó un elemento de los tres existentes y se lo separó de la estructura para evaluarlo de forma individual. Se le sometió de manera puntual a cargas laterales ubicadas a diferentes alturas como se muestra en la figura (ver Figura 8).

El contrafuerte es idealizado como una losa vertical, por lo cual, las consideraciones para la evaluación del elemento son tomadas del ACI 318-19 [12] para el diseño de diafragmas estructurales sometidos a cargas laterales, en donde las fuerzas actúan en el plano. El análisis se realiza a los cabezales y pantalla del elemento estructural, tomando en cuenta la variación de su sección. En la tabla 10 se presenta el refuerzo existente de dicho elemento estructural (ver Tabla 10).

## 2.7. LOSA DE CIMENTACIÓN

La losa de cimentación se encuentra localizada a 3 (m) de profundidad, posee un espesor de 0,4 (m) y para su verificación se toma en cuenta su configuración, armado estructural y las propiedades del suelo. Para el análisis se utiliza el MEF considerando solo al elemento y a las

cargas que actúan en él. De esta manera se logra obtener los esfuerzos que actúan en el suelo, como se observa en la figura 9, así como los momentos resultantes en ambas direcciones, como se muestra en la figura 10 (ver Figuras 9 y 10).

Los resultados obtenidos del programa computacional corresponden a la demanda, la cual debe ser comparada con la capacidad existente, la misma que se presenta en la tabla (ver Tabla 11).

## 2.8. MUROS DE CONTENCIÓN

Se evalúan los muros de contención situados en el contorno de la losa de reacción. Están conformados por muros externos de espesor de 0,20 (m) e internos de 0,40 (m). Para el análisis se los idealizó como muros en voladizo sometidos a presión horizontal, considerando diferentes sollicitaciones de corte y flexión en la altura del muro.

El análisis se realiza manualmente, en el cual se toma en cuenta el caso de carga más crítico que incluye el empuje de tierra y el sismo. Este caso crítico se encuentra en función de la altura y usa un factor que considera la combinación de cargas estáticas y dinámicas.

## 2.9. AMPLIACIÓN DEL MURO DE REACCIÓN

La ampliación del muro de reacción tiene como finalidad incrementar la cantidad de ensayos cuasi-estáticos que se pueden realizar de manera simultánea en el CIV. El muro de reacción se ampliará en el pórtico 2 una longitud de 8,65 (m), medidos desde el final del muro norte existente, hasta el inicio de las gradas que dirigen al subsuelo, como se observa en la figura 11. La geometría y características serán similares a las del muro existente, es decir, un ancho de 60 (cm), altura de 6 (m) desde el nivel del piso y pasadores distribuidos cada 60 (cm) en ambas direcciones, para tener continuidad con los agujeros del muro y losa de reacción actuales.

El nuevo muro de reacción poseerá una capacidad máxima de 490,33 (kN), para lo cual se incrementarán dos contrafuertes que se alinearán a los muros subterráneos ubicados bajo la losa de reacción. Además, se ampliará la losa de cimentación, muros de contención y losas del muro de reacción, de esta forma, la ampliación será igual al sistema de reacción existente, y la conexión se la realizará mediante una junta de construcción (ver Figura 11).

## 2.10. MODELACIÓN DEL NUEVO MURO DE REACCIÓN

La modelación del nuevo muro de reacción se realizó utilizando elementos área tipo Shell, con las mismas dimensiones del sistema de reacción existente. El modelo matemático se presenta en la figura 12, en donde: la ampliación se muestra de color azul oscuro y los valores de

Tabla 6.  
Capacidad del muro y losa de reacción

Elemento estructural	Flexión (N-m/m)	Corte (N/m)
Muro de reacción	333,10	1386,11
Losa de reacción	882,00	1164,14

Tabla 7.  
Resultantes de momentos y cortantes del muro de reacción norte en la ubicación 1

Placa	Carga (kN)	Momento	Cortante
70x70	539		
30x30	441		
20x20	441		

Tabla 8.  
Resultantes de momentos y cortantes del muro de reacción oeste en la ubicación 1

Placa	Carga (kN)	Momento	Cortante
70x70	981		
30x30	981		
20x20	981		

Tabla 9.  
Resultantes de momentos y cortantes de la losa de reacción en la ubicación 1

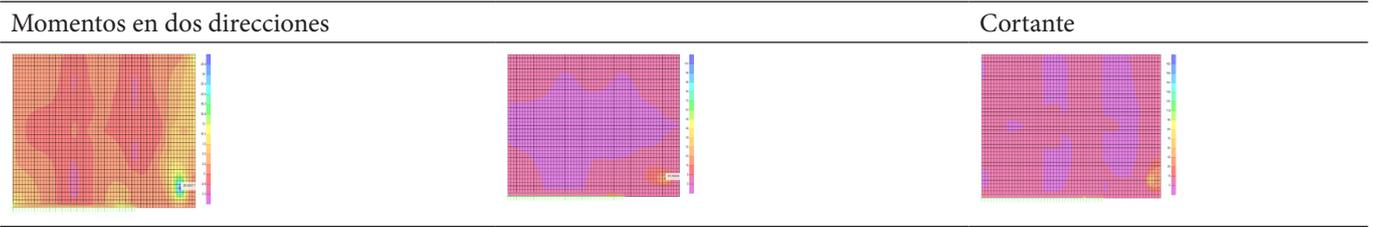


Tabla 10.  
Refuerzo existente en el contrafuerte

Elemento	Refuerzo longitudinal (cm <sup>2</sup> )	Refuerzo transversal (cm <sup>2</sup> )	Cuantía $\rho_t$ y $\rho_l$
Cabezal externo	58,90	3,14	-
Cabezal interno	66,54	1,57	-
Pantalla	-	-	0,002

