

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

SECCION DE POST-GRADO



DISIPADORES DE ENERGIA EN MUROS DE ALBAÑILERIA

TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
CON MENCIÓN EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

Ing. AERLS JUAN DE LA ROSA TORO ROJAS

LIMA - PERU

1999

DISIPADOR DE ENERGÍA EN MUROS DE ALBAÑILERÍA

RESUMEN

En la década pasada se ha visto un crecimiento acelerado en el desarrollo y aplicaciones estructurales de dispositivos de disipación de energía, los que se habían concentrado en amortiguadores de acero y amortiguadores pasivos de goma para poder mitigar el riesgo sísmico.

La finalidad de incluirlos en las estructuras, es mejorar su capacidad de disipación de energía ante sismos moderados y fuertes; la mayoría de estos dispositivos son sistemas caros para países en desarrollo

Este estudio propone la combinación de dos materiales económicos como la albañilería y las planchas de acero liviano formadas en frío para generar un panel disipador de energía en muros de albañilería. Este sistema podría ser una alternativa al diseño sísmico convencional en muros de albañilería, otorgándole mayor seguridad contra eventos sísmicos severos sin comprometer la economía.

Para el prototipo a ensayarse se considera un espécimen de 2400 mm de altura por 2500 mm de longitud con un espesor de muro de 125 mm, en la parte central se deja una abertura de 2200 mm de altura por 500 mm de ancho sobre la que se coloca el panel de acero liviano donde se espera la disipación de energía. El ensayo de carga cíclico es realizado controlando el desplazamiento sobre la línea del sistema del actuador para dos niveles de deformación: grietas no visibles en la albañilería y grietas visibles en la albañilería.

La investigación muestra como un simple panel de acero liviano mejora el comportamiento cíclico del muro de albañilería, lográndo mayor capacidad de disipación de energía;. El pandeo en el panel sucede antes que la fluencia ocurra y antes que aparezcan grietas visibles en la albañilería asimismo, se puede ver cómo usando métodos analíticos simples es posible predecir el comportamiento del muro. Se presenta la comparación entre los resultados del ensayo con dispositivo disipador (usando una plancha de acero liviano) y sin dispositivo disipador.

ENERGY DISSIPATION ON MASONRY WALLS

ABSTRACT

In the past decade a growth accelerated in the development of energy dissipation devices in structural applications has been seen, those which had been concentrated in steel honey dampers and passive rubber dampers for may mitigate the seismic risk.

The purpose of including these devices on the structural system is to improve their capacity of energy dissipation against moderate and strong earthquakes; most of these devices are expensive systems for developing countries.

This study, proposes the combination of two economic materials as masonry and light cold formed plates to generate a energy dissipation panel for masonry walls. This device would be an alternative to conventional seismic design in masonry walls, giving safety margin against seismic events without committing the economy.

A prototype of 2400 mm of height by 2500 mm of length with a wall thickness of 125 mm is considered, in the central part an opening of 2200 mm of height by 500 mm of width is let, the one is fill with the light steel panel where Energy Dissipation is expected. The cyclic load test is accomplished under a control of displacement the on-line actuador system for two deformation levels: not visible cracks in the masonry and visible cracks in the masonry.

The investigation shows that a simple light steel panel, improves the performance of the masonry wall, being achieved greater capacity of energy dissipation; also can be seen how using simple methods, it is possible to predict the behavior of the wall. The bulge in the panel happens before that the yielding occur and before appear visible cracks in the masonry. It is presented the comparison between the results of the test with dissipation device (using light steel panel) and without dissipation device.

INDICE

DEDICATORIA	.....	3
AGRADECIMIENTO	.....	4
RESUMEN	.....	5
ABSTRACT	.....	6
INDICE	.....	7
INTRODUCCION	.....	9
CAPITULO I: ESTADO DEL ARTE	.....	11
I.1	Principios Generales de la Disipación de Energía	11
I.2	Dispositivos de Control de Respuesta Sísmica	13
I.2.1	Control Pasivo de Respuesta Estructural	14
I.2.2	Control Activo e Híbrido de Respuesta Estructural	16
CAPITULO II: CRITERIOS DE DISEÑO SISMICO	.....	19
II.1	Estados Límites de Diseño	19
1	Estado Límite de Servicio	19
2	Control de Daños en el Estado Límite	20
3	Estado Límite Ultimo	20
II.2	Propiedades Estructurales	20
a)	Rigidez	21
b)	Resistencia	21
c)	Ductilidad	21
CAPITULO III: MUROS DE ALBAÑILERÍA	.....	24
III.1	Sistemas de Albañilería	25
1	Albañilería Armada	25
2	Albañilería Confinada	25
III.2	La albañilería como Elemento Estructural	28

CAPITULO IV: PROTOTIPO DEL PANEL	30
CAPITULO V: SELECCIÓN DE LA CONFIGURACION DEL PANEL	34
CAPITULO VI: ESTUDIO EXPERIMENTAL	36
VI.1 Laboratorio y Equipos de Ensayo	36
VI.2 Sistema de Carga	36
VI.3 Montaje e Instrumentación	36
VI.4 Análisis de Resultados	38
CAPITULO VII: MODELO ESTRUCTURAL Y CALCULO DE LA RESISTENCIA DEL MURO	42
VII.1 Modelos Numéricos	42
VII.2 Evaluación de la Rigidez del muro	43
VII.3 Modelos de Histéresis de las Estructuras para el Análisis de Respuesta Sísmica	47
CAPITULO VIII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	50
BIBLIOGRAFIA	53
ANEXO	57

INTRODUCCION

Los muros de albañilería son el sistema de construcción más usado en el país, especialmente en viviendas debido a que trabajan como elementos estructurales y arquitectónicos, siendo además un material térmico y resistente al fuego por excelencia; sin embargo, la desventaja es que tienen un pobre comportamiento sísmico debido a que están conformados por unidades de ladrillo que son frágiles y pesadas con resistencia a la tracción casi nula, mostrando una ductilidad muy baja cuando se los somete a una excitación sísmica; por otra parte, su gran rigidez hace que la respuesta sísmica sea grande. Cabe agregar que la falta de un diseño adecuado y una nula o deficiente dirección técnica especialmente en zonas urbano - marginales, los hace todavía más vulnerables ante los sismos; no obstante, con un apropiado refuerzo en los muros y el uso de marcos de concreto reforzado que confinen la albañilería se puede obtener una respuesta dúctil.

El uso de albañilería en el Perú se inicia desde tiempos muy antiguos, pero es sólo recientemente que su construcción y diseño tiene principios ingenieriles.

En el Perú recién en la década de los 80 se inicia la investigación sobre el comportamiento de los muros de albañilería, naciendo nuestra primera Norma de Diseño en Albañilería, la que nos da básicamente parámetros de verificación de esfuerzos cuando la estructura esta sometida a cargas de servicio. Hoy en día tomando en cuenta todas las investigaciones realizadas, existen propuestas sobre una nueva reglamentación de diseño por rotura, el que es aceptado y difundido en otros países en donde las investigaciones se han desarrollado ampliamente.

En los estudios realizados sobre albañilería, se ha visto que ésta ofrece un pobre comportamiento sísmico, mejorando cuando se le incorporan elementos de confinamiento de concreto armado; por lo que la intención del presente trabajo de investigación es suministrar a la albañilería confinada un elemento que sea capaz de poder disipar la energía de entrada por efecto sísmico, incrementando con ello su capacidad de deformación inelástica y así mejorar su comportamiento sísmico.

El fin principal de todo diseño es proporcionar una estructura segura y duradera, que incorpore la máxima economía posible, para ello debe ser capaz de soportar no sólo las cargas permanentes debidas a sus elementos estructurales y las sobrecargas propias de su uso, sino también las cargas eventuales como los sismos. La actual Norma Peruana de

Diseño Sismorresistente^{(31)*} nos exige un buen comportamiento de la edificación ante eventos sísmicos, para ello debe existir una combinación óptima de propiedades tales como: resistencia, rigidez, absorción de energía y fundamentalmente capacidad de deformación dúctil. Con la incorporación de paneles de acero como elementos disipadores de energía en los muros de albañilería, se espera que su comportamiento mejore sustancialmente convirtiendo a las edificaciones de albañilería en estructuras dúctiles.

El presente trabajo ha sido dividido en VIII capítulos: En el primero se hace una revisión acerca de los principios generales de la disipación de energía y se presentan algunos de los dispositivos utilizados como fuente de disipación de energía. En el capítulo II se revisa de manera sucinta lo concerniente a la filosofía de diseño sísmico; luego en el capítulo III se comenta sobre la albañilería, sus características más relevantes, así como los sistemas constructivos utilizados. En el capítulo IV se describe el prototipo del panel utilizado en el ensayo, así como la evaluación de la capacidad a compresión de las unidades de ladrillos de arcilla y de las pilas de albañilería. La disposición de los ángulos de acero liviano formados en frío en el panel disipador es presentada en el capítulo V. El capítulo VI trata sobre el estudio experimental, aquí se presentan los resultados obtenidos en el ensayo y mediante gráficos se observan las bondades de usar el muro de albañilería con dispositivo disipador. Luego en el capítulo VII se describe el modelo estructural del prototipo y el cálculo de la resistencia del muro, demostrándose que con el uso de un modelo matemático simple es posible predecir el comportamiento del muro.

Finalmente las conclusiones y recomendaciones son presentadas en el capítulo VIII. En el anexo se muestran algunas fotografías del proceso constructivo de los especímenes y su comportamiento durante el ensayo.

* Los superíndices indican el número de la referencia bibliográfica.

CAPITULO I

ESTADO DEL ARTE

Mucho tiempo ha tenido que pasar para pensar en sistemas que puedan ser capaces de reducir la entrada sísmica a los elementos estructurales por medio de elementos especiales que sean los encargados de soportar la mayor cantidad de entrada sísmica o por medio de sistemas eficientes que controlen la respuesta estructural ante eventos sísmicos severos; transformando a la edificación en una estructura segura, sin peligro de colapso y sin necesidad de tener que diseñar una estructura muy rígida de forma tal que se comporte elásticamente frente a un sismo severo para de esta manera lograr una construcción segura pero costosa.

I.1 PRINCIPIOS GENERALES DE LA DISIPACION DE ENERGIA

El movimiento del terreno transmite energía en una estructura; ya en la estructura, una parte de esta energía se transforma en energía elástica de movimiento y deformación (E_E) y la otra parte de la energía es disipada (E_D). En base al principio de la conservación de energía debe existir un equilibrio entre la energía de entrada (E_I) y la suma de la energía elástica y la energía disipada.

$$E_E + E_D = E_I \quad (1)$$

La energía elástica a su vez esta formada por energía almacenada en deformación elástica E_S (energía potencial) y por energía de movimiento E_K (energía cinética). La cantidad de energía cinética y la de energía de deformación elástica varían a cada instante influidas directamente por el movimiento del suelo, generándose la energía de deformación elástica máxima cuando la estructura alcanza su deformación máxima, en ese instante la energía cinética es nula pues la velocidad de la estructura es cero. Por otro lado la energía cinética alcanza su valor máximo cuando la estructura está vibrando y pasa por la posición nula de deformación lateral, en cuyo instante la velocidad con que se desplaza la estructura es máxima.

Como la energía de entrada debe estar en equilibrio con la energía elástica, se tiene

$$E_K + E_S = E_E \quad (2)$$

La energía disipada a su vez puede dividirse en dos principales fuentes: La primera es la energía de amortiguamiento E_ξ y la segunda es la energía histerética E_H , la que se da a través de deformaciones inelásticas.

El equilibrio energético de la energía disipada esta dado entonces por:

$$E_\xi + E_H = E_D \quad (3)$$

La ecuación dinámica de equilibrio energético al sustituir (2) y (3) en (1) es:

$$\begin{array}{ccc} E_K + E_S & + & E_\xi + E_H = E_I \quad (4) \\ \text{Energía elástica de movimiento y deformación} & & \text{Energía disipada} \end{array}$$

Un diseño eficiente de estructuras sismorresistentes según Bertero⁽³⁾, deberá cumplir la ecuación básica de diseño.

$$\begin{array}{ccc} \text{DEMANDA DE} & \leq & \text{CAPACIDAD DE} \quad (5) \\ \text{Rigidez} & & \text{Rigidez} \\ \text{Resistencia} & & \text{Resistencia} \\ \text{Estabilidad} & & \text{Estabilidad} \\ \text{Capacidades de absorción} & & \text{Capacidades de absorción} \\ \text{y disipación de energía} & & \text{y disipación de energía} \end{array}$$

La comparación de la ecuación (4) con la ecuación de diseño (5) demuestra que E_I representa la demanda del sistema y la suma $E_E + E_D$ representan las provisiones o capacidades provistas del sistema.

Esto implica, según se puede observar en la ecuación (4), que para tener un diseño sísmico eficiente se debe incrementar el lado izquierdo de la ecuación o bien disminuir el lado derecho; el incremento del lado izquierdo de la ecuación (4) se puede lograr aumentando la resistencia lateral de la estructura con lo que se acentúa la importancia de

los dos primeros términos con respecto al tercero y en particular con respecto al cuarto; sin embargo, esto implica un incremento en el costo de la estructura.

La concepción actual de diseño sismorresistente al aceptar deformaciones inelásticas en la estructura permite que una buena parte de la energía de entrada sea disipada por medio de energía histerética, E_H . Para lograr este objetivo una estructura convencional necesitará de deformaciones inelásticas, las que se alcanzarán a través de la formación de articulaciones plásticas en algunos miembros estructurales (fundamentalmente en los extremos de las vigas); esto implica que se acepten ciertos niveles de daño (diferentes niveles de agrietamiento, pérdida del recubrimiento, etc.). Para poder controlar la respuesta de la estructura durante movimientos sísmicos se debe reducir fundamentalmente la energía de entrada en la estructura, es decir, disminuir el lado derecho de las ecuaciones (1) y (4) lo cual se puede lograr con un sistema de aislamiento en la base o bien incrementar la capacidad de disipación de energía de la estructura; esto es, incrementar E_D lo cual se puede lograr mediante la colocación de elementos de gran capacidad de disipación de energía. Estos sistemas de control de respuesta sísmica reciben el nombre de “Dispositivos Disipadores de Energía”.

En una estructura nueva o en una estructura existente en la que se coloquen sistemas de control de respuesta sísmica, se pueden atenuar los daños estructurales y no estructurales que podría generar un movimiento telúrico al incrementar la ductilidad y/o amortiguamiento de la estructura.

I.2 DISPOSITIVOS DE CONTROL DE RESPUESTA SISMICA

La idea de tener un sistema de control de respuesta sísmica en una edificación se basa no sólo en desear que la estructura este protegida del peligro de colapso provocado por un sismo severo; sino también, en preservar que la misma cumpla con las funciones de servicio para las que fue diseñada aún después de un sismo muy fuerte. Aunque no es posible predecir cuándo se presentará un movimiento sísmico y cuál será su intensidad, es factible sin embargo mejorar el comportamiento estructural de la edificación colocando a la estructura sistemas adecuados de control de respuesta sísmica. Algunos tipos de control de respuesta sísmica se muestran en la figura N° 1.

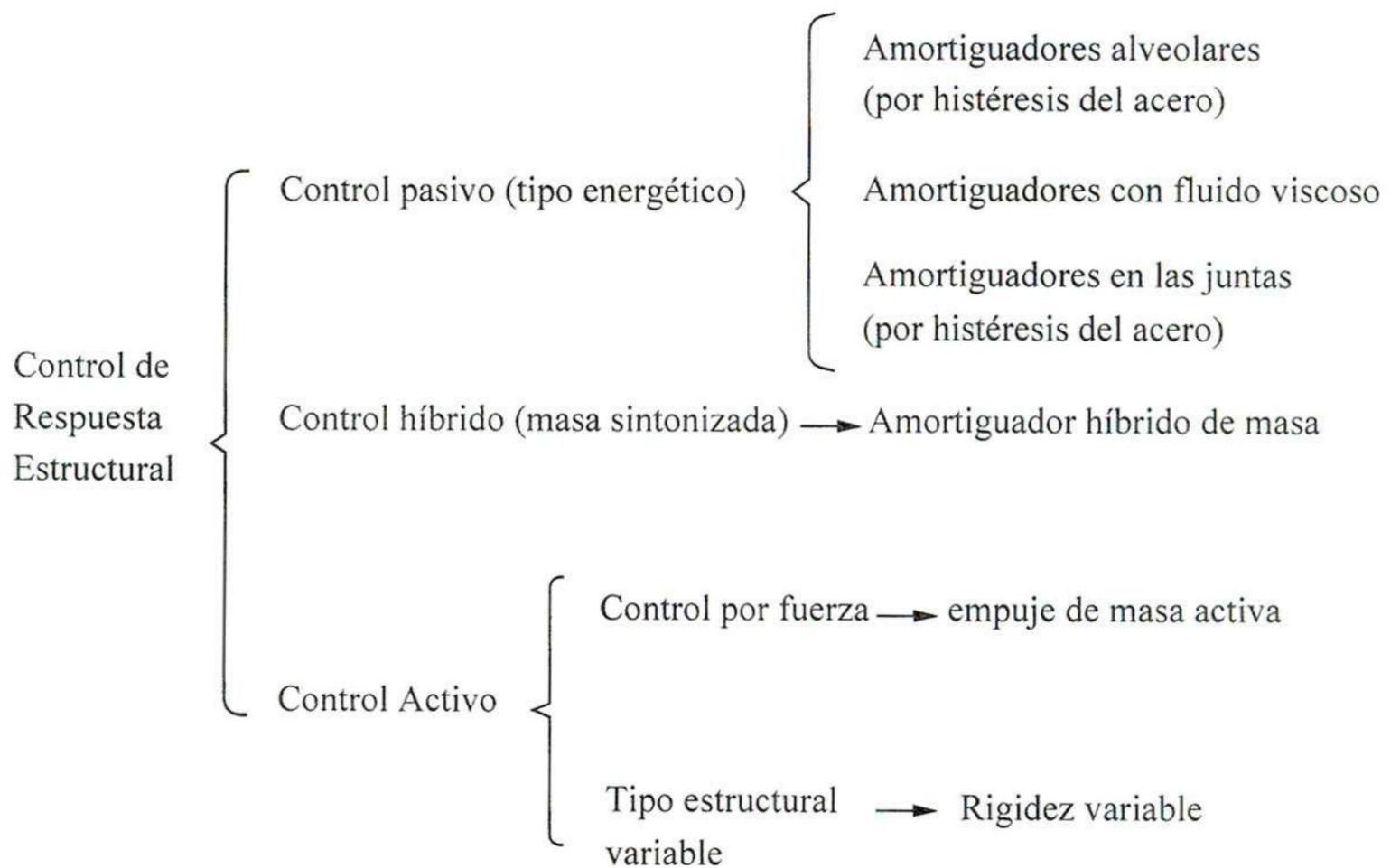


Figura N° 1. - Tipos de control de respuesta

I.2.1 Control Pasivo de Respuesta Estructural

Se han desarrollado diferentes tipos de disipadores de sistemas de control pasivo con el fin de reducir la fuerza cortante actuante en los elementos estructurales por efecto de fuerzas laterales (sismo y viento). El incremento de amortiguamiento suministrado por los dispositivos disipadores de energía en la edificación reduce la respuesta estructural y estabiliza las fluctuaciones de respuesta causadas por las variaciones de energía de entrada sísmica, también atenúa la distribución de la respuesta en la dirección vertical a lo largo de toda la estructura.

