

# 1

## INTRODUCCION

### 1.1 OBJETIVOS

El objetivo principal del libro es que el lector adquiera los conocimientos suficientes que le permitan analizar, diseñar y construir edificaciones de mediana altura (de hasta 5 pisos) hechas de albañilería estructural. Para alcanzar estos conocimientos, es necesario estudiar el comportamiento de las edificaciones de albañilería ante los terremotos ocurridos en el pasado, así como la influencia de diversos parámetros que han sido investigados a nivel experimental. Los resultados de estos estudios han permitido plantear recomendaciones en los aspectos de la construcción y del diseño estructural, principalmente para lograr un adecuado comportamiento sísmico en este tipo de estructuras.

Por lo expuesto, este libro ha sido preparado de tal manera que primero el lector tenga una concepción global de los sistemas de albañilería (Capítulo 1); para esto, se estudiará los procedimientos de construcción (Capítulo 2) y el comportamiento sísmico de estas edificaciones (Capítulo 3), así como los procedimientos vigentes de análisis (Capítulo 4) y diseño estructural (Capítulo 5), para luego entrar a ver los detalles sobre los componentes de la albañilería (Capítulo 6), analizando los resultados de los ensayos respectivos (Capítulo 7), los que finalmente han permitido plantear nuevos métodos de diseño estructural (Capítulo 8).

*A manera de referencia para los profesores universitarios que enseñan esta materia, cabe mencionar que cuando dicté el curso de "Albañilería Estructural" en la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), los conocimientos vertidos en este libro fueron complementados mediante prácticas continuadas, tipo taller, resueltas en grupos compuestos por varios alumnos.*

*En dichas prácticas, se analizó, diseñó y se trazaron los planos estructurales de un edificio de albañilería. Todos los grupos resolvieron el mismo edificio, pero bajo diferentes características, estudiándose: varias formas de techado (losas macizas y aligeradas, armadas en una o dos direcciones) y de cimentación (concreto ciclópeo y concreto armado); el efecto del peralte de las vigas coplanares con los muros; varios tipos de albañilería (armada y confinada); variaciones en el análisis estructural (aproximado y computacional, base empotrada y flexible, distribución uniforme y triangular de las fuerzas de inercia); y, diferentes técnicas de diseño (por esfuerzos admisibles y por capacidad resistente a la rotura). Esto permitió analizar el efecto de diversos parámetros sobre el edificio en estudio, discutiéndose el trabajo final entre todos los alumnos en una especie de sustentación. Adicionalmente, estas prácticas teóricas fueron complementadas realizando visitas a laboratorios de estructuras, fábricas ladrilleras y edificaciones de albañilería en construcción.*

## 1.2 BREVE HISTORIA DE LA ALBAÑILERÍA

Una buena recopilación histórica sobre la albañilería, acompañada de gráficos y datos cronológicos, se muestra en la Ref. 1; en este libro sólo se resaltarán los aspectos históricos más importantes.

La **Albañilería o Mampostería** se define como un conjunto de unidades trabadas o adheridas entre sí con algún material, como el mortero de barro o de cemento. Las unidades pueden ser naturales (piedras) o artificiales (adobe, tapias, ladrillos y bloques). Este sistema fue creado por el hombre a fin de satisfacer sus necesidades, principalmente de vivienda.

Bajo la definición indicada en el párrafo anterior, se llega la conclusión de que la albañilería existió desde tiempos prehistóricos y que su forma inicial podría haber sido los muros hechos con piedras naturales trabadas o adheridas con barro, lo que actualmente en nuestro medio se denomina "*pirca*".

La **primera unidad de albañilería artificial** consistió de una masa amorfa de barro secada al sol; vestigios de esta unidad han sido encontrados en las ruinas de Jericó (Medio Oriente), 7350 años a.C. Es interesante destacar que antiguamente las unidades no tenían una forma lógica, llegándose a encontrar unidades de forma cónica en lugares y épocas distintas: en la Mesopotamia (7000 años de antigüedad) y en Huaca Prieta, Perú (5000 años de antigüedad).

El **molde** empleado para la elaboración de las unidades artificiales de tierra, lo que hoy denominamos "*adobe*", fue creado en Sumeria (región ubicada en el Valle del Eufrates y Tigris, en la Baja Mesopotamia) hacia los 4000 años a.C. A raíz de aquel acontecimiento, empezaron a masificarse las construcciones de albañilería en las primeras civilizaciones.

El adobe fue llevado al horno unos 3000 años a.C. en la ciudad de Ur, tercera ciudad más antigua del mundo (después de Eridú y Uruk, pertenecientes a la cultura Sumeria), formándose lo que actualmente se denomina el **ladrillo de arcilla o cerámico**. A partir de aquel entonces se levantaron enormes construcciones de ladrillos asentados con betún o alquitrán, como la Torre de Babel ("Etemenanki", zigurat de 8 pisos); y en la época del Rey Nabucodonosor II (Babilonia, 600 a.C.), se construyeron edificios de hasta 4 pisos. Fue en Babilonia que el Rey Hammurabi (1700 a.C.) crea el **primer reglamento de construcción**, donde se especificaba que si por causas atribuibles al constructor fallecía el propietario de una vivienda, se debía dar muerte al constructor de la misma.