Tabla 11.  
Capacidad existente de la losa de cimentación

$\sigma_{adm}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$A_{s_{sup}}$ (cm <sup>2</sup> )	$A_{s_{sup\_ref}}$ (cm <sup>2</sup> )	$A_{s_{inf}}$ (cm <sup>2</sup> )	$A_{s_{inf\_ref}}$ (cm <sup>2</sup> )
187,08	1,54	1,54	2,01	2,01

$A_{s_{sup}}$ : área de acero superior       $A_{s_{inf}}$ : área de acero inferior  
 $A_{s_{sup\_ref}}$ : área de refuerzo superior       $A_{s_{inf\_ref}}$ : área de refuerzo inferior

Figura 7.  
Ubicaciones para las placas de 30x30 (cm) y 40x40 (cm) de la losa de reacción

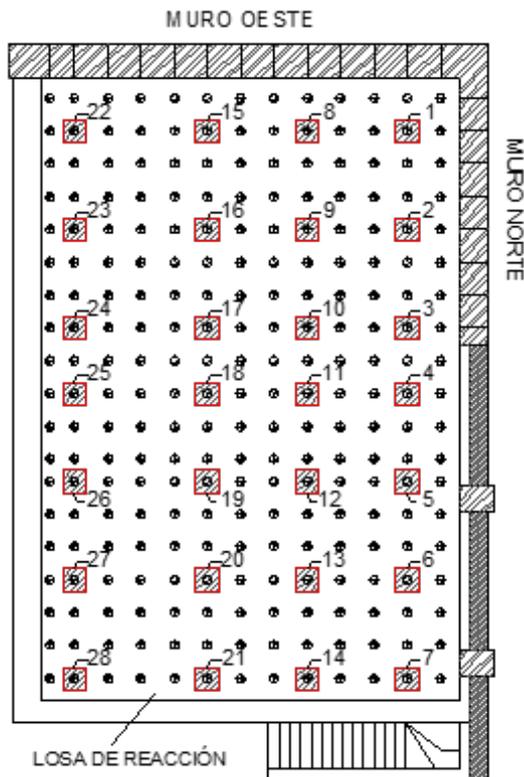
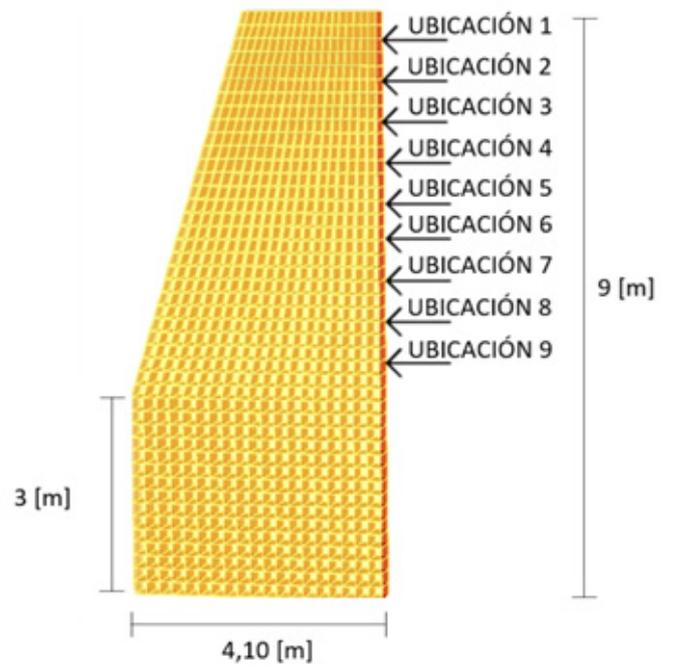
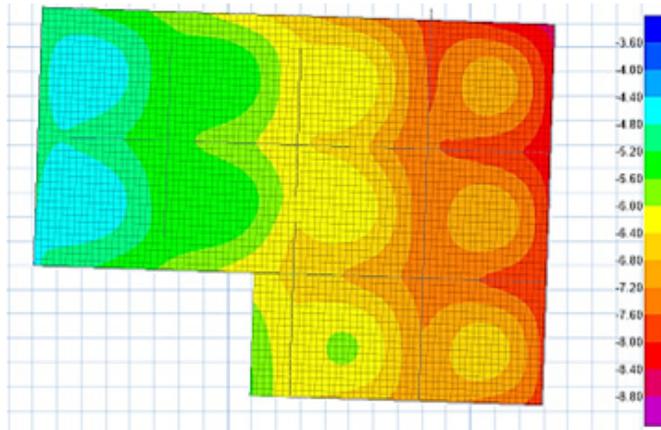
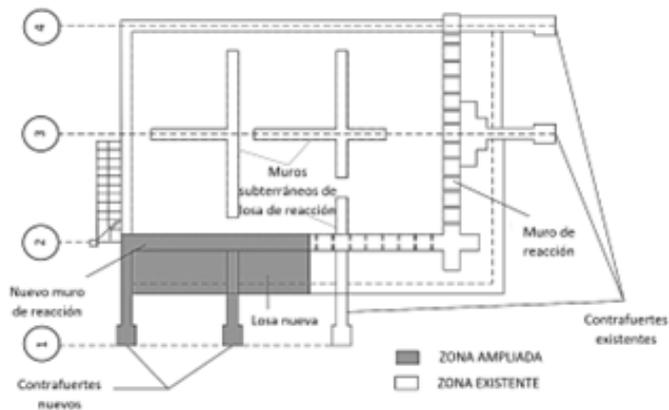