Los dispositivos de disipación de energía son hechos generalmente de acero por ser uno de los materiales más dúctiles y dicha disipación se da por el amortiguamiento histerético del mismo.

Uno de los primeros dispositivos disipadores de energía estudiados consistía en una barra de acero de sección circular empotrada en su base y libre en el extremo superior, en donde el desplazamiento relativo de la barra de acero provocaba la fluencia de su base. En estas investigaciones se observó que cuando se tenía un elemento de

sección constante ya sea trabajando en voladizo o bien doblemente empotrado se plastificaba únicamente el o los extremos del elemento, por lo que las demandas de deformaciones locales en la zona plastificada eran muy elevadas; por ello, con la finalidad de buscar la plastificación total del elemento disipador se modificó la sección transversal.

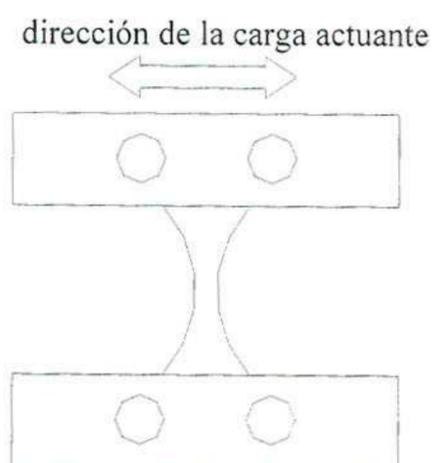
Uno de los primeros dispositivos mejorados consistió en una placa de acero con un ancho que variaba en forma triangular (figura N° 2), pues si se tiene que el ancho de la placa tiene la misma forma que el diagrama de momentos, se logra que prácticamente la totalidad de la placa se plastifique.

Uno de los dispositivos más conocidos que emplea placas de acero con deformación inelástica a flexión para disipar energía, es el llamado elemento ADAS⁽²⁷⁾, el que está constituido por placas de acero como la que se muestra en la figura N° 3.a. Dado que las placas están en doble curvatura, al imponerles desplazamientos laterales se logra la plastificación completa de la plancha y con ello se logra una gran disipación de energía.

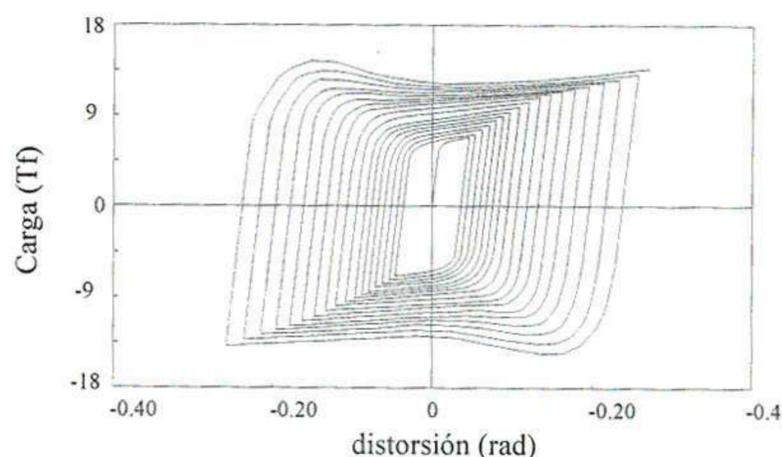
El comportamiento histerético se muestra en la figura N° 3.b



Figura N° 2
Dispositivo de disipación de energía histerética por medio de la deformación inelástica de una placa de acero de forma triangular



a) Dispositivo de disipación de energía histerética ADAS



b) Comportamiento histerético de un ADAS

Figura N° 3. - Dispositivo de disipación de energía ADAS

Otro tipo de disipador de energía llamado “amortiguador en las juntas” conecta a dos edificaciones contiguas, por medio de amortiguadores que disipan energía por histéresis; se espera entonces la reducción de la respuesta sísmica en ambas estructuras debido al desplazamiento relativo entre ellas, haciendo que los dispositivos se deformen y en consecuencia se libere energía por histéresis, reduciendo con ello los efectos sísmicos en las edificaciones.

Con el uso de estos disipadores de energía es posible reducir la separación de dos edificaciones adyacentes a valores mínimos, controlando los desplazamientos laterales de la edificación. Estos amortiguadores son hechos de acero y tienen como una de sus propiedades principales una gran capacidad de deformación inelástica y una alta confiabilidad como material estructural. La figura N° 4 muestra algunas aplicaciones de este dispositivo disipador⁽²⁹⁾.

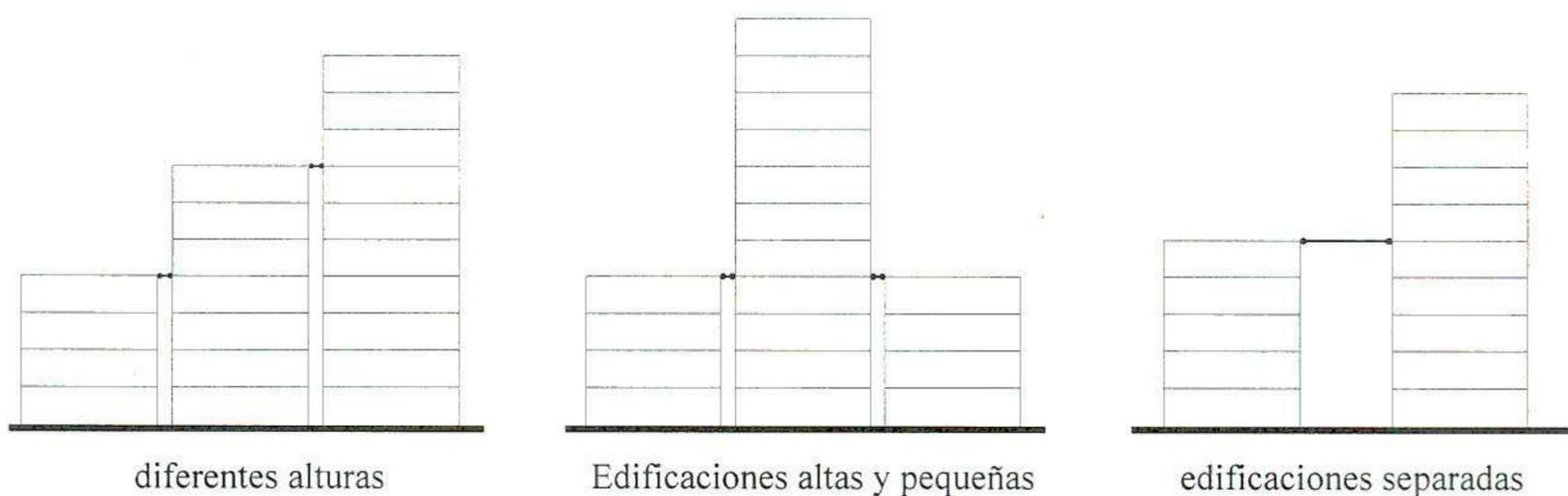


Figura N° 4. - Aplicaciones del “amortiguador en las juntas” como disipador de energía

I.2.2 Control Activo e Híbrido de Respuesta Estructural

Al igual que en el sistema de Control Pasivo su función es reducir los efectos sísmicos en las edificaciones; adicionalmente el objetivo de usar este tipo de dispositivos será eximir a las estructuras del diseño estructural sísmico, evitando de este modo lidiar con la naturaleza imprevisible de un sismo.

Estos sistemas se basan en dispositivos controlados por actuadores que reaccionan con la misma velocidad con la que se mueve la edificación frente a un empuje lateral; usualmente se coloca en el nivel superior de la edificación una cierta masa que reacciona

con una fuerza en sentido contrario al movimiento lateral, anulando de este modo la respuesta que pudiera tener la edificación.

Se han puesto en práctica diferentes tipos de sistemas Activos de Control de respuesta, entre ellos está el sistema AMD^(29,47).

El sistema AMD, llamado así por sus iniciales en Inglés (Active mass driver) dispone de tres fases: empuje, controlador y monitoreo. Dos masas colocadas en el techo de la edificación son las encargadas de suministrar la fuerza de control, una de ellas ubicada al centro y la otra al extremo del piso para controlar las vibraciones laterales y torsionales respectivamente. El sistema cuenta con un mecanismo de arranque que se activa automáticamente al iniciarse el sismo. Este sistema ha sido probado en algunas edificaciones, dando buenos resultados.

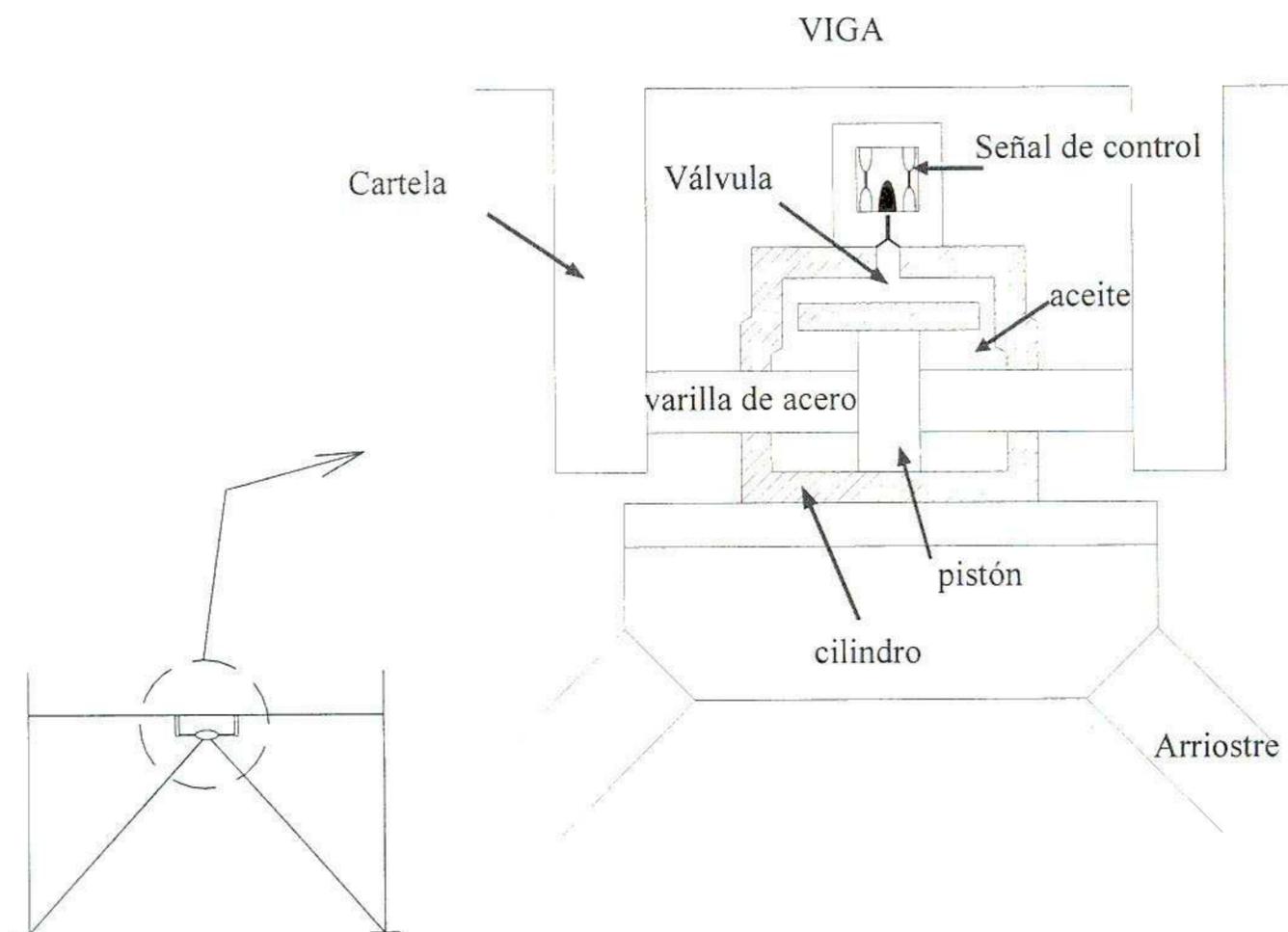


Figura N° 5. - Sistema activo de rigidez variable

Otra forma de Control de Respuesta Activo se da a través de un sistema de rigidez variable que modifica la rigidez de la estructura de acuerdo al nivel de entrada sísmica⁽²⁹⁾. El mecanismo en sí, está compuesto de sistemas de arriostre en forma de “V invertida”, los que son instalados en los costados laterales de la edificación. Las partes superiores de los arriostres diagonales tienen como punto de encuentro la viga, en esta unión se ubica un dispositivo especial a manera de un interruptor que conecta o desconecta los arriostres de la viga, cambiando con ello la rigidez de la estructura (ver figura N° 5).

El método de control del sistema de rigidez variable está dado por el análisis del movimiento del suelo, esta información es alimentada al controlador, el que altera la rigidez de la estructura seleccionando un valor óptimo dentro del rango de la rigidez de la edificación con el fin de obtener el nivel más bajo de vibración de la estructura.

CAPITULO II

CRITERIOS DE DISEÑO SISMICO

La mayor parte de pérdidas económicas y de vidas humanas causadas por terremotos moderados y fuertes es debido a la falla o colapso de instalaciones que fueron presumiblemente diseñadas y construidas para proporcionar comodidad, bienestar y protección. Una de las maneras más eficaces de mitigar los efectos destructivos de los terremotos es desarrollar métodos de diseño que disminuyan la probabilidad de falla y mejorar los métodos existentes.

Resulta muy costoso diseñar una estructura que tenga un comportamiento elástico durante sismos severos, pues éstos ocurren rara vez durante su vida útil. Por lo general, es más económico permitir que la estructura tenga cierto nivel de daño durante sismos muy intensos, que diseñar una estructura que no sufra daño; por ello, la filosofía de diseño sismorresistente permite que las estructuras experimenten un comportamiento inelástico durante sismos severos.

La actual Norma Peruana de Diseño Sismorresistente exige que la edificación tenga buen comportamiento, entendiéndose como buen comportamiento al hecho de que la estructura debe ser capaz de:

- Resistir sismos leves sin daños.
- Resistir sismos moderados, considerando la posibilidad de daños estructurales leves.
- Resistir sismos severos, con la posibilidad de daños estructurales importantes pero sin llegar al colapso.

Estos objetivos implican tres estados límites de diseño.

II.1 Estados Límites de Diseño

De acuerdo al nivel de protección de daño, éstos se dividen en:

- 1) **Estado Límite de Servicio.**- Los sismos de pequeña intensidad menores que los de diseño son frecuentes en una edificación, la estructura debe permanecer en el estado elástico; por lo tanto, la propiedad estructural que gobierne será la rigidez. La estructura debe seguir operando normalmente, vale decir, no debe alterar su funcionalidad ni uso. El diseño necesita considerar control de daños y limitación de

los desplazamientos que ocurran durante los sismos, asegurando que la estructura permanezca elástica bajo la premisa de una resistencia adecuada en cada uno de sus componentes. Las edificaciones de concreto y albañilería pueden desarrollar considerable agrietamiento en el estado límite de servicio, pero no una fluencia significativa del refuerzo que origine grandes grietas; tanto el concreto como la albañilería no deberán “aplastarse”.

- 2) **Control de Daños en el Estado Límite.**- Para movimientos de suelos de intensidad mayor que la correspondiente al estado límite de servicio, algunos daños podrían ocurrir en la edificación; sin embargo, éstos deben ser económicamente reparables de tal manera que la edificación vuelva a cumplir con las funciones para la que fue diseñada. Si una estructura de concreto armado está protegida contra los daños que durante un evento sísmico específico pueden sucederle, las incursiones inelásticas durante la respuesta dinámica serán prevenidas; esto significa que las estructuras tendrán una resistencia adecuada para soportar las acciones internas generadas durante la respuesta dinámica del sistema. Este nivel de resistencia es definido por la resistencia nominal o ideal.
- 3) **Estado Límite Último.**- El único y más importante criterio de diseño es la preservación de la vida, la que puede verse amenazada por severos pero raros eventos sísmicos y que deben ser considerados en el diseño. Este estado está referido a la condición límite de supervivencia. Debe remarcarse que con detalles juiciosos en regiones críticas, los daños estructurales de los miembros serán minimizados aún después de un evento sísmico excepcional. La propiedad más importante asociada con el estado límite de supervivencia es la ductilidad, que es la habilidad para absorber grandes deformaciones inelásticas sin pérdida significativa de la resistencia.

