



13/Dep Fi
e

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

TESIS

**"DESARROLLO DE UN MODELO ESTRUCTURAL PARA MUROS
DE MAMPOSTERÍA, CON Y SIN HUECOS"**

**PRESENTADA POR:
JOSÉ EDUARDO CERÓN CHÁVEZ**

**PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA
(ESTRUCTURAS)**

**DIRIGIDA POR:
DR. A. GUSTAVO AYALA MILIÁN**



DEPFI

T. UNAM

1 9 9 7

CER

Dedico este trabajo a mis padres, Miguel y Lupita, y a mi hermano Miguel Angel, quienes siempre creyeron en mí y me apoyaron en todo momento.

G(2)503653

**DESARROLLO DE UN MODELO ESTRUCTURAL PARA
MUROS DE MAMPOSTERÍA, CON Y SIN HUECOS**

Indice

1. Introducción.	1
2. Antecedentes.	3
2.1. Comportamiento experimental de sistemas marco-muro ante carga lateral.	11
2.2. Modelos de diagonales equivalentes.	13
2.3. Modelo de elementos finitos del programa COMBAT.	19
3. Modelo Lineal de Elementos Finitos.	23
3.1. Determinación de las propiedades mecánicas de los materiales empleados en el modelo.	23
3.2. Modelo lineal de Elementos Finitos.	31
3.3. Descripción del modelo utilizado.	33
3.4. Verificación de la validez del modelo.	35
4. Relaciones entre el Porcentaje de Vacíos y la Rigidez Lateral.	37
4.1. Procedimiento.	37
4.2. Resultados.	40
4.3. Comentarios.	46
5. Distribución y Comportamiento de los Esfuerzos Principales.	47
5.1. Ventanas tipo 1.	49
5.2. Ventanas tipo 2.	52
5.3. Puertas.	57
5.4. Comentarios.	63
6. Efecto sobre los Elementos Mecánicos del Marco.	65
6.1. Ventanas tipo 1.	66
6.2. Ventanas tipo 2.	70
6.3. Puertas.	74
6.4. Comentarios.	77
7. Modelos No Lineales.	81

8. Consideraciones sobre una Propuesta de Modelo Estructural para Muros de Relleno.	87
9. Conclusiones.	91
Referencias.	93
Apéndice A.	96
Apéndice B.	114
Agradecimientos.	133

1. Introducción

La inclusión de muros de relleno, por lo general de mampostería, en los espacios definidos por columnas y traveses de una estructura reticular, sea ésta de acero o de concreto reforzado, se hace con el objeto de definir o delimitar áreas específicas o colindancias. Estos muros producen comportamientos diferentes a los de la estructura original sin muros, tales como un notable aumento de la rigidez lateral, una disminución del período natural de vibración, una variación en la magnitud y distribución de los elementos mecánicos y, en general, una modificación de la respuesta estructural del edificio. Estos efectos han sido estudiados por investigadores como Bertero¹, quienes han establecido recomendaciones constructivas para estructuras con estas características, a fin de mejorar su comportamiento y minimizar posibles efectos nocivos producto de la presencia de muros de relleno.

Diversos investigadores se han ocupado del tema a lo largo de más de cuatro décadas, proponiéndose diversos métodos para evaluar los efectos de la presencia de muros de relleno en las estructuras. Entre las herramientas utilizadas recientemente en el estudio de este tipo de problemas, destaca el Método de los Elementos Finitos, que por su versatilidad y alcances, resulta sumamente útil para el modelado de estructuras como las descritas.

Un aspecto que ha sido objeto de diversas investigaciones es el efecto de la presencia de aberturas en los muros de relleno, correspondientes a ventanas o puertas. Muchos de los modelos que han sido desarrollados con la intención de representar la presencia de muros de una manera práctica, con miras a su aplicación en el trabajo de diseño estructural profesional, no toman en cuenta la presencia de dichas aberturas. Algunos programas de cómputo comerciales para análisis estructural han incluido modelos de elementos finitos para tratar de representar a los muros y la presencia de aberturas en éstos, aunque con limitantes importantes en cuanto a la adecuada modelación de los muros, como se comentará más adelante, ya que su comportamiento difiere bastante de lo observado en pruebas experimentales.

El objetivo del presente trabajo es, mediante el empleo de modelos analíticos y utilizando las herramientas del Método de los Elementos Finitos, desarrollar un modelo estructural para marcos con muros de relleno con y sin aberturas, de fácil aplicación para el trabajo de análisis estructural y cuya base fuera algún modelo simple previamente desarrollado, como es el caso de los diversos modelos de diagonales equivalentes propuestos por investigadores como Stafford Smith, Bazán, Saneinejad y otros a los que se hará referencia más adelante.

2. Antecedentes

El estudio de los efectos que produce la presencia de muros de mampostería dentro de sistemas estructurales definidos a partir de marcos rígidos, formados por columnas y trabes, ante la acción de cargas laterales, se ha venido desarrollando a través de los años y se ha convertido en materia de investigación debido a que la práctica común en los despachos de cálculo estructural, en muchas ocasiones, era la omisión de la presencia de estos muros, y en otros casos, se intentaba modelarlos mediante la inclusión de elementos adicionales, como diagonales o columnas anchas que de alguna forma, no siempre adecuada, trataban de representar su efecto.

En 1958, Benjamin y Williams² realizaron pruebas en especímenes a escala natural y reducida de muros a cortante de mampostería, solos y con marcos de concreto o de acero confinándolos. En la figura 2.1 se presenta un esquema de las pruebas realizadas, esquema utilizado repetidamente por muchos investigadores. Entre otros resultados, llegaron a la conclusión de que es posible estudiar el comportamiento de sistemas estructurales como los descritos por medio del empleo de modelos a escala, y que los errores que pudieran ser introducidos por causa de la escala, son insignificantes comparados con las variaciones que pueden presentarse cuando se construyen.

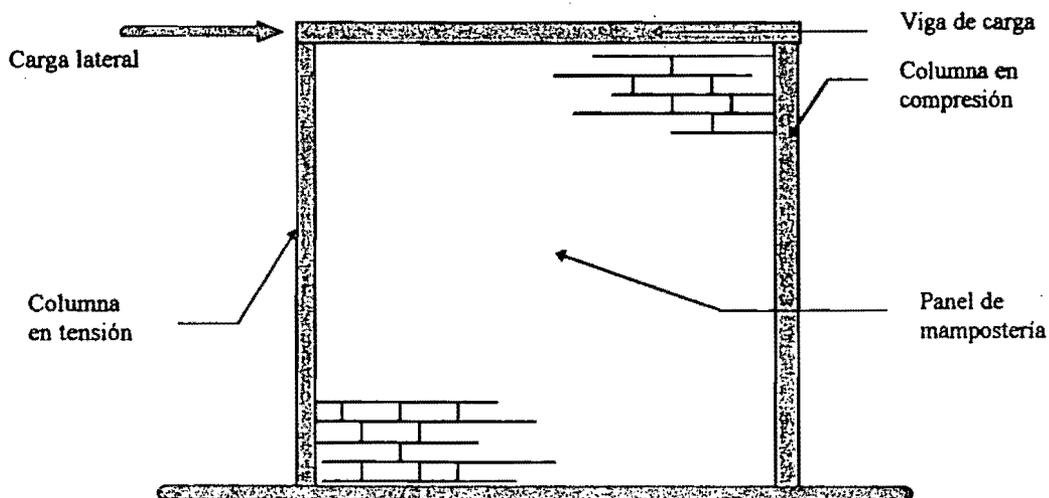


Figura 2.1. Esquema de las pruebas realizadas por Benjamin y Williams.

Establecieron asimismo que es posible predecir el comportamiento de sistemas marco-muro conociendo los parámetros necesarios, como pueden ser las características mecánicas de los materiales, y que éste sistema incrementa significativamente la resistencia del muro de mampostería solo, cuando se encuentra apropiadamente confinado. Algunos años después, Stafford Smith³ demostró que es posible representar a los muros confinados por medio de una diagonal equivalente, y calcular así la rigidez lateral del conjunto. Definió las propiedades geométricas de la diagonal y estableció que mientras más rígido sea el marco con respecto al muro, es mayor la zona de contacto entre el marco y el muro en la cual es aplicada la carga y consecuentemente el ancho de la diagonal equivalente se ve incrementado (figura 2.2). Los estudios realizados en este caso se hicieron bajo la premisa de que el sistema posee una cimentación rígida y que los muros están perfectamente unidos al marco.

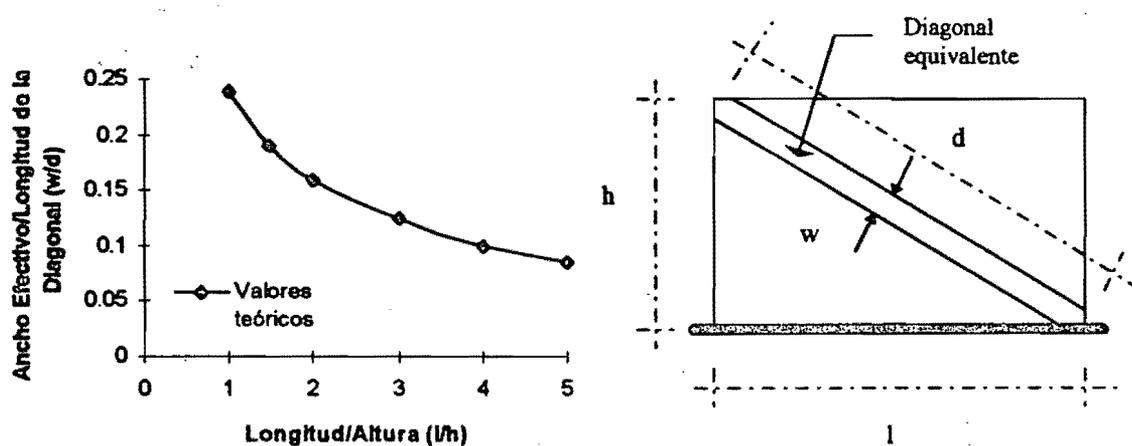


Figura 2.2. Ancho efectivo de la diagonal equivalente de Stafford Smith para varias relaciones l/h

Para 1966, este mismo investigador estableció una expresión que permite calcular un parámetro adimensional que representa la rigidez relativa entre marco y muro, y relacionó este resultado con las longitudes de contacto que se presentan, es decir, las longitudes sobre columnas y trabe en las que se mantiene el contacto entre muro y marco, al ser sometido el sistema a una carga lateral. Propuso además métodos para estimar la rigidez lateral de marcos de uno o varios niveles, con muros de relleno cuadrados, y un método para predecir la secuencia de falla de los mismos⁴. Dos

años más tarde, en 1968, realizó estudios en los que analizó el efecto de la carga vertical en sistemas muro-marco sometidos a cargas horizontales, encontrando que al aplicar una carga vertical uniformemente repartida sobre un sistema marco-muro de un nivel, siendo ésta carga cercana a la mitad de la carga resistente vertical del muro, la resistencia y la rigidez lateral del sistema se ven apreciablemente incrementadas, llegando a duplicar sus valores con respecto al caso en el que la carga vertical es nula. En la figura 2.3 se presentan los dos modos de falla característicos establecidos por Smith en su investigación. Estableció relaciones entre la magnitud de la carga vertical y su efecto en el comportamiento ante carga lateral. Sin embargo, sus resultados no son directamente aplicables a un sistema de varios niveles, ya que las condiciones de apoyo de los muros difieren, al no contar los niveles superiores con el apoyo rígido supuesto para el nivel inferior, aunque es de esperarse que esta compresión vertical en los muros contribuya a incrementar la rigidez lateral del sistema⁵.

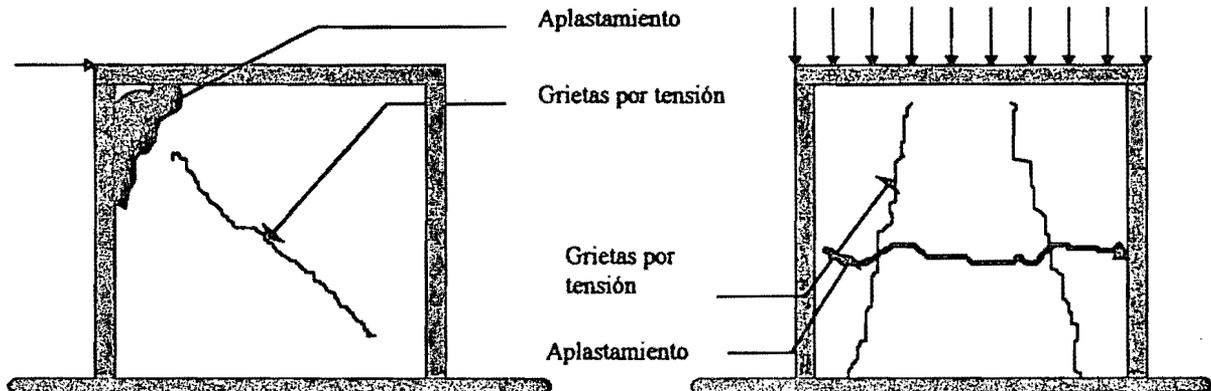


Figura 2.3. Modo de falla por carga horizontal (izquierda) y por carga vertical (derecha)

A principios de los años setenta, Mallick y Garg⁶ realizaron investigaciones relacionadas con el efecto de la presencia de aberturas en los muros de los sistemas marco-muro, encontrando que si las aberturas se ubican cerca de los extremos de la diagonal equivalente, la rigidez lateral del conjunto puede reducirse en un 85-90 % y la resistencia en hasta 75%. En el caso de aberturas localizadas en la zona media del muro, la reducción de rigidez lateral del conjunto puede ser de

entre 25-50%. Los autores recomendaron ubicar las aberturas correspondientes a puertas en la parte central del panel y en su mitad inferior. En el caso de las ventanas, recomendaron su ubicación en la mitad superior del panel, lo más cerca posible del eje vertical central.

En 1978, Page⁷ desarrolló un modelo sumamente detallado de la mampostería formada por ladrillos y mortero usando las técnicas del Método de los Elementos Finitos, logrando representar el comportamiento no lineal de la misma. Utilizando el M.E.F., los investigadores King y Pandey⁸ desarrollaron elementos capaces de representar el comportamiento que se presenta en la interface entre el muro y el marco, es decir, en la frontera existente entre el muro de mampostería y el marco de concreto reforzado o de acero que lo rodea. Al aplicar esta técnica, pueden ser representados los fenómenos de separación en la frontera de ambos materiales, donde puede ocurrir separación o deslizamiento entre ellos. Estos investigadores asumieron que el material del muro era homogéneo. Asimismo, establecieron que el método de la diagonal equivalente tiene limitaciones que lo hacen poco apropiado para su aplicación en análisis de estructuras ante condiciones de carga diferentes de las que se idealizaron cuando el método fue desarrollado. En la figura 2.4 se presenta la idealización de elementos finitos del muro de relleno con su marco confinante usada por King y Pandey.

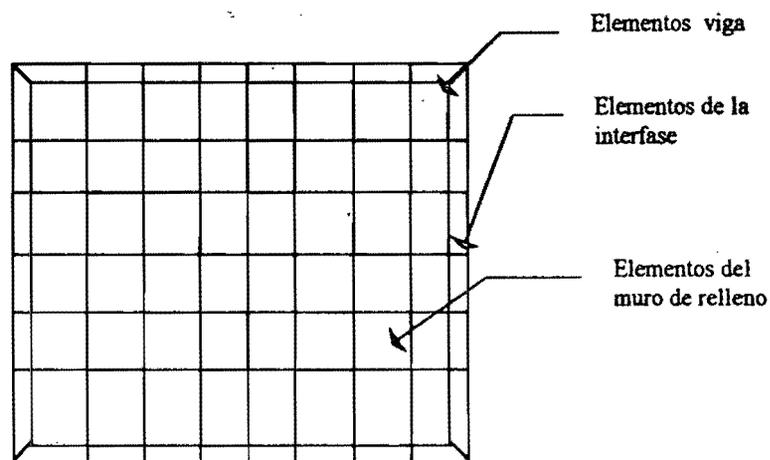


Figura 2.4. Modelo de elementos finitos de King y Pandey

En 1982, Meli⁹ estudió y propuso medios para controlar el daño sísmico que pudiera provocarse en edificios que contengan muros de mampostería, basándose en el estudio de modelos a escala, y observó significativas diferencias de comportamiento entre muros de mampostería constituidos por elementos huecos y por elementos macizos, estableciendo límites aceptables de desplazamiento de entrepiso para cada tipo de unidades. Para 1986, Achyutha *et al*¹⁰ realizaron una simulación, mediante Elementos Finitos, del comportamiento elástico de muros de relleno con aberturas. El estudio consideró diversos tipos de refuerzo rigidizando el contorno de las aberturas (a manera de cerramientos), diferentes tipos de contacto entre el marco y el relleno, diferentes rigideces relativas entre muro y marco, así como diversos tipos de aberturas. Los modelos desarrollados fueron calibrados mediante investigación experimental y eran muy similares a lo utilizado por King y Pandey en su concepción. Encontraron que la rigidez lateral disminuía con el incremento en el tamaño de las aberturas tipo ventana, siendo más drástica la reducción cuando ocurría separación marco-muro. De sus resultados infieren que la contribución del muro a la rigidez lateral deja de ser importante cuando, comparada con la del muro totalmente lleno, el porcentaje de espacios vacíos es mayor que 50%. También encontraron que la naturaleza, magnitud y distribución de los esfuerzos dependían tanto del tipo, tamaño y ubicación de las aberturas, como de la rigidez relativa entre muro y marco. Algunos investigadores se han preocupado por estudiar el comportamiento de sistemas muro-marco ante cargas cíclicas, con el fin de estudiar su comportamiento histerético, como es el caso de Zamic y Tomazevic¹¹, quienes en 1988 estudiaron modelos de muros confinados sometidos a cargas cíclicas, tratando de representar las acciones a las que éstas estructuras se ven sometidas durante un evento sísmico. Estudiaron además aspectos como la capacidad de disipación de energía que poseen estos sistemas y las posibles técnicas de reparación de muros dañados, así como el comportamiento de muros reparados ante un nuevo sismo. Otros investigadores han propuesto modelos analíticos que sean capaces de representar el comportamiento no lineal de la mampostería ante acciones sísmicas. Soroushian, Obaseki y Choi¹², realizaron trabajos en este sentido en 1988. En 1989, Naraine y Sinha¹³, basándose en resultados experimentales, propusieron una expresión matemática que representara el comportamiento de la mampostería con base en su esfuerzo

resistente máximo, y con la cual se pueden representar las curvas esfuerzo-deformación.

En el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), Ishibashi y Kastumata¹⁴ realizaron un análisis no lineal utilizando técnicas del Método de los Elementos Finitos sobre muros de mampostería confinada. En este estudio se trató de representar, además del comportamiento del conjunto, los patrones de agrietamiento sufridos por la mampostería ante cargas cíclicas reversibles, comparando los resultados con lo observado durante pruebas de laboratorio realizadas entre 1991 y 1992. En la figura 2.5 se presenta el modelo experimental reproducido mediante elementos finitos por estos investigadores. En 1994, Gergely *et al*¹⁵ presentaron una serie de estudios relacionados con la interacción de muros de relleno de mampostería no reforzada con marcos de acero semirígidos o marcos de concreto con refuerzo ligero. Dentro de la misma investigación, simplificaron y calibraron un modelo estructural para el muro de relleno empleando una triple diagonal, el cual fue desarrollado previamente y comparado con resultados obtenidos de la experimentación con modelos a escala reducida.

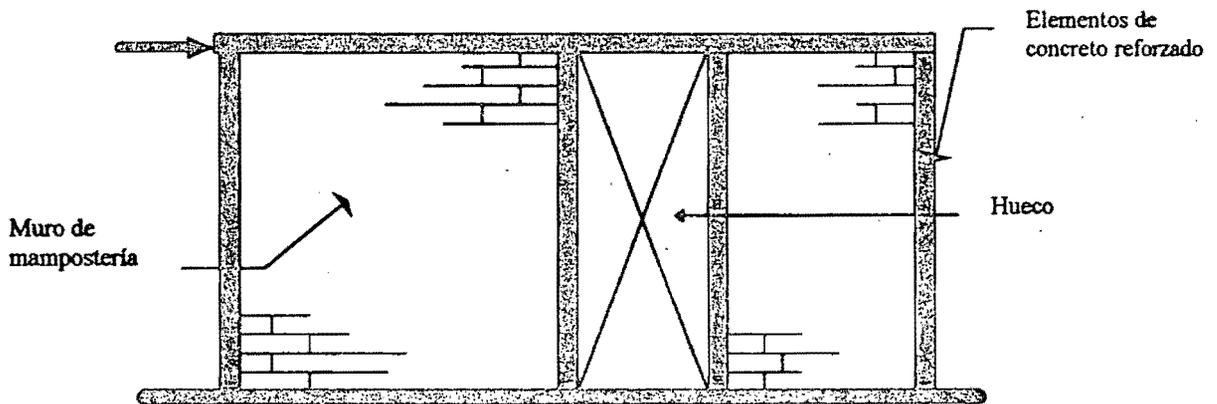


Figura 2.5. Sistema de cargas del modelo experimental probado en el CENAPRED.

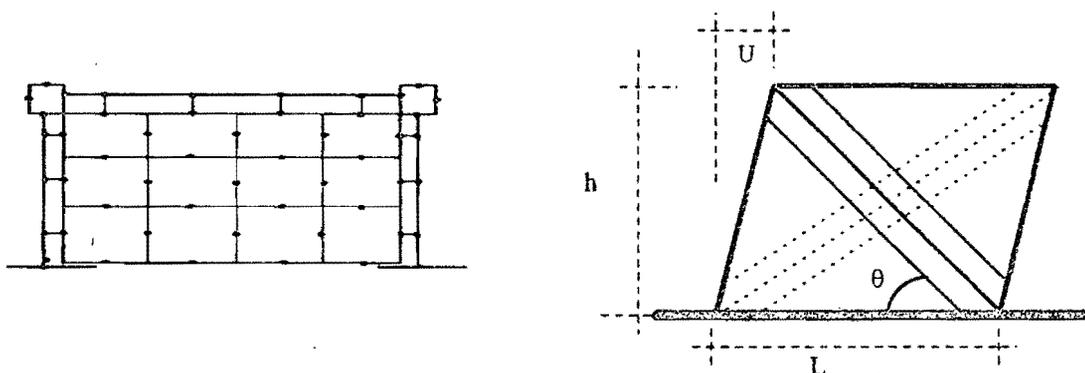


Figura 2.6. Discretización del muro y modelo tridiagonal propuesto por Gergeley.

Esta investigación incluyó también el desarrollo de un modelo de elementos finitos del sistema muro-marco, usando elementos finitos de orden superior, es decir, elementos en los que la continuidad del campo de desplazamientos debe mantenerse incluso en las derivadas de las funciones de forma. En la figura 2.6 se presenta el modelo de elementos finitos y el esquema de la triple diagonal propuesta por estos autores. Thomas Schmidt¹⁶ realizó investigaciones encaminadas a lograr una mayor comprensión del comportamiento no lineal de las estructuras con

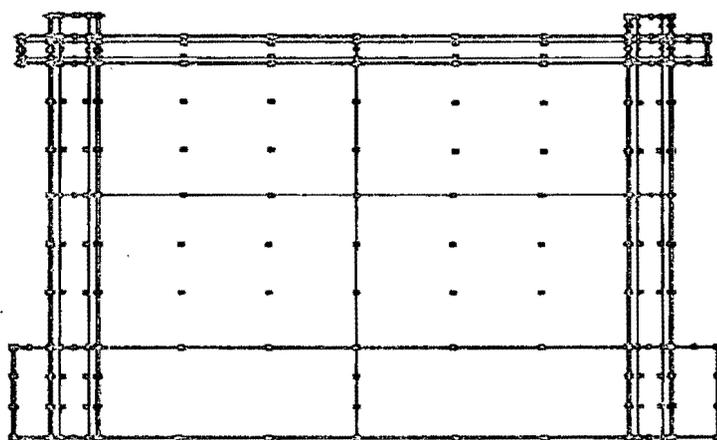


Figura 2.7. Discretización utilizada por Schmidt

muros de relleno, para poder desarrollar un modelo que pudiera ser utilizado en el análisis estructural de sistemas que fueran sometidos a excitaciones dinámicas. En sus modelos utilizó elementos viga para representar al marco confinante (con leyes de comportamiento lineales o bilineales) y elementos planos de 3, 4, 8 e incluso 16 nodos. En su modelo representó la presencia del acero de refuerzo en las columnas y vigas por medio de elementos armadura de 3 y 4 nodos. En la figura 2.7 se presenta la discretización utilizada.

En 1995, Saneinejad y Hobbs¹⁷ propusieron, basándose en investigaciones experimentales y análisis no lineales usando el M.E.F., un método para el diseño y análisis de marcos de acero con muros de relleno de concreto o de mampostería. El método toma en cuenta el comportamiento inelástico de los materiales y modela el marco con muros interiores como un marco contraventeado equivalente, y según los autores, provee de los datos necesarios para los diseños límite de resistencia y servicio. Aparentemente, su desarrollo no considera el caso de muros con aberturas.

Existen muchos aspectos que tal vez no hayan sido analizados a fondo en este tipo de estructuras. Como hemos visto, los muros "de relleno" en los marcos estructurales convierten al problema del diseño de un marco típico en un problema totalmente diferente. Sus efectos sobre el comportamiento de la estructura, y en especial ante la acción de cargas laterales debidas a sismo o a viento, tienen aspectos interesantes que merecen ser estudiados en un contexto macroscópico del problema. En la perspectiva microscópica, donde se quieren conocer con el mayor detalle posible la interacción entre el marco y el muro; el efecto de la presencia de aberturas, como puertas y ventanas; las distribuciones de los esfuerzos en el muro y en el marco; la posible modificación de la distribución y magnitud de los elementos mecánicos que se presentan en las columnas y trabes confinantes debido a la presencia del muro; los posibles patrones de agrietamiento y niveles de daño en la mampostería y en el marco al sufrir deformaciones que lleven a los materiales al rango no lineal; etc., es necesario emplear técnicas poderosas y versátiles de análisis, como el Método de los Elementos Finitos, que aunado al extraordinario

desarrollo de las capacidades de procesamiento computacional, constituyen herramientas sumamente útiles para diseñar experimentos analíticos efectivos que nos conduzcan a una comprensión más amplia del problema, lo que debe llevarnos a la posibilidad de plantear soluciones prácticas y confiables a los problemas de diseño.

2.1. Comportamiento experimental de sistemas marco-muro ante cargas laterales.

Han sido varios los investigadores que han realizado ensayos de laboratorio con configuraciones de muros y marcos estructurales como los que se estudian en este trabajo. Meli¹⁸ da una descripción del comportamiento que se presenta al someter a estos sistemas a cargas laterales, el cual se resume a continuación.

En general, una curva fuerza-desplazamiento para un modelo simple, es decir, un marco de concreto reforzado formado por dos columnas y una trabe, y un muro de mampostería confinada por estos elementos y la cimentación, comienza con una zona inicial de alta rigidez, la cual disminuye al producirse una separación en la interfase entre el marco y el muro, separación que ocurre en las esquinas de la diagonal no cargada (figuras 2.8 y 2.9). Si el refuerzo de la columna en tensión es adecuado para evitar una falla por flexión, entonces se aprecia en la curva una disminución de la carga, la cual corresponde a la formación de una grieta diagonal que sigue la dirección de la diagonal cargada, comenzando en el centro del muro y extendiéndose hacia los extremos de la mencionada diagonal.

Hasta antes de la aparición de la grieta diagonal, las características propias del marco tienen poca influencia en el comportamiento general, pero después estas son las que determinen la capacidad de carga adicional del conjunto.

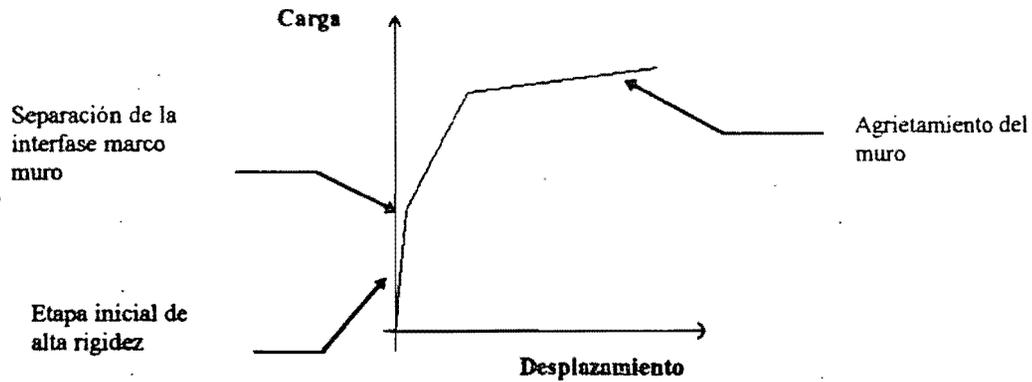


Figura 2.8. Forma característica de la gráfica Carga-Desplazamiento de sistemas marco-muro.

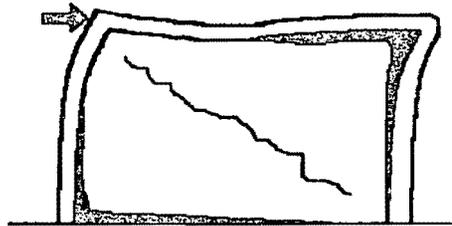


Figura 2.9. Idealización de la deformación y agrietamiento de un sistema marco-muro

Al agrietarse la mampostería, el muro actúa sobre el marco como un puntal de compresión que reacciona contra las uniones viga-columna del marco, transmitiéndole fuerzas cortantes adicionales a las que se presentan en el marco solo. Si la columna falla por cortante, se produce la falla del conjunto, pero si es capaz de resistir los esfuerzos inducidos por el puntal, entonces el conjunto es capaz de soportar cargas adicionales. Es posible que se presente aplastamiento local de la mampostería en los extremos de la diagonal. La falla por flexión se presenta si el refuerzo longitudinal de la columna en tensión no es suficiente y se presenta la fluencia del mismo. Posteriormente se presenta una zona de fluencia prolongada hasta que el acero en tensión se rompe o bien, se produce una falla por compresión. A grandes rasgos, este es el comportamiento que sigue el sistema marco-muro el cual, como ha estudiado Stafford-Smith⁴ puede verse modificado ante la presencia de carga vertical uniformemente distribuida sobre la trabe,

aumentando la rigidez lateral y la resistencia del conjunto, así como modificando los modos de falla.

2.2. Modelos de diagonales equivalentes.

Como se ha mencionado, han sido muchos los investigadores que han propuesto modelos estructurales que representen el problema del análisis de marcos que contengan muros interiores. Se han seleccionado tres de estos modelos, los cuales pueden considerarse representativos del estado del arte del problema en distintos periodos de tiempo, a fin de ilustrar el desarrollo y complejidad creciente de las formulaciones y, más adelante, detectar los parámetros más importantes que intervienen en los mismos.

El modelo de Stafford Smith, publicado en 1969, puede considerarse representativo de la década de los años setentas. Su propuesta se basa en la observación y medición del comportamiento de modelos físicos probados en laboratorio, tanto a escala reducida como a escala natural, y los resultados trataron de aproximarse matemáticamente mediante expresiones sencillas. Para su aplicación es necesario calcular un parámetro adimensional de la forma:

$$\lambda = 4 \sqrt{\frac{E_m(t) \text{sen} \theta}{4E_c I h'}} \quad 2.2.1.$$

que representa la rigidez relativa entre marco y muro. En la ecuación anterior, E_m representa el módulo elástico de la mampostería, t es el espesor del muro, θ el ángulo de inclinación de la diagonal equivalente (medido en sentido horario, de la frontera inferior del muro hacia la diagonal), E_c es el módulo elástico del material del marco, I es el segundo momento de área de la sección de la columna y h' es la altura del muro de mampostería. La longitud de contacto del muro contra la columna puede calcularse mediante:

$$\frac{\alpha}{h} = \frac{\pi}{2\lambda h}$$

2.2.2.

donde α es la longitud de contacto contra la columna y h la altura del sistema marco-muro (hasta el eje de la trabe). Mediante una serie de curvas propuestas por Sttaford Smith, las cuales relacionan el ancho y la longitud de la diagonal, w y d , con el valor de λh , puede despejarse el valor de w , determinando el valor de la relación R/R_c donde R es el valor de la carga aplicada en la diagonal y R_c la carga en la diagonal que produce el aplastamiento del material del muro. El ancho inicial de la diagonal puede entonces definirse usando la curva correspondiente a una relación $R/R_c = 0$. El módulo de elasticidad y el espesor del muro se conservan como parámetros de la diagonal equivalente. La función de estas curvas es modificar el ancho de la diagonal equivalente (o sea, su área) en función de la carga que está recibiendo, siendo esta una forma indirecta de considerar el posible agrietamiento del material del muro ante ciertos niveles de carga, y por tanto, de considerar un comportamiento no lineal del sistema.

En 1980, Bazán¹⁹ propone unas expresiones lineales derivadas de la aproximación de los resultados obtenidos de análisis de modelos que emplean el método de los elementos finitos. La modelación usada por Bazán tuvo ciertas limitaciones, derivadas del desarrollo de los programas de la época y de la limitada capacidad de procesamiento disponible, pero el hecho era que el método de los elementos finitos empezaba a considerarse como una herramienta de modelado con amplias posibilidades a futuro. El procedimiento empleado por Bazán consiste en calcular, del mismo modo que lo hace Sttaford Smith, un parámetro adimensional que representa la rigidez relativa entre marco y muro, siendo este parámetro:

$$\lambda = \frac{E_c A_c}{G_m A_m}$$

2.2.3.

donde E_c y A_c corresponden al módulo elástico y al área de las columnas del marco confinante, y G_m y A_m son el módulo cortante y el área del muro, respectivamente. Una vez calculado el parámetro λ , el ancho de la diagonal equivalente puede calcularse con la expresión:

$$w = (0.35 + 0.022\lambda)h \quad 2.2.4.$$

donde h es la altura entre ejes del sistema. De manera similar al método anterior, para considerar el deterioro del muro ante cierto nivel de carga (por ejemplo, ante una carga equivalente a la mitad de la carga que produce el aplastamiento de la mampostería), se propone la ecuación 2.2.5.

$$w = (0.22 + 0.0085\lambda)h \quad 2.2.5.$$

Saneinejad y Hobbs¹⁷ presentaron en 1995 un nuevo método de análisis y diseño inelástico para marcos con muros interiores. En este caso, el modelo propuesto toma en cuenta aspectos que no habían sido considerados en las modelaciones anteriores. Los avances tecnológicos se hacen evidentes, ya que la formulación de estos investigadores tiene su sustento en los resultados, tanto de experimentos de laboratorio como de análisis no lineales usando el método de los elementos finitos, y considera el comportamiento elástico y plástico de los sistemas marco-muro. Su aplicación es compleja y se explica claramente en la referencia correspondiente.

Para detectar los parámetros más importantes que intervienen en éstas formulaciones, podemos evaluar los parámetros comunes a cada formulación, como se presenta en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Parámetros que intervienen en diversas formulaciones de diagonal equivalente.

Parámetro	Stafford Smith	Bazán	Saneinejad y Hobbs
Parámetros Geométricos			
Altura (s)	X	X	X
Longitud (es)	-	X	X
Relación de aspecto	X	X	X
Inclinación de la diagonal.	-	-	X
Area de los elementos del marco y/o del muro	-	X	-
Espesor del muro.	X	X	X
Parámetros de resistencia.			
f_c o f_y del material del marco	-	-	-
f_m o f_t del material del muro.	-	-	X
E o G del material del marco.	X	X	-
E o G del material del muro.	X	X	-
Elementos mecánicos últimos resistentes de los elementos del marco.	-	-	X
Esfuerzos permisibles.	-	-	X
Rigidez relativa entre marco y muro.	X	X	-
Otros parámetros.			
Contracciones en los materiales.	-	-	X
Defectos constructivos.	-	-	X
Fricción en la interfase	-	-	X
Tipo y/o magnitud de las cargas.	X	-	X
Deformaciones últimas de los materiales.	-	-	X
Longitudes de contacto	X	-	X

Aquí cabe aclarar que se está considerando la intervención directa y explícita de cada parámetro en la respectiva formulación. Es evidente que algunos de los parámetros aquí enumerados pueden estar implícitos en otros. Sin embargo, con estas tablas podemos darnos una idea de cuales son los parámetros más comunes en las formulaciones estudiadas. Los primeros dos planteamientos son similares entre sí, ya que buscan determinar un ancho efectivo de la diagonal equivalente, conservando el espesor del muro y el módulo elástico del material del mismo. En cambio, el tercer planteamiento, el más complejo, busca determinar los parámetros básicos necesarios de la diagonal equivalente, es decir, un área de sección de la diagonal, y un módulo elástico inicial equivalente.

Meli¹⁸ proporciona los datos obtenidos de un modelo experimental constituido por un muro de tabique macizo de barro, con dimensiones de 2 x 2 metros, el cual se encuentra confinado por dos columnas y una trabe, siendo todos estos elementos de 15 x 15 cm. de sección transversal y reforzados con 4#5 y E#2@15 cm. El sistema es sometido a carga monótonica creciente horizontal aplicada en el eje de la trabe. Al definir diagonales equivalentes por medio de las tres formulaciones anteriores, y aplicando cargas de manera semejante, se obtuvieron los resultados que se presentan en la figura 2.10, usando para ello el programa de análisis lineal COMBAT²⁰.

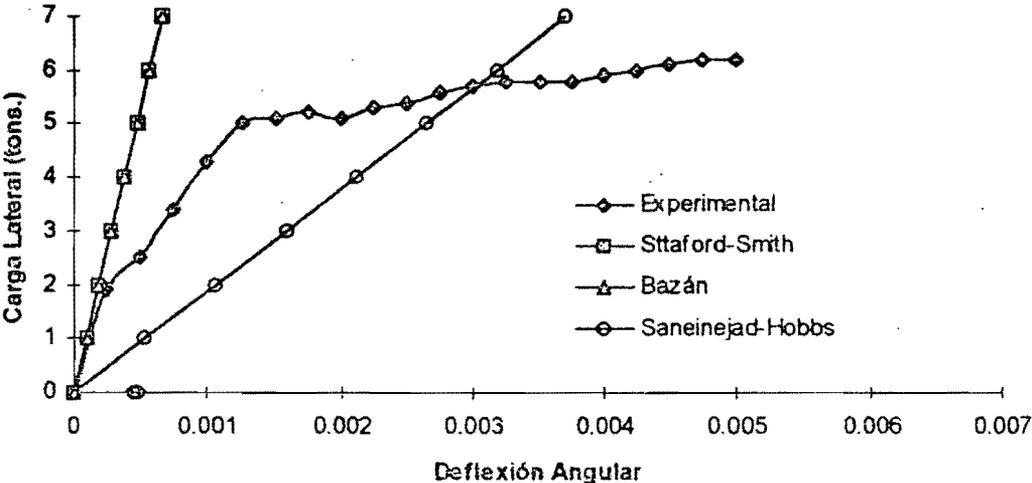


Figura 2.10. Comparación entre resultados experimentales y modelos de diagonal equivalente .

En la gráfica anterior puede apreciarse que los modelos de diagonal equivalente obtenidos para condiciones iniciales de carga, arrojan resultados que coinciden con los obtenidos del estudio experimental, en el intervalo de comportamiento lineal, con excepción del modelo propuesto por Saneinejad y Hobbs, el cual resulta ser más flexible. Los modelos de Sttaford Smith y de Bazán resultan ser muy similares, pero el modelo de Bazán es mucho más sencillo de aplicar. Si sustituimos los modelos de Bazán y de Sttaford Smith por sus aproximaciones para cuando se ha empezado a deteriorar el material del muro, obtenemos los resultados que se presentan en la figura 2.11. En este caso se observa una ligera variación en la inclinación de las gráficas; lo que nos indica una menor rigidez de la diagonal equivalente. En este caso, los desplazamientos en el rango lineal prácticamente coinciden con los observados experimentalmente. Sin embargo, es evidente que los resultados de estas formulaciones difieren por mucho del comportamiento no lineal observado en un caso real.

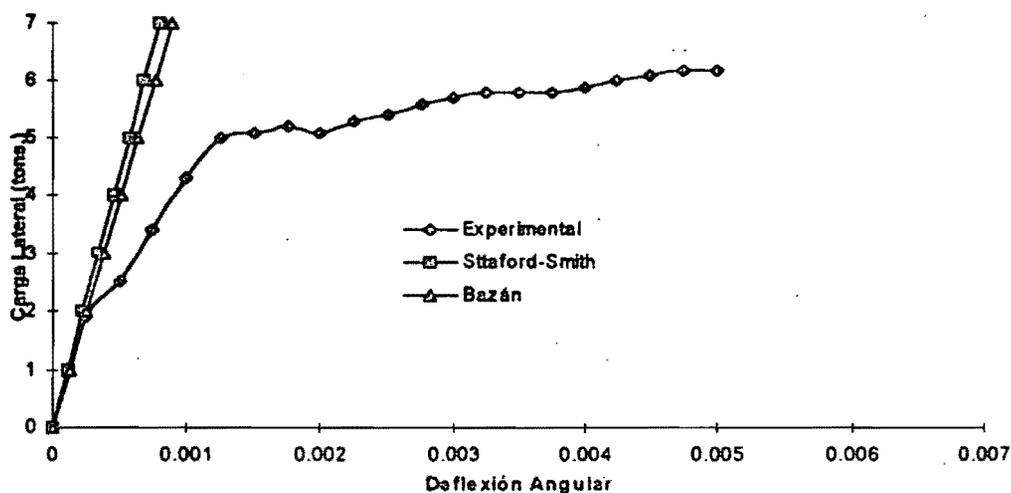


Figura 2.11. Comparación entre resultados experimentales y modelos propuestos (muro deteriorado).

El hecho de que los resultados de las formulaciones que suponen un cierto nivel de deterioro del muro hayan resultado mejor aproximados al comportamiento experimental puede deberse a que las formulaciones "sin deterioro" suponen un muro sin imperfecciones y en contacto perfecto con el marco confinante. Así, las formulaciones que suponen cierto deterioro resultarían ser más

realistas. En el caso de la formulación de Sttaford Smith, que define el ancho de la diagonal equivalente en función de la relación entre la carga aplicada en la diagonal y la carga que provoca la falla del muro, se consideró que el valor de dicha relación era de 1/2.

Para los fines de este trabajo, se propuso construir un modelo analítico del muro estudiado por Meli¹⁸, que será descrito con detalle más adelante. Este modelo servirá para analizar el efecto de las variables que nos interesa estudiar.

2.3. Modelo de elementos finitos del programa COMBAT

Existen programas de cómputo comerciales que incluyen modelos de muros de relleno. Uno de estos programas es el COMBAT (COMprehensive Building Analysis Tool)²⁰. En este programa, los muros son modelados usando una técnica de subestructuración automática la cual utiliza elementos planos isoparamétricos de 4 nodos. La malla se integra con un máximo de 5 elementos por dirección, o sea una malla de 25 elementos como máximo. A cada uno de estos elementos se les puede asignar diferente espesor, incluyendo espesor cero, con lo cual puede representarse la presencia de aberturas.

El proceso que sigue el programa consiste en convertir los elementos antes mencionados en un solo super elemento muro. Para ello, y como ocurre en la mayoría de los programas de elementos finitos, se procede a ensamblar la rigidez local de cada elemento en una matriz de rigideces global, siguiendo la técnica de la rigidez directa. Los grados de libertad internos son condensados dejando al super elemento muro sólo con los grados de libertad asociados a los nodos de las esquinas. La compatibilidad entre los elementos del muro y los elementos columna y viga perimetrales sólo se da en dichos nodos.

Como la presencia de un muro de relleno debe afectar el comportamiento a flexión de las columnas y travesaños adyacentes, el modelo implementado en el COMBAT provee de rigidez rotacional a los nudos de unión de estos elementos mediante la inclusión de unas "vigas rígidas"

ensambladas en la malla del elemento muro. De esta manera los momentos son transmitidos al muro mediante un par de fuerzas que actúan en los extremos de las "vigas rígidas". En la figura 2.12 se presenta un esquema del modelo propuesto en el programa COMBAT.

Con el fin de valorar el potencial que pudiera representar la utilización de un modelo similar al propuesto por este programa en el desarrollo del presente trabajo, se llevó a cabo una modelación del superelemento muro antes descrito con el auxilio del programa de elemento finito IMAGES²¹. El programa COMBAT no permite observar el comportamiento del modelo ante la acción de una carga lateral, ya que todo el proceso lo realiza de manera interna. Una vez reproducido y debidamente calibrado el modelo del superelemento del COMBAT en el IMAGES se pudo observar el comportamiento y modo de deformación del modelo, lo cual se muestra en la figura 2.13. De la observación realizada se pueden hacer los siguientes comentarios:

1. Puede apreciarse que existen zonas en las que la deformación del muro es por completo diferente de la del marco, presentándose graves incongruencias de comportamiento, como el que el muro tenga desplazamientos por fuera del marco confinante. Esto se presenta debido a que, como se mencionó anteriormente, la compatibilidad de desplazamientos entre marco y muro sólo se está dando en los nodos de las esquinas del muro.
2. La interacción entre marco y muro se da a través de las "vigas rígidas", las cuales transmiten momentos a los elementos del muro, sin embargo la interacción real entre el marco confinante y el muro es mucho más compleja, interviniendo fenómenos de fricción, deslizamiento y separación, además de que dicha interacción se da a todo lo largo de la interfase.
3. Los 25 elementos planos isoparamétricos son insuficientes para lograr una representación adecuada del muro.