Figura 8.  
Ubicaciones de las cargas en el contrafuerte



**Figura 9.**Esfuerzos del suelo debido a la losa de cimentación ( $D+C_{SR}$ )**Figura 11.**

Vista en planta de la ampliación del sistema de reacción

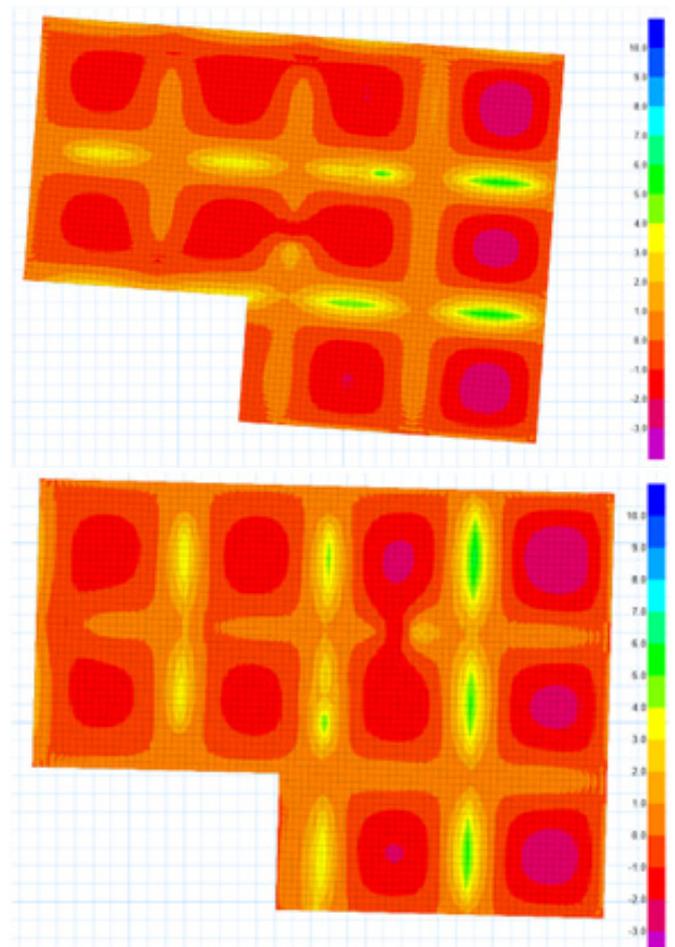


resistencia a compresión del hormigón utilizados para la losa de reacción es de 36 (MPa) y para los demás elementos es de 28 (MPa) (ver Figura 12).

### 2.11. DISEÑO DEL NUEVO MURO DE REACCIÓN

El diseño del nuevo muro de reacción se realiza con el mismo procedimiento usado en el existente. Es decir, que en base al modelo matemático se encuentran los momentos y cortantes que resultan de someter al elemento estructural a cargas perpendiculares a su plano en diferentes posiciones. En este caso se usará la placa de 20 (cm) x 20 (cm) en las 4 posiciones más altas del nuevo muro de reacción (5,4 (m) medidos desde el nivel del piso), con una fuerza máxima de 490 (kN), y tomando en cuenta las combinaciones de carga consideradas para la revisión del sistema de reacción existente.

A continuación, en la tabla 12 se presenta los momentos y cortantes obtenidos en el modelo matemático, para cada ubicación (ver Tabla 12).

**Figura 10.**Momentos actuantes en las dos direcciones en la losa de cimentación ( $D+C_{SR}$ )

### 2.12. DISEÑO DE LA AMPLIACIÓN DE LA NUEVA INFRAESTRUCTURA

La ampliación de la infraestructura se realiza con el fin de solucionar los problemas de demanda generados por la necesidad de espacio. Se incrementará un área aproximada de 400 (m<sup>2</sup>) conservando la alineación de la infraestructura existente y la distribución en altura como se observa en la figura 13 (ver Figura 13).

### 2.13. MODELACIÓN DE LA ESTRUCTURA

Se adopta un valor de resistencia para los elementos estructurales de 28 (MPa). Y, en el caso de los elementos que conforman la losa de reacción, se utilizan los valores definidos anteriormente en la ampliación del muro de reacción.