No se pueden definir con precisión las fronteras entre estos diferentes estados de diseño; sin embargo, el grado de incertidumbre que envuelve las recomendaciones dadas por los códigos en la determinación de la intensidad de las fuerzas laterales se puede cubrir aplicando el diseño por capacidad ⁽³⁴⁾.

II.2 Propiedades Estructurales

Las propiedades estructurales que necesitan ser consideradas bajo estos 3 niveles de protección son:

a) Rigidez.- La rigidez en los sistemas estructurales resulta una necesidad, puesto que las cargas horizontales pueden llegar a producir tan elevadas deformaciones que podría ocurrir una falla progresiva incontrolable, este es el llamado efecto P- Δ , en el cual los desplazamientos horizontales combinados con las cargas verticales piso a piso generan momentos adicionales por la excentricidad de la carga; estos momentos adicionales generan a su vez mayor deformación, que trae como consecuencia el incremento de momentos; el proceso continúa hasta el colapso de la construcción.

b) Resistencia.- La estructura debe tener una adecuada resistencia para soportar las acciones internas generadas durante una respuesta dinámica elástica; por eso, la técnica apropiada para la evaluación de las acciones sísmicas inducidas por los terremotos es el análisis elástico basado en propiedades de rigidez. Se debe suministrar una resistencia adecuada S_i como se muestra en la figura N° 6.

c) Ductilidad.- La capacidad de la estructura, de sus componentes o de los materiales usados para ofrecer resistencia en el dominio de la respuesta inelástica es descrita por lo general en términos de ductilidad, esto incluye la capacidad de soportar largas deformaciones y la capacidad de absorber energía por comportamiento histerético; por estas razones la ductilidad es la propiedad estructural más importante que se debe alcanzar.

La ductilidad es definida por la relación del desplazamiento impuesto Δ en cualquier instante, sobre el desplazamiento de la primera fluencia Δ_y .

$$\mu = \frac{\Delta}{\Delta_y} > 1$$

Los desplazamientos Δ_y y Δ pueden representar la deformación, curvatura, rotación o deflexión.

La ductilidad desarrollada cuando la falla es inminente es $\mu_u = \Delta_u / \Delta_y$.

Una consideración importante en la determinación de la resistencia sísmica requerida será que la máxima demanda de ductilidad durante un movimiento sísmico $\mu_m = \Delta_m / \Delta_y$ no exceda la ductilidad potencial μ_u .

Los sismos reales producen mayor efecto que el considerado por los códigos de edificaciones, pero el hecho de que bajo estas condiciones las estructuras sean adecuadamente seguras se puede explicar en parte por la propiedad del material llamada ductilidad. Esta es la propiedad de ciertos materiales (sobre todo del acero) para fallar sólo cuando se presenta una considerable deformación inelástica; sin embargo, los

materiales frágiles como el concreto y la albañilería fallan súbitamente con un mínimo de deformación; no obstante, el acero contenido en el concreto puede darle una ductilidad considerable, pues al deformarse la estructura, el acero absorbe energía y difiere la falla absoluta del concreto.

La ductilidad y la reserva de capacidad están estrechamente relacionadas, al sobrepasar el límite elástico los materiales dúctiles pueden soportar mayor carga antes de fracturarse completamente. Además, las dimensiones de los miembros, las condiciones de los extremos y los detalles de conexión también pueden afectar la ductilidad.

La capacidad de reserva es la aptitud de una estructura completa para resistir sobrecarga y depende de la ductilidad de sus miembros individuales. La única alternativa para no requerir ductilidad es proporcionar resistencia a fin de que los miembros no excedan los límites elásticos.

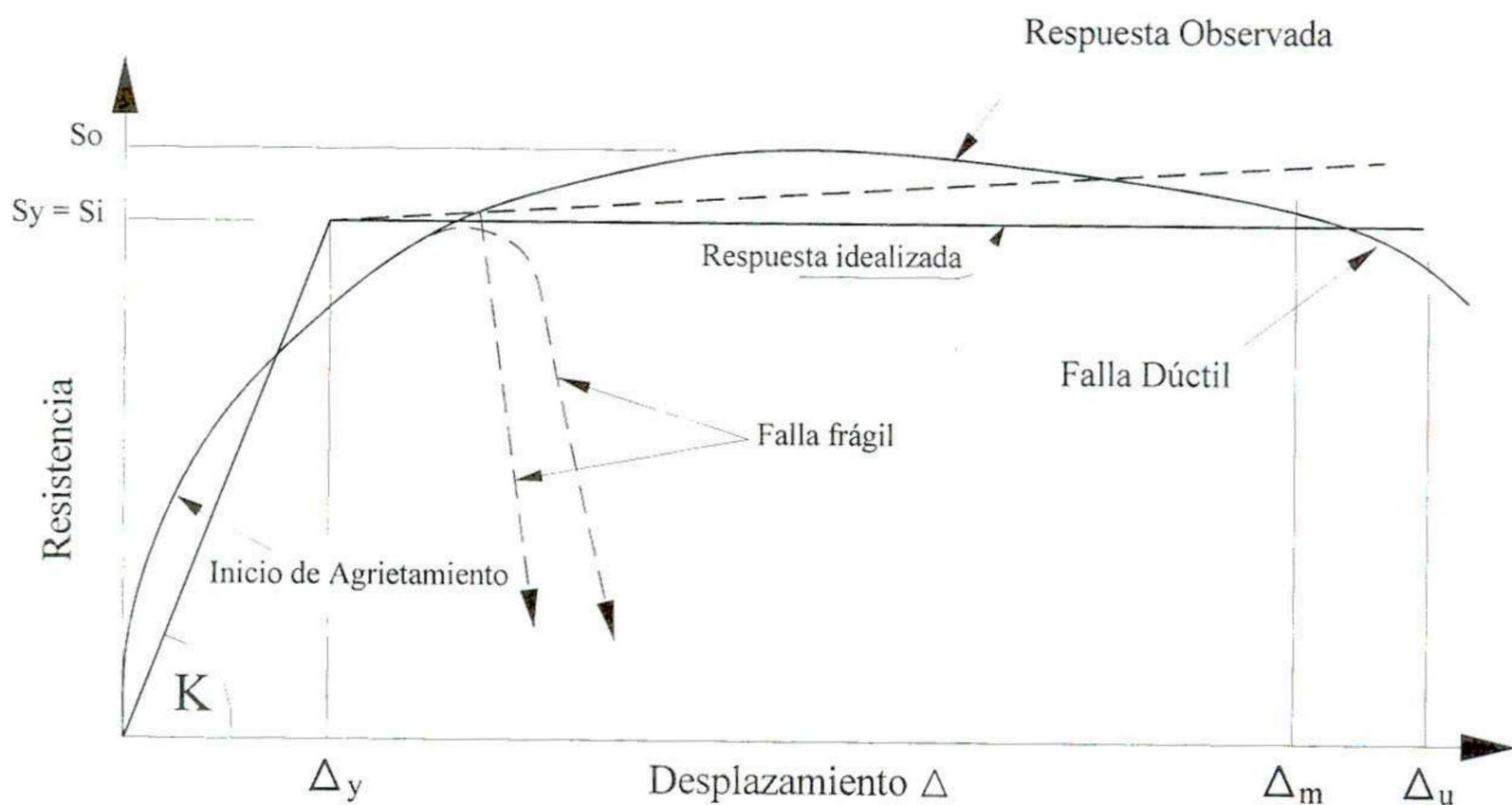


Figura N° 6. – Relación carga desplazamiento para un elemento de concreto armado

En estructuras convencionales, es decir, aquellas que no tienen dispositivos de disipación de energía, el comportamiento inelástico ocurre en los elementos estructurales, por lo que diseñar con fuerzas reducidas implica que se acepten daños estructurales

durante sismos intensos; por ello la necesidad de emplear dispositivos especiales que puedan ser los encargados de disipar la energía sísmica.

“El objetivo principal de los dispositivos disipadores de energía es eliminar o limitar a valores relativamente bajos las demandas de deformaciones inelásticas en elementos estructurales, concentrando la totalidad o bien la mayor parte de las demandas de deformaciones inelásticas y por lo tanto de disipación de energía, en elementos especialmente diseñados para poder disipar grandes cantidades de energía sin daños o bien con un mínimo de daño”⁽²⁷⁾.

CAPITULO III

MUROS DE ALBAÑILERÍA

La albañilería es definida como un conjunto de unidades adheridas entre sí con algún material como el mortero de barro o cemento; las unidades pueden ser materiales naturales como la piedra o artificiales como los adobes o ladrillos. Las estructuras de albañilería han sido edificadas desde tiempos muy remotos, pero sólo recientemente se diseñan y construyen basadas en principios ingenieriles. Al principio, las estructuras fueron hechas sin ningún tipo de refuerzo y soportaban sólo cargas de gravedad, eran estas cargas las que estabilizaban la estructura contra cualquier fuerza lateral debido al viento o acción sísmica.

Una de las características de la albañilería es su pobre comportamiento sísmico, especialmente debido a que:

1. Está compuesta por materiales frágiles y tiene una severa degradación de la resistencia cuando es sometida a una carga cíclica.
2. Posee una gran rigidez, la que lleva a la estructura a una gran respuesta de las ondas sísmicas debido a su corto período natural.
3. Tienen una gran variabilidad en su resistencia que depende de la calidad de construcción, tipo de unidad de ladrillo utilizado, entre otros.

Para poder mejorar el comportamiento de la albañilería frente a las fuerzas laterales, especialmente en zonas de alto riesgo sísmico, los muros son reforzados con acero, a fin de otorgarle ductilidad; la cantidad y distribución del refuerzo varía de acuerdo a la demanda de la fuerza lateral.

Existen dos sistemas para reforzar los muros de albañilería: (a) cuando el refuerzo es concentrado en elementos de concreto armado vaciado alrededor del perímetro del muro es llamada albañilería confinada (ver figura 7.b) y (b) cuando el refuerzo es distribuido en la albañilería tanto horizontal como verticalmente, alojándose el refuerzo vertical en los alveolos de las unidades de ladrillo construidas para este fin es llamada albañilería armada.

III.1 SISTEMAS DE ALBAÑILERÍA

1 Albañilería Armada

Se caracteriza por llevar el refuerzo en el interior de la albañilería, el que es generalmente distribuido a lo largo de la altura del muro (refuerzo horizontal) como de su longitud (refuerzo vertical). Este tipo de albañilería generalmente es construido con unidades alveolares, en cuyo interior se coloca el refuerzo vertical y luego es llenado con concreto fluido como se puede ver en la figura N° 7.a. Mayor información sobre el diseño y construcción de este tipo de albañilería se puede encontrar en las referencias (8), (15) y (40).

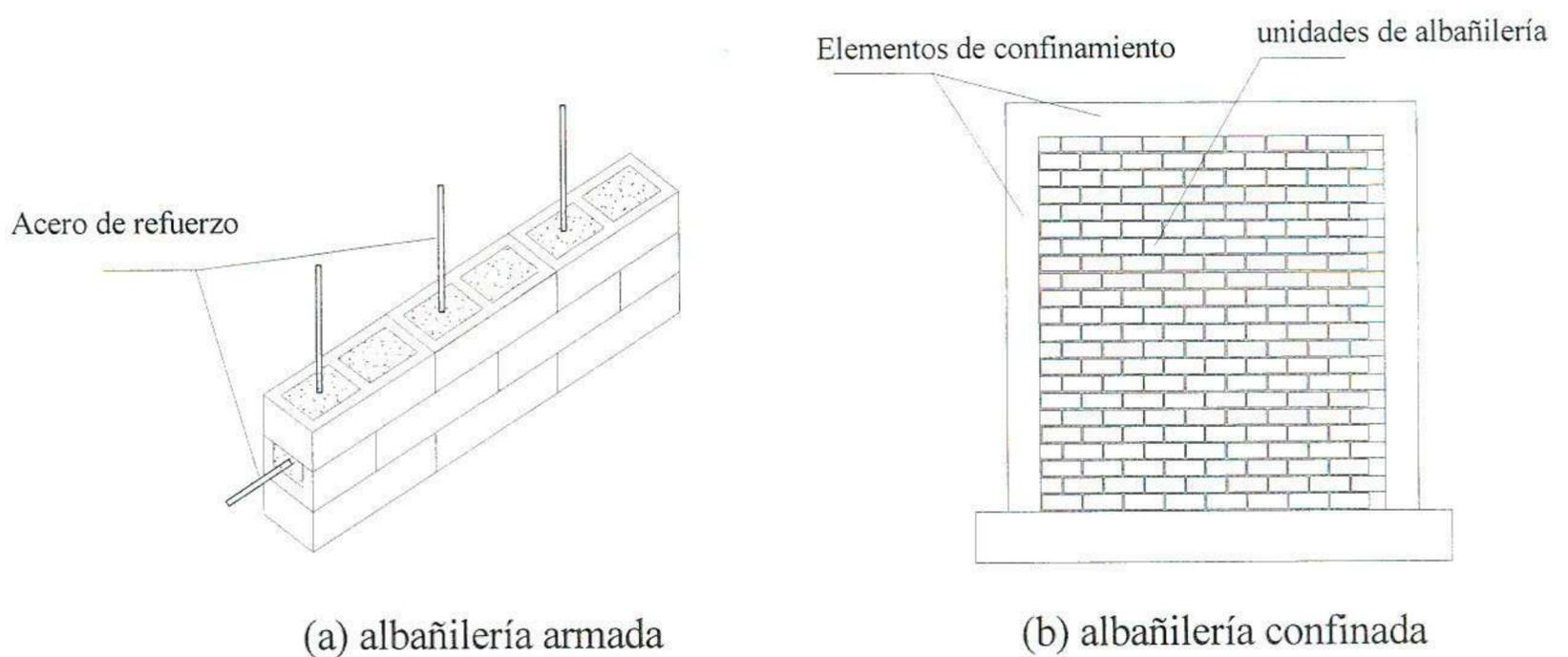


Figura N° 7. - Sistemas de albañilería más comunes empleados en nuestro país.

2 Albañilería Confinada

Es el sistema de construcción más empleado en el país, se caracteriza por estar constituido por un muro de albañilería simple enmarcado por elementos de concreto armado (vigas y columnas), vaciados una vez construido el muro.

Usualmente se emplea una conexión dentada entre la albañilería y las columnas para mejorar la adherencia con los elementos de concreto. La función principal del pórtico de concreto armado que rodea al muro es proporcionar ductilidad al sistema de modo que le otorgue capacidad de deformación inelástica. Adicionalmente el marco funciona como elemento de arrioste cuando la albañilería se sujeta a acciones perpendiculares a su plano.

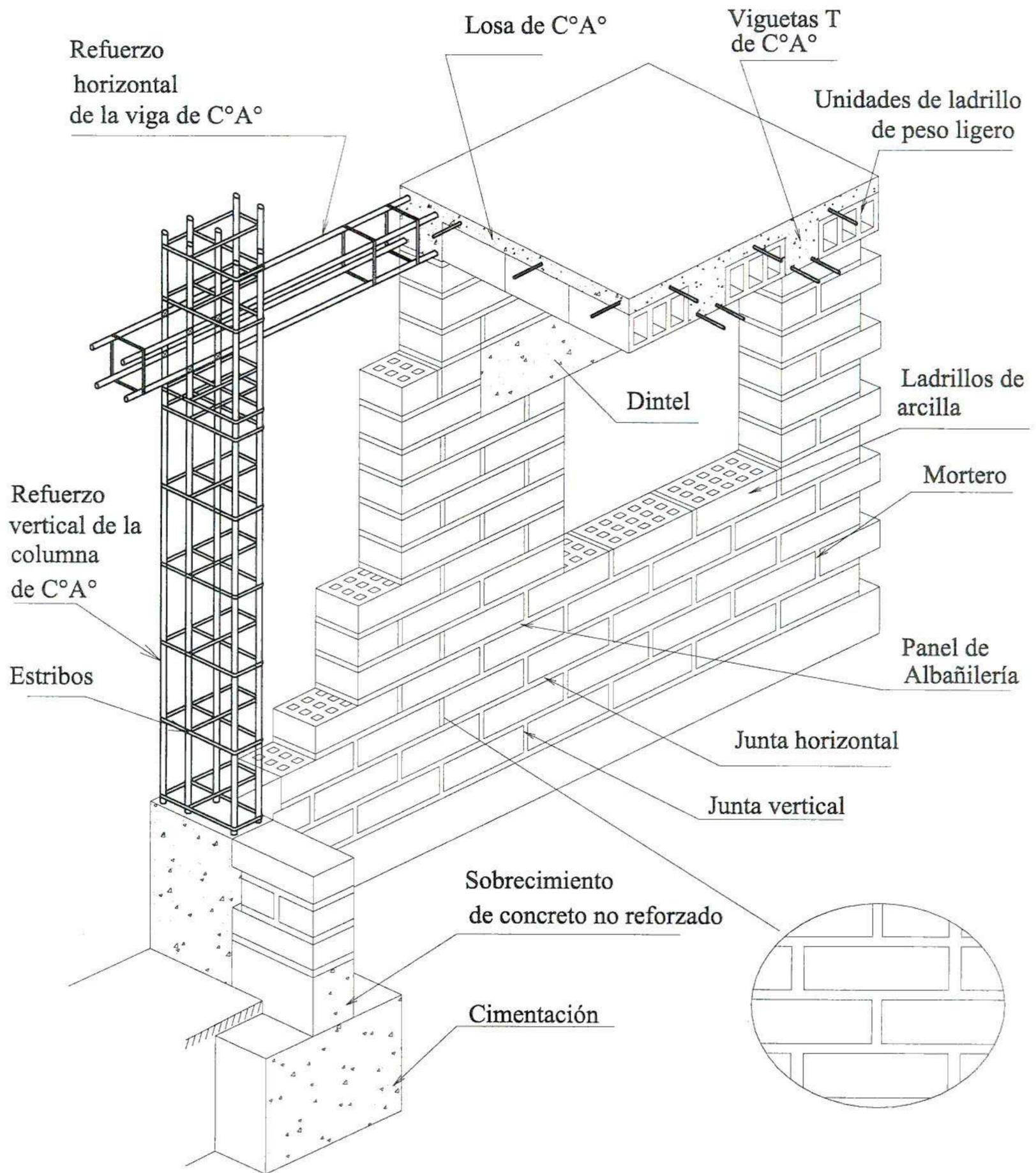


Figura N° 8. – Elementos característicos en un muro de albañilería confinada

El confinamiento vertical es anclado a la cimentación del muro y se extiende a lo largo de toda su altura. Los elementos de confinamiento verticales son usualmente vaciados después de que el muro ha alcanzado una elevación al nivel de la parte inferior de la viga collar.