Es evidente que el modelo de muro de relleno propuesto por el programa COMBAT resulta ser una sobresimplificación del problema real, que tal vez a escala macroscópica pueda ser útil en el análisis de edificios completos, pero que para los propósitos del presente trabajo es inadecuada, ya que no nos permite comprender realmente el comportamiento de estos sistemas.

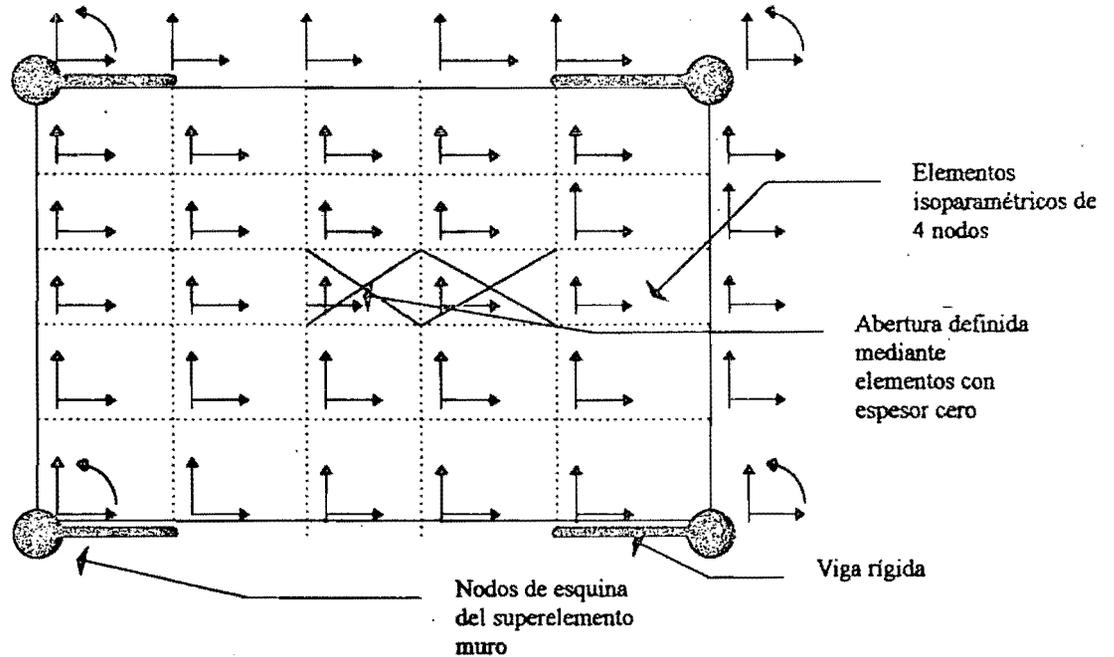


Figura 2.12. Esquema del modelo COMBAT

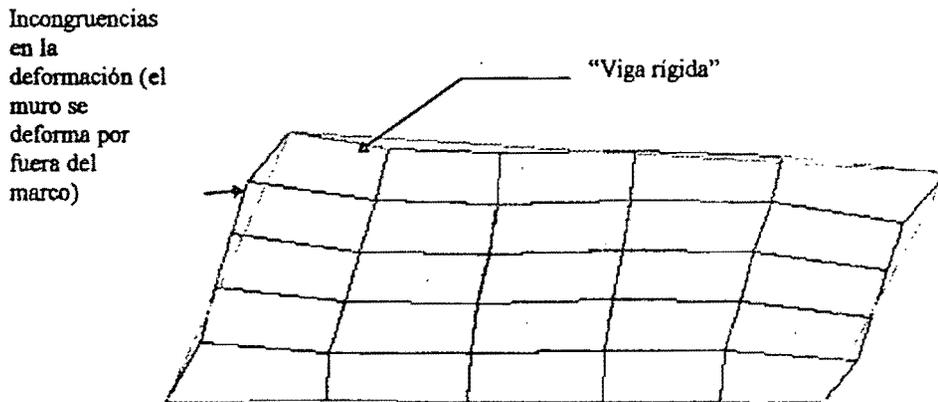


Figura 2.13. Modo de deformación del modelo del programa COMBAT.

Adicionalmente, cabe mencionar que la rigidez lateral obtenida del modelo que propone el

COMBAT resulta ser mayor que la obtenida empleando la diagonal equivalente de Bazán o la propuesta por Stafford Smith. Esto confirma que el modelo de elementos finitos propuesto con el programa COMBAT no es adecuado para representar el comportamiento de los sistemas en estudio. Este resultado era de esperarse, ya que como se mencionó anteriormente, el uso de sólo 25 elementos cuadriláteros para la representación del muro era insuficiente, arrojando como resultado un muro demasiado rígido.

3. Modelo lineal de Elementos Finitos.

3.1. Determinación de las propiedades mecánicas de los materiales empleados en el modelo

El problema de la determinación de las características mecánicas de la mampostería es sumamente complejo, ya que en él intervienen una gran cantidad de variables. Consideremos en principio que la mampostería es en realidad un material compuesto, y que sus características mecánicas dependen en gran medida de las características propias de sus elementos constituyentes, las cuales presentan una gran variabilidad. Estos elementos constituyentes son básicamente dos: las piezas, cuyo origen puede ser natural o artificial, siendo ejemplos de éstas últimas los bloques, tabiques, tabicones, adobes, etc. Las piezas de origen natural, por su parte, son los constituyentes de las más antiguas construcciones realizadas por el hombre. En la actualidad su uso sigue estando vigente, principalmente en la construcción de cimentaciones para casas-habitación, muros de retención, estructuras de contención y otros. El otro elemento básico constituyente es el mortero, que es un material aglutinante que cumple con la función de unir a las piezas descritas anteriormente. El mortero está constituido principalmente por cemento, cal, agua, arena y ocasionalmente aditivos y colorantes de diverso tipo, dependiendo su empleo de las condiciones de servicio bajo las cuales estará la estructura de mampostería. Evidentemente, los diversos proporcionamientos con los que puede ser preparado el mortero se traducen en diversos comportamientos mecánicos del mismo. Existe en la literatura disponible gran cantidad de información sobre morteros, aditivos, morteros para usos especiales y temas afines^{22,23,24}. Dentro de la práctica constructiva existen varios tipos de mampostería, ya que a la mampostería construida a base de piezas huecas es posible reforzarla mediante la colocación de varillas de acero de alta resistencia, o bien, mediante el relleno de las mencionadas piezas con concretos de alto revenimiento. Por otra parte, deberíamos considerar también que por lo general, las estructuras de mampostería son construidas *in situ*, es decir, en el sitio mismo donde cumplirán su función, y generalmente las condiciones de control que se observan durante su construcción son

poco rigurosas; además de que aspectos tales como la adecuada colocación del mortero entre pieza y pieza pueden tener influencia en el comportamiento estructural y en la durabilidad de la mampostería²⁵.

En 1985, McNary y Abrams²⁶ llevaron a cabo estudios encaminados a determinar las características de resistencia y deformación de la mampostería formada por tabiques de barro recocido. Estos investigadores realizaron pruebas de tensión y compresión biaxiales en las piezas y pruebas de compresión triaxial en especímenes de mortero con el fin de establecer relaciones constitutivas para cada material. Los efectos de la interacción entre estos dos materiales fueron examinados usando teorías propuestas por otros investigadores, como Atkinson²⁷ y Hilsdorf²⁸. Según sus resultados, consideraron que la mecánica de la mampostería formada por piezas macizas de barro recocido sometida a compresión concéntrica puede ser bien representada mediante una teoría relativamente simple que involucre el comportamiento no lineal del mortero confinado y la resistencia al aplastamiento de la pieza de barro. Concluyeron que la resistencia y la deformación de una pila de la mampostería antes descrita, están influenciadas principalmente por el mortero. Aunque el modo típico de falla a compresión de la mampostería es la fractura por tensión de las piezas, los esfuerzos de tensión que la provocan son inducidos por el mortero y éstos esfuerzos se incrementan notablemente con respecto a los de compresión debido a las propiedades no lineales de deformación del mortero. Entre los estudios realizados en nuestro país con el objetivo de establecer un conjunto de propiedades básicas que nos permitan caracterizar a la mampostería, destacan los trabajos del Meli y Reyes²⁹ en los que se proponen diversas pruebas que permitieron obtener algunos índices de éstas propiedades mecánicas básicas, utilizando materiales (piezas y morteros) de uso común en México. Dada la naturaleza heterogénea del material, es conveniente tratar de representar a la mampostería, o sea, al conjunto piezas-mortero, mediante las propiedades del material compuesto. De los resultados de la investigación antes mencionada, se puede observar que, en general, antes de llegarse a la resistencia final de una pila de mampostería en pruebas de compresión simple, el comportamiento de la curva esfuerzo-deformación es prácticamente lineal hasta por lo menos el 70% de la resistencia de la pila. En la figura 3.1 se esquematizan los dos tipos más importantes de pruebas realizadas. La investigación

de Meli y Reyes antes mencionada arrojó resultados que, para el caso del módulo de elasticidad se resumen en la tabla 3.1

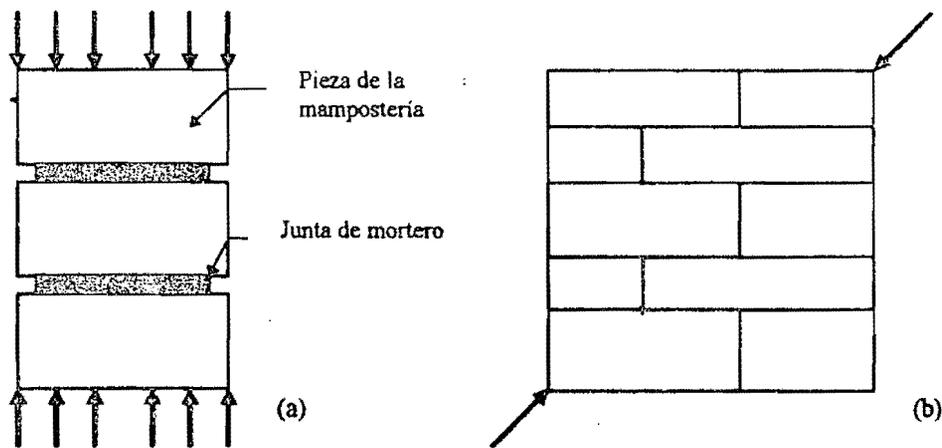


Figura 3.1. Esquema de las pruebas realizadas por Meli y Reyes²⁹: Compresión axial (a) y Compresión diagonal (b).

Tabla 3.1. Resultados de ensayos de compresión realizados por Meli y Reyes²⁹.

Pieza	f_p kg/cm ²	Proporción del mortero	f_b kg/cm ²	f_m kg/cm ²	E kg/cm ²
Tabique de barro recocido	70	1:0:3	184	33	10000
		1:1:6	92	35	9000
		0:1M:3	81	29	8000
		0:1:3	5	21	5000
Bloque de concreto	110	1:0:3	204	77	3000
		1:1:6	152	69	28000
		0:1M:3	78	67	23000
		0:1:3	5	68	15000
Tabique hueco de barro	216	1:0:3	204	99	22000
		1:1:6	92	78	24000
		0:1M:3	85	64	14000
		0:1:3	5	72	11000
Tabique perforado vertical	183	1:0:3	206	86	15000
		1:0:6	97	64	14000
		1:0.5:5	117	69	16000
Tabique sílico calcáreo	158	1:0:3	211	95	23000
		1:0:6	97	87	16000
		1:0.5:5	117	83	19000
Tabique asfáltico	39	1:0:3	206	26	9000
		1:0:6	128	25	9000
		1:0.5:5	132	20	8000

f_p : Resistencia a la compresión de la pieza; f_b : Resistencia a la compresión del mortero; f_m : Resistencia a la compresión de la pila; E : Módulo de elasticidad de la pila

En el caso de los estudios mencionados, el módulo de elasticidad del material se definió de la pendiente de la recta que se ajustó a los puntos de la curva que correspondían a esfuerzos entre el 15 y el 60 por ciento de la resistencia en gráficas carga-deformación obtenidas de los ensayos

descritos en el trabajo de Meli y Reyes²⁹.

A pesar de que el material tiene propiedades distintas de acuerdo con la orientación de las hiladas, Meli¹⁶ ha demostrado que el módulo de elasticidad, para el caso de piezas y juntas de tamaños usuales, varía poco, y que es aceptable considerar que el módulo elástico de la mampostería, E_m , es igual en las direcciones paralela y perpendicular de las hiladas¹⁸. Por lo que se refiere al módulo de cortante de la mampostería, y haciendo referencia a la investigación de Meli y Reyes²⁹, se encontró de manera experimental que varía de 0.1 a 0.3 E_m , por lo cual no siempre es posible evaluarlo mediante la expresión:

$$G_m = \frac{E_m}{2(1 + \nu_m)} \quad 3.1.1.$$

ya que ésta corresponde a materiales isotrópicos. Tomando como base el trabajo de Bazán¹⁹, podemos considerar que la relación matricial entre esfuerzos y deformaciones para la mampostería puede establecerse como:

$$\{\sigma\} = [D_m] \{\varepsilon\} \quad 3.1.2.$$

donde

$$\sigma = \{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}\} \quad 3.1.3.$$

$$\varepsilon = \{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_{xy}\}^T \quad 3.1.4.$$

$$[D_m] = \frac{E_m}{(1 - \nu_m^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu_m & 0 \\ \nu_m & 1 & 0 \\ 0 & 0 & g \end{bmatrix} \quad 3.1.5.$$

y

$$g = \frac{(1 - \nu_m^2)}{E_m} G_m \quad 3.1.6.$$

Cuando se presenta la formación de grietas en la mampostería, o sea, cuando para un determinado ángulo de inclinación el cociente entre el esfuerzo actuante de tensión y el respectivo esfuerzo resistente es mayor que uno, el comportamiento del material queda representado por la matriz

$$[D^*_\alpha] = \begin{bmatrix} E_m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad 3.1.7.$$

ya que se considera que el material, después del agrietamiento, solo es capaz de resistir esfuerzos en la dirección paralela a las grietas. El subíndice α indica que la matriz anterior está referida a la dirección del agrietamiento. Esto implica que si se presentara una fuerza en dirección normal a la grieta, esta fuerza no produciría esfuerzo alguno en el material.

En 1989, Naraine y Sinha³⁰ llevaron a cabo un programa experimental para estudiar el comportamiento de mampostería a base de ladrillos sujeta a carga cíclica de compresión. Como parte de sus experimentos, los especímenes se sometieron a carga monotónica, además de la carga cíclica antes mencionada, y lograron definir una curva envolvente que fue aproximada mediante la función

$$\sigma = \beta \frac{\varepsilon}{\alpha} e^{1 - (\frac{\varepsilon}{\alpha})} \quad 3.1.8.$$

donde, para la curva envolvente propuesta por los autores, los parámetros α y β tienen el valor de 1, ε es el cociente entre la deformación a un esfuerzo determinado y la deformación máxima que alcanza la mampostería, ε_m , y σ es el cociente entre el esfuerzo actuante y el máximo esfuerzo de falla, σ_m . Por lo tanto, la ecuación anterior se podría re-escribir como:

$$f_m = f_m^* \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_m} \right)^{1 - \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_m} \right)} \quad 3.1.9.$$

De manera similar a los modelos representativos del concreto simple, como podría ser el modelo de Hognestad³¹, es posible representar una curva esfuerzo deformación para la mampostería, en función de f_m^* , que a su vez es función del tipo de pieza empleado y del mortero utilizado en la elaboración de la mampostería. Los resultados de esta aproximación tienen la forma que se presenta en la figura 3.2.

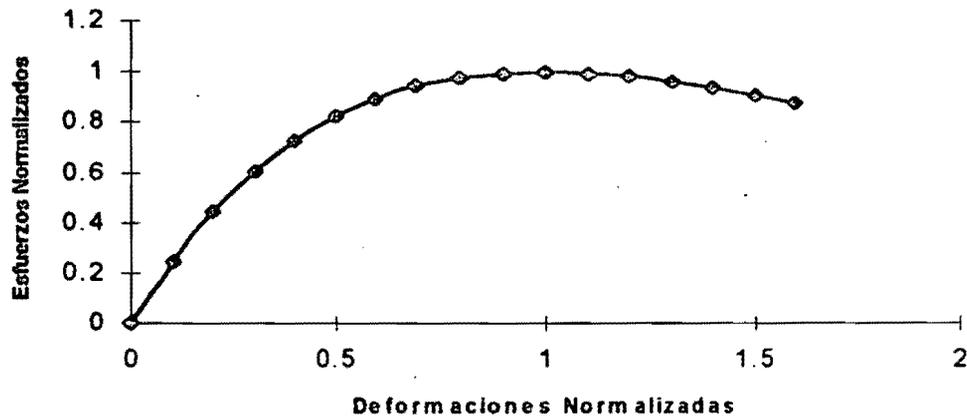


Figura 3.2. Aproximación de la curva esfuerzo-deformación según Naraine y Sinha.

Los códigos y reglamentos de construcción definen también las propiedades a considerar de los diversos tipos de mampostería, con el fin de servir de norma a los diseñadores de este tipo de estructuras. Según las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTCM) del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal³², el valor del módulo de elasticidad se define en función del valor de f_m^* , que es la resistencia de diseño a compresión de la mampostería, y que a su vez se establece en función de la resistencia a la compresión de la pieza (f^*p) y el tipo de mortero empleado, clasificándose este último en tipo I (resistencia nominal en compresión de 125 kg/cm²), tipo II (resistencia de 75 kg/cm²) y tipo III (resistencia de 40 kg/cm²). El módulo de elasticidad se define de la siguiente manera:

Para mampostería de tabiques y bloques de concreto:

$$E = 800(f^*m) , \text{ para cargas de corta duración}$$

$$E = 350(f^*m), \text{ para cargas sostenidas}$$

Para mampostería de tabique de barro y otras piezas, con excepción de las de mampostería:

$$E = 600(f^*m), \text{ para cargas de corta duración}$$

$$E = 350(f^*m), \text{ para cargas sostenidas}$$

Las tablas que definen los valores de f^*m en función de el tipo de mortero y la resistencia a compresión de la pieza se presentan en las tablas 3.2 y 3.3

Tabla 3.2. Resistencia de diseño a la compresión de mampostería de piezas de concreto (f^*m , sobre área bruta)³²

f_p kg/cm ²	Mortero tipo I	Mortero tipo II	Mortero tipo III
25	15	10	10
50	25	20	20
75	40	35	30
100	50	45	40
150	75	60	60
200	100	9	80

Para valores intermedios se interpolará linealmente

Tabla 3.3. Resistencia de diseño a compresión de la mampostería de piezas de barro (f^*m , sobre área bruta)³²

f_p kg/cm ²	Mortero tipo I	Mortero tipo II	Mortero tipo III
25	10	10	10
50	20	20	20
75	30	30	25
100	40	40	30
150	60	60	40
200	80	70	50
300	120	90	70
400	140	110	90
500	160	130	110

Para valores intermedios se interpolará linealmente

El reglamento de construcciones del D.F.³² establece la posibilidad de utilizar los valores de las tablas 3.2 y 3.3 o bien, determinar el módulo de elasticidad mediante procedimientos experimentales, aunque omite describir tales procedimientos. En cuanto al valor del módulo de cortante G_m , las normas establecen un valor de $0.3 E_m$. La revisión de reglamentos de construcción usados en otros países, tales como el Uniform Building Code (UBC-91) o las ACI 530.1-92 establecen procedimientos similares para la determinación de los valores del módulo de elasticidad y módulo de cortante. Los valores promedio de resistencia de las piezas de los reglamentos antes mencionados son en general muy superiores a los establecidos el reglamento de construcciones del D.F., debido probablemente a que en nuestro país aún se emplean piezas producidas de manera artesanal (en particular, los tabiques de barro recocido), y que por lo tanto no están sujetas a los controles de calidad propios de un proceso de producción industrializado.

El problema de la determinación de las características mecánicas de la mampostería ha sido estudiado también desde el enfoque de la Teoría de la Homogeneización para Medios Periódicos, teoría con la cual se pretende derivar el comportamiento global de la mampostería a partir del comportamiento de sus materiales constituyentes. Investigadores como Pande *et al*³³ y Anthoine³⁴ han seguido esta línea de investigación. El procedimiento implica la discretización del elemento de mampostería, de tal manera que cada uno de los elementos de esta discretización contiene partes de piezas y de mortero, y la geometría de estos elementos se define de acuerdo con la periodicidad en que se encuentran dispuestos los distintos materiales en el elemento de mampostería, es decir, con la geometría del conjunto piezas-mortero. Sin embargo, parece ser que en el rango de comportamiento no lineal (plasticidad o daño) las aproximaciones a las que se llega por este método pueden conducir a resultados erróneos, con predicciones incorrectas del modo de falla y subestimando el valor de la carga última (figura 3.3).

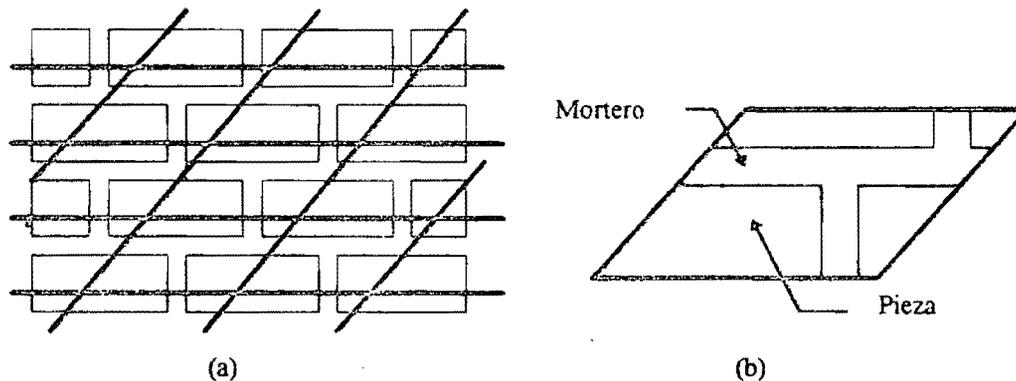


Figura 3.3. Discretización de un medio periódico: patrón de la discretización (a), elemento básico (b)

Para los fines del presente trabajo, se considera que lo más conveniente, en razón de lograr una modelación lo más realista posible, es adoptar datos provenientes de trabajos de investigación y pruebas de laboratorio previamente publicados. Como se ha visto, tal vez para fines de diseño puedan ser consideradas características elásticas para representar el comportamiento de la mampostería, pero existe suficiente evidencia de que, como en casi todos los materiales, existe en su comportamiento un importante componente no lineal, que debemos tomar en cuenta si pretendemos modelar adecuadamente el problema que nos interesa, que es el desarrollo de un modelo analítico confiable que nos permita estudiar el comportamiento de los sistemas marco-muro.

3.2. Modelo lineal de Elementos finitos.

El empleo del Método de los Elementos Finitos (MEF) en la obtención de soluciones aproximadas a problemas de sistemas discretos se ha convertido en práctica común en muchas áreas de la ingeniería, la física y otras disciplinas. A grandes rasgos, el MEF es en realidad la combinación de diversas técnicas desarrolladas por un gran número de profesionales de muy diversas áreas. Consiste básicamente en la subdivisión (discretización) de un cuerpo o medio continuo en muchos pequeños elementos, cuyo comportamiento se conoce y se encuentra bien definido. Según Cook³⁵, una descripción breve y simple es que dicho método *"implica la división de una estructura*

en muchas partes o piezas de la misma, se define el comportamiento de cada uno de esos pedazos de una manera simple, mediante ecuaciones algebraicas, se vuelven a unir estos pedazos entre sí por medio de ciertos puntos llamados nodos, como si estos puntos fueran gotas de pegamento que mantuvieran a los elementos juntos y el proceso culmina con la integración matricial de todas las ecuaciones para poder aproximar el comportamiento global del continuo que se está estudiando". En el análisis de esfuerzos el conjunto de ecuaciones que definen el problema resultan ser un conjunto de ecuaciones algebraicas simultáneas. Resulta evidente que una discretización que involucre un elevado número de elementos finitos, generará un conjunto muy grande de ecuaciones a resolver (que de hecho pueden llegar a ser miles de ecuaciones), por lo que la implementación del método requiere necesariamente del empleo de equipo de cómputo y programas adecuados.

En el presente trabajo se optó por emplear un programa de elementos finitos no lineal denominado DIRT II³⁶, el cual fue desarrollado en lenguaje FORTRAN por T.J.R. Hughes y J.H. Prevost en 1979. El programa en cuestión es de uso general y aplicable al análisis de problemas cuasi-estáticos no lineales. El algoritmo empleado para el análisis no lineal consiste en una secuencia predictor-corrector, es decir, una fase predictor en la que se obtienen esfuerzos y módulos elásticos de los materiales, los cuales son empleados para la definición de la rigidez tangencial de la fase correctora. El programa permite la modelación de una gran variedad de problemas mediante el empleo de tres tipos básicos de elementos para la discretización. Elementos planos, ya sea de forma triangular (tres nodos) o en su forma cuadrilátera (cuatro nodos), teniendo dos grados de libertad por nodo, mediante los cuales pueden obtenerse esfuerzos y deformaciones referidas al sistema de referencia, esfuerzos principales, esfuerzos máximos, deformaciones por cortante y el ángulo de inclinación en el que actúan los esfuerzos principales. Todos los resultados anteriores son calculados en el centroide de cada elemento. Pueden emplearse también elementos tridimensionales de seis u ocho nodos, con tres grados de libertad por nodo, lo que permite el modelado de problemas tridimensionales (figura 3.4).

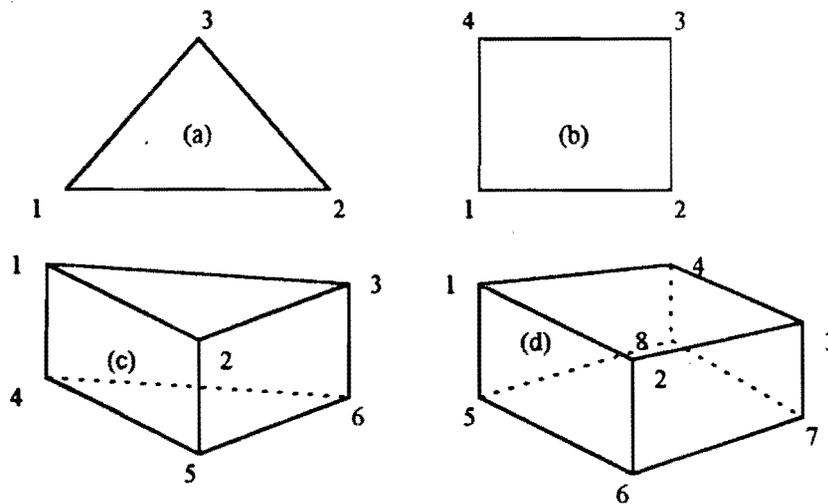


Figura 3.4. Elementos planos y tridimensionales del programa DIRT II. (a) Elemento plano de 3 nodos, (b) Elemento plano de 4 nodos, (c) elemento tridimensional de 6 nodos, (d) elemento tridimensional de 8 nodos.

Tanto en los elementos planos como en los tridimensionales, es posible definir diferentes esquemas de integración numérica así como modos incompatibles, es decir, formulaciones de elementos finitos que no cumplan los requisitos usuales de continuidad de las funciones de forma.

El tercer grupo de elementos son llamados elementos de contacto, y se utilizan para imponer restricciones de desplazamiento entre pares de nodos. Estos elementos son útiles en el modelado de interfaces entre dos grupos de elementos de diferentes materiales, entre los que exista fricción y/o deslizamiento, como se describirá más adelante.

3.3. Descripción del modelo utilizado.

En el presente trabajo se emplearon dos tipos de elementos disponibles en el programa para la modelación de un sistema simple formado por un marco rígido, con dos columnas y una trabe, en

cuyo interior se coloca un muro de un material diferente al del marco. El modelo reproducido corresponde al que se hace mención en la sección 2.2, cuyas características fueron publicadas por Meli¹⁸ (especímenes 801, 803 y 809). El material de relleno del marco fue representado por medio de 400 elementos finitos planos de forma cuadrada. Las columnas y la trabe fueron modeladas mediante 60 elementos finitos planos rectangulares cada una. En los nudos de unión entre trabe y columna se emplearon 9 elementos planos cuadrados. En la interface entre el material del relleno, el marco y el piso, se definieron un total de 84 elementos de contacto. Se generaron asimismo 21 nodos auxiliares representando al piso en la parte correspondiente al relleno. Los nodos restringidos del sistema fueron los correspondientes a la base de las columnas y a los nodos de piso. El modelo analítico propuesto cuenta así con 730 puntos nodales, 598 elementos planos y 84 elementos de contacto (fig. 3.5).

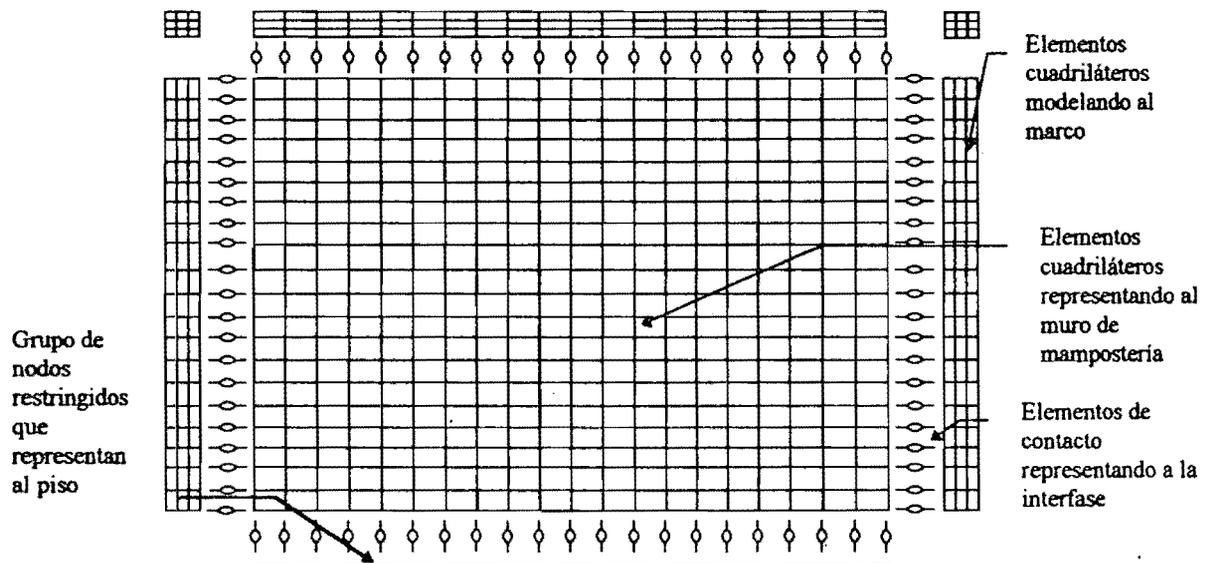


Figura 3.5. Modelo de elementos finitos del muro de estudio.

Las cargas aplicadas sobre el sistema también son discretizadas y divididas en pasos de carga, utilizándose 20 pasos de carga para cada una de las ejecuciones del programa. El empleo de tantos pasos de carga tiene por objeto tratar de modelar el comportamiento no lineal que pudiera tener el sistema, tema que será estudiado en etapas posteriores de esta investigación.

3.4 Verificación de la validez del modelo.

Una vez definido el modelo analítico a utilizar, se procedió a evaluar su capacidad para representar el comportamiento del modelo real, para lo cual se asignaron a los diferentes elementos las propiedades correspondientes a los materiales empleados en las pruebas experimentales ya referidas, y aplicando una carga monótonica creciente, se obtuvieron las gráficas que se presentan en la figura 3.6. En estas gráficas se compara la respuesta del modelo experimental con los resultados obtenidos de la aplicación de los diversos modelos de diagonal equivalente estudiados, así como con los resultados obtenidos del modelo de elementos finitos aquí propuesto. A manera de comparación, se presenta también la gráfica correspondiente al marco sin muro de relleno.

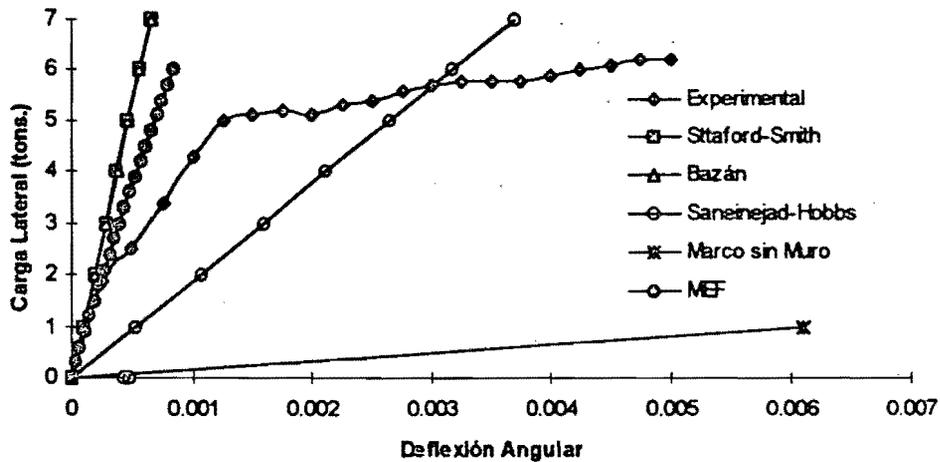


Figura 3.6 . Comparación entre resultados experimentales, modelos de diagonal equivalente y modelo de elementos finitos propuesto.

En la figura 3.7 se presenta la misma gráfica, pero utilizando las formulaciones de muro deteriorado de Bazán y de Stafford Smith.

4. Relaciones entre el Porcentaje de Vacíos y la Rigidez Lateral.

4.1. Procedimiento.

El procedimiento que se siguió en este trabajo consistió en la definición de nueve casos de estudio en los que se pretendió representar ubicaciones de espacios vacíos que se presentan comúnmente en los muros de relleno. Para ello se definieron en primer término tres ubicaciones posibles de las aberturas: izquierda, centrada y derecha. El caso centrado consideraba siempre que la abertura era simétrica con respecto al eje central vertical del conjunto. Los casos izquierdo y derecho consideraban que una de las fronteras laterales de la abertura era la cara de la columna correspondiente. A continuación se establecieron tres tipos de aberturas, correspondiendo el primero a ventanas pequeñas ubicadas en el tercio superior del muro (las cuales pueden representar ventanas de sanitarios o bodegas). A este conjunto de aberturas se le denominó ventanas tipo 1 (figura 4.1).

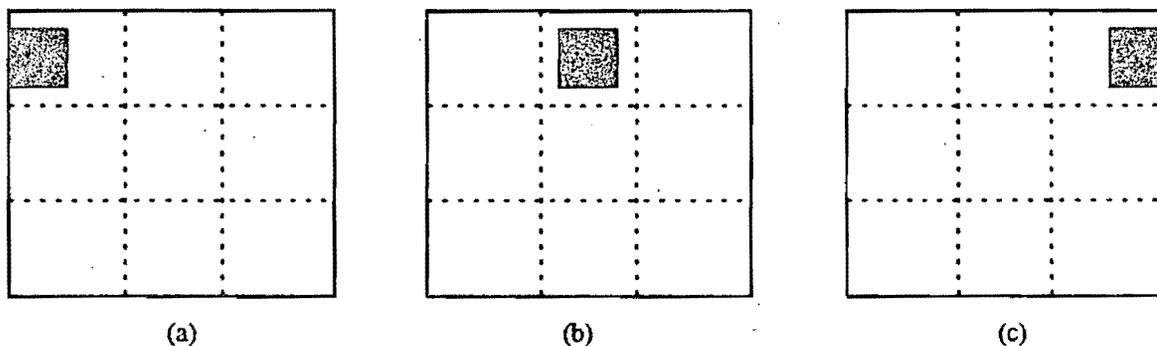


Figura 4.1. Ventanas tipo 1: izquierda (a), centrada (b), derecha (c).

Las ventanas tipo 2 se definieron como ventanas de dimensiones en general mayores que las del tipo 1 y que se ubicaban en los dos tercios superiores del muro, representando a la mayoría de las ventanas comunes (figura 4.2). El tercer grupo de aberturas representó a las puertas, donde se estableció una altura fija de las mismas correspondiente a dos tercios de la altura total del muro (figura 4.3).

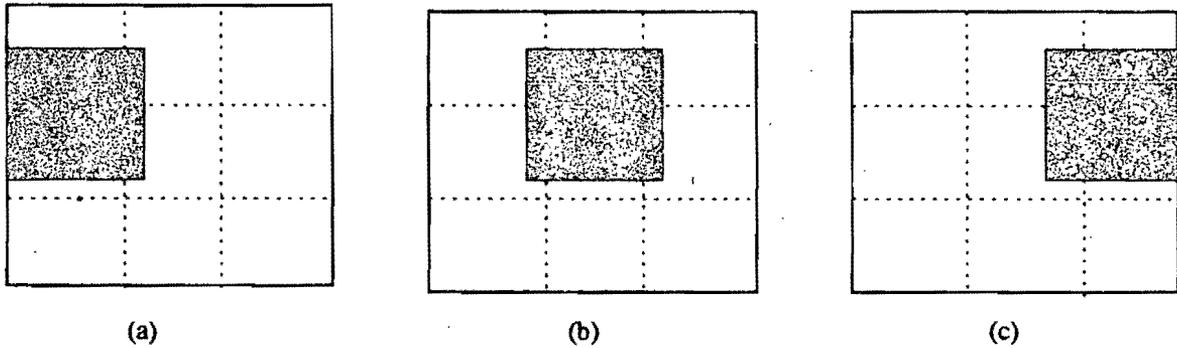


Figura 4.2. Ventanas tipo 2: Izquierda (a), Centrada (b), Derecha (c)

Cada uno de estos grupos de modelos fue analizado ante carga lateral para diferentes porcentajes de vacíos (es decir, para diferentes tamaños de aberturas¹ y para diferentes valores de rigidez relativa según la definición de Stafford Smith³. En el caso del porcentaje de vacíos, para las ventanas tipo 1 se utilizaron porcentajes correspondientes a 1, 4, 10 y 21 %. Para las ventanas tipo 2 se usaron 1, 4, 9, 16, 25, 36, y 52 %. En el caso de los modelos de puertas los porcentajes de vacíos utilizados fueron 7, 14, 21, 28, 42 y 56 %.

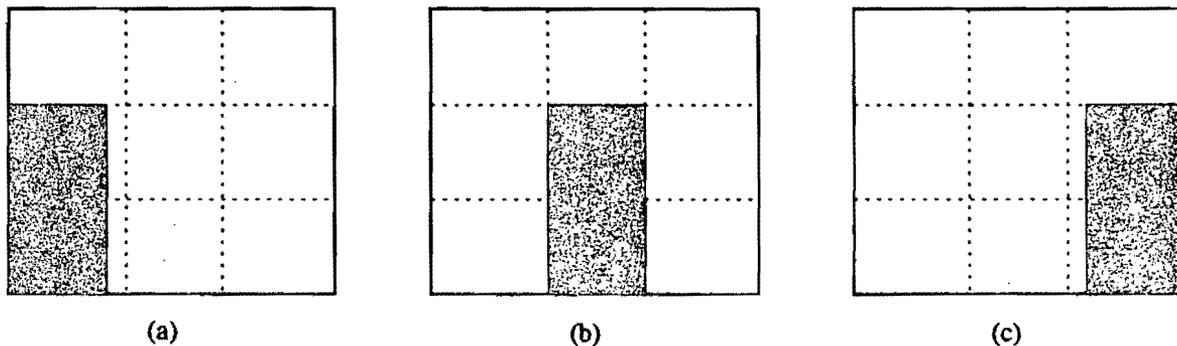


Figura 4.3. Puertas: Izquierda (a), Centrada (b), Derecha (c).

Por lo que respecta al parámetro de la rigidez relativa antes mencionado (ec. 2.2.1), se definieron los casos: a, b, c, d, e, c1, c2, c3, c4, c5 y c6. En los primeros cinco casos se estudió el efecto de la variación de las propiedades geométricas del marco (en particular, el efecto de la variación del valor del momento de inercia de la sección transversal de las columnas) y

manteniendo constantes los demás parámetros. En los casos c1 a c6 se obtuvieron distintos valores de la rigidez relativa haciendo variar las propiedades de los materiales constituyentes del sistema. En la tabla 4.1 se presentan los parámetros que intervienen en la determinación de la rigidez relativa de cada caso.

Tabla 4.1. Determinación del parámetro de rigidez relativa.

Caso	Módulo elástico de la mampostería (kg/cm ²)	Espesor del muro (cm)	Altura del muro (cm)	Módulo elástico del marco (kg/cm ²)	Momento de inercia de la sección de la columna (cm ⁴)	Rigidez relativa
a	43000	15	200	221359	2000833	1.3
b	43000	15	200	221359	1080000	1.52
c	43000	15	200	221359	520833	1.82
d	43000	15	200	221359	213333.33	2.28
e	43000	15	200	221359	67500	3.04
c1	8000	15	200	140000	4218.75	4.48
c2	8000	15	200	221359	4218.75	4.00
c3	12000	15	200	140000	4218.75	4.96
c4	12000	15	200	221359	4218.75	4.43
c5	43000	15	200	140000	4218.75	6.83
c6	43000	15	200	221359	4218.75	6.09

El módulo de elasticidad del marco de 140000 kg/cm² corresponde a un concreto de clase 1 con una f_c de 100 kg/cm². El módulo de 221359 kg/cm² corresponde a un concreto clase 1 con f_c de 250 kg/cm². Ambas definiciones de clase de concreto se adoptaron de lo establecido en las NTCC-87. Los módulos de elasticidad de la mampostería del muro corresponden a los resultados obtenidos por Meli¹⁸ para piezas de barro recocido macizo (tabiques). En la tabla 4.2 se resumen las características de la mampostería utilizadas en el estudio.

Tabla 4.2. Características de la mampostería analizada.

Pieza: Tabique de barro recocido macizo		
Resistencia de la pieza. f _p (kg/cm ²)	Proporcionamiento del mortero	Módulo de elasticidad de la pila E _m (kg/cm ²)
46	1:0:3	8000
69	1:2:9	12000
69	1:0:3	43000

4.2. Resultados.

Con base en los datos antes descritos fue posible realizar alrededor de 600 análisis cuyos resultados fueron representados en forma de gráficas que relacionaran el porcentaje de vacíos del muro con la rigidez lateral del sistema marco-muro. Estas gráficas abarcan el rango de casos

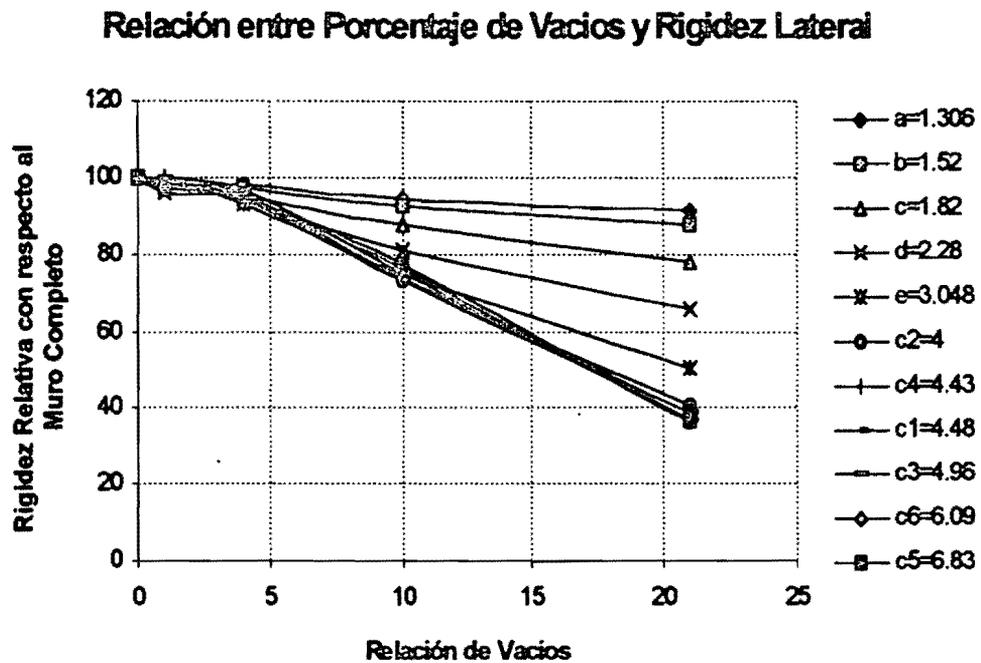


Fig.4.4. Ventana tipo 1, ubicación centrada.