Para las secciones de vigas, columnas, losa y cimentaciones se mantiene un armado similar al que tienen los elementos en la estructura actual. Se consideró el pre-dimensionamiento de forma que cumplan con los armados

Tabla 12.  
Momentos y cortantes del nuevo muro de reacción

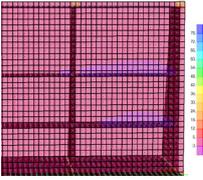
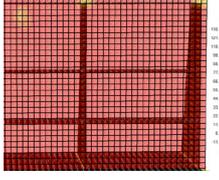
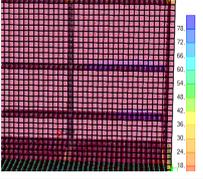
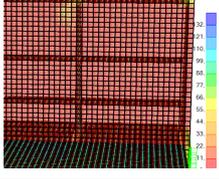
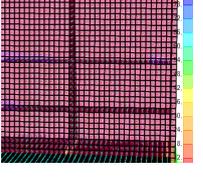
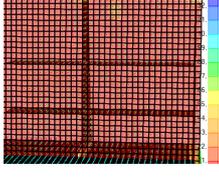
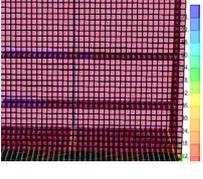
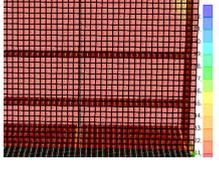
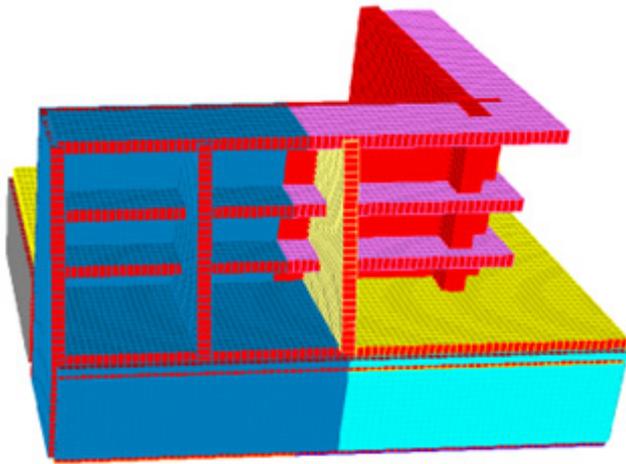
Ubicación	Momento	Cortante
1		
2		
3		
4		

Figura 12.  
Ampliación del sistema de reacción

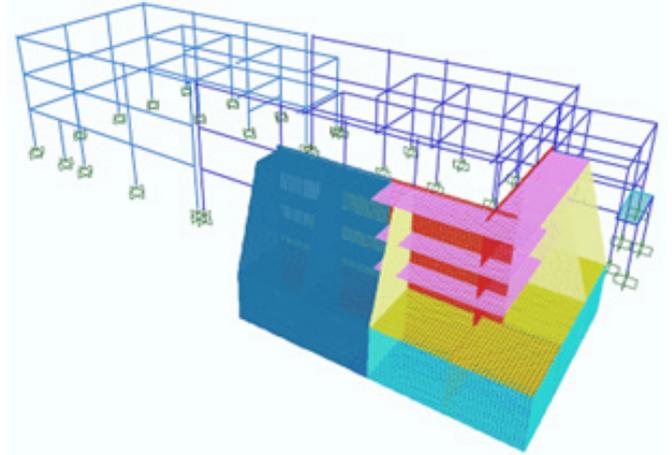


mínimos para cada chequeo establecido por normativa internacional y nacional [9, 12].

Para la definición y distribución de cargas se considera el uso de cada espacio y, al igual que en la estructura existente, se hace referencia a la normativa NEC-15 [9]. Se considera carga muerta, viva y sísmica para los diferentes niveles en oficinas y cubierta.

Las combinaciones contemplan las cargas definidas anteriormente, tomando el caso más crítico como la envolvente de las combinaciones. En el sistema de reacción se modifican las mismas para definir una carga viva que

Figura 13.  
Ampliación sistema de reacción y nueva infraestructura



corresponde a la carga aplicada por los gatos hidráulicos y marco de carga  $C_{SR}$ .

#### 2.14. ANÁLISIS

Los dos análisis que se contemplan hacen referencia al análisis estático y dinámico modal espectral. El análisis estático se lo realiza considerando la estructura existente en conjunto con la ampliación del muro de reacción, y en el análisis dinámico se considera únicamente la infraes-

estructura ampliada, como se evidencia en las tablas (ver Tablas 13 y 14).

Se comparan los resultados provenientes del cortante basal en las dos direcciones de cada análisis, como se establece en la NEC-15 [9], el mismo que indica que el  $V_D > 85\%V_E$ .

### 2.15. DISEÑO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES

A partir del prediseño se realizan las revisiones con los valores del modelo computacional y de acuerdo al elemento estructural.