Los elementos horizontales de confinamiento consisten de vigas de concreto reforzado, llamadas vigas collar o solera, las cuales son colocadas en cada nivel de piso y son continuas sobre el muro. Los elementos característicos en un muro de albañilería se pueden apreciar en la figura N° 8.

El análisis sísmico de edificaciones de albañilería es efectuado usualmente por un análisis estático, con la entrada sísmica coincidente con los ejes principales de inercia de la estructura; para ello, se asume que los pisos se comportan como diafragmas rígidos conectados a los muros. Sólo aquellos muros que tienen la misma dirección que las ondas del sismo toman las fuerzas sísmicas, y aquellos dirigidos ortogonalmente pueden despreciarse debido a su mínima rigidez lateral. Existen excepciones, tal es el caso de los muros esbeltos donde la condición más desfavorable sería cuando la entrada sísmica es ortogonal al plano del muro, debido a que grandes deflexiones harían peligrar su estabilidad.

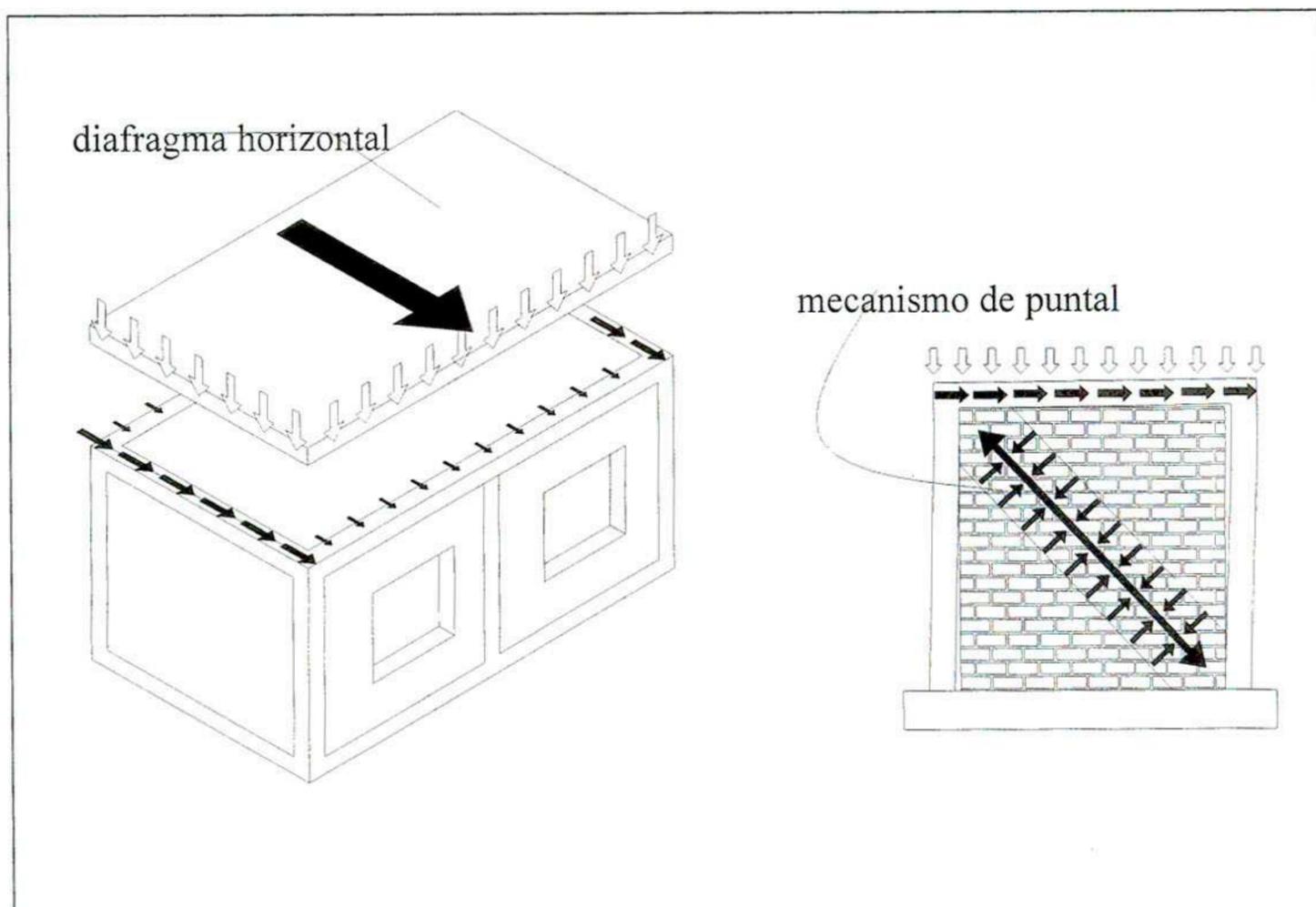


Figura N° 9. - Mecanismo de resistencia al corte en muros de albañilería

Las cargas verticales de los sistemas de piso son transmitidas a la albañilería con la finalidad de mejorar la resistencia al corte. Usualmente los sistemas de piso son construcciones de losa aligerada, compuestas por un sistema de vigas T (viguetas) y ladrillos de arcilla huecos con la finalidad de aligerar el peso. Son a través de éstos sistemas de piso que las cargas laterales y verticales son distribuidas a los muros de acuerdo a su rigidez.

Ensayos de cargas laterales realizados en el Laboratorio de Estructuras del CISMID, muestran la tendencia de estos muros de formar una grieta diagonal inducida por el corte y tracción diagonal. Estas grietas reducen la posibilidad de un comportamiento dúctil adecuado y limitan el número de pisos a ser construidos en una edificación (menores a 5), especialmente en zonas de alto riesgo sísmico.

En los muros confinados, el refuerzo vertical colocado en las columnas crea una especie de tirante, que en conjunto con la carga lateral hacen trabajar a la albañilería a compresión diagonal, induciendo tracciones principales ortogonales a la diagonal comprimida.

III.2 LA ALBAÑILERÍA COMO ELEMENTO ESTRUCTURAL

La albañilería es el sistema de construcción más empleado en el país y por ello se le debe dar un tratamiento especial en el campo de la investigación, buscando técnicas apropiadas para mejorar su comportamiento sísmico. El Perú al estar ubicado entre la placa de Nazca y la Sudamericana está sometido a eventos sísmicos constantes, es por ello, que las edificaciones existentes deben ser capaces de soportar dichos eventos o al menos no colapsar.

En los últimos 10 años los fenómenos naturales produjeron diferentes tipos de desastres en el Perú, algunos de los problemas ocurridos fueron las inundaciones, deslizamientos de tierra, lluvias torrenciales y también sismos.

Ultimamente el Fenómeno del Niño ha traído como consecuencia que materiales tradicionales como el adobe y la quincha colapsaran; después de éste desastre unas 200,000 familias perdieron sus viviendas y muchas de ellas fueron afectadas incluso en dos oportunidades por diferentes fenómenos, como sucedió en la localidad de Nazca la cual soportó el terremoto del 12 de noviembre de 1996, donde el 75% de las casas quedaron afectadas especialmente las edificaciones de adobe (100%) y estructuras de

albañilería (30%). Los edificios públicos fueron también afectados con fuertes grietas en la división de muros de albañilería, asimismo las viejas iglesias sufrieron daño estructural en sus paredes y arcos.

Tomando en cuenta éstas y otras consideraciones se propone desarrollar un dispositivo que permita incrementar la resistencia contra cargas laterales y fundamentalmente que la estructura goce de un comportamiento dúctil, es decir, que se pueda deformar en el rango inelástico sin que esto afecte significativamente su capacidad resistente; o dicho de otro modo, que pueda ser capaz de disipar energía. El objetivo del experimento es demostrar que con la inclusión de un dispositivo dentro del muro de albañilería se incrementa la resistencia y se mejora el comportamiento del muro, logrando mayor disipación de energía.

CAPITULO IV

PROTOTIPO DEL PANEL

En un sistema de construcción de albañilería, los muros son los principales elementos resistentes; si estos muros poseen aberturas para puertas o ventanas su resistencia y rigidez disminuirá, siendo su comportamiento ya conocido ^{(8),(34) y (37)}.

Si un panel de acero liviano es colocado para rellenar el hueco dejado en la albañilería, esta incrementará su ductilidad y se esperará mayor disipación de energía para el conjunto, asimismo incrementará su resistencia. Esta plancha funcionará como un fusible que hará que toda la estructura en sí tenga un comportamiento dúctil.

Se ensayaron dos muros de albañilería a escala natural, uno con elemento disipador y el otro sin elemento disipador.

El elemento disipador consistente en un panel de acero liviano de espesor de $t=0.6\text{mm}$, con propiedades correspondientes al acero tipo A36 ($f_y=2500\text{kg/cm}^2$) y un módulo de elasticidad de $E=2.1\text{E}6\text{ kg/cm}^2$; adicionalmente se colocaron perfiles L de $40\times40\times0.6\text{ mm}$ laminados en frío, con propiedades mecánicas semejantes a las del panel con la finalidad de mejorar su estabilidad y comportamiento.

Los muros de albañilería empleados en el experimento fueron de 125 mm de espesor con 600 mm de ancho y 2200 mm de altura y se hallaban confinados por columnas de $125\times200\text{mm}$ en el lado interno y $200\times250\text{mm}$ en el lado externo y unidas por una viga collar de $200\times300\text{mm}$. El concreto usado en los elementos de confinamiento alcanzó una resistencia a compresión a los 28 días de 230 kg/cm^2 .

Las columnas y vigas fueron reforzadas con acero nominal de acuerdo a lo establecido en el código de diseño.

La distribución del refuerzo longitudinal y transversal de los elementos de confinamiento es mostrada en la figura N° 10.

Para poder anclar el muro a la losa de ensayo y simular un comportamiento de muro empotrado, se construyó una viga de cimentación de 800mm de ancho por 300 mm de altura que fue unida a la base mediante 10 pernos de $\Phi=1$ pulgada. Estos pernos fueron ajustados con una fuerza de tracción de 10 Tn c/u con la finalidad de generar una fuerza de fricción mayor a la carga lateral aplicada y así evitar el deslizamiento del muro.

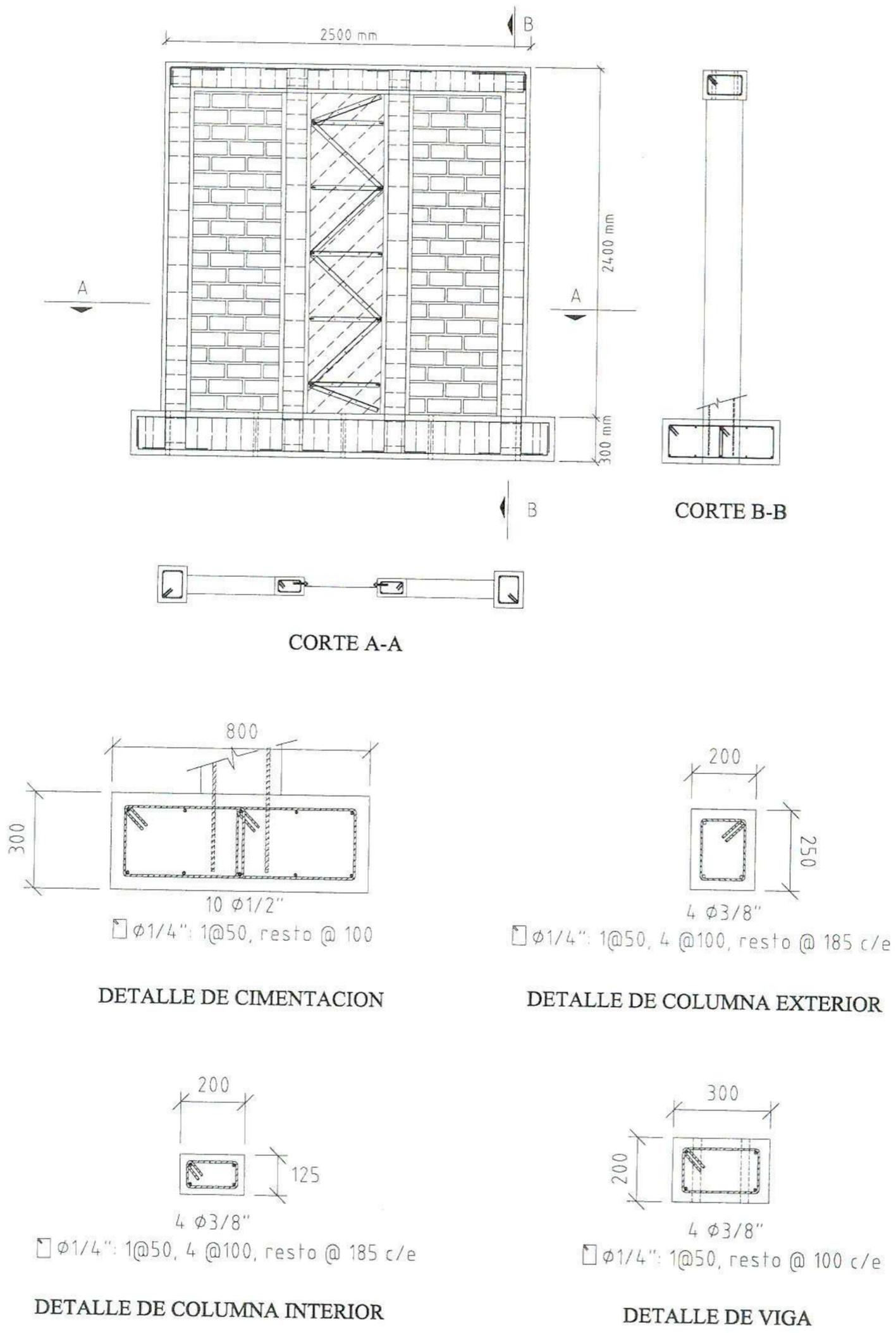
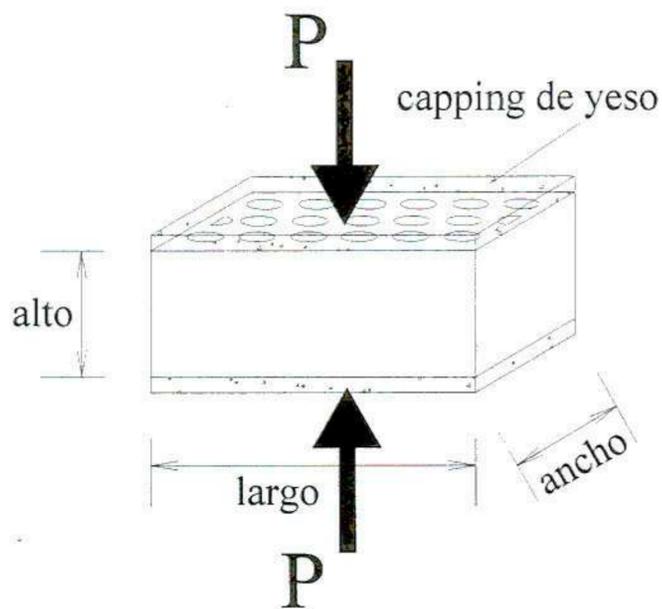


Figura N° 10. - Distribución del refuerzo longitudinal y transversal en los elementos de confinamiento y la base de cimentación.

El panel de acero liviano fue unido a las columnas interiores del muro de albañilería a través de pernos de expansión de $\Phi=3/8$ de pulgada, los que estuvieron ubicados en los extremos de los perfiles de arriostre.

Los muros fueron construidos utilizando las formas convencionales de construcción aplicadas en la mayoría de las edificaciones de albañilería (ver fotos 1 - 4 en el anexo).



Las unidades de ladrillo utilizadas para la construcción del muro fueron de fabricación industrial, tipo King Kong de 18 huecos. Al no contarse con información acerca de las propiedades mecánicas del ladrillo, se procedió a realizar ensayos de compresión en 4 unidades escogidas aleatoriamente, para de esta manera obtener su resistencia a la compresión como el resultado del promedio de las cuatro muestras menos una desviación estándar, la que arrojó como resultado una resistencia a la compresión de 250 kg/cm^2 . Los resultados de dicho análisis se resumen en la tabla N° 1.

