

01161

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

“Propuesta de Modificación al Método Simplificado de Análisis Sísmico de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería”

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL (ESTRUCTURAS)

PRESENTA:

JESÚS CANO LICONA

DIRIGIDA POR:

DR. ARTURO TENA COLUNGA

Ciudad Universitaria. México, D.F., febrero de 2005

m. 341219



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A mis padres:

**José Dolores Cano, Margarita Licona (†), Gloria Cano Licona,
por todo su apoyo incondicional a lo largo de estos años**

**A mi hermano, Toño,
sirva este trabajo como motivación**

**A Norma, mi querida esposa,
y a Dany, Mich, Chuchito, Alexis, mi familia,
por permitirme robarles gran parte del tiempo
que por derecho les pertenece**

A Manuel, Mera, Adriana y Elena, por su apoyo y compañía

**A mi director de tesis, Dr. Arturo Tena Colunga,
por toda la atención y dedicación a este trabajo,
y sobre todo por su amistad**

A mis amigos:

**Hans, Miguel, Polo, Julio, Antinea, Luis, Efrén,
por toda su ayuda**

A mis sinodales,

**Dr. Roberto Meli, Dr. Arturo Tena, Dr. Óscar González Cuevas,
Dr. Amador Terán, M.I. Octavio García,
por su tiempo dedicado**

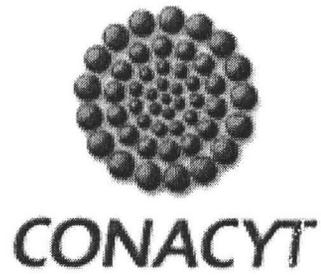
**A Dios,
por todo**

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la
UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el
contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Jesús Cano Licona

FECHA: 22 FEB 2005

FIRMA: [Firma manuscrita]



El presente trabajo se desarrolló gracias al apoyo del Conacyt

ÍNDICE

	Página
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Método simplificado de diseño según las Normas Técnicas para Estructuras de Mampostería de 1977	2
2. MÉTODO SIMPLIFICADO DE ANÁLISIS SEGÚN LAS NORMAS TÉCNICAS PARA ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA 2004	7
3. MÉTODO MATRICIAL DE DAMY PARA LA DETERMINACIÓN DE FUERZAS CORTANTES	12
3.1 Descripción del método	12
3.2 Modelado de los muros	17
3.3 Modelos en estudio	21
4. COMPARACIÓN DE LAS FUERZAS CORTANTES QUE ABSORBEN LOS MUROS EN MODELOS SIMÉTRICOS SEGÚN EL MÉTODO SIMPLIFICADO CON RESPECTO A LOS OBTENIDOS DE UN ANÁLISIS RIGUROSO, CONSIDERANDO QUE LOS MUROS TIENEN COMPORTAMIENTO ELÁSTICO LINEAL	23
4.1 Modelos en estudio	23
4.2 Evaluación del método simplificado según las NTCM-2004	28
4.3 Estudio de un nuevo Factor de Área Efectiva F_{AE}	33
4.4 Forma en que impactan las deformaciones por cortante	40
4.5 Propuesta de un nuevo Factor de área Efectiva F_{AE}	44
4.6 Conclusiones	52
5. COMPARACIÓN DE LAS FUERZAS CORTANTES QUE ABSORBEN LOS MUROS EN MODELOS SIMÉTRICOS SEGÚN EL MÉTODO SIMPLIFICADO CON RESPECTO A LOS OBTENIDOS DE UN ANÁLISIS RIGUROSO, CONSIDERANDO QUE TODOS LOS MUROS ESTÁN AGRIETADOS DE ACUERDO CON EL MODELO PROPUESTO POR BAZÁN Y MELI	54
5.1 Método de la columna ancha equivalente de Bazán y Meli	54
5.2 Comparación de fuerzas cortantes considerando F_{AE} según las NTCM-2004	55
5.3 Propuesta de un nuevo Factor de área Efectiva para muros agrietados en su totalidad F_{AETA}	67

6. COMPARACIÓN DE LAS FUERZAS CORTANTES QUE ABSORBEN LOS MUROS EN MODELOS SIMÉTRICOS SEGÚN EL MÉTODO SIMPLIFICADO CON RESPECTO A LOS OBTENIDOS DE UN ANÁLISIS RIGUROSO, CONSIDERANDO QUE EN EL EDIFICIO LOS MUROS DE LOS NIVELES INFERIORES ESTÁN AGRIETADOS DE ACUERDO CON EL MODELO PROPUESTO POR BAZÁN Y MELI	72
6.1 Comparación de fuerzas cortantes considerando F_{AE} según las NTCM-2004	73
6.2 Propuesta de un nuevo Factor de área Efectiva de edificios parcialmente agrietados F_{AEPA}	78
7. CONCLUSIONES	86
REFERENCIAS	92

1. Introducción

Las estructuras de mampostería se construyen esencialmente con base en muros, por lo que es importante evaluar el impacto específico que las deformaciones por cortante tienen, tanto en la ubicación de los centros de torsión de los edificios, como en la distribución de fuerzas cortantes entre los muros de cada entrepiso. También resulta importante calibrar la fuerza cortante asociada a cada muro con respecto a aquéllas que se obtienen aplicando el método simplificado tal y como se establece en las normas.

En el estudio previo al desarrollo de esta tesis (Tena y Pérez 2000), se comenzó a evaluar la importancia de las deformaciones por cortante en la ubicación de los centros de torsión de edificios mediante la determinación de excentricidades estáticas de cada entrepiso. Se compararon las diferencias que existen en las excentricidades estáticas obtenidas en dos situaciones: empleando la fórmula aproximada propuesta para el método simplificado en las NTCM-2004, y con las hipótesis sobre la matriz de rigidez lateral del muro conforme a las NTCM-2004; en ambos casos considerando y sin considerar las deformaciones por corte en cada una de ellas.

Se evaluó el caso común de edificios donde se tiene la misma distribución de muros en planta, pero en cada planta existen muros con distintas relaciones altura a longitud (H/L), lo que ocasiona que el impacto de las deformaciones por cortante en la rigidez lateral de cada muro sea distinto. Aquí es conveniente mencionar que esta forma de estructuración en planta es de uso común en los edificios de mampostería que se construyen en México, en particular en edificios de interés social y de interés medio.

Dicho estudio demuestra que las deformaciones por cortante tienen gran influencia en la ubicación de los centros de torsión de entrepiso de edificios que no sean totalmente simétricos en planta y en elevación. La ubicación de los centros de torsión puede variar notablemente entre los distintos entrepisos de edificios en que se tengan en planta muros con distintas relaciones H/L , a pesar de que dicha distribución de muros en planta sea idéntica en todos los niveles. Si dominan muros con $H/L < 1$ (muros cortos), las excentricidades estáticas calculadas tienden a incrementarse del último al primer nivel. Si dominan muros con $H/L > 1$ (muros esbeltos), las excentricidades estáticas calculadas tienden a incrementarse del primer al último nivel.

Un análisis más detallado de este fenómeno muestra que es el impacto que tienen las deformaciones por cortante en los grados de libertad de rotación de los muros lo que origina el cambio en los centros de torsión de entrepiso (Tena y Pérez 2000).

El estudio previo (Tena y Pérez 2000) también demuestra que la expresión aproximada propuesta actualmente por las NTCM-2004 para el cálculo de la excentricidad estática conforme al método simplificado da resultados razonables para modelos donde todos los muros tienen proporciones semejantes, es decir, relaciones de aspecto H/L aproximadamente iguales. Para sistemas dominados por muros de poca altura o muros robustos ($H/L < 1$), la expresión es conservadora, mientras que para sistemas dominados por muros esbeltos ($H/L > 1$), la expresión no es conservadora. Recuérdese del análisis estructural clásico, que es en elementos robustos donde se tiene una mayor influencia de las deformaciones por cortante, y que a medida que un elemento estructural es más esbelto, pueden desprejarse los efectos de corte, sin pérdida significativa de precisión en los resultados.

De lo anterior se desprende que quizá, para fines de análisis, debería calibrarse de mejor manera el factor de área efectiva F_{AE} propuesto en las ahora vigentes NTCM.

El presente estudio se concentra en comparar las fuerzas cortantes que toman los muros calculadas utilizando el método simplificado con respecto a aquéllas calculadas con un método riguroso. Como método riguroso, hemos seleccionado el método de Damy, en el cual se pueden tomar en cuenta las deformaciones por cortante, y hemos utilizado el método simplificado presentado en las Normas Técnicas Complementarias para Estructuras de Mampostería 2004, ahora vigentes. Con los resultados obtenidos, se tratará de encontrar expresiones para calcular factores de área efectiva asociados a distintos niveles de agrietamiento en los edificios. Se estudian tres estados de agrietamiento: estado sin agrietamiento, estado con agrietamiento en toda la altura del edificio y estado con agrietamiento en los niveles inferiores del edificio.

El método matricial de Damy se describirá con el detalle requerido en el Capítulo 3 de este trabajo, mientras que el método simplificado se comentará en el Capítulo 2.

Se presenta a continuación una descripción de cómo ha ido evolucionando el método simplificado a través de la normatividad vigente en su momento.

1.1 Método Simplificado de Diseño según las Normas Técnicas para Estructuras de Mampostería de 1977.

Se describe y comenta a continuación el Método Simplificado de Diseño presentado en el Capítulo 3 de las NTCM de 1977 (NTCM-77).

1.1.1 Alcance

Los procedimientos de diseño aquí presentados son aplicables a muros que cumplen las condiciones siguientes:

- a) Los materiales satisfacen los requisitos presentados en la sección 2 de las NTCM-77.
- b) Las deformaciones en los extremos superior e inferior del muro en la dirección normal a su plano están restringidas por el sistema de piso o por otros elementos.
- c) No hay excentricidades importantes (mayores que $t/6$) en la carga axial aplicada.
- d) La relación altura a espesor del muro no excede de 20.
- e) Los muros están confinados y reforzados para cumplir con los requisitos que se establecen para muros reforzados interiormente en 4.5.1b) y 4.5.1c) de las NTCM-77.

1.1.2 Resistencia de muros a cargas verticales.

La carga vertical que resiste un muro se determinará con la expresión siguiente:

$$P_R = F_R F_E f_m^* A_T \quad (1.1)$$

donde:

- | | |
|---------|--|
| A_T | es el área transversal bruta del muro |
| f_m^* | es la resistencia nominal en compresión de la mampostería, que se determina con base en 2.4.1 de las NTCM-77. |
| F_R | es el factor de reducción de resistencia, que se tomará como 0.6 |
| F_E | es un factor reductivo por excentricidad y esbeltez, que se tomará como 0.7 para muros interiores que soporten claros que no difieren en más de 50% y como 0.6 para muros extremos o con claros asimétricos y para casos en que la relación cargas vivas a cargas muertas de diseño excede de uno. Para muros que estén ligados a muros transversales con una separación no mayor de 3m los valores de F_E se tomarán como 0.8 y 0.9, respectivamente. |

La carga resistente así calculada se comparará con la carga total actuante obtenida considerando los factores de carga especificados por el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal de 1976, en su Título IV.

1.1.3 Resistencia de muros a cargas laterales.

La fuerza cortante resistente de diseño se calculará con la expresión

$$V_R = F_R(0.7\dot{v} A_T) \quad (1.2)$$

en que A_T es el área transversal bruta del muro, F_R se tomará como 0.6 y \dot{v} es el esfuerzo cortante nominal de la mampostería. Para muros confinados de acuerdo con 4.5.1b) de las NTCM-77 se tomará el valor de \dot{v} de la tabla adjunta. Para muros con refuerzo interior que cumpla con los requisitos de 4.5.1c) de las NTCM-77, se tomará \dot{v} igual a 1.5 veces el valor consignado en la tabla.

Tabla 1.1. Esfuerzo cortante nominal para algunos tipos de mampostería sobre área bruta (NTCM – 1977)

Pieza	Tipo de mortero	\dot{v} (1), en kg/cm ²
Tabique de barro recocido	I	3.5
	II y III	3
Tabicón de concreto ($f'_p > 80$ kg/cm ²)	I	3
	II y III	2
Tabique hueco de barro (2)	I	3
	II y III	2
Bloque de concreto tipo pesado	I	3.5
	II y III	2.5
<p>(1) Las piezas huecas deberán cumplir con los requisitos fijados en 2.1. Cuando el valor de la tabla sea mayor que $0.8\sqrt{f'_m}$ se tomará este último valor como \dot{v}_m.</p> <p>(2) Tabique de barro con perforaciones verticales pero con relación de áreas neta a bruta no menor de 0.45.</p>		

Deberá revisarse la falla por momentos flexionantes en el plano del muro, con base en lo especificado en 4.5.5 de las NTCM-77.

Las fuerzas actuantes debidas a sismo se calcularán de acuerdo a lo fijado en el capítulo XXXVII del Reglamento de 1976, en que se especifican distintas fuerzas sísmicas para muros de piezas macizas y huecas.

1.1.3 Algunos comentarios de las NTCM-77 y comparación con las actuales

Se presentan ahora algunos comentarios al texto escrito anteriormente.

Los requisitos impuestos para la aplicación del método simplificado pretenden evitar situaciones en que puedan presentarse momentos flexionantes importantes o efectos de esbeltez en los muros. Si se cumplen las condiciones impuestas, no es necesario hacer un análisis tomando en cuenta los momentos y excentricidades, sino que basta con determinar las cargas verticales sobre cada muro a partir de su área tributaria.

Para el análisis sísmico se puede aplicar el método simplificado presentado en el Reglamento, según el cual tampoco se requiere de un análisis por carga lateral de la estructura cuando se cumplen ciertas condiciones de altura y distribución de muros.

La aplicación del método simplificado se restringe a muros que tengan una cantidad mínima de refuerzo interior, o de castillos y dadas, para asegurar una ductilidad razonable cuando se llegue al agrietamiento ante eventos sísmicos. Para muros que no cumplan con estos requisitos, será necesario aplicar el método detallado de diseño.

La expresión que se propone en este método toma en cuenta, en forma burda y conservadora, el efecto benéfico que sobre la resistencia a cargas laterales tiene la fuerza axial aplicada al muro. La resistencia ante cargas laterales se expresa en términos de un esfuerzo cortante resistente de la mampostería, el cual depende de la pieza y del tipo de mortero.

Otro aspecto importante es que en el caso de las NTCM-77, los requisitos de aplicación del método simplificado no aparecen descritos dentro del cuerpo de las Normas Técnicas, como es en la actualidad, sino que se describen dentro del cuerpo principal del Reglamento de 1976. En el Artículo 238 se indica que deben de existir dos muros paralelos que cubran cuando menos 50% de la longitud de la construcción; también se imponen límites de altura y de relación de lados de la construcción.

En el Artículo 239 se presenta una tabla con los coeficientes sísmicos recomendados para la determinación de las fuerzas sísmicas que obran sobre la estructura según el tipo de suelo y el tipo de mampostería utilizado. En este artículo también se especifica que la contribución a la resistencia de muros cuya relación altura a longitud exceda de 1.33 debe reducirse afectándola por el coeficiente $(1.33 L/H)^2$.

Aquí llama la atención que el valor $(1.33 L/H)^2$ sea considerado como factor de reducción de resistencia a fuerzas laterales; en la actualidad se considera como un factor que afecta al área de la sección transversal del muro, y que indica qué porcentaje de esa área es la que contribuye a tomar la fuerza cortante, incluidos efectos de flexión, es decir, es el actual concepto de Factor de Área Efectiva. Cabe mencionar que este factor tiene involucrados efectos de flexión y efectos de corte.

Otra diferencia respecto a la normatividad actual es que en las NTCM-77 se maneja dentro del método simplificado lo relativo al análisis y diseño por cargas verticales, mientras que hoy en día se maneja por separado este análisis y el de cargas laterales. El factor de reducción para fuerza cortante tenía un valor de 0.6, mientras que la norma actual indica que puede tomarse como 0.7.

Otro punto fundamental, es que en el caso de las NTCM-77 no hay comentario alguno respecto a las posibles excentricidades torsionales, mientras que en la versión actual de las normas se especifica la forma de estimar tales excentricidades, en función también de los Factores de Área Efectiva de los muros que en cada entrepiso contribuyen a la resistencia a fuerzas laterales.

En cuanto al factor de reducción por esbeltez que interviene en la resistencia a cargas verticales, las NTCM-77 recomiendan valores en función de la posición del muro y de las cargas y claros que soporte, mientras que la norma actual proporciona valores recomendados, y expresiones que permiten calcular este valor tomando en cuenta otras variables, incluyendo posibles efectos de esbeltez. No se profundiza aquí sobre estos conceptos por ser nuestro tema enfocado a cargas laterales.

2. Método Simplificado de análisis según las Normas Técnicas Complementarias para Estructuras de Mampostería 2004.

El Método Simplificado de análisis se basa en la distribución de fuerzas laterales en estructuras con diafragmas rígidos, donde la distribución de las rigideces laterales de sus elementos resistentes es totalmente simétrica y la carga lateral se aplica en una sola dirección. El Método Simplificado ha sido la base para el análisis y diseño de estructuras de mampostería, ya que permite hacer el diseño y el análisis de la estructura de manera rápida y aproximada. De acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo vigentes, NTCS-2004, al aplicarse este método se hará caso omiso de los desplazamientos laterales, torsiones y momentos de volteo, y sólo se verificará que en cada piso la suma de las resistencias al corte de los muros de carga en la dirección que se considere actuando al sismo, sea mayor o cuando menos igual a la fuerza cortante que obra en dicho entrepiso.

Bajo estas hipótesis, existen varios aspectos importantes que pueden despreciarse sin tener un impacto significativo en la aplicación del método, como son (Tena 2001):

- la flexibilidad de diafragma
- efectos de esbeltez
- efectos de torsión
- efectos bidireccionales

Sin embargo, tal vez los dos que más se desprecian en estructuraciones comunes que cumplen con el Método Simplificado son los efectos de torsión y los efectos bidireccionales, además de las distorsiones de entrepiso.

En las normas vigentes hasta hace unos meses (NTCM-95), la torsión no estaba acotada de manera ingenieril en función de una excentricidad estática, como se ha indicado en el trabajo previo (Tena y Pérez, 2000). En el anteproyecto de norma (NTCM-2001) que se concretó en la norma actual (NTCM-2004), se establece una excentricidad estática del 10%, en congruencia con la limitación a estructuras regulares (apartado 6), pero este valor no se sustenta en ningún estudio y se ignora si este 10% es mucho o es poco.

Los requisitos para aplicar el Método Simplificado de análisis conforme a la sección 3.2.3.3 de las NTCM-2004, son los siguientes:

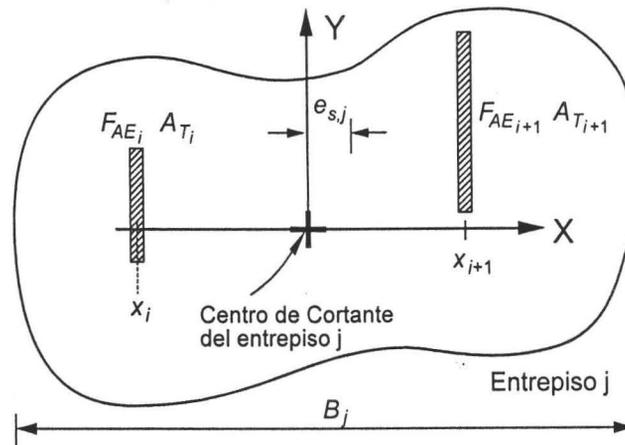
Será admisible considerar que la fuerza cortante que toma cada muro o segmento es proporcional a su área transversal, ignorar los efectos de torsión, de momento de volteo y de flexibilidad de diafragma, y emplear el Método Simplificado de diseño sísmico especificado en el Capítulo 7 de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo, cuando se cumplan los requisitos especificados en el Capítulo 2 de las Normas citadas y que son los siguientes:

- a) En cada planta al menos 75 por ciento de las cargas verticales están soportadas por muros ligados entre sí mediante losas monolíticas u otros sistemas de piso suficientemente resistentes y rígidos al corte. Dichos muros tendrán distribución sensiblemente simétrica con respecto a dos ejes ortogonales. Para ello, la excentricidad torsional calculada estáticamente, e_s , no excederá del diez por ciento de la dimensión en planta del entrepiso medida paralelamente a dicha excentricidad, B . La excentricidad torsional e_s podrá estimarse como el cociente del valor absoluto de la suma algebraica del momento de las áreas efectivas de los muros, con respecto al centro de cortante del entrepiso, entre el área efectiva total de los muros orientados en la dirección de análisis (figura 2.1). El área efectiva es el producto del área bruta de la sección transversal del muro, A_T , y el factor F_{AE} , que está dado por (ecuaciones 3.4, NTCM-2004):

$$F_{AE} = 1, \quad \text{si } \frac{H}{L} \leq 1.33 \quad (2.1)$$

$$F_{AE} = \left(1.33 \frac{L}{H}\right)^2, \quad \text{si } \frac{H}{L} > 1.33 \quad (2.2)$$

H es la altura libre del muro y L es la longitud efectiva del muro.



$$e_{s,j} = \frac{\left| \sum_{i=1}^n x_i F_{AE_i} A_{T_i} \right|}{\sum_{i=1}^n F_{AE_i} A_{T_i}} \leq 0.1 B_j \quad (3.2.3.3.a)$$

Figura 2.1 Requisito para considerar distribución simétrica de muros en una dirección (Figura 3.6, NTCM-2004)

- b) La relación entre longitud y ancho de la planta del edificio no excede de 2 a menos que, para fines de análisis sísmico, se pueda suponer dividida dicha planta en tramos independientes cuya relación longitud a ancho satisfaga esta restricción y las que se fijan en el inciso anterior, y cada tramo se revise en forma independiente en su resistencia a efectos sísmicos.
- c) La relación entre la altura y la dimensión mínima de la base del edificio no excede de 1.5 y la altura del edificio no es mayor de 13 m.

Como se comentó anteriormente y lo comenta Tena (2001), las restricciones se deben a las siguientes consideraciones. La limitante en e_s es para minimizar los efectos de torsión. La disposición de que el 75% de las cargas verticales sean soportadas por muros ligados entre sí por sistemas de piso rígidos y resistentes al corte es para garantizar que el sistema estructural principal sea a base de muros con diafragmas rígidos tanto para carga vertical como para carga lateral, y el que se observe esta condición para cada planta es para evitar que alguien piense utilizar el Método Simplificado en estructuraciones con piso débil, como sería el caso de condominios donde el primer nivel es de estacionamiento y se encuentre estructurado a base de marcos, mientras que en los pisos superiores se estructure a base de muros de mampostería. La disposición que exige que existan en cada dirección al menos dos muros de carga perimetrales de ciertas dimensiones

pretende garantizar un nivel de redundancia mínimo ante cargas laterales y proporcionar a la estructura cierta rigidez torsional.

La limitación en la relación de aspecto de la planta es para eliminar problemas potenciales por flexibilidad de diafragma, mientras que la limitación en la relación entre la altura y la dimensión mínima de la base es para minimizar potenciales efectos de esbeltez, como se ilustra en la figura 2.2.

En relación a la posibilidad de flexibilidad del diafragma, la restricción en la relación de aspecto de la planta de la estructura parece acotar razonablemente esta condición con respecto a lo que se ha observado en otros estudios disponibles en la literatura. La restricción en la relación de esbeltez de la estructura pretende acotar la condición relativa a los momentos de volteo de la estructura.

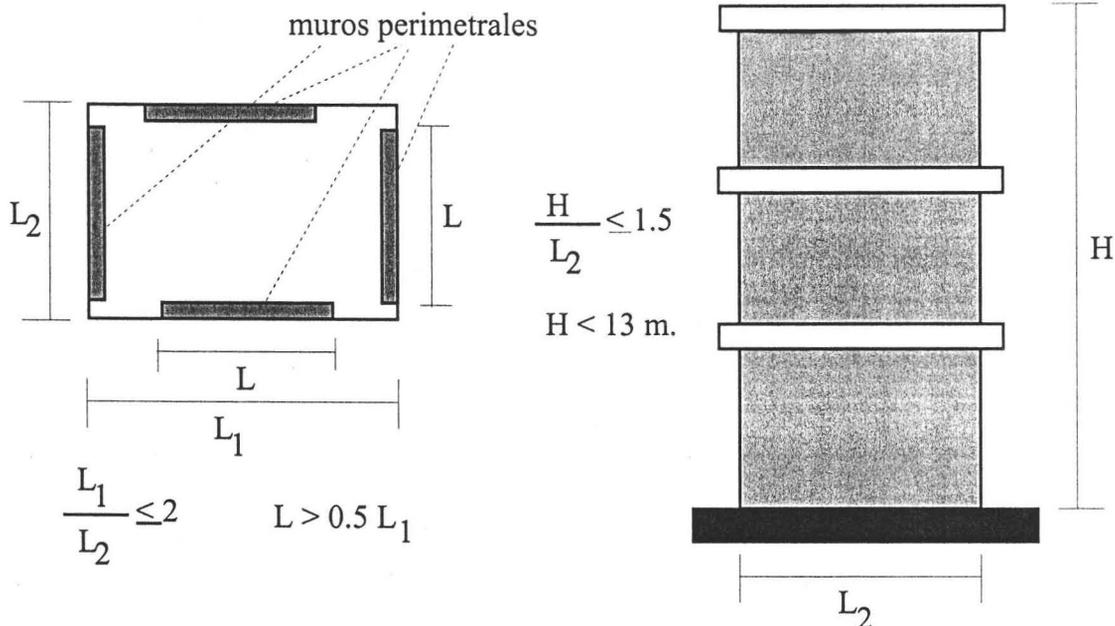


Figura 2.2 Ilustración de algunas disposiciones del Método Simplificado

En cuanto a los efectos bidireccionales, éstos pueden tomarse en cuenta indirectamente con los coeficientes sísmicos reducidos que se establecen en las NTCS 2004 para estructuras del grupo B.

Los coeficientes sísmicos reducidos para el Método Simplificado, correspondientes a estructuras del grupo B se presentan en la Tabla 7.1 de las NTCS-2004, que se reproduce aquí en la tabla 2.1:

Tabla 2.1 Coeficientes sísmicos reducidos para el Método Simplificado, correspondientes a estructuras del grupo B (Tabla 7.1, NTCS-2004)

Zona	Muros de piezas macizas y muros de concreto			Muros de piezas huecas		
	H<4m	4m≤ H<7m	7m≤H≤13m	H<4m	4m≤ H<7m	7m≤H≤13m
I	0.07	0.08	0.08	0.10	0.11	0.11
II y III	0.13	0.16	0.19	0.15	0.19	0.23

En general, estos son los requisitos que se presentan en las NTCM-2004 para la aplicación del Método Simplificado de Análisis y Diseño Sísmico.

En el presente trabajo, se estudiará el Factor de Área Efectiva dado en las ecuaciones 2.1 y 2.2, ya que como se ha mencionado, en estudios previos se demuestra que dicho factor no toma en cuenta de manera apropiada las deformaciones por cortante, las cuales tienen importancia significativa en la distribución de fuerzas cortantes en edificios en que se tiene distribución de muros similar en todas las plantas, pero distintas relaciones de aspecto para los muros de un mismo entrepiso. Se pretende proponer una nueva expresión para calcular el Factor de Área Efectiva que sí tome en cuenta lo anterior.

Comentar aquí sobre el nivel de agrietamiento al cual está asociado el método simplificado, es decir, a qué rigidez secante se asocia la distribución de fuerzas calculada con el actual factor de área efectiva.

3. Método matricial de Damy para la determinación de fuerzas cortantes

3.1 Descripción del Método

Con la finalidad de poder evaluar el impacto que las deformaciones por cortante tienen sobre las fuerzas cortantes, y hacer una comparación con las fuerzas cortantes que se obtienen de la aplicación del Método Simplificado propuesto por las NTCM-2004, se ha optado por usar el método propuesto por el Ing. Julio Damy Ríos en 1985 en la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Este método permite calcular matricialmente los centros de torsión de edificios con diafragma rígido, apoyándose en la matriz de rigidez lateral de los elementos que contribuyen a resistir las fuerzas laterales inducidas por sismo. A cada piso del edificio se asocian tres grados de libertad, dos correspondientes a los desplazamientos horizontales ortogonales, y uno correspondiente a la rotación del piso respecto a un eje vertical. La descripción del Método de Damy se basa en la hecha por Tena y Pérez (2000 y 2001).

En el presente estudio, son los muros los elementos que resisten las fuerzas laterales, y su matriz de rigidez lateral requerida por el método de Damy se obtiene por medio de una condensación estática de los grados de libertad (figura 3.1).

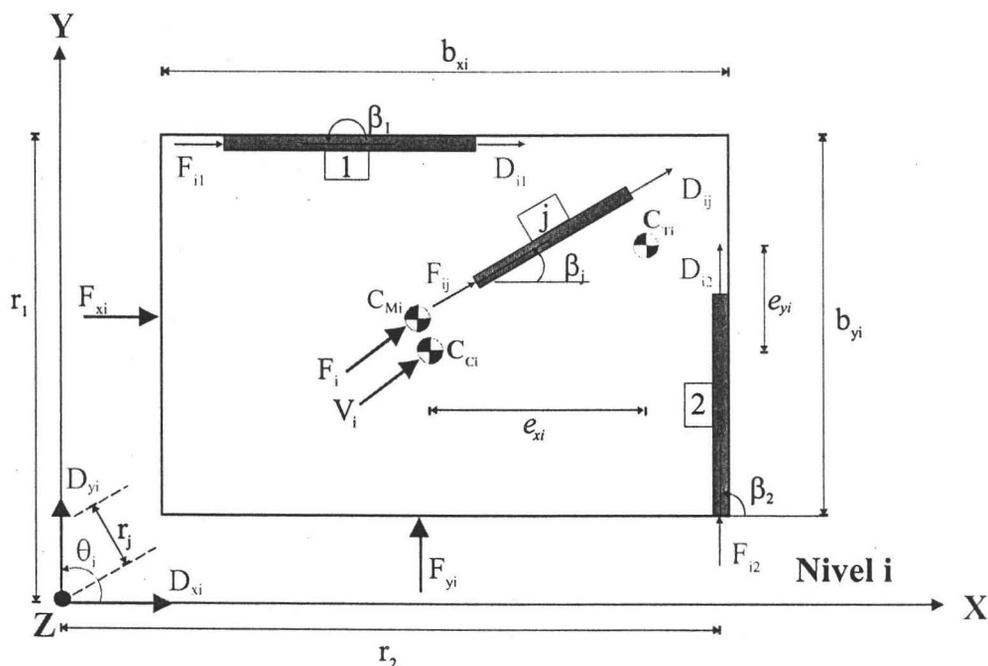


Figura 3.1. Sistema de piso del nivel i ésimo de una estructura cualquiera (Tena y Pérez, 2000)

Sea el sistema mostrado en la figura 3.1 correspondiente a una planta cualquiera del nivel i ésimo de un edificio de m niveles, referido a un sistema coordenado global único para la estructura

(X, Y, Z) . Denotemos por *muro j* a un muro cualquiera en ese nivel, cuya posición se define por los puntos $A_j(X_j, Y_j)$ y el ángulo β_j . Al muro *j* en el nivel *i* se le puede asociar un desplazamiento D_{ij} , en función de los tres grados de libertad del nivel *i*, es decir:

$$D_{ij} = D_{xi} \cos \beta_j + D_{yi} \sin \beta_j + \theta_j r_j \quad (3.1)$$

Geoméricamente, el vector de posición de cada muro *j* se determina por:

$$r_j = X_j \sin \beta_j - Y_j \cos \beta_j \quad (3.2)$$

En forma vectorial, se puede establecer para cada muro *j*:

$$\{D_j\} = \{D_x\} \cos \beta_j + \{D_y\} \sin \beta_j + \{\theta\} r_j \quad (3.3)$$

En el método de las rigideces, la solución del sistema está dada por:

$$\{F_j\} = [K_D]_j \{D_j\} \quad (3.4)$$

Al sustituir la ecuación 3.3 en la ecuación 3.4 se tiene:

$$\{F_j\} = [K_D]_j [\{D_x\} \cos \beta_j + \{D_y\} \sin \beta_j + \{\theta\} r_j] \quad (3.5)$$

El vector $\{F_j\}$ representa el conjunto de fuerzas laterales aplicadas al muro *j* asociadas a un vector de desplazamiento $\{D_j\}$.

