

# Calibración de modelos de elementos finitos de muros de adobe por optimización

## Using optimisation for calibrating finite element models for adobe walls

Wilson Rodríguez Calderón<sup>1</sup> y Myriam Rocío Pallares Muñoz<sup>2</sup>

### RESUMEN

Este trabajo presenta una propuesta de aplicación de esquemas de optimización a la calibración de modelos lineales y no lineales 3D de elementos finitos en el análisis estructural de muros de adobe. El desarrollo del proceso de calibración parte de los datos de laboratorio<sup>3</sup> y de investigaciones previas<sup>4</sup>. El proceso de simulación y calibración comprende un estudio profundo del modelo conceptual del comportamiento estructural del adobe, modelo matemático y numérico y la interrelación con esquemas de optimización que son planteados a través de la minimización de una función objetivo. Esta se define en términos de las variables de diseño y se restringe con los valores de las variables de estado. Ambas, son obtenidas del modelo de elementos finitos desarrollado en Ansys. El esquema de optimización con el que se realiza la calibración automatizada del modelo requiere de la programación de una macro con el lenguaje APDL del paquete. Con esta investigación<sup>5</sup> se pretende avanzar en la implementación de modelos computacionales no lineales para el análisis estructural de muros basados en datos experimentales, que permita disponer de una herramienta para evaluar el comportamiento de muros de adobe con mayor seguridad con el fin de tomar decisiones de rehabilitación estructural viables y eficientes.

**Palabras clave:** optimización, elementos finitos, calibración de modelos, adobe.

### ABSTRACT

This paper presents a proposal for applying optimisation schemes to calibrating 3D linear and non-linear finite element models for analysing structural walls made out of adobe. The calibration was based on laboratory data and that from previous research. Simulation and calibration involves a deep study of the conceptual model of adobe's structural behaviour, mathematical and numerical models and the interrelationship with optimisation schemes arising from minimising an objective function. This is defined in terms of design variables and is restricted by the values of state variables. Both were obtained from the finite element model developed at ANSYS. The optimisation scheme with which the model was automatically calibrated required a macro to be programmed using an APDL language package. This research was aimed at implementing nonlinear computational models for the structural analysis of walls based on experimental data; this provided a tool for assessing the behaviour of adobe walls with greater security so that decisions can be made to make structural rehabilitation feasible and efficient.

**Keywords:** optimisation, finite element, model calibration, adobe.

Recibido: julio 3 de 2008

Aceptado: junio 2 de 2009

### Introducción

El adobe es un material complejo, que por su comportamiento tensodeformacional requiere de modelos constitutivos avanzados (Blondet *et al.*, 2002; Houben y Guillaud, 2004). Estos modelos se definen a través de parámetros idealizados que deben ser ajustados o calibrados por optimización para reproducir de la manera más cercana posible el comportamiento del material ante cargas reales. La calibración de modelos numéricos de estructuras en general es muy importante si se desea obtener un orden aceptable de confiabilidad en los resultados arrojados por un modelo computacional (Rodríguez y Pallares, 2003; 2004). De esta manera,

todo el proceso que involucra la calibración está justificado en el hecho de que las estructuras están sometidas a múltiples tipos y escenarios de carga, sobre los que se debe tener seguridad en el grado de correspondencia entre el comportamiento real y el simulado. Para lograr este grado de equivalencia se realizan pruebas de carga controlada sobre la estructura, donde se monitorean como mínimo las variables fundamentales del problema como la magnitud y posición de las cargas, desplazamientos o fuerzas internas, longitudes y secciones de elementos, y las características mecánicas de los materiales de la estructura medidas en laboratorio (Oller, 2002). El objetivo particular de la calibración, es el de optimizar la eficiencia del modelo de elementos finitos en cuanto a la

<sup>1</sup> Ingeniero civil, Universidad Industrial de Santander, Colombia. M.Sc., Métodos Numéricos, Universidad Politécnica Cataluña, España. Profesor investigador, Programa de Ingeniería Civil, Universidad de la Salle, Colombia. Líder, Centro de Investigación en Modelación Numérica y Desarrollo de Software CAE "CIMON". wrodriguez@unisalle.edu.co, wilroca50@hotmail.com.

<sup>2</sup> Ingeniera civil, Universidad Industrial de Santander, Colombia. M.Sc., Métodos Numéricos, Universidad Politécnica Cataluña, España. Profesora investigadora y Coordinadora de Investigaciones, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás de Bogotá, Colombia. Líder de Investigación, grupo I+D en Simulación Numérica "SICON". myriampallares@usantotomas.edu.co, mrocio03@hotmail.com.

<sup>3</sup> Suministrados por la Universidad de los Andes.

<sup>4</sup> Realizadas por los grupos de investigación GRIME – Universidad Javeriana, Gimeci – Escuela Colombiana de Ingeniería y Estructuras – Universidad Javeriana

<sup>5</sup> Proyecto interinstitucional PS0009: "Estudio sobre modelos conceptuales y de simulación numérica del comportamiento de muros de adobe en Colombia basado en datos experimentales", desarrollado con el apoyo de la Pontificia Universidad Javeriana y la Universidad Santo Tomás.

predicción de desplazamientos e indirectamente obtener resultados lo más cercanamente posibles a la realidad, aunque intrínsecamente todo modelo posee hipótesis y aproximaciones que son ineludibles y que marcan una restricción entre la coincidencia de lo real y lo modelado (Bathe, 1982; Zienkiewicz y Taylor, 1994). Lograda la eficiencia del modelo numérico, este se puede emplear para ejecutar otros casos de carga, con la tranquilidad de tener un orden de error lo más pequeño posible. El valor agregado de la metodología empleada para la calibración radica en la contribución hecha a la automatización del proceso matemático que se requiere para llegar a resultados confiables de los parámetros que condicionan el comportamiento estructural; por lo tanto, es necesario ajustarlos hasta obtener resultados satisfactorios que muestren que el modelo numérico se aproxima a la realidad. El esquema empleado es propio, y para su implementación se desarrolló un macro con el lenguaje de programación APDL de Ansys (Ansys, 1987; Hinton y Owen, 1979). En este mismo sentido, pueden existir otros algoritmos y otros caminos que proporcionen resultados similares o mejores, sin embargo, en el caso de los modelos simulados quedó demostrada la funcionalidad de la propuesta de calibración hecha haciendo unos del programa. Se espera en proyectos futuros seguir investigando alrededor de técnicas de optimización para la calibración de modelos de diferentes tipos de estructuras como edificios, puentes, cables, entre otros, y de igual manera incluir modelos constitutivos no lineales a materiales como el concreto, el adobe o la madera. El desarrollo del proyecto en sus cuatro fases se resume en la Figura 1. Esta sirve como guía sobre los tópicos tratados a lo largo del artículo.