Por aquellas épocas, pero en otras civilizaciones, se efectuaban construcciones de albañilería aprovechando la materia prima existente en la zona. Por ejemplo, en Egipto se asentaba rocas con mortero de yeso y arena (como las pirámides de Giza, con unos 4000 años de antigüedad); mientras que en Grecia se usaba piedras asentadas con mortero de cal y revestidas con mármol (como el templo a la diosa Atenea, "*Partenón*", 440 a.C.).

El **mortero de cemento puzolánico** fue inventado por Vitruvio (Arquitecto Romano, 25 a.C.). Para esto, Vitruvio mezcló con cal y agua a la "arena volcánica" del Vesubio (actualmente denominada "puzolana"). Fue a partir de aquel entonces que hubo una gran innovación en las formas estructurales, construyéndose enormes estructuras con arcos, bóvedas y lucernarios, tal como el "*Panteón*" en Roma.

Después de la caída del Imperio Romano, el mortero puzolánico pasó al olvido, hasta que Smeaton (Ingeniero británico) lo rescató en el año de 1756 para reconstruir un faro en Inglaterra.

En el siglo XVIII, en conjunto con la Revolución Industrial (que comenzó en Inglaterra), empezó la industrialización en la fabricación de ladrillos, inventándose máquinas como trituradoras, mezcladoras y prensas para moldear mecánicamente al ladrillo; aunque, según se dice, se empleaba 2 kg de carbón para hornear 1 kg de arcilla.

En cuanto al Perú, los ladrillos de arcilla llegaron en la época de la colonia española, y la primera fábrica de ladrillos fue construida en Lima en el año de 1856.

La **primera obra de albañilería reforzada** data del año 1825. Brunel (Ingeniero británico), construyó 2 accesos verticales a un túnel bajo el río Támesis (Londres), de 15 m de diámetro y 20 m de profundidad, con paredes hechas de albañilería de 75 cm de espesor, reforzadas verticalmente con pernos de hierro forjado y horizontalmente con zunchos metálicos.

Mas bien, la **albañilería confinada** fue creada por ingenieros italianos (Ref.9), después que el sismo de 1908 en Sicilia arrasara con las viviendas de albañilería no reforzadas. En el Perú, la albañilería confinada ingresa después del terremoto de 1940; mientras que la armada lo hace en la década del 60, pese a que ésta se había creado antes.

*Un hecho curioso fue el que me ocurrió cuando estaba trabajando en el reforzamiento de una vivienda muy antigua, carente de planos, en La Punta (Callao); en esa vivienda se encontró un retazo de periódico del año 1940, que había sido utilizado para taponar el encofrado del aligerado. Esa vivienda tenía en sus esquinas columnas de concreto ciclópeo con piedras medianas (el concreto que actualmente se usa en los sobrecimientos) y refuerzo vertical liso corroído por la brisa marina. Hasta ese instante se pensaba que la albañilería confinada había sido introducida en el Perú en la década de los 50, mas esa vivienda demostró que tal hecho había ocurrido antes.*

Cerrando la historia, indicaremos que el estudio racional de la albañilería se inició recién a partir de los **ensayos** llevados a cabo en los Estados Unidos (1913) y en la India (1920). En el Perú, los primeros ensayos sobre elementos de albañilería se realizaron en la década de los 70 y los escasos resultados alcanzados hasta el año de 1982, fueron utilizados para la elaboración de nuestro primer reglamento relativo específicamente a la albañilería (Norma E-070, ININVI-82); a la fecha continúan las investigaciones.

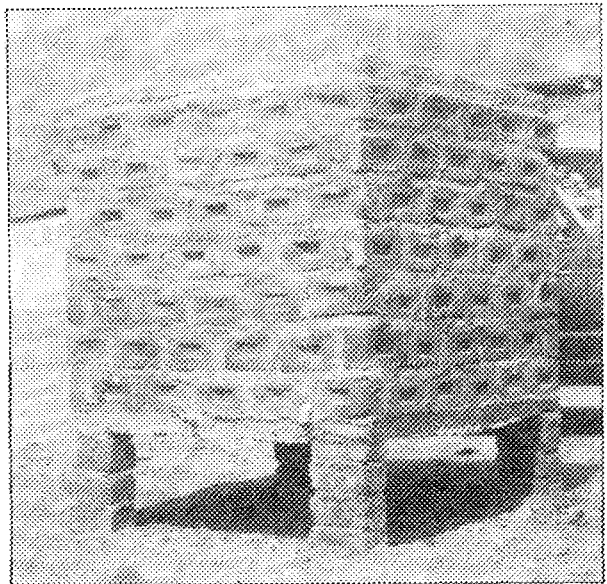
Debe hacerse notar que a diferencia de otros materiales (como el acero y el concreto armado) la adaptación de normas de diseño extranjeras resultan inaplicables al caso de la albañilería peruana; esto se debe a la enorme diferencia que se presenta en los materiales de construcción, así como en la mano de obra y las técnicas de construcción empleadas en otros países. Sin embargo, se utilizará como referencia adicional el Reglamento Mexicano de Mampostería (Ref. 16), debido a nuestra similitud en materiales, proceso constructivo y porque los mexicanos cuentan con el respaldo de una gran cantidad de ensayos.

### 1.3 CONSTRUCCION DE ALBAÑILERIA y ALBAÑILERA ESTRUCTURAL

**Construcción de Albañilería.**- Para los fines de este libro, se definirá por construcción de albañilería a todo aquel sistema donde se ha empleado básicamente elementos de albañilería (muros, vigas, pilastras, etc.). Estos elementos a su vez están compuestos por unidades de arcilla, sílice-cal o de concreto, adheridas con mortero de cemento o concreto fluido ("*grout*"). La albañilería con unidades de tierra cruda (adobe, tapial) o de piedra natural, no serán estudiadas en este libro; sin embargo, se hará alguna mención a ellas puesto que en el Perú son ampliamente utilizadas.