Siendo $\{F_x\}$ el vector de fuerzas aplicado externamente al edificio, por equilibrio en cada nivel se obtiene que:

$$\{F_x\} = \sum_{j=1}^n \{F_j\} \cos \beta_j \quad (3.6)$$

$$\{F_y\} = \sum_{j=1}^n \{F_j\} \sin \beta_j \quad (3.7)$$

$$\{M_o\} = \sum_{j=1}^n \{F_j\} r_j \quad (3.8)$$

donde n representa el número de elementos resistentes a carga lateral del piso i .

Sustituyendo la ecuación 3.5 en las ecuaciones 3.6 a 3.8 se obtiene que las $3m$ ecuaciones del sistema están dadas por

$$\begin{Bmatrix} \{F_x\} \\ \{F_y\} \\ \{M_o\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [K_{xx}] & [K_{xy}] & [K_{x\theta}] \\ [K_{yx}] & [K_{yy}] & [K_{y\theta}] \\ [K_{\alpha x}] & [K_{\theta y}] & [K_{\theta\theta}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{D_x\} \\ \{D_y\} \\ \{\theta\} \end{Bmatrix} \quad (3.9)$$

donde:

$$[K_{xx}] = \sum_{j=1}^n [K_{Dj}] \cos^2 \beta_j \quad (3.10)$$

$$[K_{yy}] = \sum_{j=1}^n [K_{Dj}] \sen^2 \beta_j \quad (3.11)$$

$$[K_{xy}] = [K_{yx}] = \sum_{j=1}^n [K_{Dj}] \cos \beta_j \sen \beta_j \quad (3.12)$$

$$[K_{x\theta}] = [K_{\alpha x}] = \sum_{j=1}^n [K_{Dj}] r_j \cos \beta_j \quad (3.13)$$

$$[K_{y\theta}] = [K_{\theta y}] = \sum_{j=1}^n [K_{Dj}] r_j \sen \beta_j \quad (3.14)$$

$$[K_{\theta\theta}] = \sum_{j=1}^n [K_{Dj}] r_j^2 \quad (3.15)$$

La ecuación 3.9 puede escribirse nuevamente como:

$$\{F\} = [K_D] \{D\} \quad (3.16)$$

Como puede verse, esta ecuación representa la solución del sistema según el método de las rigideces. $[K_D]$ es la matriz de rigidez lateral del edificio, de orden $3m$; $[F_x]$ y $[F_y]$ representan los vectores de fuerzas laterales aplicadas al edificio, y $[M_o]$ representa el vector de momentos

que estas fuerzas generan respecto al centro coordinado único de todos los niveles. $\{D_x\}$ y $\{D_y\}$ representan los vectores de desplazamiento asociados las fuerzas laterales, y $\{\theta\}$ representa el vector de rotaciones de los diafragmas rígidos de cada uno de los niveles.

A partir del sistema de ecuaciones dado por la ecuación 3.9, Dany razonó que si lo que se pretende es obtener las coordenadas de los centros de torsión de los niveles, lo que se requiere es considerar que no existe rotación, es decir, $\{\theta\} = 0$, y si ésto se cumple, las fuerzas actuantes producirán exclusivamente traslaciones sin rotación alguna, lo que define el centro de torsión.

Para definir las coordenadas del centro de torsión, se debe obtener el vector de momentos $\{M_o\}$ que es necesario aplicar al edificio para que solamente existan desplazamientos $\{D_x\}$ y $\{D_y\}$ sin rotación $\{\theta\}$. Por tanto, si $\{\theta\} = 0$, el sistema de ecuaciones en 3.9 se reduce a:

$$\begin{Bmatrix} \{F_x\} \\ \{F_y\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [K_{xx}] & [K_{xy}] \\ [K_{yx}] & [K_{yy}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{D_x\} \\ \{D_y\} \end{Bmatrix} \quad (3.17)$$

$$\{M_o\} = [K_{\alpha x}]\{D_x\} + [K_{\theta y}]\{D_y\} \quad (3.18)$$

Por lo anterior, conviene descomponer al sismo en dos direcciones ortogonales (por ejemplo X, Y) para definir los centros de torsión, como se discute a continuación.

Para obtener las abscisas de los centros de torsión de los niveles, se considera que las fuerzas sísmicas son paralelas al eje Y , y por lo tanto:

$$\{F_x\} = \{0\} \quad (3.19)$$

$$\{F_y\} = \{F\} \quad (3.20)$$

donde $\{F\}$ es el vector de fuerzas sísmicas de entrepiso. Después de sustituir las ecuaciones 3.19 y 3.20 en la ecuación 3.17 y resolver el sistema, se obtienen los vectores $\{D_x\}$ y $\{D_y\}$, y substituyendo en la ecuación 3.18 se obtiene el vector $\{M_o\}$. La abscisa del centro de pseudotorsión de entrepiso x_{ti} , se calcula como:

$$x_{\bar{n}} = \frac{M_{O_i}}{F_{y_i}} \quad (3.21)$$

De acuerdo con *Damy*, se define como centro de pseudotorsión aquél que está ligado a las fuerzas laterales que actúan en un entrepiso. Por definición el centro de torsión es el punto de aplicación de la resultante de las resistencias de cada entrepiso, es decir, el punto por donde debe cruzar la línea de acción de la fuerza cortante sísmica para que el movimiento relativo de los dos niveles que limitan al entrepiso sea exclusivamente de traslación. Por lo tanto, para calcular las abscisas de los centros de torsión de entrepiso x_{T_i} se procede de la siguiente manera. Para el último nivel n se tiene que

$$x_{T_n} = x_{T_n} \quad (3.22)$$

mientras que para cualquier nivel i ésimo se tiene que:

$$X_{T_i} = \frac{V_{y_{i+1}} \cdot X_{T_{i+1}} + F_{y_i} \cdot X_{\bar{n}}}{V_{y_i}} \quad (3.23)$$

donde V_{y_i} es el cortante de entrepiso del nivel i , y n es el número total de niveles.

De manera similar a como se hizo en la dirección Y , para obtener las ordenadas de los centros de torsión de los niveles, considérese que las fuerzas sísmicas son paralelas al eje X , por lo tanto:

$$\{F_x\} = \{F\} \quad (3.24)$$

$$\{F_y\} = \{0\} \quad (3.25)$$

Así, substituyendo las ecuaciones 3.24 y 3.25 en la ecuación 3.17 y resolviendo el sistema, se obtienen los vectores $\{D_x\}$ y $\{D_y\}$, y substituyendo éstos en la ecuación 3.18 se obtiene el vector $\{M_o\}$. De esta manera, podemos calcular la ordenada del centro de pseudotorsión de entrepiso $y_{\bar{n}}$ como:

$$y_{\bar{n}} = \frac{-M_{O_i}}{F_i} \quad (3.26)$$

Análogamente a la dirección Y, para obtener las ordenadas de los centros de torsión de entrespiso y_{Ti} , se tiene que:

$$y_{Tn} = y_m \quad (3.27)$$

$$y_{Ti} = \frac{V_{xi+1}y_{Ti+1} + F_{xi} \cdot y_{Ti}}{V_{xi}} \quad (3.28)$$

donde V_{xi} es el cortante de entrespiso del nivel i , y n es el número total de niveles.

Como se menciona en párrafos anteriores, $\{M_o\}$ representa el vector de momentos generados por los vectores de fuerzas $[F_x]$ y $[F_y]$ externamente aplicadas al edificio, con respecto al centro único coordinado

3.2 Modelado de los muros

Como se mencionó al principio, el método de Damy requiere de las matrices de rigidez lateral de los elementos resistentes ante carga lateral; además, para nuestro estudio se requiere incluir el efecto de las deformaciones por cortante. Con base en lo anterior, se decidió modelar los muros como columnas anchas equivalentes, lo cual permite incluir directamente las deformaciones por cortante, y posteriormente obtener la matriz de rigidez lateral mediante una condensación estática de los grados de libertad de rotación, obteniéndose una viga condensada equivalente en función de los grados de libertad de desplazamiento lateral exclusivamente, como se muestra en la figura 3.2.

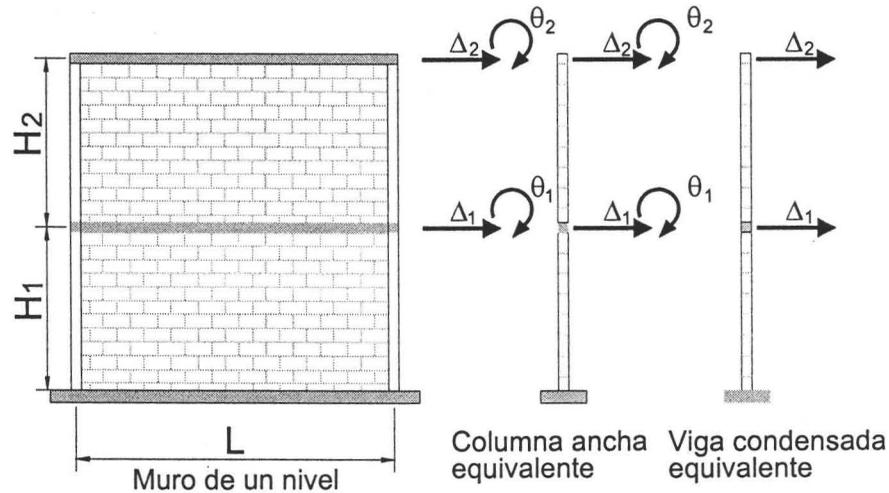


Figura 3.2. Modelado de muros

Se puede demostrar que la matriz de rigidez de una columna ancha equivalente bidimensional con dos grados de libertad por nudo en coordenadas locales $[k']$ es de la forma (Tena 1999):

$$[k'] = \begin{bmatrix} [k'_{11}] & [k'_{12}] \\ [k'_{21}] & [k'_{22}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{aax} & r_{abx} & -r_{aax} & r_{bax} \\ r_{abx} & r_{11x} & -r_{abx} & r_{12x} \\ -r_{aax} & -r_{abx} & r_{aax} & -r_{bax} \\ r_{bax} & r_{21x} & -r_{bax} & r_{22x} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

donde los coeficientes de rigidez están dados por:

$$r_{aax} = \frac{12EI_x}{h^3(1 + \phi_y)} \quad (3.30)$$

$$r_{abx} = r_{bax} = \frac{6EI_x}{h^2(1 + \phi_y)} \quad (3.31)$$

$$r_{11x} = r_{22x} = \frac{(4 + \phi_y)EI_x}{h(1 + \phi_y)} \quad (3.32)$$

$$r_{12x} = r_{21x} = \frac{(2 - \phi_y)EI_x}{h(1 + \phi_y)} \quad (3.33)$$

y las deformaciones por cortante están dadas adimensionalmente en función del coeficiente ϕ_y dado por:

$$\phi_y = \frac{12EI_x}{GA_{cy}h^2} = 24(1 + \nu) \frac{A}{A_{cy}} \left(\frac{r_x}{h} \right)^2 \quad (3.34)$$

G representa el módulo de rigidez a cortante del muro, A_{cy} es el área de cortante de la sección, ν es el coeficiente de Poisson del material del muro, E es el módulo de elasticidad, I_x el momento de inercia de la sección transversal del muro respecto al eje de flexión, y A es el área de su sección transversal. De la ecuación 3.34 se aprecia que las deformaciones por cortante dependen de la relación entre el radio de giro de la sección transversal r_x con respecto a la altura del muro h , y como el radio de giro es función de la longitud del muro L , es obvio que las deformaciones por cortante dependen de la relación de aspecto del muro, H/L , o de manera directa a partir de la ecuación 3.34, L/H , es decir, si se introduce un coeficiente α que nos da la fracción de L que define el radio de giro para una sección transversal dada, por ejemplo, para la sección transversal rectangular $\alpha = 0.287$, se tiene que la ecuación 3.34 puede escribirse nuevamente como:

$$\phi_y = 24(1 + \nu) \frac{A}{A_{cy}} \left(\frac{\alpha L}{h} \right)^2 \quad (3.35)$$

Por lo tanto, a medida que aumenta la altura del muro (muros esbeltos) se reduce el valor del coeficiente adimensional ϕ_y y su influencia se reduce notablemente, pero para muros cuadrados o robustos, h relativamente pequeña, se aumenta el valor de ϕ_y y su impacto es significativo en la determinación de la matriz de rigidez, y por ello no pueden despreciarse en la mayoría de los muros.

La matriz de rigidez global de los muros se obtienen a partir del ensamble de las matrices de rigidez de cada muro utilizando procedimientos convencionales, y haciendo las permutaciones necesarias se puede obtener la matriz de rigidez global del sistema en función de los grados de libertad de desplazamiento y de rotación, por lo que el sistema global asociado a la figura 3.2b estaría definido por:

$$\begin{Bmatrix} \{M_x\} \\ \{F_z\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [k_{\varphi\varphi}] & [k_{\varphi D}] \\ [k_{D\varphi}] & [k_{DD}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\varphi_x\} \\ \{D_z\} \end{Bmatrix} \quad (3.36)$$

donde $\{M_x\}$ y $\{F_z\}$ son los momentos flexionantes y fuerzas laterales externamente aplicados respectivamente, $\{\varphi_x\}$ y $\{D_z\}$ son los giros asociados a los momentos flexionantes y los desplazamientos asociados a las fuerzas laterales respectivamente, y $[k_{\varphi\varphi}]$, $[k_{\varphi D}]$, $[k_{D\varphi}]$ y $[k_{DD}]$ son las submatrices de rigidez asociadas a giros y desplazamientos laterales.

Para obtener la viga equivalente mostrada en la figura 3.2c, se necesita hacer una condensación estática del sistema de ecuaciones dado por la ecuación 3.36, de manera que los grados de libertad de giro se incluyan en la respuesta. Se puede demostrar a partir de la ecuación 3.36 (Tena 1999) que el sistema equivalente de la figura 3.2c está dado por:

$$\{F_z\} - [k_{D\varphi}][k_{\varphi\varphi}]^{-1}\{M_x\} = ([k_{DD}] - [k_{D\varphi}][k_{\varphi\varphi}]^{-1}[k_{\varphi D}])\{D_z\} \quad (3.37)$$

o escrito de otra forma:

$$\{F_z\} - [k_{D\varphi}][k_{\varphi\varphi}]^{-1}\{M_x\} = [K_D]\{D_z\} \quad (3.38)$$

donde $[K_D]$ es la matriz de rigidez lateral del muro, dada por:

$$[K_D] = [k_{DD}] - [k_{D\varphi}][k_{\varphi\varphi}]^{-1}[k_{\varphi D}] \quad (3.39)$$

De esta manera, las matrices de rigidez lateral de cada muro requeridas en el método de Damy se pueden calcular y programar fácilmente.

Para ilustrar lo complejo que es la participación de las deformaciones por cortante en la matriz de rigidez lateral de los muros, se presenta la forma de la matriz de rigidez lateral del muro de dos pisos de la figura 3.2 en función de los coeficientes de rigidez de cada entrepiso del muro, indicando con superíndices a qué entrepiso corresponde cada coeficiente. En Tena (1999) se demuestra que para el muro de la figura 3.2, la matriz de rigidez lateral está dada por:

$$[K_D] = \begin{bmatrix} k_{11D} & k_{12D} \\ k_{21D} & k_{22D} \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

donde:

$$[k_{11D}] = r_{aax}^1 + r_{aax}^2 - \frac{1}{\text{Det}_{\varphi\varphi}} \left\{ (r_{bax}^1 - r_{abx}^2) \left[(r_{bax}^1 - r_{abx}^2) r_{22x}^2 + r_{bax}^2 r_{12x}^2 \right] + (r_{bax}^2)^2 (r_{22x}^1 + r_{11x}^2) \right\} \quad (3.39)$$

$$[k_{12D}] = -r_{aax}^2 - \frac{1}{Det_{\phi\phi}} \left\{ (r_{bax}^1 - r_{abx}^2) (r_{abx}^2 r_{22x}^2 - r_{bax}^2 r_{12x}^2) + r_{bax}^2 [r_{abx}^2 r_{12x}^2 - r_{bax}^2 (r_{22x}^1 + r_{11x}^2)] \right\} \quad (3.40)$$

$$[k_{12D}] = [k_{12D}] \quad (3.41)$$

$$[k_{22D}] = r_{aax}^2 - \frac{1}{Det_{\phi\phi}} \left\{ (r_{abx}^2)^2 r_{22x}^2 - 2r_{abx}^2 r_{bax}^2 r_{12x}^2 + (r_{bax}^2)^2 (r_{22x}^1 + r_{11x}^2) \right\} \quad (3.42)$$

$$Det_{\phi\phi} = (r_{22x}^1 + r_{11x}^2) r_{22x}^2 - (r_{12x}^2)^2 \quad (3.43)$$

En síntesis, los muros se modelaron conforme a la condensación estática que se presenta en esta sección y se ilustra en la figura 3.2, y los detalles se presentan en Pérez (2000).

3.3 Modelos en estudio

Se seleccionaron edificios de mampostería tipo de tres y cinco niveles, con altura típica de entrepiso de 2.50 y 2.40 m respectivamente, cuya planta se presenta en la figura 3.3; los criterios empleados en su selección así como sus características más relevantes se enuncian a continuación.

En todos los casos, los muros de mampostería son de tabique de barro de 14 cm de espesor, con $E = 19.2 \text{ ton/cm}^2$ y $\nu = 0.25$; ϕ_y se calculó conforme a la ecuación 3.34 para considerar las deformaciones por cortante. Se consideró al edificio con uso de oficinas, y desplantado en terreno tipo III; por ser de piezas macizas y tener altura total menor a 13m se le asignó un coeficiente sísmico de 0.19. En el caso del edificio de cinco niveles, se seleccionó $h = 2.4\text{m}$ para que la altura total del edificio fuera de 12m, y se cumpliera con el requisito impuesto para el Método Simplificado en cuanto a altura del edificio, la cual debe de ser menor a 13m.

Se estudió el caso muy común de edificios construidos en México en que se tiene la misma distribución de muros en cada planta, pero en cada planta existen muros con distintas relaciones de aspecto H/L , lo que ocasiona que el impacto de las deformaciones por cortante en la rigidez lateral de cada muro sea distinto, como se puede deducir a partir de lo presentado en la sección 3.2. En la dirección Y se emplearon tres muros largos dispuestos simétricamente siempre, mientras que en la dirección X se emplearon seis muros, cuatro perimetrales y dos centrales.

Se consideraron cinco casos de estudio, en cada uno de los cuales se mantuvo fija la relación de aspecto del muro central, y se varió la relación de aspecto de los muros laterales. A los muros centrales se les asignó una relación de aspecto desde 0.50 hasta 2.50, a intervalos de 0.5, por lo

que los casos de estudio se denotan como: $H/L = 0.50$, $H/L = 1.00$, $H/L = 1.50$, $H/L = 2.00$ y $H/L = 2.50$.

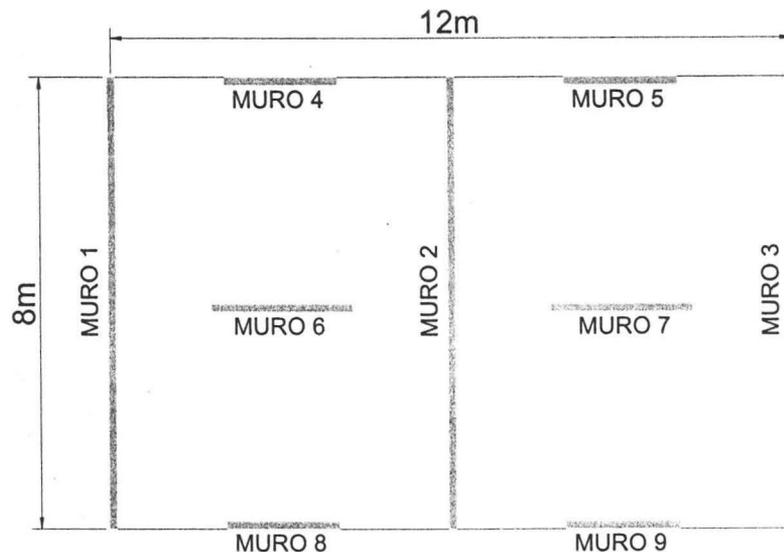


Figura 3.3. Planta tipo de los modelos en estudio

Ahora bien, para cada uno de estos casos de estudio, se dieron diferentes valores para la relación de aspecto de los muros laterales, iniciando con $H/L = 0.42$ hasta $H/L = 2.50$, por lo que en cada caso de estudio se tiene un total de 43 modelos diferentes. En total se obtienen 215 modelos, divididos en cinco casos de estudio. Se seleccionó este rango de valores para la relación H/L del muro central por considerar que dentro de este rango caen la mayoría de muros que se construyen en la realidad, desde muros muy robustos, con H/L menor, hasta muros esbeltos, con H/L mayor.

Cada uno de los distintos modelos se analizó con el Método de Damy, y con el Método Simplificado, expuestos en secciones anteriores. Además se repitió el mismo tipo de análisis para el edificio de cinco niveles.

Después de la etapa de análisis con cada uno de los métodos, se procedió a la comparación de fuerzas cortantes que toman los muros laterales en cada uno de los métodos utilizados. Se procedió a la representación de los resultados en forma gráfica, los cuales se presentan en detalle en capítulos posteriores.

Los vectores de fuerzas laterales asociados a cada uno de los edificios en estudio, se determinaron de acuerdo al análisis estático convencional presentado en el capítulo 7 de las NTC para diseño por Sismo 2004. No obstante la variación de la masa de cada entepiso debido a la variación de las relaciones de aspecto de los muros, se mantuvo el mismo vector de fuerzas laterales. Los vectores de fuerzas son los siguientes, para el caso del edificio de tres y cinco niveles:

$$F = \begin{cases} F_3 = 17.17\text{ton} \\ F_2 = 14.89\text{ton} \\ F_1 = 7.45\text{ton} \end{cases} \qquad F = \begin{cases} F_5 = 24.22\text{ton} \\ F_4 = 21.50\text{ton} \\ F_3 = 16.13\text{ton} \\ F_2 = 10.75\text{ton} \\ F_1 = 4.62\text{ton} \end{cases}$$

Se hicieron los análisis descritos anteriormente para tres condiciones de daño de cada uno de los edificios:

- Estado elástico: Ninguno de los muros presenta agrietamiento en toda su altura.
- Estado totalmente agrietado: Los muros se han agrietado en toda su altura y perdido rigidez.
- Estado parcialmente agrietado: En el caso del edificio de tres niveles, se consideró que sólo el primer nivel estaba agrietado y los otros dos permanecían elásticos; en el edificio de cinco niveles, se consideraron agrietados los dos primeros niveles, y el resto en estado elástico.

Para el modelado de los muros en estado agrietado, se siguieron las recomendaciones de Meli y Bazán. En los capítulos 4, 5 y 6 se explica la metodología correspondiente, y se presentan en detalle los resultados obtenidos.

4. Comparación de las fuerzas cortantes que absorben los muros en modelos simétricos según el Método Simplificado con respecto a los obtenidos con un análisis riguroso, considerando que los muros tienen comportamiento elástico lineal.

4.1 Modelos en estudio

En el estudio se consideraron las plantas tipo de los edificios que se ilustran en la figura 4.1 y 4.2. Se seleccionaron edificios de tres niveles, con altura de entrepiso típica de 2.50 m, y edificios de cinco niveles, con altura de entrepiso de 2.40 m. Ambas estructuras fueron seleccionadas a modo de que cumplieran los requisitos geométricos que se imponen en el Capítulo 2 de las Normas Técnicas para Diseño por Sismo, y en la sección 3.2.3.3 de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTCM-2004).

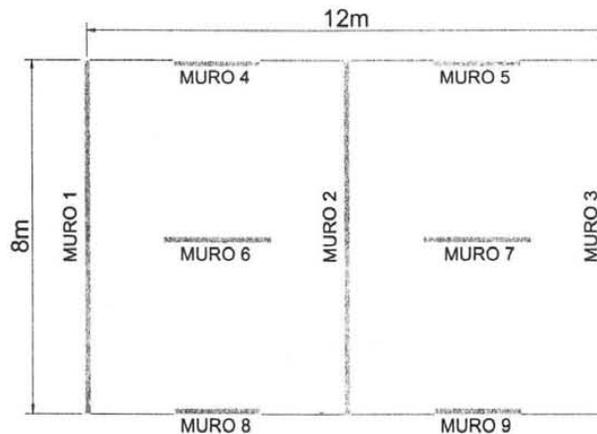


Figura 4.1. Planta típica de los modelos en estudio

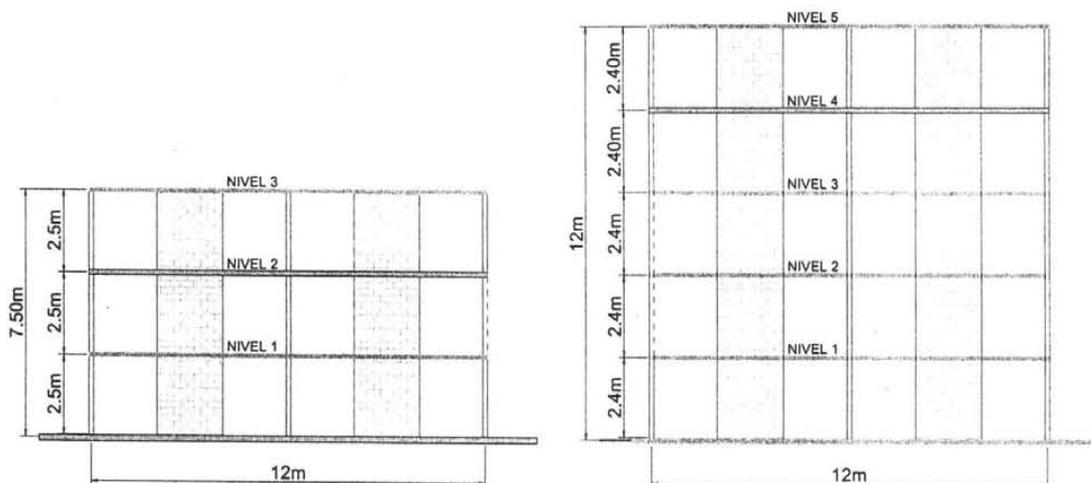


Figura 4.2. Edificios de tres y cinco niveles en elevación

Los muros se seleccionaron de tabique de barro con 14 cm de espesor, módulo de elasticidad de 19.2 ton/cm^2 y coeficiente de Poisson igual a 0.25. Todas las plantas presentan la misma distribución de muros que se aprecia en la figura 4.1. En dirección X se hizo variar la relación de aspecto H/L de los muros laterales y centrales, según se describe mas adelante, mientras que los muros en dirección Y se mantuvo constante durante todos los análisis.

Con la finalidad de visualizar la importancia que tienen las deformaciones por cortante en la distribución de fuerzas cortantes en muros, así como la influencia de tener distintas relaciones de aspecto de los muros de un mismo entrepiso, se variaron las relaciones de aspecto H/L de los muros centrales y laterales, para posteriormente analizar los edificios con dos métodos y comparar las fuerzas cortantes que se obtienen.

Para cada uno de los edificios de tres y cinco niveles, se consideraron cinco casos de estudio, el cual está indicado por la relación de aspecto del muro central, es decir, muros seis y siete. A este muro se le asignaron valores para la relación de aspecto desde $H/L=0.50$ hasta $H/L=2.50$, a incrementos de 0.5, por lo que los cinco casos de estudio son los que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4.1. Casos de estudio, representados por la relación de aspecto del muro central

Caso	H/L	H (m)	L (m)	t (m)	A (m ²)	I (m ⁴)
1	0.50	2.50	5.00	0.14	0.7000	1.4583
2	1.00	2.50	2.50	0.14	0.3500	0.1823
3	1.50	2.50	1.67	0.14	0.2333	0.0540
4	2.00	2.50	1.25	0.14	0.1750	0.0228
5	2.50	2.50	1.00	0.14	0.1400	0.0117

Para cada uno de los casos de estudio indicados anteriormente, se hizo variar la relación de aspecto de los muros laterales, es decir, muros cuatro, cinco, ocho y nueve, por lo que en cada caso de estudio H/L tuvo el mismo valor para estos cuatro muros. En el caso del edificio de tres niveles, el rango de valores de H/L cubiertos por cada caso de estudio fue desde $H/L=0.42$ hasta $H/L=2.50$, mientras que en el edificio de cinco niveles el rango fue de $H/L=0.40$ hasta $H/L=2.50$. En ambos edificios, el incremento de H/L es de 0.05. Se seleccionó este rango de valores debido a que cubre la mayoría de los muros que usualmente se encuentran en los edificios de mampostería.

Para proceder a los análisis realizados, se calcularon las propiedades geométricas y mecánicas de cada uno de los muros, a fin de integrar la información requerida para el Método de Damy y el Método Simplificado. Las propiedades principales se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 4.2. Casos de estudio, representados por la relación de aspecto del muro central. Edificio de tres niveles.