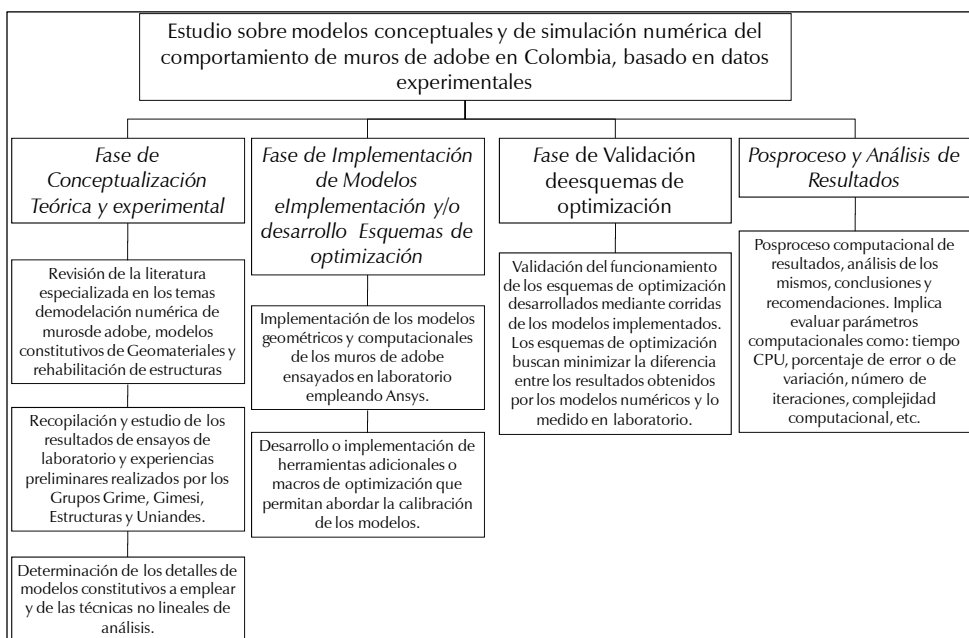


Figura 1. Diagrama de flujo del desarrollo del proyecto

## Metodología

La optimización de los modelos se planteó como una fase exploratoria sin embargo, logró establecerse una metodología clara y resultados satisfactorios para las restricciones dadas por la misma fuente secundaria de los datos. De acuerdo con los objetivos propuestos, la metodología que se planteó seguir en el proceso investigativo se resume en los siguientes puntos.

- 1) Revisión de la literatura especializada (Blondet, 2002; Houben, 2004; Tolles, 2002).
- 2) Recopilación y estudio de los resultados de ensayos de laboratorio y experiencias preliminares. Se usó información suministrada por Uniandes (CIMOC, 2004). Se recopiló de manera ordenada las pruebas experimentales que se usaron como base para los modelos numéricos y la calibración por optimización.
- 3) Determinación de los detalles de modelos constitutivos a emplear y de las técnicas no lineales de análisis: formulación matemática, hipótesis, restricciones, convecciones de signos, artificios para la incorporación de elementos finitos especiales, esquemas de optimización, entre otros. Definición de las posibles alternativas para la modelación estructural no lineal de los muros. En este punto se estudiaron y determinaron los pormenores de diversos modelos constitutivos disponibles en Ansys y finalmente se escogieron cuatro en orden creciente de complejidad; estos son: elástico lineal, elastoplástico isotrópico (BISO), elastoplástico cinemático (BKIN) y elastoplástico anisotrópico (Aniso). Estudio de la formulación matemática, rangos de aplicabilidad, artificios para lograr compatibilizar elementos de diferente especie, parámetros de los modelos, entre otros. En el tema de optimización, se estudiaron los métodos del subproblema y de primer orden y se determinaron las ventajas y desventajas de cada uno de ellos.
- 4) Implementación de los modelos geométricos y computacionales de los muros de adobe ensayados en laboratorio empleando Ansys. Estudio de los procedimientos necesarios para implementar

los modelos geométricos y computacionales adaptados a los ensayos de laboratorio de mayor caracterización y documentación sobre las condiciones de ensayo en el estudio experimental suministrado. Estos fueron fundamentalmente la prueba de compresión y la de carga cíclica paralela en muros (este segundo ensayo se abordó de manera exploratoria); no obstante, se tuvo en cuenta para alimentar los parámetros de los modelos toda la caracterización de los muros en cuanto a efectos de tracción, compresión y cortante. Hubo dificultades en la disponibilidad de memoria, ya que los modelos computacionales poseen una carga excesiva de no linealidad tanto geométrica como de material y además el proceso de optimización agrega un costo computacional elevado por su naturaleza iterativa y la no linealidad del

algoritmo de búsqueda. Por otra parte, los modelos exigen una buena concentración de elementos y fue necesario recurrir a refinamientos. El único modelo que superó los límites de la máquina disponible fue el de carga cíclica paralela y por tanto solo fue posible aplicar una carga simple, sin embargo, este modelo incorpora avances significativos en la propuesta estructural y en las compatibilidades de los elementos Shell y Solid empleados.

- 5) Desarrollo o implementación de herramientas adicionales o macros de optimización que permitan abordar la calibración de los modelos. Es conveniente advertir que las técnicas de optimización son en general altamente no lineales y por tal razón no siem-

pre funcionan, y si lo hacen es bajo un porcentaje de calibración del 70, 80%, y si se tiene éxito, superior a 90% en el mejor de los casos, luego esta fase es netamente exploratoria. A pesar de que en el proyecto se planteó esta fase como exploratoria, se llegó a establecer un esquema de optimización convergente y se implementó el algoritmo utilizando comandos de APDL inspirado en rutinas de Fortran. Los niveles de calibración logrados fueron satisfactorios.

6) Validación del funcionamiento de los esquemas de optimización desarrollados en el apartado (5) mediante corridas de los modelos implementados en (4). Los esquemas de optimización deben incorporar resultados de laboratorio que sirvan como referencia. La validación se llevó a cabo dado que la función objetivo del esquema de optimización incorpora los resultados de laboratorio para minimizar la distancia multidimensional entre lo simulado y lo medido en laboratorio. En el reporte de resultados pueden observarse las evidencias sobre el cumplimiento de este punto a través de las diferentes corridas de los modelos de elementos finitos acoplados al esquema de optimización.

7) Posproceso computacional de resultados, análisis de los mismos, conclusiones y recomendaciones. El posproceso se muestra mediante gráficas de convergencia, isocontornos, cortes internos, identificación de efectos máximos y mínimos y porcentajes de variación.

## Marco teórico de la aplicación de técnicas de optimización a modelos estructurales en Ansys

Teniendo como referente investigaciones preliminares en Optimización aplicada a la calibración de modelos numéricos (Rodríguez y Pallares, 2003; 2004), se realizó la calibración de los modelos empleando técnicas de optimización con el programa de elementos finitos Ansys (Ansys, 1987). Para el planteamiento del esquema de optimización es necesario contar en primera instancia con un modelo de elementos finitos de los muros, compuestos por elementos SOLID y SHELL. Hecho esto, se busca determinar las variables de diseño (parámetros del modelo constitutivo o dimensiones dependiendo del caso) cumpliendo criterios de optimización comúnmente llamados función objetivo (p. ej. diferencia entre lo medido y lo calculado) y satisfaciendo ciertas restricciones o condiciones denominadas variables de estado (desplazamientos o esfuerzos calculados). Inicialmente se aborda brevemente la teoría general de optimización y se plantea un problema de minimización de la función objetivo.

La optimización en problemas de análisis de estructuras suele ser compleja y de alto costo computacional, no obstante, su uso se hace necesario cuando se pretende eliminar en la medida de lo posible algunas incertidumbres de la modelación. Para la solución computacional se parametriza el modelo utilizando el lenguaje APDL del programa de elementos finitos Ansys y se emplean los módulos de preproceso, solución, post-proceso y optimización. La optimización del diseño es una técnica que pretende determinar el mejor diseño o diseño óptimo. Por "diseño óptimo" se entiende aquel que reúne toda una serie de requisitos específicos, pero con un gasto o costo mínimo de ciertos factores, tales como peso, área de la superficie, volumen, tensión, costo, etc. En otras palabras, el diseño óptimo es normalmente aquel que logra "hacer lo más eficaz posible". Virtualmente se puede perfeccionar cualquier aspecto del diseño como: dimensiones, forma, colocación de apoyos, costo de fabricación, frecuencia natural, propiedad del material, etc. En nuestro caso el objetivo es el optimizar la eficiencia de los modelos de elementos finitos en cuanto a la pre-

dicción de desplazamientos e indirectamente obtener resultados lo más cercanamente posibles a la realidad, aunque intrínsecamente todo modelo posee hipótesis y aproximaciones que son ineludibles y que marcan una restricción entre la coincidencia de lo real y lo modelado.