Figura No 11. Ensayo a compresión en el ladrillo tipo King Kong

unidad	largo	ancho	alto	P	Ag (cm ²)	Ah (cm ²)	An (cm ²)	f _b
1	23.3	12.6	8.9	49200	293.58	95.57	198.01	248.5
2	23.4	12.6	9.2	52800	294.84	95.57	199.27	265.0
3	23.4	12.6	9.0	51800	294.84	95.57	199.27	259.9
4	23.4	12.6	9.0	51200	294.42	95.57	198.85	257.5

desviación estándar = 6.91 f_b(promedio) = 250.8 kg/cm²

Tabla N° 1: Propiedades del ladrillo de arcilla tipo King Kong empleado en el ensayo

En la tabla N° 1:

Ag, representa el área geométrica de la sección transversal

Ah, el área de huecos

An, el área neta y

P, la carga de compresión aplicada.

De igual manera, para poder conocer la resistencia a la compresión de la albañilería se construyeron 4 pilas, cada una de ellas conformada por 4 unidades de ladrillo unidas con mortero de cemento – arena (1:4), con un espesor de junta de 15mm aproximadamente como se aprecia en la fig. N° 12. Luego cada pila fue sometida a compresión axial para obtener su resistencia a la compresión, valor que se obtuvo como el promedio de las cuatro muestras menos una desviación estándar. La resistencia a compresión promedio de las pilas de albañilería fue de 111 kg/cm². Los resultados de dicho análisis se resumen en la tabla N°2.

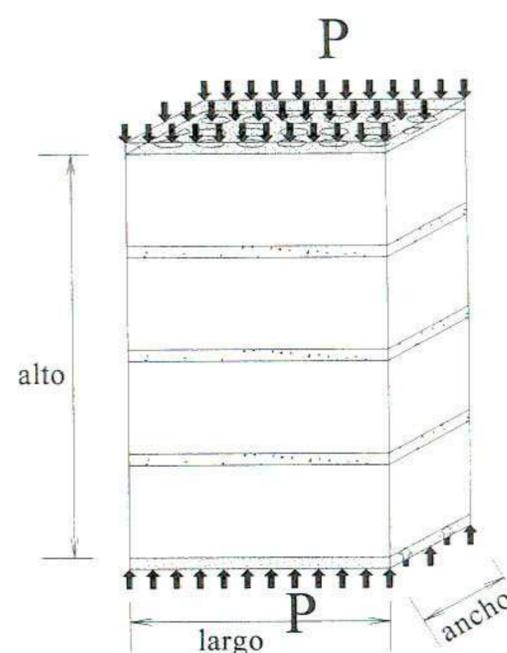


Figura N° 12.- Ensayo a compresión en las pilas de albañilería.

Pila	Largo	Ancho	Alto	P	Ag (cm ²)	Ah (cm ²)	An (cm ²)	f _m
1	23.4	12.6	41.4	28100	294.84	95.57	199.27	141.0
2	23.4	12.6	41.1	27600	294.84	95.57	199.27	138.5
3	23.4	12.7	42.1	24500	297.18	95.57	201.61	121.5
4	23.4	12.6	41.5	26400	295.62	95.57	200.05	132.0

Desviación estándar = 7.4

f_m(promedio) = 111.06 kg/cm²

Tabla N° 2: Datos obtenidos del ensayo a la compresión en las pilas de albañilería

CAPITULO V

SELECCION DE LA CONFIGURACION DEL PANEL

Modelamos el muro con el panel disipador mediante la técnica de los elementos finitos, para ello nos apoyamos en el programa de cómputo SAP90 versión 5.01.

Se realizaron 5 modelos con diferente disposición de los puntales de arriostre (figura N° 13). La función de los perfiles de acero formados en frío (puntales) en la plancha de acero, fue evitar el pandeo excesivo y prematuro de la plancha, así como mejorar la distribución de esfuerzos que se generarían en el momento del ensayo.

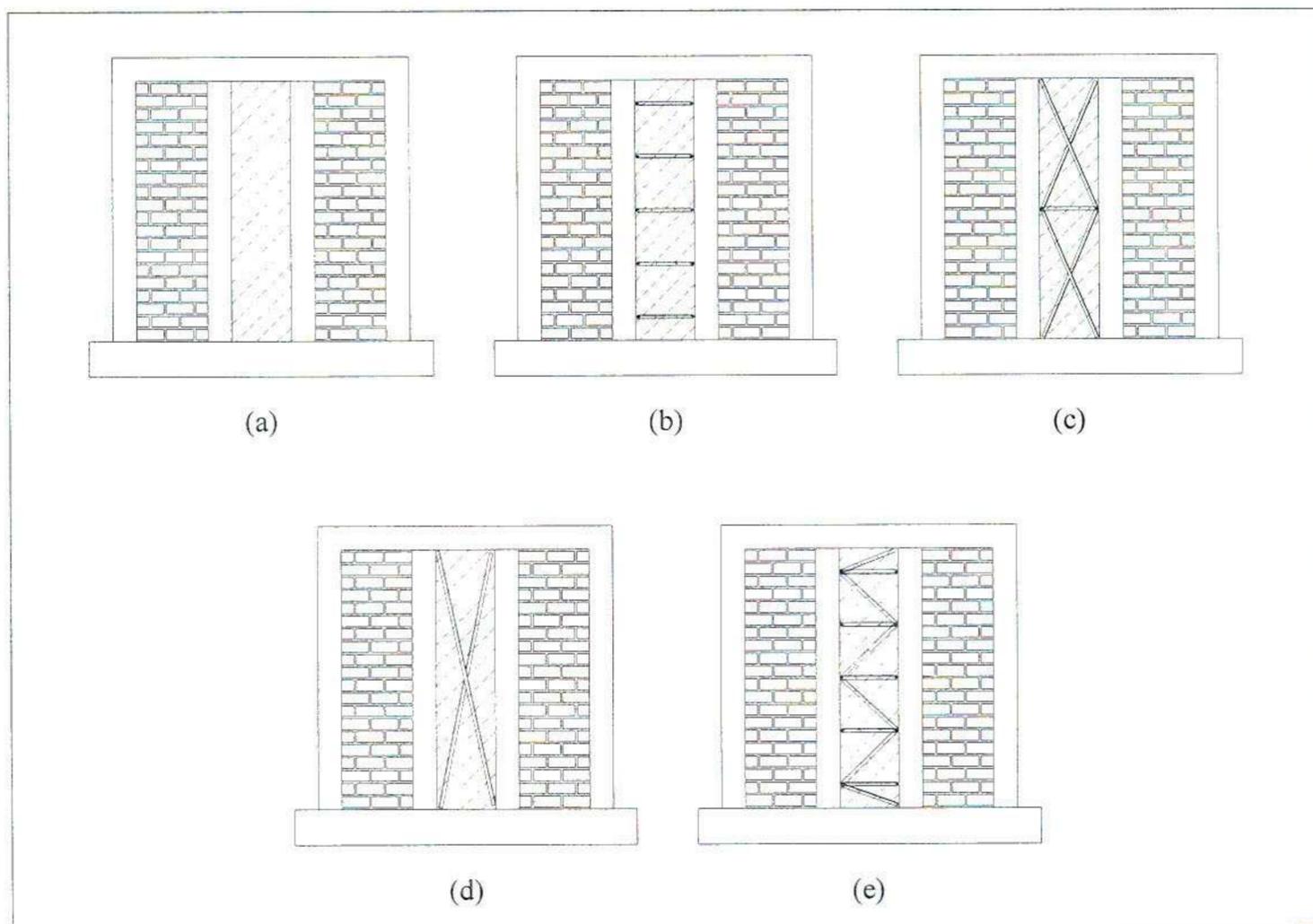


Figura N° 13. - Muros analizados mediante modelos elásticos

Para modelar el muro de albañilería y la plancha de acero liviano se usaron elementos SHELL tipo membrana con cuatro nodos, considerando una formulación isoparamétrica que incluye una componente de rigidez traslacional en el plano y una rigidez rotacional en la dirección normal al plano. Los ángulos de acero fueron modelados usando elementos FRAME unidos a los elementos SHELL en los nodos, liberando para ello los grados de libertad correspondientes a la flexión.

Los modelos fueron analizados con la misma intensidad de carga para poder compararlos, los resultados de dicho análisis se muestran en forma gráfica en la figura N° 14; en ella se vé la distribución de los esfuerzos cortantes, los diversos colores indican la variación de los esfuerzos en los modelos, la leyenda permite conocer su intensidad. Los resultados de los modelos “a”, “b”, “c”, y “d” de la figura N° 13 en general no muestran mayores diferencias en cuanto a esfuerzos como puede apreciarse en la figura N° 14; sin embargo, el modelo “e” arroja esfuerzos en el muro de albañilería menores a los obtenidos en los otros modelos, estando los esfuerzos mejor distribuidos tanto en el muro de albañilería como en el panel de acero; por lo que, éste será el modelo elegido que se tomará en cuenta para el prototipo. Además cabe agregar que los modelos consideraron solamente un análisis lineal, lo que no ocurre realmente ya que la plancha de acero liviano debido a su pequeño espesor incursiona en el rango inelástico por pandeo y será por este medio que se disipará energía.

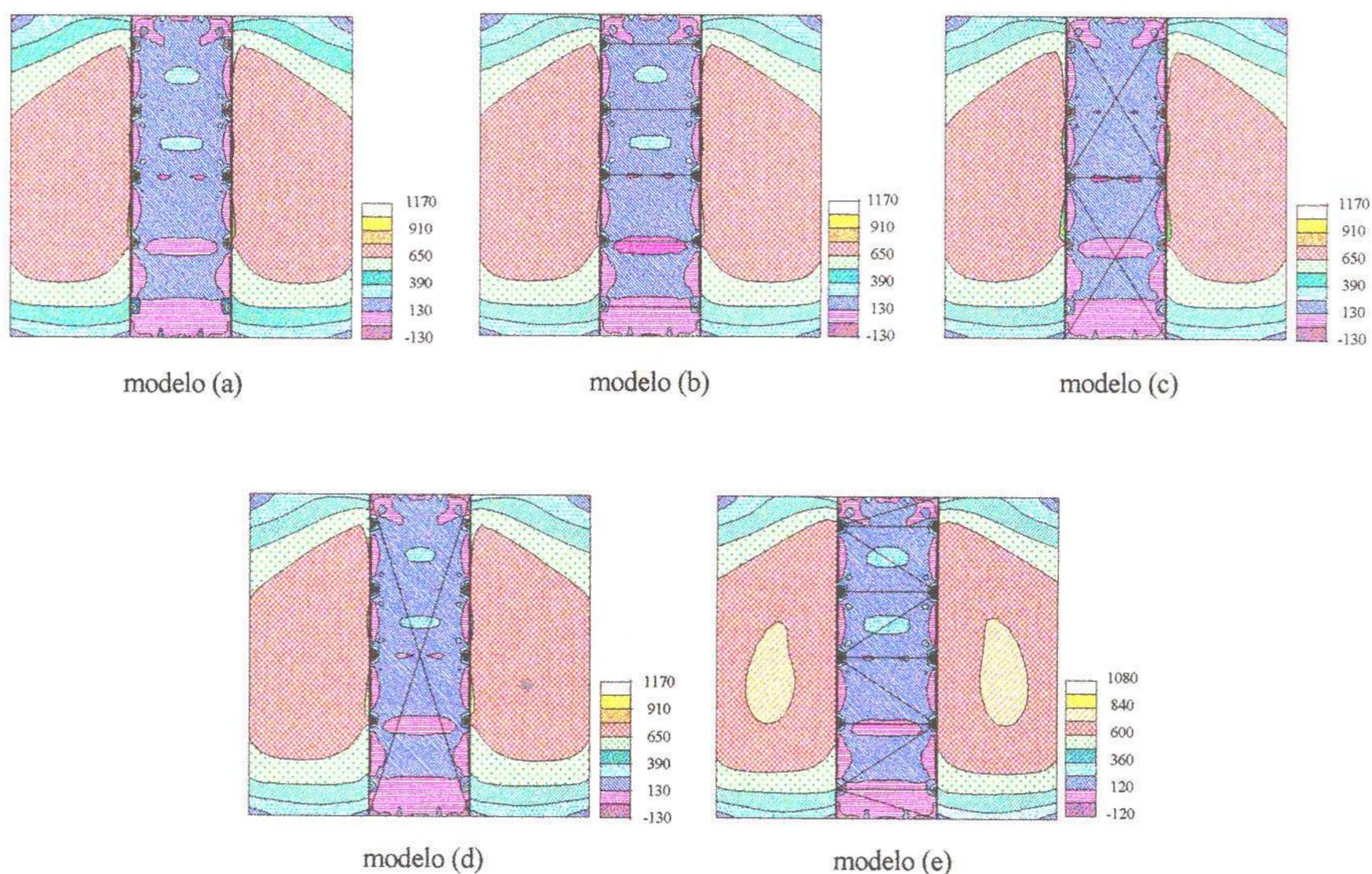


Figura N° 14. - Esfuerzos en los muros para las diferentes disposiciones de los perfiles angulares

CAPITULO VI

ESTUDIO EXPERIMENTAL

VI.1 Laboratorio y Equipos de Ensayo

Los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Estructuras del CISMID (Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres) de la Facultad de Ingeniería Civil de la UNI. El laboratorio cuenta con una losa de ensayo, un muro de reacción y el sistema de carga, el sistema de procesamientos de datos y el sistema de ensayo controlados por medio de computadoras.

La losa de ensayo construida de concreto pretensado tiene una dimensión de 22.00m x 11.00m en planta y un espesor de 0.80 m; por otra parte en un extremo de la losa de ensayo se tiene el muro de reacción de 9.00 m x 11.00 m y 4.50 m de espesor.

La losa y muro de reacción poseen huecos de 100 mm de diámetro espaciados cada 600 mm en ambas direcciones, los cuales permiten la fijación adecuada de los dispositivos de carga y de los especímenes a ensayar mediante pernos de fijación.

VI.2 Sistema de Carga

Para aplicar la carga se utilizó un actuador, cuyo movimiento del pistón es controlado por un sistema de servo - control electro - hidráulico Shimatzu, capaz de producir desplazamientos ± 200 mm, operando bajo un rango de cargas de ± 25 Tn.

El sistema de carga consta de un panel selector de alimentación, un módulo de entrada, un servo controlador y una servo válvula.

Las señales de comandos son enviadas a través de una computadora conectada en línea con el sistema de servo control, quien realiza los desplazamientos de comando.

VI.3 Montaje e Instrumentación

Los muros a ensayar fueron transportados desde el lugar de su construcción hasta la losa de ensayo, luego el espécimen fue anclado fijamente a la losa de ensayo y posteriormente una viga de acero fue fijada en la parte superior del muro con la finalidad de distribuir en forma eficiente la carga horizontal.

La respuesta del modelo se obtuvo a partir de la medición simultánea de los desplazamientos en diferentes puntos mediante transductores de desplazamiento, los que

VI.4 Análisis de Resultados

Se realizó un ensayo cíclico bajo control de desplazamientos, manejando el actuador para diferentes niveles de distorsión de la estructura. No se usó fuerza axial de confinamiento.

La historia de los desplazamientos reprodujo ángulos de distorsión de 1/3200, 1/1600, 1/800, 1/400, 1/200 y 1/120.

Los desplazamientos registrados en cada canal por medio de los transductores de desplazamiento, fueron analizados conjuntamente con la fuerza cortante por medio de gráficos que representan el comportamiento de los muros en el proceso de carga y descarga, estas curvas son denominadas lazos histeréticos; en ellas se observa un comportamiento elástico para pequeñas distorsiones y el ensanchamiento del lazo conforme las distorsiones crecen, lo cual indica un comportamiento inelástico con disipación de energía.