H/L	H (m)	L (m)	t (m)	A (m ²)	I (m ⁴)
0.42	2.50	5.95	0.14	0.8333	2.4605
0.45	2.50	5.56	0.14	0.7778	2.0005
0.50	2.50	5.00	0.14	0.7000	1.4583
0.55	2.50	4.55	0.14	0.6364	1.0957
0.60	2.50	4.17	0.14	0.5833	0.8439
0.65	2.50	3.85	0.14	0.5385	0.6638
0.70	2.50	3.57	0.14	0.5000	0.5315
0.75	2.50	3.33	0.14	0.4667	0.4321
0.80	2.50	3.13	0.14	0.4375	0.3560
0.85	2.50	2.94	0.14	0.4118	0.2968
0.90	2.50	2.78	0.14	0.3889	0.2501
0.95	2.50	2.63	0.14	0.3684	0.2126
1.00	2.50	2.50	0.14	0.3500	0.1823
1.05	2.50	2.38	0.14	0.3333	0.1575
1.10	2.50	2.27	0.14	0.3182	0.1370
1.15	2.50	2.17	0.14	0.3043	0.1199
1.20	2.50	2.08	0.14	0.2917	0.1055
1.25	2.50	2.00	0.14	0.2800	0.0933
1.30	2.50	1.92	0.14	0.2692	0.0830
1.35	2.50	1.85	0.14	0.2593	0.0741
1.40	2.50	1.79	0.14	0.2500	0.0664
1.45	2.50	1.72	0.14	0.2414	0.0598
1.50	2.50	1.67	0.14	0.2333	0.0540
1.55	2.50	1.61	0.14	0.2258	0.0490
1.60	2.50	1.56	0.14	0.2188	0.0445
1.65	2.50	1.52	0.14	0.2121	0.0406
1.70	2.50	1.47	0.14	0.2059	0.0371
1.75	2.50	1.43	0.14	0.2000	0.0340
1.80	2.50	1.39	0.14	0.1944	0.0313
1.85	2.50	1.35	0.14	0.1892	0.0288
1.90	2.50	1.32	0.14	0.1842	0.0266
1.95	2.50	1.28	0.14	0.1795	0.0246
2.00	2.50	1.25	0.14	0.1750	0.0228
2.05	2.50	1.22	0.14	0.1707	0.0212
2.10	2.50	1.19	0.14	0.1667	0.0197
2.15	2.50	1.16	0.14	0.1628	0.0183
2.20	2.50	1.14	0.14	0.1591	0.0171
2.25	2.50	1.11	0.14	0.1556	0.0160
2.30	2.50	1.09	0.14	0.1522	0.0150
2.35	2.50	1.06	0.14	0.1489	0.0140
2.40	2.50	1.04	0.14	0.1458	0.0132
2.45	2.50	1.02	0.14	0.1429	0.0124
2.50	2.50	1.00	0.14	0.1400	0.0117

Tabla 4.3. Casos de estudio, representados por la relación de aspecto
del muro central. Edificio de cinco niveles

H/L	H (m)	L (m)	t (m)	A (m ²)	I (m ⁴)
0.40	2.40	6.00	0.14	0.8400	2.5200
0.45	2.40	5.33	0.14	0.7467	1.7699
0.50	2.40	4.80	0.14	0.6720	1.2902
0.55	2.40	4.36	0.14	0.6109	0.9694
0.60	2.40	4.00	0.14	0.5600	0.7467
0.65	2.40	3.69	0.14	0.5169	0.5873
0.70	2.40	3.43	0.14	0.4800	0.4702
0.75	2.40	3.20	0.14	0.4480	0.3823
0.80	2.40	3.00	0.14	0.4200	0.3150
0.85	2.40	2.82	0.14	0.3953	0.2626
0.90	2.40	2.67	0.14	0.3733	0.2212
0.95	2.40	2.53	0.14	0.3537	0.1881
1.00	2.40	2.40	0.14	0.3360	0.1613
1.05	2.40	2.29	0.14	0.3200	0.1393
1.10	2.40	2.18	0.14	0.3055	0.1212
1.15	2.40	2.09	0.14	0.2922	0.1060
1.20	2.40	2.00	0.14	0.2800	0.0933
1.25	2.40	1.92	0.14	0.2688	0.0826
1.30	2.40	1.85	0.14	0.2585	0.0734
1.35	2.40	1.78	0.14	0.2489	0.0656
1.40	2.40	1.71	0.14	0.2400	0.0588
1.45	2.40	1.66	0.14	0.2317	0.0529
1.50	2.40	1.60	0.14	0.2240	0.0478
1.55	2.40	1.55	0.14	0.2168	0.0433
1.60	2.40	1.50	0.14	0.2100	0.0394
1.65	2.40	1.45	0.14	0.2036	0.0359
1.70	2.40	1.41	0.14	0.1976	0.0328
1.75	2.40	1.37	0.14	0.1920	0.0301
1.80	2.40	1.33	0.14	0.1867	0.0277
1.85	2.40	1.30	0.14	0.1816	0.0255
1.90	2.40	1.26	0.14	0.1768	0.0235
1.95	2.40	1.23	0.14	0.1723	0.0218
2.00	2.40	1.20	0.14	0.1680	0.0202
2.05	2.40	1.17	0.14	0.1639	0.0187
2.10	2.40	1.14	0.14	0.1600	0.0174
2.15	2.40	1.12	0.14	0.1563	0.0162
2.20	2.40	1.09	0.14	0.1527	0.0151
2.25	2.40	1.07	0.14	0.1493	0.0142
2.30	2.40	1.04	0.14	0.1461	0.0133
2.35	2.40	1.02	0.14	0.1430	0.0124
2.40	2.40	1.00	0.14	0.1400	0.0117
2.45	2.40	0.98	0.14	0.1371	0.0110
2.50	2.40	0.96	0.14	0.1344	0.0103

De las tablas anteriores se deduce que por cada uno de los cinco casos de estudio, se obtuvieron 43 modelos, correspondientes a un valor de la relación H/L de los muros laterales. Cada uno de los 43 modelos se analizó con el Método de Damy y con el Método Simplificado de las NTCM-2004, con el fin de obtener valores de la fuerza cortante en los muros laterales, y poder comparar las fuerzas obtenidas con cada método. Lo anterior se realizó para los edificios de tres y cinco niveles aquí presentados.

El análisis de cada estructura consistió en someter al edificio a un conjunto de fuerzas laterales representando la acción del sismo. Se consideró el coeficiente sísmico reducido igual a 0.19 indicado en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo 2004 para estructuras cuya altura oscile entre los 7 y 13 metros construidas con piezas macizas. Únicamente se consideró el sismo actuando en la dirección X, ya que, como se ha mencionado, la distribución de muros en dirección Y se mantuvo constante.

En todos los análisis se utilizó el mismo vector de fuerzas laterales, pese a que el valor de las relaciones de aspecto de los muros cambia y, por ende, los pesos de los entresijos. Ésto se hizo con la finalidad de comparar los distintos modelos sometidos ante el mismo vector de fuerzas, y centrar la atención en el efecto de tener distintas relaciones de aspecto en los muros, así como en las deformaciones por cortante.

4.2 Evaluación del Método Simplificado según las NTCM-2004

La primera etapa de análisis consistió en tomar el *Factor de Área Efectiva* (F_{AE}) tal como lo proponen las Normas Técnicas Complementarias. En la expresión 3.4 de las Normas Técnicas Complementarias de Estructuras de Mampostería se propone:

$$F_{AE} = 1, \quad \text{si } \frac{H}{L} \leq 1.33 \quad (4.1)$$

$$F_{AE} = \left(1.33 \frac{L}{H}\right)^2, \quad \text{si } \frac{H}{L} > 1.33 \quad (4.2)$$

H es la altura libre del muro en el entresijo considerado y L es la longitud efectiva del muro.

De acuerdo al Método Simplificado, la fuerza cortante que toma cada muro es directamente proporcional a su área efectiva, es decir:

$$V_{ui} = V_u \frac{F_{AE_i} A_{T_i}}{\sum_{i=1}^n F_{AE_i} A_{T_i}} \quad (4.3)$$

siendo A_{T_i} el área transversal del muro i , V_u el cortante de entrepiso en la dirección de análisis, y n el número de muros en la dirección considerada.

De la expresión 4.2, se deduce que a los muros esbeltos, con relación H/L mayor que 1.33, se les asocia menor fuerza cortante, mientras que para los muros poco esbeltos o robustos (ec. 4.1), cuya relación H/L es menor o igual que 1.33, ocurre lo contrario, es decir, absorben mayor cantidad de fuerza cortante, pretendiendo tomar en cuenta de manera indirecta el efecto de las deformaciones por cortante, ya que como se sabe, éstas tienen mayor influencia en elementos robustos, mientras que para elementos esbeltos, el efecto es casi despreciable.

Como se mencionó en el párrafo anterior, la expresión 4.2 asigna a muros esbeltos una menor participación de la fuerza cortante de entrepiso. Sin embargo, se ignoran los detalles del procedimiento empleado para definir este factor de reducción. Por lo tanto, y con la finalidad de obtener una expresión realista para el F_{AE} en función de las relaciones de aspecto de los muros, se realizaron los primeros análisis considerando el Factor de Área Efectiva tal como se indica en las ecuaciones 4.1 y 4.2, para posteriormente compararlos con los análisis utilizando el método riguroso que incluye las deformaciones por cortante (Método de Damy) y, a partir de la comparación de los resultados obtenidos entre el Método Simplificado y el Método de Damy, definir cómo puede ser el F_{AE} de manera que permita obtener mejores aproximaciones de las fuerzas cortantes con el Método Simplificado para un espectro más amplio de relaciones de aspecto H/L .

Por lo tanto, en los primeros análisis, se consideró que $H/L = 1$ para los muros centrales, y se varió la relación H/L de los muros laterales, desde $H/L = 0.42$, hasta $H/L = 2.50$ con incrementos de H/L a cada 0.05, valores que comprenden una buena gama de los valores reales usados en la práctica, desde muros robustos, hasta muros esbeltos.

Con esta información y con ayuda de programas de computadora desarrollados ex profeso para este estudio, se hicieron 43 análisis, cada uno de ellos con el riguroso Método de Damy y con el Método Simplificado de las Normas Técnicas Complementarias. Procesando los resultados obtenidos en cada método, se trazaron las gráficas mostradas a continuación. En el eje de las ordenadas se grafica la relación de fuerzas cortantes obtenidas para los muros laterales, es decir, la fuerza cortante obtenida según el Método de Damy (VD) dividida entre la fuerza cortante

obtenida con el Método Simplificado (VS). En el eje de las abscisas se grafica el valor de H/L de los muros laterales.

De la figura 4.3, en que $H/L = 1$ para el muro central, se notan resultados importantes, que se comentan a continuación.

En primer lugar, $VD/VS = 1$ indica que las fuerzas cortantes obtenidas con el Método Simplificado son iguales a las fuerzas cortantes obtenidas con el Método de Damy sólo cuando todos los muros del mismo entrepiso tienen igual relación H/L .

A medida que los muros laterales son más robustos, y con ello las deformaciones por cortante más importantes, observamos que el Método Simplificado subestima las fuerzas cortantes en los muros.

Esta subestimación es distinta para cada uno de los niveles del edificio, llegando a ser del orden de 22% para el tercer nivel del edificio, mientras que para el primer nivel, que es el crítico de diseño, la subestimación es del orden del 10%.

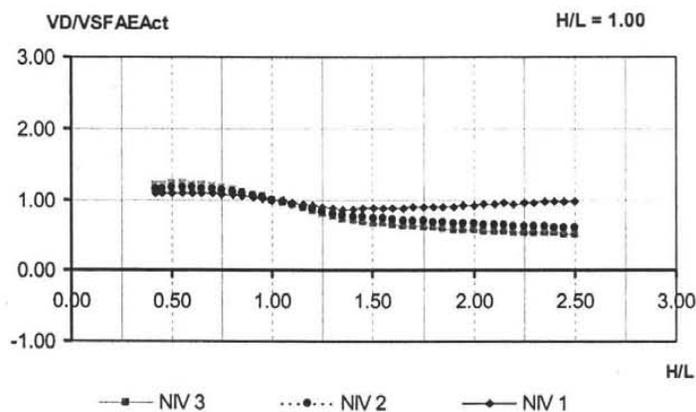


Figura 4.3. Comparación de fuerzas cortantes cuando la relación $H/L = 1$ para el muro central, y tomando F_{AE} reglamentario según NTCM-2004.

Por otro lado, a medida que la relación de aspecto de los muros crece, es decir, muros esbeltos, ocurre lo contrario. El Método Simplificado sobre estima las fuerzas cortantes en los muros, y como se ve en la figura 4.3, el entrepiso en consideración tiene gran importancia, pues tiende a sobre estimarse más en los niveles superiores que en los inferiores.

En todos los niveles, la sobre estimación de fuerzas inicia desde que H/L del muro central es mayor a uno, aunque en el nivel uno, como se ve en la figura 4.3, la sobre estimación tiende a disminuir a medida que se tienen relaciones de aspecto correspondientes a muros esbeltos. No obstante, en

los niveles superiores la sobre estimación de fuerzas cortantes aumenta, aún cuando se tiende a relaciones de aspecto de muros esbeltos, y la fuerza cortante obtenida con el método simplificado correspondiente al nivel tres llega a ser el doble de la que se calcula con el método de Damy.

Ahora bien, si se revisa la figura 4.4, correspondiente a $H/L = 0.50$ para el muro central, observamos nuevamente que la coincidencia entre VD y VS ocurre sólo cuando la relación H/L de todos los muros de un mismo entrepiso tiene el mismo valor. No obstante, a medida que los muros laterales son más esbeltos, la fuerza cortante según el Método Simplificado llega a ser hasta 100 veces mayor que la obtenida con el Método de Damy, dado que en el caso del nivel tres el cociente $VD/VS = 0.1$, siendo éste el nivel menos crítico de diseño. Para el caso del nivel uno, la fuerza cortante del Método Simplificado es del orden de una y media veces mayor que la fuerza obtenida con el método riguroso.

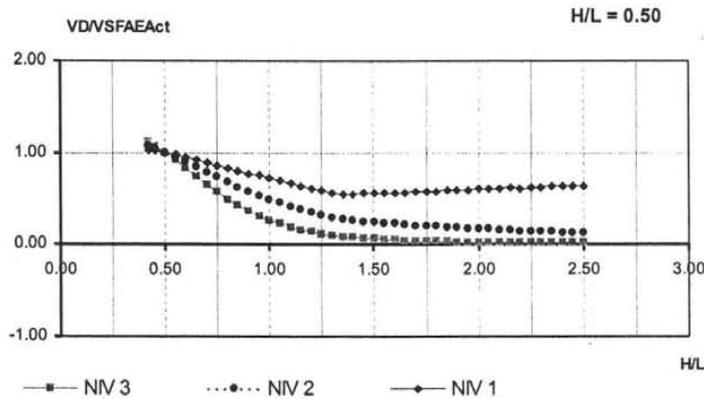


Figura 4.4. Comparación de fuerzas cortantes cuando la relación $H/L = 0.50$ para el muro central. F_{AE} reglamentario según NTCM-2004.

Analicemos ahora la figura 4.5, correspondiente al caso de $H/L = 2.50$ para el muro central, en la que se ha cambiado la escala del eje vertical para mejor apreciación. Nuevamente la coincidencia de fuerzas ocurre sólo cuando todos los muros son geoméricamente iguales. Sin embargo, una vez más, las fuerzas cortantes en los muros laterales se subestiman cuando la relación H/L es menor que uno, y como se ve, el comportamiento difiere poco según el nivel del edificio que se trate. En el caso de los niveles uno, dos y tres, prácticamente existe coincidencia entre los cocientes de fuerzas cortantes obtenidas con ambos métodos; sólo en el nivel uno se presenta una sobre estimación de dichas fuerzas más notoria que en los niveles dos y tres.

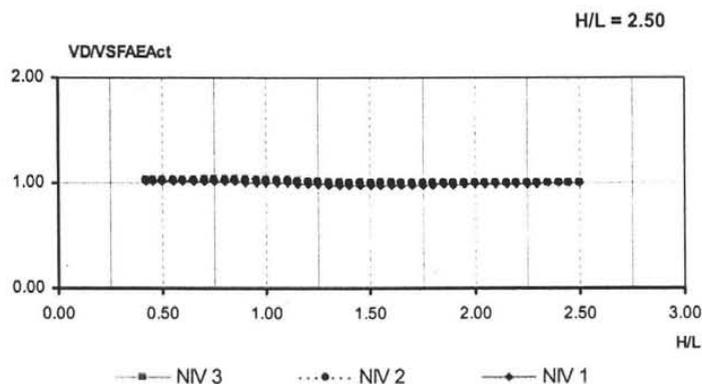


Figura 4.5. Comparación de fuerzas cortantes cuando la relación $H/L = 2.50$ para el muro central. F_{AE} reglamentario según NTCM-2004.

El Factor de Área Efectiva, tal como se presenta en las NTC actuales, sobre estima la fuerza cortante que toman los muros a medida que éstos son más esbeltos, mientras que para muros robustos, subestima dicha fuerza. Ello se debe a que para muros esbeltos tienen mayor impacto las deformaciones por flexión que las deformaciones por corte. Dada la relación que existe entre las deformaciones por cortante y las propiedades geométricas de la sección transversal del muro, se puede esperar una asignación de fuerzas cortantes diferente que tome en cuenta de una mejor manera el impacto de las deformaciones por cortante.

La figura 4.6 muestra el resumen de todos los análisis, es decir, los casos en que $H/L = 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0$ y 2.5 , para el muro central, y la correspondiente variación de H/L .

Gráficamente se aprecia que la sobre estimación de fuerzas cortantes que existe cuando los muros son esbeltos tiende a desaparecer, es decir, con el F_{AE} reglamentario se tiende a la coincidencia de fuerzas respecto al método de Damy. Sin embargo, en los niveles superiores se tiende a una mayor sobre estimación de fuerzas cortantes.

Lo anterior no debería sorprender, ya que como se sabe, las deformaciones por cortante son más importantes en muros robustos, que en aquéllos en que el Método Simplificado subestima las fuerzas.

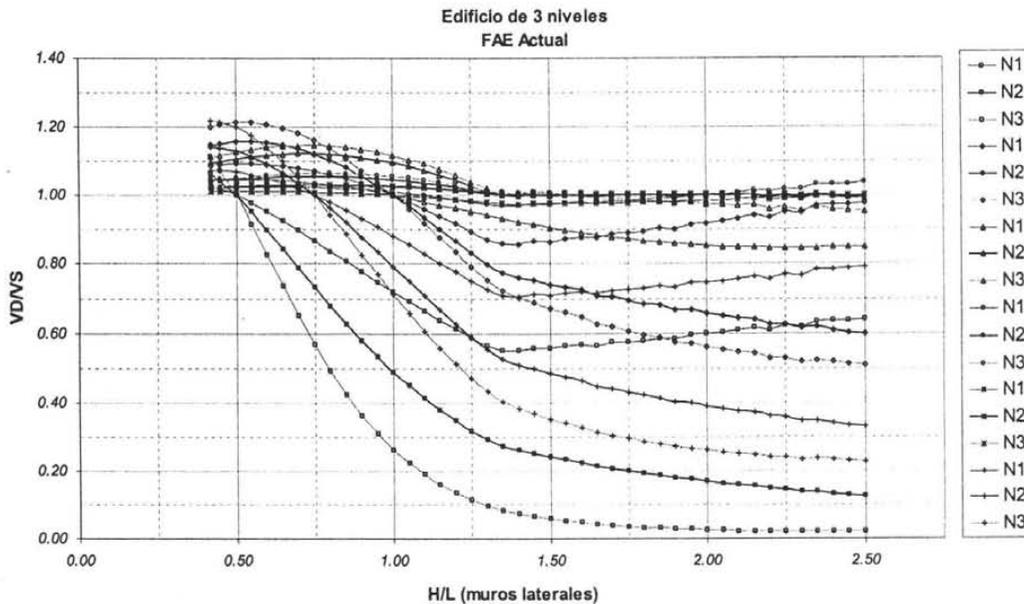


Figura 4.6. Resumen de los casos en estudio, edificio de tres niveles. F_{AE} reglamentario según NTCM-2004.

4.3 Estudio de un nuevo Factor de Área Efectiva F_{AE}

Como una segunda etapa, se repitieron los análisis antes descritos, pero ahora tomando el Factor de Área Efectiva constante e igual a la unidad, con la finalidad de identificar las variaciones existentes entre el método riguroso y el método simplificado basado en una distribución de fuerzas cortantes acorde con el concepto de áreas efectivas, donde en principio no se considera modificación alguna del área en función de la relación de aspecto del muro y, por tanto, de las deformaciones por cortante, que es la razón de considerar $F_{AE} = 1$. Precisamente, al dividir los resultados del método riguroso, que incluye las deformaciones por cortante, entre los del Método Simplificado que no las incluye, se definirá cómo impactan las deformaciones de cortante a las estimaciones de fuerzas con el método simplificado en función de la relación de aspecto H/L , y de esta manera, se podrán proponer posteriormente expresiones simples para F_{AE} que permitan aproximar mejor las fuerzas cortantes con el método simplificado, que lo que se obtiene con la propuesta actual de las NTCM-2004 (sección 4.2).

La figura 4.7 muestra el caso de estudio en que el muro central tiene relación $H/L = 1.00$. Tratándose de los muros robustos, $H/L \leq 1.33$, la forma en que se distribuyen las fuerzas cortantes es la misma que se ha descrito anteriormente. La diferencia sólo radica en los muros cuya relación $H/L > 1.33$.

En el caso del último nivel del edificio, y para cuando los muros son muy esbeltos, se obtiene un cociente $VD/VS = 0.2$, lo cual indica que la fuerza cortante en el muro obtenida con el Método Simplificado es cinco veces mayor que aquella obtenida con el Método de Damy.

Para el nivel uno, al tratarse de los muros más esbeltos, se obtiene $VD/VS = 0.4$, por lo que la fuerza cortante obtenida con el Método Simplificado es 2.5 veces mayor que la que se obtiene con el Método de Damy.

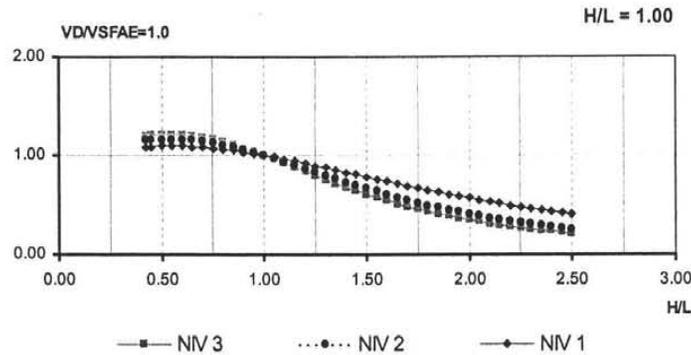


Figura 4.7. Comparación de fuerzas cortantes cuando la relación $H/L = 1$ para el muro central, y tomando $F_{AE} = 1$ para todos los muros.

El siguiente caso de estudio se ilustra en la figura 4.8, correspondiente a $H/L = 0.50$ para el muro central. Como se ve, el comportamiento es aún más drástico, puesto que la sobre estimación de fuerzas es grande en todos los niveles. A medida que los muros laterales son más esbeltos, la fuerza cortante según el Método Simplificado (considerando $F_{AE}=1$ para toda relación H/L) llega a ser hasta 100 veces mayor que la obtenida con el Método de Damy, para el caso del nivel 3, siendo éste el nivel menos crítico de diseño. Para el caso del primer nivel, la fuerza cortante del Método Simplificado es aproximadamente cuatro veces mayor que la fuerza obtenida con el Método de Damy.

La figura 4.9 muestra el caso de estudio en que $H/L = 2.5$ para el muro central. Nuevamente la coincidencia de fuerzas ocurre sólo cuando todos los muros son geoméricamente iguales. Sin embargo, ahora todas las fuerzas cortantes en los muros laterales son subestimadas sin importar su relación H/L , llegando a ser del orden del 15% en el nivel uno, y aún mayores en los niveles superiores.

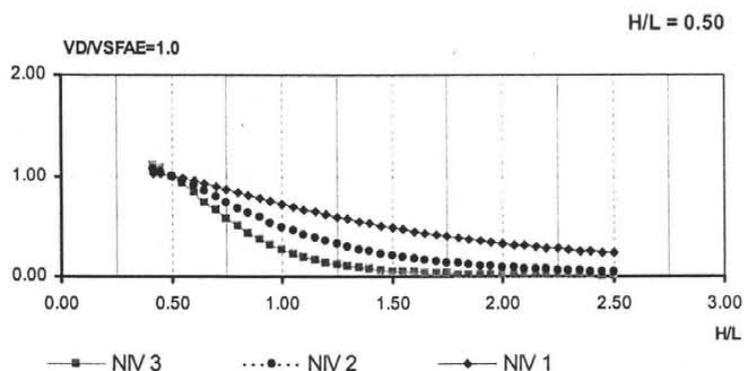


Figura 4.8. Comparación de fuerzas cortantes cuando la relación $H/L = 0.50$ para el muro central, y tomando $F_{AE} = 1$ para todos los muros.

En la figura 4.10 se presenta el resumen de todos los análisis, es decir, los casos en que $H/L = 0.50, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0$ y 2.50 , para el muro central, y la correspondiente variación de H/L , considerando un Factor de Área Efectiva constante.

De los casos en estudio anteriores, la información más relevante es la siguiente:

- ◆ La coincidencia de fuerzas dadas por el método de Damy y las calculadas con el Método Simplificado ocurre sólo cuando todos los muros de un mismo entrepiso son iguales entre sí en su relación de aspecto.
- ◆ Cuando los muros extremos tienden a ser robustos ($H/L < 1$), las fuerzas cortantes en el Método Simplificado se subestiman; ello indica que el efecto de las deformaciones por cortante no se está tomando en cuenta, al menos de forma aproximada. Tal subestimación es mayor en los niveles superiores.
- ◆ Cuando los muros extremos tienden a ser esbeltos ($H/L > 1$), las fuerzas cortantes en el Método Simplificado se sobre estiman fuertemente, sobre todo en los niveles superiores del edificio para muros muy esbeltos.

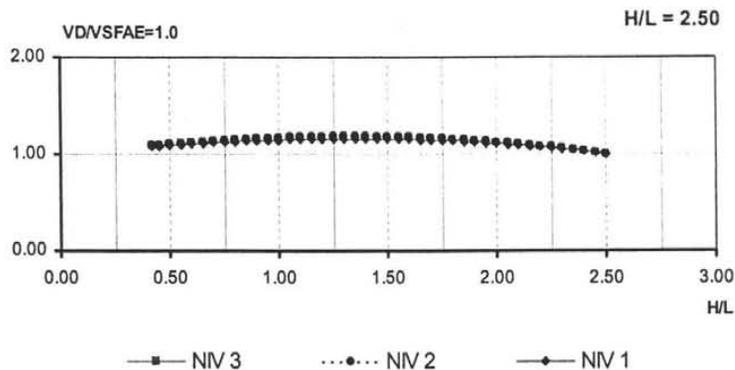


Figura 4.9. Comparación de fuerzas cortantes cuando la relación $H/L = 2.50$ para el muro central, y tomando $F_{AE} = 1$ para todos los muros.

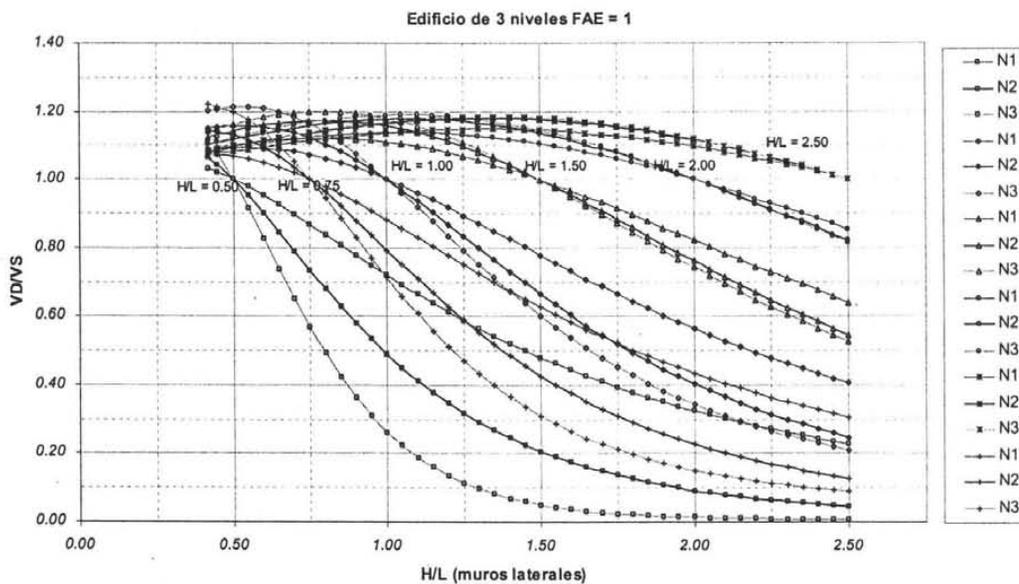


Figura 4.10. Resumen de los casos en estudio, edificio de tres niveles. $F_{AE} = 1$

Cabe mencionar que para el edificio de cinco niveles se siguió el mismo procedimiento descrito, y el comportamiento es prácticamente igual al del edificio de tres niveles, como se observa en las figuras 4.11 a 4.16, donde se presentan los mismos casos de estudio discutidos previamente para el edificio de tres niveles.

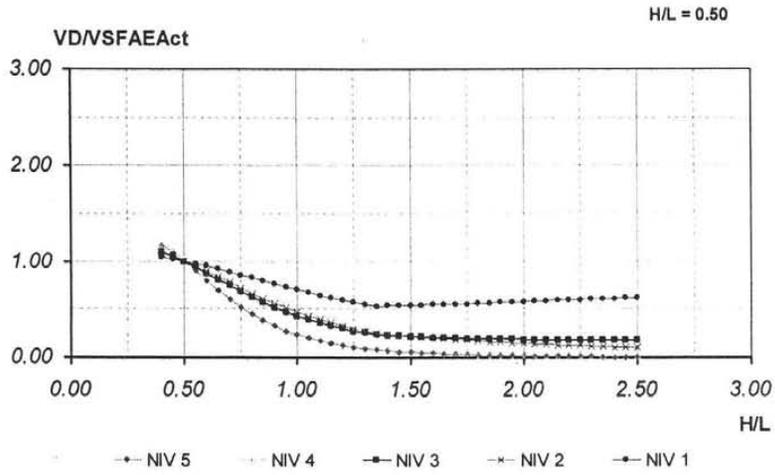


Figura 4.11. Comparación de fuerzas cortantes cuando la relación $H/L = 0.50$ para el muro central, y tomando F_{AE} reglamentario.

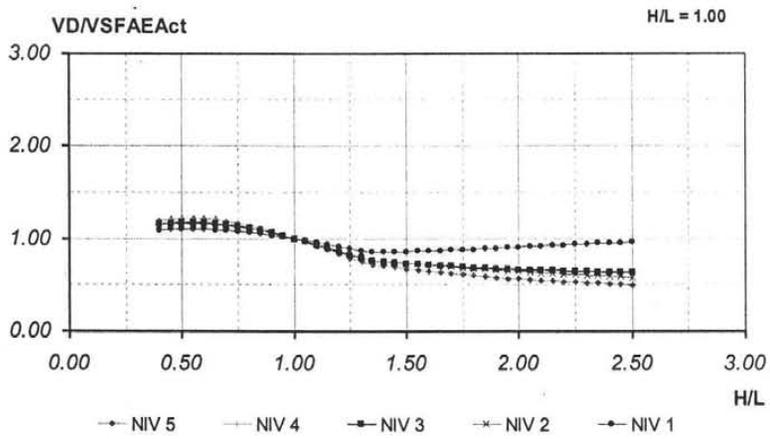


Figura 4.12. Comparación de fuerzas cortantes cuando la relación $H/L = 1.00$ para el muro central, y tomando F_{AE} reglamentario.