Se mantienen armados similares a los encontrados en planos estructurales del año 1998, verificando los mismos mediante un prediseño en vigas, columnas, losa y cimentaciones de los nuevos elementos.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. MURO DE REACCIÓN Y LOSA DE REACCIÓN

De acuerdo con la comparación realizada, entre la capacidad existente del muro de reacción y la obtenida mediante el software computacional, la máxima fuerza del gato hidráulico que se puede aplicar en el muro de reacción con las diferentes placas en las 9 ubicaciones se presenta en las figuras (ver Figuras 14 y 15).

Los desplazamientos que se generan al aplicar las cargas máximas en dirección de la aplicación de la fuerza se observan en las figuras (ver Figuras 16 y 17).

Para la losa de reacción se obtiene como resultado que la máxima fuerza que se puede aplicar en el elemento estructural para las placas de 30 (cm) x 30 (cm) y 40 (cm) x 40 (cm) es de 981 kN en todas las ubicaciones.

La máxima deflexión de la losa de reacción obtenida en el modelo matemático es 5,19 (mm), siendo inferior a la calculada de 12,5 (mm), la cual se determina tomando en cuenta los límites establecidos por el ACI 318-19 [12] y asumiendo un factor de seguridad de 2.

### 3.2. CONTRAFUERTE

En la figura 18 se presentan las cargas máximas que puede soportar el contrafuerte para cada ubicación, en donde se aprecia que a medida que la sección del elemento estructural crece, las fuerzas también aumentan (ver Figura 18).

### 3.3. LOSA DE CIMENTACIÓN

La revisión de la losa de cimentación se realizó a flexión, obteniéndose los momentos máximos y mínimos para ambas direcciones, a través del programa computacio-

nal. Se evidencia que el armado actual le proporciona a la sección una mayor capacidad que la requerida.

También, se realizó una comprobación del esfuerzo admisible del suelo, en donde se obtiene un valor máximo de 84,04 (kN/m<sup>2</sup>), siendo menor al valor obtenido mediante los ensayos de suelos y cumpliendo con la revisión.

### 3.4. MUROS DE CONTENCIÓN

De acuerdo con las máximas solicitaciones de momento y corte para los muros de contención internos y externos que rodean la losa de reacción, se obtiene una demanda similar que no sobrepasa a la capacidad existente. Por lo tanto, las secciones colocadas son las adecuadas para dichas solicitaciones como se observa en la tabla 15. De igual forma, el espesor de los elementos estructurales cumple con el chequeo realizado, comprobándose que es capaz de resistir las solicitaciones a flexión (ver Tabla 15).

### 3.5. AMPLIACIÓN DEL MURO DE REACCIÓN

La demanda resultante de los modelos matemáticos se compara con la capacidad obtenida del armado del muro de reacción existente; de esta manera se observa que dicho armado es suficiente para cubrir las solicitaciones del nuevo muro de reacción, en donde los resultados a flexión y corte se presentan en las tablas 16 y 17, respectivamente (ver Tablas 16 y 17).

Finalmente, el armado de la pantalla del nuevo muro de reacción es igual al existente, es decir, Ø18 @ 15 [cm] para acero vertical y horizontal. De igual forma, los armados de los demás elementos estructurales que conforman el sistema de reacción, como son: los contrafuertes, losa de cimentación y muros de contención, serán iguales a los existentes. En la revisión de estos elementos, se comprueba que tienen la capacidad suficiente para cubrir la demanda de diseño de 490 (kN) del nuevo muro de reacción, y en la tabla 18 se presenta un resumen de los armados de los nuevos elementos estructurales (ver Tabla 18).

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos mediante la modelación matemática utilizando el método de elementos finitos (MEF) resulta ser efectivo, real e incluso más conservador, en comparación con algunos cálculos de control realizados a mano.

La discretización del modelo en elementos finitos permitió visualizar los esfuerzos puntuales tanto en la losa como el en muro de reacción, facilitando el análisis y la verificación de capacidad frente a la demanda.

Tabla 13.

Comparación cortante basal análisis estático y dinámico primer caso

Dirección	Análisis		%V D/E	Cumplimiento
	Estático (kN)	Dinámico (kN)		
X	3359,63	3514,58	104,61	Ok
Y	3359,63	4792,54	142,65	Ok

Tabla 14.

Comparación cortante basal análisis estático y dinámico segundo caso

Dirección	Análisis		%V D/E	Cumplimiento $V_D > 85\% V_E$
	Estático (kN)	Dinámico (kN)		
X	666,13	568,44	85,34	OK
Y	666,13	574,45	86,24	OK

Tabla 15.

Capacidad y demanda de los muros de contención

Acero en pantalla	Capacidad	Demanda	Cumplimiento
$A_{S_{min}}$	Ø10@20(cm) o Ø14@10(cm)	Ø10@20(cm)	OK
$A_{S_{ret\_temp}}$	Ø10@20(cm)	Ø10@20(cm)	OK

Tabla 16.

Resultados a flexión del nuevo muro de reacción con placa 20x20 [cm]

Momentos (kN-m/m)

Carga (kN)	Ubicación	Demanda		Capacidad	Cumplimiento
		Máximo	Mínimo		
490	1	335,58	-332,25	336,47	OK
490	2	331,8	-332,25	336,47	OK
490	3	335,78	-332,25	336,47	OK
490	4	333,72	-335	336,47	OK

Tabla 17.