Fig. 1.1

*Ejemplo del mal uso de la albañilería: tanque de agua hecho de albañilería no reforzada, apoyado sobre pilas de mampostería.*



Estas construcciones pueden tener diversos fines, como por ejemplo: viviendas, tanques de agua (Fig. 1.1), muros de contención, etc. Sin embargo, debe indicarse que nuestra Norma y las investigaciones actuales están dirigidas principalmente a resolver el problema de la vivienda; en consecuencia, para construcciones distintas a los edificios, las disposiciones de la Norma se aplicarán en la medida que sea posible.

**Albañilería Estructural.**- Son las construcciones de albañilería que han sido diseñadas racionalmente, de tal manera que las cargas actuantes durante su vida útil se transmitan adecuadamente a través de los elementos de albañilería (convenientemente reforzados) hasta el suelo de cimentación.

En cuanto a los **edificios**, el sistema estructural de albañilería debería emplearse sólo cuando estas edificaciones contengan una abundancia de muros; por ejemplo: en las viviendas uni y multifamiliares, los hoteles, etc. Esto no quiere decir que toda la estructura deba ser de albañilería, sino que pueden existir columnas aisladas de cualquier otro material que ayuden a los muros a transmitir la carga vertical, incluso podrían existir placas de concreto armado que en conjunto con la albañilería tomen la fuerza sísmica; sin embargo, el sistema estructural predominante estará conformado por los muros de albañilería.

#### 1.4 TIPOS DE ALBAÑILERIA y ESPECIFICACIONES REGLAMENTARIAS

La albañilería se clasifica de dos maneras:

A.- Por la Función Estructural (o Solicitaciones Actuantes).

B.- Por la Distribución del Refuerzo.

##### A.- Clasificación por la Función Estructural

Los Muros se clasifican en Portantes y No Portantes.

Los **Muros No Portantes** son los que no reciben carga vertical, como por ejemplo: los cercos, los parapetos y los tabiques. Estos muros deben diseñarse básicamente ante cargas perpendiculares a su plano, originadas por el viento, sismo u otras cargas de empuje; según se indica en el Anexo A.4.

Mientras que los cercos son empleados como elementos de cierre en los linderos de una edificación (o de un terreno), los tabiques son utilizados como elementos divisorios de ambientes en los edificios; en tanto que los parapetos son usados como barandas de escaleras, cerramientos de azoteas, etc.

En nuestro medio, los **tabiques** son generalmente hechos de albañilería, esto se debe a las buenas propiedades térmicas, acústicas e incombustibles de la albañilería. Por lo general, en estos elementos se emplea mortero de baja calidad y ladrillos tubulares (perforaciones paralelas a la cara de asentado) denominados "*pandereta*", cuya finalidad es aligerar el peso del edificio, con el consiguiente decrecimiento de las fuerzas sísmicas. Sin embargo, si los tabiques no han sido cuidadosamente aislados de la estructura principal, haciéndolos "*flotantes*", se producirá la interacción tabique-estructura en el plano del pórtico (Fig. 1.11), problema que se estudiará más adelante y también en el Acápite 4.6.

Los **Muros Portantes** son los que se emplean como elementos estructurales de un edificio. Estos muros están sujetos a todo tipo de sollicitación, tanto contenida en su plano como perpendicular a su plano, tanto vertical como lateral y tanto permanente como eventual.

## B.- Clasificación por la Distribución del Refuerzo

De acuerdo a la distribución del refuerzo, los muros se clasifican en:

- a.- Muros No Reforzados o de Albañilería Simple.
- b.- Muros Reforzados (Armados, Laminares y Confinados).

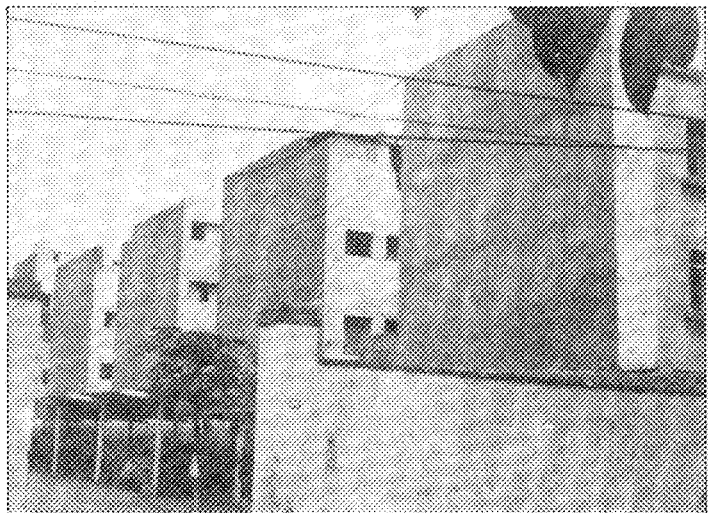
### a.- Muros No Reforzados o de Albañilería Simple

Son aquellos muros que carecen de refuerzo; o que teniéndolo, no cumplen con las especificaciones mínimas reglamentarias que debe tener todo muro reforzado.