El programa Ansys ofrece dos métodos de optimización adaptables a una gama amplia de problemas: el de la aproximación del sub-problema, que es un método de orden cero avanzado que se puede aplicar eficazmente a la mayoría de problemas de ingeniería, y el método de primer orden que se basa en la sensibilidad del diseño y está recomendado para problemas que requieren gran exactitud, como es el caso de la calibración de un modelo numérico. Para los dos métodos el programa ejecuta una serie de ciclos de análisis - evaluación - modificación, es decir, se lleva a cabo un análisis de diseño inicial, se evalúan los resultados contra criterios específicos del diseño, y se modifica este si es necesario. Dicho proceso se repite hasta que todos los criterios específicos se satisfagan.

Antes de empezar a describir y analizar los resultados es importante tener en cuenta algunas definiciones básicas que introducen el lenguaje propio del diseño de optimización. La terminología básica empleada en diseño de optimización involucra términos como: variables de diseño, variables de estado, función objetivo, diseño factible y no factible, archivo de análisis, iteraciones, ciclos, conjunto de diseño, etc. Estas definiciones son: (a) **Variables de diseño** (DV), son cantidades independientes que se iteran ordenadamente para alcanzar el diseño óptimo. Es necesario especificarles límites superiores e inferiores como "restricciones", los cuales definen su rango de variación. (b) **Variables de estado** (SV), son cantidades que condicionan o restringen el diseño. Se conocen también como "variables dependientes", variables de respuesta que son funciones de las variables de diseño. Una variable de estado puede tener un límite máximo y un límite mínimo, o tener un "único límite". (c) **La función objetivo**, es la variable dependiente que se intenta minimizar. Debe ser una función de las DVs, es decir, si cambian los valores de las DV debe cambiar el valor de la función objetivo. Las variables de diseño, las variables de estado y la función objetivo son llamadas colectivamente *variables de optimización*. En una optimización efectuada en Ansys el usuario representa estas variables a través de parámetros. (d) **Un conjunto de diseño** es simplemente un conjunto único de valores de parámetros que representan una configuración particular de un modelo. Se caracteriza por los valores de las variables de optimización; más todos los parámetros del modelo (incluso aquellos que no están identificados como variables de optimización), se incluyen en el conjunto. (e) **Un diseño factible** satisface todas las restricciones o condiciones especificadas tanto para las SV como para las DV. Si *una o ninguna* de las restricciones no se satisfacen, el diseño es considerado como *no factible*. El *mejor diseño* es aquel que satisface todas las restricciones y produce el mínimo valor en la función objetivo. (Si todo el conjunto de diseño es no factible, el mejor conjunto de diseño es aquel que más se acerca a la factibilidad, independientemente del valor que produzca en la función objetivo). (f) **El archivo de análisis** es en ANSYS el archivo de entrada que contiene una secuencia completa de análisis (pre-proceso, solución, postproceso). Este archivo debe contener un modelo definido paramétricamente usando variables que representen todas las entradas y las salidas que serán usadas, como DVs, SVs, y la función objetivo. Desde este archivo se crea automáticamente un ciclo de archivos de optimización que usa el optimizador para ejecutar los ciclos. (g) **Un ciclo** es un paso a través del ciclo de análisis. Una *iteración de optimización* es uno o más ciclos, los cuales resultan en un nuevo conjunto de diseño. Una

iteración equivale a un ciclo. Sin embargo, para el método de primer orden, una iteración representa más de un ciclo. (g) **La base de datos de optimización** contiene el último entorno de optimización e incluye las definiciones de las variables de optimización, los parámetros, todas las especificaciones de optimización y los conjuntos de diseño acumulados.

Algunos de los conceptos descritos anteriormente pueden ser entendidos mejor a través de la Figura 2, que muestra el flujo de información durante un análisis de optimización.

Dadas las restricciones de extensión del artículo se mostrarán a continuación los modelos y una síntesis de los análisis realizados, sin entrar en detalles sobre los modelos constitutivos empleados y otros aspectos.

## Resultados de la modelación y calibración de los muros en Ansys

El escenario de calibración se llevó a cabo implementando los modelos constitutivos mencionados anteriormente. Estos son:

- 1) Modelos de muros a compresión bajo el modelo constitutivo elástico lineal.
- 2) Modelos de muros a compresión bajo el modelo constitutivo elastoplástico bilineal con endurecimiento isotrópico (BISO).
- 3) Modelos de muros a compresión bajo el modelo constitutivo elastoplástico anisotrópico (Aniso).
- 4) Modelos de muros bajo carga horizontal paralela al plano del muro bajo el modelo constitutivo elástico lineal (modelo exploratorio)

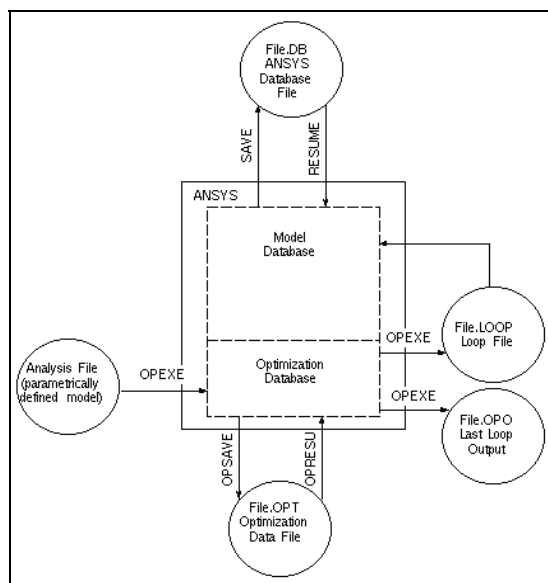


Figura 2. Flujo de datos de optimización<sup>6</sup>

### Modelos de muros a compresión bajo el modelo constitutivo elástico lineal

En este primer bloque de modelaciones, y después de varias pruebas, se formuló el siguiente esquema para la calibración por optimización:

**1) Función objetivo:** definida como la distancia euclidiana de tres (3) diferencias relativas de desplazamiento tomadas dentro del

rango elástico de las pruebas de laboratorio, al cual se le suma un valor constante arbitrario de uno (1) para evitar problemas numéricos relacionados con la propagación de error cuando se alcanza el mínimo. En otras palabras, cuando el ajuste entre lo medido y lo simulado sea idealmente perfecto, la función objetivo tomará un valor mínimo de uno (1).

**2) Variables de diseño:** es el módulo elástico EM, sobre el cual pesará la responsabilidad de generar una relación adecuada de esfuerzo-deformación que permita ajustar lo máximo posible el modelo a los datos experimentales.

**3) Variables de estado:** controlan la factibilidad de la solución mediante restricciones que plantean un esfuerzo mínimo en cada uno de los tres puntos escogidos en (1). Este esfuerzo mínimo está definido como el 80% del esfuerzo medido en cada uno de los tres puntos; así mismo, el umbral superior se encuentra definido a través del esfuerzo máximo medido en laboratorio.

Se emplean dos métodos para la optimización: el del subproblema, el cual es poco robusto y de exactitud media, y el método de primer orden, muy robusto y de alta exactitud (no necesariamente es el ideal). La tolerancia general es 0,00001. Es importante aclarar que una iteración del método de subproblema no implica subiteraciones, mientras que en el método de primer orden sí ocurre, lo cual le da un costo computacional de orden superior.

Se presenta, entonces, un resumen del posproceso destacando algunas figuras y resultados importantes del muro 1.