Resultados a flexión del nuevo muro de reacción con placa 20x20 [cm]

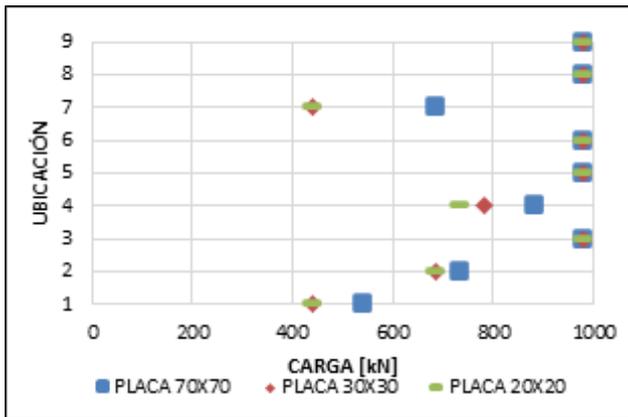
Cortantes (kN/m)

Carga (kN)	Ubicación	Demanda		Capacidad	Cumplimiento
		Máximo	Mínimo		
490	1	614,98	-679,01	1439,52	OK
490	2	644,69	-682,05	1439,52	OK
490	3	720,69	-691,66	1439,52	OK
490	4	674,21	-643,51	1439,52	OK

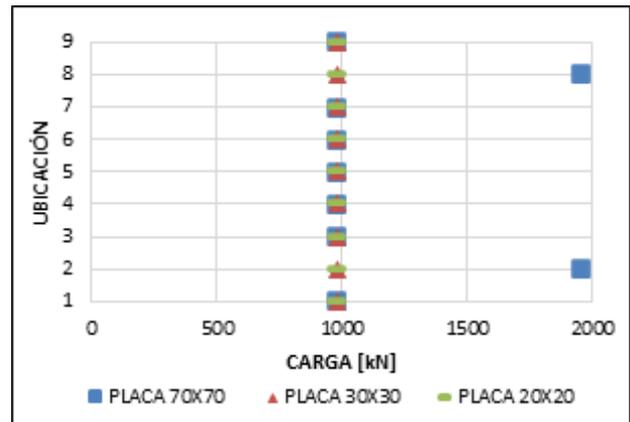
**Tabla 18.**  
Resumen del armado de los nuevos elementos del sistema de reacción

Elemento	Armado estructural			
Pantalla del muro de reacción	Acero horizontal		Ø18 @ 15 (cm)	
	Acero vertical		Ø18 @ 15 (cm)	
Contrafuerte	Acero horizontal		Ø10 @ 20 (cm)	
	Acero vertical		Ø10 @ 20 (cm)	
Cabezal externo	Refuerzo longitudinal		12 Ø25	
	Refuerzo transversal		Ø10@10(cm)	
	Cabezal interno	Refuerzo longitudinal		12 Ø25+3Ø18
		Refuerzo transversal		Ø10@30(cm)
Losa de reacción	Acero longitudinal		Ø25@15 (cm)	
	Acero transversal		Ø25@15 (cm)	
Losa de cimentación	Dirección x	Acero superior	Ø14@20 (cm)	
		Acero inferior	Ø16@20 (cm)	
	Dirección y	Acero superior	Ø14@20 (cm)	
		Acero inferior	Ø16@20 (cm)	
Muros de contención	Acero horizontal		Ø10 @ 20 (cm)	
	Acero vertical		Ø18 @ 20 (cm)	

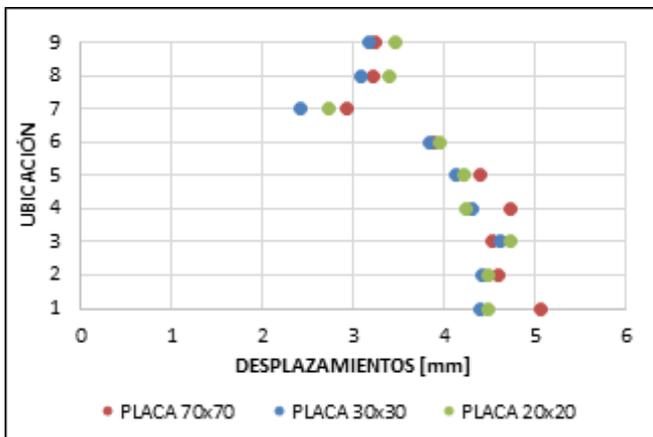
**Figura 14.**  
Fuerza máxima recomendada para el muro norte



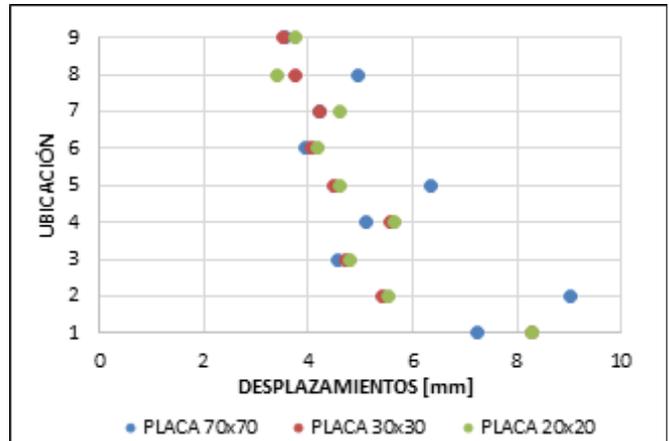
**Figura 15.**  
Fuerza máxima recomendada para el muro oeste