De acuerdo a la Norma E-070, su uso está limitado a construcciones de un piso; sin embargo, en Lima existen muchos edificios antiguos de albañilería no reforzada, incluso de 5 pisos, pero ubicados sobre suelos de buena calidad y con una alta densidad de muros en sus dos direcciones, razones por las cuales estos sistemas se comportaron elásticamente (sin ningún tipo de daño, Fig. 1.2) ante los terremotos ocurridos en los años de 1966, 1970 y 1974.

Fig. 1.2

*Edificio de albañilería no reforzada analizado por R. Cestti en su tesis de investigación.*



Uno de esos edificios limeños (de 4 pisos, Fig. 1.2) fue estudiado por el Ing. Rafael Cestti, en su tesis de investigación (PUCP-1992). Cestti, llegó a demostrar (mediante un programa de análisis dinámico paso a paso "TODA") que ante las acciones de los terremotos del 66, 70 y 74, el edificio se comportaba elásticamente, debido no sólo a su alta resistencia, sino también por su elevada rigidez lateral otorgada por los muros y el alféizar de las ventanas; sin embargo, ante la acción de sismos más severos, la estructura era insegura y podía colapsar.

El **espesor efectivo** del muro (Fig. 1.3) se define como su espesor bruto descontando los acabados (por el posible desprendimiento del tarrajeo producto de las vibraciones sísmicas, Fig. 3.3), las bruñas u otras indentaciones. De acuerdo a la Norma E-070, el espesor efectivo mínimo a emplear en los muros no reforzados debe ser:  $t = h / 20$ , donde "h" es la altura libre de piso a techo, o altura de pandeo. Esta fórmula proviene de considerar posibles problemas de pandeo cuando los muros esbeltos se ven sujetos a cargas perpendiculares a su plano, o a cargas verticales excéntricas.

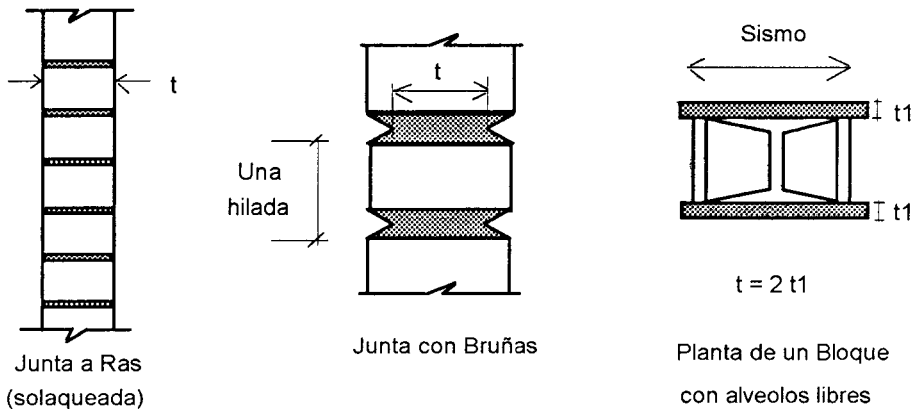


Fig. 1.3. Espesor Efectivo de un muro: "t"

Aunque la Norma E-070 no lo indique, es preferible que estos sistemas no reforzados estén ubicados sobre suelos de buena calidad, ya que la albañilería es muy frágil ante los asentamientos diferenciales.

En realidad la resistencia al corte (VR en la Fig. 1.4) y la rigidez en el plano de los muros no reforzados son comparables con las correspondientes a los muros reforzados; pero debido al carácter de falla frágil que tienen los muros no reforzados (por no existir refuerzo que controle el tamaño de las grietas), la Norma adopta factores de seguridad para los muros no reforzados iguales al doble de los correspondientes a los reforzados (ver la deducción del factor de seguridad para el diseño por fuerza cortante en el Anexo A.2).

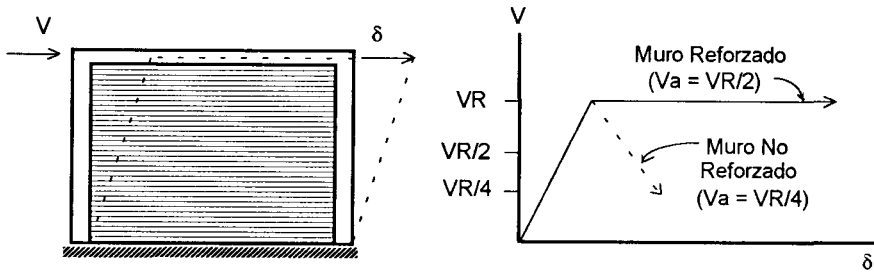


Fig. 1.4. Fuerza cortante admisible " $V_a$ "

## b.- Muros Reforzados

De acuerdo con la disposición del refuerzo, los muros se clasifican en:

b.1.- Muros Armados

b.2.- Muros Laminares ("Sandwich")

b.3.- Muros Confinados

Según la Norma E-070, en todo muro reforzado puede emplearse un espesor efectivo igual a:  $t = h / 26$  (para una altura libre  $h = 2.4$  m, se obtendría  $t = 9$  cm); sin embargo, en las Refs. 1 y 2 se recomienda la adopción de un espesor efectivo mínimo igual a:  $h / 20$ , a fin de evitar problemas de excentricidades accidentales por la falta de verticalidad del muro y para facilitar la colocación del refuerzo vertical y horizontal.