Los datos del modelo bajo la sintaxis APDL-Fortran son:

```
*SET,H,330
*SET,B,280
*SET,LE,250.5
*SET,D,140
*SET,EM,119570/1000
*SET,C1,792.12964*9.81
*SET,C2,1556.21875*9.81
*SET,C3,2341.34009*9.81
P1=C1/(PI*D**2/4)
P2=C2/(PI*D**2/4)
P3=C3/(PI*D**2/4)
*SET,DMEDIDO1,0.415302653
*SET,DMEDIDO2,0.815904042
*SET,DMEDIDO3,1.222753234
*SET,SZMEDIDO1,198.2344839/1000
*SET,SZMEDIDO2,389.4516821/1000
*SET,SZMEDIDO3,585.9323031/1000
*SET,SZMAX,15.2*9.81/100
```

Donde:

H	→	Altura (mm)
B	→	Base (mm)
LE	→	Longitud del extensómetro (mm)
D	→	Espesor (mm)
EM	→	Módulo elástico del modelo (tomado inicialmente del ajuste de laboratorio) (N/mm <sup>2</sup> )
C1	→	Carga 1 (N)
C2	→	Carga 2 (N)
C3	→	Carga 3 (N)
P1	→	Presión 1 (N/mm <sup>2</sup> )
P2	→	Presión 2 (N/mm <sup>2</sup> )
P3	→	Presión 3 (N/mm <sup>2</sup> )
DMEDIDO1	→	Desplazamiento vertical medido 1 (mm)
DMEDIDO2	→	Desplazamiento vertical medido 2 (mm)

<sup>6</sup> Gráfica extraída del Manual del programa de elementos finitos Ansys.

- DMEDIDO3 → Desplazamiento vertical medido 3 (mm)
- SZMEDIDO1 → Esfuerzo vertical medido 1 (N/mm<sup>2</sup>)
- SZMEDIDO2 → Esfuerzo vertical medido 2 (N/mm<sup>2</sup>)
- SZMEDIDO3 → Esfuerzo vertical medido 3 (N/mm<sup>2</sup>)
- SZMAX → Esfuerzo máximo (N/mm<sup>2</sup>)

En la Figura 3, se muestra la carga circular aplicada a la placa de contacto para transmitir la carga distribuida al muro. Los elementos Shell empleados para modelar la placa están colocados sobre la cara superior del muro, el cual fue modelado con elementos Solid. En el modelo se aplica compatibilidad de desplazamiento vertical entre la placa de contacto y el muro y en la base se aplican condiciones de apoyo simple.

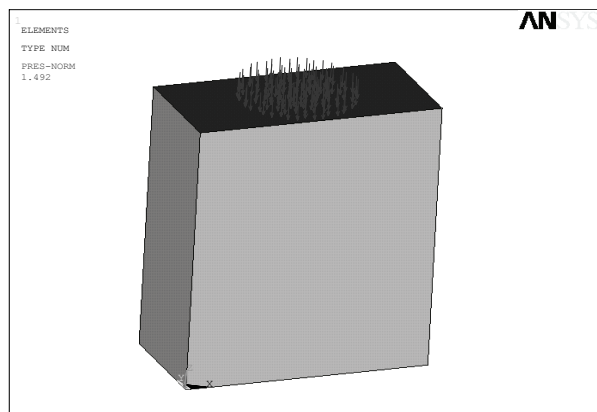


Figura 3. Modelo de elementos finitos de un muro de adobe

**Por el método del subproblema**

Después de extraer los resultados de la base de datos de optimización, se obtienen los resultados resumidos en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados calibración muro de adobe 1

Variable o parámetro	Valor
SZCALC1 (SV) (N/mm <sup>2</sup> )	0.19530
SZCALC2 (SV) (N/mm <sup>2</sup> )	0.38368
SZCALC3 (SV) (N/mm <sup>2</sup> )	0.57724
SZMEDIDO1 (N/mm <sup>2</sup> )	0.19823
SZMEDIDO2 (N/mm <sup>2</sup> )	0.38945
SZMEDIDO3 (N/mm <sup>2</sup> )	0.58593
EM (DV) (N/mm <sup>2</sup> )	117.46 (1197.35 Kg/cm <sup>2</sup> )
FOBJ (OBJ) (Adimensional)	1.0041
DESPCAL1 (mm)	0.41416
DESPCAL2 (mm)	0.81365
DESPCAL3 (mm)	1.2241
DMEDIDO1 (mm)	0.41530
DMEDIDO1 (mm)	0.81590
DMEDIDO1 (mm)	1.2228

Adicionalmente, se obtienen gráficas de convergencia de la función objetivo y del módulo de elasticidad como variable de diseño fundamental. La Figura 4, muestra un salto inicial en la función objetivo; sin embargo, después de cinco (5) iteraciones el valor se estabiliza alrededor del mínimo ideal (uno). En la Figura 5, se aprecia la convergencia oscilante hacia el valor obtenido del módulo como parámetro calibrado.

Finalmente, se exhiben algunas gráficas de isocontornos que ilustran el comportamiento del muro en cuanto a desplazamientos y esfuerzos. En la figura 6, se observa cómo en los extremos del muro existe cierta no uniformidad de los esfuerzos verticales; sin embargo, en la parte central los esfuerzos tienden a ser más uniformes (efecto *Saint Venant*). La Figura 7 despliega los despla-

mientos en X; se evidencian desplazamientos a la izquierda (-) y a la derecha (+). De esta manera, puede verse el plano de simetría en el centro del ancho del muro, y fácilmente se verifica la expansión volumétrica predecible por los efectos inducidos de la compresión del muro.

La Figura 8 señala un comportamiento muy similar al de la figura 7. En este caso los desplazamientos horizontales son paralelos al espesor del muro. La Figura 9 presenta los desplazamientos verticales, y de igual manera que en la Figura 9, pueden observarse claramente los efectos establecidos en el principio de Saint Venant. La Figura 10 muestra el esfuerzo de Von Mises (esfuerzo planteado en términos de los dos primeros invariantes del tensor de esfuerzo), establecido por algunos autores como base para criterios de falla, por tanto pueden verse algunas zonas críticas como los vértices o esquinas y la parte central. Por último, la figura 11 despliega un corte en plano medio horizontal que ilustra la uniformidad del esfuerzo vertical en este plano, aunque se percibe una variación sutil, donde los mayores esfuerzos se dan en zonas cercanas a las esquinas del plano de corte.

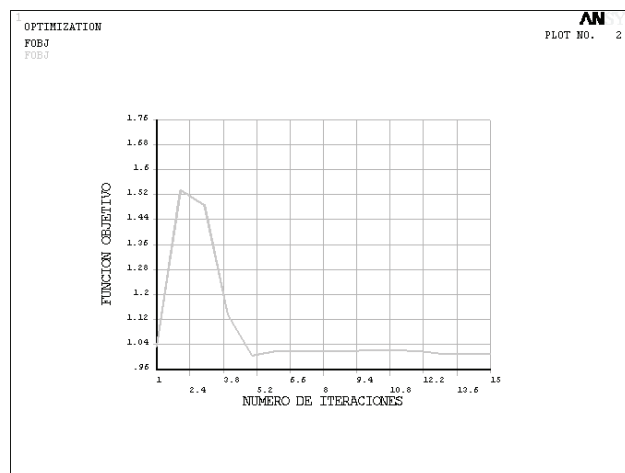


Figura 4. Convergencia de la función objetivo

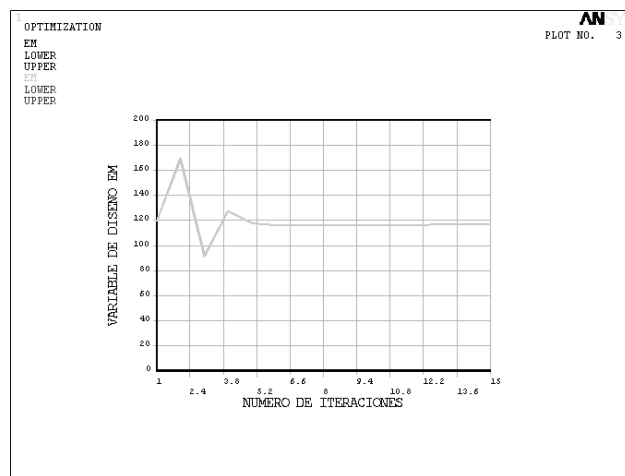


Figura 5. Convergencia de la variable de diseño EM (módulo elástico)

**Por el método de primer orden**

Los resultados extractados de la base de datos de optimización se presentan en la tabla 2.