Relación entre Porcentaje de Vacios y Rigidez Lateral

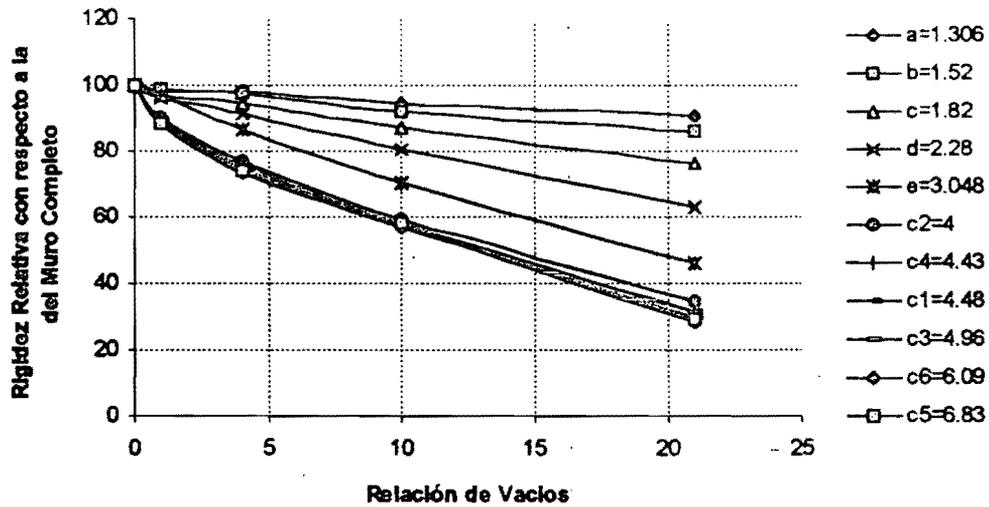


Fig. 4.5. Ventana tipo 1, ubicación izquierda.

Relación entre Porcentaje de Vacios y Rigidez Lateral

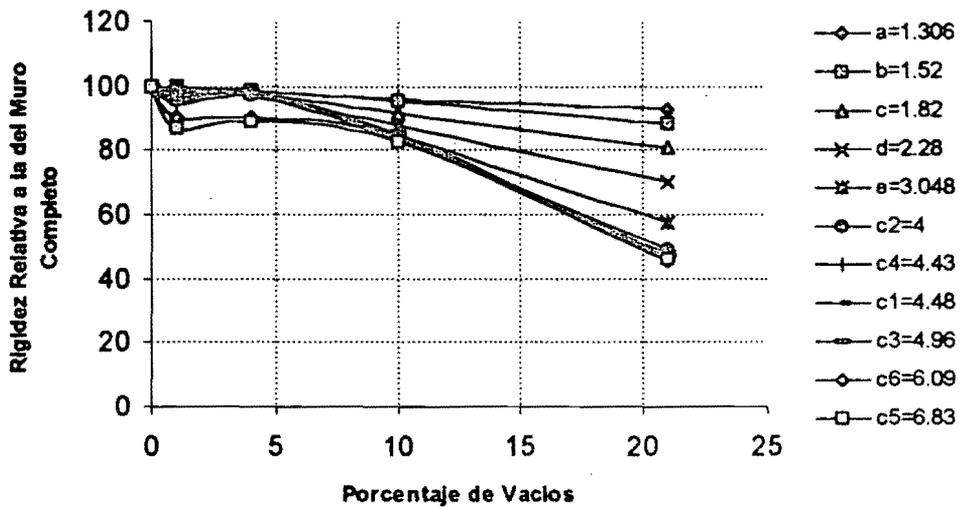


Fig. 4.6. Ventana tipo 1, ubicación derecha.

y tamaños de aberturas estudiados, mismos que se consideraron representativos de las dimensiones de puertas y ventanas que pueden encontrarse comúnmente.

En las figuras anteriores (Figs. 4.4 a 4.6) es posible observar que para las ventanas con ubicación centrada, el efecto de la presencia de las aberturas sobre la rigidez lateral empieza a ser evidente (rigidez lateral entre 10 y 20% menor que la del muro completo) a partir de relaciones de vacíos superiores al 5%, mientras que para la ubicación izquierda el efecto es notorio desde relaciones de vacíos de 1%. En el caso de las aberturas ubicadas del lado derecho del muro, se observa algo similar que para el caso centrado, aunque con distorsiones en la parte de la gráfica correspondiente a las relaciones de vacíos de 1 y 5% (fig. 4.6). Es probable que estas distorsiones tengan su origen en la separación de la interfase muro-marco, que en combinación con ciertas relaciones de vacíos y ubicaciones, den lugar a distribuciones de esfuerzos tales que producen el efecto observado. En general, para el grupo de casos de estudio correspondiente a las ventanas tipo 1, se observa que la rigidez lateral del conjunto puede llegar a ser del 40% de la rigidez que tendría el sistema con el muro completo, al existir aberturas con una relación de vacíos de 20% o superior.

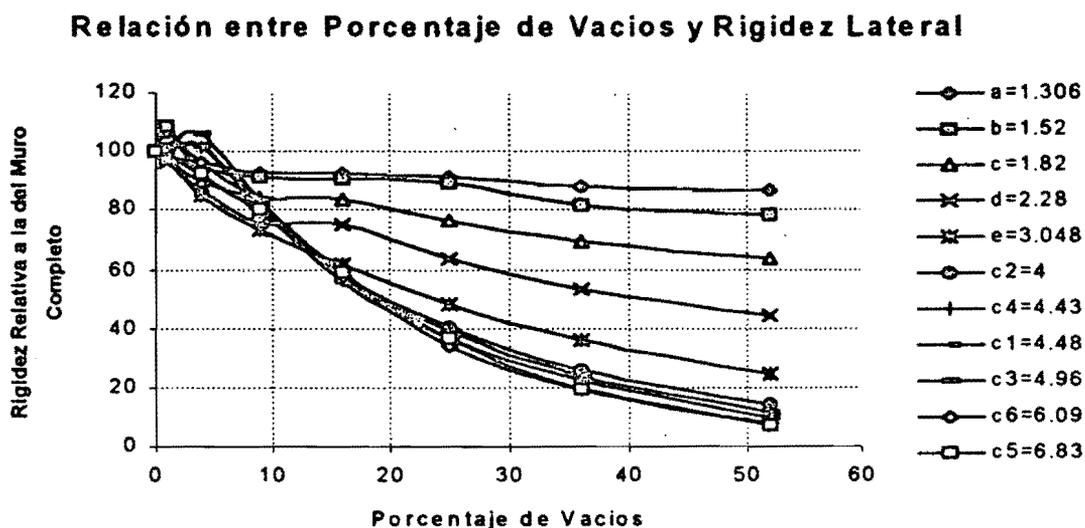


Fig. 4.7. Ventana tipo 2, ubicación centrada.

Relación entre Porcentaje de Vacios y Rigidez Lateral

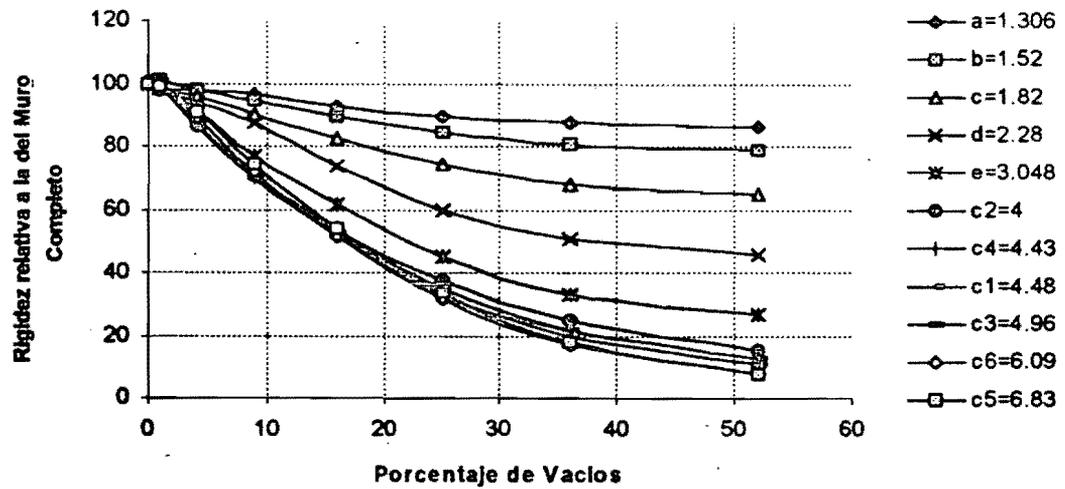


Fig. 4.8. Ventana tipo 2, ubicación izquierda.

Relación entre Porcentaje de Vacios y Rigidez Lateral

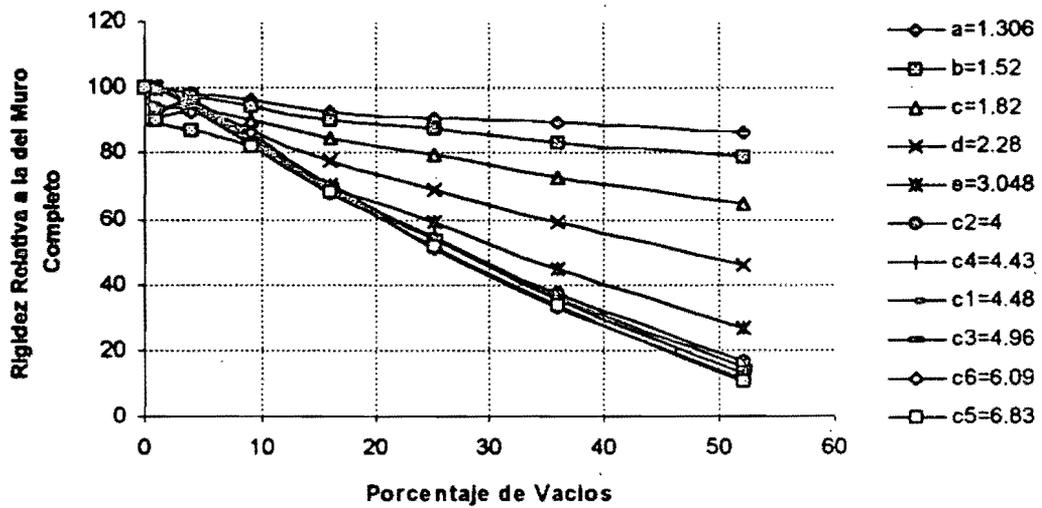


Fig. 4.9. Ventana tipo 2, ubicación derecha.

En el caso de las figuras correspondientes a las ventanas tipo 2 (Figs. 4.7 a 4.9), pueden apreciarse comportamientos muy similares para las tres ubicaciones de las aberturas. En general, la rigidez lateral del conjunto presenta una variación cuadrática con la relación de vacíos, con excepción del caso correspondiente a la ubicación derecha de las aberturas, en el cual la variación resulta ser prácticamente lineal. Cabe hacer notar que para relaciones de vacíos superiores al 50%, y para las rigideces relativas de los casos c1 a c6, la rigidez lateral del conjunto llega a ser menor al 20% de la rigidez con el muro completo, siendo prácticamente despreciable la presencia del muro, lo que coincide con lo reportado por Achyutha *et al*¹⁰. Se observa también que para los casos centrado y derecho se presentan distorsiones en los segmentos de las curvas correspondientes a relaciones de vacíos menores a 10%, lo cual fue comentado con anterioridad (fig. 4.7 y 4.9). Las ventanas tipo 2 representan las configuraciones de ventanas más comunes que pueden ser encontradas en la práctica, y las gráficas obtenidas muestran, en general, un comportamiento bien definido.

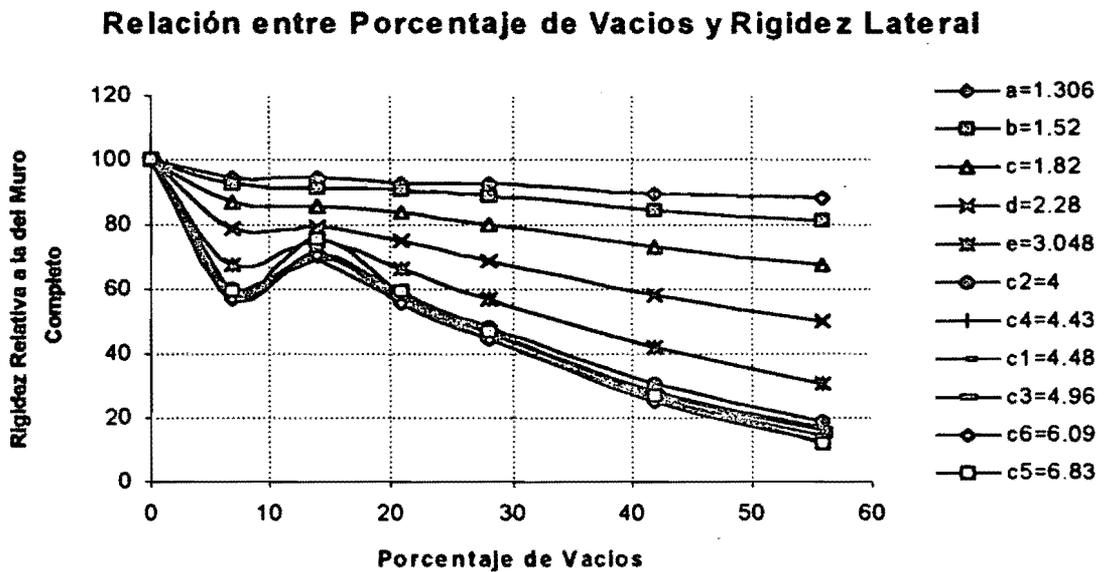


Fig. 4.10. Puerta, ubicación centrada

Relación entre Porcentaje de Vacíos y Rigidez Lateral

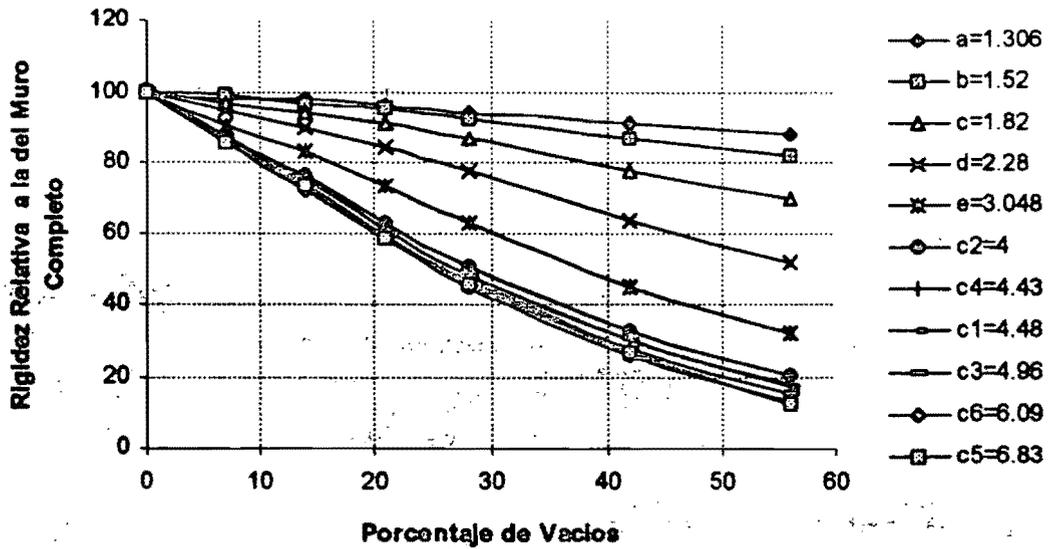


Fig. 4.11. Puerta, ubicación izquierda.

Relación entre Porcentaje de Vacíos y Rigidez Lateral

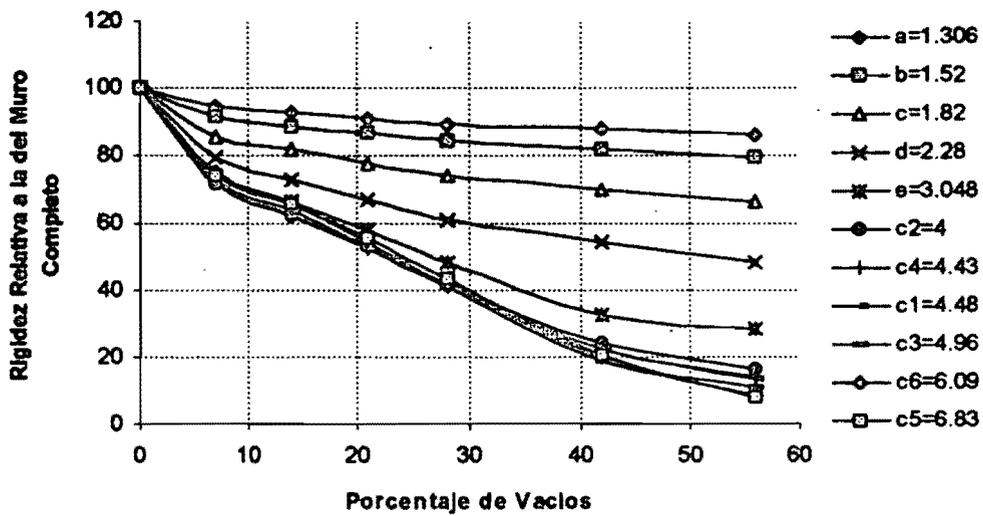


Fig. 4.12. Puerta, ubicación derecha.

En el caso del grupo de aberturas correspondientes a puertas, se observa un comportamiento en general estable, salvo por las gráficas del caso centrado (fig. 4.10), en donde se aprecia una disminución en la rigidez lateral del sistema para una relación de vacíos de 7%. Esta pérdida de rigidez lateral resulta menor para la siguiente relación de vacíos (14%), y a partir de este punto la reducción en la rigidez lateral sigue una tendencia prácticamente lineal. Este comportamiento es común a todos los casos de rigidez relativa marco-muro estudiados en este grupo. Es posible que tenga su origen en la forma en que se distribuyen los esfuerzos en el plano del muro, para esa particular ubicación y dimensión de abertura.

4.3. Comentarios.

Puede observarse en la mayoría de las figuras que las gráficas correspondientes a las rigideces relativas representadas en los casos c1, c2, c3, c4, c5, y c6, en donde se hicieron variar las propiedades de los materiales, tuvieron un comportamiento muy similar. En particular, las gráficas correspondientes a los casos c3 y c4 son prácticamente iguales, teniendo estos casos valores muy aproximados (4.96 y 4.43, respectivamente), lo cual indica el parámetro de rigidez relativa propuesto por Stafford Smith es válido. Las gráficas cambian notablemente su forma cuando el parámetro modificado es el producto EI de las columnas del sistema, donde E es el módulo de elasticidad del material de la columna e I es el momento de inercia de su sección. En otras palabras, el comportamiento del sistema es altamente dependiente del momento de inercia de los elementos confinantes (columnas), o sea, de su rigidez a la flexión.

5. Distribución y Comportamiento de los Esfuerzos Principales.

Las formulaciones que proponen la representación del muro de relleno mediante su sustitución por una diagonal equivalente, algunas de las cuales han sido descritas en 2.2., parten del hecho de que la distribución y dirección de los esfuerzos principales de compresión, en un muro sin aberturas, se asemejan a una diagonal cuyos extremos se ubicaran en esquinas opuestas del plano del muro. En el caso de la aplicación de una carga lateral a un sistema marco-muro como el estudiado en este trabajo, esta diagonal comienza en la esquina superior izquierda del muro y termina en el extremo inferior derecho. El ancho de la diagonal equivalente, en el caso común en que el material del muro de relleno es no lineal, varía con la carga aplicada y las propiedades relativas del muro y del marco³⁹. El ancho de esta diagonal no abarca porciones iguales de la columna y de la trabe en su extremo inicial, como podría pensarse, sino que se extiende desde la junta columna-trabe hacia abajo, una distancia variable conocida como longitud de contacto y mencionada por diversos autores^{3,4,5,17 y 39}. En el otro extremo de la diagonal, el ancho de la misma abarca principalmente una cierta distancia desde la base de la columna derecha. Las longitudes de contacto que se presentan entre el muro y la trabe, que evidentemente también contribuyen a la definición de este "ancho" de la diagonal, son más difíciles de establecer, aunque se ha observado que corresponden aproximadamente la mitad del claro³⁹. En la fig. 5.1 se presenta la distribución de esfuerzos principales de compresión en un muro sin aberturas, donde puede observarse que los esfuerzos de mayor magnitud se concentran en una franja central y parecen "fluir" desde el extremo del muro cercano al punto de aplicación de la carga (esquina superior izquierda), hasta la esquina opuesta del muro, donde se concentran en la parte inferior de la columna derecha. Puede observarse también que los esfuerzos de compresión en las esquinas que no forman parte de la diagonal son prácticamente nulos. Si el marco es lo suficientemente resistente, es posible que se presente una falla por aplastamiento en los extremos del muro, donde se observa concentración de esfuerzos.

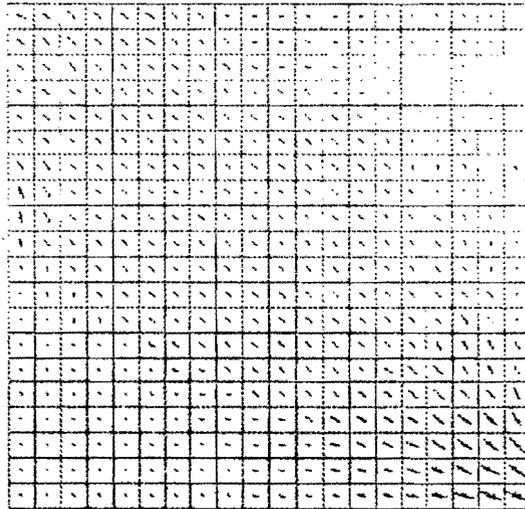


Fig. 5.1. Esfuerzos de compresión en un muro sin aberturas.

Sin embargo, como se ha visto con anterioridad, también es posible que se presente la falla del muro de relleno por agrietamiento, debido a tensión diagonal. Este tipo de falla se manifiesta como un agrietamiento en el muro que sigue aproximadamente la dirección de la diagonal equivalente. Como las grietas se deben a esfuerzos de tensión, la fig. 5.2. nos da una idea de los puntos donde podría iniciarse la formación de la mencionada grieta.

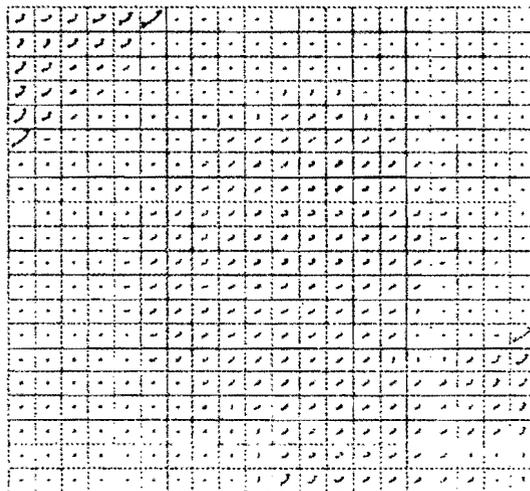


Fig. 5.2. Esfuerzos de tensión en un muro sin aberturas.

Para conocer lo que ocurre con los esfuerzos principales que aparecen en los muros con aberturas, es necesario poder representar gráficamente su distribución y la forma como "fluyen" en el plano del muro. Para esto se seleccionaron diferentes valores del parámetro de rigidez relativa para cada uno de los grupos de casos de estudio descritos con anterioridad, de tal manera que para las ventanas tipo 1 se representaron gráficamente las distribuciones de esfuerzos correspondientes al caso 2, rigidez relativa de 4; para las ventanas tipo 2, se graficaron los esfuerzos correspondientes al caso 5, rigidez relativa igual a 6.83 y para las puertas se graficaron los esfuerzos correspondientes al caso d, rigidez relativa de 2.28. En general, las magnitudes de los esfuerzos varían dependiendo del parámetro de rigidez relativa, sin embargo, se consideró que las distribuciones presentadas son representativas de lo que ocurre en todos los casos, ya que lo que interesa en este momento es ver el efecto de la presencia de los espacios vacíos en la forma en que se distribuyen los esfuerzos. Los mismos parámetros mencionados arriba son utilizados más adelante para la graficación de los elementos mecánicos que se presentan en los elementos del marco. En el Apéndice A se presenta la totalidad de las distribuciones de esfuerzos estudiadas.

5.1. Ventanas tipo 1.

Para las ventanas del tipo 1 centradas, se observó poca distorsión en la distribución de los esfuerzos de compresión para ventanas pequeñas, con respecto a la distribución que se presenta cuando el muro está completo, como se puede observar en la figura 5.1.1. Conforme la abertura se va agrandando, se forman concentraciones de esfuerzos de compresión en esquinas opuestas de la misma (fig. 5.1.2), de manera que el flujo de esfuerzos envuelve al hueco. Los esfuerzos de tensión también se incrementan y se ubican en la esquina inferior derecha de la abertura (fig. 5.1.3). Se puede apreciar que el flujo de los esfuerzos de compresión tiende a pasar por debajo de la abertura, y que también se presentan esfuerzos de compresión mayores en la zona donde el muro hace contacto con la porción inferior de la columna derecha.

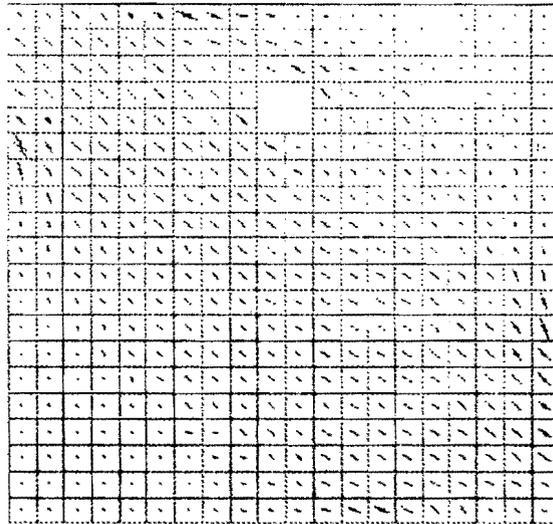


Fig. 5.1.1. Esfuerzos de compresión (1% de vacíos).

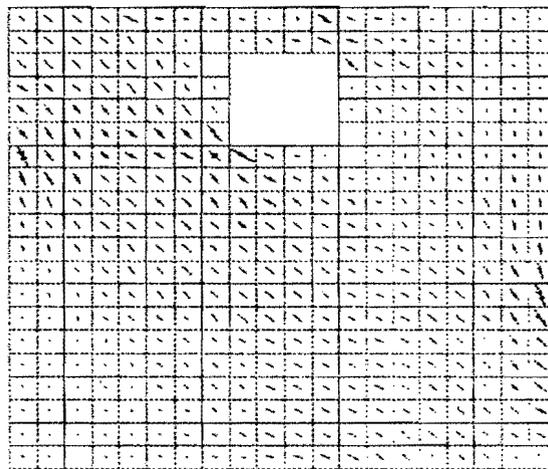


Fig. 5.1.2. Esfuerzos de compresión (4% de vacíos).

Para el caso en que la ventana se ubica del lado izquierdo, el flujo de los esfuerzos de compresión tiende a separarse en dos líneas de flujo principales. La primera, sigue la tendencia observada en el caso de las ventanas centradas, pasando por debajo de la abertura, y la segunda, tiende a pasar por sobre la abertura y luego dirigirse bruscamente hacia abajo, hasta unirse con la primera corriente, para después dirigirse hacia la esquina inferior derecha del

muro. Esto puede observarse en la fig. 5.1.4 y en los casos anteriores, aunque de manera menos evidente.

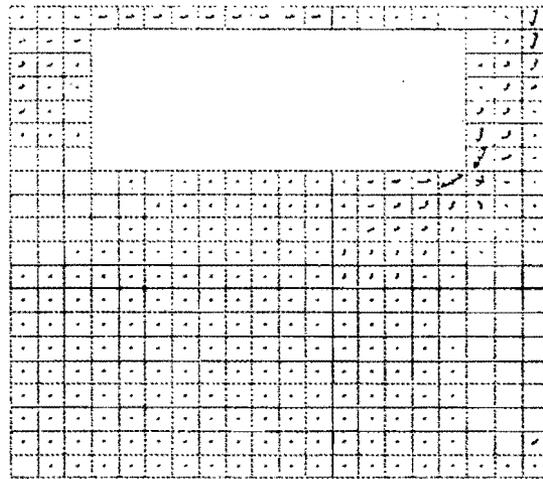


Fig. 5.1.3. Esfuerzos de tensión (21% de vacíos).

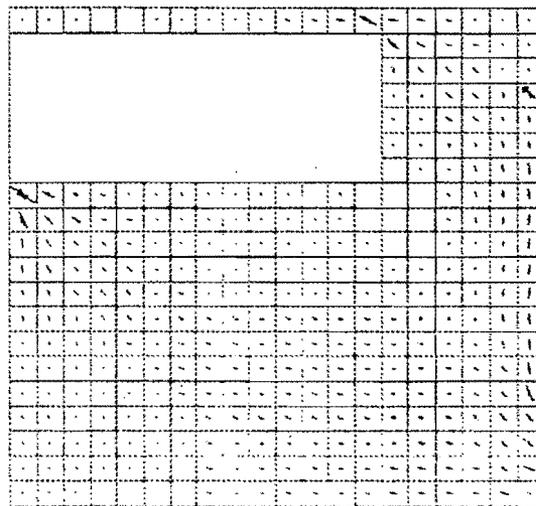


Fig. 5.1.4. Esfuerzos de compresión (21% de vacíos)

Puede observarse que se presentan esfuerzos elevados de compresión en la esquina inferior izquierda de la abertura, así como en la esquina superior derecha de la misma. El lado derecho del muro se encuentra en compresión, y los esfuerzos cambian de dirección al encontrarse las dos líneas de flujo antes mencionadas.

Al situar la abertura en el extremo derecho del muro, el flujo diagonal de esfuerzos de compresión prácticamente no se ve afectado por la presencia de esta, para las aberturas de 1 y 4% de vacíos. Para la abertura de 10% se observa una concentración de esfuerzos de compresión en la esquina inferior izquierda de la ventana. Para la abertura de 21% de vacíos esta concentración de esfuerzos es más notoria y en cierta forma "corta" el flujo de esfuerzos hacia la esquina inferior derecha del muro, donde ahora los esfuerzos de compresión son notoriamente más pequeños. La diagonal de compresión no puede ser inferida tan claramente como en los casos anteriores a partir de esta distribución de esfuerzos, la cual se muestra en la fig. 5.1.5.

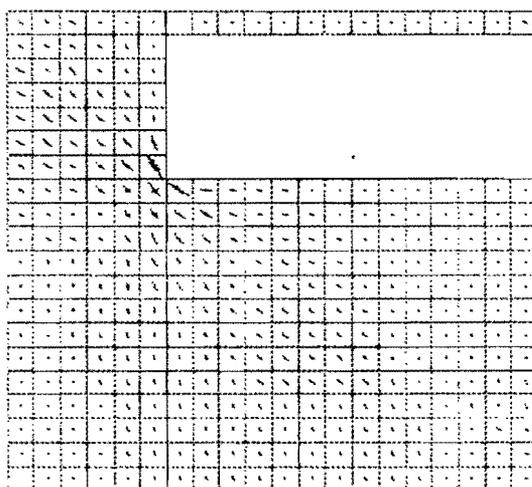


Fig. 5.1.5. Esfuerzos de compresión (21% de vacíos).

5.2. Ventanas tipo 2.

El flujo de esfuerzos de compresión para los casos de ventanas centradas de este grupo se divide pasando alrededor de la abertura, y para porcentajes de vacíos pequeños esta distribución de esfuerzos no parece afectar el flujo con tendencia diagonal (fig. 5.2.1.) Conforme va aumentando la dimensión de la abertura, se generan concentraciones de esfuerzos de compresión en la esquina inferior izquierda de la ventana, que comienzan a cortar el flujo de esfuerzos que se dirigen hacia la esquina inferior derecha del muro (fig. 5.2.2.).

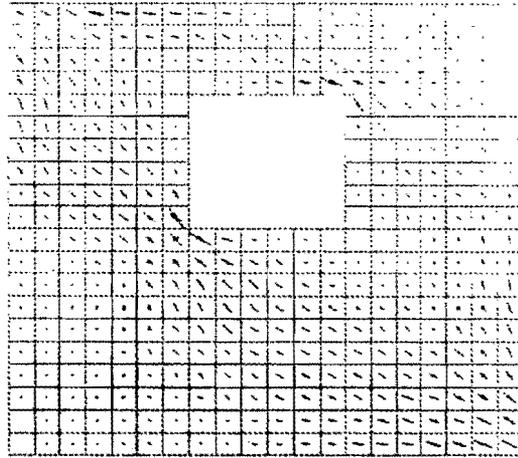


Fig. 5.2.1. Esfuerzos de compresión (9% de vacíos).

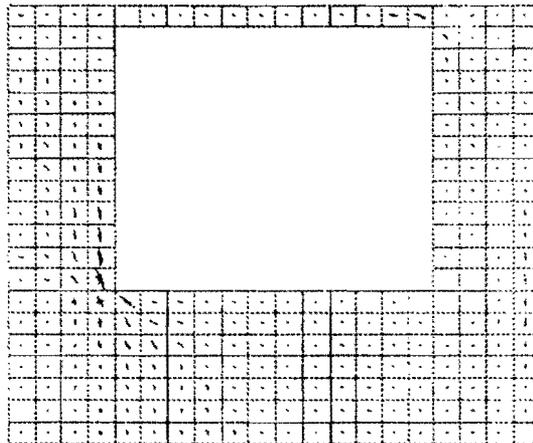


Fig.5.2.2. Esfuerzos de compresión (36% de vacíos)

Al tener la abertura dimensiones mayores al 25% de vacíos, como el caso de la figura 5.2.2, se observa también una concentración de esfuerzos de tensión en la esquina inferior derecha de la ventana, que indica un lugar donde podría empezar a generarse una grieta en la mampostería del muro (fig. 5.2.3).

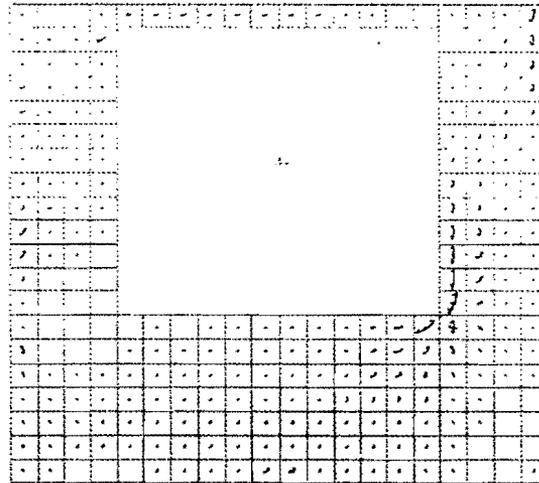


Fig. 5.2.3. Esfuerzos de tensión (36% de vacíos).

Cuando la abertura se sitúa en el extremo izquierdo del muro, los esfuerzos de compresión se distribuyen alrededor de esta, de manera similar a lo que ocurrió con las ventanas tipo 1 izquierdas, reuniéndose los flujos en la parte inferior derecha del muro (fig. 5.2.4). Se observa también que se genera una zona sin esfuerzos de compresión en la esquina inferior derecha del hueco, zona en la que, en cambio, existen elevados esfuerzos de tensión.

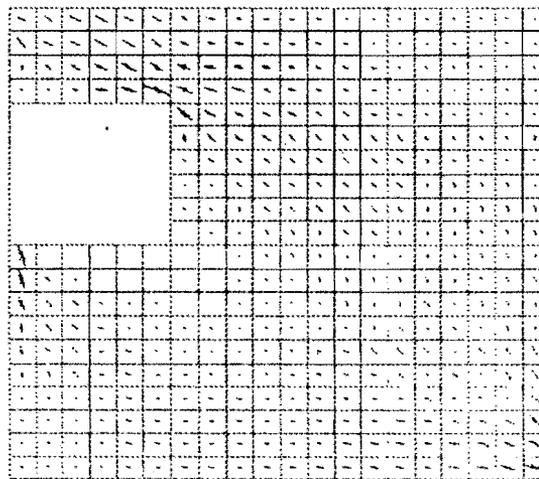


Fig. 5.2.4. Esfuerzos de compresión (9% de vacíos).

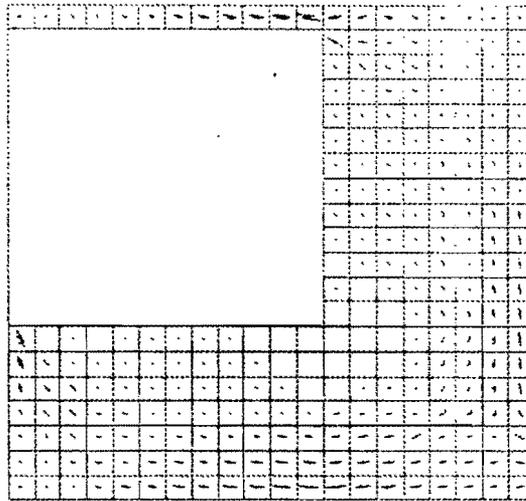


Fig. 5.2.5. Esfuerzos de compresión (36% de vacíos)

Cuando las dimensiones de las ventanas son mayores, el flujo de los esfuerzos de compresión se distorsiona formando un arco en la zona inferior derecha del muro, sin que se pueda definir una trayectoria comparable a la de la diagonal equivalente, es decir, una trayectoria que se dirija hacia el extremo inferior de la columna derecha del sistema y que fluya en el plano del muro siguiendo una trayectoria aproximadamente diagonal (fig. 5.2.5.)

Por otra parte, las ventanas situadas del lado derecho del muro no afectan el flujo diagonal de los esfuerzos de compresión mientras su dimensión sea pequeña, menor a un 20% de vacíos (fig. 5.2.6). Conforme esta dimensión aumenta, se observa una concentración de esfuerzos de compresión en la esquina inferior izquierda de la abertura, la cual interrumpe el flujo de los esfuerzos hacia la esquina inferior derecha del muro (fig. 5.2.7.).

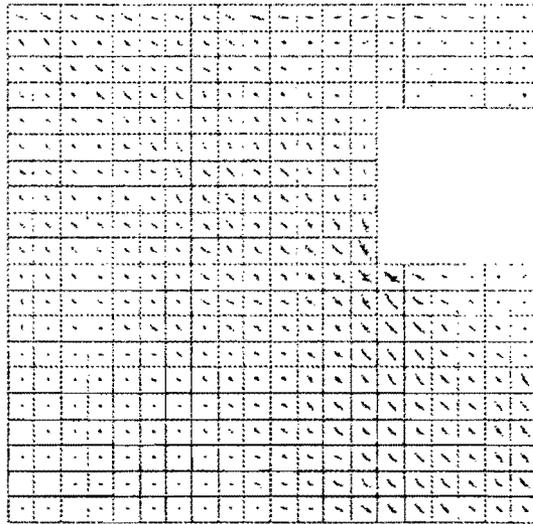


Fig. 5.2.6. Esfuerzos de compresión (9% de vacíos).

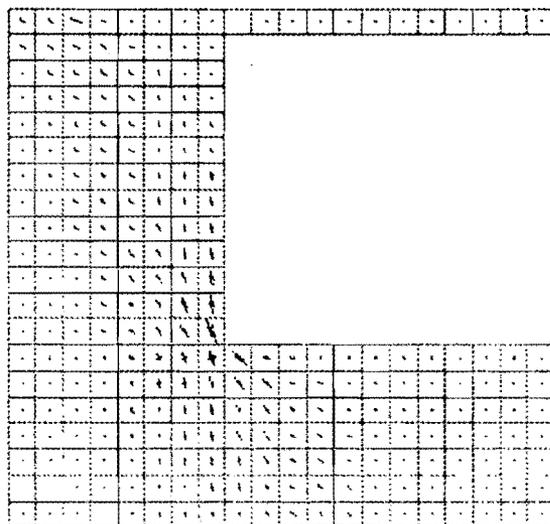


Fig. 5.2.7. Esfuerzos de compresión (36% de vacíos).

En la parte izquierda del muro se generan esfuerzos de tensión en la zona adyacente a la columna izquierda, de tal manera que la porción del muro comprendida entre la columna izquierda y la abertura se comporta como una columna ancha, o como una viga en voladizo (fig. 5.2.8.).

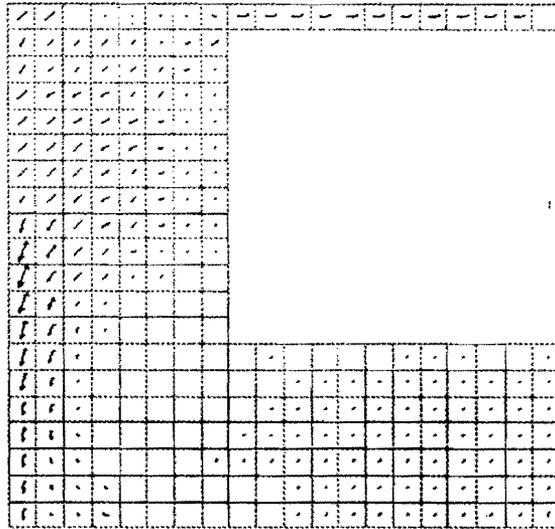


Fig. 5.2.8. Esfuerzos de tensión (36% de vacíos).

5.3. Puertas

El comportamiento de las trayectorias de esfuerzos de compresión para el caso de puertas centradas puede establecerse como formado por dos trayectorias principales, las cuales inician en la esquina superior izquierda del muro, dirigiéndose la primera de ellas hacia abajo y terminando con una notoria concentración de esfuerzos en la esquina inferior izquierda de la abertura de la puerta. La otra trayectoria de esfuerzos pasa sobre la abertura, concentrándose en la esquina superior derecha de la misma, y luego se dirige hacia abajo, sin llegar de manera definida a la esquina inferior derecha del muro, actuando en vez sobre el lado del muro adyacente a la columna derecha, en su altura media, como puede apreciarse en la fig. 5.3.1.

Al ir aumentando el ancho de la abertura, la primera trayectoria de esfuerzos tiende a desaparecer, y la mayor parte de estos se distribuyen por encima de la puerta, concentrándose en su esquina superior derecha. Los esfuerzos que llegan a la parte inferior derecha del muro son pequeños, por lo que no puede definirse una trayectoria diagonal de los esfuerzos. Esto puede observarse en la fig. 5.3.2.

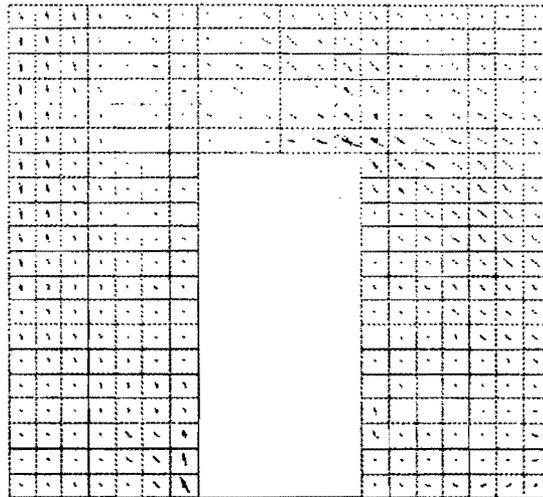


Fig. 5.3.1. Esfuerzos de compresión (21% de vacíos).

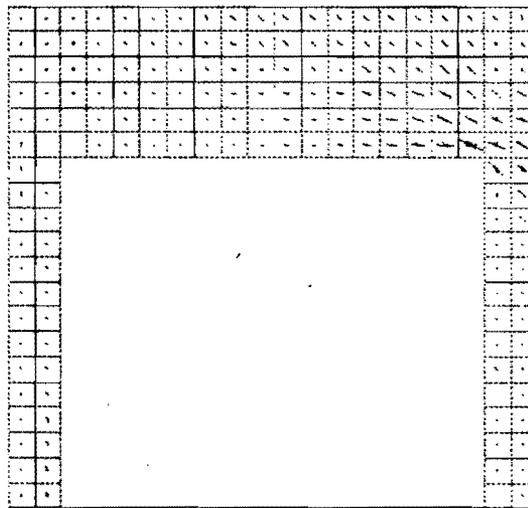


Fig. 5.3.2. Esfuerzos de compresión (56% de vacíos)

Los esfuerzos de tensión mayores se presentan a media altura de la abertura de la puerta y del lado derecho, como se muestra en la fig. 5.3.3. Esto indica la probable formación de grietas en esta zona, y el aparente comportamiento de columna ancha que tienen estas porciones de muro.

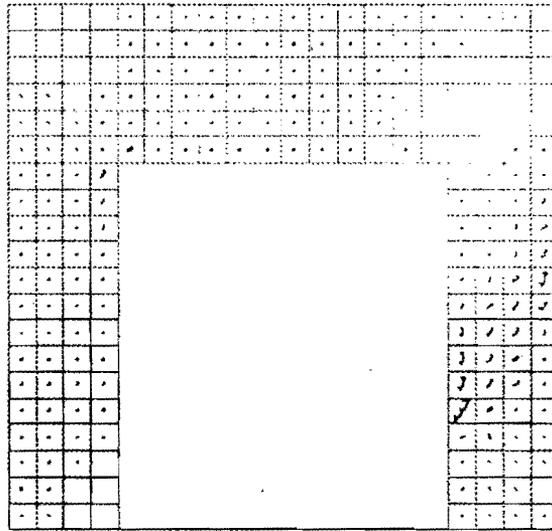


Fig. 5.3.3. Esfuerzos de tensión (42% de vacíos).