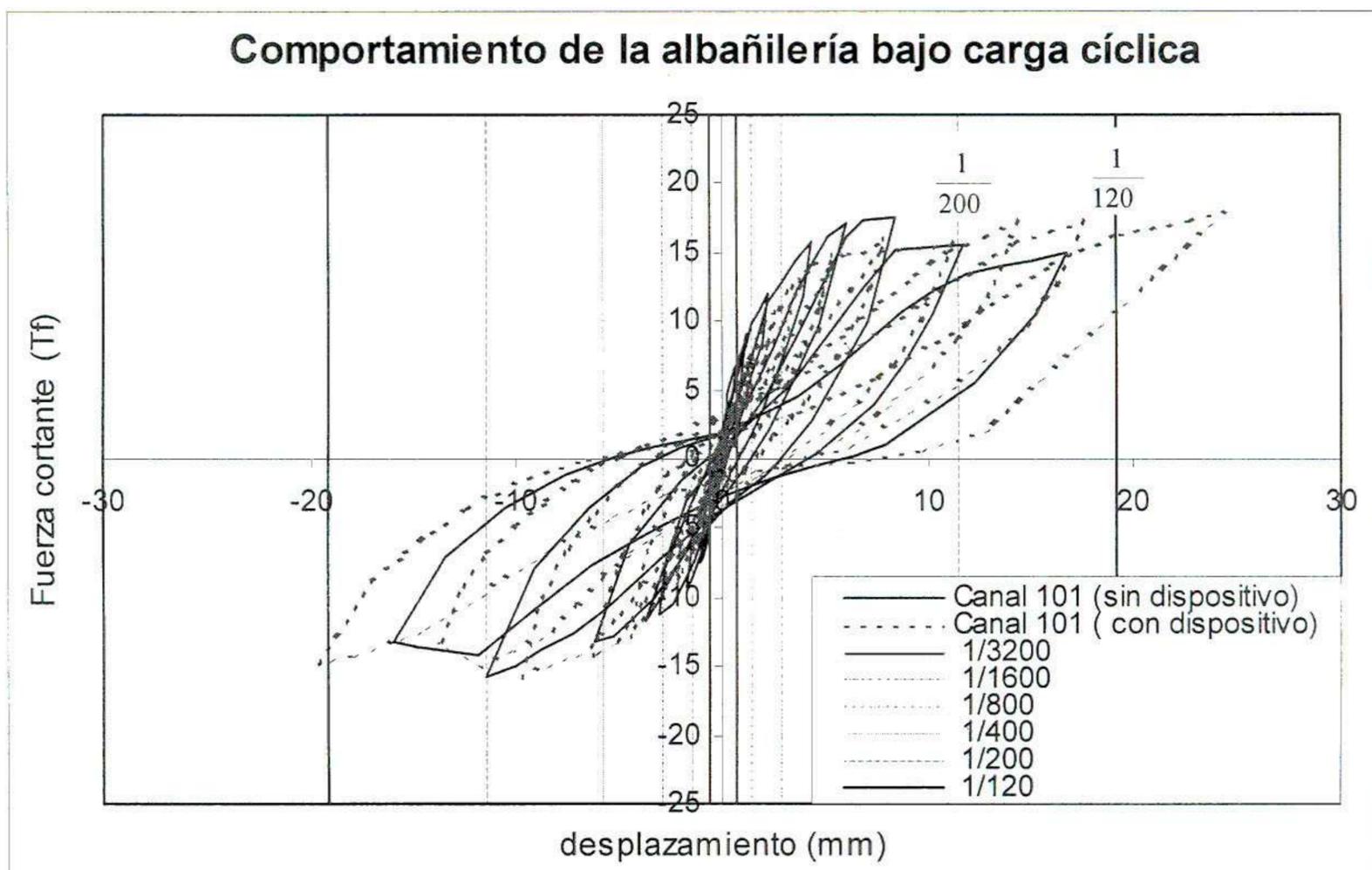


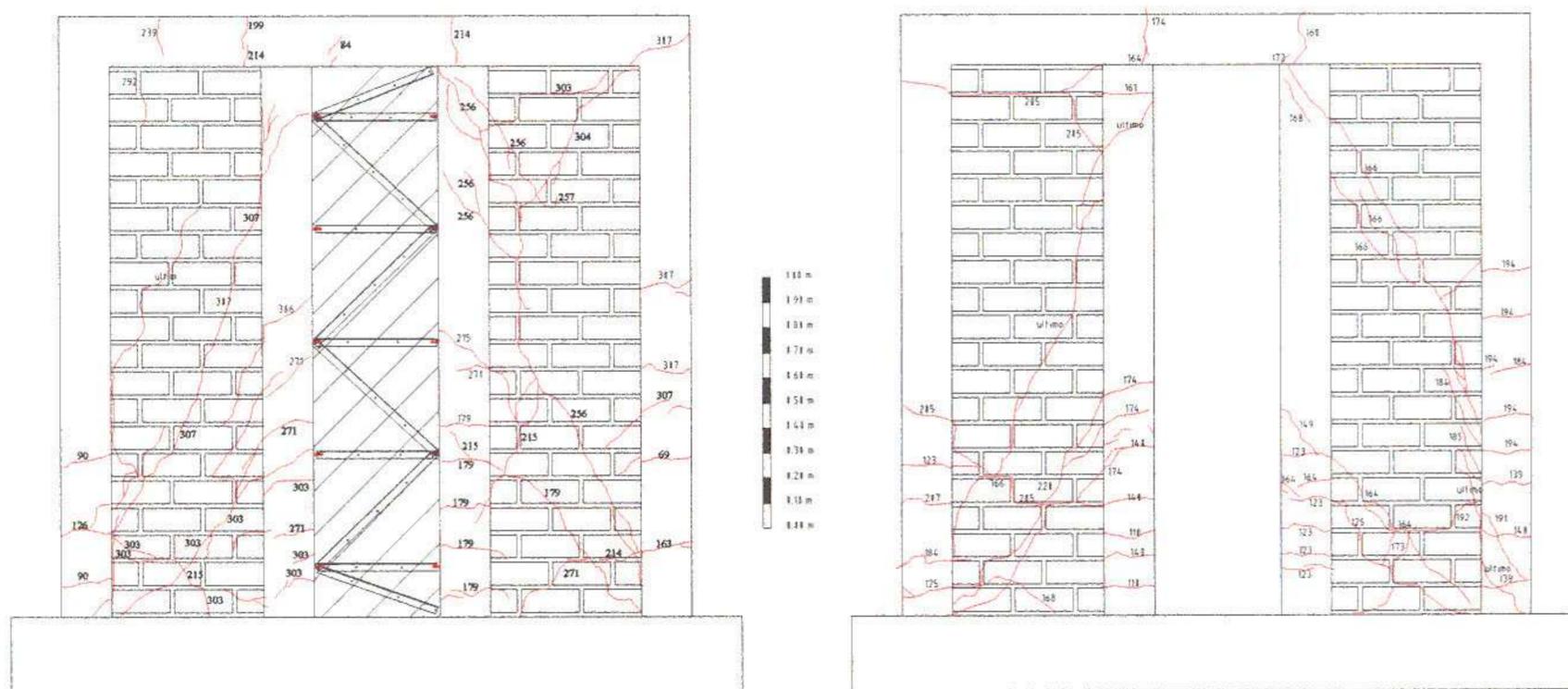
Figura N° 16. - Comportamiento de los especímenes

En la figura N° 16 se muestra la respuesta de los muros con y sin panel disipador. Si se comparan ambas curvas es posible leer el incremento de la resistencia suministrada por el panel de acero liviano.

En el espécimen sin panel, la máxima resistencia alcanzada se dió bajo un ángulo de distorsión de 1/272 dando una máxima fuerza cortante de 17.3 Tf.; cabe mencionar que el experimento fue detenido para una distorsión máxima de 1/145 debido a las grandes grietas que se produjeron para este nivel.

Los resultados del espécimen con panel dissipador son presentados con líneas punteadas en la figura N° 16 y puede verse que estas curvas encierran una mayor área dentro del ciclo, lo que indica la tendencia del conjunto para disipar energía. La resistencia máxima en el muro fue alcanzada para un ángulo de distorsión de 1/94 con una fuerza de corte de 17.92 Ton.

La distorsión angular es la que origina esfuerzos principales de tracción diagonal en la albañilería dando origen a las grietas diagonales; al respecto los experimentos muestran que el agrietamiento diagonal ocurre al alcanzar una pequeña distorsión, aproximadamente del orden de 1/800 (incluyendo los desplazamientos por flexión y por corte). Esta afirmación se verificó en el muro sin dispositivo dissipador de energía, el que experimentó su primera grieta diagonal en el paso 125 correspondiente a una distorsión de 1/788



Patrón de grietas en el muro con dissipador

Patrón de grietas en el muro sin dissipador

Figura N° 17. - Patrones de comportamiento en los especímenes ensayados

El muro con disipador por otra parte, experimentó su primera grieta diagonal en el paso 179 correspondiente a una distorsión de 1/434.

Ensayos experimentales muestran que la máxima deformación que podría esperarse en los muros de albañilería es de 1/200, antes de que se presenten daños irreparables.

Se puede observar en la figura N° 16 que para una distorsión angular de 1/200 en el muro sin el mecanismo disipador de energía, la resistencia empieza a decrecer; sin embargo, cuando el muro tiene el dispositivo disipador, su resistencia se mantiene e incluso va en aumento.

Durante el ensayo las grietas se propagaron principalmente en ambas direcciones diagonales, formándose algunas de ellas en las columnas y la viga. Grietas horizontales pasando a través de las juntas horizontales fueron observadas en los muros. Los modelos fueron severamente dañados cuando se excedieron los desplazamientos máximos permisibles. La propagación de las grietas es mostrada en la figura N° 17.

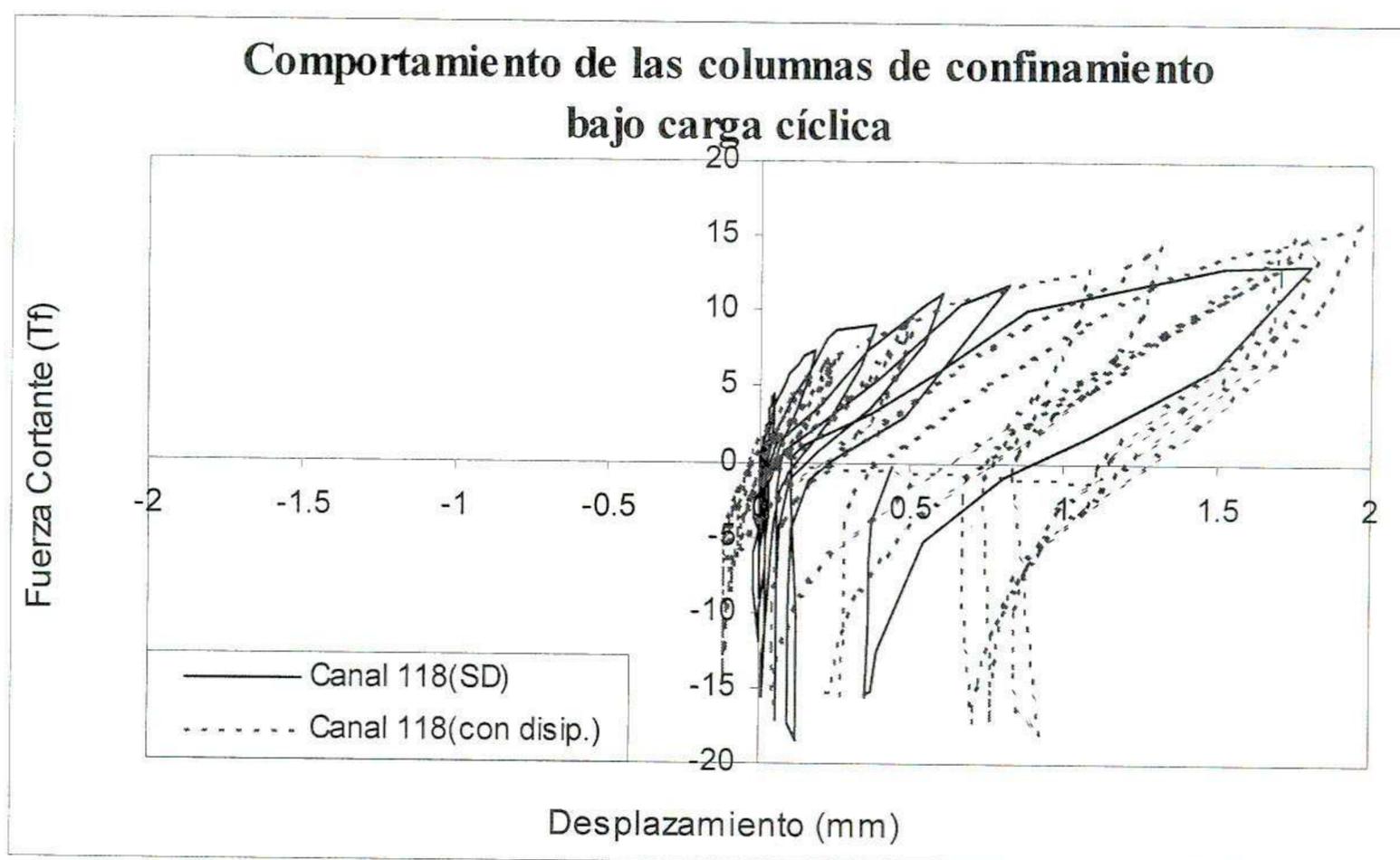


Figura N°18. – Comportamiento de las columnas de confinamiento bajo carga cíclica.

Si bien es cierto que la mayor cantidad de grietas se observaron en el muro con el dispositivo disipador, el ancho de grietas observados fue reducido, muchas de ellas fueron micro grietas; en cambio para el muro sin el dispositivo las grietas se concentraron en unas cuantas haciéndose muy visibles, en algunas de ellas el ancho de grietas fue incontrolable por lo que se tuvo que detener el ensayo. Esto nos indica que el comportamiento del muro mejoró sustancialmente al agregarle el dispositivo disipador de energía.

Se observa además en la figura N°18 que para amplitudes de desplazamiento pequeños, el mecanismo de acción de las columnas cambia alternativamente de tracción a compresión, indicándonos un comportamiento monolítico; sin embargo, una vez agrietado el muro prevalece la tracción en ambas direcciones de desplazamiento lateral impuesto, empujando las columnas a un costado e induciendo a sus barras de refuerzo a trabajar en tracción; este comportamiento es observado en ambos especímenes. Cabe agregar por otro lado, que los elementos de confinamiento previenen la desintegración de la albañilería e inducen esfuerzo adicional a compresión en direcciones horizontal y vertical.

CAPITULO VII

MODELO ESTRUCTURAL Y CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DEL MURO

VII.1 Modelos Numéricos

Existen diferentes modelos para representar numéricamente los muros estructurales. Los modelos desde el punto de vista ingenieril pueden ser clasificados en dos grupos: macro modelos y micro modelos.

Se entiende como Macro Modelo aquel que incorpora el comportamiento de toda la sección transversal de un muro sobre cierta altura, incluyendo para ello sus propiedades tales como: calidad del concreto, el acero de refuerzo y los efectos de interacción entre el concreto y el acero. Los macro modelos más frecuentes encontrados en la literatura son: modelo de elemento viga, modelo de elemento armadura y modelo de elementos multi resortes.

Los Micro Modelos son aquellos que basados en la mecánica de sólidos y comprenden el campo de las leyes constitutivas de los materiales y su implementación en la metodología de los elementos finitos. Los modelos que pueden ser colocados entre las dos categorías principales son llamados como meso modelos.

Linde⁽¹⁹⁾ (1993) nos da una definición más detallada sobre estos modelos y predice el comportamiento no lineal en muros de concreto armado en zonas de rótulas plásticas en el dominio del tiempo a través de estos dos grupos de modelos.

Rojas⁽³⁶⁾ (1994) predice el comportamiento de los muros de albañilería a través de micro modelos propuestos por Noguchi (1996) para muros de concreto armado, en éste se observa la precisión de los micro modelos al compararlos con los ensayos en laboratorio; desafortunadamente estos modelos no son aplicables para fines prácticos por su dificultad en el análisis y sólo están limitados al trabajo de investigación.

Por otro lado, los macro modelos son fáciles de implementar y demandan menor esfuerzo computacional; esto motivó la implementación de un macro modelo; para ello, se consideró toda la sección transversal real del muro (elementos de confinamiento de concreto armado, muros de albañilería y elemento disipador) y se la transformó en un material equivalente.

VII.2 Evaluación de la Rigidez del Muro

El proceso de construcción de la albañilería con conexión dentada hace que exista una fuerte adherencia entre las columnas de confinamiento y las unidades de ladrillo que conforman el muro, por ello para evaluar la rigidez elástica del muro en la fase inicial (antes de que ocurra la primera grieta) es necesario en primer lugar transformar la sección en una equivalente de un solo material.

La transformación de la sección se realiza cambiando sus dimensiones paralelas al eje neutro de flexión en relación de los módulos elásticos de los materiales.

La rigidez del muro depende de sus dimensiones, propiedades mecánicas de la albañilería y restricciones de frontera y es expresada en general en términos de fuerza sobre desplazamiento.

La rigidez efectiva del muro de albañilería confinada K_0 es calculada por una ecuación simple basada en la teoría de la elasticidad, tomando en cuenta las deformaciones a flexión y corte.