### b.1.- Muros Armados

Los Muros Armados se caracterizan por llevar el refuerzo en el interior de la albañilería. Este refuerzo está generalmente distribuido a lo largo de la altura del muro (refuerzo horizontal) como de su longitud (refuerzo vertical).

Estos muros requieren de la fabricación de unidades especiales, con alveolos donde se pueda colocar el refuerzo vertical; en tanto que dependiendo del diámetro del refuerzo horizontal, éste se coloca en los canales de la unidad (cuando el diámetro es mayor de  $1/4"$ , Fig. 1.5), o en la junta horizontal (cuando el diámetro es menor o igual a  $1/4"$ , Figs. 2.18 y 2.22). El diámetro del refuerzo horizontal depende de la magnitud de la fuerza cortante que tiene que ser soportada íntegramente por el acero.



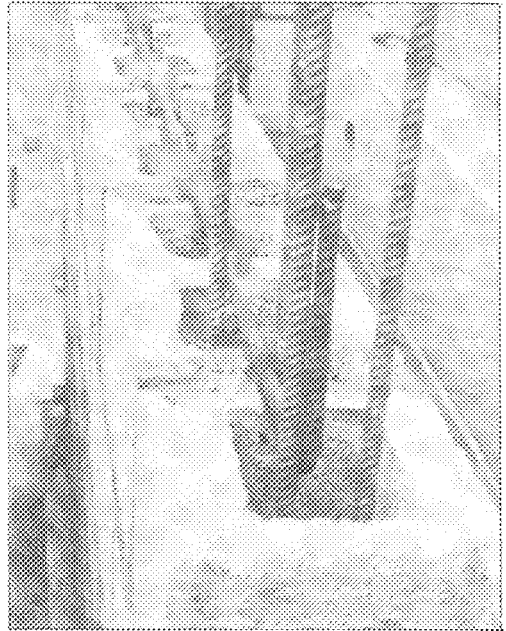
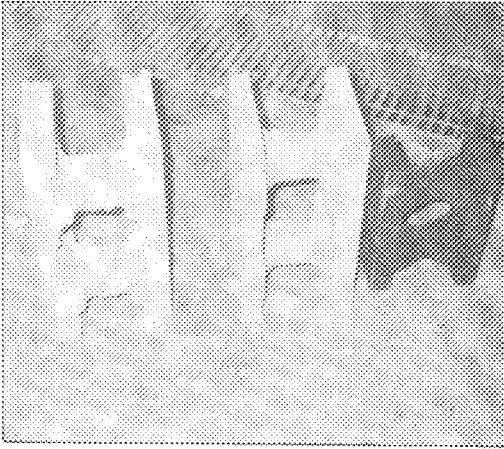


Fig. 1.5

*Bloques de concreto vibrado y de arcilla para muros armados. A la derecha se aprecia la disposición del refuerzo en un muro armado.*

De acuerdo a la Norma E-070, todo muro armado debe satisfacer los siguientes requisitos mínimos (Fig. 1.6):

- a) El recubrimiento de la armadura debe ser mayor que 1.5 veces el diámetro de la barra, y no debe ser menor de 10 mm.
- b) El espesor del mortero en las juntas horizontales no debe ser menor al diámetro de la barra horizontal (alojada en la junta) más 6 mm.
- c) El diámetro, o dimensión mínima, de los alveolos debe ser 5 cm por cada barra vertical, o 4 veces el diámetro de la barra por el número de barras alojadas en el alveolo.
- d) La cuantía mínima del refuerzo total debe ser 0.0015; no menos de 2/3 del refuerzo total debe repartirse horizontalmente. Esto es:  $p_h (\text{mín}) = 0.001 = A_s / (s t)$ . Por ejemplo, para un muro de espesor  $t = 14$  cm y empleando  $1 \phi \frac{1}{4}$ " ( $A_s = 0.32 \text{ cm}^2$ ), el espaciamiento máximo resulta  $s = 0.32 / (0.001 \times 14) = 22$  cm. Lo que equivale a:  $1 \phi \frac{1}{4}$ " @ 2 hiladas, cuando se emplee unidades silico-calcárea (Fig. 2.18); o,  $2 \phi \frac{1}{4}$ " @ 2 hiladas en escalerilla electrosoldada (Fig. 2.22), cuando se use bloques de concreto con 19 cm de altura.
- e) En todos los bordes del muro y en las intersecciones de los muros ortogonales, debe colocarse el refuerzo especificado en la TABLA 3 de la Norma. Además, en los bordes de toda abertura que exceda los 60 cm se colocará  $2 \phi \frac{3}{8}$ ", o su equivalente  $1 \phi \frac{1}{2}$ ".

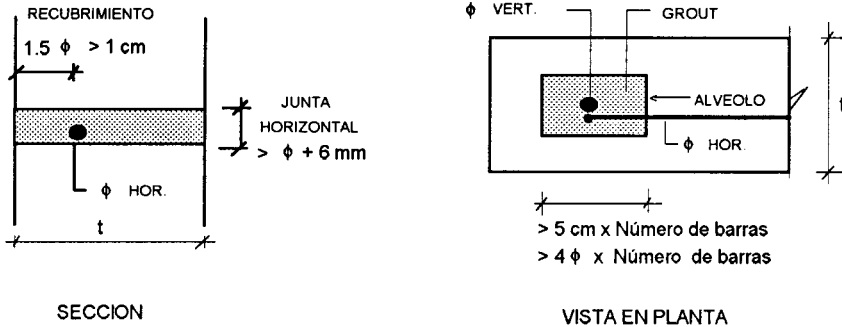


Fig. 1.6. Recubrimientos y dimensiones mínimas de los alveolos.