Al colocar la abertura de la puerta del lado izquierdo del muro, se observa que la trayectoria de los esfuerzos de compresión sigue la forma diagonal hasta aberturas inferiores a un 20% de vacíos, aunque se presentan concentraciones de esfuerzos en la esquina superior derecha de la abertura (fig.5.3.4.).

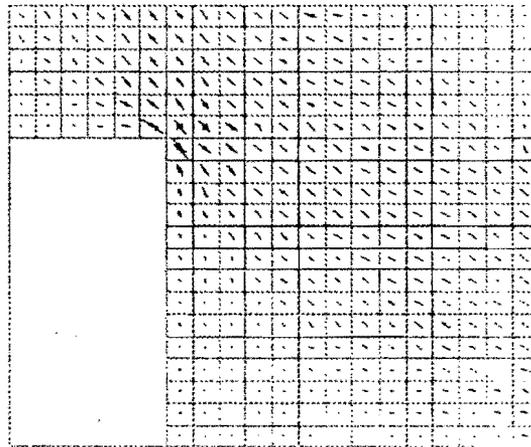


Fig. 5.3.4. Esfuerzos de compresión (21% de vacíos).

Cuando aumenta la dimensión de la abertura se presenta el mismo fenómeno observado con anterioridad en otros casos estudiados; el flujo de esfuerzos es cortado al concentrarse altos

valores de esfuerzos de compresión en la esquina superior derecha de la abertura. La trayectoria de los esfuerzos deja de ser aproximadamente una diagonal, y toda la zona superior derecha del muro se encuentra en compresión. Los esfuerzos que se presentan en la esquina inferior derecha del muro son muy pequeños, como se puede apreciar en la fig. 5.3.5.

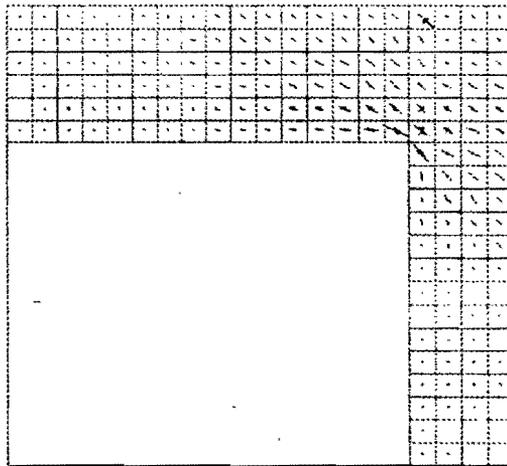


Fig. 5.3.5. Esfuerzos de compresión (56% de vacíos).

Con respecto a los esfuerzos de tensión que se presentan en el muro, no parece haber una zona bien definida en la que se concentren los esfuerzos más elevados, presentándose estos en la zona por encima de la abertura y en la zona adyacente a la columna derecha. La esquina superior derecha del muro está libre de esfuerzos de tensión (fig. 5.3.6.).

Cuando la puerta está situada en el lado derecho del muro, es posible observar que los esfuerzos de compresión siguen dos trayectorias principales. La primera de ellas inicia en la esquina superior izquierda del muro y se dirige hacia abajo, terminando en la esquina inferior izquierda de la abertura, formando lo que podría considerarse una diagonal. La segunda trayectoria de esfuerzos es prácticamente horizontal, paralela a la trabe superior y adyacente a ella, y al llegar al lado derecho del muro baja y termina, con esfuerzos elevados, en la esquina superior derecha de la abertura, como se observa en la fig. 5.3.7.

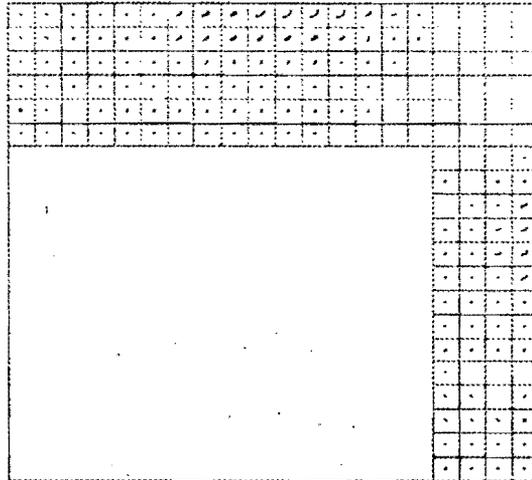


Fig. 5.3.6. Esfuerzos de tensión (56% de vacíos).

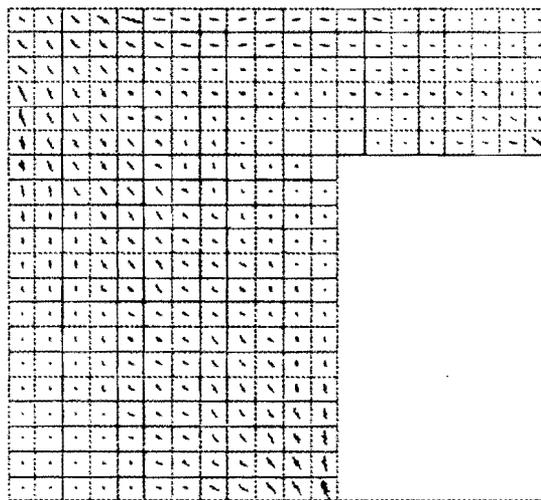


Fig. 5.3.7. Esfuerzos de compresión (28% de vacíos).

Al aumentar lateralmente las dimensiones de la abertura, la primera trayectoria de esfuerzos mencionada no es evidente y el mayor flujo ocurre sobre la abertura, concentrándose nuevamente esfuerzos elevados en la esquina superior derecha de la puerta. Con esta trayectoria de esfuerzos no es posible definir una trayectoria similar a una diagonal, como puede observarse en la fig. 5.3.8.

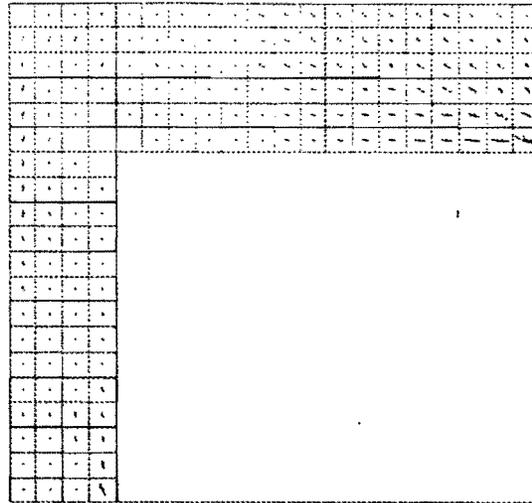


Fig. 5.3.8. Esfuerzos de compresión (56% de vacíos).

Los esfuerzos de tensión más elevados se presentan en la esquina superior izquierda del hueco, sitio donde probablemente se originarían las primeras grietas (fig. 5.3.9.).

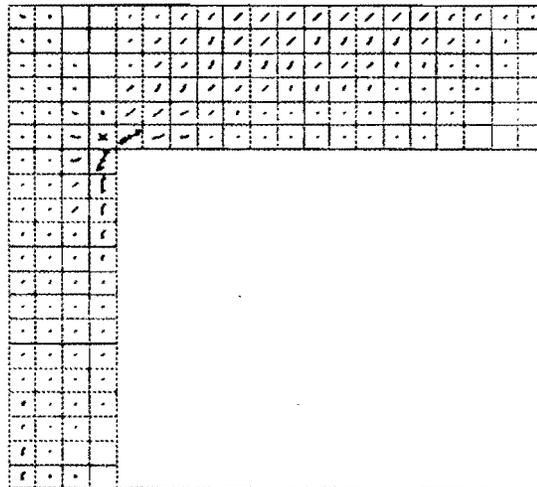


Fig. 5.3.9. Esfuerzos de tensión (56% de vacíos).

5.4 Comentarios.

Como se ha observado en los ejemplos anteriores, existen casos en los que no es posible considerar que la distribución que adoptan los esfuerzos pueda representarse de manera aproximada mediante el empleo de un elemento diagonal equivalente. Por lo general, estos casos corresponden a aberturas que representan porcentajes elevados de vacíos. Por otra parte, la concentración de esfuerzos de tensión y de compresión en las esquinas de los diversos tipos de huecos nos permite afirmar que es necesario reforzar la periferia de los mismos, ya que en general, las mamposterías de uso común en México probadas por Meli tuvieron resistencias a la compresión relativamente bajas, del orden de 30 kg/cm^2 para la mampostería formada por tabiques de barro recocido y mortero con proporcionamiento cemento-cal-polvo 1:0:3²⁹, mientras que en los resultados obtenidos de los análisis realizados en este trabajo se llegaron a obtener magnitudes de esfuerzos del orden de 200 kg/cm^2 , precisamente en las esquinas de las aberturas. En el caso de que el muro de mampostería esté formado por piezas huecas, este

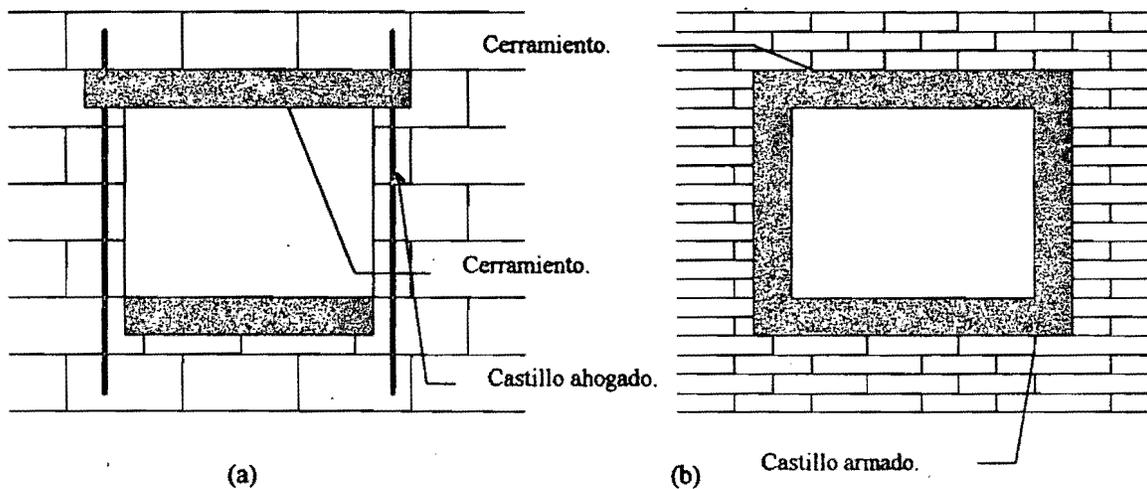


Fig. 5.4.1. Refuerzo perimetral de las aberturas: muro de piezas huecas (a), muro de piezas macizas (b).

refuerzo puede lograrse mediante la inclusión de castillos ahogados a ambos lados del hueco y de cerramientos en la parte superior e inferior (fig. 5.4.1.(a)). Para muros formados por piezas macizas, la sugerencia es considerar la construcción de un marco de concreto que rodee al hueco (fig.5.4.1.(b)).

Las distribuciones de esfuerzos y la interacción entre marco y muro de relleno producen modificaciones en la magnitud y forma de los diagramas de elementos mecánicos de las columnas y la trabe, tema que será tratado en el siguiente capítulo.

6. Efecto sobre los Elementos Mecánicos del Marco.

Los elementos mecánicos que se presentan en las columnas y trabes que están en contacto con el muro, son de magnitudes y distribuciones diferentes de los que se presentan en un marco sin muros de relleno. Esto ocurre debido a la interacción que se presenta entre el muro y el marco confinante y a los fenómenos de separación que se producen en la interfase. Este efecto de los muros de relleno sobre el comportamiento de un marco simple puede provocar la modificación de los mecanismos de falla esperados. Por otra parte, es posible que algunas de las recomendaciones constructivas que regularmente se sugieren en el proceso de diseño, como ubicaciones para corte de barras o traslapes de las mismas, resulten inconvenientes o poco efectivas cuando se toma en cuenta la presencia de muros de relleno. Stafford y Riddington³⁷ desarrollaron un método de diseño a usarse en edificios de acero con muros de relleno de mampostería. En su trabajo se apunta que, de comportarse el sistema real exactamente como lo haría el sistema equivalente con diagonales en lugar de los muros de relleno, donde las reacciones de la diagonal actúan sobre las uniones trabe-columna, no existirían momentos inducidos por los muros sobre el marco. Evidentemente esto no ocurre en la realidad, ya que el muro actúa sobre parte de la longitud de las columnas y de las trabes, modificando los momentos flexionantes y las fuerzas cortantes en ellas. Si consideramos que un marco que contenga a un muro de relleno ve notablemente incrementada su rigidez lateral, incremento que puede ser de entre 8 y 10 veces la rigidez lateral del mismo marco sin muro, esto nos hace pensar que los elementos del marco se flexionarán muy poco, y por consiguiente los momentos que se presenten serán de poca magnitud. Algo similar puede pensarse en el caso de las fuerzas cortantes.

La interacción entre marco y muro es determinante en el estudio de los elementos mecánicos del marco. Liauw y Kwan³⁸ realizaron un estudio mediante un modelo de elementos finitos en el cual consideraron la existencia o no de elementos conectores entre el muro de relleno y el marco. Encontraron que los momentos en el marco eran del doble de magnitud cuando no

existían dichos elementos de unión que cuando estaban presentes. Asimismo encontraron que cuando no se proveía de conectores, se presentaban concentraciones de fuerza cortante cerca de las uniones viga-columna. Estas concentraciones de fuerza cortante pueden provocar deterioro en zonas críticas de la estructura, como lo son las áreas cercanas a las juntas. Aunque los resultados que se presentarán más adelante corresponden al modelo descrito en 3.3, estos coinciden en lo general con lo obtenido por estos investigadores. El modelo estudiado en el presente trabajo no considera ningún tipo de conector en la interfase marco-muro, por considerarse que en la práctica constructiva común en México no se utilizan estos elementos.

6.1. Ventanas tipo 1.

Para los casos de estudio comprendidos en este grupo, fue posible obtener gráficas donde se representan los diagramas de momentos y fuerzas cortantes que se presentan en las columnas y en la trabe que forman el marco del sistema estudiado, así como su modificación debido a la presencia de aberturas con distinto porcentaje de vacíos y diferentes ubicaciones. Se seleccionó un caso de rigidez relativa particular para la elaboración de las gráficas, correspondiendo este al caso 2, es decir, un valor de rigidez relativa de 4. En el Apéndice B se presentan la totalidad de las gráficas obtenidas para todos los casos estudiados.

En la fig. 6.1.1 se presenta una distribución característica de momentos para la columna izquierda del sistema ante la acción de una carga lateral. En la fig. 6.1.2 se presenta la misma gráfica, pero omitiendo la representación correspondiente a los momentos que actúan en la columna cuando no existe muro de relleno. Puede observarse que, para el caso con una ventana centrada, las magnitudes de los momentos son en general menores que los correspondientes al marco solo. La forma de las gráficas se ve modificada conforme el tamaño

de la abertura se va incrementando. En la parte superior de la columna, se observa el efecto del

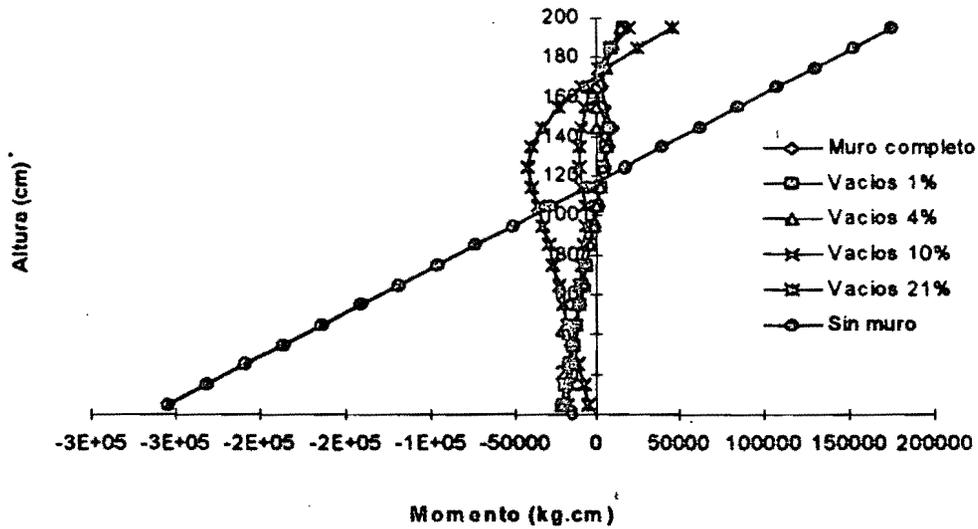


Fig. 6.1.1. Momentos en la columna izquierda, ventana centrada.

contacto existente entre muro y marco, contacto que se ha perdido ya en la parte inferior de la columna, en la zona donde el diagrama de momentos varía de manera prácticamente lineal. Conforme va aumentando el tamaño de la abertura , puede observarse también que la zona de

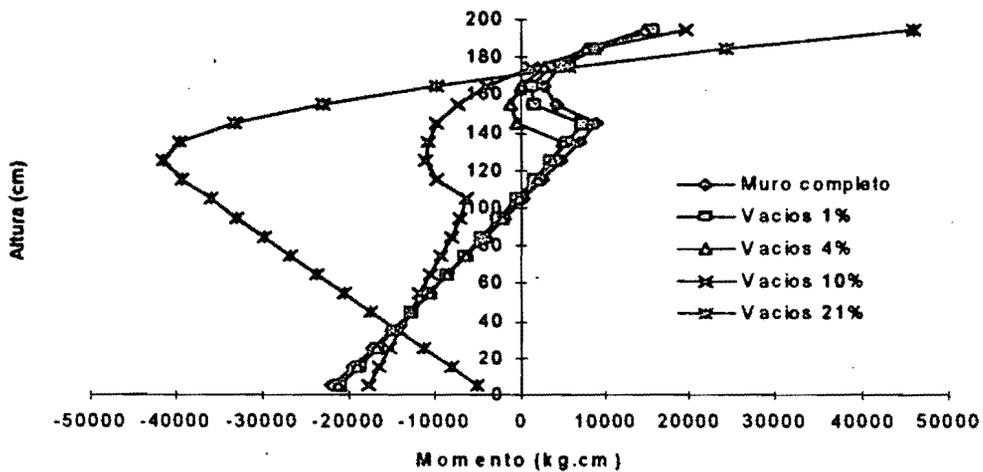


Fig. 6.1.2. Momentos en la columna izquierda, ventana centrada.

contacto va ampliándose, hasta que para la mayor abertura considerada (correspondiente a un 21% de vacíos), la gráfica de momentos se ha distorsionado notablemente.

Cabe señalar que para el caso de la columna derecha las gráficas siguen patrones muy similares, aunque en este caso las distorsiones debidas al contacto marco-muro se presentan en la parte inferior de la columna, como era de esperarse, ya que la distribución de los esfuerzos principales tiende a seguir la dirección de una diagonal que uniera el extremo superior de la columna izquierda con el inferior de la columna derecha. También puede observarse que, al existir muros de relleno, con o sin huecos, los momentos máximos no se presentan necesariamente en los extremos de la columna.

Las fuerzas cortantes sufren un incremento en zonas cercanas al extremo superior de la columna derecha, resultado que, como se comentó con anterioridad, se había observado en investigaciones anteriores³⁵. Sin embargo, la magnitud de estas fuerzas es inferior en general a los cortantes que se presentan al no estar presente el muro de relleno (fig. 6.1.3.)

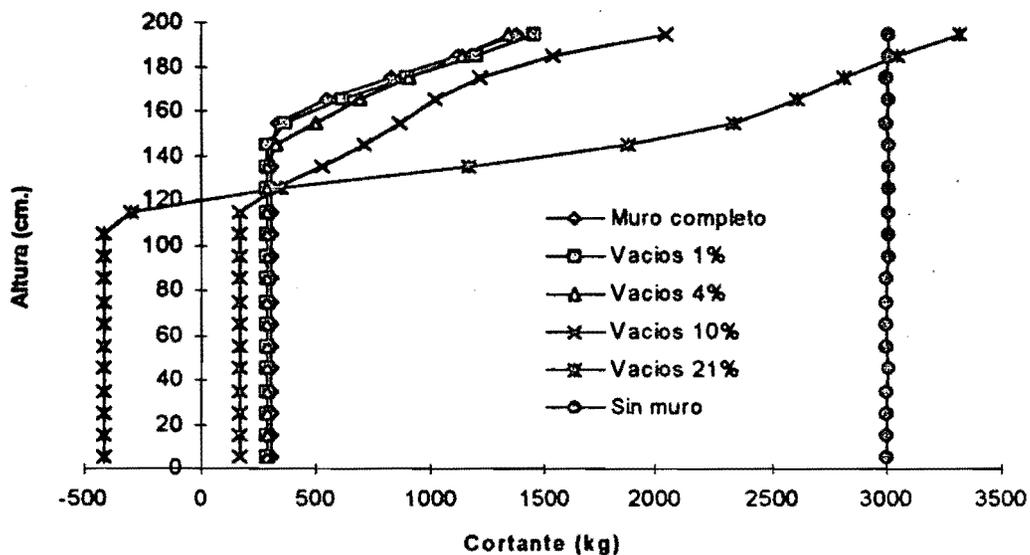


Fig. 6.1.3. Cortante en la columna izquierda, ventana centrada

Para la abertura mayor, se presenta un cambio en el signo del cortante el cual, en el extremo superior de la columna, llega a sobrepasar ligeramente en magnitud al cortante cuando no hay muro presente. Para la columna derecha el comportamiento es muy similar al descrito anteriormente, con las concentraciones de esfuerzos en el extremo inferior de la columna. Por lo que respecta a los elementos mecánicos que se presentan en la trabe superior del marco, sus magnitudes son en lo general inferiores a las que se presentan en el marco simple, pero con la misma forma en el caso de los momentos. En el caso de los cortantes, la configuración varía a lo largo de la trabe. El comportamiento descrito anteriormente es similar a lo observado cuando, para este mismo grupo de casos de estudio, las ventanas son colocadas en el extremo izquierdo del muro, aunque en el caso de los cortantes en la columna derecha, estos se ven notoriamente incrementados superando, para varios porcentajes de vacíos, la magnitud del cortante al no existir muro. La gráfica correspondiente puede observarse en la fig. 6.1.4.

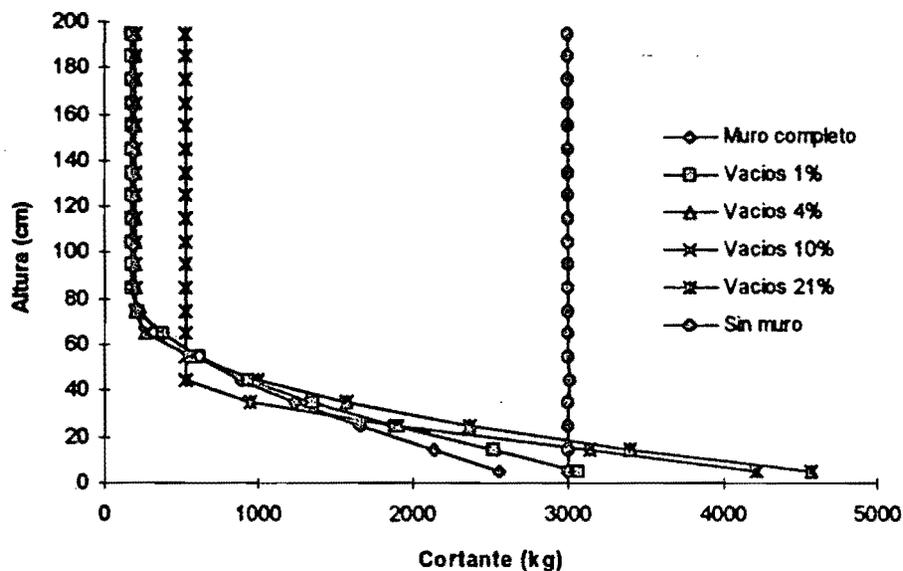


Fig. 6.1.4. Cortantes en la columna derecha, ventana izquierda.

El comportamiento observado para el caso con la ventana ubicada en el lado derecho del muro sigue los mismos patrones aquí descritos.

6.2. Ventanas tipo 2.

En el segundo grupo de casos de estudio se observó que las distorsiones que sufren los diagramas de momentos son más complejas, lo cual indica que la distribución de esfuerzos principales en el muro resulta en una más compleja interacción entre este y el marco. En este grupo se seleccionó un rigidez relativa correspondiente al caso 5, con un valor de 6.83. En la fig. 6. 2.1 se presentan los diagramas de momentos que se presentan en la columna izquierda, comparados contra el diagrama del marco simple. En la fig. 6.2.2. se omite este último diagrama con el fin de poder apreciar mejor el efecto producido por la presencia de las aberturas.

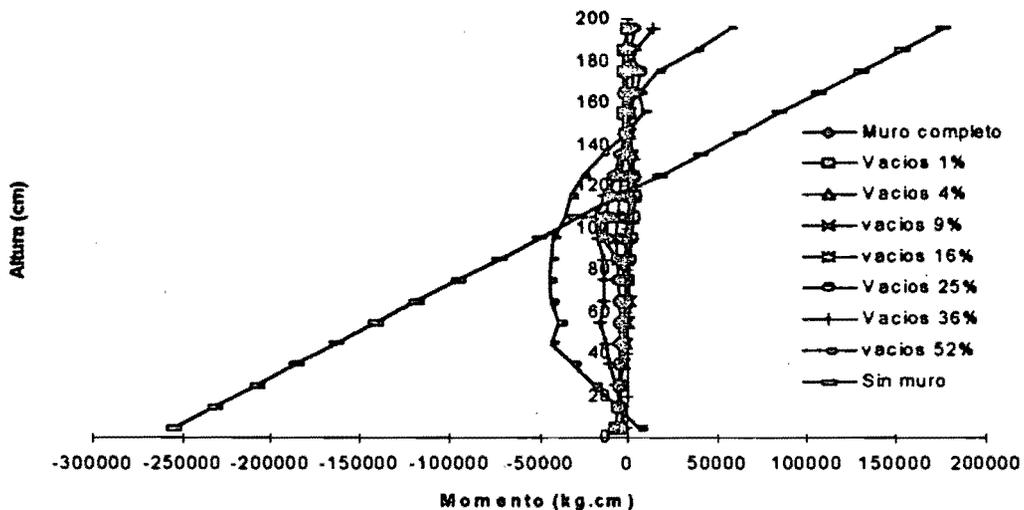


Fig. 6.2.1. Momentos en la columna izquierda, ventana centrada.

En este caso es notorio que, aunque en general las magnitudes de los momentos cuando existe el muro son menores que cuando se considera al marco solo, hay zonas donde el momento cambia de signo. Puede observarse en la fig. 6.2.2. que el diagrama de momentos correspondiente a un porcentaje de vacíos de 52% comienza, cerca de la base de la columna, con un pequeño valor positivo, el cual decrece hasta cambiar de signo y alcanzar un máximo

alrededor de los 80 cm. de altura, para luego crecer nuevamente hasta hacerse cero aproximadamente a 150 cm. de altura, terminado con un valor positivo en el extremo superior de la columna. Esto nos indica una posible flexión en curvatura doble en la columna que, para ciertos casos, puede ser inducida por el muro de relleno.

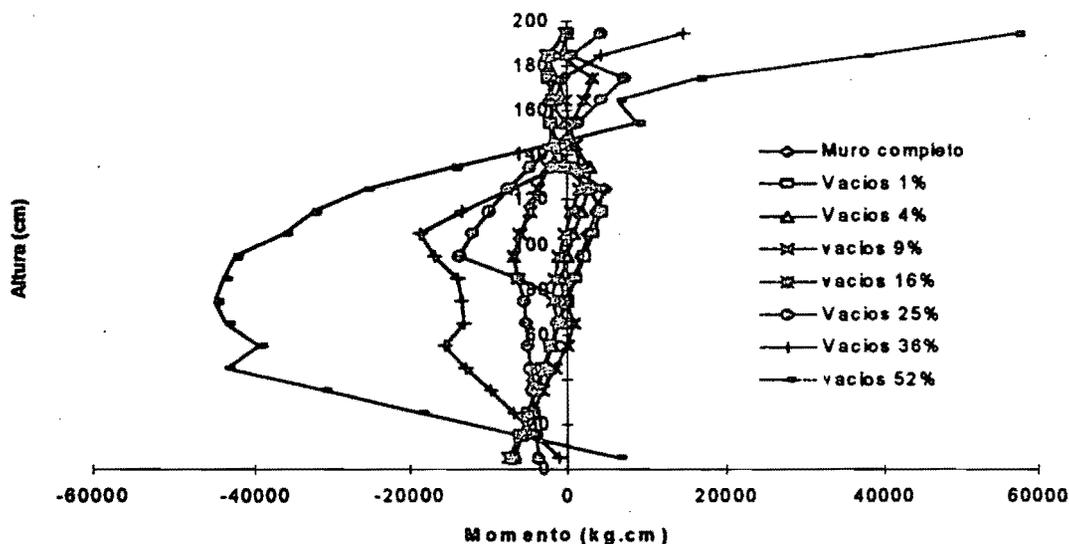


Fig. 6.2.2. Momentos en la columna izquierda, ventana centrada.

Los diagramas de momentos correspondientes a la trabe y a la columna derecha siguen un comportamiento similar al descrito en 6.1. En el caso de los diagramas de fuerza cortante, se observa un marcado cambio de signo del cortante que coincide con la altura del límite inferior de las aberturas correspondientes. Para los casos de aberturas pequeñas, los diagramas de momentos son similares a sus correspondientes en las ventanas tipo 1 centradas (fig. 6.2.3.).

Las mayores distorsiones corresponden a los casos con mayor porcentaje de vacíos, que para este grupo de casos son porcentajes de 36 y 52%. Los diagramas de cortantes correspondientes a la trabe superior muestran también cierta variación, aunque en general las magnitudes se conservan por debajo de las correspondientes al marco solo. En el caso de los diagramas de la columna derecha, estos siguen el mismo patrón que los correspondientes a las ventanas del tipo 1.

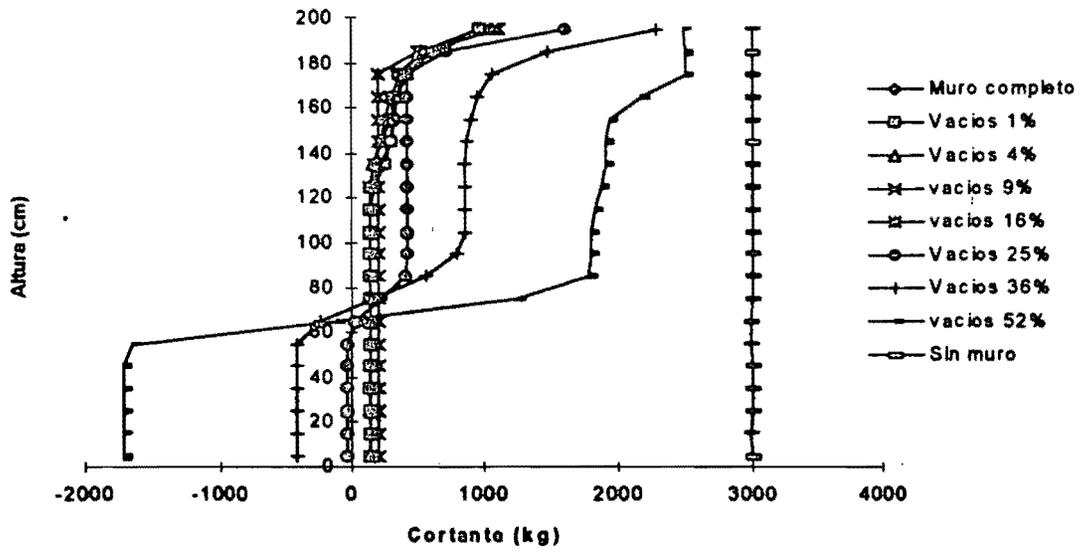


Fig. 6.2.3. Cortantes en la columna izquierda, ventana centrada.

Al considerar las ventanas ubicadas en el extremo izquierdo del muro, se presentan cambios en la configuración de los diagramas de momentos, reduciéndose en el extremo inferior de la columna izquierda hasta valores prácticamente nulos (fig. 6.2.4.).

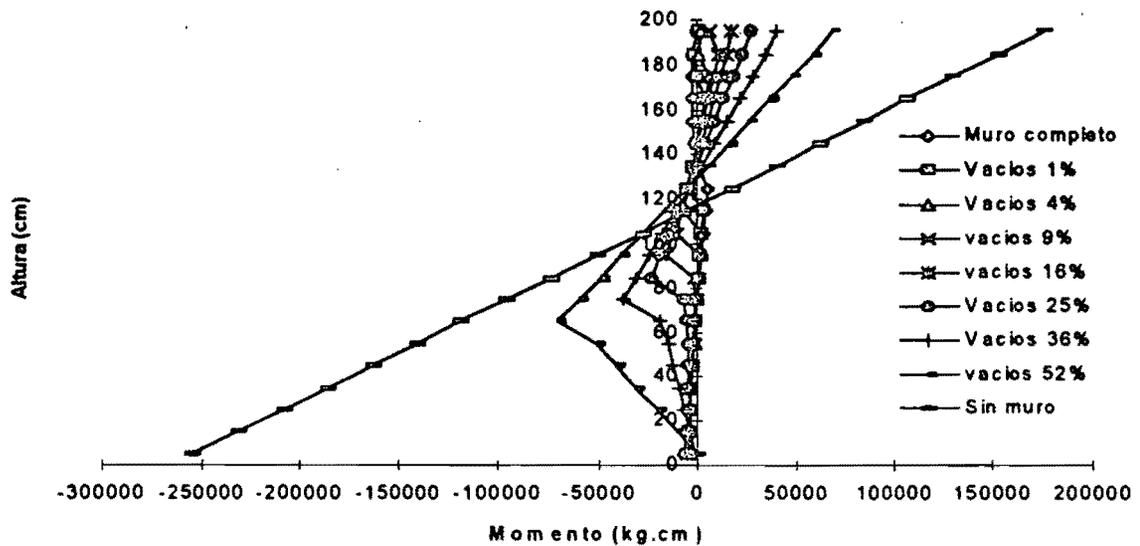


Fig. 6.2.4. Momentos en la columna izquierda, ventana izquierda.

Los momentos en la columna derecha son de magnitudes mucho menores a las correspondientes al marco solo, presentando incrementos en su magnitud en el extremo inferior de dicha columna. Los cortantes siguen en general configuraciones similares a las correspondientes al caso con ventanas centradas, con cambio de signo a media altura en la columna izquierda y concentración de cortante en el extremo inferior de la columna derecha.

En el caso de las ventanas ubicadas en el extremo derecho del muro se observan variaciones interesantes en la configuración de los diagramas de momentos, los cuales se presentan en la fig.6.2.5. En esta figura se ha omitido el diagrama de momentos correspondiente al marco solo, el cual es de magnitud superior a los representados.

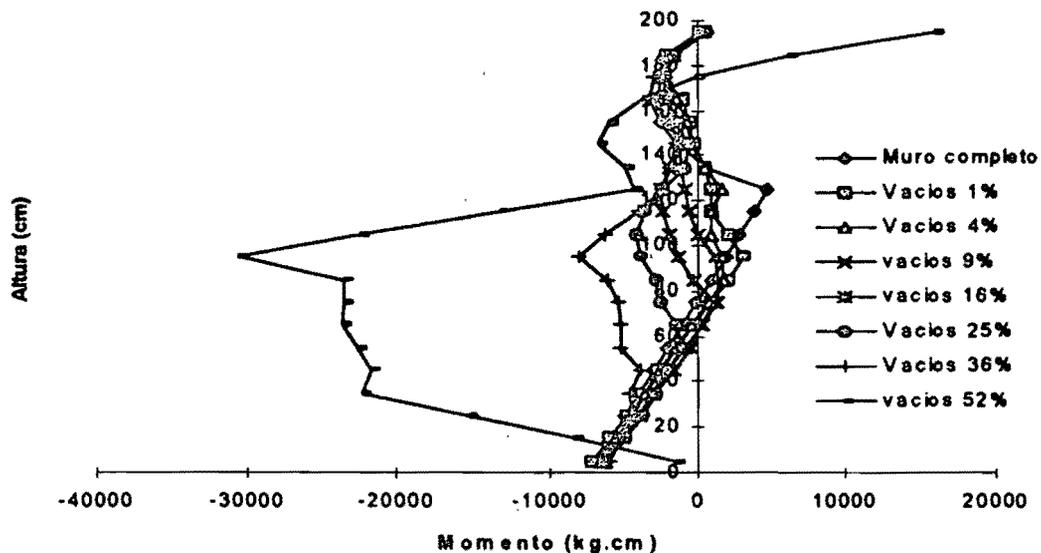


Fig. 6.2.5. Momentos en la columna izquierda, ventana derecha.

Puede apreciarse que se producen variaciones de consideración en la forma de los diagramas de momentos correspondientes a esta columna. Para porcentajes de vacíos de hasta 25%, pueden distinguirse los segmentos de la columna en los que existe contacto entre marco y muro, y los segmentos en los que se ha producido separación en la interfaz. Para porcentajes de vacíos mayores, la forma adoptada por los diagramas sugiere contacto e interacción marco-

muro en toda la longitud de los elementos confinantes. Los restantes diagramas de momentos y cortantes no muestran variaciones tan marcadas.

6.3. Puertas

Para el estudio del grupo de casos correspondientes a diferentes configuraciones de puertas se seleccionó una rigidez relativa entre el marco y el muro de 2.28, correspondiente al caso d. Entre los primeros resultados evidentes, destaca el que las magnitudes de los momentos y cortantes no son muy diferentes de las correspondientes al marco solo, lo cual indica que las columnas y la trabe realizan mayor trabajo cuando las aberturas del muro corresponden a puertas, que cuando corresponden a ventanas. Por otra parte, los diagramas de momentos y de cortantes no sufren de distorsiones tan radicales como las descritas en los casos anteriores. En la fig. 6.3.1. se presentan las gráficas correspondientes a momentos en la columna izquierda.

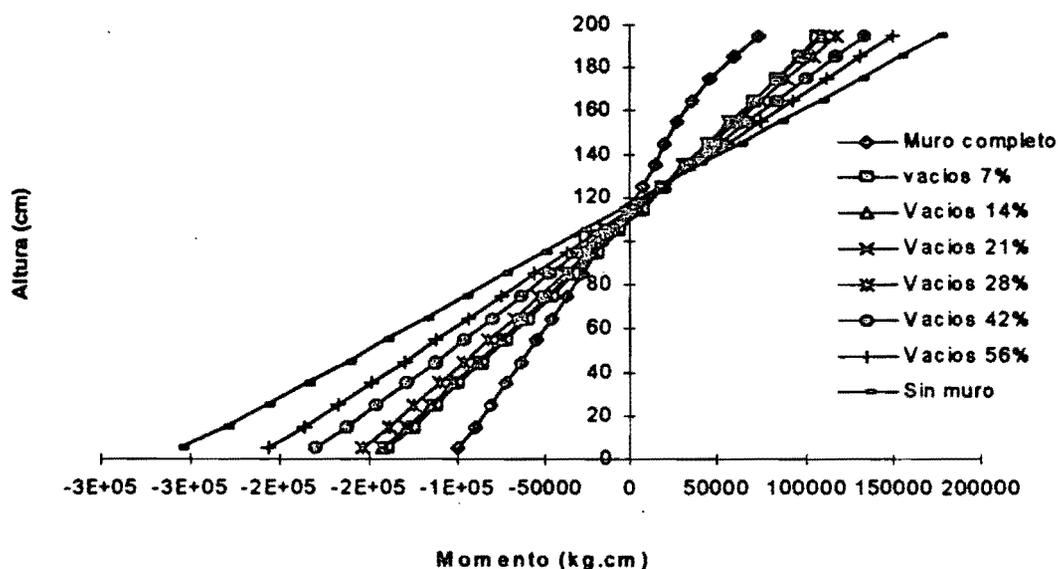


Fig. 6.3.1. Momentos en la columna izquierda, puerta centrada.

En el caso de las puertas, el efecto de la presencia de los muros parece ser más evidente en la segunda columna, la columna derecha. El diagrama de fuerzas cortantes para el caso de puerta

centrada se presenta en la fig. 6.3.2. Es evidente una gran variación en la forma de los diagramas de fuerzas cortantes, y las magnitudes de las mismas son cercanas a las del marco sin muro, e incluso ligeramente superadas en los casos correspondientes a 7 y 56% de vacíos. En este caso, los diagramas de cortantes correspondientes a la columna izquierda no presentan mucha variación en su forma, aunque sí en sus magnitudes.

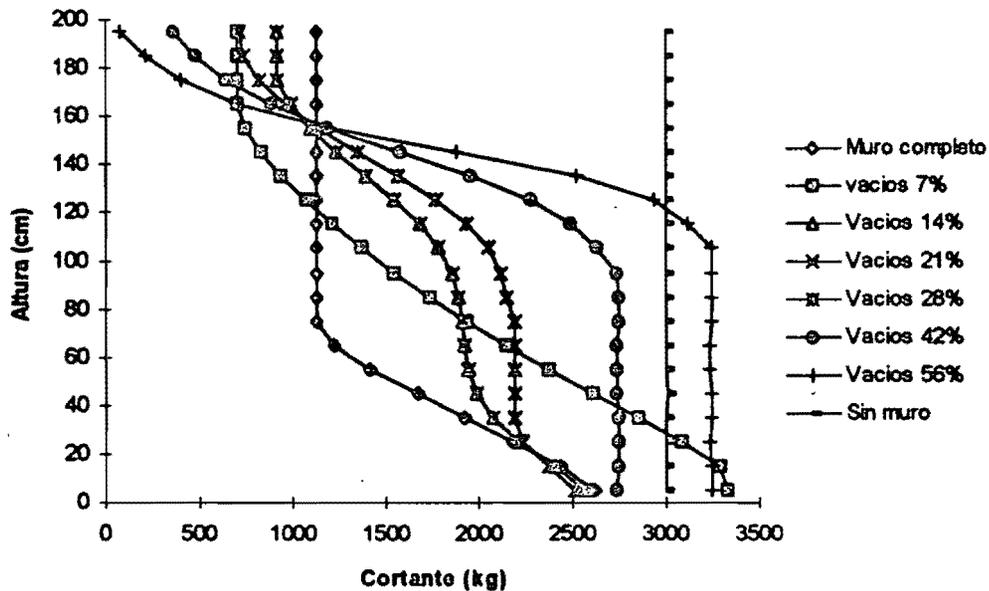


Fig. 6.3.2. Cortantes en la columna derecha, puerta centrada.

Al ubicar las aberturas en el lado izquierdo del muro, el comportamiento observado en los diagramas de momentos no difiere del correspondiente a las puertas centradas, y persiste la marcada evidencia de interacción marco-muro en la columna derecha por sobre la izquierda, como se puede apreciar en la fig. 6.3.3.

Por otra parte, los efectos de la presencia de muros con puertas modifican los diagramas de fuerza cortante de la trabe superior, aunque por lo general sin cambios de signo y con magnitudes menores a las correspondientes al marco solo, con excepción, en este caso, de los cortantes en el extremo izquierdo de la trabe y de el cambio de signo en el extremo opuesto.

Esto puede observarse en la fig. 6.3.4., correspondiente a puertas ubicadas del lado izquierdo del muro de relleno.

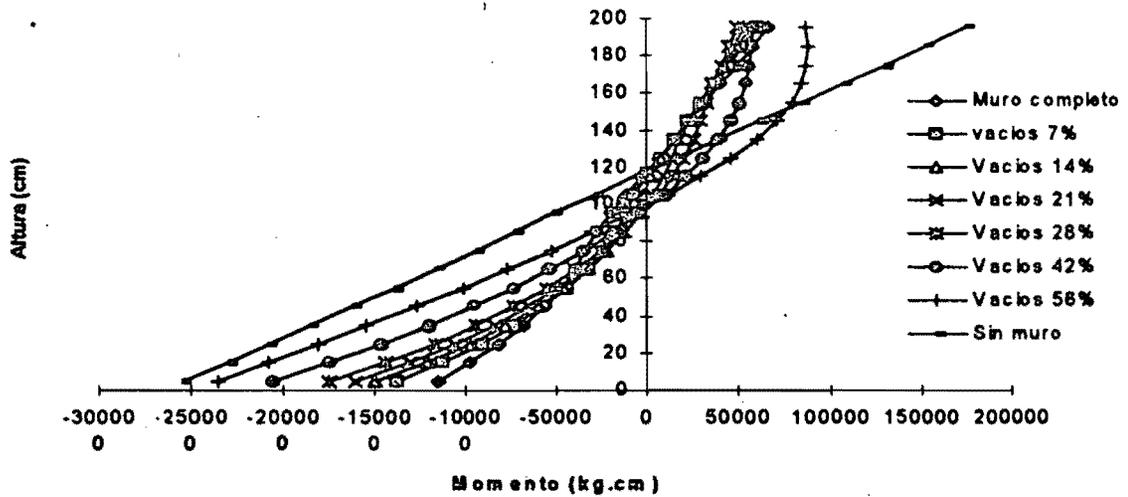


Fig. 6.3.3. Momentos en la columna derecha, puerta izquierda.