**Figura 16.**  
Desplazamientos del muro norte

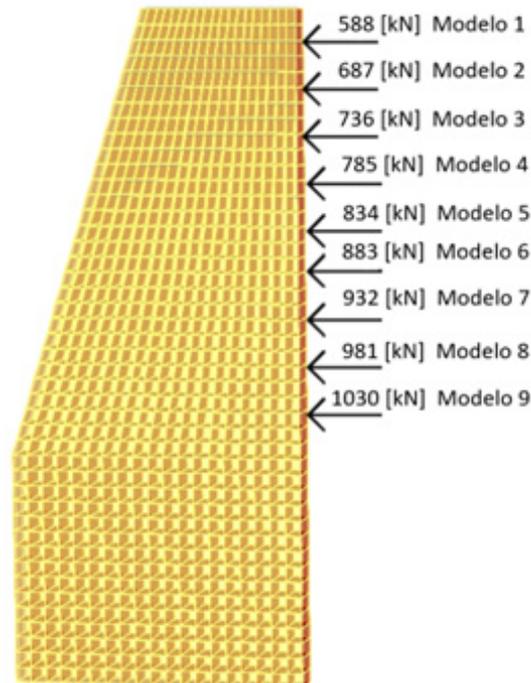


**Figura 17.**  
Desplazamientos del muro oeste



**Figura 18.**

Fuerzas recomendadas para el contrafuerte



Pese a la demanda computacional del programa utilizado para el análisis por el método de elementos finitos (MEF), los resultados obtenidos son relevantes y necesarios para evaluar estructuras y elementos que estarán sometidos a cargas dinámicas y cuasi-estáticas.

Los elementos estructurales del CIV como vigas, columnas, losas y cimentaciones tienen la suficiente capacidad para resistir las solicitaciones a las cuales se encuentran sometidos, incluso se puede evidenciar que se encuentran sobredimensionados ya que la demanda es pequeña.

La mayoría de los elementos estructurales analizados, incluyendo los que conforman el sistema de reacción, se encuentran armados con la cuantía mínima especificada por las normas vigentes, ya que el área de acero obtenida a través de la demanda es menor a la mínima calculada.

El muro de reacción oeste tiene suficiente capacidad para resistir cargas del gato hidráulico de 981 (kN) para las placas de 20x20 (cm), 30x30 (cm) y 70x70 (cm); incluso con la placa más grande, en las zonas centrales, el elemento estructural soporta fuerzas de hasta 1962 (kN).

El muro de reacción norte, tiene menor capacidad que el oeste, ya que cuenta con un solo contrafuerte, en donde la máxima carga del gato hidráulico que puede resistir es 981 (kN) para las tres placas en la zona central y la cercana a la unión con el otro muro. Mientras que, en la zona en donde termina el elemento estructural, al lado del contrafuerte, soporta menos fuerza debido a que en esa parte el muro se asemeja a un volado.

Se evidencia que en las posiciones analizadas en la losa de reacción se tiene un comportamiento adecuado a flexión y a corte, para la carga analizada del gato hidráulico de 981 (kN) y para las placas de 30x30 (cm) y 40x40 (cm).

Los contrafuertes fueron revisados para cargas laterales, se evidencia que la fuerza que resiste en la parte más alta del elemento estructural es de 587 (kN) y a medida que la altura disminuye y la sección crece, la carga aumenta, llegando a soportar 1030 (kN).

La ampliación del muro de reacción se realizó manteniendo la configuración del sistema de reacción existente, en donde, después de revisar los elementos estructurales como contrafuertes, muros de contención, losa de cimentación, losa y muro de reacción. Se comprobó que la estructura es capaz de resistir la carga de diseño para la ampliación, la cual es de 490 (kN) y se decide mantener el mismo armado para los nuevos elementos.

Los nuevos contrafuertes se ubican alineados a los muros que se encuentran bajo la losa de reacción para aportar rigidez al sistema de reacción. De igual manera, los muros de contención en conjunto con la losa de reacción y contrafuertes forman un sistema tipo cajón que le brinda resistencia y rigidez.

Se recomienda que los ensayos que requieran una carga mayor a 981 (t) se realicen en el muro oeste, mientras que aquellos que demanden una aplicación de fuerzas más pequeñas se hagan en el muro norte.

En el modelo se recomienda realizar un mallado uniforme evitando cambios bruscos de geometría para una

mejor distribución de las cargas, minimizar errores por convergencia y obtener un análisis más real.