Algunos aspectos interesantes de la Norma Mexicana (Ref. 16) relacionados con el refuerzo de los muros armados, que no están especificados por la Norma E-070, son:

- El refuerzo horizontal debe ser continuo en toda la longitud del muro y anclado en sus extremos.
- El espaciamiento máximo del refuerzo, vertical u horizontal, debe ser 90 cm o 6 veces el espesor del muro.
- Por lo menos en cada extremo del muro, cada 3 metros y en las intersecciones ortogonales de los muros, debe colocarse  $1 \phi 3/8"$  en 2 alveolos consecutivos (una barra en cada alveolo).
- La cuantía total de refuerzo ( $p_v + p_h$ ) debe ser como mínimo 0.002 (en nuestro caso es 0.0015) y ninguna de las 2 cuantías debe ser menor a 0.0007 (en nuestro caso  $p_v \text{ min} = 0.0005$ ).

Debe hacerse notar que esas **cuantías mínimas** (0.002 y 0.0007) no sólo las señala la Norma Mexicana, sino también la Norteamericana, la Chilena y la de Nueva Zelandia; adicionalmente, en estas normas se especifica llenar todos los alveolos (contengan o no refuerzo vertical) con grout de resistencia mínima  $f_c = 140 \text{ kg/cm}^2$ , y utilizar como **longitud de traslape** 60 veces el diámetro de la barra. Existiendo mayor experiencia sobre muros armados en el extranjero, se recomienda tomar 0.001 como cuantía mínima de refuerzo horizontal o vertical, llenando con grout todos los alveolos de los bloques, en previsión de fallas frágiles por concentración de esfuerzos de compresión que se generan en los bloques vacíos.

En cuanto al **Concreto o Mortero Fluido ("Grout")** a vaciar en los alveolos, su consistencia debe ser similar a la de una sopa espesa de sémola, con un revenimiento (slump) comprendido entre 8 y 11 pulgadas (Fig. 1.7). La intención de emplear este gran revenimiento es que el concreto pueda circular y llenar todos los intersticios del muro, para de este modo favorecer la integración entre el refuerzo y la albañilería.

Fig. 1.7

Revenimiento del mortero fluido (grout).



Dependiendo del tamaño que tengan los alveolos de la unidad, el grout a emplear clasifica en: **1) mortero fluido**, usado cuando los huecos son pequeños, por ejemplo, el ladrillo sílico-calcáreo tiene alveolos de 5 cm (Figs. 2.18 y 6.18); y, **2) concreto fluido**, utilizado cuando los huecos son grandes, por ejemplo, los bloques de concreto vibrado con 19 cm de espesor tienen alveolos de 12x13 cm (Fig. 1.5). La diferencia entre el concreto fluido y el mortero fluido está en los agregados; mientras que en el concreto fluido se emplea confitillo de 3/8" (comercializado como piedra de 1/4") más arena gruesa, en el mortero fluido el agregado es sólo arena gruesa. En el Capítulo 6 se detallará las características del grout.

Una variedad de los muros armados son los muros de **Junta Seca o Apilables**, éstos son muros que no requieren el uso de mortero en las juntas verticales u horizontales. Esta variedad de muros armados será vista en el Capítulo 2.

### b.2.- Muro Laminar ("Sandwich")

Este muro (Fig. 1.8) está constituido por una placa delgada de concreto (dependiendo del espesor, 1 a 4 pulgadas, se usa grout o concreto normal) reforzado con una malla de acero central, y por 2 muros de albañilería simple que sirven como encofrados de la placa.

Debido a la adherencia que se genera entre el concreto y los muros de albañilería, así como por el refuerzo transversal que se emplea para la conexión de los dos muros, se logra una integración de todo el sistema. Sin embargo, en la única investigación experimental realizada en el Perú por el Ing. H. Gallegos, utilizando ladrillos sílico-calcáreos, se observó un buen comportamiento elástico del muro laminar, con una elevada rigidez lateral y resistencia al corte; pero después de producirse el agrietamiento diagonal de la placa, ocurrió una fuerte degradación de resistencia y rigidez (falla frágil), debido principalmente a que los muros de albañilería se separaron de la placa, "soplándose".

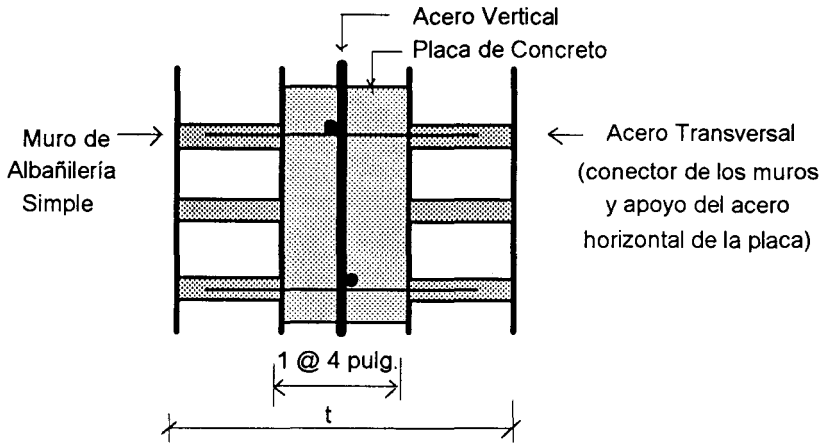


Fig. 1.8. Sección transversal de un muro laminar.