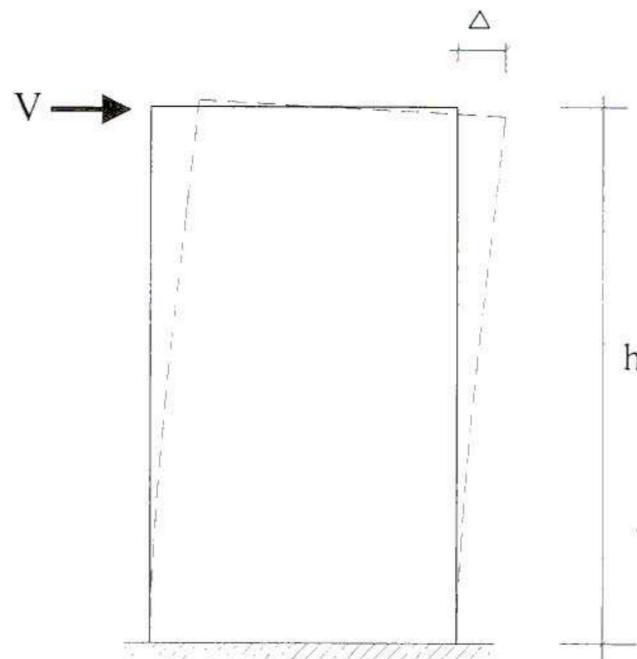


Figura N° 19. - Deformada típica de un muro

$$k = V/\Delta \quad \rightarrow \quad \Delta = \Delta_{\text{flexión}} + \Delta_{\text{corte}} \quad (6)$$

$$\Delta_{\text{flexión}} = \frac{V \cdot h^3}{3EI} \quad \text{y} \quad \Delta_{\text{corte}} = \frac{V \cdot h}{G \cdot A_s} \quad (7)$$

reemplazando (7) en (6) se tiene:

$$k = \frac{V}{\Delta} = \frac{1}{\frac{h^3}{3EI} + \frac{h}{G \cdot A_s}} \quad (8)$$

en donde:

h = altura del muro

E = módulo de elasticidad de la sección transformada

G = módulo de corte

I = momento de inercia de la sección transformada

A_s = área de corte

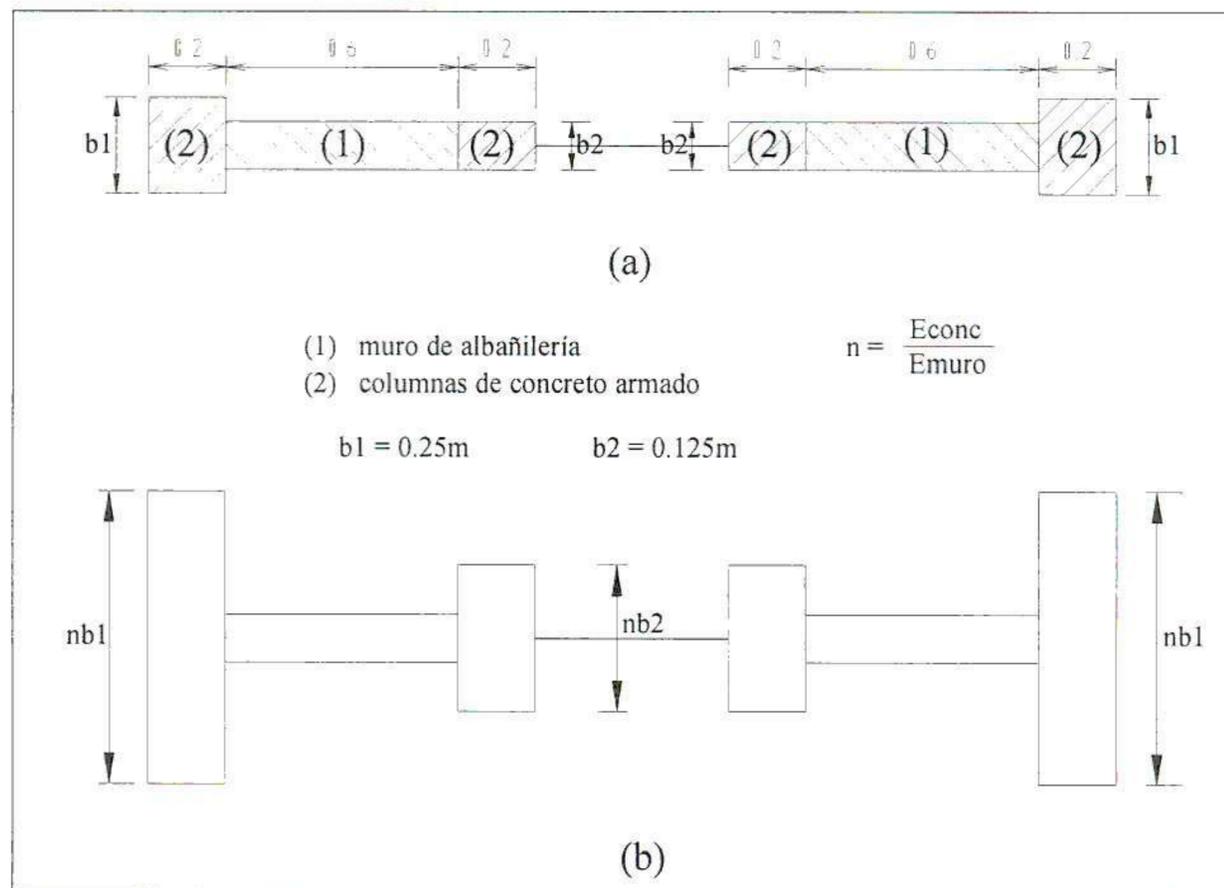


Figura N° 20. - (a) sección transversal del muro de albañilería confinada (b) sección equivalente del material 1

La sección transversal del muro de albañilería confinada es transformada en una sección equivalente del material tipo 1, mostrada en la figura N° 20.a. Las propiedades mecánicas y físicas de la sección transformada fueron evaluadas y los resultados se resumen a continuación.

$$E_c \approx 15000 \sqrt{f'_c} \approx 220000 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_m \approx 500 f'_m \approx 55000 \text{ kg/cm}^2$$

$$G \approx 0.4 E_m = 22000 \text{ kg/cm}^2$$

$n = E_c/E_m$	Area (m^2)	Momento de inercia (m^4)	* Area de corte (m^2)
4	0,3625	0,047	0,125

* El área de corte fue evaluada considerando el alma de la sección transversal equivalente

Luego los valores fueron reemplazados en la ecuación (8), la que nos dio la rigidez inicial del muro en el estado elástico $K_0 = 7.1 \text{ Tn/mm}$. Este valor es comparado con la rigidez inicial obtenida experimentalmente de los muros dándonos resultados muy cercanos.

Los muros de albañilería al estar constituidos por diversos materiales tienen un comportamiento difícil de predecir, pero en general la curva esquelética se puede simplificar en un modelo trilineal como se observa en la figura N° 21.

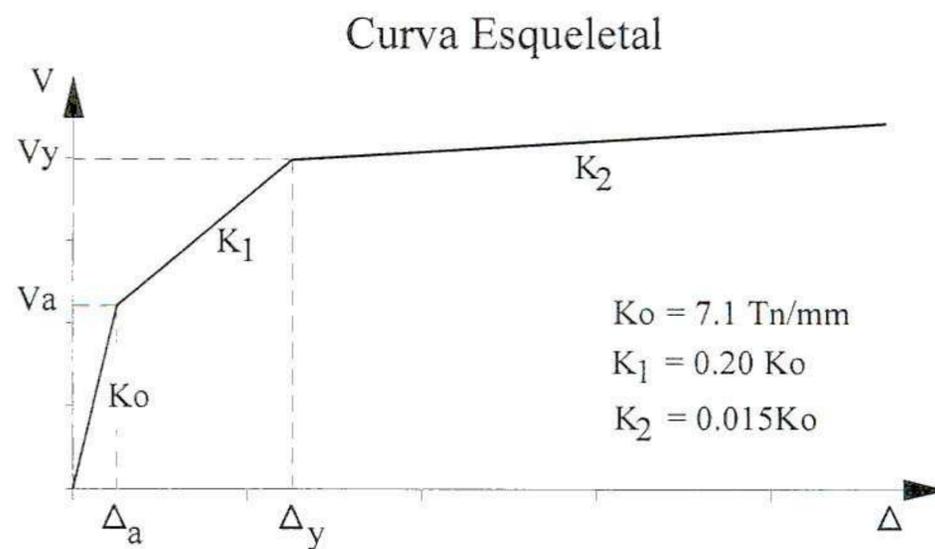


Figura N° 21. - Curva esquelética del muro de albañilería con disipador

La relación trilineal de la resistencia expresada en la figura N° 21 se ha definido sobre la base de tres características, las que han sido observadas en el ensayo de ambos especímenes:

- Límite elástico, determinado por la carga lateral y el desplazamiento en la primera grieta significativa del muro (distorsión angular 1/1800).
- Resistencia de fluencia, determinada por la carga lateral y el desplazamiento al alcanzar las grietas en la base de los extremos de las columnas (distorsión angular de 1/360).
- Estado último, determinado por la carga lateral y el desplazamiento ocasionado cuando el tamaño de las grietas se torna incontrolable.

Para modelar la degradación de la rigidez se tomó una ecuación empírica propuesta por (Tomazevic1977), la que considera la rigidez inicial y el índice de daño.

$$K_1 = K_0 (1 - \sqrt{1.281Id - 0.320}) \quad (9)$$

donde K_0 , es la rigidez elástica inicial, Id es el índice de daño:

Para poder ajustar la curva, el índice de daño ha sido tomado como 0.75, esta rigidez degradada nos representa la segunda pendiente de la curva esquelética. La tercera pendiente de la curva esquelética fue tomada como el 1.5% de la rigidez inicial y ésta se inició para una distorsión de 1/360.

La curva esquelética es construida considerando los valores máximos de cada ciclo de los especímenes. La figura N° 22 representa la curva esquelética de los especímenes con y sin panel disipador incluyendo el modelo trilineal.

En esta figura se puede apreciar que el espécimen con el dispositivo disipador tiene un comportamiento más dúctil en el rango inelástico; pues su “platea” de deformación inelástica es más amplia. Sin embargo, podemos observar que el espécimen sin dispositivo disipador tiene una resistencia mayor para los primeros ciclos de carga (pequeños desplazamientos), pero ésta se degrada rápidamente, pues su platea de deformación inelástica es casi nula.

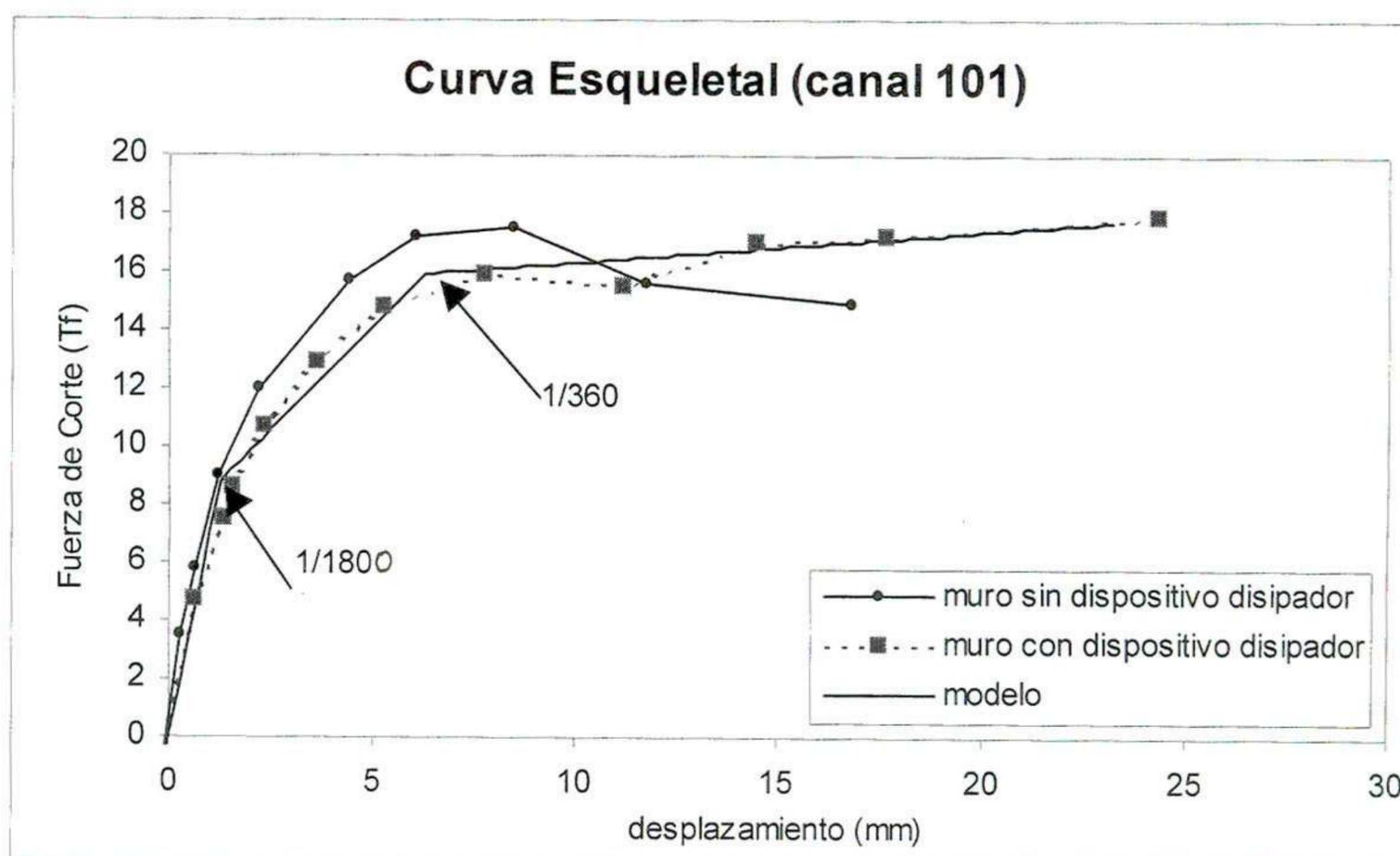


Figura N° 22. - Envoltorio de las máximas fuerzas cortantes alcanzadas durante el ensayo

VII.3 Modelos de Histéresis de las Estructuras para el Análisis de Respuesta Sísmica

Para estudiar la respuesta inelástica de un sistema discreto de masas se debe establecer un modelo matemático con las características de fuerza de restitución y definir la relación entre la fuerza cortante en el entrepiso y la deflexión del mismo.

Para una secuencia progresiva de cargas y descargas, la línea que une a los puntos picos en la curva carga deflexión de cada secuencia de carga se llama curva esquelética. En muchos casos la curva esquelética coincide con la carga monótona. La curva que se obtiene al invertir la dirección de la fuerza se llama curva de histéresis, interviniendo en ella significativamente las propiedades de los materiales y el tipo estructural.

Los modelos histeréticos son necesarios para simular el comportamiento de los elementos que están sometidos a cargas cíclicas y deben ser capaces de representar la rigidez y resistencia del miembro, propiedades que varían en cada instante de tiempo con la historia de las cargas y deformaciones producidas por los movimientos sísmicos.

La mayoría de los modelos matemáticos que representan las curvas histeréticas se simplifican de acuerdo con el nivel requerido de análisis. Se han desarrollado muchos modelos tales como: el bilineal, el trilineal, el Ramberg Osgood, el de Takeda, el modelo degradante de Clough, el modelo degradante trilineal, entre otros ⁽³²⁾.

En el presente trabajo de investigación se adoptó el modelo trilineal degradante en donde el cambio de rigidez en la curva primaria se da en los puntos de agrietamiento y fluencia. Una vez que la deformación excede el punto de fluencia el modelo tiene una rigidez de 1.5% de la rigidez inicial (casi plástico perfecto). Durante la descarga, el punto de descarga es tratado como un “nuevo” punto de fluencia y las rigideces de descarga correspondientes a los puntos de pre y post agrietamiento se reducen proporcionalmente de manera que el comportamiento tiene una forma bilineal en el rango comprendido entre los puntos de fluencia positivos y negativos. Este modelo tiene como característica la degradación continua de la rigidez con el incremento máximo del desplazamiento más allá de la fluencia

Cuando el muro empieza a degradarse, la rigidez de carga y descarga se reduce en función del desplazamiento máximo anterior (Nielsen y Imbeault, 1970) en la forma:

$$K_r = K_y \left| \frac{D_m}{D_y} \right|^{-\alpha} \quad (10)$$

Donde:

α = parámetro de la degradación de la rigidez en la descarga ($0 \leq \alpha \leq 1$)

K_y = rigidez elástica inicial; y

D_m = desplazamiento máximo alcanzado en el paso anterior en cualquier dirección

Para el análisis del modelo trilineal degradante, se ha tomado el valor de $\alpha = 0.09$

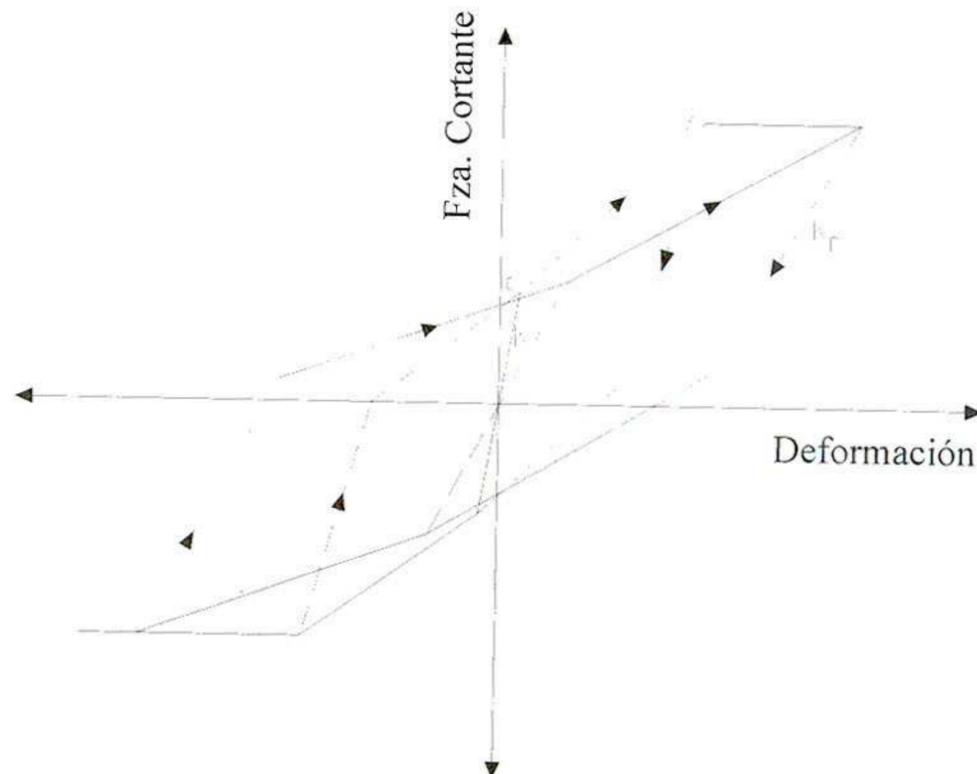


Figura N° 23. – Modelo Trilineal Degradante

En la figura N° 24 se comparan los resultados obtenidos experimentalmente y los del modelo trilineal degradante. Se puede apreciar la semejanza entre ambas curvas, demostrándose que un modelo simple puede simular el comportamiento de la estructura sin mayor esfuerzo.