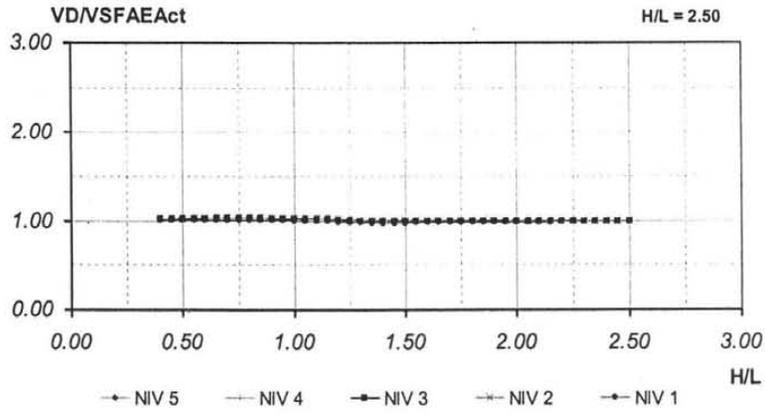


Figura 4.13. Comparación de fuerzas cortantes cuando la relación $H/L = 2.50$ para el muro central, y tomando F_{AE} reglamentario.

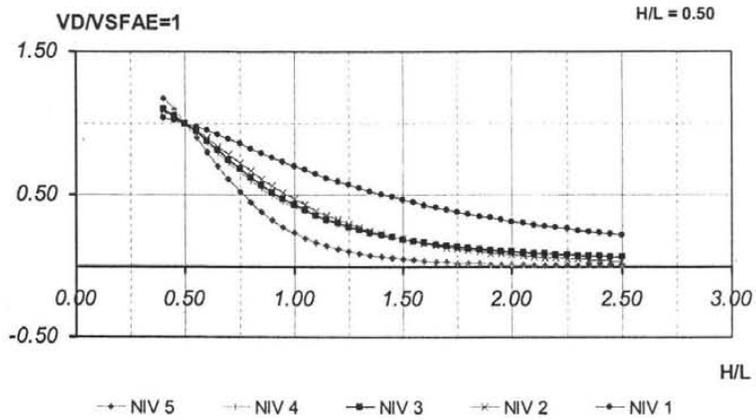


Figura 4.14. Comparación de fuerzas cortantes cuando la relación $H/L = 0.50$ para el muro central, y tomando $F_{AE} = 1$ para todos los muros

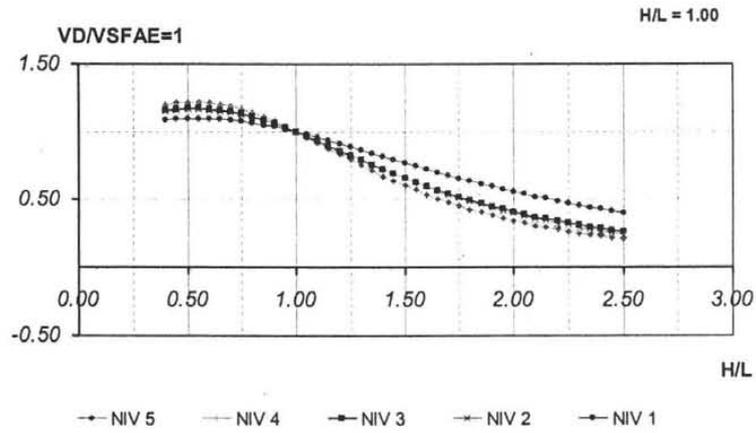


Figura 4.15. Comparación de fuerzas cortantes cuando la relación $H/L = 1.00$ para el muro central, y tomando $F_{AE} = 1$ para todos los muros

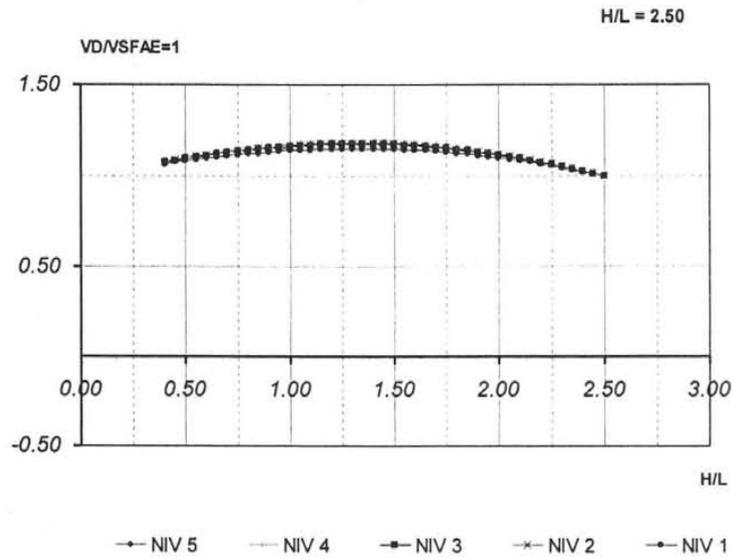


Figura 4.16. Comparación de fuerzas cortantes cuando la relación $H/L = 2.50$ para el muro central, y tomando $F_{AE} = 1$ para todos los muros

4.4 Forma en que impactan las deformaciones por cortante

Ya se mencionó anteriormente que existen diferencias significativas entre las fuerzas cortantes calculadas con el método simplificado de las NTC respecto a las que se obtienen con el método riguroso de Damy.

Se tratará ahora de buscar una expresión matemática que refleje la forma en que impactan las deformaciones por cortante y por flexión en dichas fuerzas, para que con ello se proponga una nueva forma de calcular el Factor de Área Efectiva. Dicha expresión debe ser simple, ya que sería utilizada con fines prácticos de diseño.

Por simplicidad, analicemos el caso de un muro en voladizo, asociándole los dos grados de libertad de giro y desplazamiento que se ilustran en la figura 4.17.

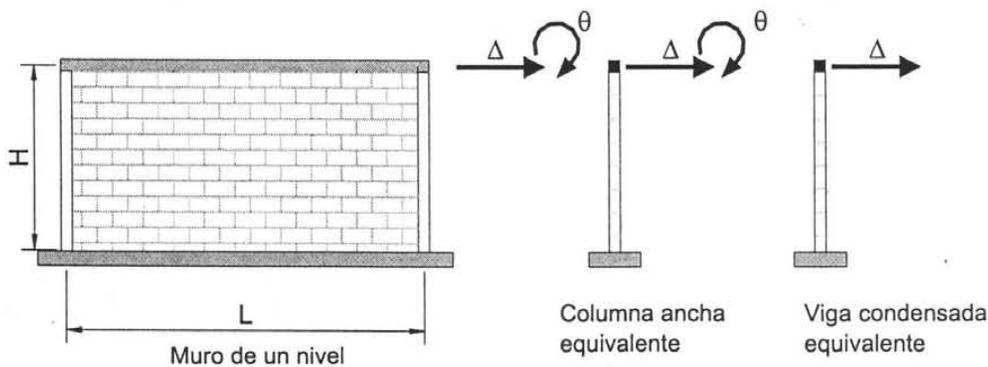


Figura 4.17. Muro de un nivel en voladizo

Para tales grados de libertad, la matriz de rigidez asociada, es de la forma

$$[k] = \begin{bmatrix} \frac{(4 + \phi_y)EI}{h(1 + \phi_y)} & -\frac{6EI}{h^2(1 + \phi_y)} \\ \frac{6EI}{h^2(1 + \phi_y)} & \frac{12EI}{h^3(1 + \phi_y)} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Como puede consultarse en Tena (1999) y Tena y Pérez (2000), si queremos tomar en cuenta el efecto de ambos grados de libertad sobre el desplazamiento lateral, podemos hacer una condensación estática de los grados de libertad con la expresión

$$k_{\Delta} = k_{\Delta\Delta} - k_{\Delta\theta} k_{\theta\theta}^{-1} k_{\theta\Delta} \quad (4.5)$$

De acuerdo con la ecuación 4.4, cada uno de los términos que intervienen en la ecuación 4.5, son los siguientes:

$$k_{\Delta\Delta} = \frac{12EI}{h^3(1+\phi_y)} \quad (4.6)$$

$$k_{\Delta\theta} = k_{\theta\Delta} = -\frac{6EI}{h^2(1+\phi_y)} \quad (4.7)$$

$$k_{\theta\theta} = \frac{(4+\phi_y)EI}{h(1+\phi_y)} \quad (4.8)$$

por lo que al hacer las sustituciones de las ecuaciones 4.6 a 4.8 en la ecuación 4.5, y haciendo las operaciones correspondientes, se llega a:

$$k_{\Delta} = \frac{12EI}{h^3(1+\phi_y)} - \left[\frac{-6EI}{h^2(1+\phi_y)} \right] \left[\frac{(4+\phi_y)EI}{h(1+\phi_y)} \right]^{-1} \left[\frac{-6EI}{h^2(1+\phi_y)} \right] = \quad (4.5a)$$

$$k_{\Delta} = \frac{12EI}{h^3(4+\phi_y)} \quad (4.9)$$

Si tomamos en cuenta que ϕ_y representa el efecto de las deformaciones por cortante, y que dicho término vale

$$\phi_y = \frac{12EI}{GA_c h^2} \quad (4.10)$$

podemos establecer una expresión en la cual se involucre a los términos H y L , que representan los valores tomados en cuenta para el cálculo del Factor de Área Efectiva; en la expresión anterior también se reflejan los efectos de flexión. Ésto se hace de la siguiente manera, considerando las expresiones

$$A_c = \frac{A}{1.2} = \frac{tL}{1.2}$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

$\nu = 0.25$ para mampostería

$$\phi_y = \frac{12EI}{GA_c h^2} = \frac{12EI}{0.4E \frac{A}{1.2} h^2} = \frac{36I}{Ah^2} = 36 \frac{r^2}{h^2} \quad (4.10a)$$

En la ecuación anterior, aparece la relación I/A , que como se sabe representa el cuadrado del radio de giro, r , de la sección del muro. Si tomamos en cuenta que t y L son el espesor y la longitud del muro respectivamente,

$$r^2 = \frac{I}{A} = \frac{1}{12} \frac{tL^3}{tL} = \frac{L^2}{12}$$

al sustituir este valor en la ecuación 4.10a, obtenemos una expresión para el coeficiente ϕ_y , que toma en cuenta las deformaciones por cortante, en función de los parámetros H y L ; para el muro que se está estudiando, y con las consideraciones hechas anteriormente, se obtiene

$$\phi_y = 3 \left(\frac{L}{h} \right)^2 \quad (4.11)$$

Al sustituir en la ecuación 4.9 el valor de ϕ_y , dado por la ecuación 4.11, obtenemos una expresión para la matriz de rigidez lateral del muro de un nivel mostrado en la figura 4.17, en función de las variables que intervienen en el cálculo del Factor de Área Efectiva, la cual queda como sigue:

$$k_\Delta = \frac{12EI}{h^3 \left[4 + 3 \left(\frac{L}{h} \right)^2 \right]} \quad (4.12)$$

En la ecuación anterior, la expresión entre corchetes que aparece en el denominador, nos da la forma en que impactan las deformaciones por cortante por medio del término L/h , mientras que las deformaciones por flexión se caracterizan por el término constante; se aprecia que es una expresión del tipo de una ecuación cuadrática sin término lineal, es decir,

$$c_1 + c_2 \left(\frac{L}{h} \right)^2 \quad (4.13)$$

siendo c_1 y c_2 constantes desconocidas, las cuales sería necesario determinar con la finalidad de proponer un nuevo Factor de Área Efectiva F_{AE} , tomando en cuenta efectos de flexión y corte.

Veamos ahora el caso de un muro de dos niveles, tal como se muestra en la figura 4.18.

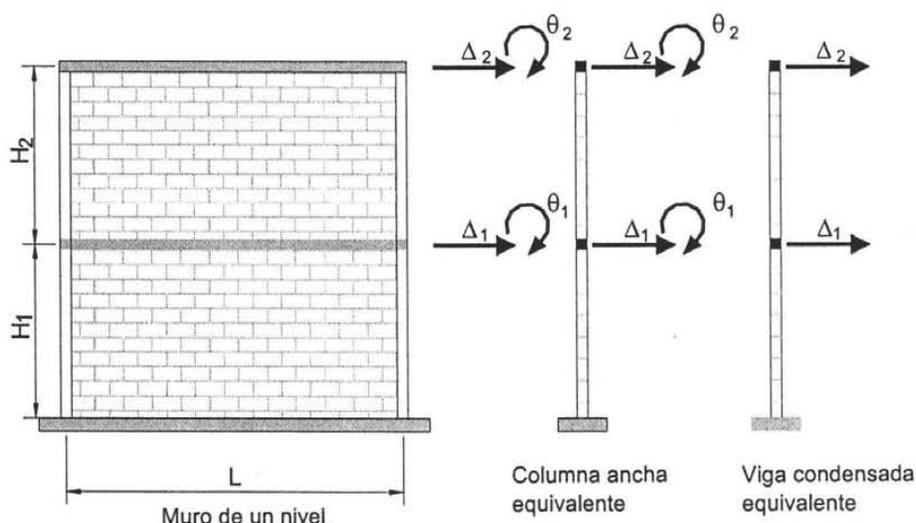


Figura 4.18. Muro de dos niveles

En Tena (1999) y Tena y Pérez (2000), se demuestra que la matriz de rigidez lateral para un muro de dos niveles modelado como columna ancha equivalente, es

$$[k_{\Delta}] = \begin{bmatrix} k_{11\Delta} & k_{12\Delta} \\ k_{21\Delta} & k_{22\Delta} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Cada uno de los términos de esta matriz se indican en las ecuaciones siguientes, en las que los superíndices indican a qué nivel del muro corresponde cada término:

$$[k_{11\Delta}] = r_{aax}^1 + r_{aax}^2 - \frac{1}{Det_{\theta\theta}} \left\{ (r_{bax}^1 - r_{abx}^2) \left[(r_{bax}^1 - r_{abx}^2) r_{22x}^2 + r_{bax}^2 r_{12x}^2 \right] + (r_{bax}^2)^2 (r_{22x}^1 + r_{11x}^2) \right\} \quad (4.15)$$

$$[k_{12\Delta}] = [k_{21\Delta}] = -r_{aax}^2 - \frac{1}{Det_{\theta\theta}} \left\{ (r_{bax}^1 - r_{abx}^2) (r_{abx}^2 r_{22x}^2 - r_{bax}^2 r_{12x}^2) + r_{bax}^2 \left[r_{abx}^2 r_{12x}^2 - r_{bax}^2 (r_{22x}^1 + r_{11x}^2) \right] \right\} \quad (4.16)$$

$$[k_{22\Delta}] = r_{aax}^2 - \frac{1}{Det_{\theta\theta}} \left\{ (r_{abx}^2)^2 r_{22x}^2 - 2r_{abx}^2 r_{bax}^2 r_{12x}^2 + (r_{bax}^2)^2 (r_{22x}^1 + r_{11x}^2) \right\} \quad (4.17)$$

$$Det_{\theta\theta} = (r_{22x}^1 + r_{11x}^2) r_{22x}^2 - (r_{12x}^2)^2 \quad (4.18)$$

Nuevamente, al tratar de ver la forma en que impactan las deformaciones por cortante, ϕ_y y particularmente los parámetros H y L , se obtienen las siguientes expresiones, a partir de desarrollar y reducir algebraicamente cada uno de los términos dados en las ecuaciones 4.15 a 4.18. Los términos que intervienen en las ecuaciones se muestran en la sección 3.2. De acuerdo con nuestras suposiciones iniciales, el muro tiene las mismas propiedades en toda su altura, tanto el nivel uno como el nivel dos, por lo que en las ecuaciones subsecuentes el superíndice no indica a qué nivel corresponde cada término, sino que hace el papel de exponente. Las ecuaciones son:

$$Det_{\theta\theta} = \frac{28 + 20\phi_y + \phi_y^2}{1 + \phi_y^2} \left(\frac{EI}{L} \right)^2 \quad (4.19)$$

$$[k_{11\Delta}] = \left[1 - \frac{3(4 + \phi_y)}{28 + 20\phi_y + \phi_y^2} \right] \frac{24EI}{L^3(1 + \phi_y)} \quad (4.20)$$

$$[k_{12\Delta}] = [k_{21\Delta}] = - \left[1 - \frac{9(2 + \phi_y)}{28 + 20\phi_y + \phi_y^2} \right] \frac{12EI}{L^3(1 + \phi_y)} \quad (4.21)$$

$$[k_{22\Delta}] = \left[1 - \frac{3(8 + 5\phi_y)}{28 + 20\phi_y + \phi_y^2} \right] \frac{12EI}{L^3(1 + \phi_y)} \quad (4.22)$$

Se observa que la forma en que impactan las deformaciones por cortante, se caracteriza por una ecuación cuadrática completa, a diferencia de la ecuación 4.13, en que no se tenía término lineal.

Ahora bien, para el muro de sección rectangular constante en toda su altura, la manera en que los parámetros H y L intervienen en el factor ϕ_y , que representa a las deformaciones por corte, está dada por la ecuación 4.11. Al hacer las sustituciones y manipulaciones algebraicas convenientes, las ecuaciones 4.20 a 4.22 quedan como sigue:

$$[k_{11\Delta}] = \frac{2Et}{1 + 3\frac{L^2}{h^2}} \left[1 - \frac{12 + 9\frac{L^2}{h^2}}{28 + 60\frac{L^2}{h^2} + 9\frac{L^4}{h^4}} \right] \quad (4.23)$$

$$[k_{12\Delta}] = [k_{21\Delta}] = \frac{Et}{1 + 3\frac{L^2}{h^2}} \left[1 - \frac{18 + 27\frac{L^2}{h^2}}{28 + 60\frac{L^2}{h^2} + 9\frac{L^4}{h^4}} \right] \quad (4.24)$$

$$[k_{22\Delta}] = \frac{Et}{1 + 3\frac{L^2}{h^2}} \left[1 - \frac{24 + 45\frac{L^2}{h^2}}{28 + 60\frac{L^2}{h^2} + 9\frac{L^4}{h^4}} \right] \quad (4.25)$$

No es difícil ver que los parámetros H y L intervienen en los coeficientes de la matriz de rigidez lateral en una forma algebraica demasiado complicada como para ser incluida en un código de diseño, pues de hecho, se requeriría proponer una matriz de corrección. No hay que olvidar además que estamos estudiando el caso de un muro de dos niveles, por lo que es de esperarse que para un edificio de más pisos, como suele ser común en la Ciudad de México, la forma del polinomio se vuelva más complicada y de un grado superior. Se tratará ahora de proponer una expresión más simple para calcular el Factor de Área Efectiva, tomando en cuenta los resultados obtenidos en los análisis que se describieron con anterioridad en las secciones 4.3 y 4.4.

4.5 Propuesta de un nuevo Factor de Área Efectiva F_{AE} .

En las secciones 4.1 y 4.2 se describió la forma en que se calcularon y obtuvieron las gráficas mostradas en las figuras 4.3 a 4.5, las cuales muestran la variación del cociente de la fuerza cortante obtenida con el método de Damy y la fuerza cortante obtenida con el Método Simplificado de la propuesta actual de las NTCM-2004 en función de la relación de aspecto H/L .

Si lo que queremos es encontrar una expresión para el Factor de Área Efectiva F_{AE} en la cual se reflejen indirectamente las deformaciones por cortante y las deformaciones por flexión, podemos auxiliarnos de dichas gráficas y tratar de encontrar una expresión analítica que describa la relación entre dichas variables, o sea una expresión del tipo

$$\frac{V_D}{V_S} = f\left(\frac{H}{L}\right) \quad (4.26a)$$

$$V_D = f\left(\frac{H}{L}\right)V_S \quad (4.26b)$$

en la que $f\left(\frac{H}{L}\right)$ representa la función analítica deseada.

Es decir, una posible forma de calcular el F_{AE} sería encontrar una expresión analítica que describa la relación V_D/V_S en función de H/L , pero sin perder de vista que tal expresión debe de ser lo suficientemente sencilla para fines de normatividad. Una expresión del tipo de las ecuaciones 4.23 a 4.25 carece de aplicabilidad práctica. Sin embargo, del análisis del muro de un nivel en voladizo, una expresión del tipo dado por la ecuación 4.13 resulta adecuada y simple para fines prácticos.

Utilizando métodos convencionales, se hicieron regresiones del tipo dado por la ecuación 4.13, a las gráficas mostradas en las figuras 4.7 a 4.9. Sin embargo, los resultados obtenidos no fueron satisfactorios, por lo que se optó por cambiar la forma de la ecuación por una del tipo dado en el denominador de las ecuaciones 4.20 a 4.22, es decir, una cuadrática completa. Con ello, las ecuaciones 4.26 toman la forma

$$V_D = \left[c_1 + c_2 \frac{H}{L} + c_3 \left(\frac{H}{L} \right)^2 \right] V_S \quad (4.27)$$

La expresión entre corchetes nos da la nueva forma de calcular el Factor de Área Efectiva F_{AE} , por lo que hay que determinar los coeficientes c_1 , c_2 y c_3 . Para ello, utilizaremos la gráfica de la figura 4.7.

Aquí es importante hacer notar que se tienen dos tipos diferentes de curvatura en las curvas de V_D/V_S , y que la curvatura cambia cuando $H/L = 1.0$, lo cual implica que se deben encontrar dos expresiones para el cálculo del nuevo Factor de Área Efectiva F_{AE} . Lo anterior representa un primer cambio respecto a lo que se propone actualmente en el Método Simplificado, ya que según las ecuaciones 4.1 y 4.2, el uso de una u otra depende de si H/L es mayor o menor de 1.33, mientras que si tomamos en cuenta la curvatura de las curvas en estudio, el valor frontera es justamente la unidad.

Las figuras 4.19 y 4.20 muestran gráficamente cada una de las diferentes expresiones matemáticas que se propusieron para evaluar F_{AE} , en los casos correspondientes a $H/L \leq 1.0$ y $H/L > 1.0$, respectivamente. En ambas figuras, la curva referida como F_{AE_Act} representa la forma actual de calcular F_{AE} , y está con línea interrumpida. En la tabla 4.4 se muestran las ecuaciones de dichas curvas.

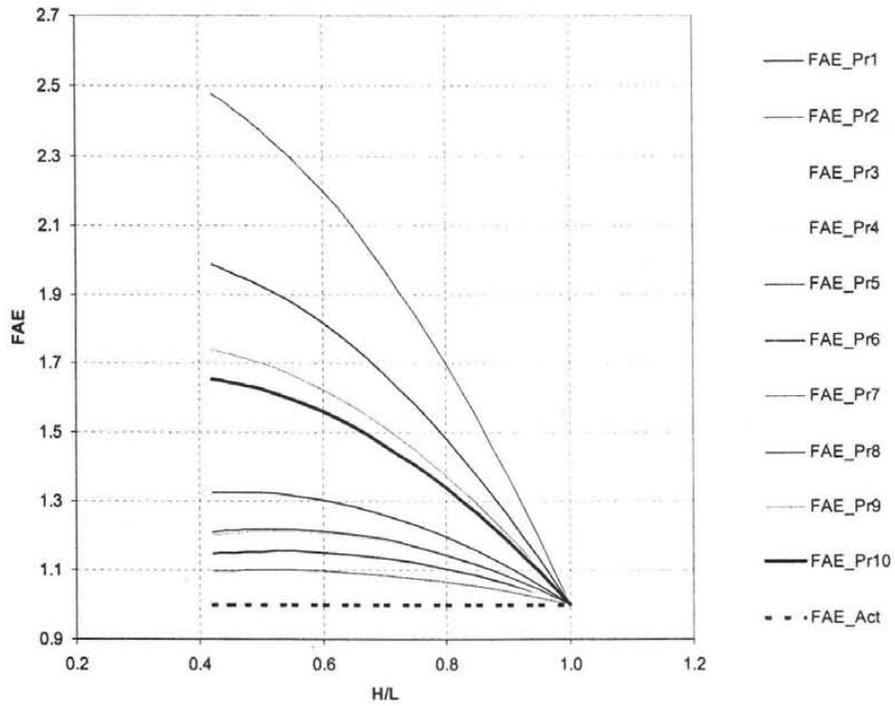


Figura 4.19. Distintas propuestas para F_{AE} . $H/L \leq 1.0$

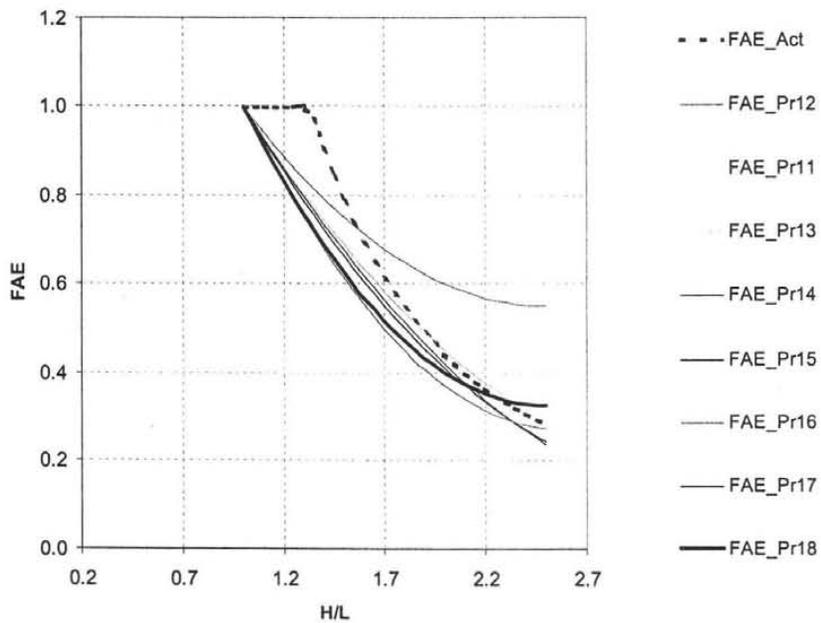


Figura 4.20. Distintas propuestas para F_{AE} . $H/L > 1.0$

Tabla 4.4. Distintas propuestas para F_{AE} . Ecuaciones correspondientes a las gráficas de las figuras 4.19 y 4.20

$\frac{H}{L} \leq 1.0$		$\frac{H}{L} > 1.0$	
Número de propuesta	Ecuación	Número de propuesta	Ecuación
1	$F_{AE} = 0.96 + 0.74 \frac{H}{L} - 0.7 \left(\frac{H}{L}\right)^2$	11	$F_{AE} = 2.00 - 1.2 \frac{H}{L} + 0.2 \left(\frac{H}{L}\right)^2$
2	$F_{AE} = 0.99 + 0.43 \frac{H}{L} - 0.42 \left(\frac{H}{L}\right)^2$	12	$F_{AE} = 1.80 - 1.0 \frac{H}{L} + 0.2 \left(\frac{H}{L}\right)^2$
3	$F_{AE} = 0.96 + 0.77 \frac{H}{L} - 0.73 \left(\frac{H}{L}\right)^2$	13	$F_{AE} = 1.85 - 1.0 \frac{H}{L} + 0.15 \left(\frac{H}{L}\right)^2$
4	$F_{AE} = 0.96 + \frac{H}{L} - 0.95 \left(\frac{H}{L}\right)^2$	14	$F_{AE} = 1.86 - 1.0 \frac{H}{L} + 0.14 \left(\frac{H}{L}\right)^2$
5	$F_{AE} = 0.96 + \frac{H}{L} - 0.96 \left(\frac{H}{L}\right)^2$	15	$F_{AE} = 1.93 - 1.1 \frac{H}{L} + 0.17 \left(\frac{H}{L}\right)^2$
6	$F_{AE} = 1.1 + \frac{H}{L} - 1.1 \left(\frac{H}{L}\right)^2$	16	$F_{AE} = 2.21 - 1.5 \frac{H}{L} + 0.29 \left(\frac{H}{L}\right)^2$
7	$F_{AE} = 2.5 + \frac{H}{L} - 2.5 \left(\frac{H}{L}\right)^2$	17	$F_{AE} = 2.24 - 1.5 \frac{H}{L} + 0.28 \left(\frac{H}{L}\right)^2$
8	$F_{AE} = 1.9 + \frac{H}{L} - 1.9 \left(\frac{H}{L}\right)^2$	18	$F_{AE} = 2.22 - 1.5 \frac{H}{L} + 0.3 \left(\frac{H}{L}\right)^2$
9	$F_{AE} = 1.6 + \frac{H}{L} - 1.6 \left(\frac{H}{L}\right)^2$		
10	$F_{AE} = 1.5 + \frac{H}{L} - 1.5 \left(\frac{H}{L}\right)^2$		

Las curvas seleccionadas para hacer la nueva propuesta de cálculo de Factor de Área Efectiva F_{AE} se han graficado con línea más gruesa. Para el caso en que $H/L \leq 1.0$, se seleccionó la ecuación de la curva correspondiente a F_{AE_Pr10} , mientras que para el otro caso en que $H/L > 1.0$ se seleccionó la curva designada como F_{AE_Pr18} . Antes de decidir qué expresiones tomar, se volvieron a analizar cada uno de los edificios en estudio con cada una de las posibles propuestas de cálculo dadas en las gráficas y la tabla anteriores, a fin de ver la variación del cociente V_D/V_S en función de H/L , con cada uno de los posibles Factores de Área Efectiva.

Con estas gráficas y con base en los resultados presentados en las gráficas de las figuras 4.19 y 4.20, se proponen las siguientes ecuaciones para el cálculo del Factor de Área Efectiva F_{AE} :

$$\text{Si } \frac{H}{L} \leq 1.0 \quad (4.28)$$

$$F_{AE} = 1.5 + \frac{H}{L} - 1.5 \left(\frac{H}{L} \right)^2$$

$$\text{Si } \frac{H}{L} > 1.0 \quad (4.29)$$

$$F_{AE} = 2.20 - 1.5 \frac{H}{L} + 0.3 \left(\frac{H}{L} \right)^2$$

Con estas expresiones, se repitió el análisis los edificios de tres y cinco niveles, y se procedió a la comparación de fuerzas respecto al método de Damy. Los resultados para el edificio de tres niveles se presentan en las figuras 4.21 a 4.23, mientras para el edificio de cinco niveles, en las figuras 4.24 a 4.26.