A la fecha, con este sistema no se ha construido ningún edificio en el Perú; es más, nuestro reglamento no contempla este tipo de estructura, por lo que no lo estudiaremos en este libro. Sin embargo, debe mencionarse que en zonas sísmicas de los Estados Unidos (California) se ha empleado estos sistemas para construir edificios de hasta 20 pisos.

### b.3.- Albañilería Confinada

Este es el sistema que tradicionalmente se emplea en casi toda Latinoamérica para la construcción de edificios de hasta 5 pisos (Fig. 1.9).

La Albañilería Confinada se caracteriza por estar constituida por un muro de albañilería simple enmarcado por una cadena de concreto armado, vaciada con posterioridad a la construcción del muro. Generalmente, se emplea una conexión dentada entre la albañilería y las columnas; esta conexión es más bien una tradición peruana, puesto que en Chile se utiliza una conexión prácticamente a ras (Fig. 1.10) que tuvo un buen comportamiento en el terremoto de 1985.

El pórtico de concreto armado, que rodea al muro, sirve principalmente para ductilizar al sistema; esto es, para otorgarle capacidad de deformación inelástica, incrementando muy levemente su resistencia, por el hecho de que la viga ("solera", "viga collar", "collarín" o "viga ciega") y las columnas son elementos de dimensiones pequeñas y con escaso refuerzo. Adicionalmente, el pórtico funciona como elemento de arrioste cuando la albañilería se ve sujeta a acciones perpendiculares a su plano.

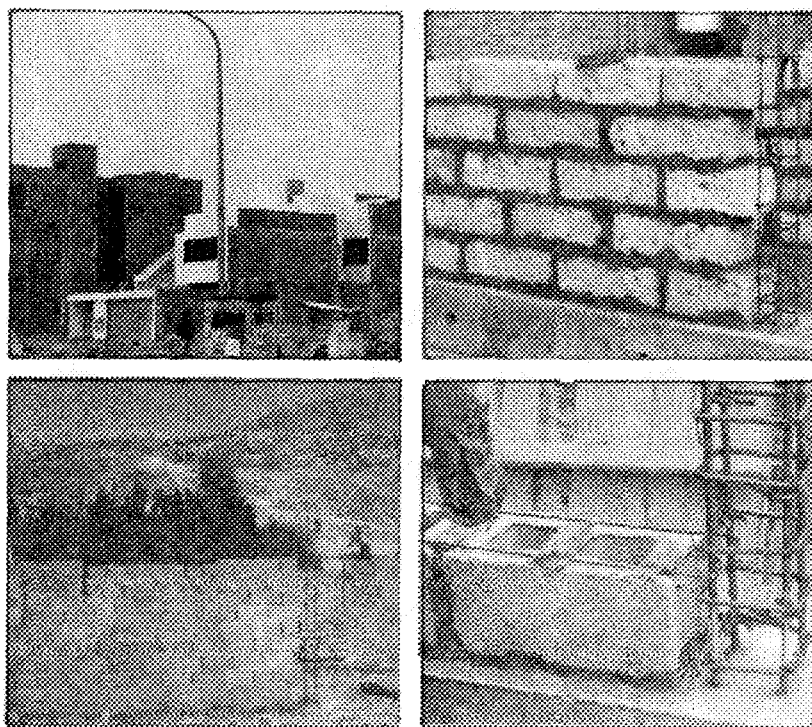
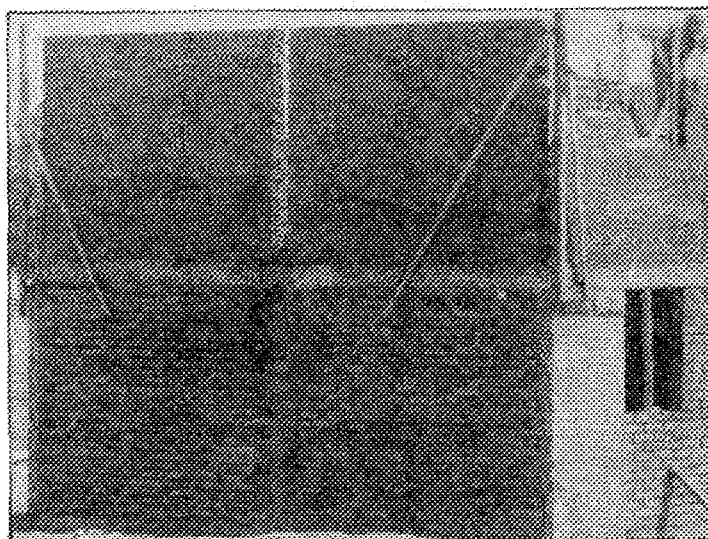


Fig. 1.9. Variedad de muros confinados con unidades de arcilla, bloques de sillar y de concreto.