## REFERENCIAS

- [1] C. G. Ugalde, «Diseño arquitectónico del laboratorio de estructuras y diseño estructural del muro de reacción de la Facultad de Ingeniería UAQ», Querétaro: Universidad Autónoma de Querétaro, 2009.
- [2] MIDUVI. *Política habitacional y servicios de agua y saneamiento, período 2009-2025*, 2013.
- [3] CITEEC-Udc. Centro de Innovación Tecnológica en Edificación e Ingeniería Civil de la Universidade da Coruña, 2017. Recuperado de: <https://www.udc.es/citeec/construccion.html> [febrero, 2020].
- [4] UNAM, I. D. Instituto de Ingeniería UNAM. Obtenido de Laboratorio de Estructuras y Materiales, 2021. <http://www.ii.unam.mx>
- [5] Orientación profesional-Posgrados y Pregrados. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito inaugura moderno edificio de laboratorios de Estructuras y Materiales, Noticias, 2020. Recuperado de: <https://orientacion.universia.net.co>
- [6] Bernal, J., *Modelos estructurales*, 2020. Laboratoriointegrado.uniandes.edu.co. Recuperado de: <https://laboratoriointegrado.uniandes.edu.co>
- [7] EPN y FICA, Centro de Investigación de la Vivienda. Recuperado de Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, 2014. Obtenido de: <https://fica.epn.edu.ec>
- [8] E. Ruiz y C. Arias, *Modelación por el método de elementos finitos (MEF), mediante el software Ansys del elemento placa*, tesis de ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas Bogotá, Colombia, 2019.
- [9] INEN, *Norma Ecuatoriana de la Construcción*, NEC-SEDS-peligro sísmico-diseño sismo resistente, Quito, Ecuador: NEC, 2015.
- [10] INEN, S. E., «Ladrillos cerámicos. Parte 3: Unidades de mampostería no estructural. Requisitos». Quito: NTE INEN 3049-3, 2019.
- [11] ASCE, «Seismic evaluation and retrofit of existing buildings (41-17)», Washington DC, Estados Unidos: American Society of Civil Engineers, 2017.
- [12] American Concrete Institute, «Requisitos de Reglamento para el Concreto Estructural (ACI 318S-14)», vol. 22, Estados Unidos: ACI, 2014.
- [13] ASTM C39, «Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens», United States: ASTM International, 2018.
- [14] ASTM C42, «Test method of obtaining and testing drill cores and sawed beams of concrete», United States: ASTM International, 2018.
- [15] ASTM C-805, «Standard test method for rebound number of hardened concrete», United States: ASTM International, 2018.
- [16] ASTM D2850-15, «Standard test method for unconsolidated-undrained triaxial compression test on cohesive soils», United States: ASTM International, 2015.
- [17] J. Álvarez, *Análisis aplicativo del método de los elementos finitos en un campo estático-lineal e introducción a la no linealidad*, tesis maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú, 2020.
- [18] J. I. Aravena, *Análisis y diseño de un paraguas invertido en hormigón armado mediante elementos finitos*, tesis, Universidad Andrés Bello, 2021. Obtenido de: <https://repositorio.unab.cl>
- [19] D. A. Turcios, *Comparación de diseño estructural para cimentaciones superficiales utilizando el método rígido convencional y el método Winkler por elementos finitos*, tesis licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2020. Obtenido de: <https://repositoriotec.tec.ac.cr>
- [20] J. Casanova, *Cuaderno de mecánica computacional de sólidos*, Universidad Politécnica de Valencia, 2018. Obtenido de: <https://riunet.upv.es>
- [21] A. F. Alanoca, *Método algorítmico matemático de elementos finitos para construir losas de estructuras diversas, con resistencia específica*, Universidad Nacional Federico Villarreal, 2019. Obtenido de: <https://repositorio.unfv.edu.pe>
- [22] E. Oñate, *Structural analysis with the finite element method-linear statics*, España: Springer, 2009.
- [23] H. Cabrera, *Módulo de elasticidad de hormigones de peso normal empleados en el Ecuador f'c: 21, 24, 28, 35 Mpa*, tesis, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2014.
- [24] ASTM D2216-10, «Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass», ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.
- [25] ASTM D6913 / D6913M-17, «Standard test methods for particle-size distribution (gradation) of soils using sieve analysis», ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017. [www.astm.org](http://www.astm.org).
- [26] ASTM D4318-17e1, «Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils», ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017. [www.astm.org](http://www.astm.org).
- [27] ASTM D2166 / D2166M-16, «Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil», ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016. [www.astm.org](http://www.astm.org).
- [28] J. Bowles, *Foundation analysis and design*, New York: McGraw-Hill, 1996.
- [29] L. Grijalva & H. Narváez, «Elaboración de curvas de fragilidad para ensayos experimentales realizados sobre mamposterías de bloques de concreto y ladrillos en Quito», Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional, 2018.
- [30] M. Durán Bolaños, «Calibración de modelos estructurales y estudio del comportamiento dinámico para puentes

de vigas de acero compuestas y continuas de 3 tramos», Costa Rica: Universidad de Costa Rica, 2018.

- [31] R. Godfrey Montero, «Identificación de modos de torsión de tres edificios de concreto reforzado empleando la medición de vibraciones ambientales y el análisis espectral», Costa Rica: Universidad de Costa Rica, 2018.