Al igual que en el método del subproblema, se obtienen gráficas de convergencia de la función objetivo y del módulo de elasticidad.

dad. La Figura 12 muestra una caída abrupta de la función objetivo en la segunda iteración hacia el valor ideal (uno); sin embargo, es importante recordar que el método de primer orden realiza subiteraciones e incorpora las primeras derivadas numéricas de la función objetivo, este detalle genera un algoritmo “goloso” pero muy efectivo. La Figura 13 registra variaciones muy suaves de la variable de diseño gracias a la eficiencia en la búsqueda del algoritmo de primer orden.

Tabla 2. Resultados de la calibración del muro de adobe 1

Variable o parámetro	Valor
SZCALC1 (SV) (N/mm <sup>2</sup> )	0.19530
SZCALC2 (SV) (N/mm <sup>2</sup> )	0.38368
SZCALC3 (SV) (N/mm <sup>2</sup> )	0.57724
SZMEDIDO1 (N/mm <sup>2</sup> )	0.19823
SZMEDIDO2 (N/mm <sup>2</sup> )	0.38945
SZMEDIDO3 (N/mm <sup>2</sup> )	0.58593
EM (DV) (N/mm <sup>2</sup> )	117.28 (1195.51 Kgf/cm <sup>2</sup> )
FOBJ (OBJ) (Adimensional)	1.0032
DESPCAL1 (mm)	0.41479
DESPCAL2 (mm)	0.81489
DESPCAL3 (mm)	1.2260
DMEDIDO1 (mm)	0.41530
DMEDIDO1 (mm)	0.81590
DMEDIDO1 (mm)	1.2228

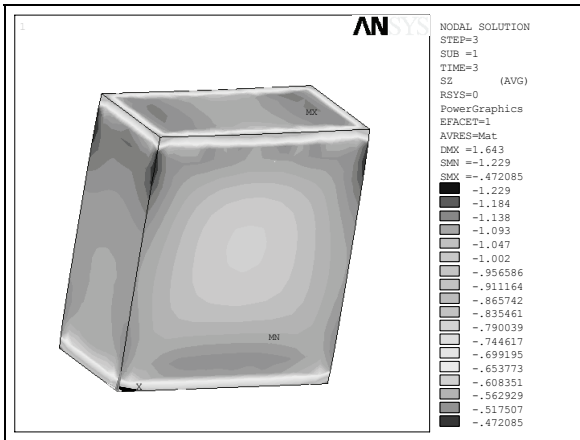


Figura 6. Isocontornos de esfuerzo vertical

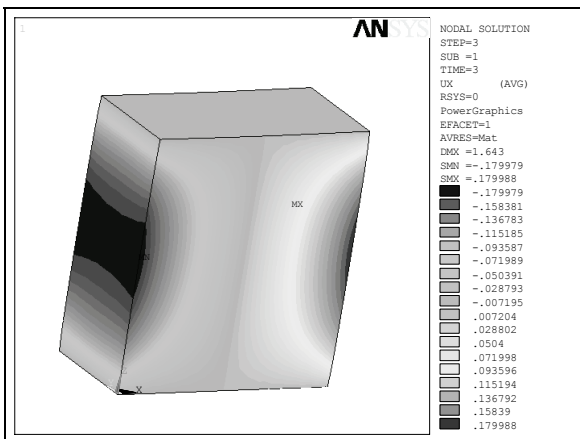


Figura 7. Isocontornos de desplazamiento en X (paralelo al ancho)

**Resumen de la calibración de los modelos por optimización (modelo constitutivo elástico lineal)**

Se ofrecen los valores del parámetro módulo elástico del muro EM, calibrado por el método del subproblema y el de primer orden. Además se establece una comparación de los métodos de

optimización a través del porcentaje de variación de EM, tomando como referencia el valor del módulo EM hallado por el método del primer orden. Los resultados se registran en la Tabla 3.

El porcentaje de variación presentado en la Tabla 3 indica que es recomendable usar el método del subproblema, ya que su costo computacional es inferior al del método de primer orden y las diferencias son inferiores al 1%.

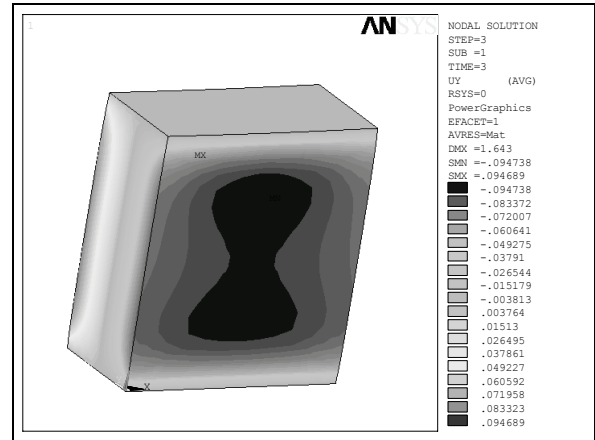


Figura 8. Isocontornos de desplazamiento en Y (paralelo al espesor)

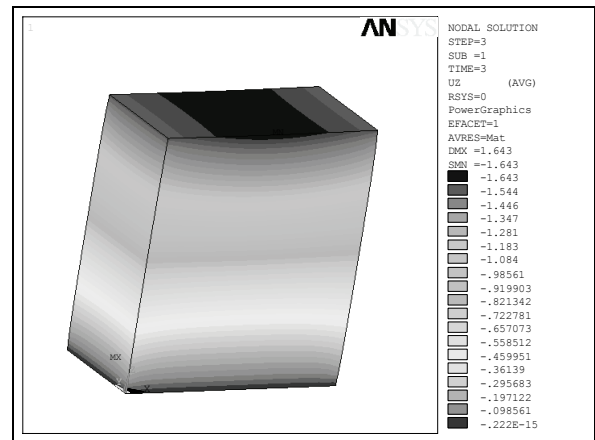


Figura 9. Isocontornos de desplazamiento vertical

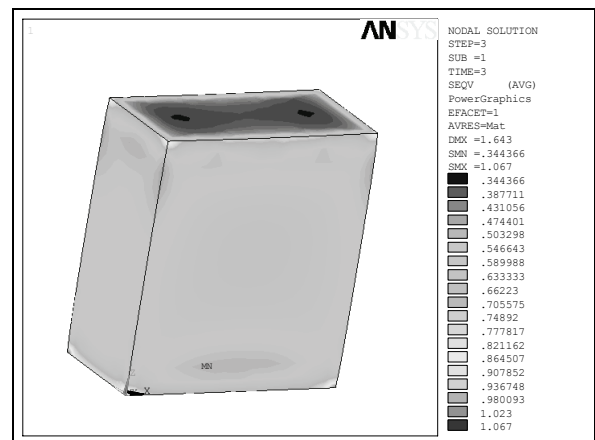


Figura 10. Esfuerzos de Von Mises

**Modelos de muros a compresión bajo el modelo constitutivo elastoplástico bilineal con endurecimiento isotrópico (BISO)**

En el proyecto se analizan los muros de manera preliminar con el modelo constitutivo elastoplástico bilineal cinemático (BKIN) y posteriormente se usa el modelo elastoplástico bilineal con endurecimiento isotrópico (BISO). En pruebas iniciales se detectan resultados muy similares entre los dos modelos constitutivos, dado que en las pruebas de laboratorio no existen ciclos de carga/descarga; por tanto, se elige profundizar en el modelo de endurecimiento isotrópico, además el cuarto modelo constitutivo conserva algunos aspectos esenciales del modelo de endurecimiento isotrópico (Modelo elastoplástico anisotrópico - Aniso).