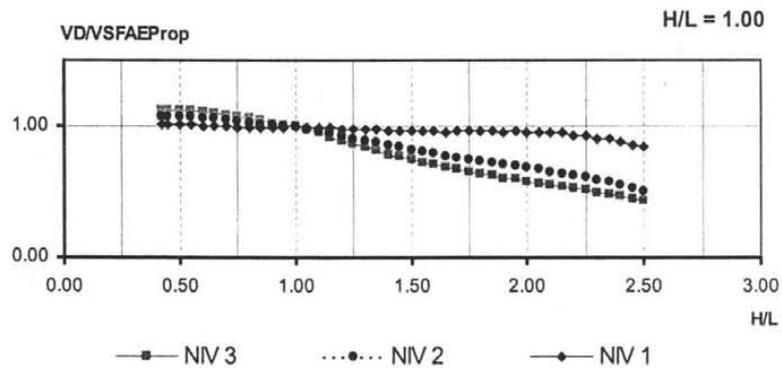


Figura 4.21. Comparación de fuerzas cortantes según Método de Damy y Nueva Propuesta para F_{AE} . Caso en que $H/L = 1.00$

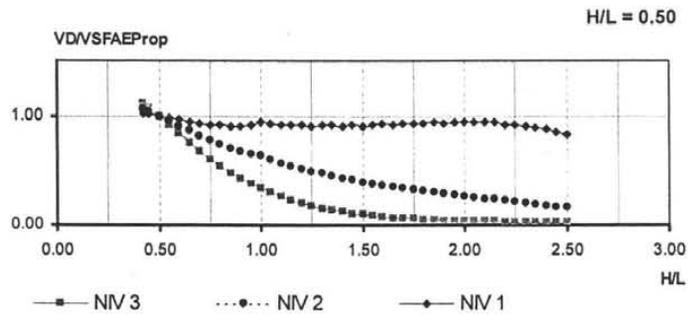


Figura 4.22. Comparación de fuerzas cortantes según Método de Damy y Nueva Propuesta para FAE. Caso en que $H/L = 0.50$

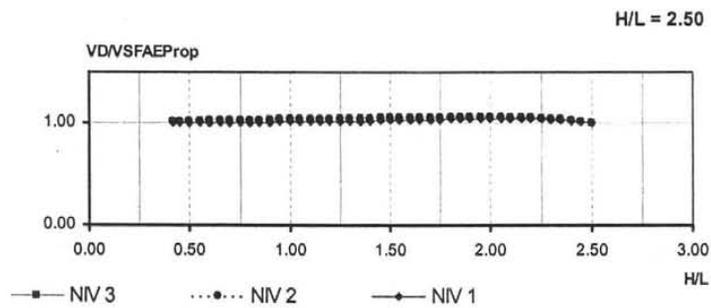


Figura 4.23. Comparación de fuerzas cortantes según Método de Damy y Nueva Propuesta para FAE. Caso en que $H/L = 2.50$

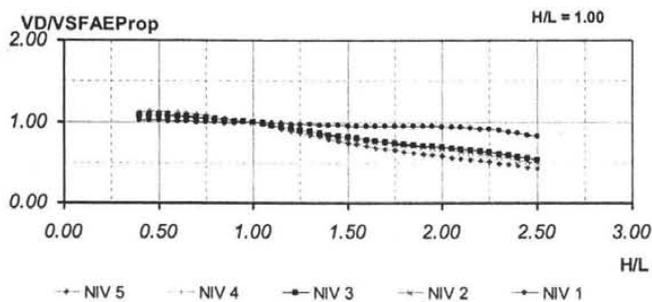


Figura 4.24. Comparación de fuerzas cortantes según Método de Damy y Nueva Propuesta para FAE. Caso en que $H/L = 1.00$

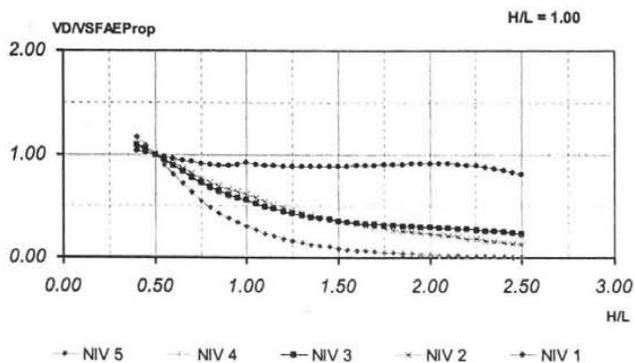


Figura 4.25. Comparación de fuerzas cortantes según Método de Damy y Nueva Propuesta para FAE. Caso en que $H/L = 0.50$

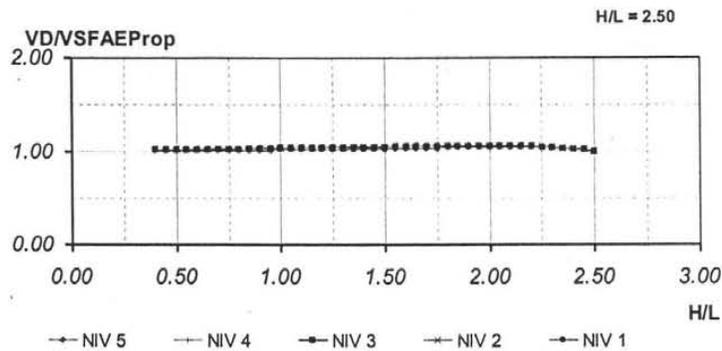


Figura 4.26. Comparación de fuerzas cortantes según Método de Damy y Nueva Propuesta para FAE. Caso en que $H/L = 2.50$

4.6 Conclusiones

Al revisar las gráficas anteriores, se nota que el uso del nuevo Factor de Área Efectiva permite calcular las fuerzas cortantes de forma tal que se aproximan más a los resultados del Método Riguroso de Damy. Por ejemplo, en la figura 4.22 para el edificio de tres niveles, y en la figura 4.25, tratándose del edificio de cinco, apreciamos que la curva correspondiente al primer nivel es casi horizontal e igual a la unidad, lo cual indica que hay gran coincidencia de fuerzas cortantes entre los resultados obtenidos con los dos métodos que se han estudiado. La figura 4.22 indica que al tener relaciones de aspecto menores a la unidad, se tienen cocientes VD/VS del orden de 1.1, lo cual quiere decir que las fuerzas obtenidas con el método de Damy son alrededor de un 10% mayores que aquellas obtenidas con el Método Simplificado, es decir este último método subestima las fuerzas en muros robustos, en los cuales las deformaciones por cortante son más importantes. Por su parte, la figura 4.24 indica que esta diferencia de fuerzas ya no es significativa usando en Factor de Área Efectiva propuesto, pues como ya se ha dicho, la curva del cociente VD/VS tiene un valor muy cercano a la unidad.

Veamos ahora el caso de la figura 4.4, correspondiente al actual Factor de Área Efectiva, en que el muro central del edificio tiene relación de aspecto $H/L = 0.50$, es decir, es un muro muy robusto, con un gran impacto de las deformaciones por cortante. Se observa que a medida que crece la relación de aspecto de los muros laterales, el cociente VD/VS tiende a un valor de 0.60, es decir, las fuerzas cortantes obtenidas con el Método de Damy son tan solo un 60% de las que arroja el Método Simplificado; este resultado permite ver claramente que el actual Factor de Área Efectiva no toma en cuenta de manera adecuada el efecto que las deformaciones por cortante y por flexión en muros robustos tienen sobre la distribución de fuerzas cortantes en los muros de un entrepiso, es decir, a medida que los muros tienden a ser esbeltos, las fuerzas cortantes se sobre estiman del

orden de un 67%, ya que si $VD/VS = 0.6$, implica que $VS = 1.67VD$. Ahora bien, la figura 4.22 y 4.24 indican que con el F_{AE} propuesto, el cociente VD/VS oscila entre 0.9 y 1.00, es decir vuelven a coincidir prácticamente las fuerzas calculadas con ambos métodos.

Analizando las figuras 4.5, 4.23 y 4.26, en que el muro central es esbelto con $H/L = 2.50$. Cuando los muros extremos son robustos, con $H/L < 1.0$, el Método Simplificado tiene una baja subestimación de fuerzas cortantes del orden de entre 2 y 5% respecto al método riguroso de Damy; cuando los muros tienden a ser esbeltos, ocurre una sobre estimación en igual porcentaje. Con la nueva propuesta de Factor de Área Efectiva, tratándose de muros robustos, se ve en las figuras 4.23 y 4.26 que las curvas tienden a converger en la unidad, mientras que para muros esbeltos hay una subestimación en las fuerzas cortantes del Método Simplificado respecto al Método de Damy menor al 5%. Sin embargo, este valor no es importante, ya que se trata de muros relativamente esbeltos, en los cuales las deformaciones por cortante tienen efecto casi despreciable o nulo.

Resumiendo, con la propuesta de cálculo para el Factor de Área Efectiva F_{AE} ,

- ◆ Se reduce notablemente la sobre estimación de fuerzas cortantes que se tiene cuando los muros tienden a ser esbeltos.
- ◆ La subestimación de fuerzas cortantes que se tiene en muros robustos con el Método Simplificado tiende a desaparecer, ya que se toma en cuenta de forma indirecta el impacto de las deformaciones por cortante.

5. Comparación de las fuerzas cortantes que absorben los muros en modelos simétricos según el Método Simplificado con respecto a los obtenidos con un análisis riguroso, considerando que todos los muros están agrietados de acuerdo con el modelo propuesto por Bazán y Meli.

Se presenta en este capítulo la metodología implantada para hacer la comparación de fuerzas cortantes obtenidas en muros según el Método Simplificado de las Normas Técnicas Complementarias y el Método riguroso de Damy, considerando en este último que los muros se han agrietado y perdido rigidez. Para usar el Método de Damy y tomar en cuenta este agrietamiento, se toman propiedades mecánicas y geométricas equivalentes, según se describe a continuación. En lo subsecuente se denominará como Método de Damy_Ag. Para ver geometría de los modelos en estudio y propiedades de los muros, ver sección 4.1 del capítulo anterior.

5.1 Método de la columna ancha equivalente de Bazán y Meli

A fines de los años sesentas, se propuso el método del marco equivalente, donde los muros se modelan como elementos viga-columna, tomando en cuenta las deformaciones por flexión y por cortante. Con este método, los muros se idealizan como columnas anchas ubicadas en el eje centroidal del muro. Este método se utilizó para modelar sistemas con muros, y también se puede utilizar para modelar muros confinados.

Bazán y Meli (1985, 1999) proponen modelar a los sistemas a base de marcos que contengan muros de mampostería confinada por medio de una columna ancha equivalente, como se muestra en la figura 5.1. Para ello, se asignan al sistema propiedades equivalentes basados en una sección transformada y agrietada del muro confinado, considerando que el momento de inercia de la sección del muro depende principalmente del área transversal de las columnas (o de los castillos), ya que la mampostería se encuentra agrietada, y además utilizando un área de cortante reducida que tome en cuenta la separación entre muro y elemento confinante. Estas propiedades equivalentes son las siguientes, conforme al muro que se ilustra en la figura 5.1:

$$I_{eq} = A_c \frac{b^2}{2} \quad (5.1)$$

$$A_{ceq} = (0.37 - 0.12\zeta + 0.023\lambda)(A_m + 2A_c) \quad (5.2)$$

$$\zeta = \frac{b}{h} \quad (5.3)$$

$$\lambda = \frac{E_c A_c}{G_m A_m} \quad (5.4)$$

La expresión 5.3 da la relación de aspecto del muro, mientras que la 5.4 es una medida de la rigidez axial de los castillos respecto a la rigidez a cortante del muro, A_c es el área de la sección transversal de cada columna o castillo confinantes, A_m es el área neta de la sección transversal del muro, E_c es el módulo de elasticidad de los elementos confinantes del muro y G_m es el módulo de cortante del muro. En estas expresiones se tomó en cuenta que $G_m = 0.4E_m$, siendo E_m el módulo de elasticidad del muro. Las expresiones 5.1 y 5.2 son válidas para los siguientes intervalos:

$$0.75 \leq \zeta \leq 2.5 \quad (5.5)$$

$$0.9 \leq \lambda \leq 11 \quad (5.6)$$

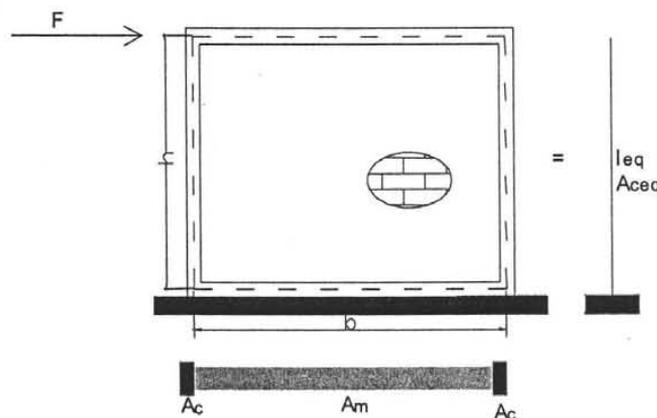


Figura 5.1. Hipótesis para la columna ancha equivalente, según Meli y Bazán.

5.2 Comparación de fuerzas cortantes considerando F_{AE} según las NTCM 2004

Para esta etapa de análisis, se consideró que todos los muros están agrietados y se asignó a los mismos propiedades mecánicas tales que se cumplieran los límites impuestos por las ecuaciones 5.5 y 5.6; los requisitos geométricos ya habían quedado definidos al establecer la geometría de los edificios en estudio. Se utilizaron los programas de computadora empleados en el capítulo anterior, tomando las modificaciones correspondientes. Sin embargo, en este estudio se ha tomado la relación H/L , como se indica en las NTCM actuales, por lo que, si se toma en cuenta que b es la base o longitud L del muro, de acuerdo con la ecuación 5.3 la ecuación 5.5 se puede escribir como:

$$0.4 \leq \frac{H}{L} \leq 1.33 \quad (5.7)$$

Como en el caso del edificio de tres niveles, la altura de entrepiso es de 2.50m, el límite inferior de esta ecuación permite utilizarla para muros cuya longitud es cuando mucho igual a 6.25m, es decir, muros muy robustos; el otro límite permite usar una longitud no menor de 1.88m, es decir, muros no muy esbeltos. No obstante, se decidió seguir con este estudio, ya que los que nos interesa es determinar el impacto de las deformaciones por cortante, que son más importantes en muros robustos. Las tablas 5.2 y 5.3 muestran las propiedades mecánicas y geométricas utilizadas con el método de la columna ancha equivalente para el edificio de tres y cinco niveles respectivamente.

En ambos casos, se utilizó $t=14\text{ cm}$ y $G=76800\text{ ton/m}^2$ para el espesor y módulo de cortante del muro; los castillos se propusieron de 25 por 25 cm con $f_c=150\text{ kg/cm}^2$. Las dimensiones de los castillos son algo mayores que las usadas comúnmente en la práctica; sin embargo, se seleccionaron así a fin de cumplir con los límites impuestos por la ecuación 5.6. Recuérdese que en el edificio de tres niveles se ha tomado $h = 2.5m$.

**Tabla 5.2. Propiedades geométricas y mecánicas equivalentes para el muro 2 (muro central).
Edificio tres niveles**

CASO H/L	$L_{\text{muro}}(\text{m})$	$A_{\text{muro}}(\text{m}^2)$	ζ	Condición	λ	Condición	$A_{\text{ceq}}(\text{m}^2)$	$I_{\text{eq}}(\text{m}^4)$
0.50	5.00	0.70	2.00	Cumple	1.139	Cumple	0.1289	0.7813
0.75	3.33	0.47	1.33	Cumple	1.709	Cumple	0.1475	0.3472
1.00	2.50	0.35	1.00	Cumple	2.278	Cumple	0.1436	0.1953
1.50	1.67	0.23	0.67	Inferior	3.417	Cumple	0.1321	0.0868
2.00	1.25	0.18	0.50	Inferior	4.556	Cumple	0.1244	0.0488
2.50	1.00	0.14	0.40	Inferior	5.695	Cumple	0.1200	0.0313

**Tabla 5.3. Propiedades geométricas y mecánicas equivalentes para el muro 2 (muro central).
Edificio cinco niveles**

CASO H/L	$L_{\text{muro}}(\text{m})$	$A_{\text{muro}}(\text{m}^2)$	ζ	Condición	λ	Condición	$A_{\text{ceq}}(\text{m}^2)$	$I_{\text{eq}}(\text{m}^4)$
0.50	4.80	0.67	2.00	Cumple	1.187	Cumple	0.1254	0.7200
0.75	3.20	0.45	1.33	Cumple	1.780	Cumple	0.1438	0.3200
1.00	2.40	0.34	1.00	Cumple	2.373	Cumple	0.1404	0.1800
1.50	1.60	0.22	0.67	Inferior	3.560	Cumple	0.1298	0.0800
2.00	1.20	0.17	0.50	Inferior	4.746	Cumple	0.1228	0.0450
2.50	0.96	0.13	0.40	Inferior	5.933	Cumple	0.1189	0.0288

De igual manera, las tablas 5.4 y 5.5 muestran las correspondientes propiedades mecánicas y geométricas equivalentes para el muro tres, es decir los muros laterales, del edificio de tres y cinco niveles respectivamente.

Tabla 5.4. Propiedades geométricas y mecánicas equivalentes para el muro 3 (muros laterales).
Edificio tres niveles

CASO H/L	$L_{\text{muro}}(\text{m})$	$A_{\text{muro}}(\text{m}^2)$	ζ	Condicion	λ	Condición	$A_{\text{eq}}(\text{m}^2)$	$I_{\text{eq}}(\text{m}^4)$
0.42	5.95	0.833	2.38	Cumple	0.957	Cumple	0.1019	1.1072
0.45	5.56	0.778	2.22	Cumple	1.025	Cumple	0.1146	0.9645
0.50	5.00	0.700	2.00	Cumple	1.139	Cumple	0.1289	0.7813
0.55	4.55	0.636	1.82	Cumple	1.253	Cumple	0.1375	0.6457
0.60	4.17	0.583	1.67	Cumple	1.367	Cumple	0.1427	0.5425
0.65	3.85	0.538	1.54	Cumple	1.481	Cumple	0.1456	0.4623
0.70	3.57	0.500	1.43	Cumple	1.595	Cumple	0.1470	0.3986
0.75	3.33	0.467	1.33	Cumple	1.709	Cumple	0.1475	0.3472
0.80	3.13	0.438	1.25	Cumple	1.823	Cumple	0.1473	0.3052
0.85	2.94	0.412	1.18	Cumple	1.936	Cumple	0.1467	0.2703
0.90	2.78	0.389	1.11	Cumple	2.050	Cumple	0.1459	0.2411
0.95	2.63	0.368	1.05	Cumple	2.164	Cumple	0.1448	0.2164
1.00	2.50	0.350	1.00	Cumple	2.278	Cumple	0.1436	0.1953
1.05	2.38	0.333	0.95	Cumple	2.392	Cumple	0.1424	0.1772
1.10	2.27	0.318	0.91	Cumple	2.506	Cumple	0.1412	0.1614
1.15	2.17	0.304	0.87	Cumple	2.620	Cumple	0.1399	0.1477
1.20	2.08	0.292	0.83	Cumple	2.734	Cumple	0.1387	0.1356
1.25	2.00	0.280	0.80	Cumple	2.848	Cumple	0.1375	0.1250
1.30	1.92	0.269	0.77	Cumple	2.962	Cumple	0.1363	0.1156
1.35	1.85	0.259	0.74	Inferior	3.076	Cumple	0.1352	0.1072
1.40	1.79	0.250	0.71	Inferior	3.189	Cumple	0.1341	0.0996
1.45	1.72	0.241	0.69	Inferior	3.303	Cumple	0.1331	0.0929
1.50	1.67	0.233	0.67	Inferior	3.417	Cumple	0.1321	0.0868
1.55	1.61	0.226	0.65	Inferior	3.531	Cumple	0.1311	0.0813
1.60	1.56	0.219	0.63	Inferior	3.645	Cumple	0.1302	0.0763
1.65	1.52	0.212	0.61	Inferior	3.759	Cumple	0.1294	0.0717
1.70	1.47	0.206	0.59	Inferior	3.873	Cumple	0.1285	0.0676
1.75	1.43	0.200	0.57	Inferior	3.987	Cumple	0.1278	0.0638
1.80	1.39	0.194	0.56	Inferior	4.101	Cumple	0.1270	0.0603
1.85	1.35	0.189	0.54	Inferior	4.215	Cumple	0.1263	0.0571
1.90	1.32	0.184	0.53	Inferior	4.329	Cumple	0.1257	0.0541
1.95	1.28	0.179	0.51	Inferior	4.442	Cumple	0.1250	0.0514
2.00	1.25	0.175	0.50	Inferior	4.556	Cumple	0.1244	0.0488
2.05	1.22	0.171	0.49	Inferior	4.670	Cumple	0.1239	0.0465
2.10	1.19	0.167	0.48	Inferior	4.784	Cumple	0.1233	0.0443
2.15	1.16	0.163	0.47	Inferior	4.898	Cumple	0.1228	0.0423
2.20	1.14	0.159	0.45	Inferior	5.012	Cumple	0.1224	0.0404
2.25	1.11	0.156	0.44	Inferior	5.126	Cumple	0.1219	0.0386
2.30	1.09	0.152	0.43	Inferior	5.240	Cumple	0.1215	0.0369
2.35	1.06	0.149	0.43	Inferior	5.354	Cumple	0.1211	0.0354
2.40	1.04	0.146	0.42	Inferior	5.468	Cumple	0.1207	0.0339
2.45	1.02	0.143	0.41	Inferior	5.582	Cumple	0.1204	0.0325
2.50	1.00	0.140	0.40	Inferior	5.695	Cumple	0.1200	0.0313

Tabla 5.5. Propiedades geométricas y mecánicas equivalentes para el muro 3 (muro lateral).

Edificio cinco niveles								
CASO H/L	$L_{\text{muro}}(\text{m})$	$A_{\text{muro}}(\text{m}^2)$	ζ	Condición	λ	Condición	$A_{\text{eq}}(\text{m}^2)$	$I_{\text{eq}}(\text{m}^4)$
0.40	6.00	0.840	2.50	Cumple	0.949	Cumple	0.08862	1.125
0.45	5.33	0.747	2.22	Cumple	1.068	Cumple	0.11148	0.8889
0.50	4.80	0.672	2.00	Cumple	1.187	Cumple	0.12536	0.7200
0.55	4.36	0.611	1.82	Cumple	1.305	Cumple	0.13382	0.5950
0.60	4.00	0.560	1.67	Cumple	1.424	Cumple	0.13888	0.5000
0.65	3.69	0.517	1.54	Cumple	1.543	Cumple	0.14178	0.4260
0.70	3.43	0.480	1.43	Cumple	1.661	Cumple	0.14325	0.3673
0.75	3.20	0.448	1.33	Cumple	1.780	Cumple	0.14379	0.3200
0.80	3.00	0.420	1.25	Cumple	1.898	Cumple	0.14370	0.2813
0.85	2.82	0.395	1.18	Cumple	2.017	Cumple	0.14319	0.2491
0.90	2.67	0.373	1.11	Cumple	2.136	Cumple	0.14242	0.2222
0.95	2.53	0.354	1.05	Cumple	2.254	Cumple	0.14147	0.1994
1.00	2.40	0.336	1.00	Cumple	2.373	Cumple	0.14041	0.1800
1.05	2.29	0.320	0.95	Cumple	2.492	Cumple	0.13930	0.1633
1.10	2.18	0.305	0.91	Cumple	2.610	Cumple	0.13815	0.1488
1.15	2.09	0.292	0.87	Cumple	2.729	Cumple	0.13701	0.1361
1.20	2.00	0.280	0.83	Cumple	2.848	Cumple	0.13588	0.1250
1.25	1.92	0.269	0.80	Cumple	2.966	Cumple	0.13477	0.1152
1.30	1.85	0.258	0.77	Cumple	3.085	Cumple	0.13369	0.1065
1.35	1.78	0.249	0.74	Inferior	3.204	Cumple	0.13265	0.0988
1.40	1.71	0.240	0.71	Inferior	3.322	Cumple	0.13166	0.0918
1.45	1.66	0.232	0.69	Inferior	3.441	Cumple	0.13070	0.0856
1.50	1.60	0.224	0.67	Inferior	3.560	Cumple	0.12978	0.0800
1.55	1.55	0.217	0.65	Inferior	3.678	Cumple	0.12891	0.0749
1.60	1.50	0.210	0.63	Inferior	3.797	Cumple	0.12808	0.0703
1.65	1.45	0.204	0.61	Inferior	3.916	Cumple	0.12729	0.0661
1.70	1.41	0.198	0.59	Inferior	4.034	Cumple	0.12654	0.0623
1.75	1.37	0.192	0.57	Inferior	4.153	Cumple	0.12583	0.0588
1.80	1.33	0.187	0.56	Inferior	4.272	Cumple	0.12516	0.0556
1.85	1.30	0.182	0.54	Inferior	4.390	Cumple	0.12452	0.0526
1.90	1.26	0.177	0.53	Inferior	4.509	Cumple	0.12392	0.0499
1.95	1.23	0.172	0.51	Inferior	4.628	Cumple	0.12335	0.0473
2.00	1.20	0.168	0.50	Inferior	4.746	Cumple	0.12281	0.0450
2.05	1.17	0.164	0.49	Inferior	4.865	Cumple	0.12231	0.0428
2.10	1.14	0.160	0.48	Inferior	4.983	Cumple	0.12183	0.0408
2.15	1.12	0.156	0.47	Inferior	5.102	Cumple	0.12138	0.0389
2.20	1.09	0.153	0.45	Inferior	5.221	Cumple	0.12096	0.0372
2.25	1.07	0.149	0.44	Inferior	5.339	Cumple	0.12056	0.0356
2.30	1.04	0.146	0.43	Inferior	5.458	Cumple	0.12019	0.0340
2.35	1.02	0.143	0.43	Inferior	5.577	Cumple	0.11984	0.0326
2.40	1.00	0.140	0.42	Inferior	5.695	Cumple	0.11951	0.0313
2.45	0.98	0.137	0.41	Inferior	5.814	Cumple	0.11921	0.0300
2.50	0.96	0.134	0.40	Inferior	5.933	Cumple	0.11892	0.0288

Con el mismo procedimiento del capítulo anterior, se obtuvieron las gráficas mostradas a continuación. Se comparan las fuerzas calculadas con el método de Damy considerando que todos los muros están agrietados y las fuerzas obtenidas con el Método Simplificado, para los edificios de tres y cinco niveles. Se muestran tres de los cinco casos de estudio; cada caso corresponde a un valor de la relación H/L del muro central.

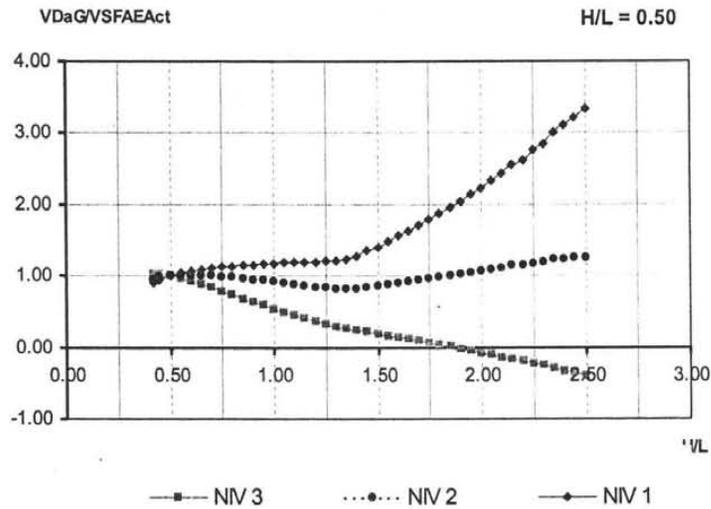


Figura 5.2. Comparación de fuerzas cortantes según Método de Damy_Ag y FAE reglamentario. Caso en que $H/L = 0.50$

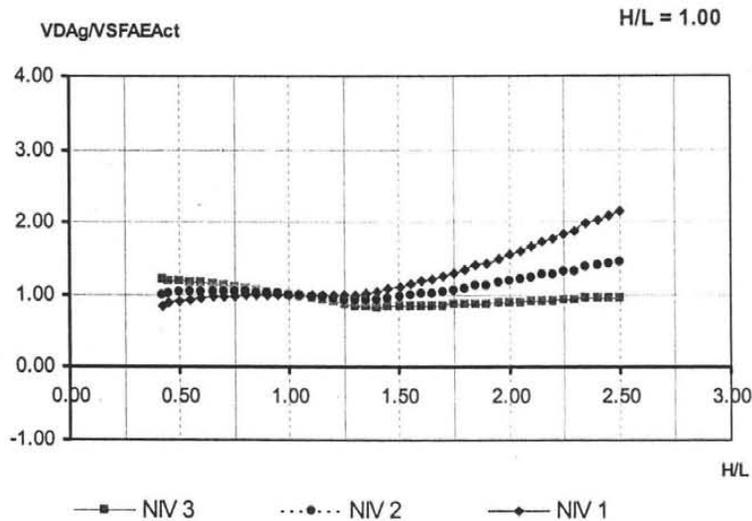


Figura 5.3. Comparación de fuerzas cortantes según Método de Damy_Ag y FAE reglamentario. Caso en que $H/L = 1.00$

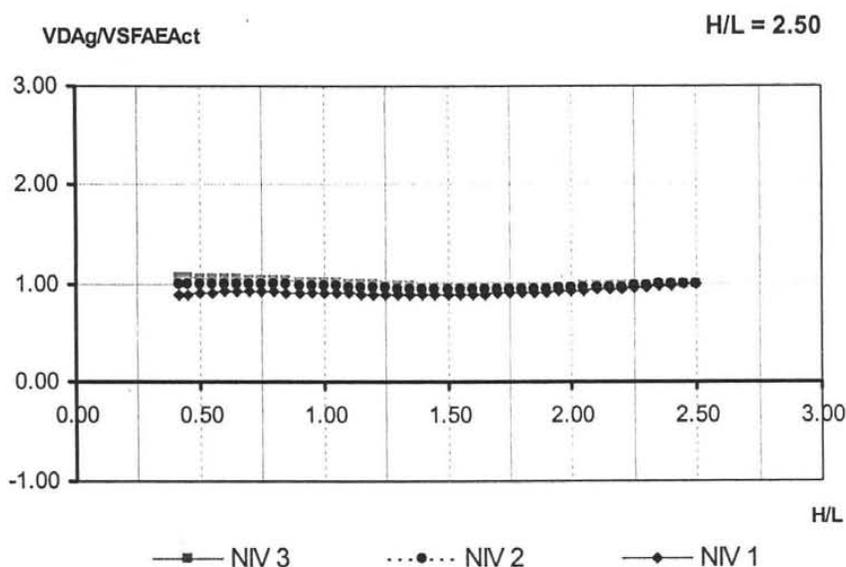


Figura 5.4. Comparación de fuerzas cortantes según Método de Damy_Ag y FAE reglamentario. Caso en que $H/L = 2.50$

Las figuras 5.2 y 5.3, se refieren a casos de estudio en que el muro central tiene una relación de aspecto de 0.50 y 1.0, respectivamente; es claro que el cociente de la fuerza cortante según el Método de Damy y la fuerza cortante según el Método Simplificado llega a ser del orden de tres, por lo que el Método Simplificado subestima de forma importante la fuerza cortante; este hecho se vuelve más relevante al notar que es el nivel uno donde se presenta la mayor subestimación de fuerzas por parte del Método Simplificado. Es interesante ver que esta situación se da cuando las relaciones de aspecto de todos los muros de un mismo entrepiso son muy diferentes entre sí; por ejemplo, de la figura 5.2, caso en que la relación de aspecto $H/L=0.50$ en el muro central, el cociente máximo se alcanza en los muros esbeltos, es decir, con relación de aspecto $H/L=2.5$. Ocurre algo similar en la figura 5.3, en la que también se puede ver que es el primer nivel del edificio el que resulta más afectado, ya que con el Método Simplificado se le asocia una fuerza cortante sísmica del orden de una tercera parte de la que se calcula con el Método de Damy.