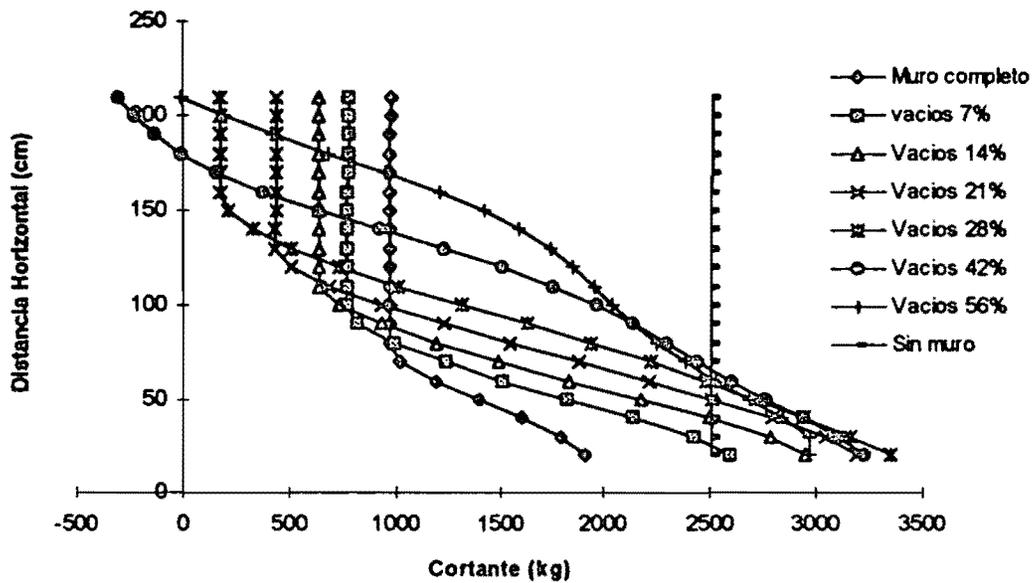


Fig. 6.3.4. Cortante en la trabe superior, puerta izquierda.

Los casos correspondientes a puertas situadas en el lado derecho del muro siguieron también patrones similares a los descritos con anterioridad en esta sección. En particular, se observaron variaciones notorias en la forma de los diagramas de fuerzas cortantes para la columna derecha, y para ciertos porcentajes de vacíos, como se muestra en la fig. 6.3.5.

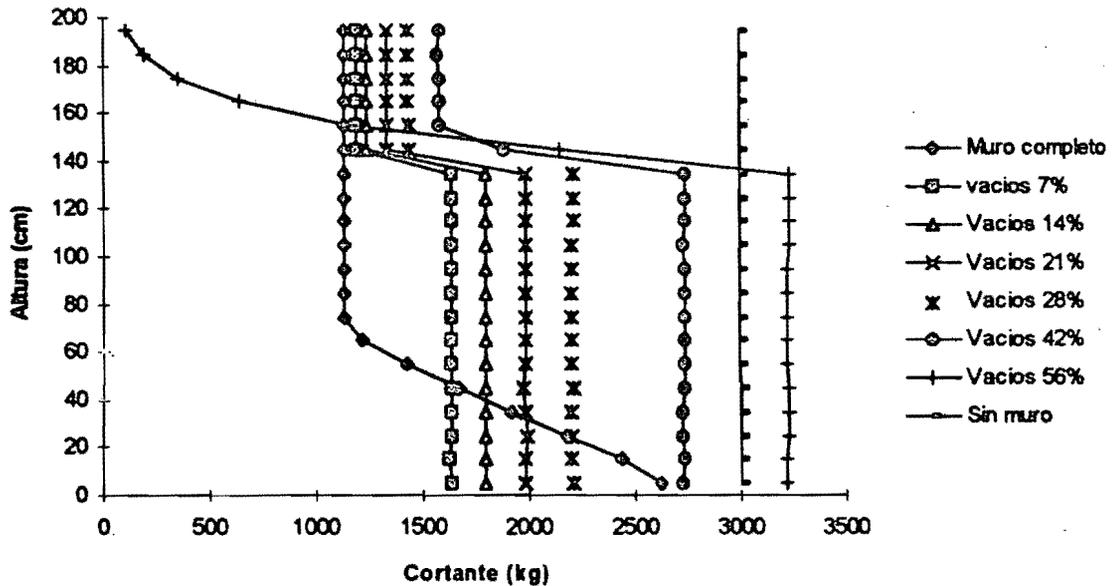


Fig. 6.3.5. Cortantes en la columna derecha, puerta derecha.

6.4. Comentarios.

De los resultados aquí expuestos puede hacerse notar que, aunque algunos de los efectos que se presentan en los elementos mecánicos de las columnas pudieran ser reproducidos mediante el empleo de una o varias diagonales equivalentes, o de diagonales con elementos rígidos en sus extremos, esto solo podría ser aplicado a algunos casos particulares de aberturas. Por otra parte, la implementación de estos recursos en un programa de análisis no lineal de edificios seguramente sería poco práctica, ya que implicaría la definición de numerosos parámetros para cada caso distinto de muro de relleno que se presentara.

En la figura 6.4.1. se han representado los diagramas de momentos obtenidos de la aplicación de la misma carga lateral, en dos direcciones. Los diagramas corresponden a la columna izquierda, y la clase de abertura corresponde a las ventanas tipo 2, caso centrado.

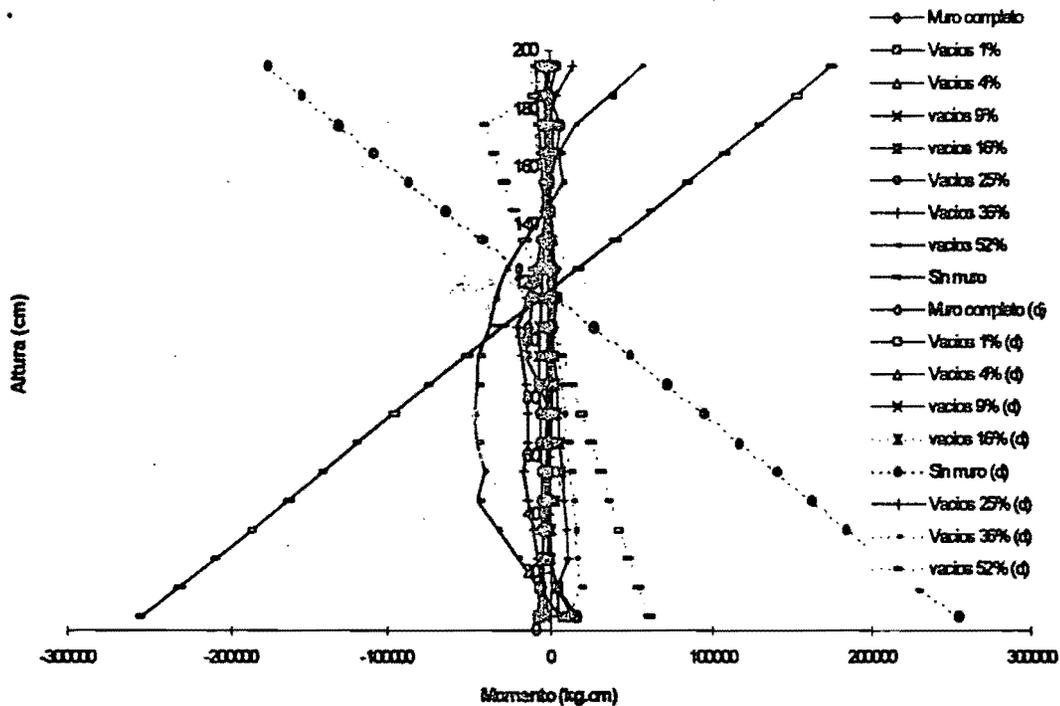


Fig. 6.4.1. Diagramas de momentos de la columna izquierda, ante carga en dos direcciones. Ventana centrada.

En la figura anterior puede observarse que, en general, las magnitudes de los momentos que se presentan en la columna se conservan dentro del rango definido por las gráficas correspondientes a los momentos cuando no existe la presencia de muros, lo cual nos indica que el no considerar la presencia de los muros en el análisis, y después incluirlos en la estructura real, podría dar por resultado un diseño del lado de la seguridad. Sin embargo, la variación de los momentos de algunos de los casos estudiados da lugar a zonas en las que, para el caso sin muros, no se esperarían magnitudes considerables de momento. En la figura 6.4.2 y 6.4.3 se presentan gráficas similares a la anterior, correspondientes al caso de ventana izquierda tipo 2 y al de puerta centrada, respectivamente. Por otra parte, esto no ocurre con las fuerzas cortantes, como puede observarse en las figuras 6.3.4 y 6.3.5, en donde la presencia de

los muros produce cortantes incidentes en las columnas de magnitudes superiores a las que se obtendrían de considerar al marco solo.

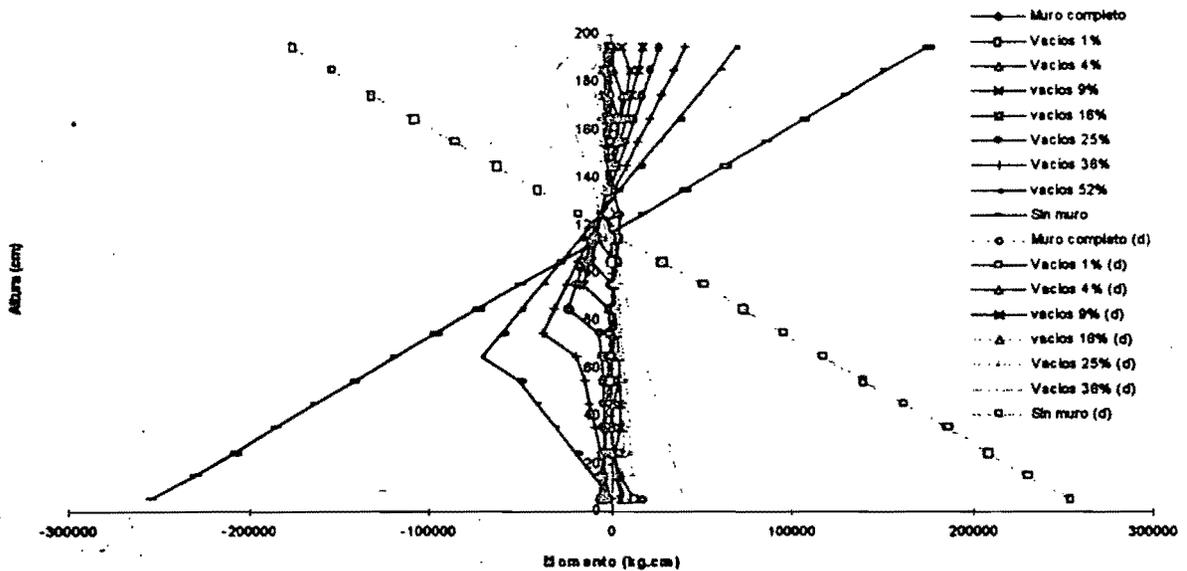


Fig. 6.4.2. Diagramas de momentos de la columna izquierda, ante carga en dos direcciones.
Ventana izquierda.

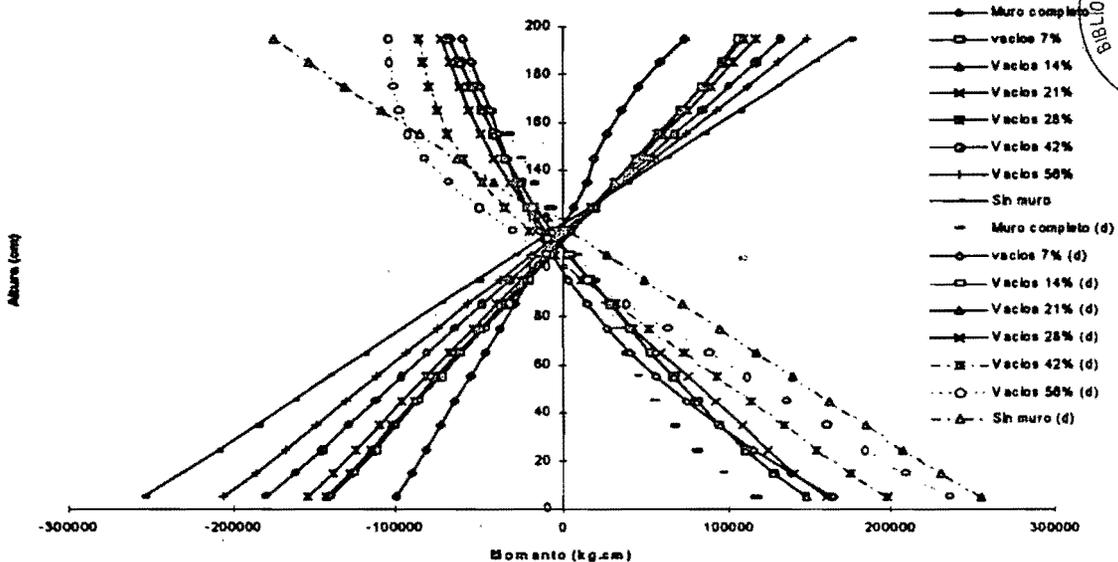


Fig. 6.4.3. Diagramas de momentos de la columna izquierda, ante carga en dos direcciones. Puerta centrada.

Estos resultados nos indican que, para la mayoría de los casos prácticos, la presencia de muros de relleno reduce de manera significativa las magnitudes de los momentos que se presentan en

los elementos estructurales confinantes. Sin embargo, sus variaciones pueden tener como consecuencia que se realicen cortes o traslapes de las barras del acero de refuerzo en lugares en donde se presenten momentos flexionantes de magnitud considerable, momentos que no se presentan cuando no se considera la presencia de los muros. Además, como se señaló con anterioridad, es posible que se presenten fuerzas cortantes superiores a las calculadas en un diseño en el que no se haya considerado la presencia de muros, lo cual puede producir deterioro en puntos críticos de la estructura, como lo son las uniones viga-columna.

Por otra parte, en los edificios de pocos niveles es común la construcción y eliminación de los muros de relleno de manera frecuente, con el fin de adecuar el inmueble a los diversos usos y necesidades que se presenten durante su vida útil. Como se ha visto, la presencia o ausencia de muros de relleno puede resultar en que un mismo elemento estructural, trabe o columna, se vea sometido a solicitaciones diferentes de aquellas para las cuales fue diseñado. Existe, por lo tanto, el riesgo latente de que una estructura sea diseñada considerando la presencia de muros de relleno, con el fin de reducir costos al disminuir secciones y cantidades de acero de refuerzo, y que durante su vida útil sufra modificaciones, como la eliminación de muros, que la lleven a situaciones que pongan en riesgo su seguridad y funcionalidad.

7. Modelos No Lineales.

La presencia de grietas en los muros de mampostería, así como el posible deslizamiento de las piezas a lo largo de las juntas de mortero, son la más importante fuente de no linealidad de los sistemas muro-marco, como determinó Mosalam⁴⁰. El-Haddad⁴¹ estudió los fenómenos de separación y de agrietamiento que se presentan en marcos con muros de relleno mediante el empleo del método de los elementos finitos y técnicas de la mecánica de la fractura. Existen programas de cómputo de elemento finito no lineal, que permiten predecir los patrones de agrietamiento que se presentan en los materiales. Se consideró adecuado construir, con el fin de ejemplificar el potencial de los programas de análisis no lineal, unos modelos simples que representaran a muros de mampostería sometidos a compresión diagonal, de manera similar a las pruebas de especímenes realizadas por Meli²⁹ y a las que se ha hecho referencia con anterioridad. Estos modelos se realizaron con el programa SBETA⁴², programa de elemento finito no lineal. En la figura 7.1 se presenta un modelo de muro de mampostería discretizado en 400 elementos finitos.

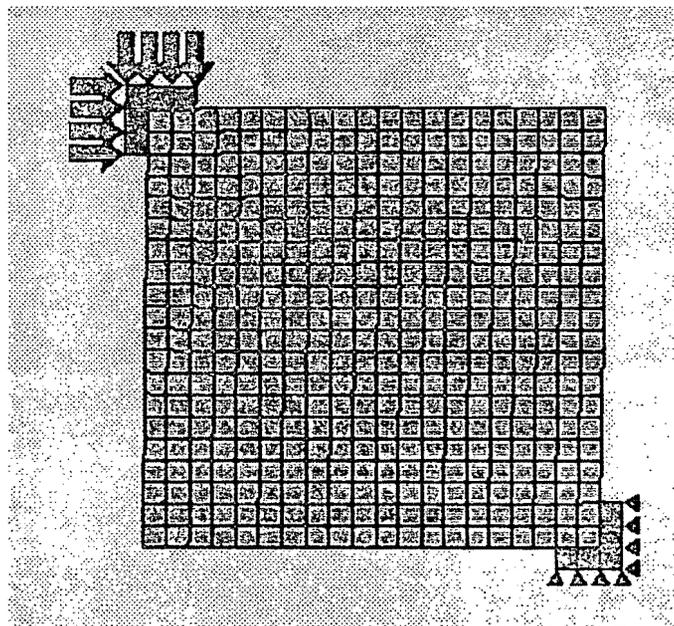


Fig. 7.1. Modelo de elementos finitos del programa SBETA.

Las restricciones del modelo están representadas por medio de triángulos ubicados en la esquina inferior derecha del muro. La carga es aplicada a través de elementos con propiedades similares a las del acero, los cuales están dispuestos en forma de ángulo. Esta carga se aplica en 8 puntos, como se muestra en la figura, a fin de lograr representar una carga aplicada en forma diagonal. Las propiedades asignadas al modelo son similares a las utilizadas para la mampostería en los análisis realizados con el DIRT II³⁶. Al aplicar la carga, el programa permite definir los posibles patrones de agrietamiento que seguirán las grietas, comenzando éstas por lo general en la parte central del modelo, lo que coincide con lo observado en pruebas experimentales (fig. 7.2).

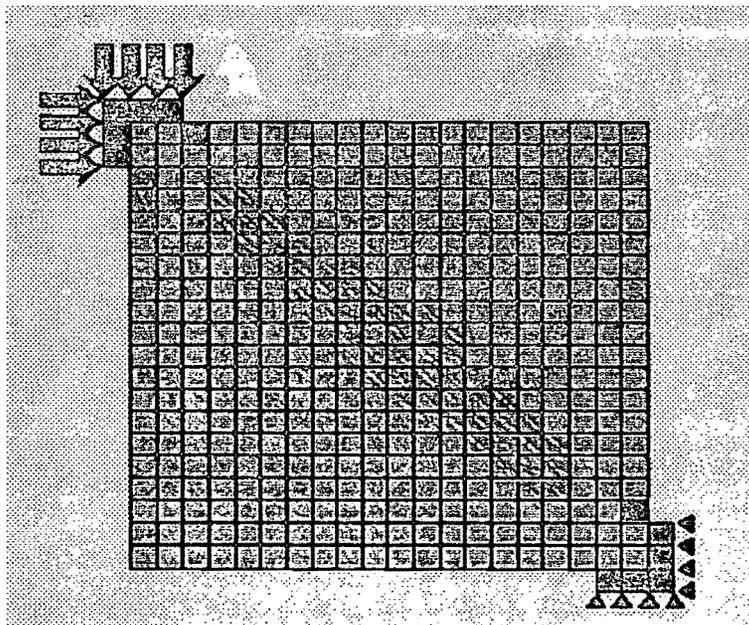


Fig. 7.2. Patrones de agrietamiento generados por el programa SBETA.

Los elementos que aparecen en color negro representan zonas donde se ha producido aplastamiento del material, es decir, los esfuerzos de compresión han tenido magnitudes por encima del esfuerzo resistente del mismo. Conforme la carga va aumentando, se comienza a generalizar el deterioro del material, aumentando la extensión de las grietas y el aplastamiento de las regiones cercanas a la zona de aplicación de la carga y a la zona restringida, como se observa en la fig. 7.3.

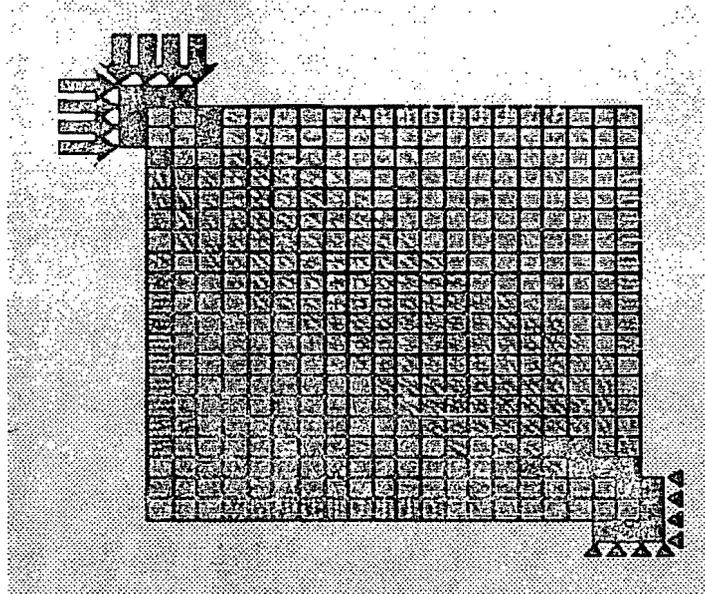


Fig. 7.3. Modelo con grietas extendidas y zonas de aplastamiento.

En la figura 7.4 se observa al modelo con un deterioro generalizado, donde las zonas de aplastamiento se han extendido y donde, el muro ha sido llevado a la falla.

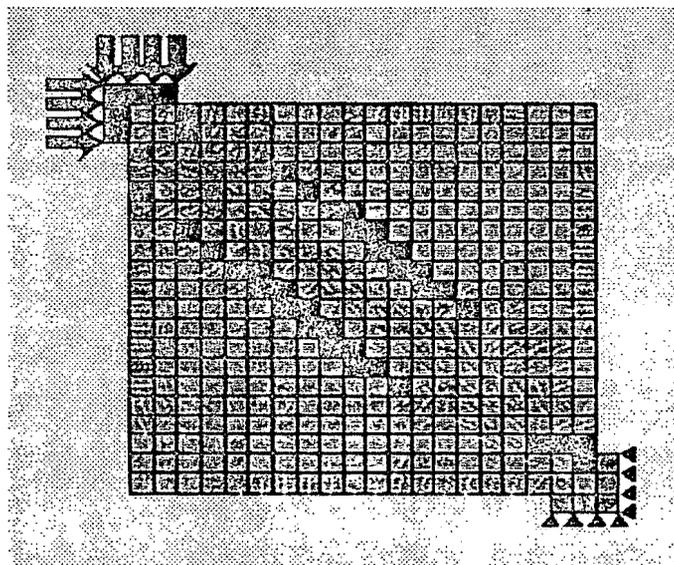


Fig. 7.4. Modelo con deterioro generalizado.

Existe también la posibilidad de modelar la presencia de aberturas. En la figura 7.5 se muestra el mismo modelo analizado anteriormente, pero se ha incluido la presencia de un hueco en su parte central. Puede apreciarse que las grietas inician en las esquinas superior izquierda e inferior derecha del hueco, lo que coincide con los resultados presentados en el capítulo 5, donde se observaban concentraciones de esfuerzos de tensión en esas ubicaciones.

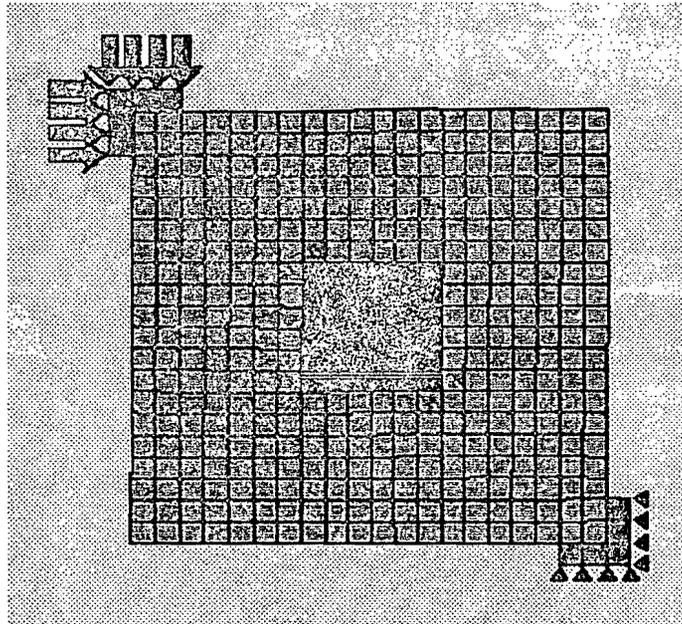


Fig. 7.5. Modelo no lineal con hueco centrado.

El patrón de agrietamiento que sigue el modelo conforme la carga y las deformaciones van aumentando puede observarse en la figura 7.6, donde se aprecia que el agrietamiento va extendiéndose hacia las esquinas del modelo. Cuando la carga aumenta, se observa que surgen nuevas zonas de agrietamiento, simétricas con respecto a la diagonal en compresión que se forma entre los elementos donde se aplica la carga y los elementos en los que se establecieron las restricciones de desplazamiento (fig. 7.7).

De análisis de este tipo, es posible generar curvas carga-deformación que nos proporcionen información sobre el comportamiento de los sistemas muro-marco en el rango no lineal. El programa SBETA, usado aquí para la generación de los ejemplos mostrados, tiene una

estructura enfocada al análisis no lineal de elementos de concreto simple y de concreto reforzado, conteniendo ya los modelos constitutivos del concreto y del acero.

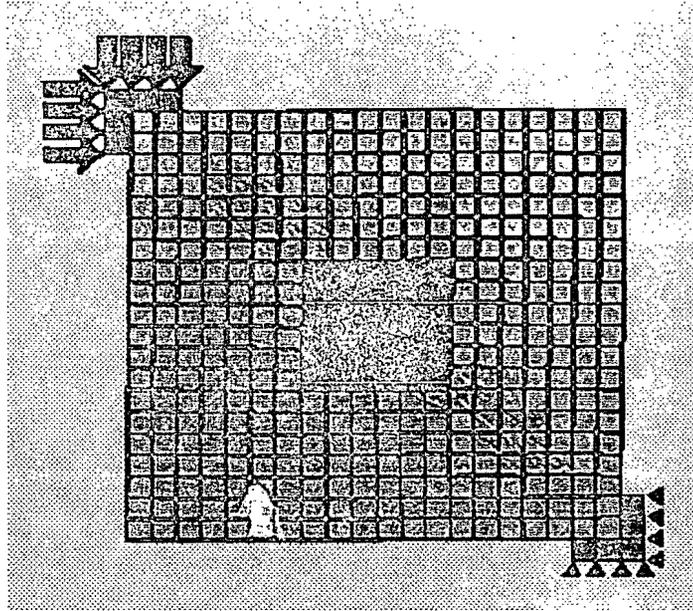


Fig. 7.6. Patrones de agrietamiento en el modelo con hueco centrado.

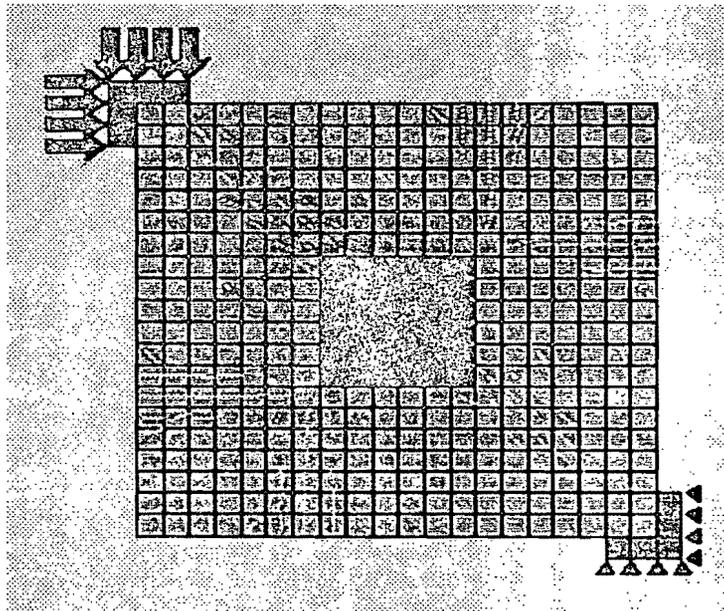


Fig.7.7. Estado avanzado de deterioro en el modelo con hueco centrado.

Los modelos estudiados en el presente trabajo no pueden ser analizados adecuadamente mediante programas como el SBETA, ya que además de estar enfocados hacia el estudio del concreto simple y/o reforzado, este programa no posee elementos que permitan el modelado de interfases entre diversos materiales, como es el caso de los elementos de contacto del DIRT II. Como ya se ha mencionado en los capítulos anteriores, los fenómenos de unión y separación que ocurren en dicha interfase son muy importantes para entender el comportamiento del conjunto. Sin embargo, contando con las herramientas apropiadas (como podría ser el uso de programas altamente especializados como el DIANA⁴³) existe el potencial para estudiar los sistemas marco-muro en el rango no lineal. La importancia de contar con información en este sentido se discutirá en el capítulo 8.

8. Consideraciones sobre una Propuesta de Modelo Estructural para Muros de Relleno.

Al analizar los resultados presentados en los capítulos anteriores, se pudo establecer que no es conveniente la modelación de los muros de relleno de mampostería con huecos mediante el uso de una diagonal equivalente, ya que ni las distribuciones de esfuerzos que se presentaron en los muros podían representarse como tal ni los efectos que se produjeron sobre los elementos mecánicos del marco confinante podían ser reproducidos con el empleo de una o varias de estas diagonales. Los muros sin huecos pueden ser sustituidos por elementos diagonales equivalentes, en el entendimiento de que esta simplificación no puede reproducir las variaciones de los elementos mecánicos de los marcos que contienen a los muros, ya que al suponer articulados los extremos de la diagonal, este efecto no es tomado en cuenta.

Uno de los principales efectos de la presencia de los muros de relleno en una estructura esquelética es el incremento en la rigidez lateral de dicha estructura. La rigidez adicional proporcionada por los muros debe ser transmitida a los pisos de la estructura, que en cierta forma es lo que hace el elemento diagonal. La idealización de los edificios como sistemas de varios grados de libertad, en los que la masa de la estructura se concentra en los diversos niveles y la rigidez lateral de cada entrepiso se representa con un resorte que une las concentraciones de masa se presenta en la figura 8.1. En este esquema, los muros ubicados en determinado entrepiso contribuyen con sus respectivas rigideces a incrementar la rigidez lateral total de ese entrepiso, como se representa esquemáticamente en la figura 8.2. Las gráficas presentadas en la sección 4.2. pueden ser empleadas para determinar cual es la contribución particular de cada muro, por tipo y ubicación de abertura. Sin embargo, todos los resultados aquí expuestos se han conservado dentro del rango de comportamiento lineal. Si se desea definir una propuesta práctica y aplicable al diseño de edificios, en particular si se considera el diseño

en zona sísmica, es necesario considerar el comportamiento de los sistemas aquí estudiados en el rango no lineal.

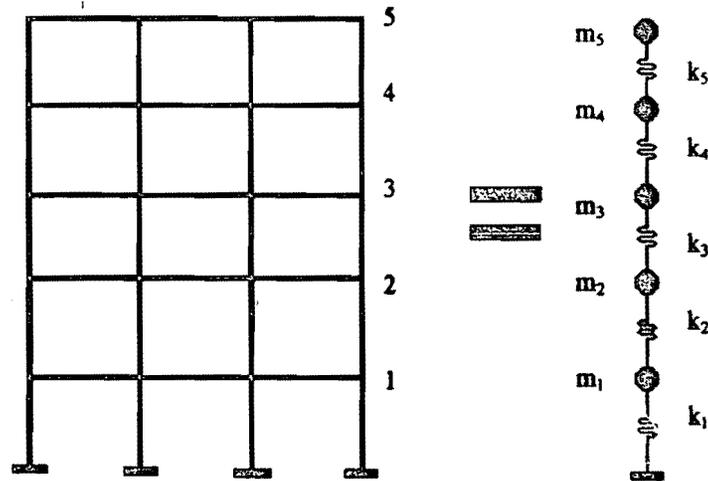


Fig. 8.1. Idealización de un edificio como un sistema de varios grados de libertad.

Por otra parte, y como se mencionó en el capítulo 7, la aparición de grietas forma parte importante de la no linealidad de los sistemas marco-muro. En la práctica de diseño y en los estudios de evaluación de daño es importante poder establecer la diferencia de propiedades

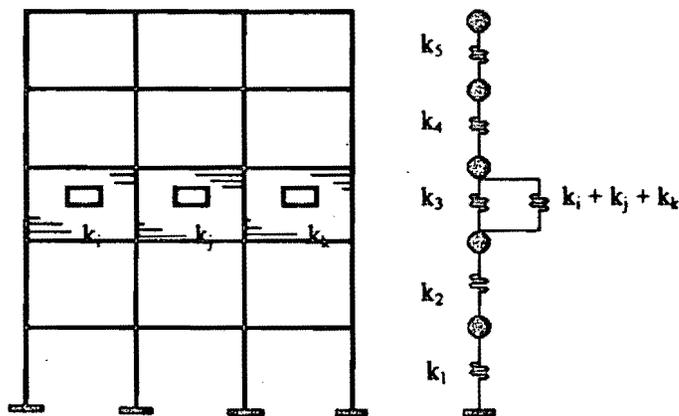


Fig. 8.2. Contribución de los muros a la rigidez de entrepiso.

entre un muro agrietado y un muro no agrietado y su efecto sobre el resto de la estructura.

Además de la necesidad de realizar análisis similares a los presentados en este trabajo, pero para el rango de comportamiento no lineal, es importante también modelar estructuras simples, como la que se propone en la figura 8.3, con el fin de estudiar las distribuciones de cortantes y momentos en elementos rodeados de muros. Las variaciones en los elementos mecánicos de las traveses que se encuentran entre dos niveles consecutivos y en las columnas que se encuentran entre dos crujeas consecutivas con muros de relleno son ejemplos de estos casos. Otro recurso, además del informático, que puede ser considerado como una opción interesante de investigación relacionada con lo aquí expuesto, es la construcción y prueba de modelos a escala de los sistemas marco-muro. Como antecedente de este tipo de experimentos puede mencionarse el trabajo de Mosalam⁴⁰.

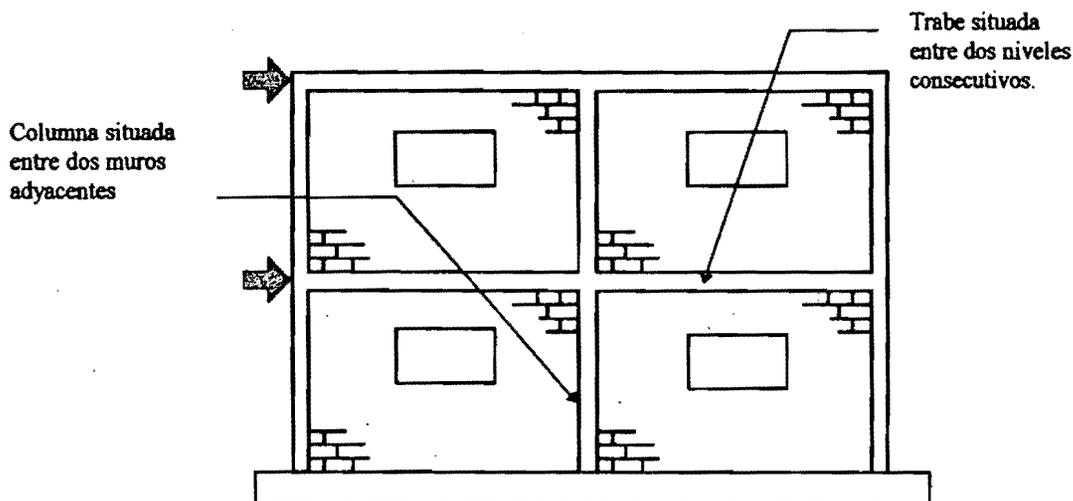


Fig. 8.3. Modelo propuesto de edificio de dos niveles.

De todo lo anterior puede concluirse que el problema de los efectos que produce la presencia de muros de relleno, con y sin huecos, sobre una estructura esquelética, es complejo y no puede.

reducirse a formulaciones simples como las de diagonales equivalentes, si lo que se pretende es tomar en cuenta todos los fenómenos que intervienen en el comportamiento de estos sistemas. La información generada en este trabajo puede ser de utilidad en el desarrollo de un modelo estructural de aplicación práctica, pero necesita ser complementada con estudios de otro tipo de modelos y con análisis en el rango no lineal.

9. Conclusiones.

De los resultados obtenidos en este trabajo pueden establecerse las siguientes conclusiones:

1. Los modelos analíticos que sustituyen la presencia de muros de relleno por elementos diagonales equivalentes, en estructuras reticulares de concreto reforzado o de acero, son válidos mientras los mencionados muros no contengan aberturas, o estas sean de dimensiones tales que representen porcentajes muy pequeños del área total del muro (e.g. porcentajes menores al 5% del área total del muro).
2. Los modelos de diagonales equivalentes pueden representar el efecto de la presencia de muros de relleno en la rigidez lateral de la estructura, pero no proporcionan ninguna información con respecto a la distribución y magnitudes de los elementos mecánicos que se presentan en columnas y trabes de la misma.
3. No es posible representar a los muros que contienen huecos de dimensiones y ubicaciones comunes por medio de diagonales equivalentes, ya que las distribuciones de esfuerzos que se generan en estos muros presentan trayectorias diversas, dependiendo precisamente de la dimensión y ubicación de las aberturas.
4. Los muros de relleno, con y sin huecos, modifican notablemente los elementos mecánicos que actúan en las columnas y las trabes confinantes, aunque sus magnitudes son, en general, inferiores a las de los momentos y cortantes que se presentan cuando se considera a la estructura sin muros. Las variaciones de los diagramas de elementos mecánicos no pueden ser reproducidas mediante una o varias diagonales o mediante el empleo de otros elementos, ya que presentan una gran irregularidad en su forma.

5. Es necesaria la investigación del comportamiento de estos sistemas en el rango no lineal, a fin de poder complementar los resultados aquí presentados y estar en la posibilidad de establecer un método práctico de análisis para estructuras con muros de relleno, con y sin huecos, que englobe todos los resultados que se obtengan.

Referencias

1. Bertero, V. y Brokken, S., "Infills in Seismic Resistant Building", Journal of Structural Engineering, A.S.C.E., Vol.109, No.6, Junio 1983, pp 1337-1361.
2. Benjamin, J.R. y Williams, Harry A., "The Behavior of One-Story Brick Shear Walls", Journal of the Structural Division, Proceedings of the A.S.C.E., Paper 1723, No.ST4, Julio 1958, pp 1723-1-30.
3. Stafford Smith, B., "Lateral Stiffness of Infilled Frames", Journal of the Structural Division, Proceedings of the A.S.C.E., No.ST6, Diciembre 1962, pp 183-199.
4. Stafford Smith, B., "Behavior of Square Infilled Frames", Journal of the Structural Division, Proceedings of the A.S.C.E., No.ST1, Febrero 1966, pp 381-403.
5. Stafford Smith, B., "Model Test Results of Vertical and Horizontal Loading of Infilled Frames", ACI Journal, No. 65-44, Agosto 1968, pp 618-624.
6. Mallick, D.V., "Effect of Openings on the Lateral Stiffness of Infilled Frames", Proc. Instn. Civil Engrs., No. 7371, Vol. 49, 1971, pp 193-209.
7. Page, Adrian W., "Finite Element Model for Masonry", Journal of the Structural Division, No. ST8, Agosto 1978, pp 1267-1285.
8. King, G.J.W. y Pandey, P.C., "The Analysis of Infilled Frames using Finite Elements", Proc. Instn. Civ. Engrs., Parte 2, Diciembre 1978, Vol. 65, pp 749-760.
9. Meli, R., "Control of Earthquake Damage in Buildings with Masonry Walls", Proc. GIBMAC, Roma, 1982, pp 1021-1032.
10. Achyutha, H., Jagadish, R., Rao, P.S. y Shakeebur Rahman, S., "Finite Element Simulation of the Elastic Behavior of Infilled Frames with Openings", Computers and Structures, Vol. 23, No. 5, 1986, pp 685-696.
11. Zamic, R. y Tomazevic, M., "An Experimentally Obtained Method for Evaluation of the Behavior of Masonry Infilled R/C Frames", Proceedings of Ninth Conference on Earthquake Engineering, Vol. VI, Agosto 2-9, 1988, pp VI-163-168.
12. Soroushian, P., Obaseki, k. y Choi, Ki-Bong, "Nonlinear Modeling and Seismic Analysis of Masonry Shear Walls", Journal of Structural Engineering, Vol. 144, Mayo 1988, pp 1106-1119.
13. Naraine, K. y Sinha, S., "Behavior of Brick Masonry under Cyclic Compressive Loading", Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 115, No.2, Junio 1989, pp 1432-1445.
14. Ishibashi, K. y Kastumata, H., "A Study on Nonlinear Finite Element Analysis of Confined Masonry Walls", Cuadernos de Investigación, CENAPRED, No. 15, Julio 1994.
15. Gergely, P., White, Richard N., Zawilinski, D. y Mosalam, K., "The Interaction of Masonry Infill and Steel or Concrete Frames", Proc. National Earthquake Conf., Memphis, Tennessee, Vol.II, 1993, pp 183-192.

16. Schimdt, Thomas, " An Approach of Modeling Masonry Infilled Frames by the FE-Method and a Modified Equivalent Strut Method", Darmstadt Concrete, 1993, pp 171-180.
17. Saneinejad, A. y Hobbs, B., " Inelastic Design of Infilled Frames", Journal of Structural Engineering, A.S.C.E., Vol. 121, No.4, Abril 1995, pp 634-650.
18. Meli, R., " Comportamiento Sísmico de Muros de Mampostería", Instituto de Ingeniería, U.N.A.M., Reporte No. 352, Abril 1975.
19. Bazán, E., " Muros de Mampostería ante Cargas Laterales, Estudios Analíticos", Tesis doctoral, Facultad de Ingeniería, U.N.A.M., 1980.
20. "COMBAT (COMprehensive Building Analysis Tool)", Manual del usuario, Computech Engineering Services, Inc., 1983.
21. "IMAGES 3-D", Manual del usuario, Celestial Software, Inc., 1990.
22. Amrhein, James E., " Reinforced Masonry Engineering Handbook (Clay and Concrete Masonry)", Fifth edition, Masonry Institute Of America, 1992.
23. Schneider, Robert R. y Dickey, Walter L., "Reinforced Masonry Design", Prentice-Hall, Inc., 1980.
24. Sahlin, Sven. "Structural Masonry", Prentice-Hall, Inc., 1971.
25. T. Grimm, Clayford, " Void Mortar Joints: Bane of Brick Masonry", Journal of Construction Engineering and Management, A.S.C.E., Marzo 1994, pp 152-161.
26. Scott McNary, W. y P. Abrams, Daniel, " Mechanics of Masonry in Compression", Journal of Structural Engineering, Vol. 111, No.4, Abril 1985, pp 857-870.
27. Atkinson, R. H. y Nolan, J. L., " A Proposed Failure Theory for Brick Masonry in Compression", Proceedings, 3rd Canadian Masonry Symposium, Edmonton, Canada, 1983, pp 5-1 a 5,17.
28. Hildsford, H. K., " Investigation into the Failure Mechanisms of Brick Masonry loaded in Axial Compression", Designing, Engineering and Constructing with Masonry Products, Gulf Publishing Co., Houston, Tex., 1969, pp 34-41.
29. Meli, R. y Reyes G. Alejandro., " Propiedades Mecánicas de la Mampostería", Instituto de Ingeniería, No.288, 1971.
30. Naraine, K. y Sinha, S., " Behavior of Brick Masonry under Cyclic Compressive Loading" , Journal of Construction Engineering and Management, A.S.C.E., Vol. 115, No. 2, Junio 1989, pp 1432-1445.
31. Hognestad, E., " A Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Members", University of Illinois Engineering Experimental Station, Bulletin No. 399, Noviembre 1951.
32. Betancourt S., Max y Amal S., Luis, " Nuevo Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (Ilustrado y Comentado)", Editorial Trillas, S.A. de C.V., Segunda Edición, 1996.