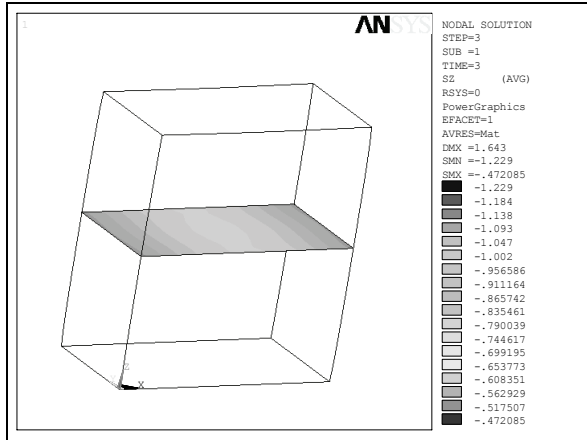


Figura 11. Corte central del esfuerzo vertical

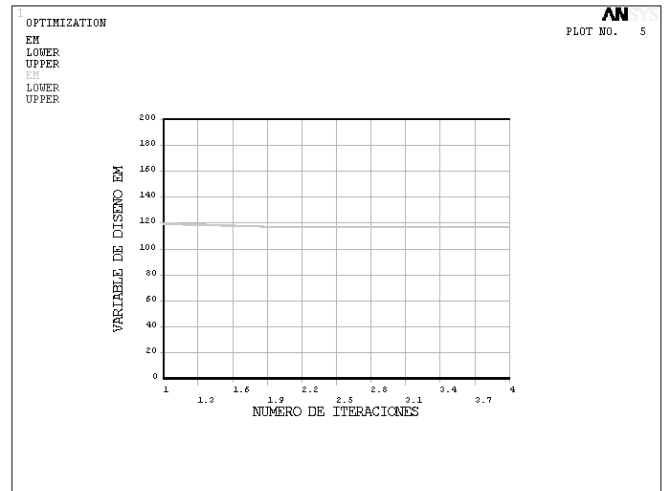


Figura 13. Convergencia de la variable de diseño EM (módulo elástico) por el método de primer orden

Verificada la correspondencia de resultados entre los modelos constitutivos BKIN y BISO, se procede directamente a la calibración por optimización del parámetro módulo tangente (ET), como parámetro característico de la pendiente esfuerzo-deformación en la zona plástica del modelo.

En este caso y después de varias pruebas, se formuló el siguiente esquema para la calibración por optimización:

**1) Función objetivo:** definida como el valor absoluto de la diferencia entre el desplazamiento medido y el simulado para la carga última aplicada al modelo más un valor constante arbitrario de diez (10) para evitar problemas numéricos relacionados con la propagación de error cuando se alcanza el mínimo. En otras palabras, cuando el ajuste entre lo medido y lo simulado sea idealmente perfecto, la función objetivo tomará un valor mínimo de diez (10).

**2) Variables de diseño:** es el módulo tangente (ET), sobre el cual pesa la responsabilidad de generar una relación adecuada de esfuerzo/deformación en la zona plástica del modelo BISO que permita ajustar lo máximo posible el modelo a los datos experimentales en condiciones de carga última.

**3) Variables de estado:** controlan la factibilidad de la solución mediante restricciones que plantean un esfuerzo mínimo definido como 0,8\*esfuerzo máximo. El límite superior se define como 1,2\*esfuerzo máximo medido en laboratorio para el caso de carga última.

Se emplean dos métodos para la optimización, el del subproblema y el de primer orden, explicados en el apartado (3.1). La tolerancia general es 0,00001. Es importante resaltar que el problema es mucho más robusto comparado con el lineal, toda vez que la no linealidad material del modelo BISO hace que sea necesario emplear un esquema de tipo iterativo-incremental, que representa un aumento considerable en el costo computacional si se tiene en cuenta que la optimización cambia el parámetro ET en cada ciclo y es necesario volver a correr todo el modelo de elementos finitos con su complejidad en la relación esfuerzo-deformación. Se presentan, entonces, los valores del parámetro módulo tangente ET, calibrado por el método del subproblema y el método de primer orden. Además se establece una comparación de los métodos de optimización a través del porcentaje de variación de ET, tomando como referencia el valor del módulo tangente hallado por el método del primer orden. Los resultados se sintetizan en la Tabla 4.

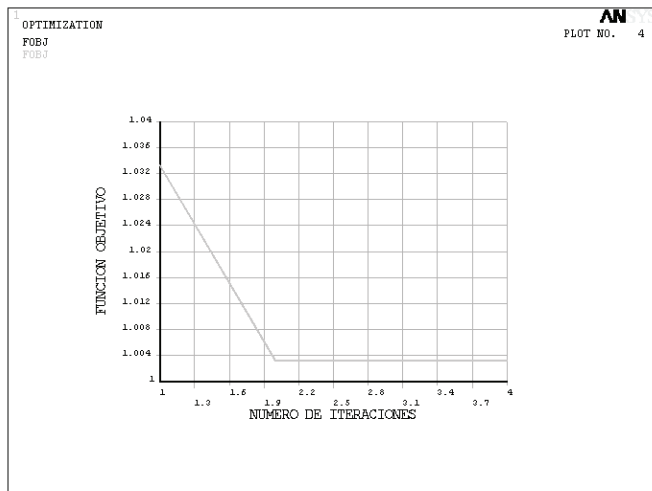


Figura 12. Convergencia de la función objetivo por el método de primer orden

Tabla 3. Resultados del resumen de la calibración del parámetro EM por el modelo elástico lineal

	Método del subproblema	Método de primer orden
Muro 1	117.46	117.28
Muro 2	142.62	140.02
Muro 3	111.66	111.87
Muro 4	111.21	111.15
Muro 5	141.36	139.11
Muro 6	117.48	117.46
Promedio de EM (N/mm <sup>2</sup> )	123.632 (1260.26 Kg/cm <sup>2</sup> )	122.815 (1251.94 Kg/cm <sup>2</sup> )
[% variación]	0.66	

Tabla 4. Resultados de la calibración del parámetro ET empleando el modelo elastoplástico bilineal isotrópico (BISO)

	Método del subproblema	Método de primer orden
Muro 2	41.067	40.910
Muro 4	28.246	27.589
Muro 5	47.201	46.959
Promedio de ET (N/mm <sup>2</sup> )	38.838 (395.90 Kg/cm <sup>2</sup> )	38.486 (392.31 Kg/cm <sup>2</sup> )
[% variación]	0.91	

El porcentaje de variación ofrecido en la Tabla 4 indica que sería utilizar el método del subproblema, ya que el costo computacional de este es inferior al de primer orden y las diferencias son inferiores al 1%; sin embargo, si se desea usar el método de primer orden se puede flexibilizar el criterio de terminación de los ciclos para terminar en máximo 3 de ellos, ya que las gráficas de convergencia del método de primer orden evidencian que después de la tercera iteración el valor de la función objetivo es prácticamente constante y el mínimo posible.

### Modelos de muros a compresión bajo el modelo constitutivo elastoplástico anisotrópico (ANISO)

En estos modelos se procede directamente a la calibración por optimización de los parámetros: módulo tangente normal y módulo tangente al corte (ETN y ETCOR), como medidas características de la pendiente esfuerzo-deformación de esfuerzos normales y al corte en la zona plástica del modelo. Esta calibración fue muy difícil por el alto costo computacional del modelo de elementos finitos, por lo tanto, solo se usó el método del subproblema con límite máximo de veinte (20) iteraciones. El modelo anisotrópico (Aniso) es altamente no lineal y su solución debe ser realizada de manera incremental e iterativa, bajo pasos de carga pequeños en intervalos de pseudotiempo pequeños, luego el costo computacional es muy alto si se desea lograr la convergencia hacia la solución. Se recomienda para la calibración de este tipo de modelos usar computadores con procesador Intel Core Dúo, además de una buena configuración de memoria caché y RAM o un *cluster*.