En forma análoga, en la figura 5.4, caso en que la relación de aspecto $H/L = 2.50$ en el muro central, se observa que el cociente de fuerzas tiende a la unidad para todas las relaciones de aspecto, y que en este caso de estudio el hecho de que haya relaciones de aspecto diferentes en los muros de un mismo entrepiso no tiene efecto significativo. Lo anterior se debe a que como predominan los muros esbeltos, hay poca influencia de las deformaciones por cortante, predominando el impacto de las deformaciones por flexión.

El hecho de tener relaciones de aspecto muy diferentes en los muros de un mismo entreciso, tiene un mayor impacto sobre la forma en que se distribuyen las fuerzas cortantes cuando el muro central tiende a ser robusto, por lo que las deformaciones por cortante juegan un papel importante. Esta situación es muy común en los edificios de mampostería típicos de México, y como ilustran las gráficas anteriores, el Factor de Área Efectiva propuesta en las NTC actuales no lo está tomando en cuenta, ya que subestima las fuerzas cortantes calculadas; más aún, es el nivel uno en donde se tiene un efecto mayor, que como ya se ha dicho es el nivel crítico de diseño y se está asumiendo una fuerza cortante de aproximadamente 30% de la calculada tomando en cuenta las deformaciones por corte.

Otro aspecto que también resulta importante comentar, es que cuando se considera que los muros permanecen elásticos en toda la altura, tema tratado en el capítulo anterior, la forma y curvatura de las curvas correspondientes a cada nivel es más o menos parecida en cada caso de estudio. En el caso del presente capítulo, en que ahora los muros se han considerado agrietados en toda su altura, no persiste este comportamiento, sino que para un mismo caso de estudio, las curvas de cada nivel presentan formas distintas, en especial en los casos de estudio correspondientes a muros robustos con relaciones de aspecto bajas.

Lo anterior se debe a que en la deducción de las ecuaciones 5.1 y 5.2, utilizadas para modelar según el método de la columna ancha equivalente, se utilizaron muros de un solo nivel en voladizo, mientras que en el presente análisis se ha supuesto que los tres muros están en las mismas condiciones de apoyo y en las mismas condiciones de daño, es decir, continuos y agrietados simultáneamente. Como es de esperarse, ello tiene impacto en el ensamble de la matriz de rigidez utilizada para el método de Damy. Además, se ha observado en estructuras de mampostería existentes que, ante sismos (reales o simulados en laboratorio), en mampostería confinada y reforzada se agrieta considerablemente el muro del primer entreciso, mientras que los muros de niveles superiores permanecen con poco o nulo agrietamiento, sobre todo los del último nivel (Ruiz 1995, Arias, Vázquez y Alcocer 2004). Tratándose de edificios de mayor altura, como el caso del edificio de cinco niveles aquí estudiado, el agrietamiento severo se llega a presentar inclusive en el segundo nivel. En el capítulo siguiente se presentan los resultados obtenidos de un estudio que toma en cuenta este patrón de agrietamiento. Con lo anterior, se pretende concluir que es posible obtener Factores de Área Efectiva que tomen en cuenta la cantidad de daño que se espera en una estructura ante un evento sísmico.

Veamos ahora los resultados obtenidos para el edificio de cinco niveles. Las gráficas 5.5 y 5.6 dejan ver claramente cómo se disparan las curvas correspondientes al nivel cinco del edificio cuando se excede el valor de H/L que marca el límite impuesto en las hipótesis de la columna

ancha equivalente, es decir, $H/L = 1.33$. La subestimación de fuerzas cortantes por parte del Método Simplificado respecto al Método de Damy es menor para los niveles superiores con respecto a los inferiores, como puede constatarse con las curvas correspondientes al nivel cinco y al nivel uno. En los niveles inferiores, el cociente de fuerzas es menor que la unidad, indicando que los valores dados por el Método Simplificado son menores respecto al Método de Damy.

Como se ha venido mencionando en el desarrollo de este trabajo, el primer nivel es el que se considera crítico, y es en ese nivel donde se presenta mayor subestimación. Con la gráfica de la figura 5.7 se comprueba que cuando predominan los muros esbeltos, el cociente de fuerzas se aproxima a la unidad. Al predominar los muros robustos, la subestimación de fuerzas ocurre en los niveles inferiores, mientras que para el caso de muros esbeltos, la subestimación de fuerzas tiende a presentarse en los niveles superiores.

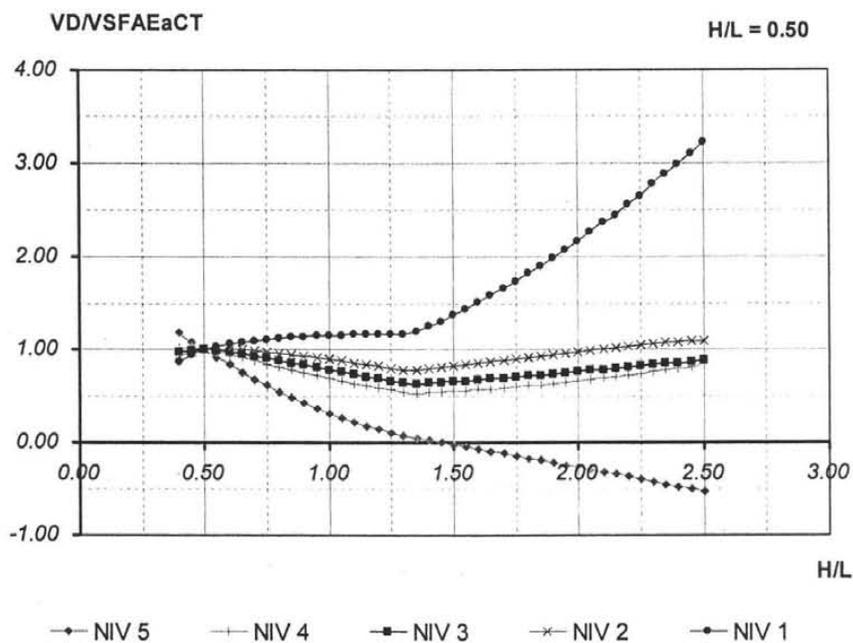


Figura 5.5. Comparación de fuerzas cortantes según Método de Damy_Ag y FAE reglamentario. Caso en que $H/L = 0.50$

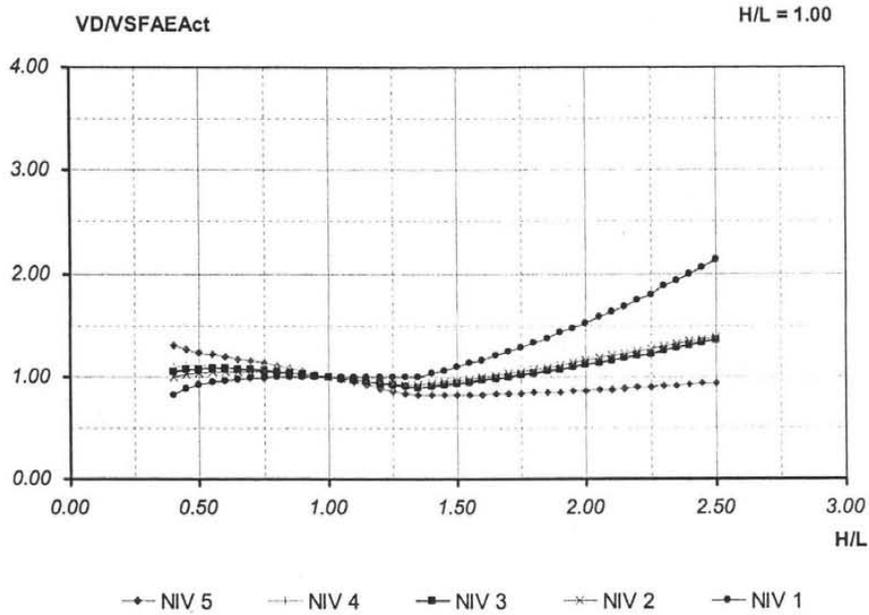


Figura 5.6. Comparación de fuerzas cortantes según Método de Damy_Ag y FAE reglamentario. Caso en que H/L = 1.00

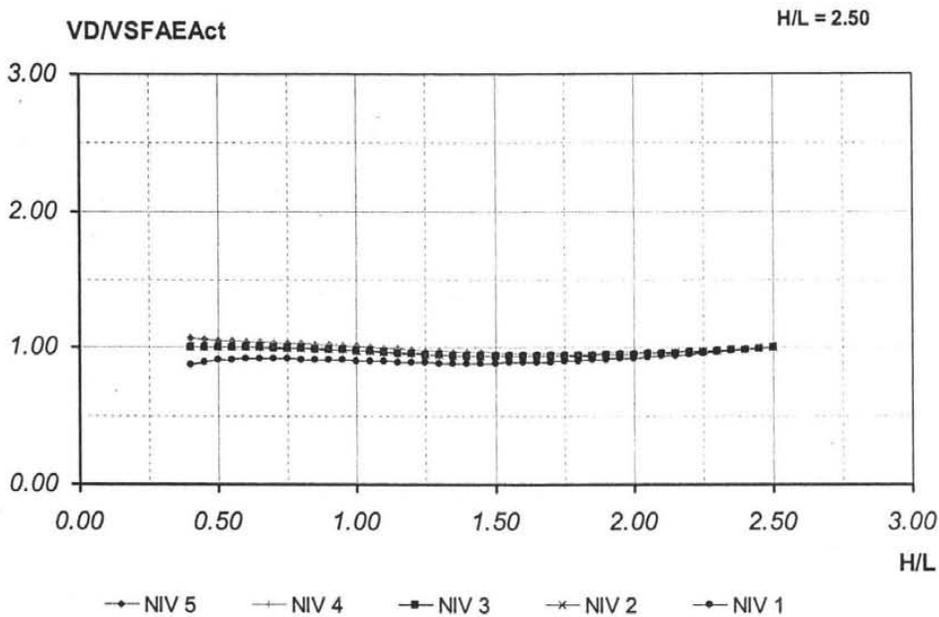


Figura 5.7. Comparación de fuerzas cortantes según Método de Damy_Ag y FAE reglamentario. Caso en que H/L = 2.50

Una vez que se han visto los resultados que se obtienen al comparar las fuerzas cortantes con el Método de Damy asignando a los muros las propiedades correspondientes al estado agrietado según la columna ancha equivalente, y las fuerzas cortantes de acuerdo con la versión vigente de las Normas Técnicas Complementarias para Mampostería 2004, se pretende ahora determinar algún parámetro que refleje de manera simple y adecuada el impacto tanto de la relación de aspecto de los muros como de sus condiciones de agrietamiento severo. Dicho de otra forma, se pretende determinar un Factor de Área Efectiva Equivalente que considera el agrietamiento de la totalidad de los muros (F_{AETA} , Factor de Área Efectiva de Muros Agrietados en su Totalidad) con el cual puedan evaluarse las fuerzas cortantes en muros cuando se espera en todos ellos un daño severo ante sismos de intensidad considerable.

Ahora bien, como se ha mencionado, el método de la columna ancha equivalente impone el límite de 1.33 para la relación de aspecto H/L ; según las NTCM 2004, para valores H/L menores a este valor se asocia un $F_{AE} = 1$. Como siguiente etapa de análisis, se hizo la comparación de fuerzas cortantes asociando a todos los muros un Factor de Área Efectiva igual a la unidad, sin importar su relación de aspecto. Los resultados se muestran gráficamente a continuación. Primero se muestran los resultados obtenidos con el edificio de tres niveles.

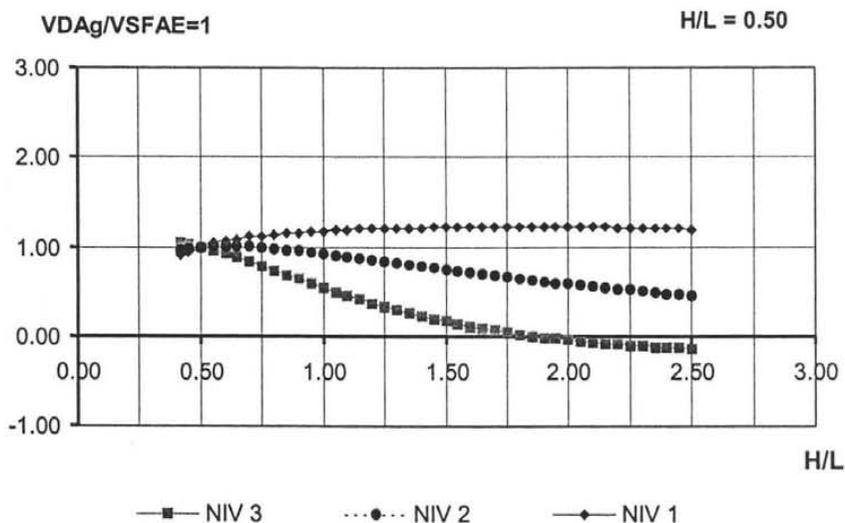


Figura 5.8. Comparación de fuerzas cortantes según Método de Damy_Ag y $F_{AE} = 1$. Caso en que $H/L = 0.50$, edificio tres niveles

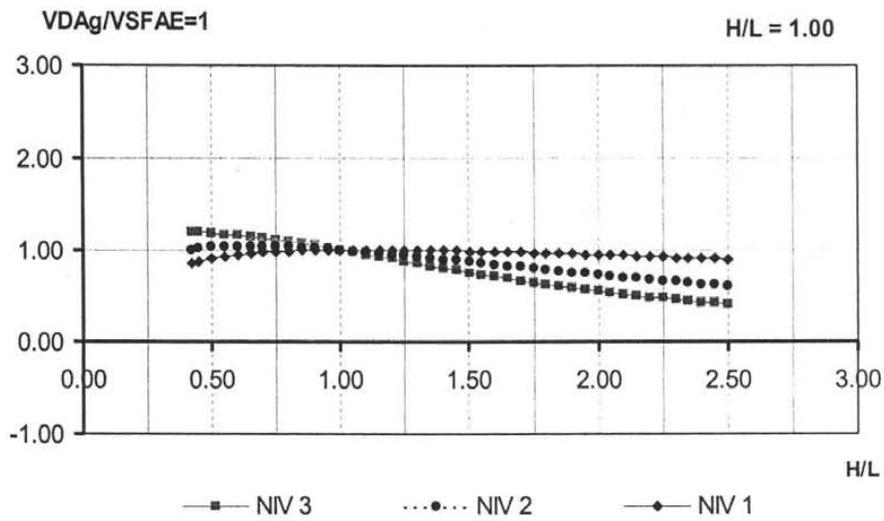


Figura 5.9. Comparación de fuerzas cortantes según Método de Damy_Ag y $F_{AE} = 1$. Caso en que $H/L = 1.00$, edificio tres niveles

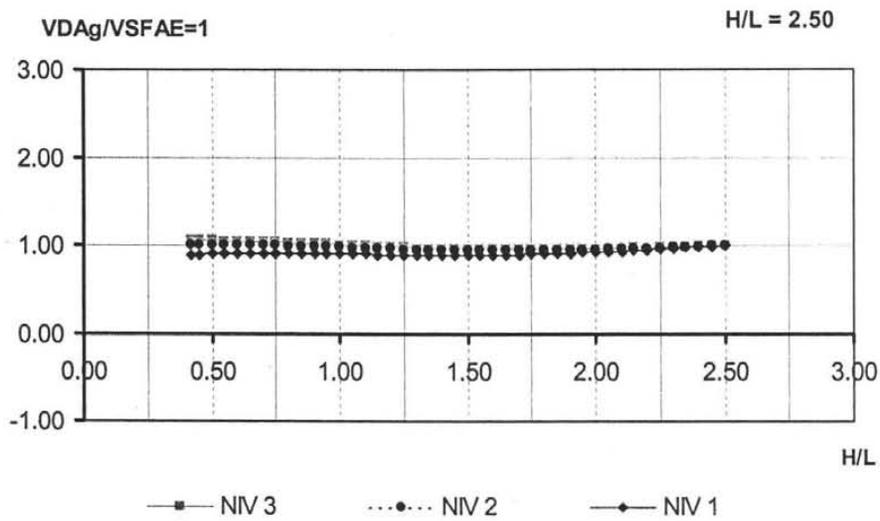


Figura 5.10. Comparación de fuerzas cortantes según Método de Damy_Ag y $F_{AE} = 1$. Caso en que $H/L = 2.50$, edificio tres niveles

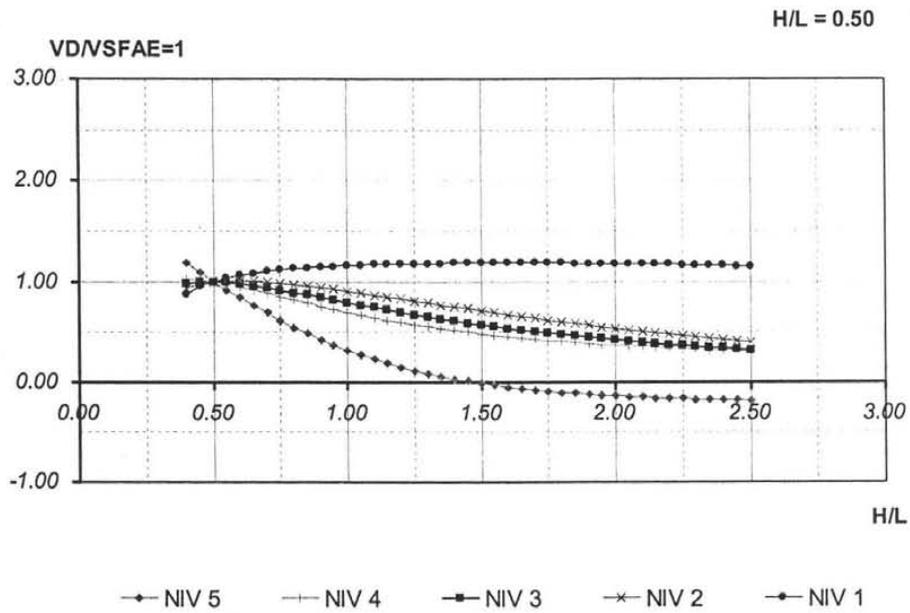


Figura 5.11. Comparación de fuerzas cortantes según Método de Damy_Ag y $F_{AE} = 1$. Caso en que $H/L = 0.50$, edificio cinco niveles

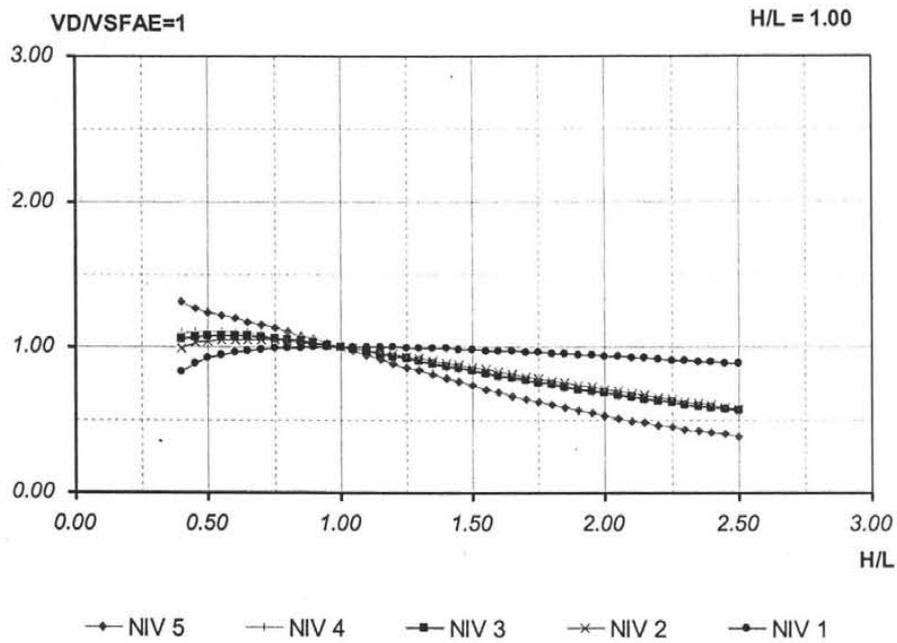


Figura 5.12. Comparación de fuerzas cortantes según Método de Damy_Ag y $F_{AE} = 1$. Caso en que $H/L = 0.50$, edificio cinco niveles

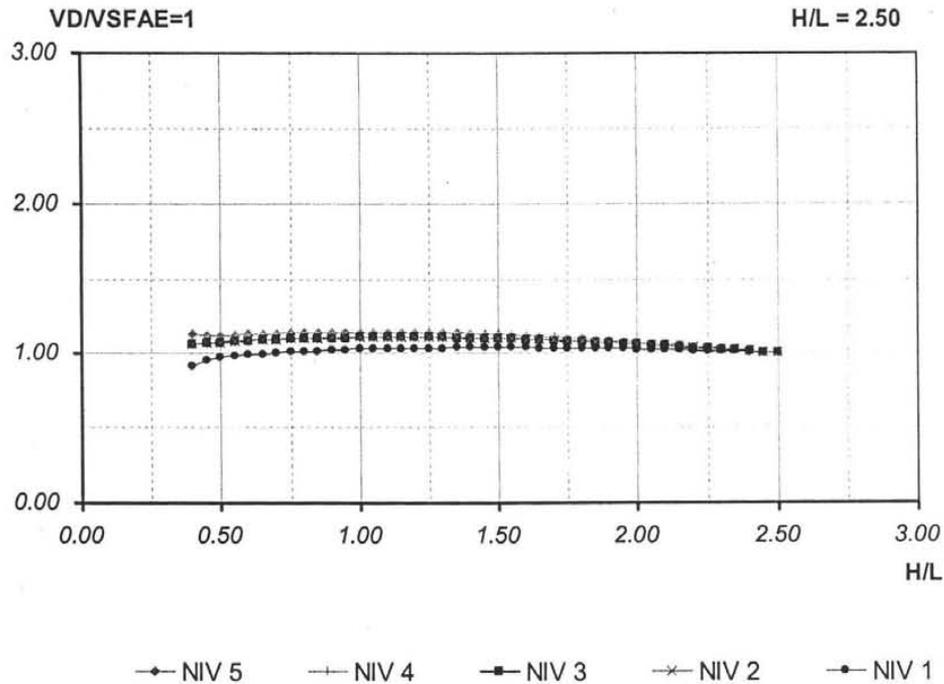


Figura 5.13. Comparación de fuerzas cortantes según Método de Damy_Ag y $F_{AE} = 1$. Caso en que $H/L = 0.50$, edificio cinco niveles

5.3 Propuesta de un nuevo Factor de área Efectiva para muros agrietados en su totalidad F_{AETA}

Al igual que en capítulo cuatro, se trata ahora de encontrar una expresión con la que se puedan evaluar las fuerzas cortantes en muros, en función de su relación de aspecto. Con esta expresión el objetivo es que se obtengan valores aproximados a aquéllos obtenidos con el método de Damy.

Partiendo de la gráfica 5.8, se hicieron varios tipos de regresión, utilizando métodos convencionales. Se probaron ecuaciones de grado dos y de grado tres, hasta seleccionar la expresión que se muestra a continuación, con la cual se observó una mejor coincidencia entre las fuerzas cortantes calculadas con ambos métodos. A este Factor de Área Efectiva se le denota por F_{AETA} , y considera a los muros agrietados en su totalidad.

$$F_{AETA} = 0.1 \left(\frac{H}{L} \right)^3 - 0.6 \left(\frac{H}{L} \right)^2 + 1.1 \left(\frac{H}{L} \right) + 1 \quad (5.8)$$

Con la ecuación propuesta, se volvieron a analizar tanto el edificio de tres niveles como el de cinco niveles, para cada uno de los cinco casos de estudio. Se calcularon nuevamente los cocientes de

fuerzas cortantes dados por el Método de Damy y por el Método Simplificado, con el nuevo valor de F_{AETA} propuesto. Los resultados se presentan en forma gráfica a continuación.

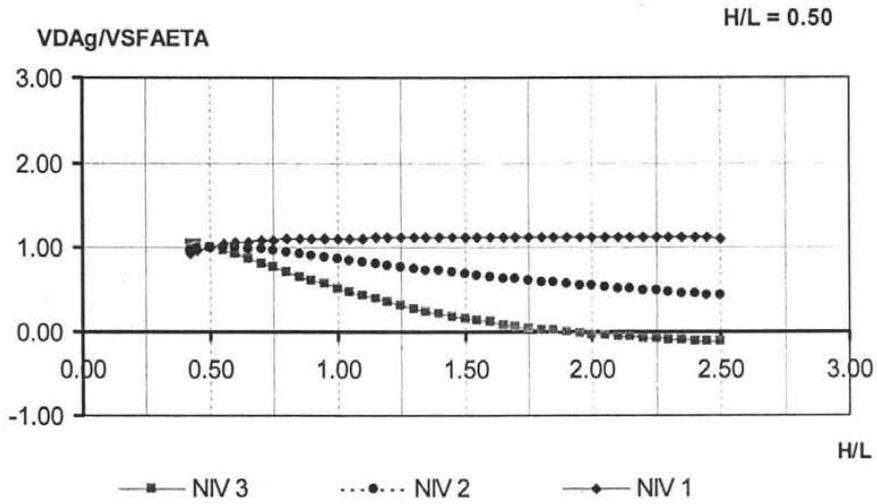


Figura 5.14. Comparación de fuerzas cortantes según Método de Damy_Ag y F_{AETA} . Caso en que $H/L = 0.50$, edificio tres niveles

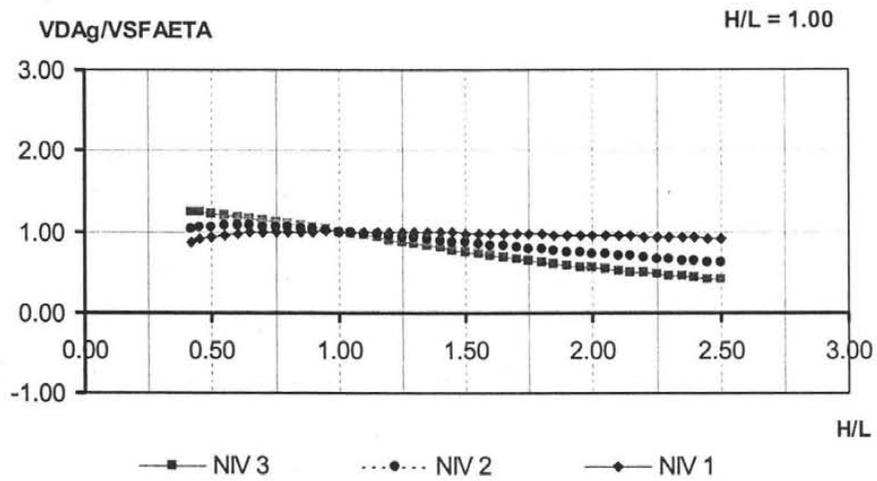


Figura 5.15. Comparación de fuerzas cortantes según Método de Damy_Ag y F_{AETA} . Caso en que $H/L = 1.00$, edificio tres niveles

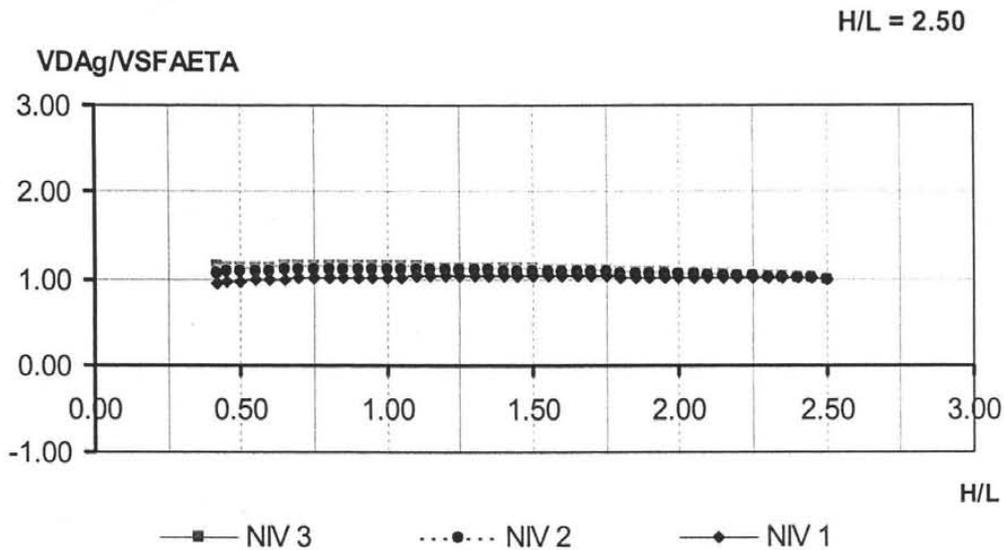


Figura 5.16. Comparación de fuerzas cortantes según Método de Damy_Ag y F_{AETA} . Caso en que $H/L = 2.50$, edificio tres niveles

Puede verse claramente que con el nuevo Factor de Área Efectiva para muros agrietados en su totalidad, se logra una buena coincidencia de fuerzas cortantes ambos métodos, es particular en los muros del nivel uno. En la figura 5.11 predominan los muros robustos; el primer nivel se ajusta razonablemente bien con el cortante dado por el Método de Damy, y en los pisos superiores se obtienen valores conservadores para la fuerza cortante. Pasa algo similar con el caso $H/L=1.0$ mostrado en la figura 5.12, mientras que en la figura 5.13, que representa el caso dominado por muros esbeltos, se logra una coincidencia de fuerzas en todos los niveles. Se muestran a continuación los resultados obtenidos con el edificio de cinco niveles.