33. Pande, G.N., Liang, J.X. y Middleton, J., " Derivatives of Elastic Parameters for Masonry", Numerical Methods in Engineering: Theory and Applications (NUMETA 90), Elsevier Applied Science, Londres, 1990, pp 844-853.
34. Anthoine, A., " Derivation of the In-Plane Elastic Characteristics of Masonry Through Homogenization Theory", Int. J. Solids Structures, Vol. 32, No. 2, pp 137-163.
35. Cook, Robert D., " Finite Element Modeling for Stress Analysis", John, Wiley and Sons, Inc., 1995.
36. Hughes T.J.R. y Prevoist J.H., "DIRT II, Program documentation", Informe interno, Princeton University, 1979.
37. Stafford Smith, B. y Riddington, J. R., " The Design of Masonry Infilled Steel Frames for Bracing Structures", The Structural Engineer, No.1, Vol. 56B, Marzo 1978, pp 1-7.
38. Liaum, Te-Chang y Kwan, Kwok-Hung, "Non-linear Analysis of Multistorey Infilled Frames", Proc. Instn. Civ. Engrs., Parte 2, Junio 1982, pp 441-454.
39. Stafford Smith, B. y Carter, C., " A Method of Analysis for Infilled Frames", Proceedings ICE, Vol. 44, septiembre 1969, pp 31-48.
40. Mosalam, Khalid M., "Experimental and Computational Strategies for the Seismic Behavior Evaluation of Frames with Infill Walls", Tesis doctoral, Universidad de Cornell, Ithaca, N.Y., 1996.
41. El Haddad, M. H., " Finite Element Analysis of Infilled Frames considering Craking and Separation Phenomena", Computers and Structures, Vol. 41, No. 3, 1991, pp 439-447.
42. Peekel Instruments, " SBETA Program documentation", Rotterdam, Holanda. 1990.
43. "DIANA-Finite Element Analysis", TNO Building and Construction Research, Department of Computational Mechanics, Delft, The Netherlands, 1993.

Apéndice A.

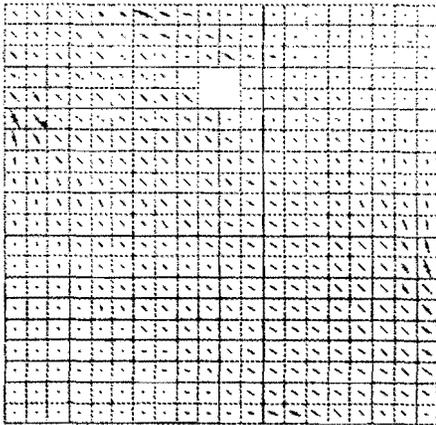
En las siguientes páginas se presentan la totalidad de las distribuciones de esfuerzos, tanto de compresión como de tensión, obtenidas de los análisis realizados con el programa DIRT II y graficadas mediante los programas PLOT-UNAM, desarrollado en el Instituto de Ingeniería, por el Dr. Gustavo Ayala Milián y Orlando Ramírez Boscán, M. en C. y el pos-procesador GRAFICO1, desarrollado por el autor.

La nomenclatura utilizada para la definición de los diversos casos estudiados es como sigue: en el caso de ventanas, los dos primeros caracteres indican ventana tipo 1 (v1) o ventana tipo 2 (v2), el tercer carácter indica la ubicación de la abertura, siendo esta centrada (c), izquierda (l) o derecha (d). El número que sigue a continuación indica el porcentaje de vacío que representa la abertura con respecto al muro totalmente lleno.

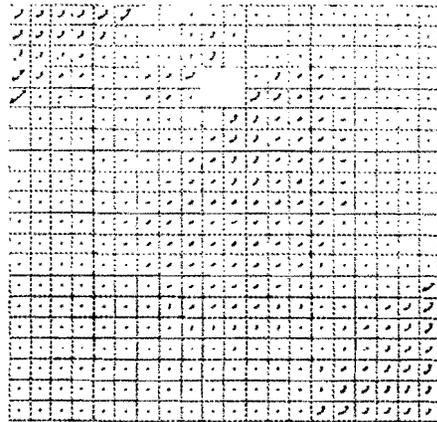
En el caso de las puertas, el primer carácter indica su pertenencia al grupo de puertas (p), el segundo carácter indica la ubicación de la abertura de igual manera que para las ventanas y el número al final indica el porcentaje de vacío con respecto al muro lleno.

Las letras c y t al final de la clave de identificación de cada modelo indican esfuerzos de compresión y de tensión, respectivamente.

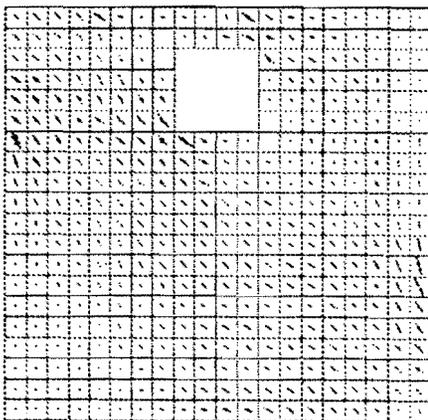
Ventanas tipo 1, Rigidez relativa: 4, caso 2.



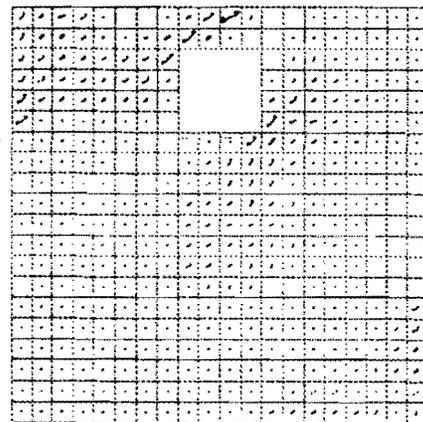
vlc1c



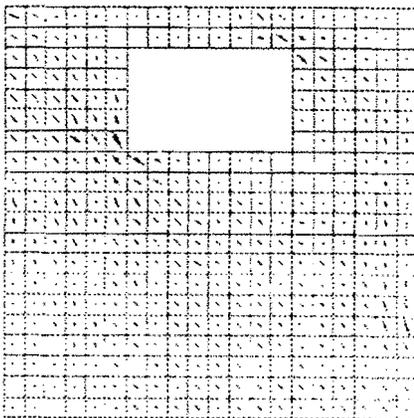
vlc1t



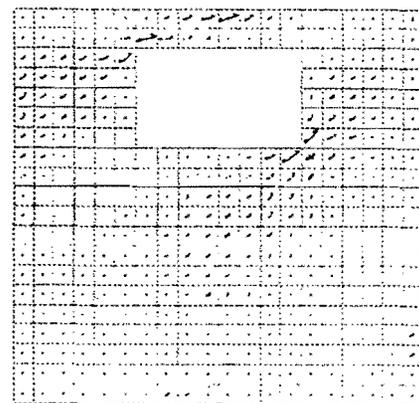
vlc4c



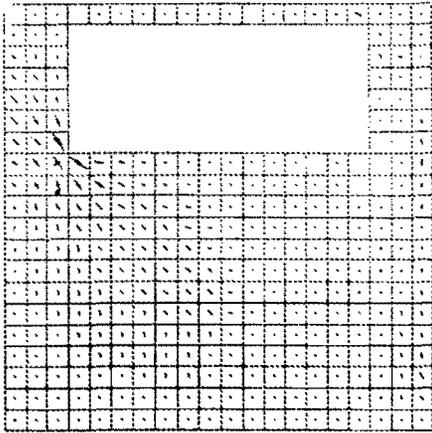
vlc4t



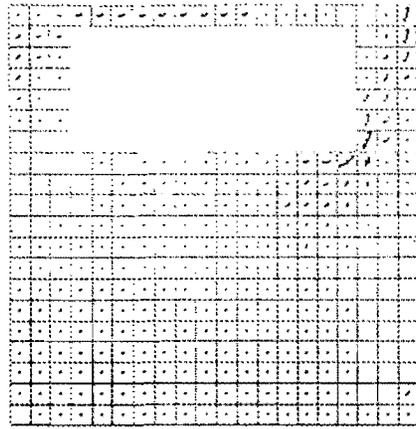
vlc10c



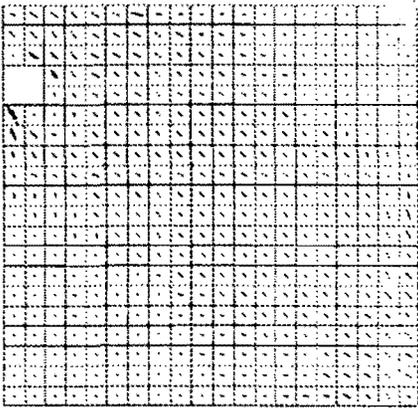
vlc10t



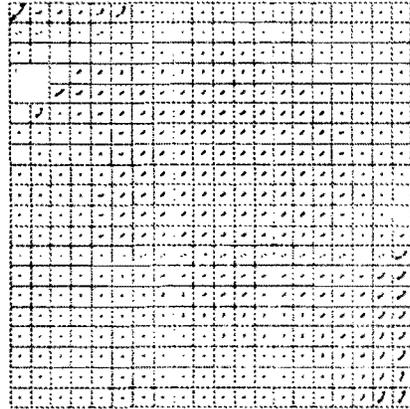
vlc2lc



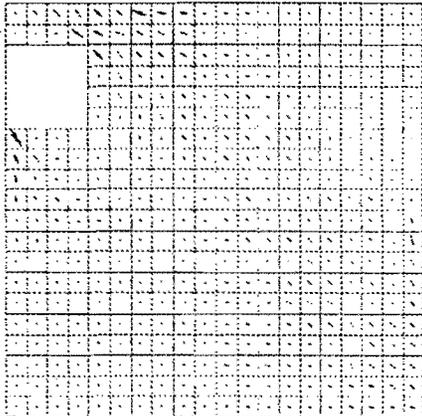
vlc2lt



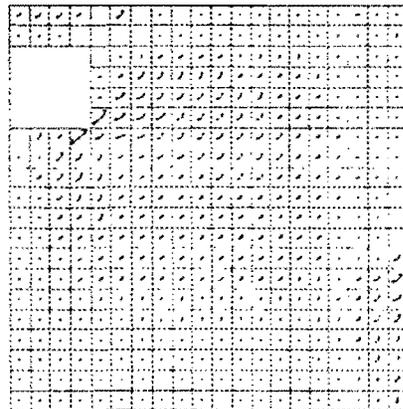
vlic



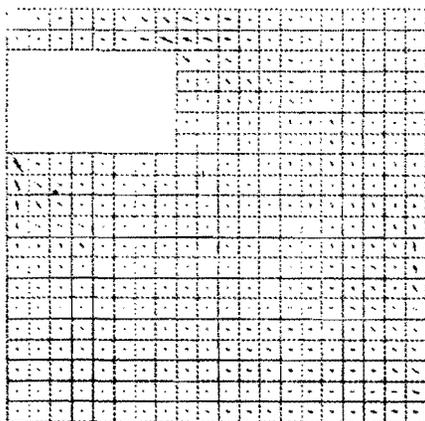
vli4t



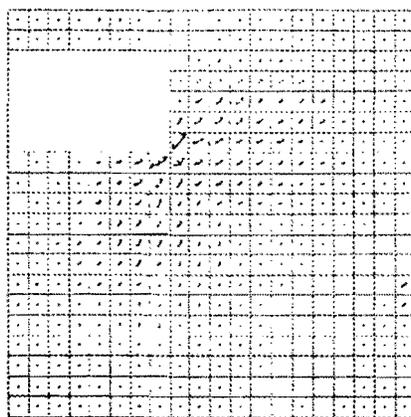
vli4c



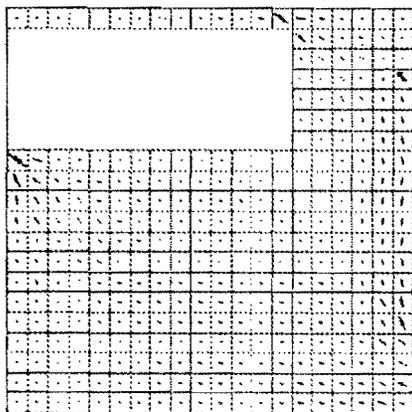
vli4t



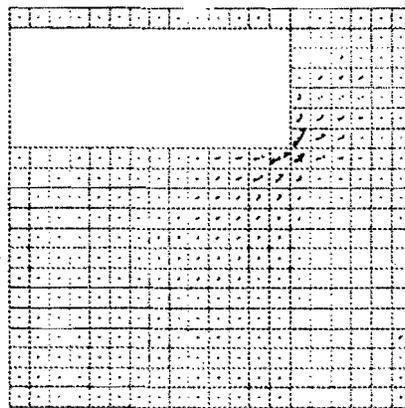
vli10c



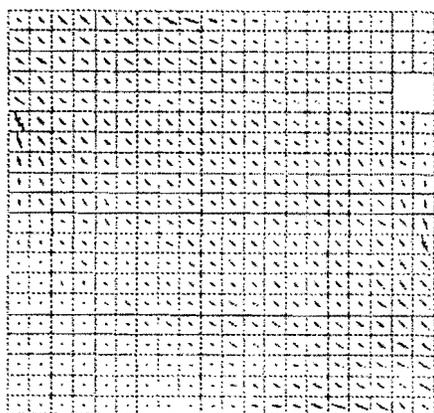
vli10t



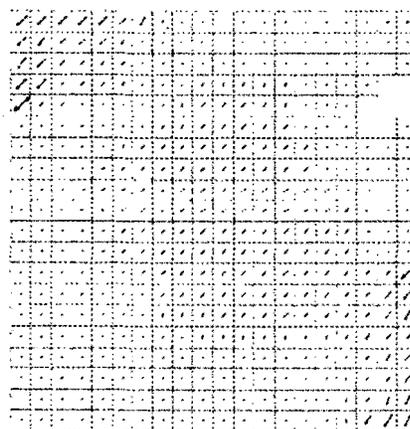
vli21c



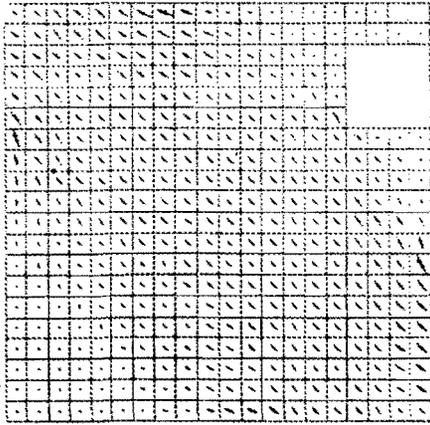
vli21t



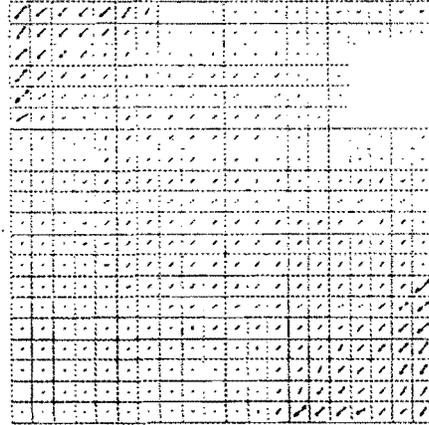
vld1c



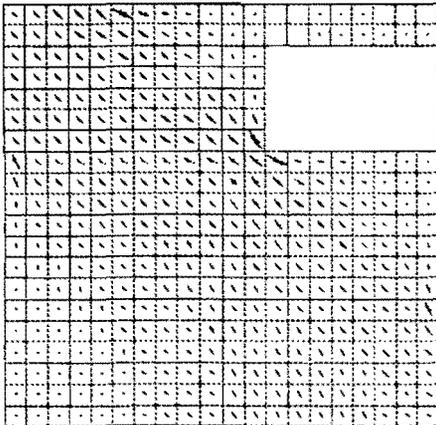
vld1t



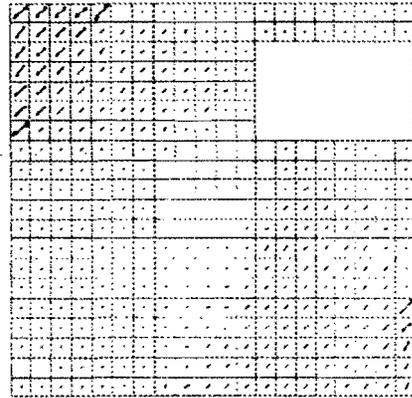
v1d4c



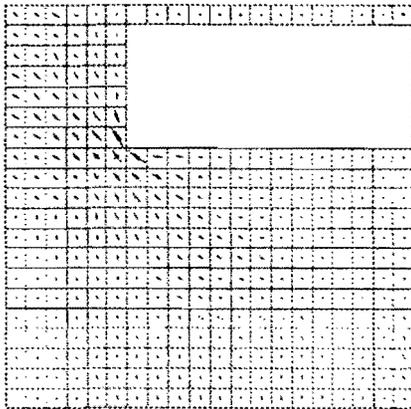
v1d4t



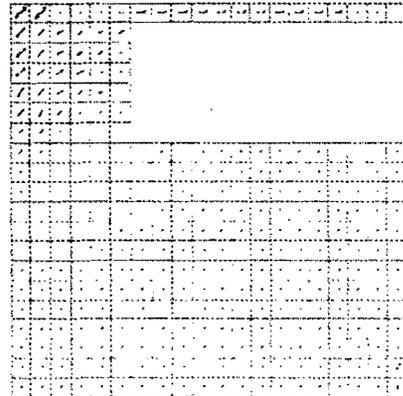
v1d10c



v1d10t

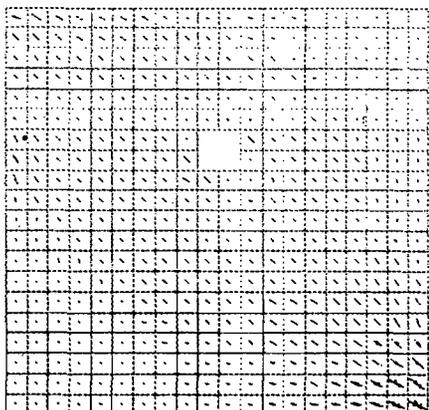


v1d21c

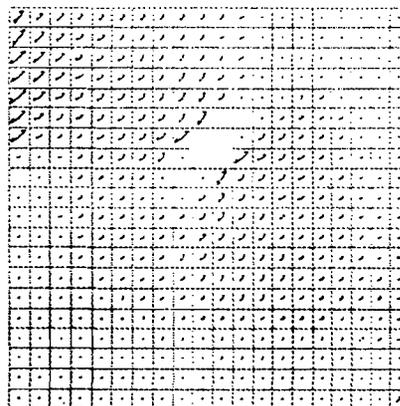


v1d21t

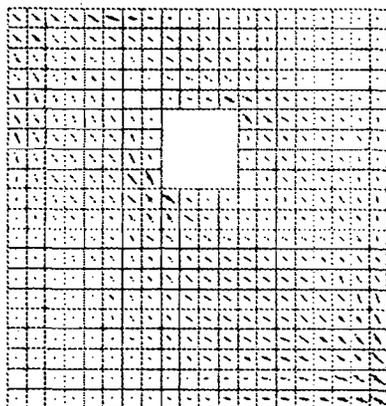
Ventanas tipo 2, Rigidez relativa: 6.28, caso 5.



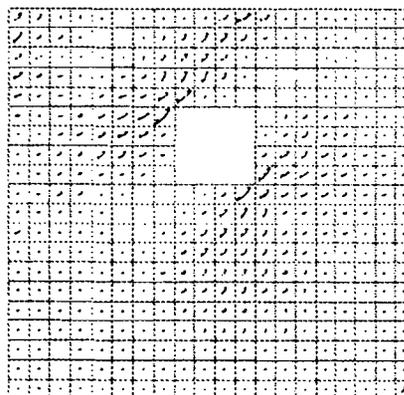
v2c1c



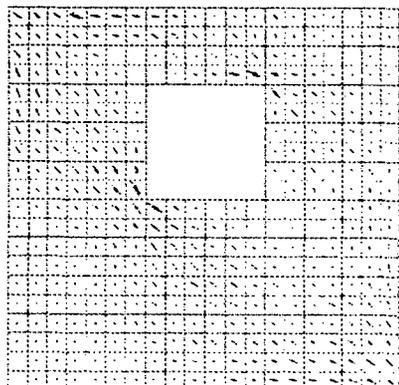
v2c1t



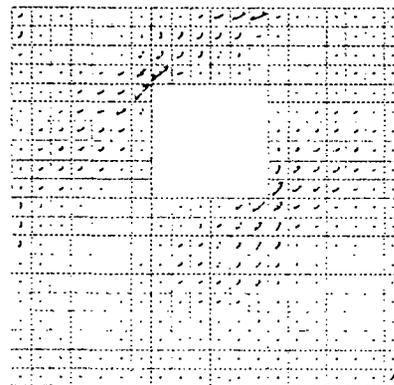
v2c4c



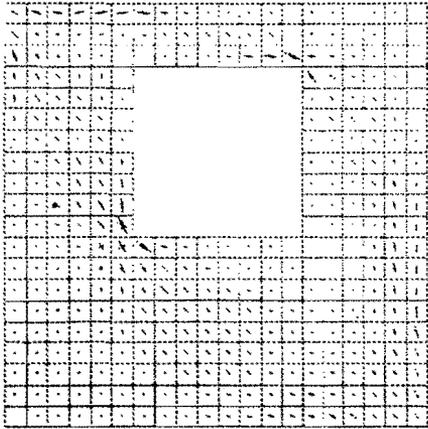
v2c4t



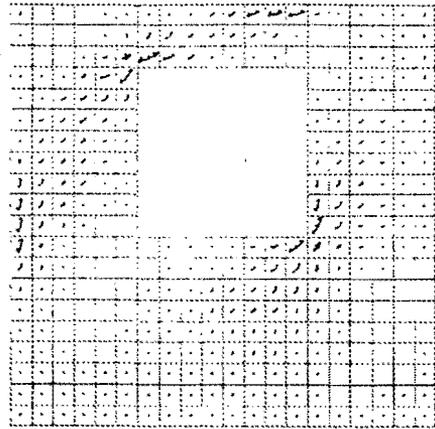
v2c9c



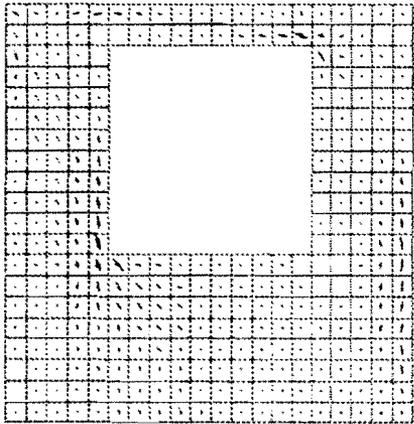
v2c9t



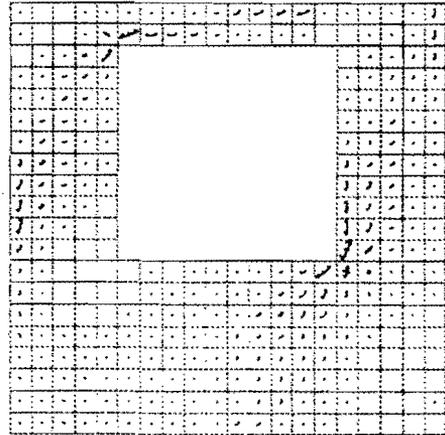
v2c16c



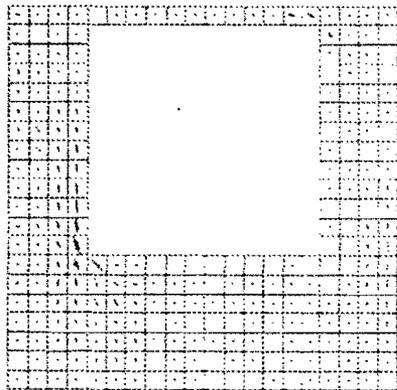
v2c16t



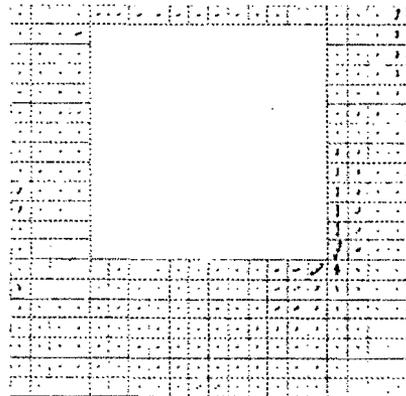
v2c25c



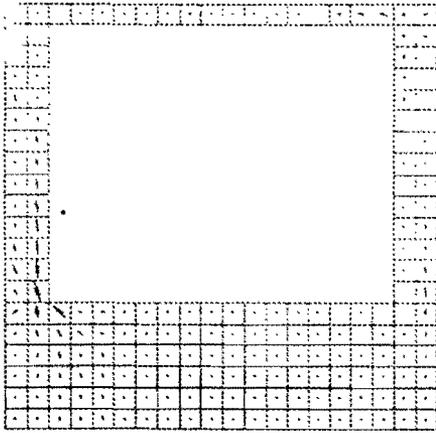
v2c25t



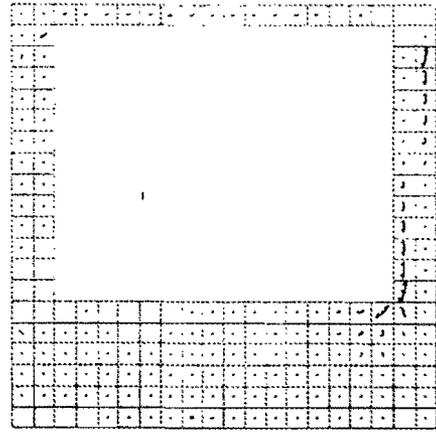
v2c36c



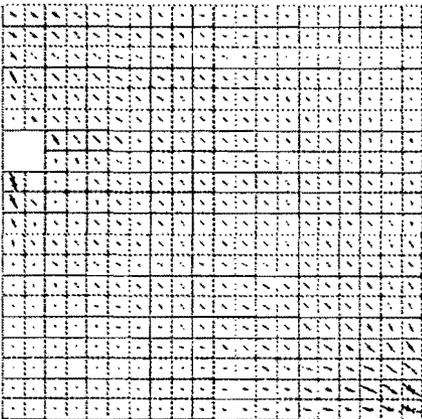
v2c36t



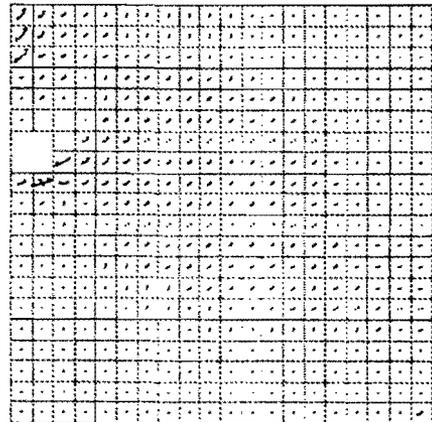
v2c52c



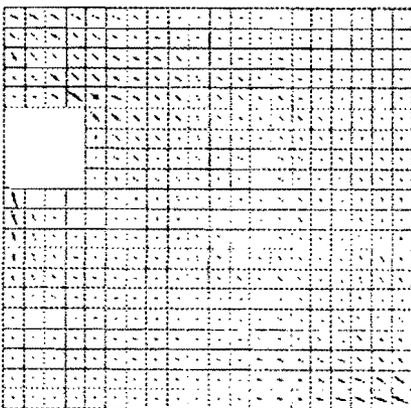
v2c52t



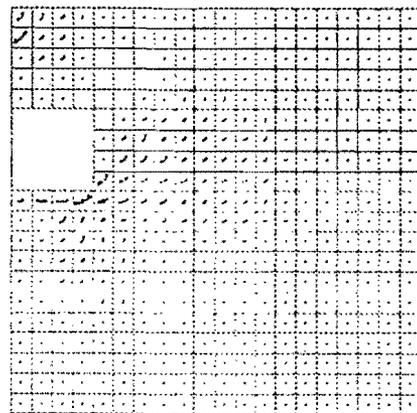
v2i1c



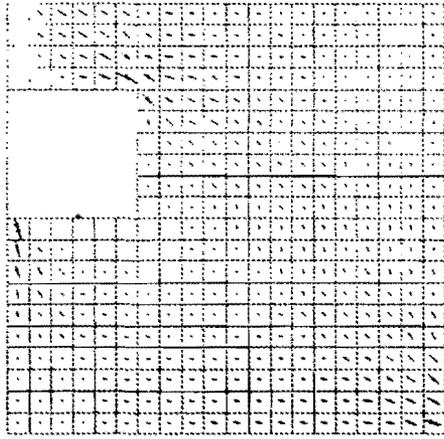
v2i1t



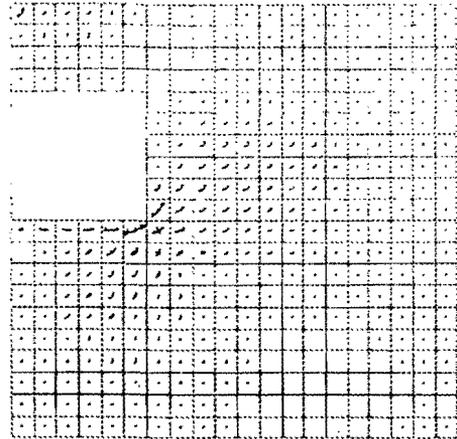
v2i4c



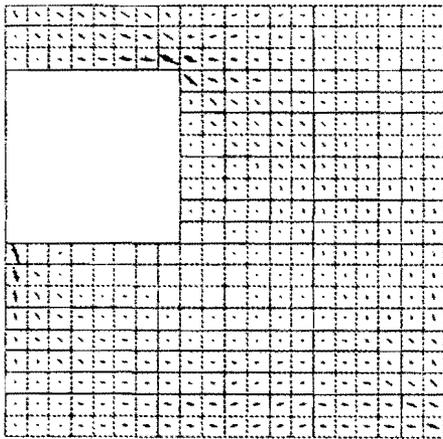
v2i4t



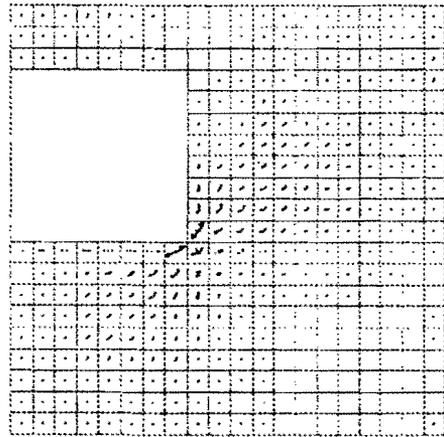
v2i9c



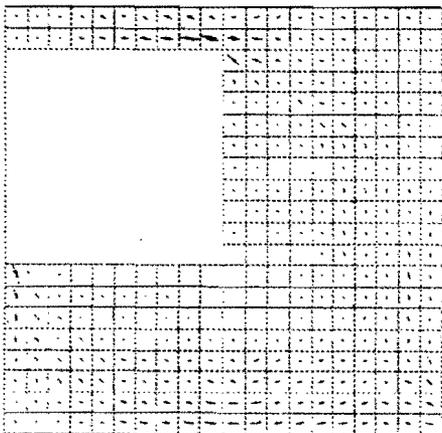
v2i9t



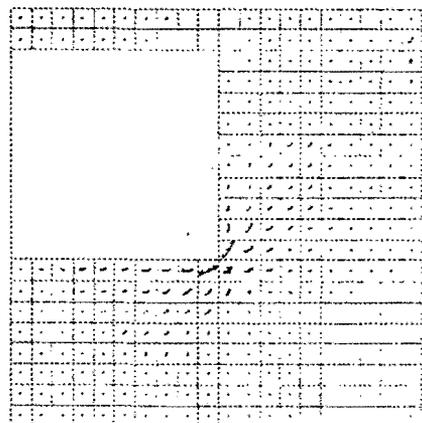
v2i16c



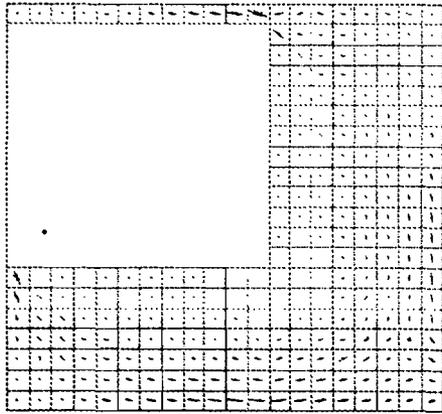
v2i16t



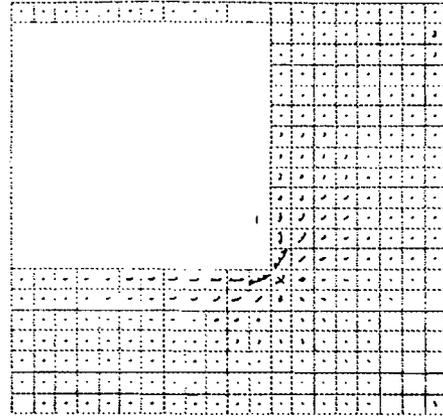
v2i25c



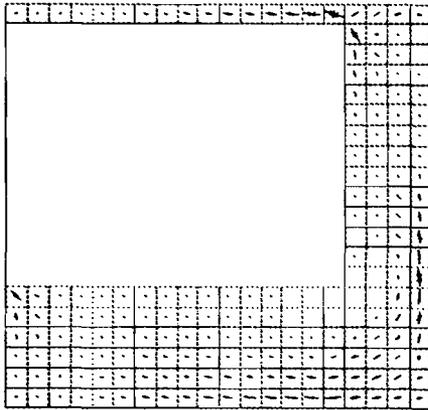
v2i25t



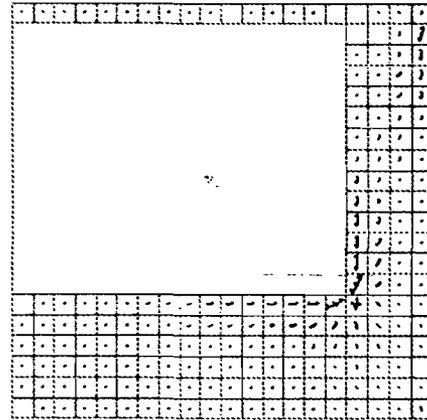
v2i36c



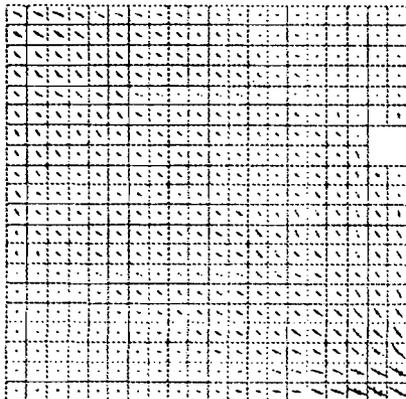
v2i36t



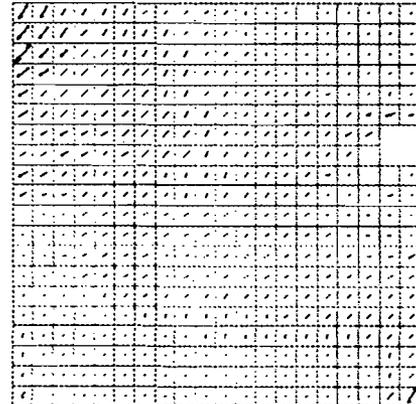
v2i52c



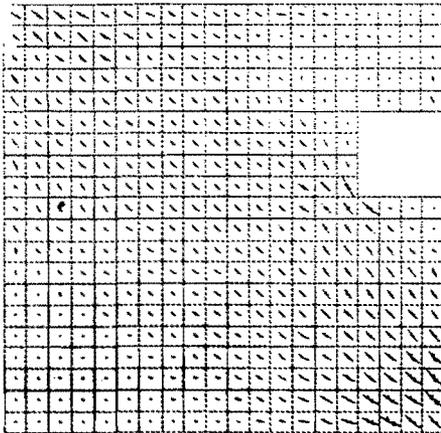
v2i52t



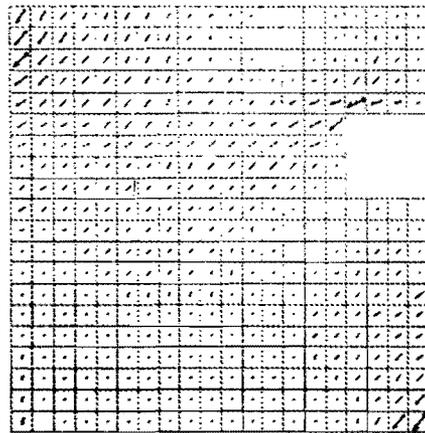
v2d1c



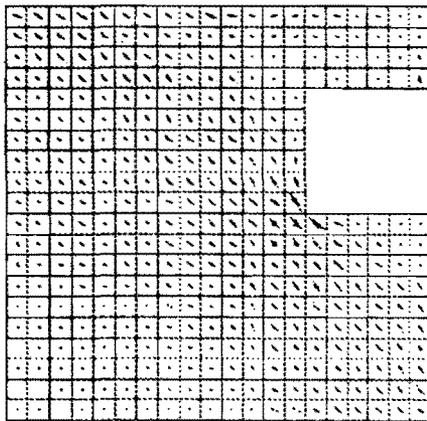
v2d1t



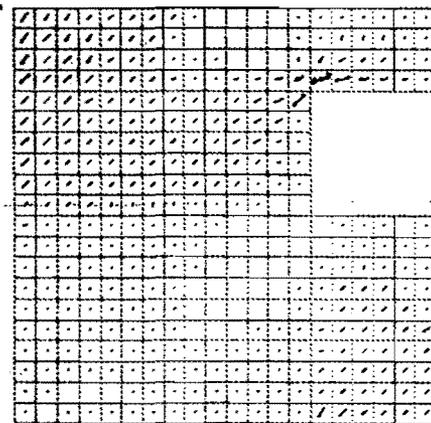
v2d4c



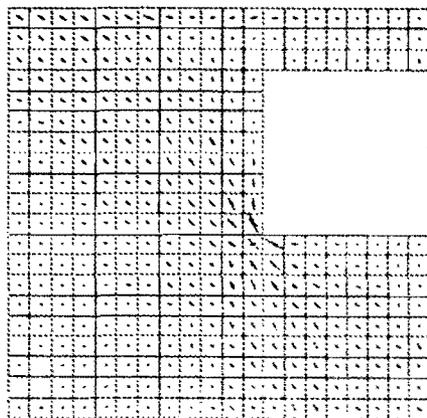
v2d4t



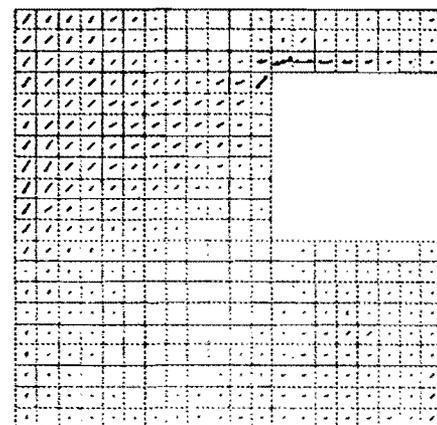
v2d9c



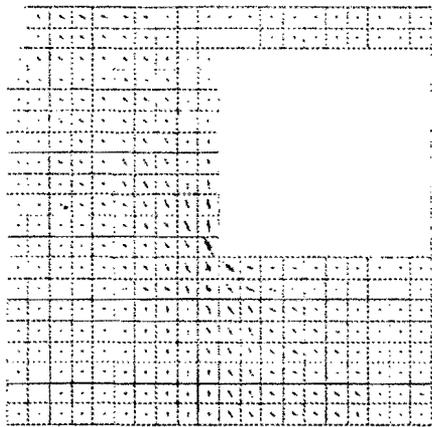
v2d9t



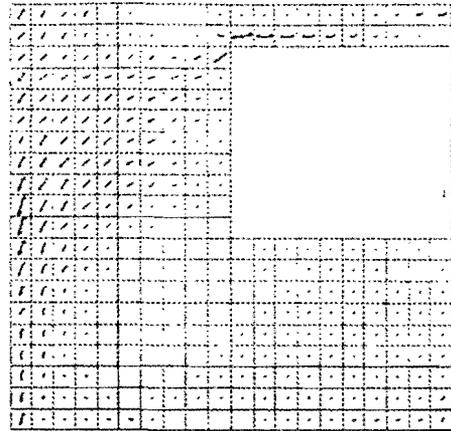
v2d16c



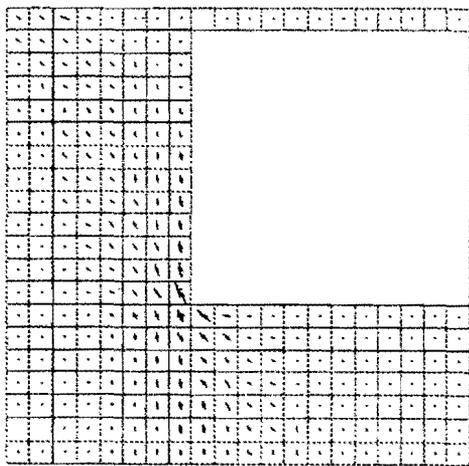
v2d16t



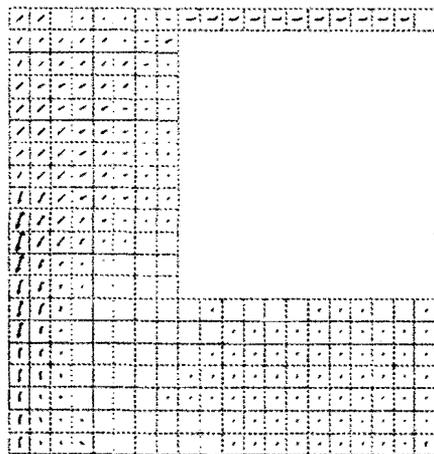
v2d25c



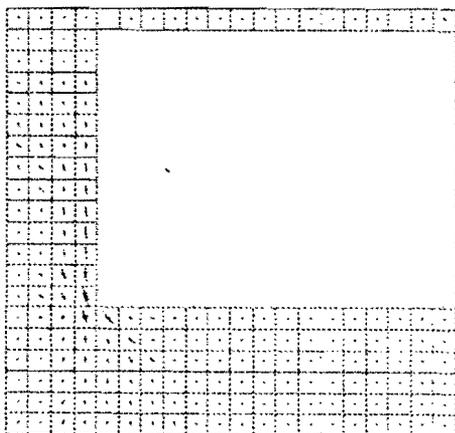
v2d25t



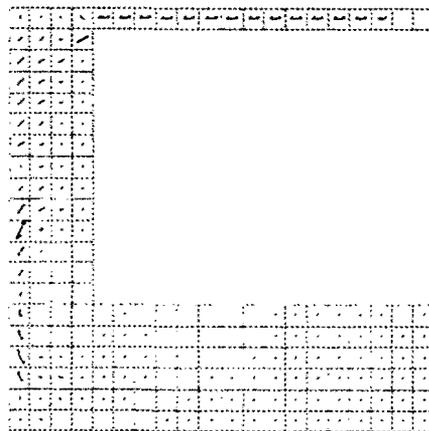
v2d36c



v2d36t

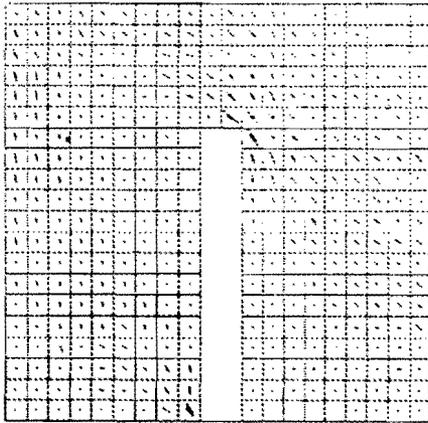


v2d52c

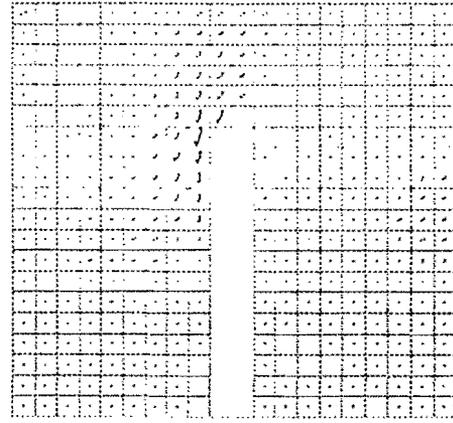


v2d52t

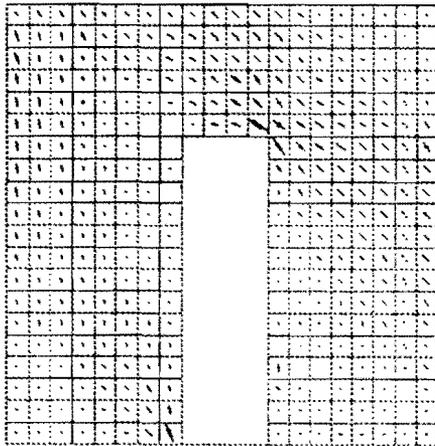
Puertas, Rigidez Relativa: 2.8, caso d.