Después de varias pruebas, se formuló el siguiente esquema para la calibración por optimización:

**1) Función objetivo:** definida como el valor absoluto de la diferencia entre el desplazamiento medido y el simulado para la carga última aplicada al modelo más un valor constante arbitrario de diez (10) para evitar problemas numéricos relacionados con la propagación de error cuando se alcanza el mínimo. En otras palabras, cuando el ajuste entre lo medido y lo simulado sea idealmente perfecto, la función objetivo tomará un valor mínimo de diez (10).

**2) Variables de diseño:** son: el módulo tangente para esfuerzos normales (ETN) y el módulo tangente para esfuerzos cortantes (ETCOR), sobre los cuales pesa la responsabilidad de generar una relación adecuada de esfuerzo-deformación en la zona plástica del modelo Aniso que permita ajustar lo máximo posible el modelo a los datos experimentales en condiciones de carga última.

**3) Variables de estado:** controlan la factibilidad de la solución mediante restricciones que plantean un esfuerzo mínimo definido como  $0,8 \cdot \text{esfuerzo máximo}$ . El límite superior se define como  $1,2 \cdot \text{esfuerzo máximo}$  medido en laboratorio para el caso de carga última.

Se emplea únicamente el método del subproblema para la optimización, ya que el alto costo del algoritmo iterativo-incremental necesario para la solución por elementos finitos aumenta el costo computacional considerablemente, hasta el punto de no permitir

la viabilidad del método de primer orden. La tolerancia general es 0,00001. Se usan 20 iteraciones como límite, dado el gran esfuerzo computacional que implica la solución.

Los resultados de los parámetros módulo tangente ETN y ETCOR, calibrados por el método del subproblema, se reseñan en la Tabla 5.

El valor promedio obtenido para ETN es similar al logrado para ET en el modelo BISO.

Tabla 5. Resultados de la calibración de los parámetros ETN y ETCOR empleando el modelo elastoplástico anisotrópico (ANISO)

	Parámetro ETN	Parámetro ETCOR
Muro 2	43.993	20.521
Muro 4	27.289	29.551
Muro 5	49.223	29.566
Promedio (N/mm <sup>2</sup> )	40.168 (409.46 Kg/cm <sup>2</sup> )	26.546 (270.60 Kg/cm <sup>2</sup> )

### Modelos de muros con carga horizontal paralela al plano del muro bajo el modelo constitutivo elástico lineal (modelo exploratorio)

Con los tres modelos anteriores se habían cumplido los objetivos del proyecto, sobre todo en la fase de optimización, que en principio era exploratoria y que finalmente terminó representando un valor agregado importante. No obstante, se quiso explorar la posibilidad de hacer un modelo de carga paralela en muros confinados bajo carga vertical, pese a las fuertes limitaciones de computador que ya se habían evidenciado en el apartado (3.3). Por tanto, en esta instancia solo se logró construir un modelo elástico lineal. Se destacan los siguientes aportes:

1) Se construyó un modelo que propone una configuración geométrica y estructural muy similar a la real.

2) La conectividad propuesta entre la viga que aplica la carga y el muro, genera resultados y comportamientos previsibles. Esta conectividad no es automática y por tanto se busca acercarse al fenómeno de contacto viga-muro.

3) Se eligieron elementos Shell y Solid de orden superior que permitieran una adecuada discretización de la geometría y la carga. Aunque agregar estos elementos añade un costo computacional importante al modelo, esto es absolutamente necesario para minimizar el error de los resultados, sobre todo cuando se emplean modelos constitutivos no lineales.

4) Se refinó la discretización de los elementos finitos para tratar de maximizar la precisión al menor costo computacional posible; sin embargo, el modelo resultó bastante robusto y por tanto requirió de toda la capacidad de cómputo disponible.

5) Se eligió el mejor solucionador disponible en Ansys para sistemas con matriz dispersa.

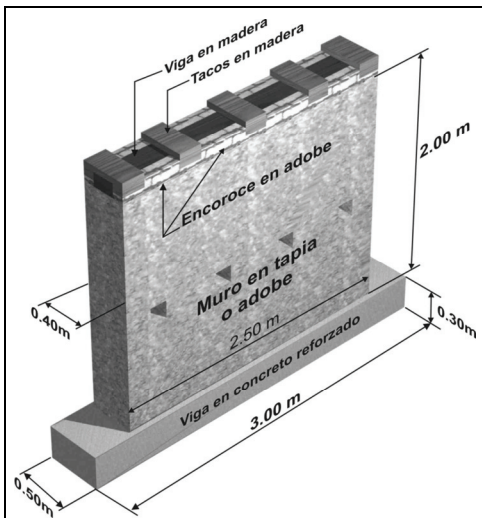
6) Dado que por restricciones de costo computacional no fue posible aplicar la historia de carga, ni siquiera para un ciclo histérico, en su defecto se determinó una carga de prueba extractada del primer ciclo de carga del muro 1. Esto sirvió para corroborar el funcionamiento adecuado del modelo con cargas relativamente bajas que se ajustan a las hipótesis de la elasticidad lineal.

7) Se modeló la viga de carga como un elemento compuesto, donde se unen en un solo cuerpo el perfil en I de acero y la viga de madera.

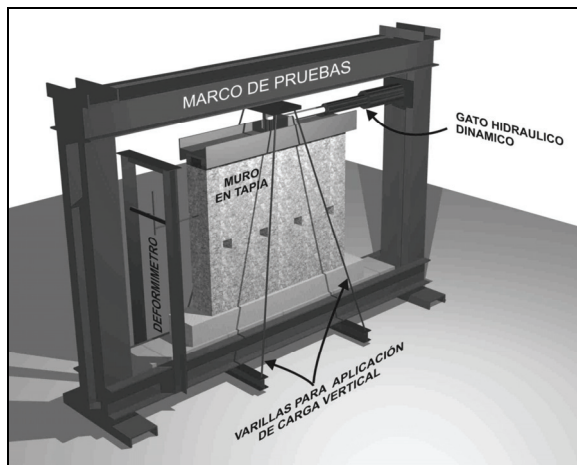


A continuación se reportan los datos del modelo, así como algunas gráficas y figuras:

- 1) Materiales:  $E_{madera} = 12164,4 \text{ N/mm}^2$ ,  $E_{acero} = 200000 \text{ N/mm}^2$ ,  $E_{adobe} = 115,4 \text{ N/mm}^2$ ,  $\nu_{madera} = 0,25$ ,  $\nu_{acero} = 0,3$ ,  $\nu_{adobe} = 0,25$
- 2) Carga vertical=aplicada como una presión vertical de  $2,18 \text{ (N/mm}^2)$  (equivale a 7 Ton de fuerza de confinamiento), Carga horizontal=aplicada como una presión horizontal de  $0,146 \text{ N/mm}^2$  (equivale a una fuerza horizontal de 5,84 KN).
- 3) Las aletas del elemento I de la viga miden 100 mm, el alma 400 mm y el espesor de lámina es de 25,4 mm. La viga de madera tiene un espesor de 100 mm y un ancho de 400 mm.
- 4) El muro tiene restringida la traslación en su base y en la unión viga-muro se compatibilizó el desplazamiento vertical y el horizontal (en dirección de la carga aplicada por el pistón).
- 5) Las dimensiones del muro y la configuración de la prueba se indican en las gráficas 1 y 2<sup>7</sup>.



Gráfica 1. Dimensiones del muro



Gráfica 2. Marco de pruebas utilizado para el ensayo de carga paralela al plano

<sup>7</sup> Fuente: Informe final "Estudios de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casas en adobe y tapia pisada", realizado por Uniandes para el Forec y la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.

La Figura 14, revela la isométrica del conjunto viga-muro; el círculo sobre la viga indica la presión de confinamiento vertical aplicada por los tensores y la placa representa la carga horizontal aplicada en forma de presión. La Figura 15 señala un comportamiento acertado del muro. En la Tabla 6 se presenta la comparación del desplazamiento horizontal medido y el calculado.