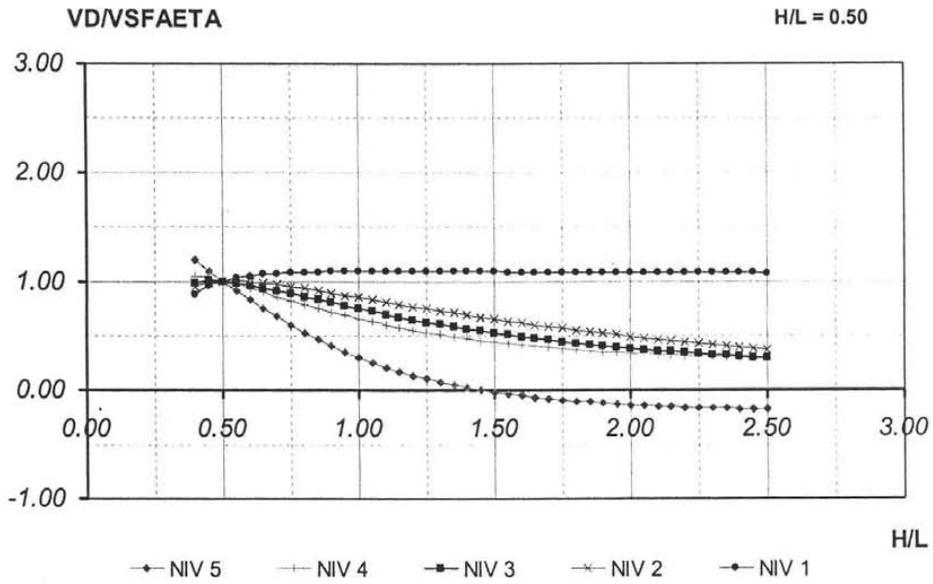


Figura 5.17. Comparación de fuerzas cortantes según Método de Damy_Ag y F_{AETA} . Caso en que $H/L = 0.50$, edificio cinco niveles

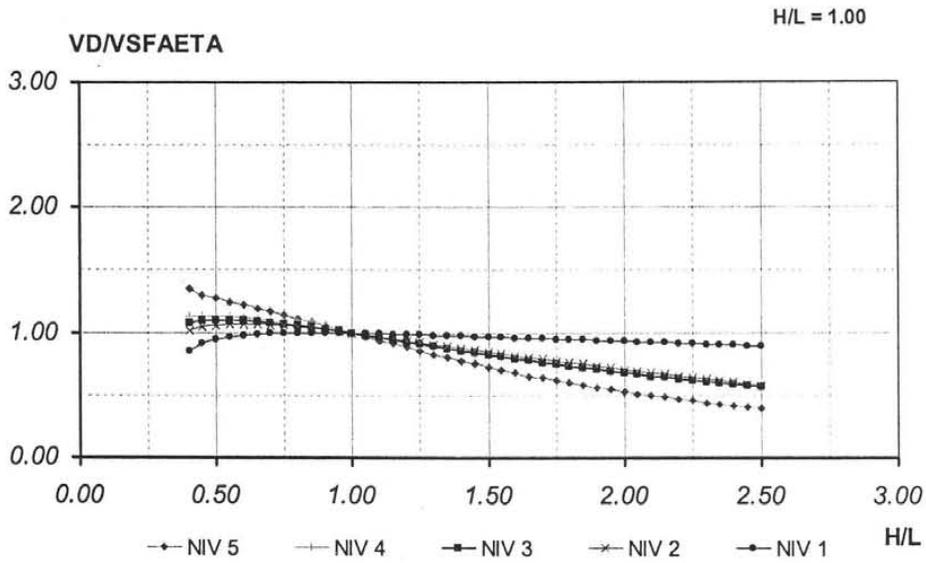


Figura 5.18. Comparación de fuerzas cortantes según Método de Damy_Ag y F_{AETA} . Caso en que $H/L = 1.00$, edificio cinco niveles

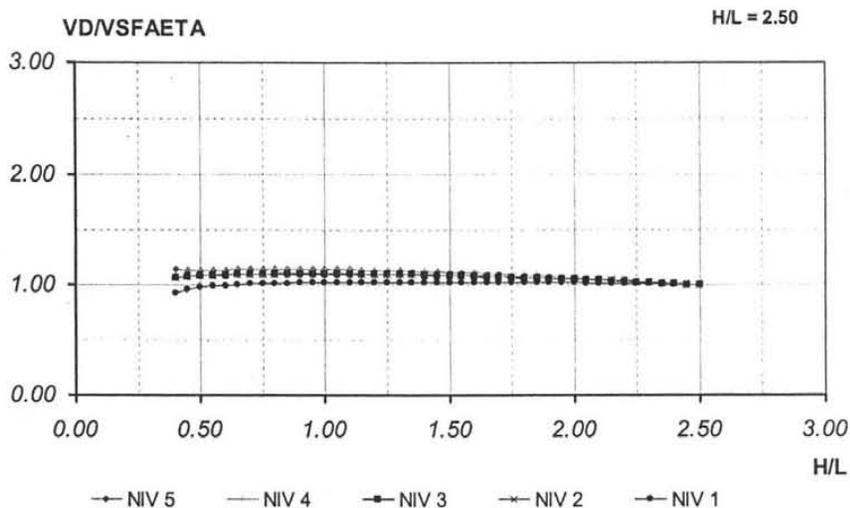


Figura 5.19. Comparación de fuerzas cortantes según Método de Damy_Ag y F_{AETA} . Caso en que $H/L = 2.50$, edificio cinco niveles

La figura 5.14 corresponde al edificio de cinco niveles y está dominada por muros robustos, es decir, $H/L=0.50$ para el muro central. Se nota que con el F_{AETA} propuesto, se logra una buena aproximación de fuerzas cortantes, ya que los cocientes del nivel uno tienden a la unidad. En los niveles restantes, hay una sobre estimación de fuerzas, lo cual es conservador. En la figura 5.15, correspondiente a $H/L=1.0$, la concordancia de fuerzas es aún mejor en el nivel uno. Hay una ligera subestimación de fuerzas en el nivel cinco, el cual no es crítico. En la gráfica de la figura 5.16, en la que predominan muros esbeltos, caso $H/L=2.5$, las curvas son prácticamente horizontales y cercanas a la unidad, por lo que también hay buena correlación de fuerzas cortantes en todos los niveles.

En conclusión, se propone la siguiente expresión para calcular el Factor de Área Efectiva de muros agrietados en su totalidad, F_{AETA} :

$$F_{AETA} = 0.1\left(\frac{H}{L}\right)^3 - 0.6\left(\frac{H}{L}\right)^2 + 1.1\left(\frac{H}{L}\right) + 1 \tag{5.8)c}$$

6. Comparación de las fuerzas cortantes que absorben los muros en modelos simétricos según el Método Simplificado con respecto a los obtenidos con un análisis riguroso, considerando que en el edificio los muros de los niveles inferiores están agrietados de acuerdo con el modelo propuesto por Bazán y Meli.

Se presenta en este capítulo la metodología implantada para hacer la comparación de fuerzas cortantes obtenidas en muros según el Método Simplificado de las Normas Técnicas Complementarias y el Método riguroso de Damy, considerando en este último que los muros se han agrietado en los niveles inferiores. En el caso del edificio de tres niveles, se considera agrietado sólo el primer nivel, mientras que en el edificio de cinco niveles se ha considerado que se agrietan los dos niveles inferiores. Para usar el Método de Damy y modelar este agrietamiento, se toman propiedades mecánicas y geométricas equivalentes, según se describe a continuación. En lo subsecuente se denominará como Método de Damy_Pa.

La figura 6.1 muestra el patrón de agrietamiento modelado, correspondiente a los modelos en estudio.

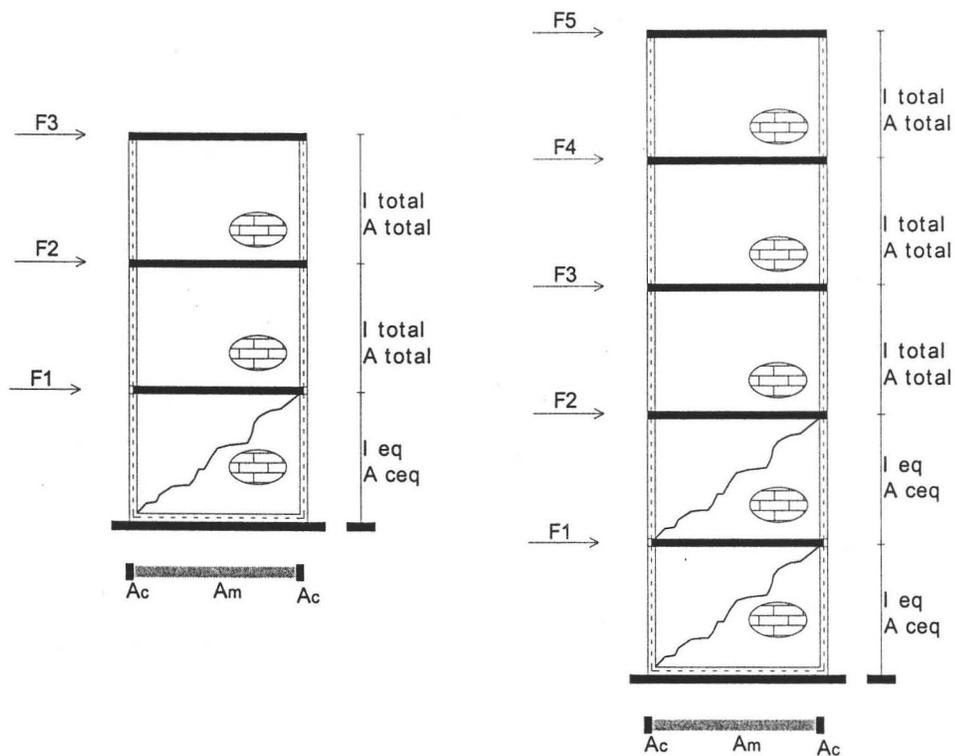


Figura 6.1. Patrón de agrietamiento en los edificios de tres niveles y cinco niveles.

6.1 Comparación de fuerzas cortantes considerando F_{AE} según las NTCM 2004

Para esta etapa de análisis, se consideró que los muros están agrietados en los niveles inferiores y se asignó a los mismos propiedades mecánicas tales que se cumplieran los límites impuestos por las ecuaciones 5.5 y 5.6, con base en los cuales se adecuó y acotó la geometría de los muros de los edificios en estudio. Se modificaron nuevamente los programas de computadora empleados en el capítulo anterior para tomar en cuenta el agrietamiento deseado, en particular el programa *RKD* (Pérez 2000) utilizado para calcular la matriz de rigidez de los muros.

A los niveles inferiores que se consideran agrietados, se les asignaron propiedades mecánicas equivalentes de acuerdo al método de Bazán y Meli, según se indica en el capítulo cinco; los niveles superiores de los muros se mantienen elásticos, por lo que se les asociaron sus propiedades geométricas brutas. Las propiedades equivalentes se calcularon con las expresiones

$$I_{eq} = A_c \frac{b^2}{2} \quad (6.1)$$

$$A_{ceq} = (0.37 - 0.12\zeta + 0.023\lambda)(A_m + 2A_c) \quad (6.2)$$

I_{eq} representa el momento de inercia equivalente de la sección, y A_{ceq} es el área de cortante equivalente. Las propiedades de los materiales son las mismas que se indican en el capítulo cinco.

Se analizaron los edificios como se ha venido describiendo en capítulos anteriores. Se comparan a continuación las fuerzas calculadas con el método de Damy considerando que los muros están agrietados en los niveles inferiores y las fuerzas obtenidas con el Método Simplificado, para los edificios de tres y cinco niveles. Se muestran tres de los cinco casos de estudio; cada caso corresponde a un valor de la relación H/L del muro central.

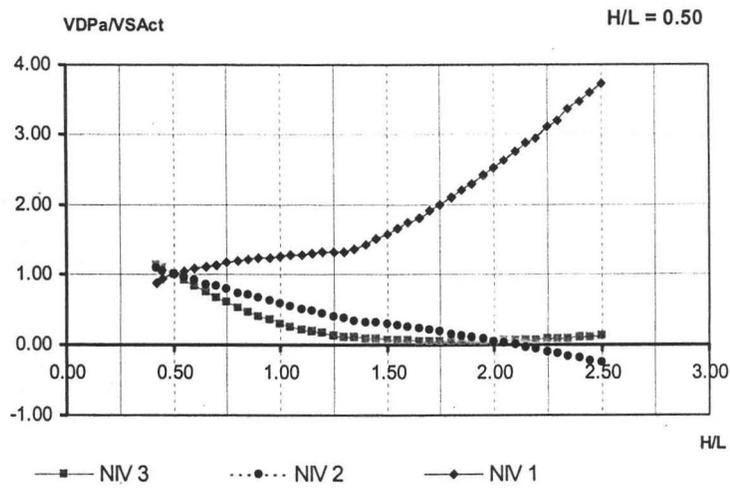


Figura 6.2. Comparación de fuerzas cortantes según Método de Damy_Pa y FAE reglamentario. Caso en que H/L = 0.50

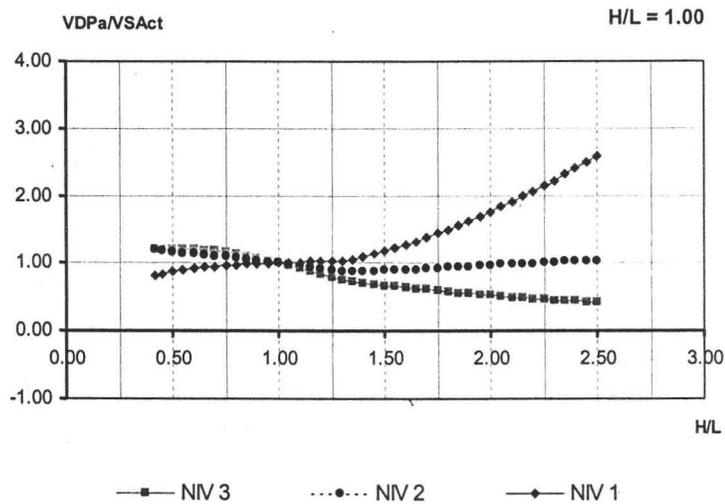


Figura 6.3. Comparación de fuerzas cortantes según Método de Damy_Pa y FAE reglamentario. Caso en que H/L = 1.00

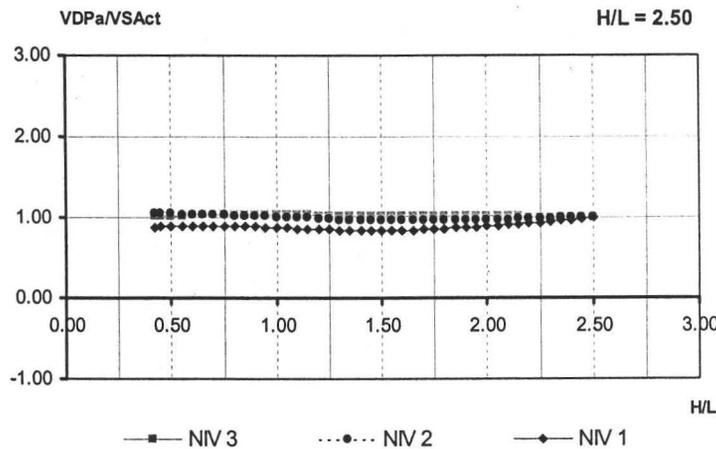


Figura 6.4. Comparación de fuerzas cortantes según Método de Damy_Pa y FAE reglamentario. Caso en que $H/L = 2.50$

Las figuras 6.2 y 6.3, se refieren a casos de estudio en que el muro central tiene una relación de aspecto H/L de 0.50 y 1.0, respectivamente; es claro que el cociente de la fuerza cortante según el Método de Damy y la fuerza cortante según el Método Simplificado llega a ser del orden de cuatro, por lo que el Método Simplificado subestima de forma importante la fuerza cortante. Este hecho se vuelve más relevante al notar que es el nivel uno donde se presenta la mayor subestimación de fuerzas por parte del Método Simplificado. Ocurre algo similar en la figura 6.3, en la que también se observa que es el primer nivel del edificio el que resulta más afectado, ya que con el Método Simplificado se le asocia una fuerza cortante sísmica del orden de una tercera parte de la que se calcula con el Método de Damy.

En forma análoga, en la figura 6.4, caso en que la relación de aspecto es $H/L=2.50$ en el muro central, se observa que el cociente de fuerzas tiende a la unidad para todas las relaciones de aspecto. Este caso está dominado por muros esbeltos, por lo que hay poca influencia de las deformaciones por cortante.

El hecho de tener relaciones de aspecto muy diferentes en los muros de un mismo entrepiso, tiene un mayor impacto sobre la forma en que se distribuyen las fuerzas cortantes cuando el muro central tiende a ser robusto, por lo que las deformaciones por cortante juegan un papel importante. Este hecho también se observó en los modelos estudiados en el capítulo cinco. Los resultados mostrados en el presente capítulo confirman que cuando predominan los muros robustos, la influencia de las deformaciones por cortante es importante, lo cual se comprueba con la gráfica de la figura 6.2, ya que la fuerza cortante calculada con el actual Método Simplificado es del orden de un 25% de la que se obtiene con el Método de Damy, suponiendo que sólo el primero de los tres

niveles se ha agrietado. De acuerdo con la figura 6.4, al tener mayor cantidad de muros esbeltos, el cociente de fuerzas tiende a la unidad, ya que no hay influencia de las deformaciones por cortante.

Veamos ahora los resultados obtenidos para el edificio de cinco niveles. Las gráficas 6.5 y 6.6 dejan ver claramente que la subestimación de fuerzas cortantes del Método Simplificado con respecto al Método de Damy es menor para los niveles superiores y mayor en los inferiores, como puede constatarse con las curvas correspondientes al nivel cinco y al nivel uno. En los niveles inferiores, el cociente de fuerzas es menor que la unidad, indicando que los valores obtenidos con el Método Simplificado son menores con respecto a los obtenidos con el Método de Damy.

Como se ha venido mencionando en el desarrollo de este trabajo, el primer nivel es el que se considera crítico, y es en ese nivel donde se presenta la mayor subestimación. Con los resultados presentados en la figura 6.7 se comprueba que en el caso en que predominan los muros esbeltos, el cociente de fuerzas se aproxima a la unidad. Cuando predominan los muros robustos, la subestimación de fuerzas ocurre en los niveles inferiores, mientras que para el caso de muros esbeltos, la subestimación de fuerzas tiende a presentarse en los niveles superiores.

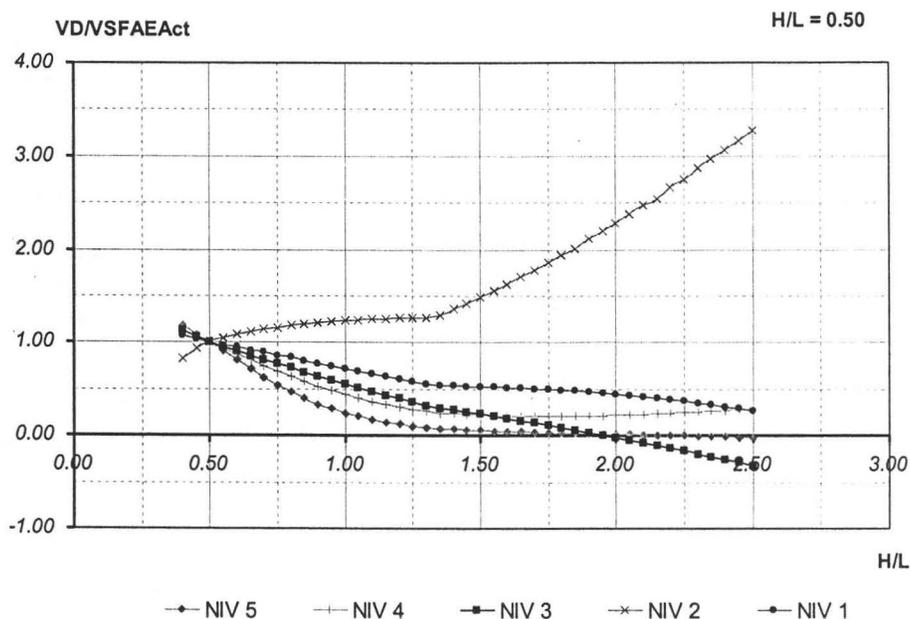


Figura 6.5. Comparación de fuerzas cortantes según Método de Damy_Pa y FAE reglamentario. Caso en que $H/L = 0.50$

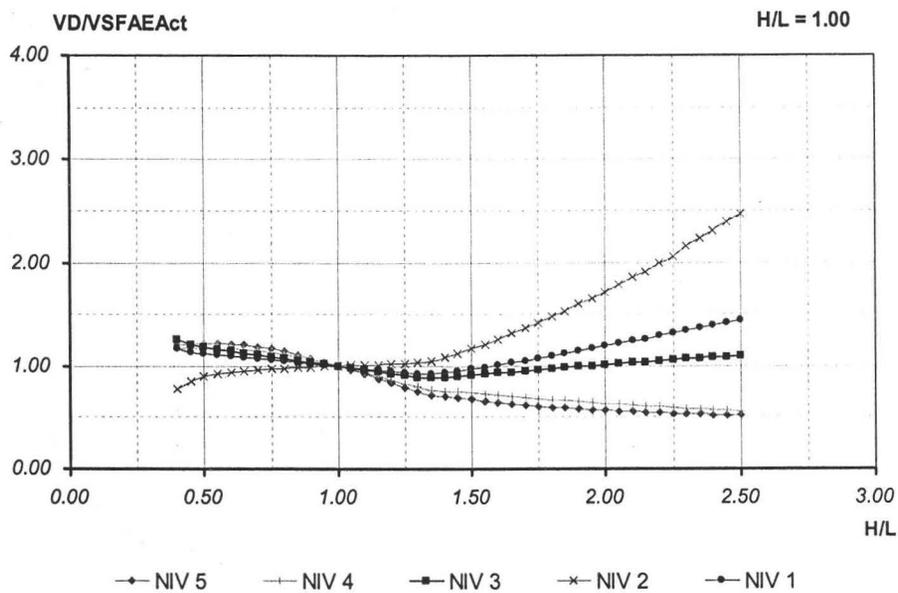


Figura 6.6. Comparación de fuerzas cortantes según Método de Damy_Pa y FAE reglamentario. Caso en que H/L = 1.00

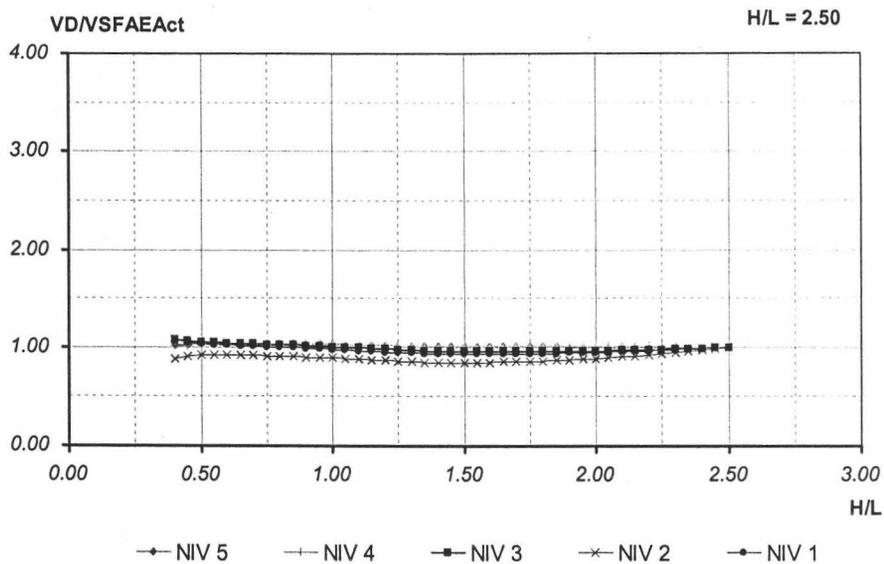


Figura 6.7. Comparación de fuerzas cortantes según Método de Damy_Pa y FAE reglamentario. Caso en que H/L = 2.50

6.2 Propuesta de un nuevo Factor de área Efectiva de edificios parcialmente agrietados FAEPA

Una vez que se han analizado los resultados que se obtienen al comparar las fuerzas cortantes con el Método de Damy asignando a los muros las propiedades correspondientes al estado agrietado según la columna ancha equivalente, y las fuerzas cortantes de acuerdo con la versión vigente de las Normas Técnicas Complementarias para Mampostería 2004, se pretende ahora definir un parámetro que refleje de manera simple y adecuada el impacto tanto de la relación de aspecto de los muros como de sus condiciones de agrietamiento. Se pretende determinar un Factor de Área Efectiva equivalente que considere que los muros están agrietados concretamente en los niveles inferiores (F_{AEPA} , Factor de Área Efectiva de edificios Parcialmente Agrietados) con el cual puedan evaluarse las fuerzas cortantes cuando se espera agrietamientos ante sismos que causen el patrón de daño deseado en estructuras de mampostería confinada y que se ha observado en pruebas experimentales realizadas ante carga cíclica alterna (Ruiz 1995, Ruiz y Alcocer 1996) y recientemente en ensayos de mesa vibradora (Arias, Vázquez y Alcocer 2004).

Como siguiente etapa de análisis, se hizo la comparación de fuerzas cortantes ignorando los factores de área efectiva propuestos por las normas actuales (o visto de otra manera, asociando a todos los muros un Factor de Área Efectiva igual a la unidad, sin importar su relación de aspecto), con la finalidad de ver la tendencia de las curvas que resultan y, a partir de su observación, proponer modelos de regresión adecuados para la definición de factores de área efectiva simples que permitan mejores aproximaciones, sobre todos para el nivel crítico (primer nivel). Los resultados de estas normalizaciones se muestran gráficamente a continuación. Se muestran los resultados obtenidos con los modelos de tres niveles (figuras 6.8 a 6.10) y de cinco niveles (figuras 6.11 a 6.13).

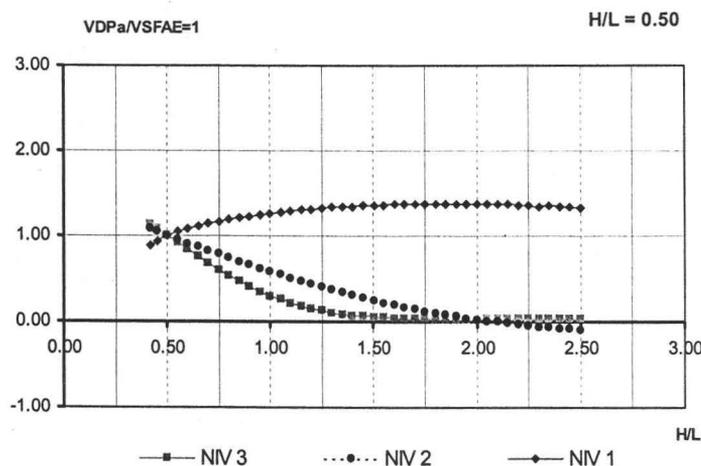


Figura 6.8. Comparación de fuerzas cortantes según Método de Damy_Pa y $F_{AE} = 1$. Caso en que $H/L = 0.50$, edificio tres niveles

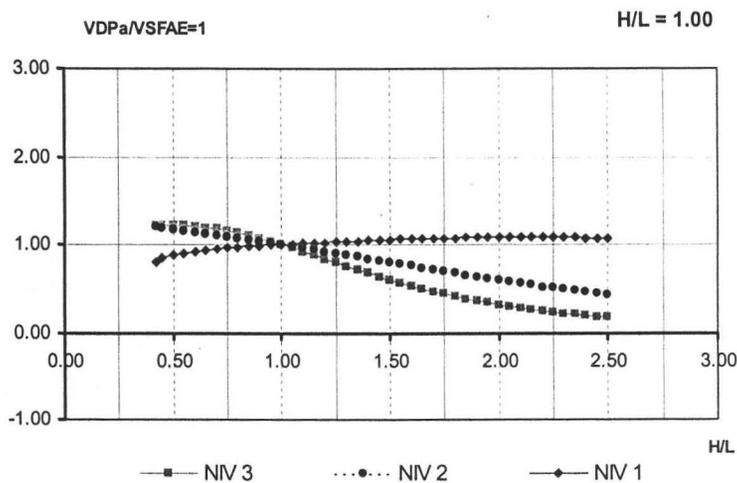


Figura 6.9. Comparación de fuerzas cortantes según Método de Damy_Pa y $F_{AE} = 1$. Caso en que $H/L = 1.00$, edificio tres niveles

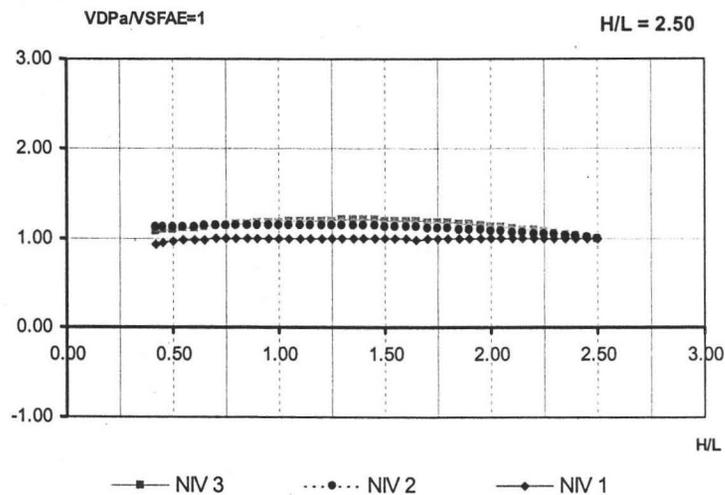


Figura 6.10. Comparación de fuerzas cortantes según Método de Damy_Pa y $F_{AE} = 1$. Caso en que $H/L = 2.50$, edificio tres niveles

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

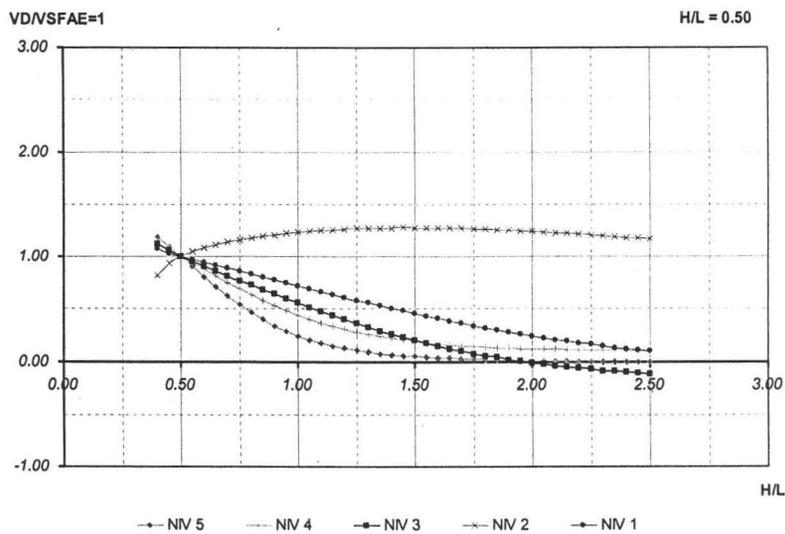


Figura 6.11. Comparación de fuerzas cortantes según Método de Damy_Pa y $F_{AE} = 1$. Caso en que $H/L = 0.50$, edificio tres niveles

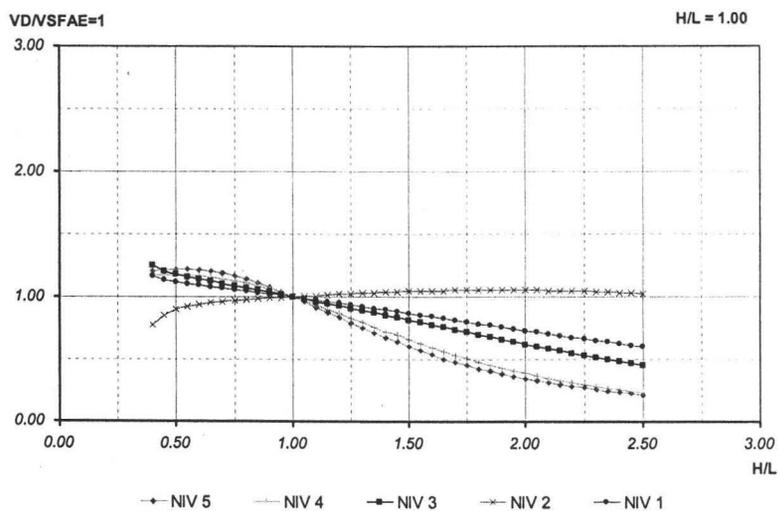


Figura 6.12. Comparación de fuerzas cortantes según Método de Damy_Pa y $F_{AE} = 1$. Caso en que $H/L = 2.50$, edificio tres niveles

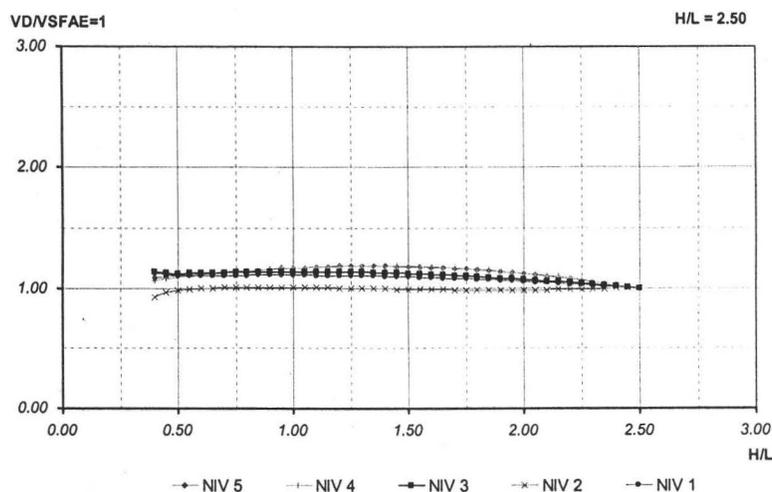


Figura 6.13. Comparación de fuerzas cortantes según Método de Damy_Pa y $F_{AE} = 1$. Caso en que $H/L = 2.50$, edificio tres niveles

Partiendo de las gráficas 6.8 a 6.13, se hicieron varios tipos de regresión, utilizando métodos convencionales. Se probaron ecuaciones de grado dos, grado tres e inclusive grado cuatro, hasta seleccionar la expresión que se muestra a continuación, con la cual se observó una mejor coincidencia entre las fuerzas cortantes calculadas con ambos métodos. A este Factor de Área Efectiva se le denota por F_{AEPA} , y considera a los muros agrietados en los niveles inferiores.

$$F_{AEPA} = 0.04\left(\frac{H}{L}\right)^3 - 0.28\left(\frac{H}{L}\right)^2 + 0.6\left(\frac{H}{L}\right) + 0.6 \quad (6.3)$$

Con la ecuación propuesta, se volvieron a analizar tanto el edificio de tres niveles como el de cinco niveles, para cada uno de los cinco casos de estudio. Se calcularon nuevamente los cocientes de fuerzas cortantes dados por el Método de Damy y por el Método Simplificado, con el nuevo valor de F_{AEPA} propuesto. Los resultados se presentan en forma gráfica en las figuras 6.14 a 6.19.