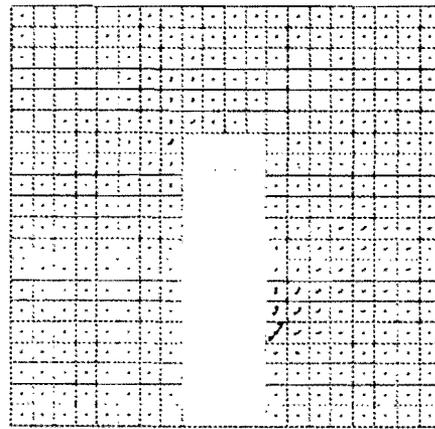
pc7c



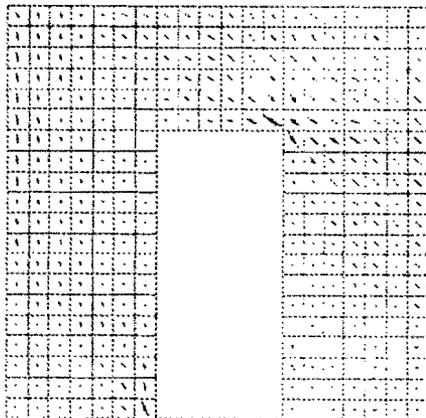
pc7t



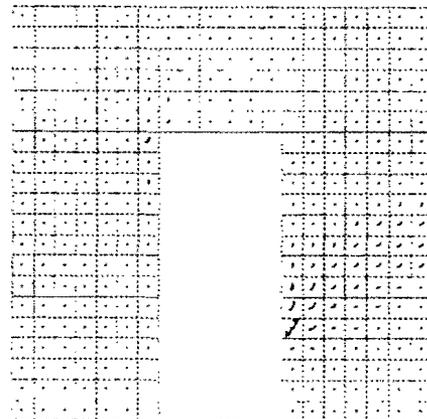
pc14c



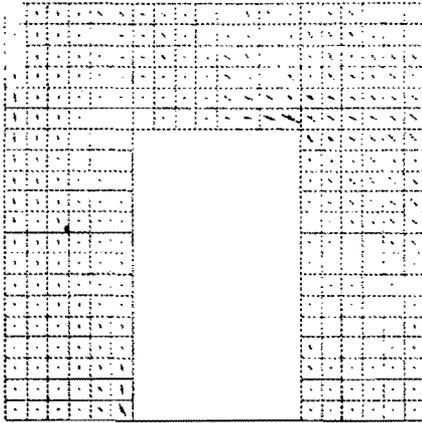
pc14t



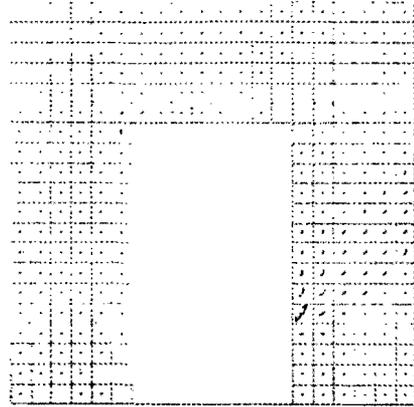
pc21c



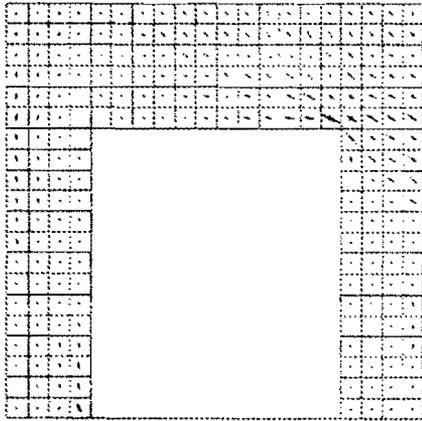
pc21t



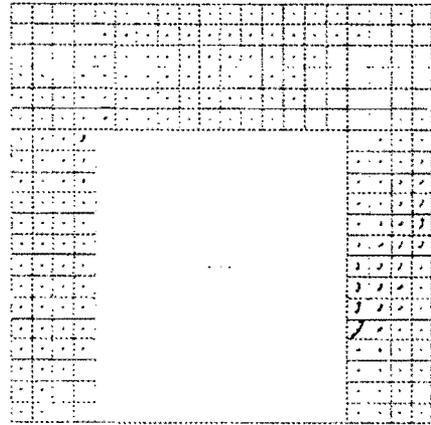
pc28c



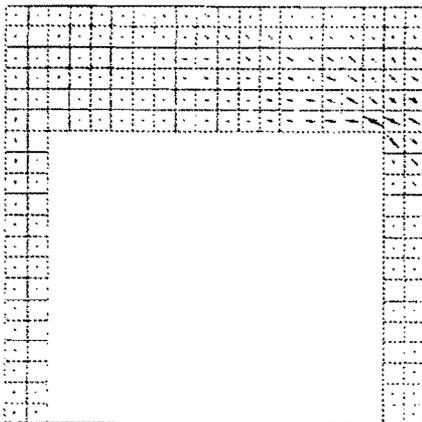
pc28t



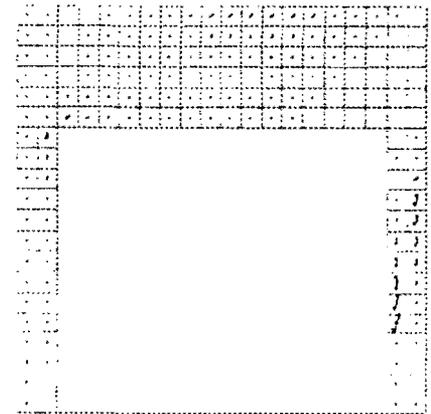
pc42c



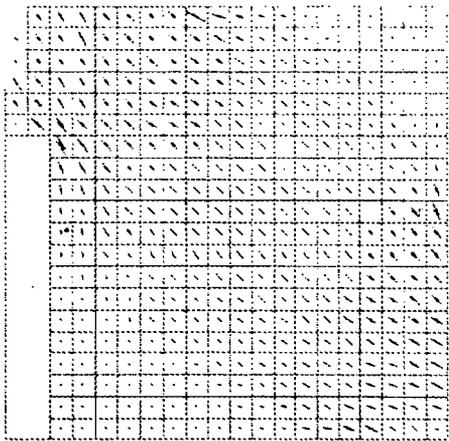
pc42t



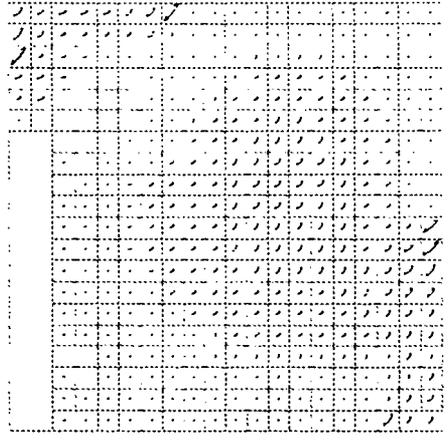
pc56c



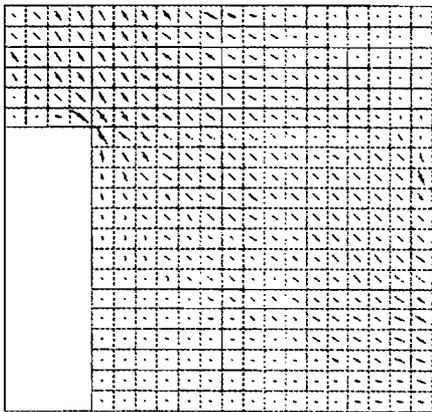
pc56t



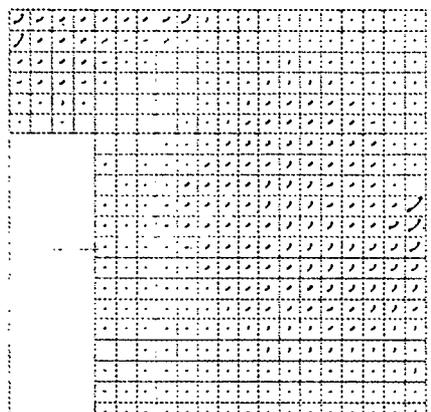
pi7c



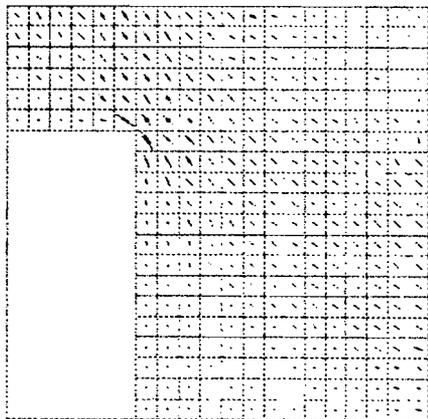
pi7t



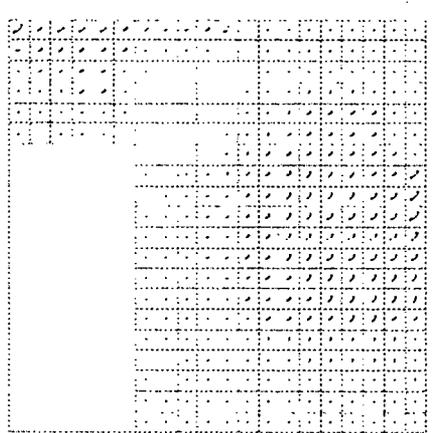
pi14c



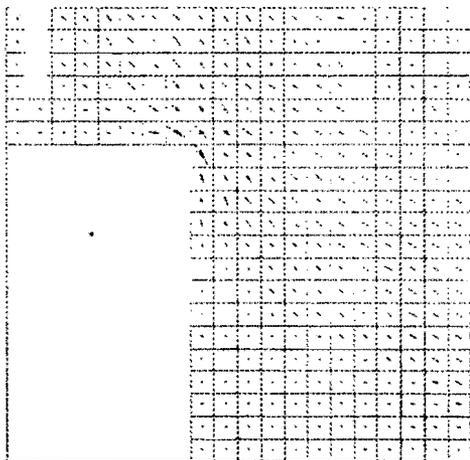
pi14t



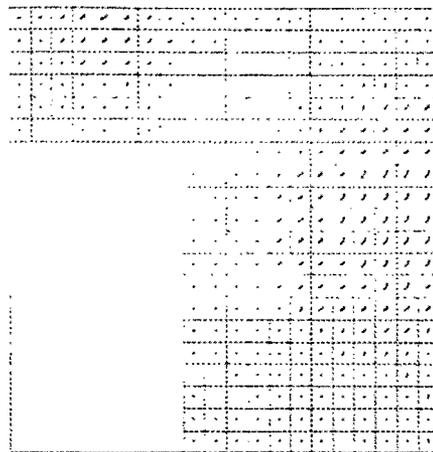
pi21c



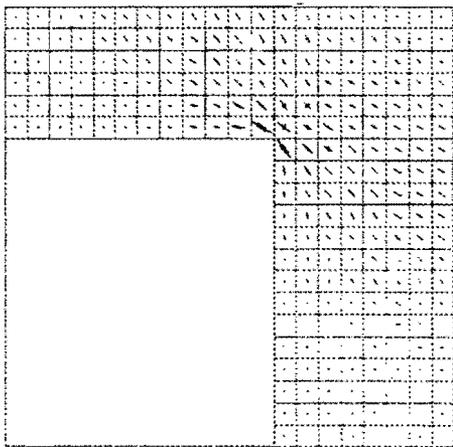
pi21t



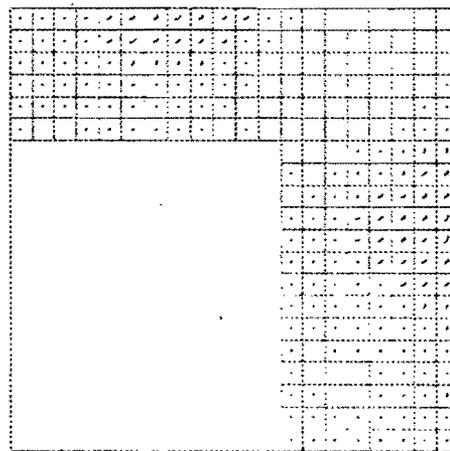
pi28c



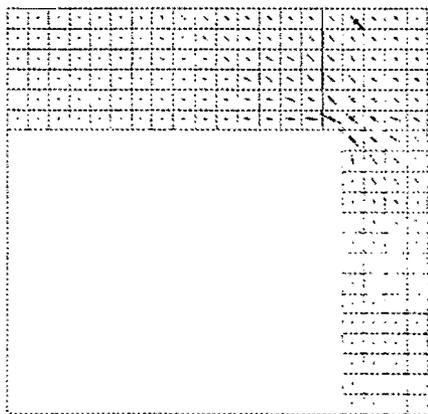
pi28t



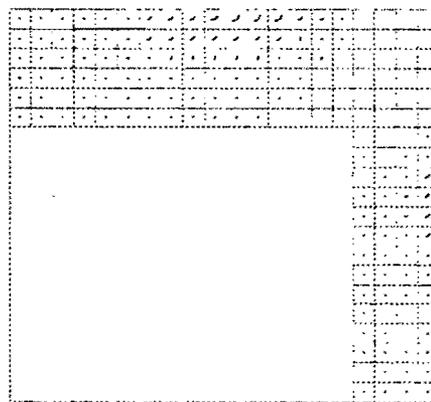
pi42c



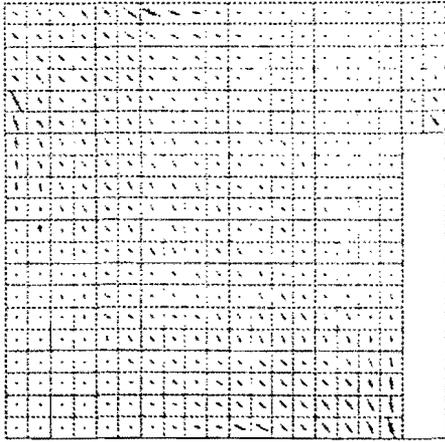
pi42t



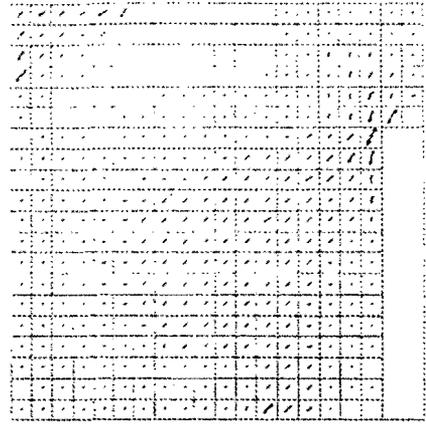
pi56c



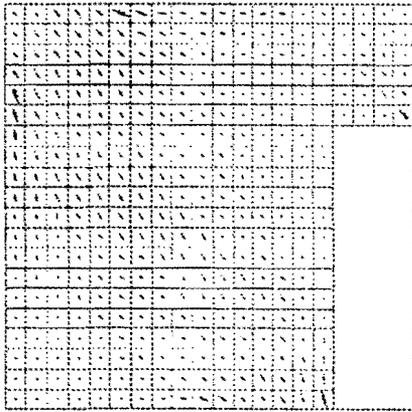
pi56t



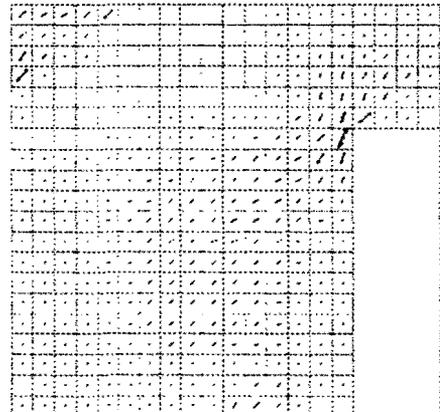
pd7c



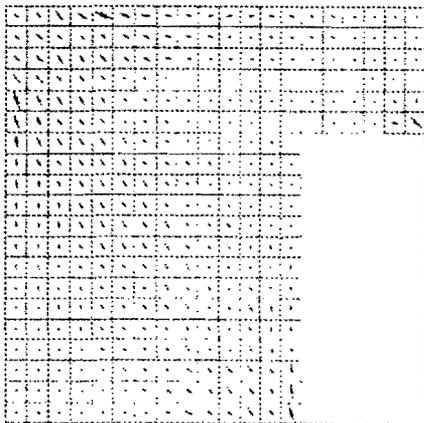
pd7t



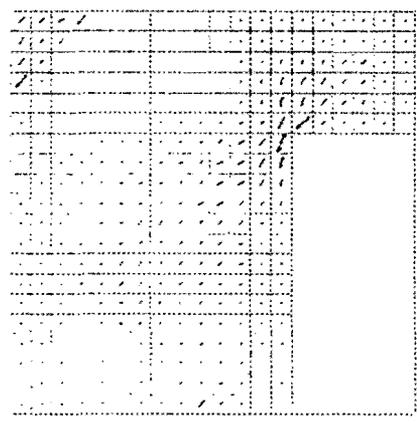
pd14c



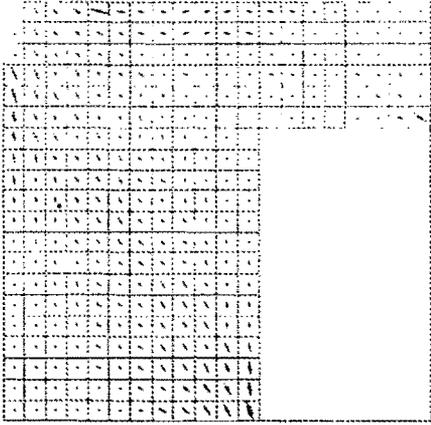
pd14t



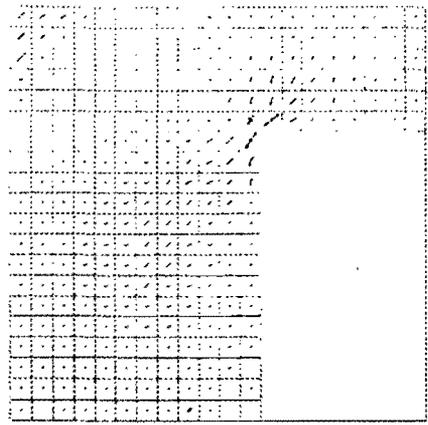
pd21c



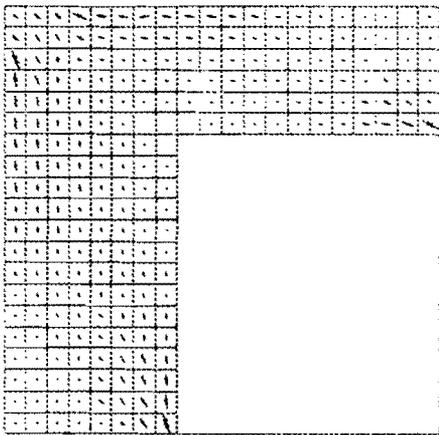
pd21t



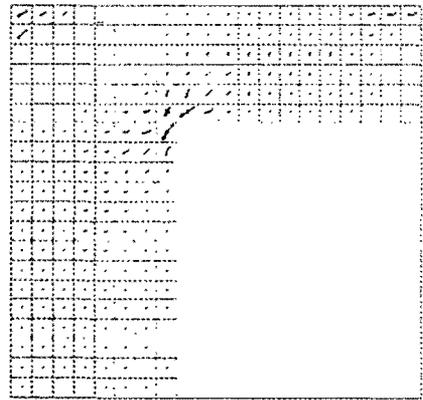
pd28c



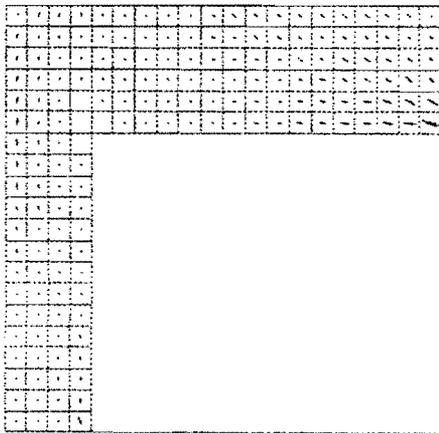
pd28t



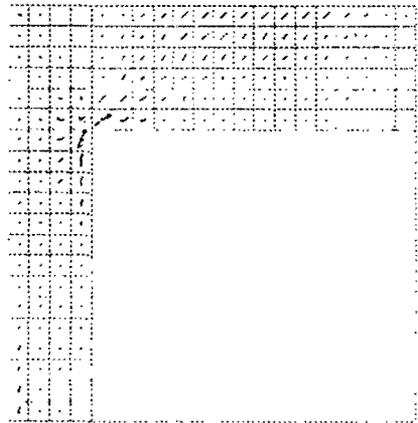
pd42c



pd42t



pd56c



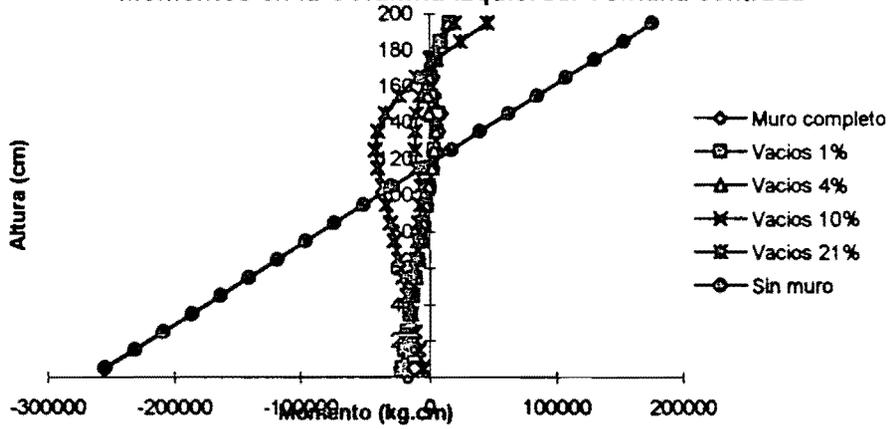
pd56t

Apéndice B.

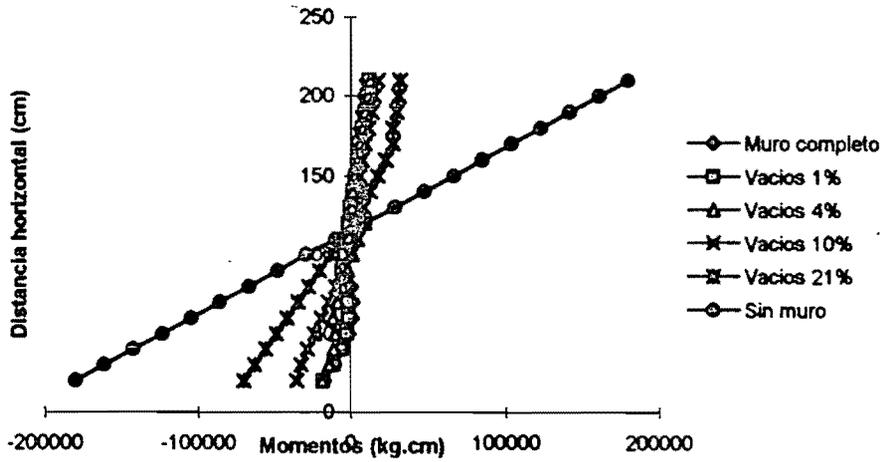
En las siguientes páginas se presentan la totalidad de los diagramas de elementos mecánicos , momentos y cortantes, obtenidas de los análisis realizados con el programa DIRT II y graficadas mediante el programa MOMEN, desarrollado por el autor como pos-procesador de los archivos de resultados del DIRT II.

Ventanas tipo 1

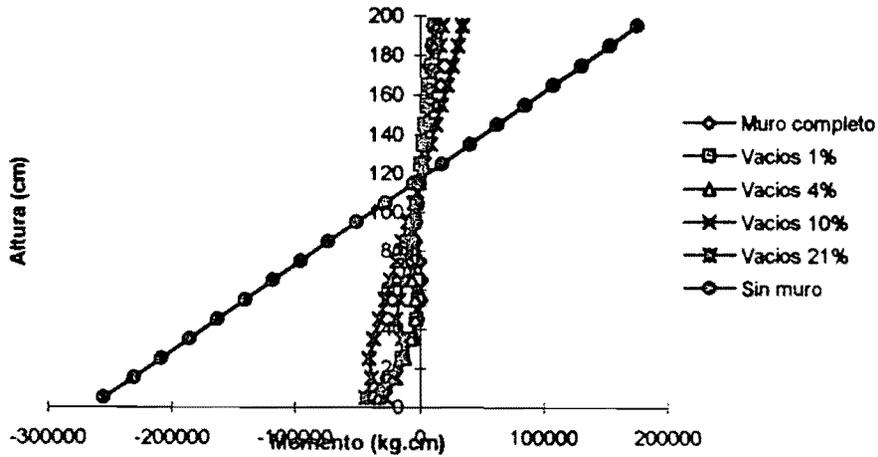
Momentos en la Columna Izquierda. Ventana centrada



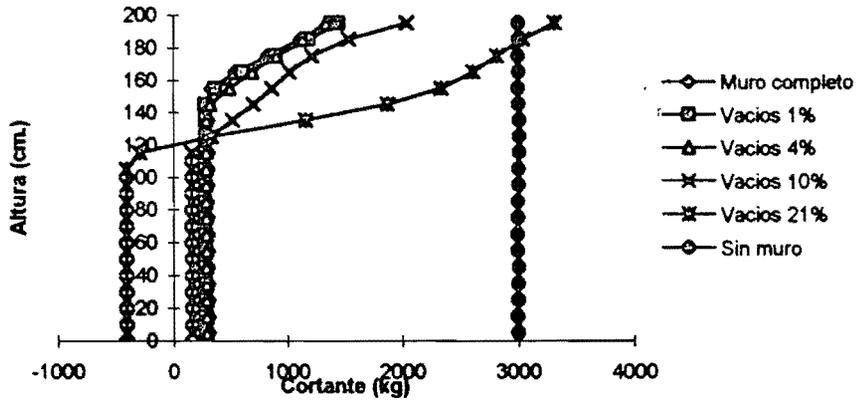
Momentos en la trabe superior. Ventana centrada



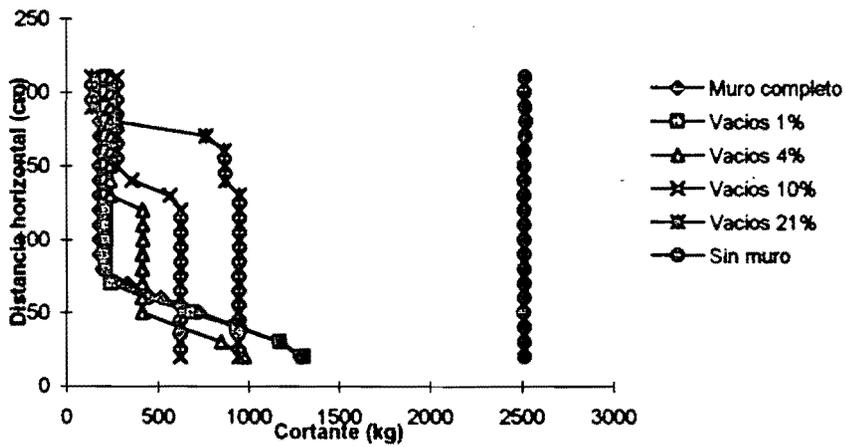
Momentos en la columna derecha. Ventana centrada



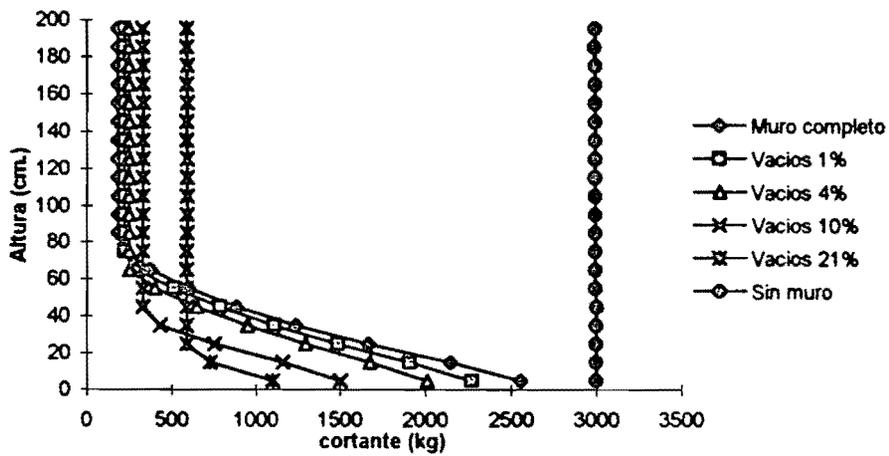
Cortante en la columna izquierda. Ventana centrada.



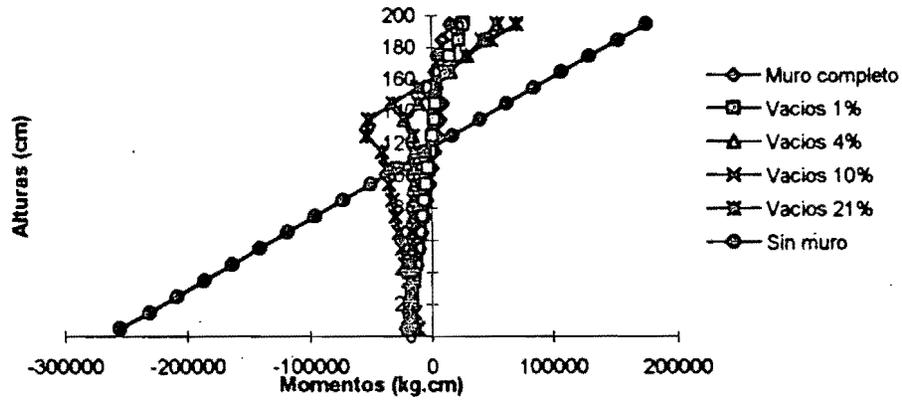
Cortante en la trabe superior. Ventana centrada



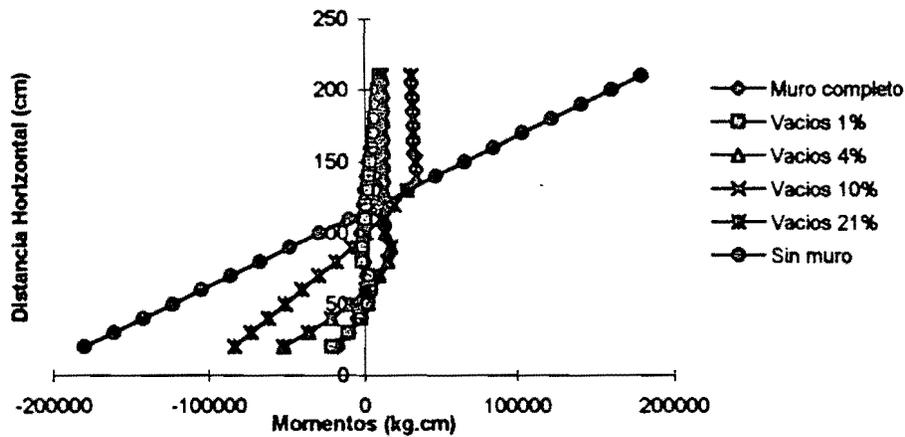
Cortante en la columna derecha. Ventana centrada.



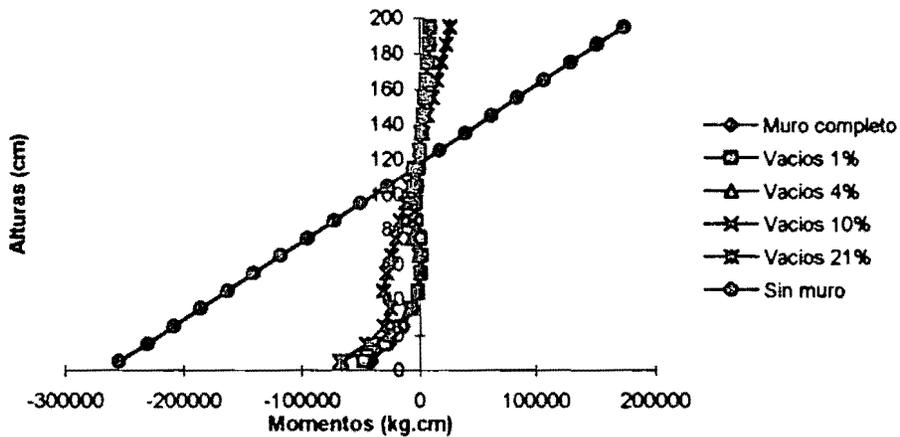
Momentos en la Columna Izquierda. Ventana izquierda.



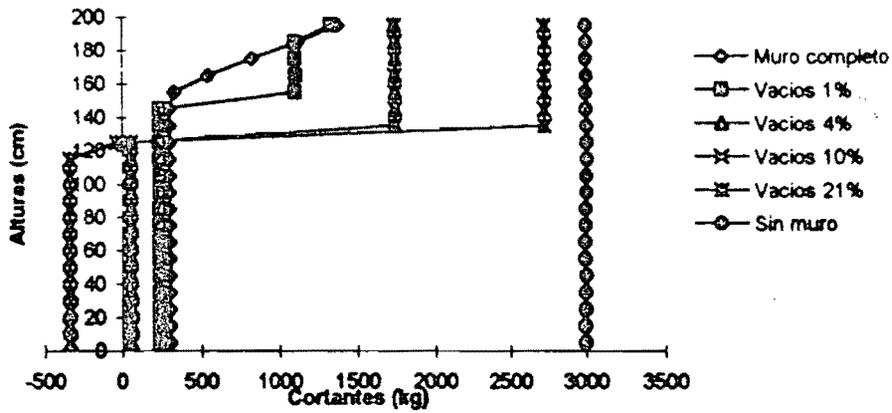
Momentos en la Trabe Superior. Ventana izquierda.



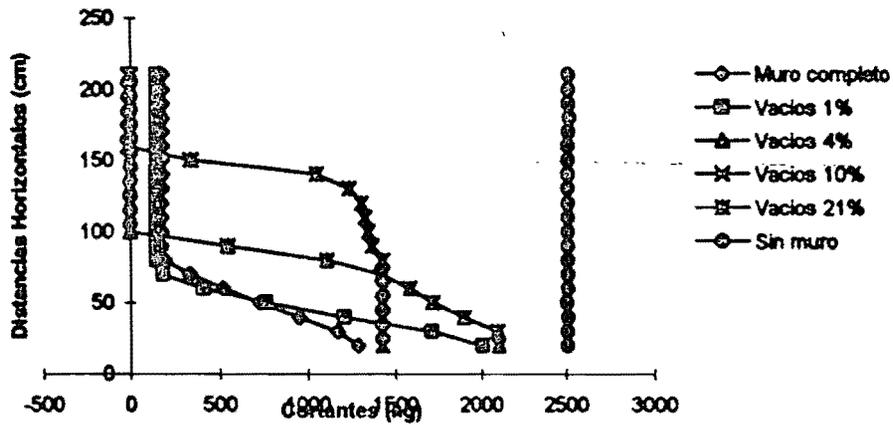
Momentos en la Columna Derecha. Ventana izquierda.



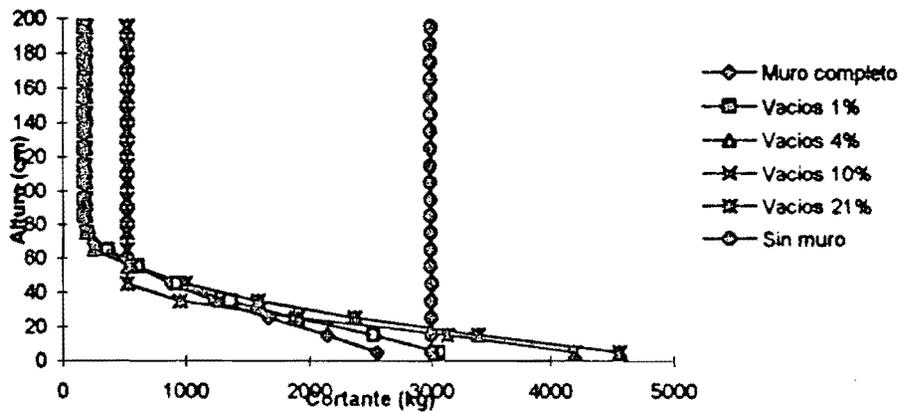
Cortantes en la Columna Izquierda. Ventana izquierda.



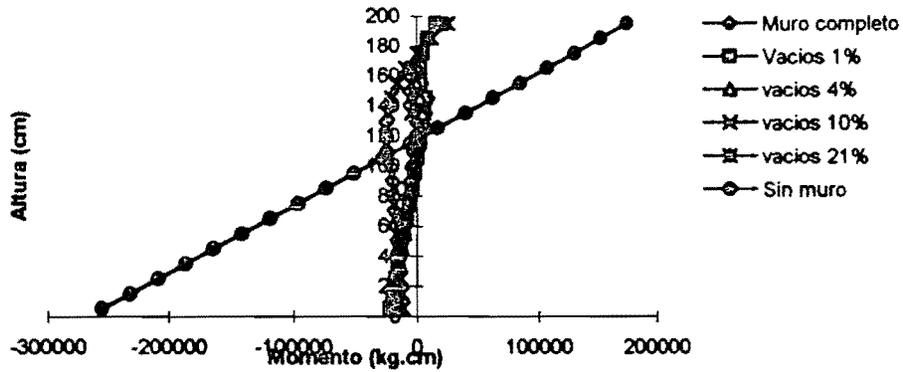
Cortantes en la Trabe Superior. Ventana izquierda.



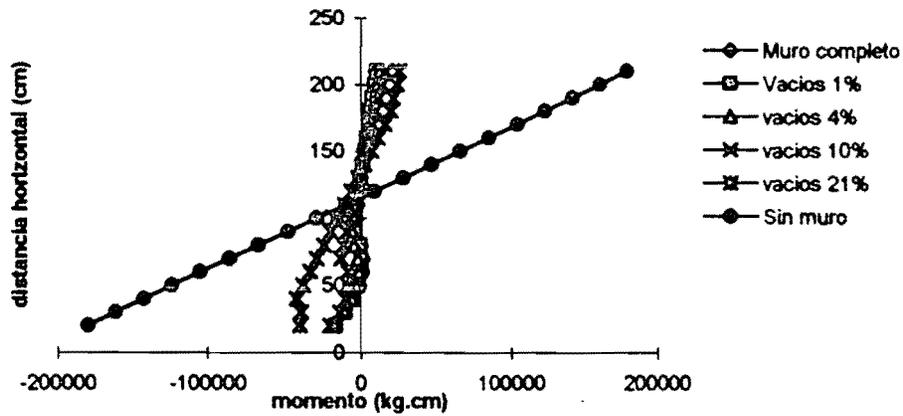
Cortantes en la Columna Derecha. Ventana izquierda



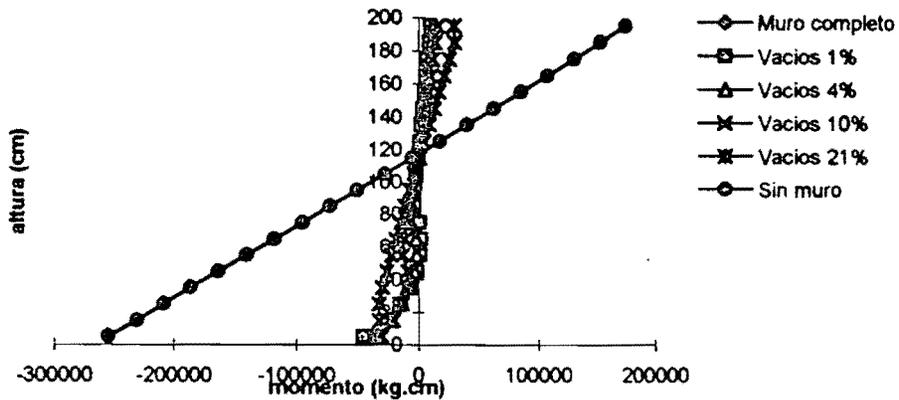
Momentos en la Columna Izquierda. Ventana derecha.



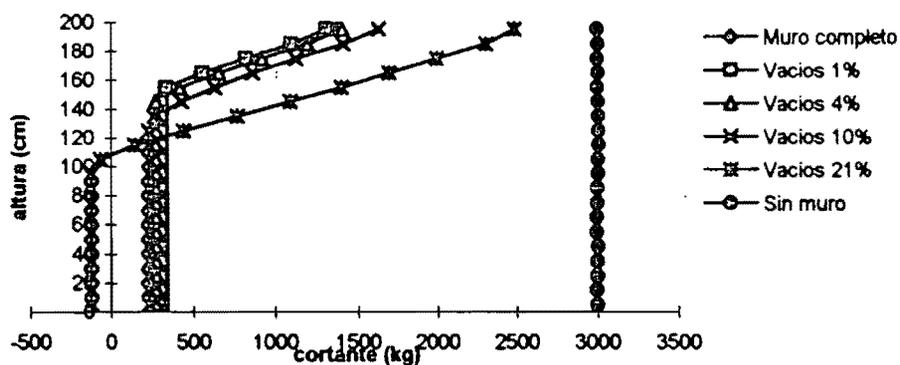
Momento en la trabe superior. Ventana derecha.



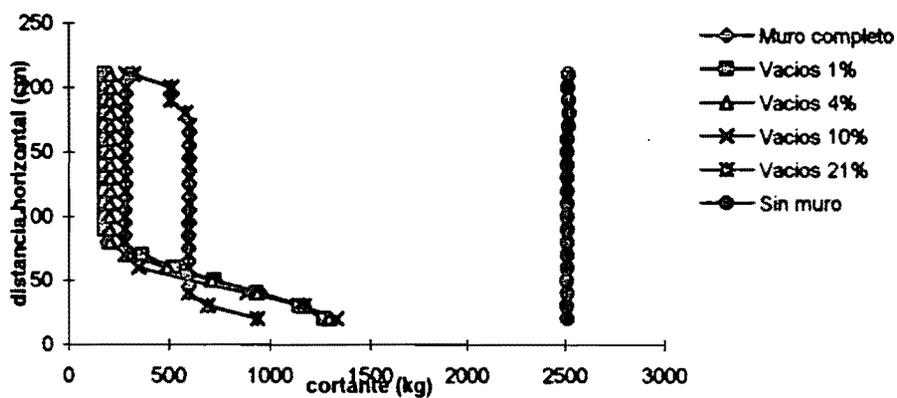
Momento en la columna derecha. Ventana derecha.



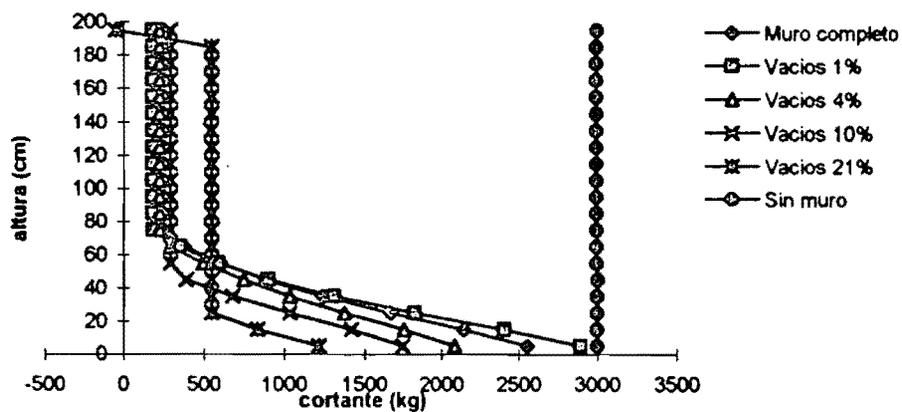
Cortante en la columna izquierda. Ventana derecha.



cortante en la trabe superior. Ventana derecha.

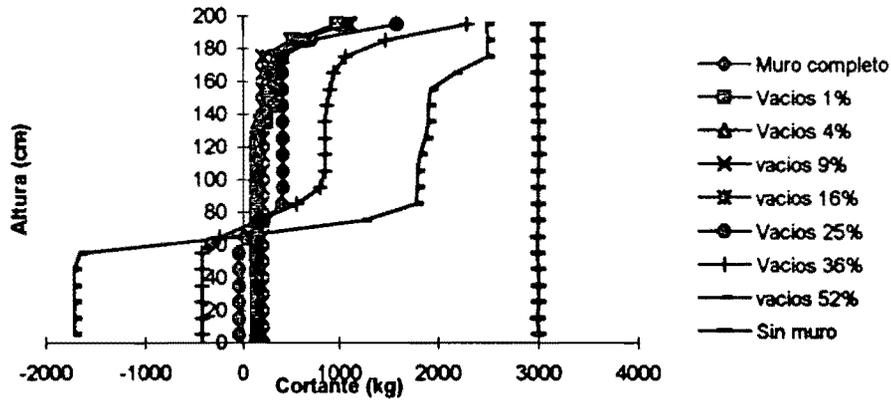


Cortantes en la columna derecha. Ventana derecha.