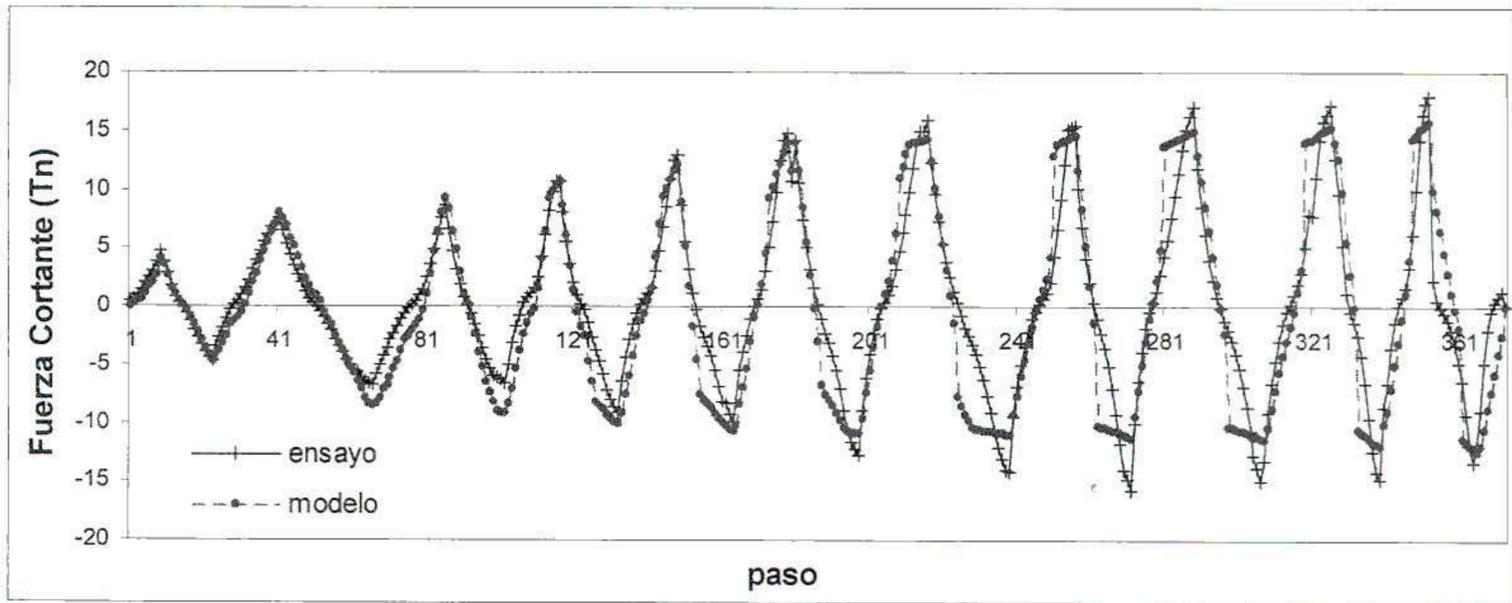


Figura N° 24. - Comparación de la variación de fuerza cortante para cada paso de ensayo, entre el ensayo experimental y el modelo analítico

CAPITULO VIII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La estrategia de diseño es seleccionar convenientemente los vínculos dúctiles capaces de disipar energía por comportamiento histerético, para asegurar que la estructura considerada como un todo se comporte en forma satisfactoria ante sismos fuertes excepcionales, es decir, sin llegar al colapso y poder así salvaguardar vidas humanas, que es la meta de todo diseño; para poder cumplir con este objetivo básico la edificación debe tener un comportamiento adecuado, lo que motivó a colocar una plancha de acero liviano en el muro de albañilería con la finalidad de servir como medio de disipación de energía en la estructura.

Las conclusiones y recomendaciones que envuelven la presente investigación son:

- El ensayo ha demostrado, que es posible incrementar la resistencia del muro de albañilería cuando se coloca un panel disipador. Si bien es cierto que el incremento de la resistencia es mínimo, se mejora el comportamiento cíclico.

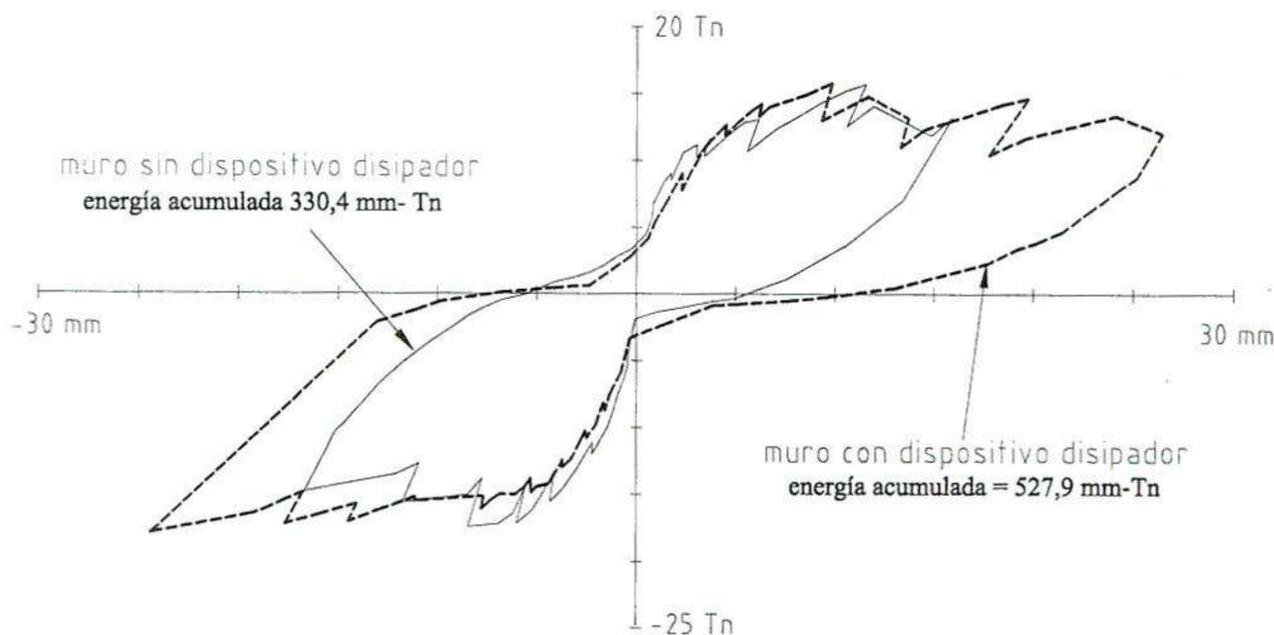


Figura N° 25. – Disipación de energía en ambos especímenes.

- El panel actúa como un dispositivo disipador de energía, lo cual se confirma en la figura N° 25 donde la energía es evaluada para los máximos ciclos en ambos

especímenes. El muro sin panel tiene una disipación de energía de 330,4 Ton – mm (3 240 Joules), sin embargo cuando el panel ocupa el lugar de la abertura, la energía acumulada se incrementa a 527,9 Ton - mm (5 175 Joules); lo que representa un incremento de 60% en la disipación de energía.

- El uso del programa de cómputo SAP90 sirvió para determinar la mejor ubicación de los perfiles de arriostre en el panel disipador, permitiendo encontrar una distribución de esfuerzos adecuados en el rango elástico presentes en el muro para pequeñas distorsiones.
- En la etapa de post agrietamiento diagonal, particularmente en la zona central del muro se observó que el tamaño de las grietas es importante, por lo que es aconsejable la colocación de refuerzo horizontal, el que hubiera reducido el tamaño de dichas grietas y poder así controlar mejor los daños.
- El patrón de agrietamiento observado en los muros muestra inicialmente un comportamiento por flexión con grietas horizontales en la parte inferior de las columnas de confinamiento; a medida que se incrementan las distorsiones aparecen las grietas diagonales en el muro y empiezan a propagarse y la rigidez en el muro sin dispositivo disipador decae drásticamente; sin embargo, la resistencia del muro con dispositivo disipador se mantiene aún para una distorsión mayor a 1/200.
- Los agrietamientos diagonales en el muro sin dispositivo disipador, empezaron para distorsiones pequeñas del orden de 1/800, lo que es corroborado por los ensayos realizados en muros de albañilería confinada; sin embargo, el muro con disipador experimentó su primera grieta diagonal a una distorsión de 1/434, lo que demuestra que el muro de albañilería con dispositivo disipador tiene una mayor capacidad de deformación.
- Para una distorsión angular de 1/200, la resistencia del muro sin disipador empieza a decrecer; sin embargo, cuando el muro tiene el dispositivo disipador la resistencia se mantiene.
- Es posible determinar analíticamente la rigidez lateral del muro en la fase inicial (antes de que ocurra la primera grieta), siendo necesario en primer lugar transformar la sección real en una equivalente de un solo material; esto se realiza bajo la premisa de que en la fase inicial, existirá una fuerte adherencia entre los diversos materiales que conforman el muro.

- Se ha visto que un modelo simple basado en la curva trilineal puede representar en forma aproximada la respuesta no lineal del muro, teniendo presente que los puntos de quiebre de la curva están dados por:
 - El límite elástico determinado por la primera grieta significativa del muro ($1/1800$ de ángulo de distorsión).
 - La resistencia de fluencia ($1/360$ de ángulo de distorsión) y
 - El estado último, cuando el tamaño de las grietas se torna incontrolable.
- El actual Código Peruano de Diseño Sismorresistente limita los desplazamientos relativos siendo más severo que muchos otros códigos, el límite de distorsión ha sido fijado en $1/200$; por eso, hasta que el muro no alcance este valor máximo deberá considerarse como un muro sísmicamente resistente. En ambos especímenes podemos observar que el principio es satisfecho; sin embargo, en el ensayo con cargas laterales para el muro sin panel la curva es decreciente, mientras que en el muro con dispositivo disipador la curva muestra un mejor comportamiento histerético y con ello un incremento de su capacidad de deformación inelástica y energía disipada.
- Este experimento es el primer ensayo en muros de albañilería con disipadores de energía y abre la posibilidad de mejorar el comportamiento estructural de materiales tradicionales como la albañilería usando paneles de acero liviano, los que son fáciles de construir y no representan mayor costo para la construcción y/o reparación de estructuras existentes.
- El muro pudo incrementar su resistencia en mayor porcentaje si el espesor de la plancha de acero hubiera sido mayor, teniendo presente siempre que este elemento es el responsable del comportamiento dúctil del sistema. Por tal motivo queda abierta la posibilidad de realizar a futuro otros ensayos de investigación y así poder perfeccionar el modelo propuesto de muros de albañilería con disipadores de energía, utilizando planchas de acero liviano.

BIBLIOGRAFIA

1. Abrams Daniel P.; Dempster Andrea. "Seismic Analysis of Masonry Buildings". SEWC. San Francisco California July 1998.
2. Andreus U. "Failure Criteria for Masonry Panels under in plane Loading". ASCE January 1996 Vol. 122 N°1
3. Bertero Vitelmo. "Lecciones aprendidas de terremotos catastróficos recientes y otras investigaciones". Primera conferencia Internacional Torroja 1989.
4. Casabone C. Gallegos H. "Conceptual Design of Low Rise Masonry Buildings in South America". SEWC. San Francisco California July 1998.
5. Chai H. Romstad M. Bird M. "Energy – Base Linear Damage Model por High – Intensity Seismic Loading". ASCE. May 1995
6. Chariarse V. Cuadra C., Zavala A. "Técnica para Ensayos a Escala Natural en el Laboratorio de Estructuras del CISMID-FIC-UNI". Memorias del VIII Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Piura 1990.
7. Dinehart David W., Shenton III Harry W. "Comparison of the Response of Timber Shear Walls with an without Passive Dampers". SEWC. San Francisco California July 1998.
8. Drysdale Robert G., Hamid Ahmad A., Baker Lawrie R.. "Masonry Structures Behavior and Design". Prentice-Hall. 1994.
9. Echevarría G. San Bartolomé A. "Ensayos de carga lateral de muros de albañilería confinada- Efectos de la Carga vertical". Memorias del VI Congreso de Ingeniería Civil, CIP. Cajamarca 1986.
10. Griffith C. Page W. "Seismic Design of Connections in Unreinforced Masonry Buildings". SEWC. San Francisco California July 1998.
11. Hall W. "Structural Engineering Issues at Year 1998 Research and Education as Related to Practice". SEWC. San Francisco California July 1998.
12. Hamilton III R. Dolan W. " Strengthening Unreinforced Masonry with FRP". SEWC. San Francisco California July 1998.
13. Ian D. Aiken, "Testing of Seismic Isolators and Dampers – Considerations and Limitations". SEWC. San Francisco California July 1998.
14. ININVI, "Norma de edificación E070 – Albañilería", Lima 1982.

15. James, Amrhein, "Reinforced Masonry Engineering Handbook". Published by Masonry Institute of America. Third Edition, 1978.
16. Klingner Richard E. "Developments in Design of Masonry Structures for Seismic Zones". SEWC. San Francisco California July 1998.
17. La Mendola L. "Influence of Nonlinear Constitutive Law on Masonry Pier Stability". ASCE. October 1997.
18. La Mendola L. Papia M. Zingone G. "Stability of Masonry Walls Subjected to Seismic Transverse Forces" ASCE. November 1995.
19. Linde Peter, "Numerical Modelling and Capacity Design of Earthquake-Resistant Reinforced Concrete Walls," Institut für Baustatik und Konstruktion Eidgenössische Technische Hochschule (ETC), Zurich 1993.
20. Mardam A., and Reinham A.M., "Modeling of Masonry infilled Panels for structural Analysis". Journal of ASCE, October 1997.
21. Martijena E. San Bartolomé A. "Efectos del peralte del dintel sobre el comportamiento sísmico y de un pórtico mixto de albañilería confinada de dos pisos". Seminario de Análisis y Diseño de Construcción de Albañilería. CISMID – Setiembre - 1972
22. Masayoshi Nakashima, Takashi Akasawa and Bunzo Tsuji. " Strain – Hardening Behavior of Shear panels made of low – yields steel". II: Model. ASCE. Dec. 1995. Vol 121 N°12.
23. Masayoshi Nakashima. "Strain – Hardening Behavior of Shear panels made of low – yields steel". I: Test. ASCE. Dec. 1995. Vol 121 N°12.
24. Maurice W. White and Daniel Dolan "Nonlinear Shear – Wall Analysis". ASCE. November 1995.
25. Miha Tomazevic and Iztok Klemenc, "Seismic Resistance Analysis of Confined Masonry Walls and Buildings". Proceeding of Structural Engineers World Congress, San Francisco California July 1998.
26. Minoru Wakabayashi, "Design of Earthquake – Resistant Buildings", McGraw-Hill Book Company, 1986.
27. Miranda Eduardo, "Control de la Respuesta Sísmica con Dispositivos de Disipación Pasiva de Energía".
28. Miranda Julio C.. "Seismic Protection of Buildings with Passive Tuned Mass Dampers". SEWC. San Francisco California July 1998.

29. Mitsuo Sakamoto and Takuji Kobori. "Research, development and practical applications on structural response control of buildings".
30. Nakashima M, Akawa T and Tsuji B. "Strain-Hardening Behavior of Shear Panels made of low-yield steel II. Model". ASCE, Dec 1995, Vol. 121 N° 12.
31. Norma Técnica de Edificación E030 – Diseño Sismorresistente. Octubre 1997.
32. OTANI, S. "Hysteresis Models of Reinforced Concrete for Earthquake Response Analysis". Journal of the faculty engineering, the University of Tokyo. Vol. XXXVI, N°2 (1981).
33. Page W. "Masonry Research for the 21st Century an Astrulian Perspective". SEWC. San Francisco California July 1998.
34. Paulay, M.J.N. Priestley, "Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Building", A Wiley Interscience Publication, 1992.
35. Piqué J. "Sismo de Nasca de 12 de noviembre de 1996". El Ingeniero Civil. N° 107 y 108 Marzo – junio 1997.
36. Rojas V. "Analytical Study of Behavior of Confined Masonry Structures under Lateral Loads", JICA-Training Report Dpt. Of Architecture Faculty of Engineering, Chiba University Dec. 1994.
37. Rosenblueth Emilio, "Design of Earthquake resistant structures". Pentech Press Ltd. 1980
38. Saif M. Hussain, Martin W. Johnson. "Protective Systems in Seismic Design". SEWC. San Francisco California July 1998.
39. San Bartolomé Angel, "Albañilería confinada". Libro N° 4. Colección del Ingeniero Civil. CIP. Lima, 1991.
40. San Bartolomé Angel, "Construcciones de Albañilería – Comportamiento Sísmico y Diseño Estructural". PUCP, 1994.
41. Saneinejad A. and Hobbs B. Inelastic Design of Infilled Frames, Journal of Structural Engineering of ASCE, April 1995, Vol. 121 N.4.
42. Schultz A.E, Hutchinson R.S and Cheok G.C "Seismic Performance of Masonry Walls with bed Joint Reinforcement". SEWC. San Francisco California July 1998.
43. Seismic Isolation and Response Control for Nuclear and Non – Nuclear Structures. Special Issue for the Exhibition on the 11th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMIRT 11), August 18-23, 1991, Tokyo, Japan.
44. Shaw G. Caine J. "UK Developments in Structural Masonry and Related Research Needs for the 21st Century". SEWC. San Francisco California July 1998.

45. Soong T.; Reinhorn A.; Nielsen E.; Crosby P.; Nickerson H. "Seismic Upgrade of a Reinforced Concrete Building Using Viscoelastic Dampers". Structural Engineering World Wide Congress, San Francisco California July 1998.
46. Suter G.T. "Bond is Critical". SEWC. San Francisco California July 1998.
47. Tamura Y.; Kijewski T.; Kareem A. "Overview of Methods to Mitigate the Response of Wind-Sensitive Structures". Paper T179-1, (1998)
48. Vazquez Chicata, "Análisis y Diseño Inelástico de Estructuras Aperticadas", ACI-capítulo peruano – N° 17, diciembre 1992.
49. Wang R. Elwi E. Hatzinikolas A. "Numerical Study of Tall Masonry Cavity Walls Subjected to Eccentric loads". ASCE. October 1997
50. Zavala, C., Gallardo J., et al, "Aseismic Masonry Building Model for Urban Areas". Proceedings of Structural Engineers Words Congress, San Francisco California July 1998.