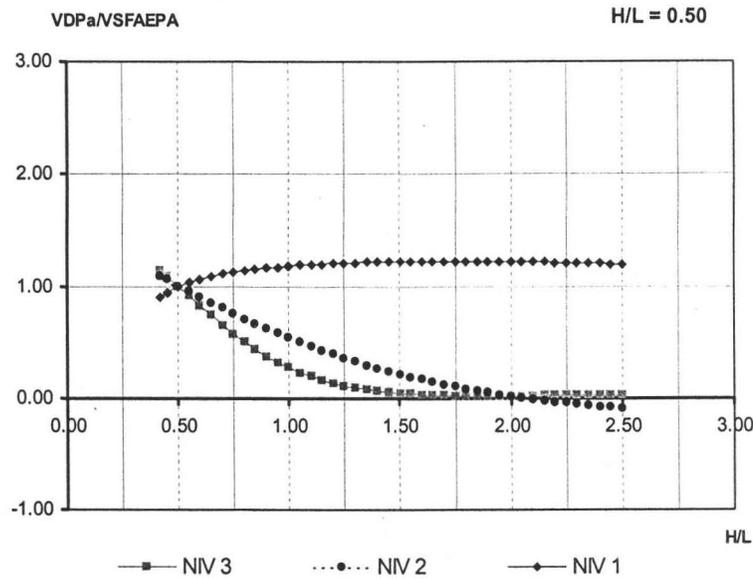


Figura 6.14. Comparación de fuerzas cortantes según Método de Damy_Pa y F_{AEPA} . Caso en que $H/L = 0.50$, edificio tres niveles

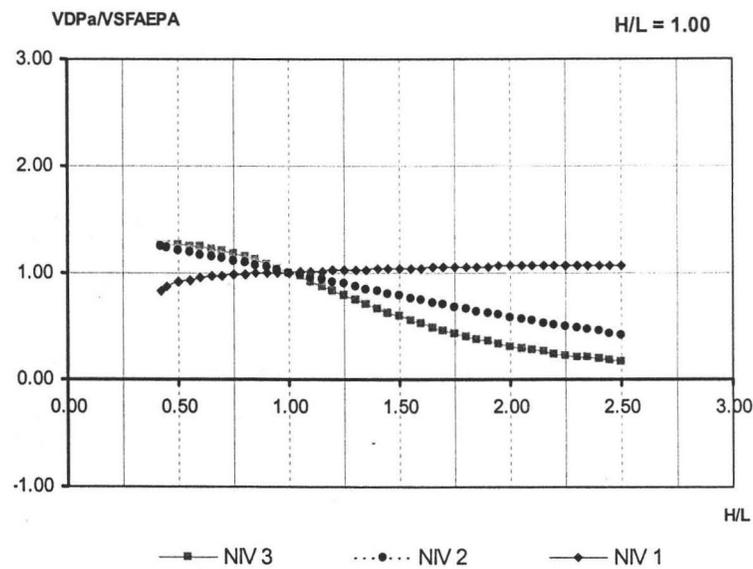


Figura 6.15. Comparación de fuerzas cortantes según Método de Damy_Pa y F_{AEPA} . Caso en que $H/L = 1.00$, edificio tres niveles

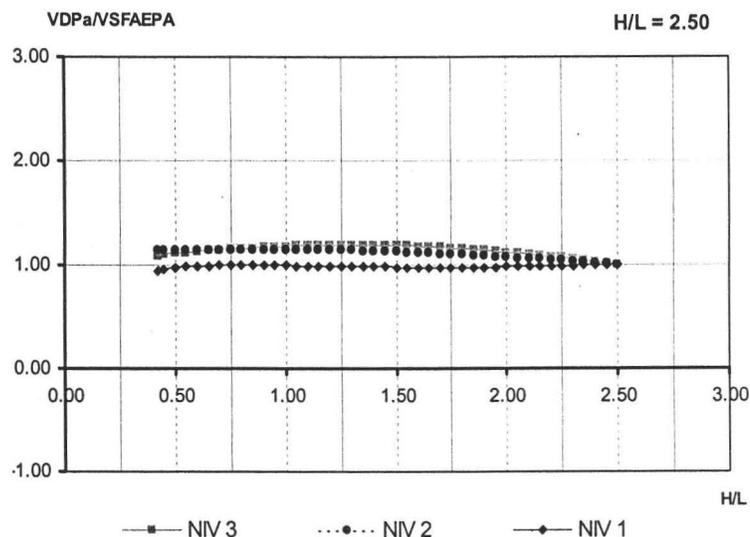


Figura 6.16. Comparación de fuerzas cortantes según Método de Damy_Pa y F_{AEPA} . Caso en que $H/L = 2.50$, edificio tres niveles

Se observa claramente que con el nuevo Factor de Área Efectiva para muros agrietados en su totalidad, se logra una buena coincidencia de fuerzas cortantes en ambos métodos para los muros del nivel uno, que es el crítico. La única debilidad del nuevo factor de área efectiva se observa exclusivamente en los muros del nivel superior cuando predominan muros muy robustos ($H/L=0.5$, figura 6.14), donde las estimaciones son bastante malas, aunque conservadoras. Como se observa también en las figuras 6.15 y 6.16, esta debilidad se corrige notablemente en los niveles superiores a medida que dominan los muros sensiblemente cuadrados (figura 6.15) y es prácticamente exacta cuando dominan los muros esbeltos (figura 6.16).

Los resultados obtenidos con el edificio de cinco niveles se muestran en las figuras 6.17 a 6.19.

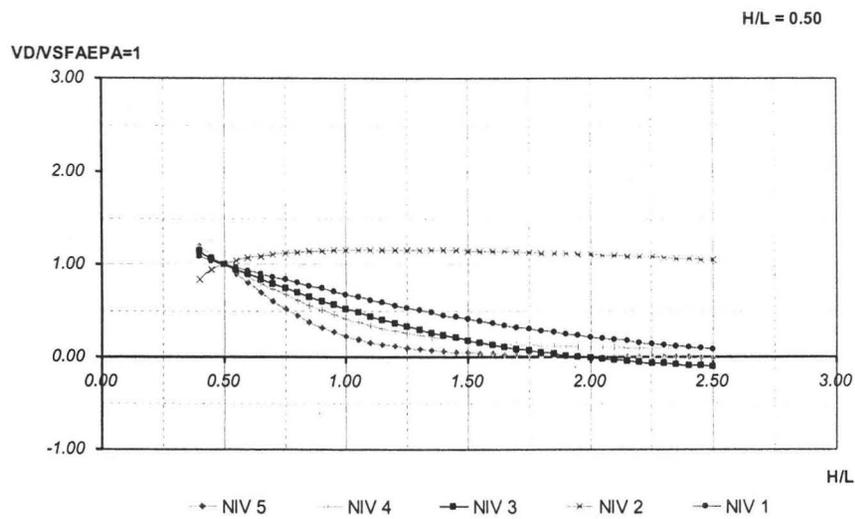


Figura 6.17. Comparación de fuerzas cortantes según Método de Damy_Pa y F_{AEPA} . Caso en que $H/L = 0.50$, edificio cinco niveles

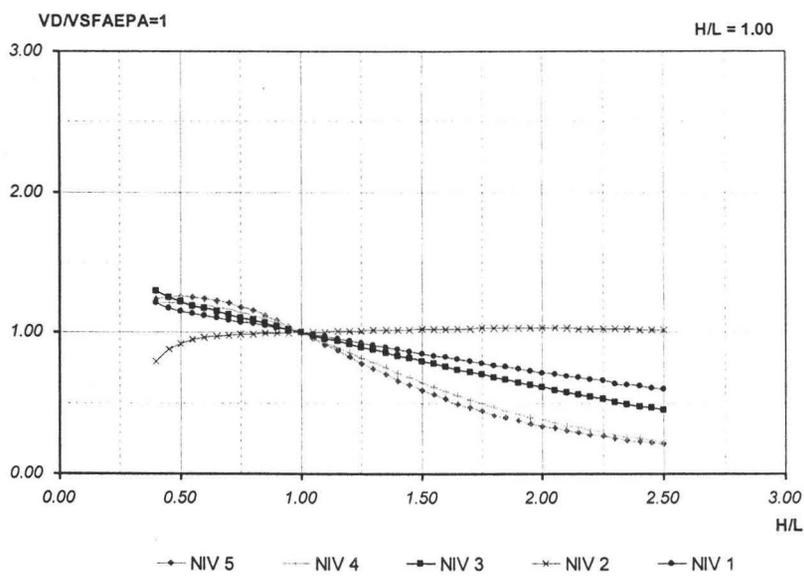


Figura 6.18. Comparación de fuerzas cortantes según Método de Damy_Pa y F_{AEPA} . Caso en que $H/L = 1.00$, edificio cinco niveles

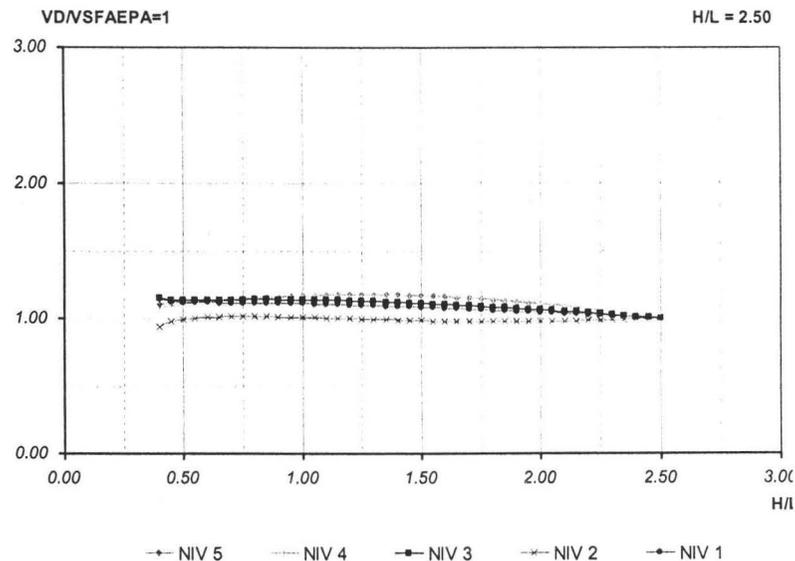


Figura 6.19. Comparación de fuerzas cortantes según Método de Damy_Ag y F_{AETA} . Caso en que $H/L = 2.50$, edificio cinco niveles

La figura 6.17 corresponde al edificio de cinco niveles y está dominada por muros robustos, es decir, $H/L=0.50$ para el muro central. Se nota que con el F_{AEPA} propuesto, se logra una buena aproximación de fuerzas cortantes en los niveles críticos (uno y dos). En los niveles restantes, hay una sobre estimación de fuerzas, lo cual es conservador. En la figura 6.15, correspondiente a $H/L=1.0$, la concordancia de fuerzas es aún mejor en el nivel uno. Sin embargo, existe subestimación de fuerzas en los niveles superiores con relación de aspecto menores a uno. En la gráfica de la figura 6.16, en la que predominan muros esbeltos, caso $H/L=2.5$, las curvas son prácticamente horizontales y cercanas a la unidad, por lo que también hay buena correlación de fuerzas cortantes en todos los niveles.

7. Conclusiones.

El presente trabajo parte de los estudios anteriores desarrollados por Tena y Pérez, respecto al impacto que las deformaciones por cortante tienen sobre la distribución de fuerzas cortantes en estructuras hechas con muros de mampostería.

En los estudios previos se demuestra que las deformaciones por cortante tienen gran influencia en la magnitud de las fuerzas cortantes de los entrepisos, y que éstas no se estiman de una manera razonablemente aproximada con el método simplificado, aún para sistemas con distribuciones de muros totalmente simétricos en planta.

De lo anterior se dedujo que era necesario calibrar nuevos Factores de Área Efectiva para el método simplificado que llevaran a una estimación más razonable de las fuerzas cortantes de los niveles críticos de diseño, que el propuesto actualmente en las Normas Técnicas Complementarias para Estructuras de Mampostería 2004. Como un paso adelante, se consideraron tres niveles de desempeño estructural: (a) comportamiento totalmente elástico de los muros en planta y elevación, (b) comportamiento totalmente agrietado de los muros en planta y elevación y, (c) comportamiento totalmente agrietado de los muros en los niveles inferiores, pero totalmente elástico en los niveles superiores, como se explica con detalle en capítulos anteriores.

Para proponer los nuevos Factores de Área Efectiva, en este trabajo el comportamiento tridimensional riguroso de los edificios estructurados con base en muros se analizaron utilizando el método de la columna ancha equivalente junto con el Método de Damy, que a lo largo del trabajo se ha identificado como "Método de Damy". Se estudiaron edificios de tres y cinco niveles, que cumplen con las limitantes para la aplicación del método simplificado y con alturas y distribución de muros en planta típicos de la Ciudad de México.

Se decidió modelar los muros como columnas anchas equivalentes incluyendo de manera directa las deformaciones por cortante. Se calcularon las matrices de rigidez lateral mediante una condensación estática de los grados de libertad de rotación, obteniéndose una viga condensada equivalente en función de los grados de libertad de desplazamiento lateral exclusivamente, requeridas para la aplicación del Método matricial de Damy. Lo anterior se describe con detalle en el capítulo tres.

De los análisis efectuados, se deduce que la concordancia entre las fuerzas cortantes calculadas con el "Método de Damy" y con el Método Simplificado, se logra sólo cuando todos los muros del entrepiso tienen la misma relación de aspecto, es decir, todos los muros son geoméricamente

iguales. La anterior es una configuración de muros que en general no se presenta en la construcción de edificios reales, puesto que en ellos se tienen muros con muy diversos valores de su relación de aspecto para un mismo entrepiso.

La forma real en que se distribuyen las fuerzas cortantes depende del tipo de muros que predominen en un mismo entrepiso, y más aún, tal distribución de fuerzas cortantes no es uniforme en toda la altura del edificio, sino que va variando en los distintos niveles que conforman el edificio.

Por ejemplo, en este estudio se encontró que si en la planta del edificio se tienen predominantemente muros alargados, es decir, muros robustos, el actual Factor de Área Efectiva sobre estima de forma importante las fuerzas cortantes que absorben el resto de los muros del mismo entrepiso, y que dicha sobre estimación llega a ser bastante notoria en los niveles superiores del edificio.

Por el contrario, en el caso de que existan muros cuadrados o muros que tiendan a ser esbeltos, las fuerzas cortantes se subestiman de forma importante en los niveles inferiores del edificio. También se subestiman de manera importante las fuerzas cortantes calculadas en muros que tienden a ser robustos en los niveles inferiores; es importante mencionar que en el diseño práctico de estructuras de mampostería, se considera crítico el nivel de planta baja de los edificios, como lo han confirmado los resultados de pruebas experimentales y el comportamiento observado de este tipo de estructuras durante sismos.

Se estudió la forma algebraica en que impactan las deformaciones por cortante en muros de uno y dos niveles, y se comprobó que a medida que sube el número de niveles del muro, se vuelve mucho más complicada la expresión matemática que refleja la participación de las deformaciones por cortante en la distribución de fuerzas cortantes en muros; sin embargo, si se puede apreciar que involucran polinomios cuya variable fundamental es la relación de aspecto (H/L). De hecho, si se quisiera encontrar una expresión matemática que corrigiera el efecto de no tomar en cuenta las deformaciones por cortante en todos los niveles de la estructura, tendría que proponerse una matriz de corrección que involucra diversos polinomios en función de H/L , lo cual no resulta práctico para agregarse en una recomendación de diseño, o un documento de carácter obligatorio, como lo son las actuales NTCM2004.

Así, se optó por hacer regresiones con métodos matemáticos convencionales a las gráficas que se obtuvieron de los análisis efectuados, cuya finalidad es proporcionar un nivel superior de aproximación en el nivel crítico de diseño, que es el primer nivel o planta baja. Se propusieron ecuaciones simples, donde se involucrara la variable más importante, H/L .

Como resultado de las regresiones efectuadas, se propone la siguiente expresión para el cálculo del Factor de Área Efectiva cuando el comportamiento de todos los muros en planta y en elevación es totalmente elástico:

$$\text{Si } \frac{H}{L} \leq 1.0 \quad (7.1)$$

$$F_{AE} = 1.5 + \frac{H}{L} - 1.5 \left(\frac{H}{L} \right)^2$$

$$\text{Si } \frac{H}{L} > 1.0 \quad (7.2)$$

$$F_{AE} = 2.20 - 1.5 \frac{H}{L} + 0.3 \left(\frac{H}{L} \right)^2$$

Con este nuevo Factor de Área Efectiva, se logra una mejor coincidencia entre las fuerzas cortantes en muros calculadas con los métodos seleccionados en este estudio. Se reduce notablemente la subestimación de fuerzas en muros robustos y de los niveles inferiores, por lo que se pueden determinar de forma más precisa las fuerzas cortantes que obran en el nivel crítico de diseño, en particular en los muros de planta baja.

Se reduce notablemente la sobre estimación de fuerzas cortantes que se tiene cuando los muros tienden a ser esbeltos. La subestimación de fuerzas cortantes que se tiene en muros robustos con el Método Simplificado tiende a desaparecer, ya que se toma en cuenta de forma indirecta el impacto de las deformaciones por cortante.

Se estudió también el caso en que todos los muros del edificio se han agrietado en planta y elevación. Esta es una condición que se ha presentado en estructuras de mampostería no reforzada (o simple) ante sismos muy intensos, y no debe descartarse que pudiera presentarse en muros deficientemente confinados. En las NTCM-2004 no se presenta recomendación alguna sobre la determinación de fuerzas ante una condición similar de daño.

Se puede apreciar que para esta condición de daño, el nivel uno del edificio presenta valores muy altos en la relación de cortantes calculados con ambos métodos, por lo que se subestiman de forma muy importante las fuerzas cortantes calculadas con el actual Factor de Área Efectiva.

Para este análisis se utilizaron las expresiones propuestas por Bazán y Meli para muros confinados agrietados, y calcular así sus propiedades mecánicas equivalentes, a fin de integrara las matrices de rigidez requeridas por el Método de Damy.

De las regresiones realizadas a los resultados obtenidos después de efectuar los análisis de los edificios de tres y cinco niveles, se determinaron diversas ecuaciones para calcular un Factor de Área Efectiva para muros Totalmente Agrietados (F_{AETA}).

Como resultado de esta etapa de análisis, se propone la siguiente expresión para el cálculo del Factor de Área Efectiva para edificios donde se espera que todos los muros se agrieten:

$$F_{AETA} = 0.1 \left(\frac{H}{L} \right)^3 - 0.6 \left(\frac{H}{L} \right)^2 + 1.1 \left(\frac{H}{L} \right) + 1 \quad (7.3)$$

Con este nuevo factor, se logran curvas casi horizontales y muy cercanas a la unidad, por lo que las fuerzas cortantes obtenidas con el Método de Damy y con el Método Simplificado son muy parecidas, en particular los muros del nivel uno, que es el que normalmente se considera crítico de diseño.

Otra etapa de análisis que también fue tomada en cuenta en este trabajo, fue modelar los edificios considerando que se han agrietado exclusivamente los niveles inferiores, que es el comportamiento que se ha obtenido experimentalmente para estructuras de mampostería confinada diseñadas conforme a las NTCM, tanto en pruebas hechas en el muro de reacción del Cenapred, como en la nueva mesa vibradora del Instituto de Ingeniería. En el caso del edificio de tres niveles, se consideró agrietado el nivel uno, mientras que en el edificio de cinco, se consideró agrietamiento en los niveles uno y dos.

Se siguió la misma metodología de análisis empleada en los capítulos previos, por lo que como resultado de las regresiones hechas, se propone la siguiente expresión para el cálculo del Factor de Área Efectiva de estructuras Parcialmente Agrietadas (F_{AEPA}):

$$F_{AEPA} = 0.04 \left(\frac{H}{L} \right)^3 - 0.28 \left(\frac{H}{L} \right)^2 + 0.6 \left(\frac{H}{L} \right) + 0.6 \quad (7.4)$$

Nuevamente, con la expresión propuesta se consigue una mejor aproximación de las fuerzas cortantes en muros calculadas con el Método Simplificado, respecto a aquéllas calculadas con el Método de Damy.

Finalmente se presenta una gráfica en que se representan los Factores de Área Efectiva propuestos en este trabajo.

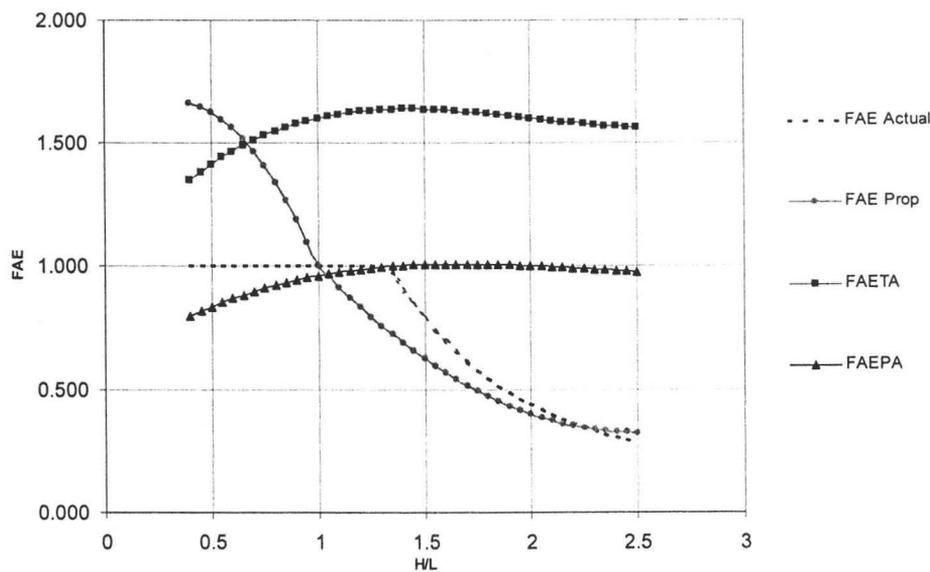


Figura 7.1. Comparación de F_{AE} , reglamentario y propuesto. Se muestra también las gráficas de F_{AETA} y F_{AEPA}

En la gráfica anterior, se muestra que para el caso de relaciones de aspecto $H/L > 1.5$, la curva del F_{AE} actual y la curva del F_{AEPROP} tienden a coincidir. Para valores de $H/L < 1$, el F_{AEPROP} tiene valores mayores que uno, y corresponde a relaciones de aspecto bajas, correspondientes a muros robustos. Lo anterior representa el efecto de las deformaciones por cortante, ya que entre más robusto es el muro, se tiene mayor participación de éstas. Es decir, no es que se le asocie al muro un área transversal mayor a la que geoméricamente tiene, sino que hacemos que el área efectiva sea mayor numéricamente para tomar en cuenta indirectamente las deformaciones por cortante.

Con respecto a F_{AEPA} , la curva del F_{AE} actual y la curva del F_{AEPA} tienden a coincidir para valores de $0.7 < H/L < 1.33$, pero a partir de $H/L > 1.4$, no existe coincidencia alguna. Finalmente, no existe coincidencia alguna entre la curva del F_{AE} actual y la curva del F_{AETA} en todo el intervalo de valores de H/L considerado.

Según las NTCM-2004 vigentes, el valor de la resistencia a cortante, V_{mR} , calculado con las expresiones convencionales debe de afectarse por el F_{AE} . Sin embargo, para fines de determinar V_{mR} , no es correcto suponer áreas mayores a la que por geometría presenta el muro. Por ello, se recomienda que en la determinación resistencias, se acote al Factor de Área Efectiva a la unidad, es decir, se utilicen otras expresiones. No obstante, la determinación de V_{mR} no es tema de este trabajo.

En síntesis, los factores de área efectiva propuestos en este estudio son válidos para mejorar la estimación de las demandas de fuerzas en los muros en planta y elevación, así como la determinación de los centros de rigidez en función de las excentricidades estáticas (e_s). Sin embargo, no lo son para determinar cómo se determina su resistencia a fuerza cortante (V_{mR}) en función de su relación de aspecto H/L . Para ello, es más adecuado determinar expresiones que se comparen con los resultados de pruebas experimentales. Por lo tanto, resulta claro de este estudio que deben existir dos grupos de factores de área efectiva distintos, uno para determinar demandas de fuerzas (como los propuestos en este estudio), y otros para definir la capacidad a fuerza cortante de los muros (V_{mR}).

REFERENCIAS

Arias, J. G., A. Vázquez y S. M. Alcocer (2004), "Respuesta dinámica de modelos a escala 1:2 de viviendas de mampostería confinada de uno y tres pisos, ensayados en mesa vibradora", *Memorias, XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Acapulco, CDROM, Artículo II-05, pp. 1-6, noviembre.

Pérez Osornio, M. A. (2000), "Estudio de la excentricidad estática máxima para el diseño de estructuras de mampostería conforme al método simplificado", Proyecto Terminal de Licenciatura, Departamento de Materiales, Universidad Autónoma Metropolitana, mayo.

Ruiz García, J. (1995), "Reparación y refuerzo de una estructura tridimensional de mampostería confinada de dos niveles a escala natural", Tesis de Maestría, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, diciembre.

Ruiz García, J. y S. M. Alcocer (1998), "Desempeño experimental de estructuras de mampostería confinada rehabilitadas mediante el uso de malla de alambre", *Revista de Ingeniería Sísmica*, SMIS, No. 59, pp 59-79, julio-diciembre.

Tena Colunga, A. y M. A. Pérez Osornio (2000a), "Importancia de las deformaciones por cortante en la ubicación de los centros de torsión de entrepiso en edificios estructurados con base en muros", *Memorias, XII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, León, CDROM, noviembre.

Tena Colunga, A. y M. A. Pérez Osornio (2000b), "Definición de la excentricidad estática máxima permisible para el empleo del método simplificado en el diseño de estructuras de mampostería conforme al Reglamento vigente", *Reporte UAM-A/DMAE-2000/02*, Departamento de Materiales, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, octubre.

Tena Colunga, A. (2001), "Diseño de estructuras de mampostería", Apuntes del profesor, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Tena Colunga, A. y M. A. Pérez Osornio (2001), "Definición de la excentricidad estática máxima permisible para el empleo del método simplificado en el diseño de estructuras de mampostería conforme al Reglamento vigente (segunda etapa)", *Reporte UAM-A/DMAE-2001/01*, Departamento de Materiales, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, diciembre.

Tena Colunga, A., M. A. Pérez Osornio y J. Cano Licona (2002), "Propuesta de modificación a la estimación de las fuerzas cortantes del método simplificado de análisis", *Memorias, XIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Puebla, CDROM, Artículo No. 156, pp. 1057-1068, noviembre.