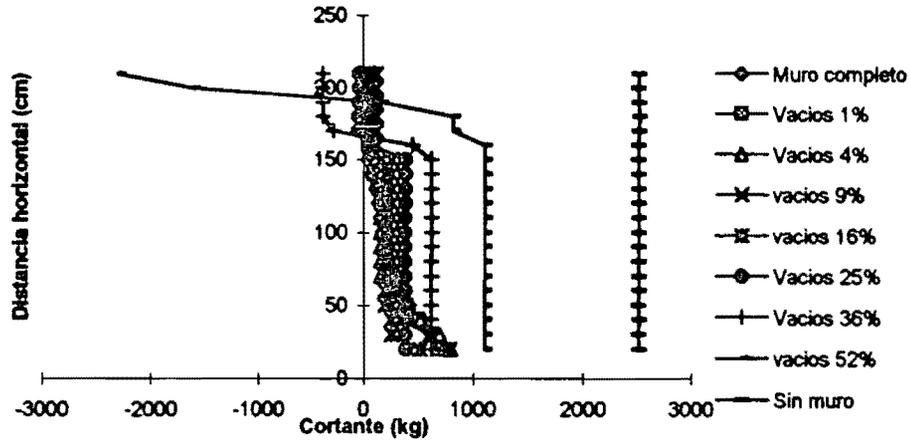


Ventanas tipo 2

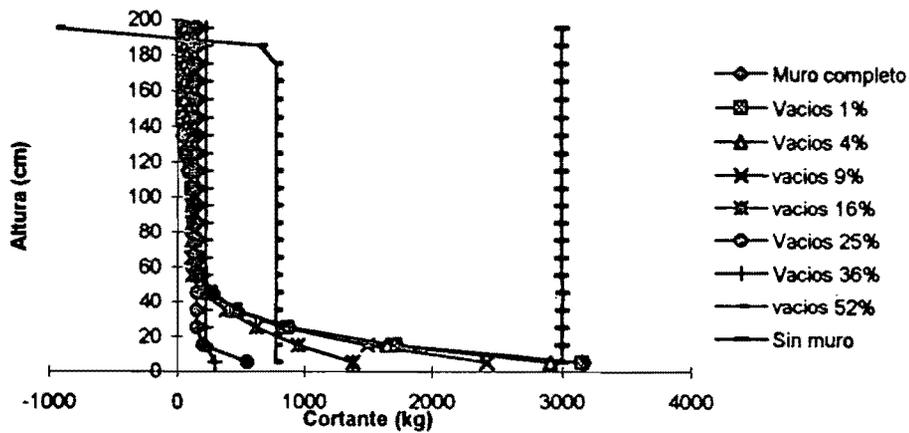
Cortantes en la Columna Izquierda. Ventana Centrada



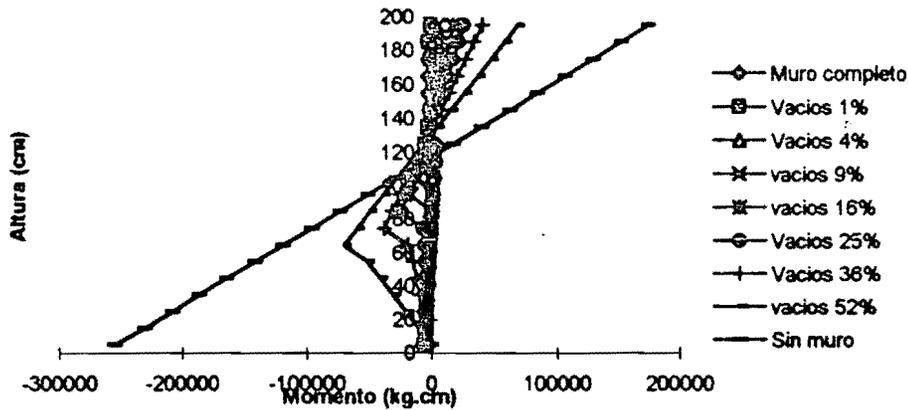
Cortantes en la Trabe Superior. Ventana Centrada



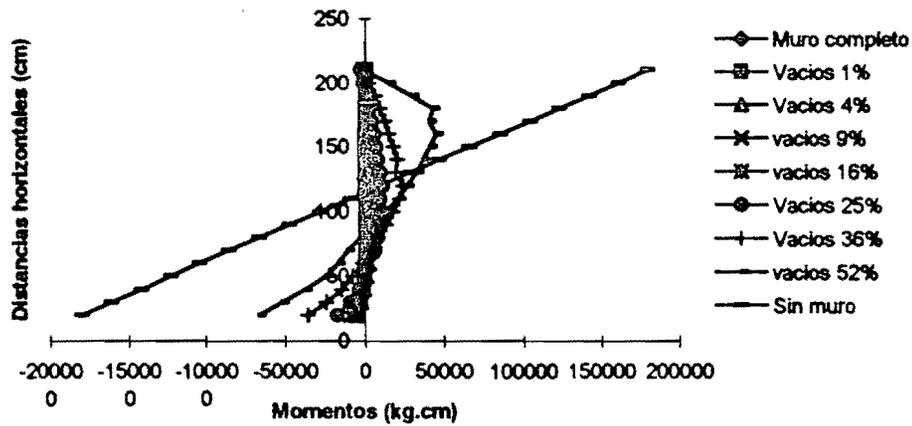
Cortante en la Columna Derecha. Ventana Centrada



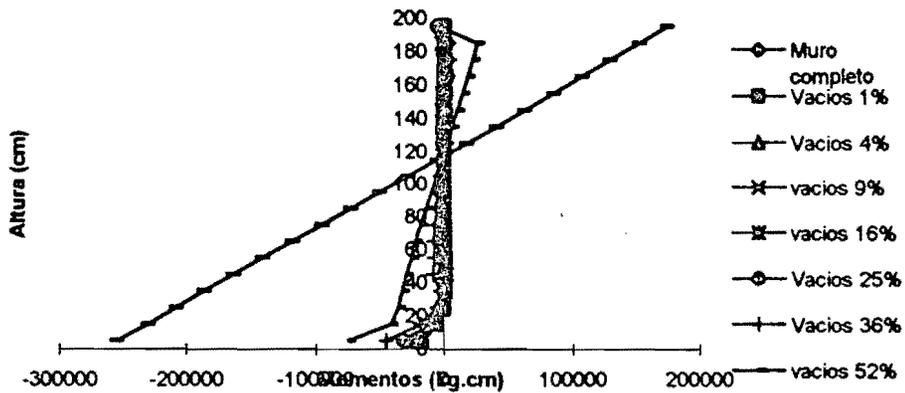
Momentos en la Columna Izquierda.Ventana Izquierda



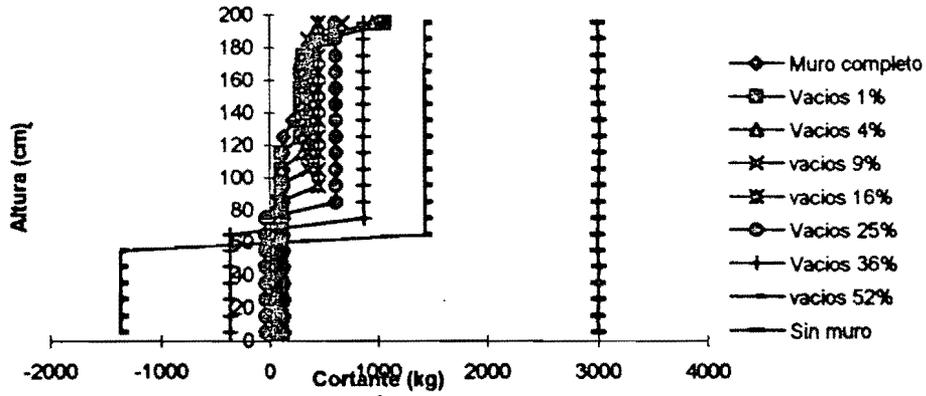
Momentos en la Trabe Superior.Ventana Izquierda



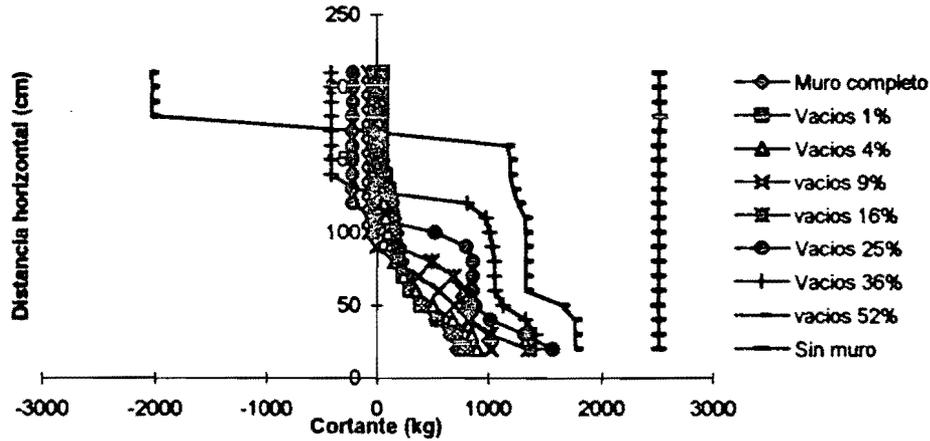
Momentos en la Columna Derecha.Ventana Izquierda



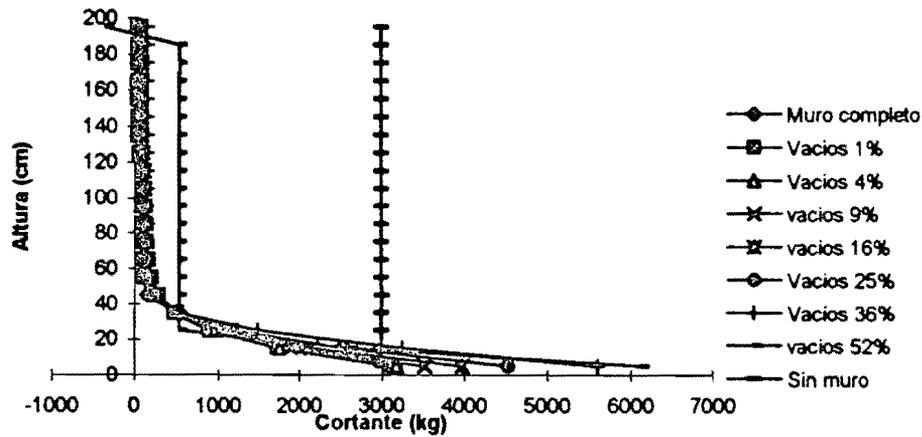
Cortantes en la Columna Izquierda. Ventana Izquierda



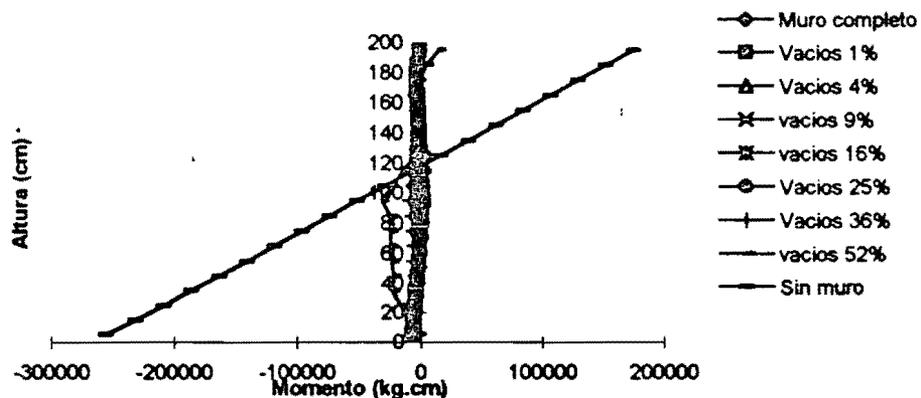
Cortantes en la Trabe Superior. Ventana Izquierda



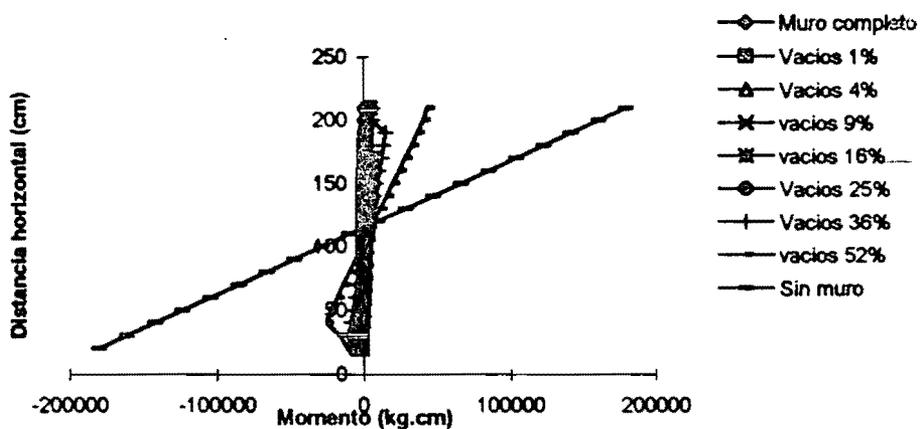
Cortantes en la Columna Derecha. Ventana Izquierda



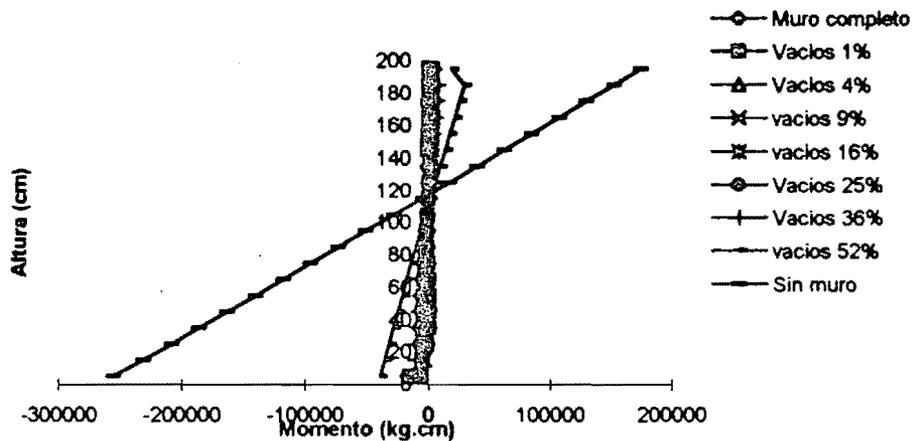
Momentos en la Columna Izquierda. Ventana Derecha



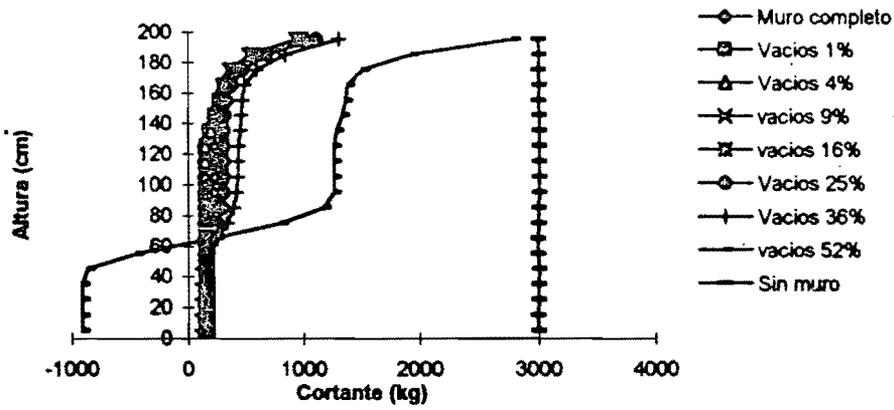
Momentos en la Trabe Superior. Ventana Derecha



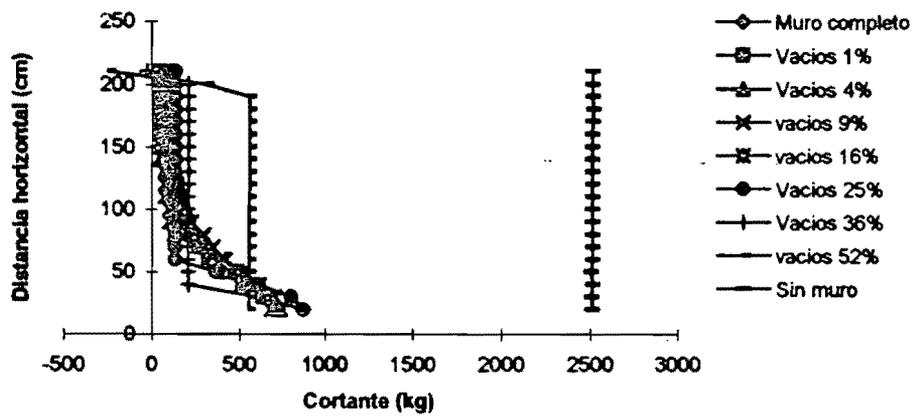
Momentos en la Columna Derecha. Ventana Derecha



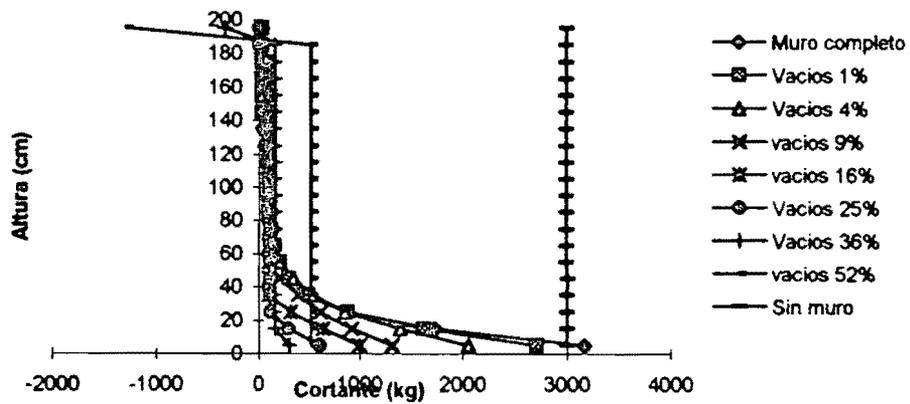
Cortantes en la Columna Izquierda.Ventana Derecha



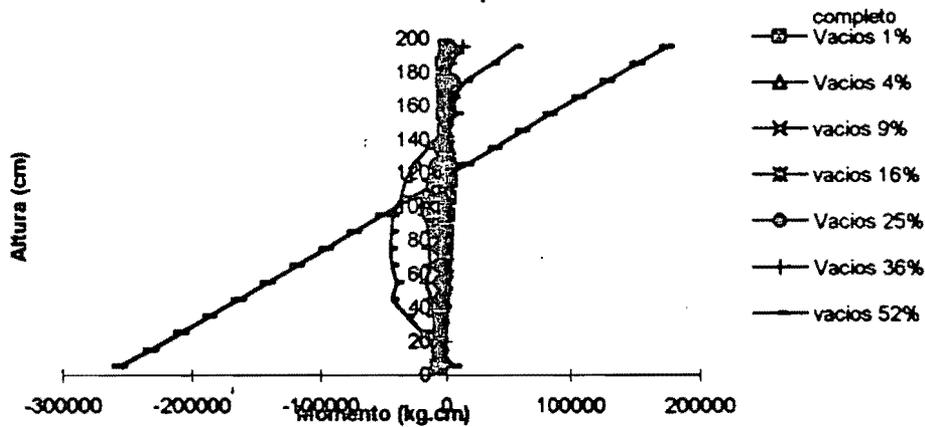
Cortantes en la Trabe Superior.Ventana Derecha



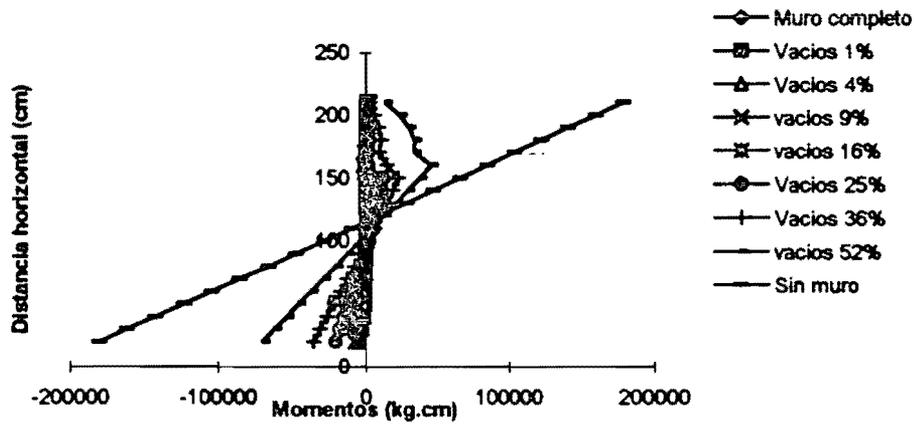
Cortantes en la Columna Derecha.Ventana Derecha



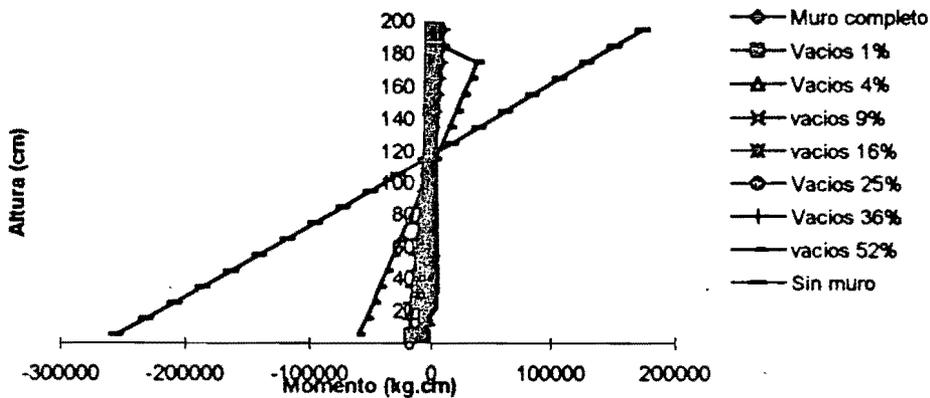
Momentos en la Columna Izquierda. Ventana Centrada



Momentos en la Trabe Superior. Ventana Derecha

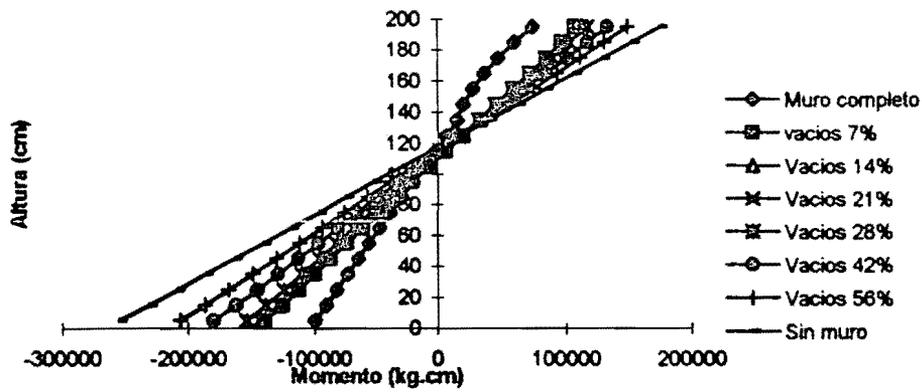


Momentos en la Columna Derecha. Ventana Centrada

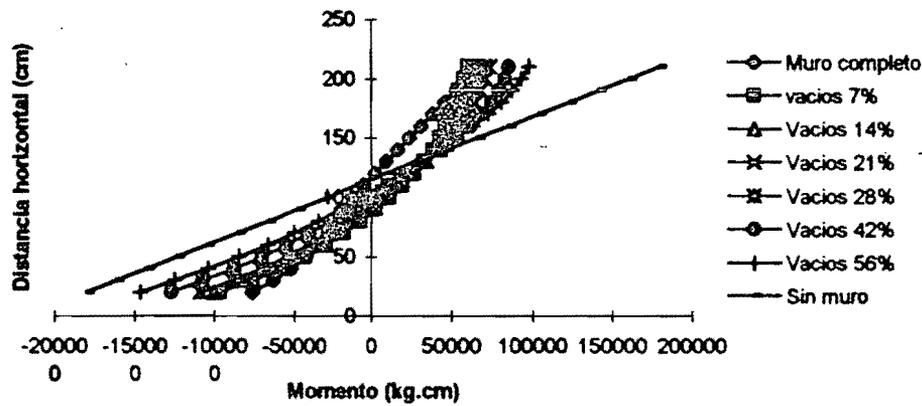


Puertas

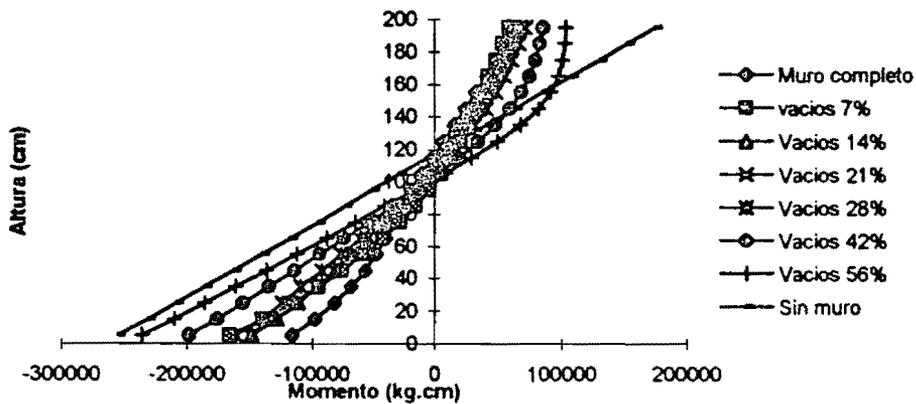
Momentos en la Columna Izquierda. Puerta centrada



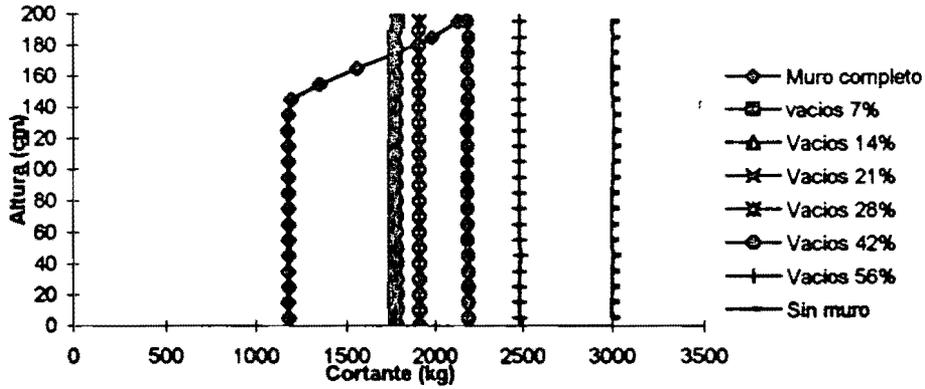
Momentos en la Trabe Superior. Puerta centrada



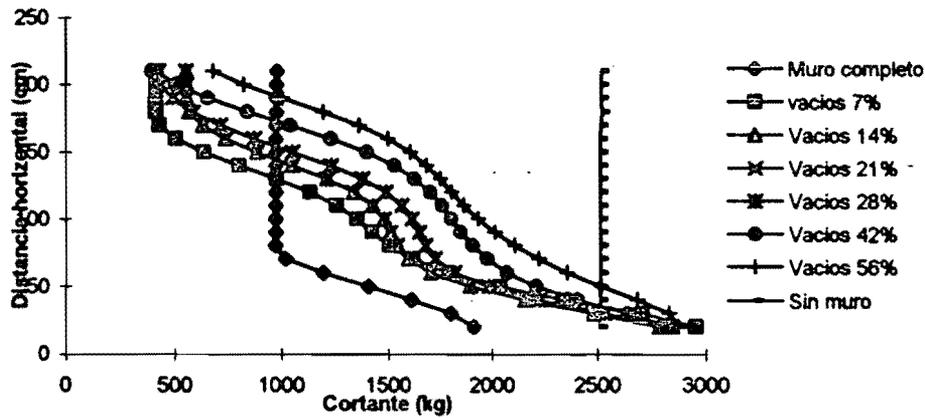
Momentos en la Columna Derecha. Puerta centrada



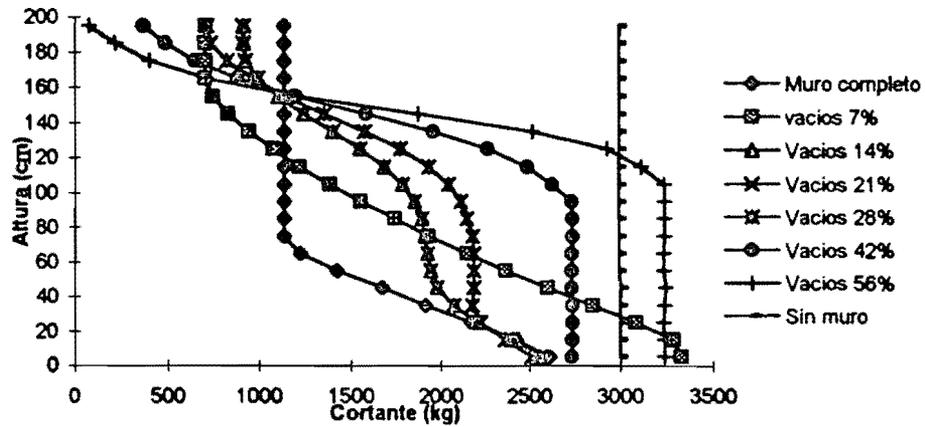
Cortantes en la Columna Izquierda. Puerta centrada



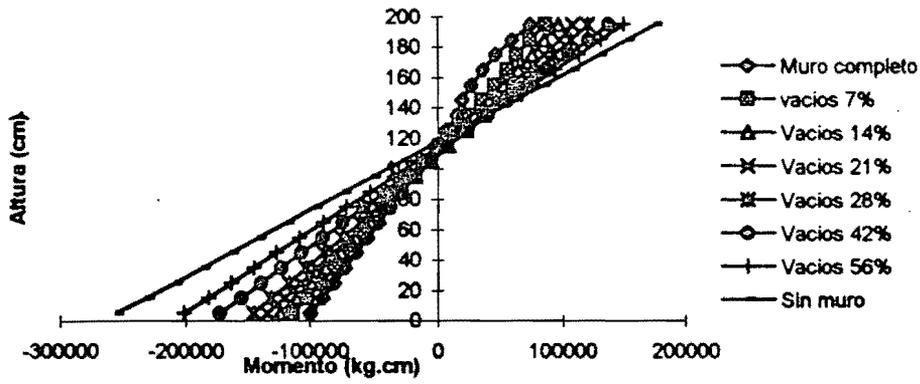
Cortantes en la Trabe Superior. Puerta centrada



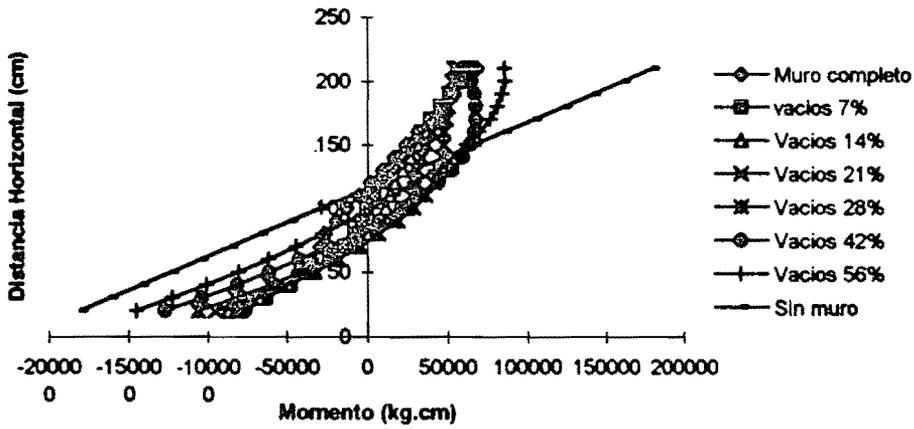
Cortantes en la Columna Derecha. Puerta centrada



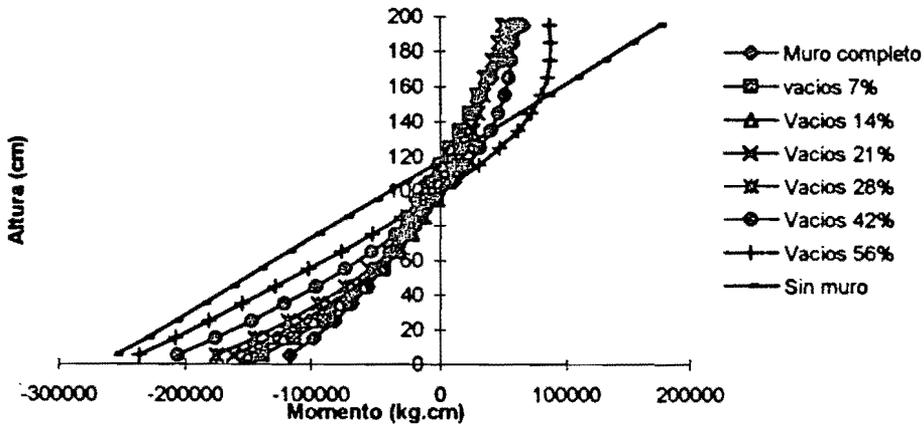
Momentos en la Columna Izquierda. Puerta Izquierda



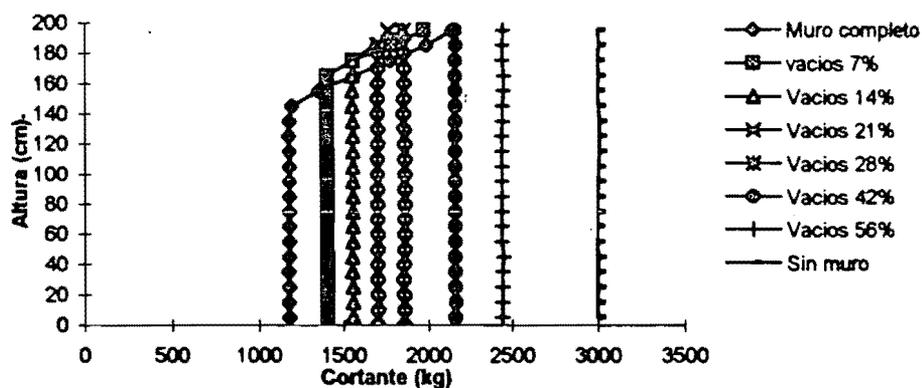
Momentos en la Trabe Superior. Puerta izquierda



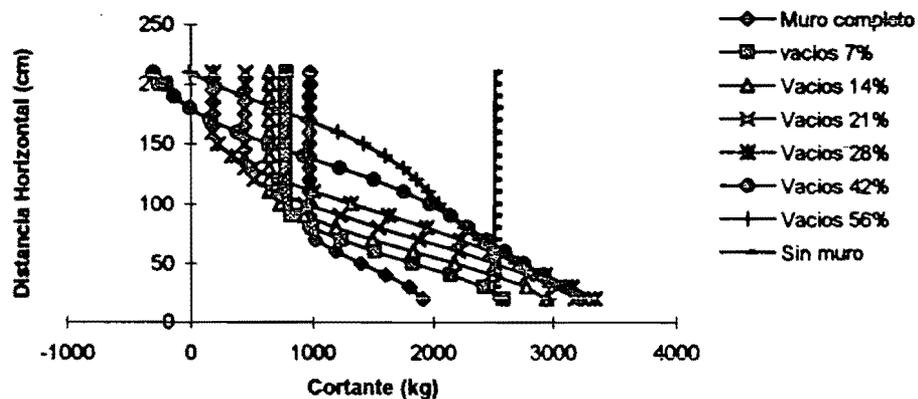
Momentos en la Columna Derecha. Puerta Izquierda



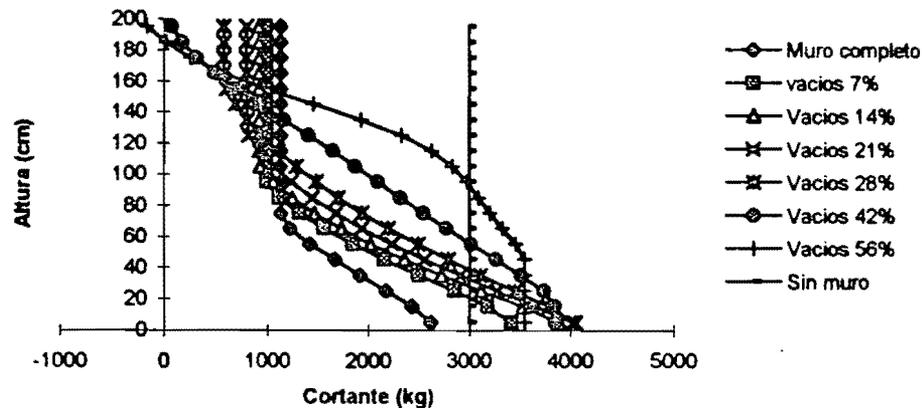
Cortante en la Columna Izquierda. Puerta Izquierda



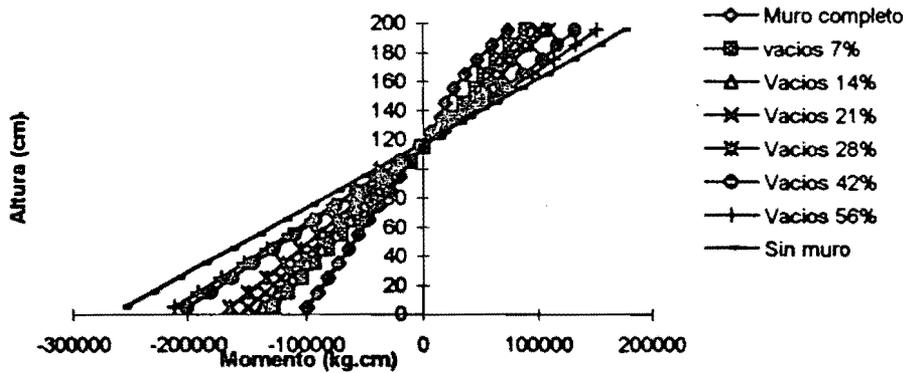
Cortante en la Trabe Superior. Puerta Izquierda



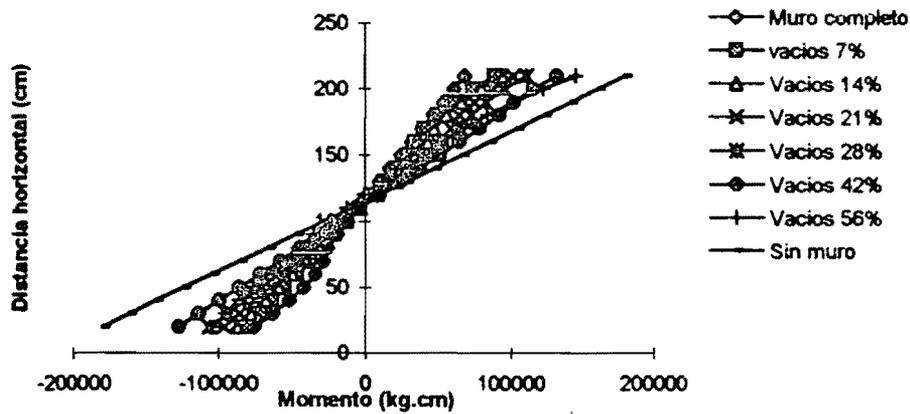
Cortantes en la Columna Derecha. Puerta Izquierda



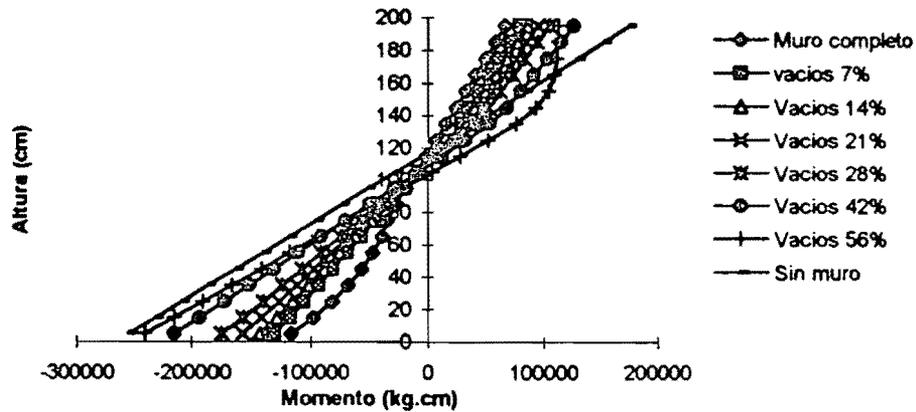
Momentos en la Columna Izquierda. Puerta derecha



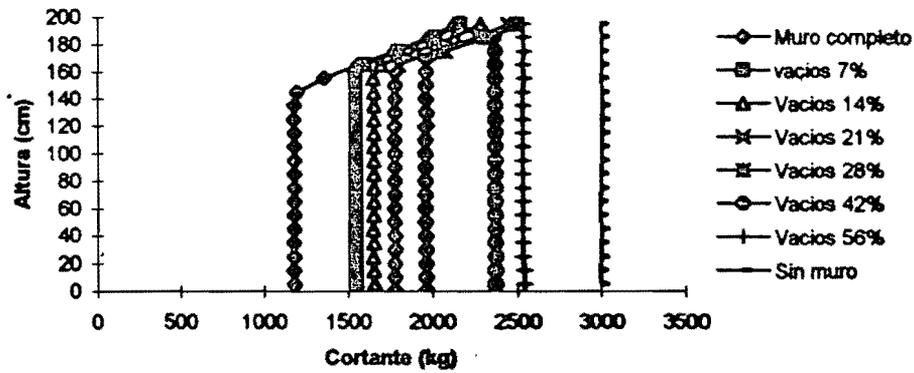
Momentos en la Trabe Superior. Puerta Derecha



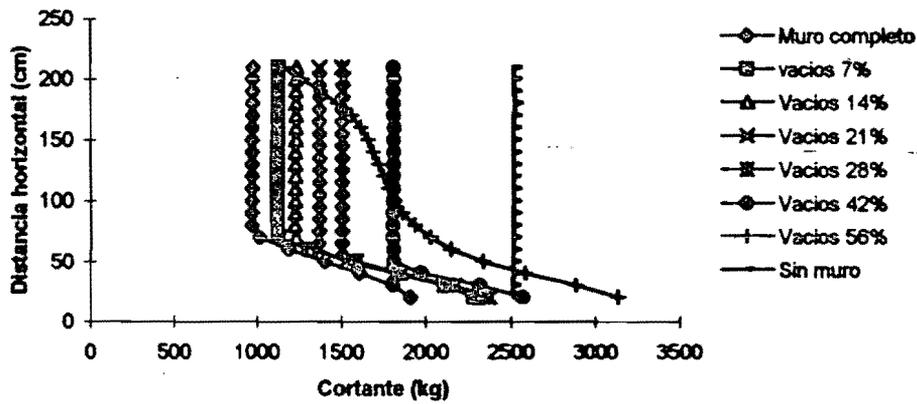
Momentos en la Columna Derecha. Puerta Derecha



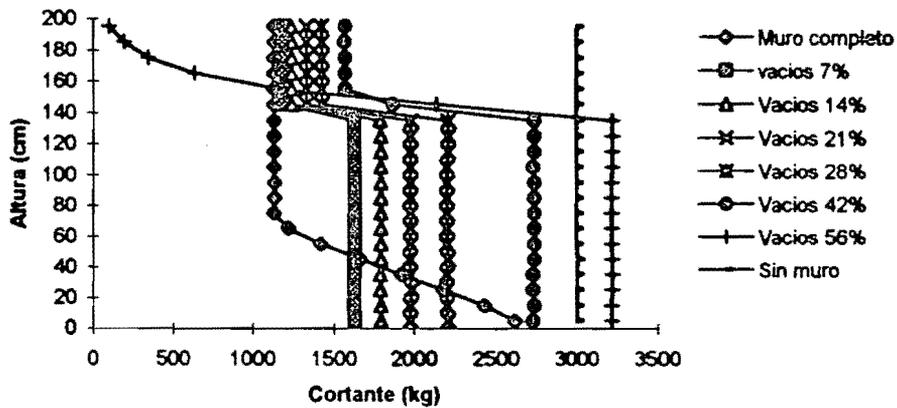
Cortantes en la Columna Izquierda. Puerta Derecha



Cortantes en la Trabe Superior. Puerta Derecha



Cortantes en la Columna Derecha. Puerta Derecha



Agradecimientos

Deseo expresar mi sincero agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada, la cual me permitió realizar los estudios de Maestría en la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, así como a la Dirección General de Intercambio Académico (DGIA) por el otorgamiento de la beca complementaria que me permitió llevar a buen término la realización de mi tesis. Asimismo, mi especial gratitud al Dr. Amado Gustavo Ayala Milián, director del trabajo de tesis, por su apoyo y guía y al Dr. Oscar López Bátiz, por sus valiosos comentarios. Agradezco también al Instituto de Ingeniería de la UNAM, por las instalaciones y recursos que contribuyeron tanto a la realización de la tesis como a mi formación académica. A los profesores de la DEPFI, mi reconocimiento y aprecio. Al Ing. Mario Gómez Mejía, director de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán y al Ing. Julio Baeza Balam, por su apoyo, ayuda y estímulo, los que contribuyeron a la realización de este sueño. A los compañeros y amigos que hicieron menos difícil el camino, GRACIAS.