La Tabla 6 exhibe un porcentaje de variación del resultado de desplazamiento, aceptable para el orden de la medida, si se tiene en cuenta que se trata de desplazamientos inferiores a un milímetro.

Tabla 6. Comparación del resultado del desplazamiento horizontal en el plano medio de corte del muro respecto al desplazamiento horizontal medido

	Valor
Desplazamiento Medido (mm)	0,252184549
Desplazamiento Calculado (mm)	0,239544616
[% de variación respecto al valor medido]	5 %

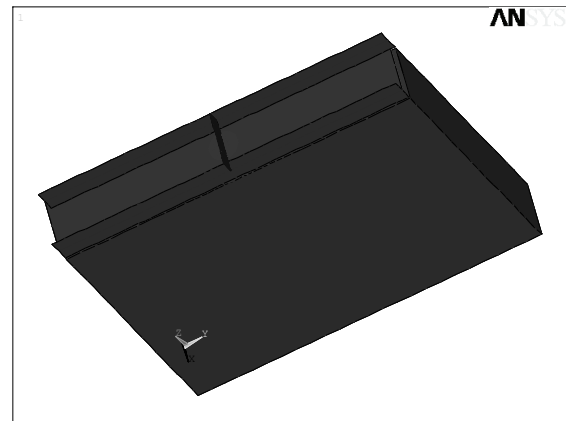


Figura 14. Isométrica del conjunto viga-muro y presiones aplicadas

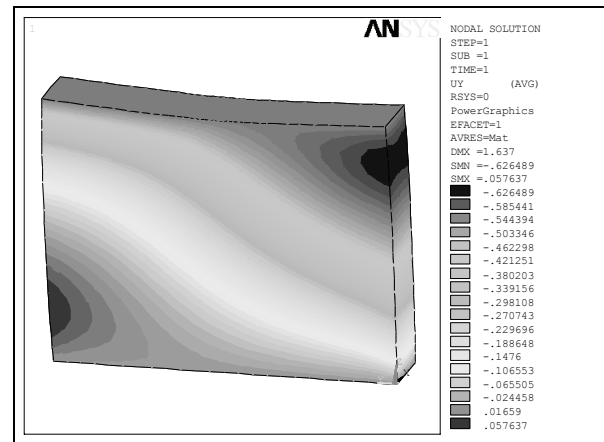


Figura 15. Isocontornos de desplazamiento horizontal en Y

## Conclusiones

Las técnicas de optimización reemplazan a las heurísticas de tanteo o de aproximación empírica de los parámetros de un modelo numérico de una estructura, de esta manera se plantea una técnica generalizable y eficiente para diversos tipos de estructuras (puentes, edificaciones, túneles, etc.).

El proceso de calibración de un modelo estructural requiere una secuencia de pasos rigurosa, que además debe ser realizada con la mayor precisión posible si se quiere minimizar el error de las predicciones hechas a través de un modelo numérico. Los errores inherentes no son controlables por los algoritmos numéricos y por

tanto se debe tener especial cuidado en la toma de información de campo.

El éxito conseguido en la calibración por optimización de los modelos de elementos finitos de los muros abre la puerta para emplear estas técnicas en Colombia a través de proyectos de macroingeniería que normalmente requieren la optimización como herramienta para dar factibilidad a una propuesta técnico-económica.

En cuanto a los modelos constitutivos empleados, debe evaluarse la factibilidad y disponibilidad de datos en la práctica, ya que cada uno posee un rango de posibilidades y un nivel de aproximación que deben ajustarse a las solicitaciones reales de los muros dentro de una estructura. El modelo más complejo es el Aniso; sin embargo, en el proyecto pudo observarse la dificultad para su calibración, para obtener una caracterización experimental adecuada y para obtener resultados con un costo computacional razonable, luego sólo se recomienda su uso en casos de extrema complejidad tensodeformacional. El modelo BISO representa el equilibrio entre las alternativas y tiene como ventajas la relativa facilidad para obtener parámetros en el laboratorio y por retrocálculo, con un costo computacional manejable; además, puede reproducir comportamientos esfuerzo-deformación no lineales con un grado aceptable de aproximación. Por último, el modelo elástico lineal es una alternativa de modelación que puede usarse para obtener por optimización el módulo elástico de un muro con un costo computacional bastante competitivo.

Los métodos de optimización utilizados no presentan diferencias superiores al 1% en los parámetros calibrados, por lo que se cree que es recomendable usar el método del subproblema, por ser un algoritmo barato respecto al de primer orden. En algunos casos es inviable el método de primer orden; tal es el caso del modelo anisotrópico Aniso; no obstante, con algunas manipulaciones en las tolerancias y número de iteraciones puede reducirse un poco el costo computacional sin sacrificar considerablemente la exactitud. Este aspecto depende de la experiencia y buen juicio del analista.

La metodología empleada demostró su funcionalidad, toda vez que se encontraron resultados satisfactorios, sobre todo en la calibración de los modelos por optimización. Esta actividad se propuso como exploratoria por el riesgo que implica la minimización de la función objetivo, donde es muy común encontrar esquemas divergentes.

Se recomienda a investigadores futuros sobre la línea de este proyecto, abordar un proceso de modelación controlando todas sus fases (experimental y computacional), ya que asimilar y usar información secundaria es un proceso de mayor dificultad en la que no es posible ir más allá de las limitaciones que imprimen los mismos datos de laboratorio.

El uso de computadores o *clusters* de gran capacidad de memoria es indispensable en este tipo de proyectos, dado que exigen complejidad en la evaluación geométrica de la deformación, en el modelo constitutivo del material, en los elementos finitos usados, en la conectividad y en los esquemas de optimización.

El modelo de carga paralela bajo confinamiento del muro demuestra estar bien configurado en su propuesta estructural y de conectividad, puesto que un porcentaje de variación del desplazamiento horizontal del 5% es aceptable si se tiene en cuenta que es inferior a 1 mm.

## Bibliografía

- ANSYS, Users Manual Revision 4.3A., Swason Analysis System Inc., 1987.
- Bathe, K. J., Finite element procedures in engineering analysis., Prentice Hall Inc., 1982.
- Blondet, M., Torrelva, D., Villa Garcia, G., Adobe in Peru: Tradition, Research and Future., Modern Earth Building 2002 – International Conference and Fair, Berlin, Germany. [http://www.world-housing.net/Tutorials/AdobeTutorial/Reference\\_2.pdf](http://www.world-housing.net/Tutorials/AdobeTutorial/Reference_2.pdf)
- CIMOC., Informe final “Estudios de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casas en adobe y tapia pisada”, realizado por UNIANDES para el FOREC y la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2004.
- Houben, H., Guillaud, H., Earth Construction – A Comprehensive Guide., ITDG Publishing, London, UK, 2004.
- Oller, S., Análisis y Cálculo de Estructuras de Materiales Compuestos., Publicado por CIMNE, Barcelona, España, 2002.
- Rodríguez, W., Pallares, M., Determinación de la superficie libre en presas de tierra mediante técnicas de optimización, Revista Tecnura, No. 15, 2004, pp. 33-44.
- Rodríguez, W., Pallares, M., Diseño de optimización de estructuras mediante métodos numéricos avanzados., II Congreso internacional de materiales, Universidad industrial de Santander, Bucaramanga, 2003.
- Tolles, E. L., Kimbro, E. E., Webster, F. A., Ginell, W. S., Seismic Stabilization of Historic Adobe Structures – Final., 2002.
- Tolles, E. L., Kimbro, E. E., Ginell, W. S., Planning and Engineering Guidelines for the Seismic Stabilization of Historic Adobe Structures., GCI Scientific Program Reports, The Getty Conservation Institute, Los Angeles, CA, 2002.
- Hinton, E., Owen, D. R. J., Finite element programming, Academic Press, 1979.
- Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., El método de los elementos finitos, McGraw-Hill, Barcelona, 1994.