Fig. 1.10

*Vivienda Chilena  
con junta prácticamente  
a ras  
entre la albañilería y la co-  
lumna (Ref. 8).*



La acción de confinamiento que proporciona el pórtico de concreto puede interpretarse físicamente mediante el ejemplo siguiente:

*Supóngase un camión sin barandas, que transporta cajones montados unos sobre otros. Si el camión acelera bruscamente, es posible que los cajones salgan desperdigados hacia atrás por efecto de las fuerzas de inercia, lo que no ocurriría si el camión tuviese barandas.*

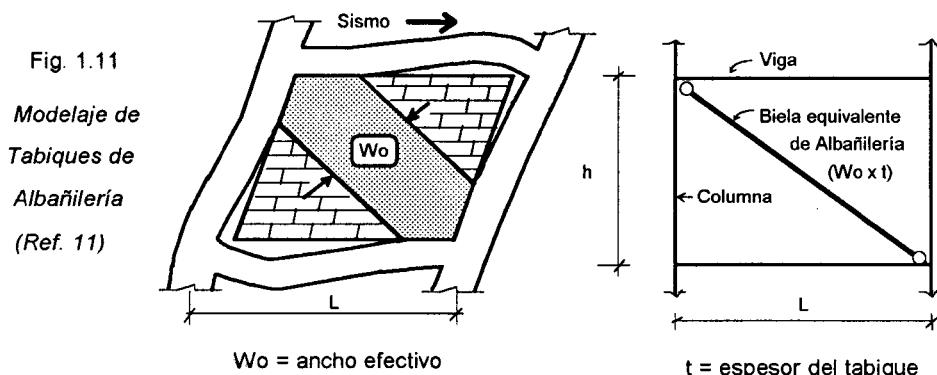
Haciendo una semejanza entre ese ejemplo y la albañilería confinada sujeta a terremotos, la aceleración del camión correspondería a la aceleración sísmica, los cajones sueltos serían los trozos de la albañilería simple ya agrietada por el sismo y las barandas del camión corresponderían al marco de concreto, el que evidentemente tiene que ser especialmente diseñado a fin de que la albañilería simple continúe trabajando, incluso después de haberse fragmentado.

Es destacable señalar que el comportamiento sísmico de un tabique en el interior de un pórtico principal de concreto armado, es totalmente diferente al comportamiento de los muros confinados. La razón fundamental de esa diferencia se debe al procedimiento de construcción, al margen del tipo de unidad o mortero que se emplea en cada caso.

Mientras que en el caso de los tabiques primero se construye la estructura de concreto armado (incluyendo el techo que es sostenido por el pórtico) y finalmente se levanta el tabique, en el caso de los muros confinados el proceso constructivo es al revés; esto es, primero se construye la albañilería, posteriormente se procede con el vaciado de las columnas y luego se vacían las soleras en conjunto con la losa del techo. Con lo cual, el muro confinado es capaz de transportar y transmitir cargas verticales, cosas que no lo hacen los tabiques.

La técnica constructiva descrita hace que en los muros confinados se desarrolle una gran adherencia en las zonas de interfase columna-muro y solera-muro, integrándose todo el sistema; con lo cual estos elementos trabajan en conjunto, como si fuese una placa de concreto armado sub-reforzada (con refuerzo sólo en los extremos), evidentemente con otras características elásticas y resistentes.

Lo expresado en el párrafo anterior no se produce en los tabiques, ya que la zona de interconexión concreto-albañilería es débil (la interfase pórtico-tabique es usualmente rellena con mortero), lo que hace que incluso ante la acción de sismos leves se separen ambos elementos, trabajando la albañilería como un puntal en compresión (Fig. 1.11); esto se debe a que la zona de interacción (contacto) sólo se presenta en las esquinas, al deformarse el tabique básicamente por corte ("panel de corte"), mientras que el pórtico (más flexible que el tabique) se deforma predominantemente por flexión. Este efecto así como las características del puntal, se estudiarán en detalle en el Acápite 4.6



Los requisitos mínimos que señala la Norma E-070, para que un muro se considere confinado son:

1. El muro debe estar enmarcado en sus 4 lados por elementos de concreto armado (o la cimentación) especialmente diseñados; esto se debe al carácter cíclico del efecto sísmico. Véase el comportamiento sísmico de un muro con una sólo columna en la Fig. 3.7.
2. La distancia máxima entre los confinamientos verticales (columnas) debe ser 2 veces la distancia que existe entre los confinamientos horizontales (soleras); más allá, la acción de confinamiento se pierde, especialmente en la región central de la albañilería donde el tamaño de las grietas se vuelve incontrolable. Cabe hacer mención que en la Norma Mexicana se especifica que la distancia máxima entre los confinamientos verticales es 4 m, y entre los horizontales es 3 m.

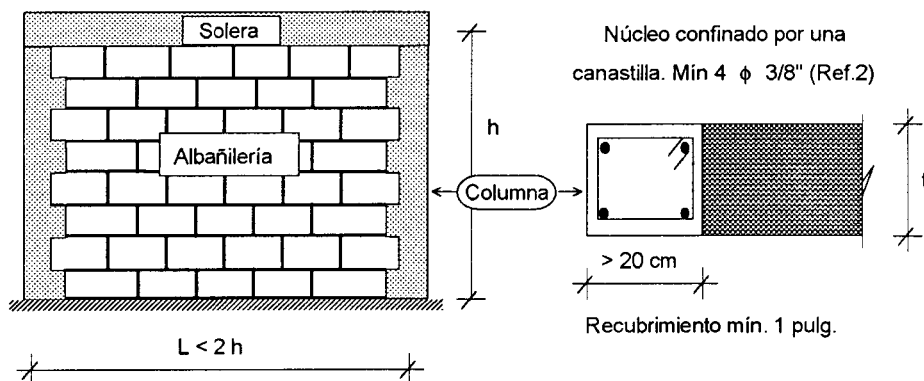


Fig. 1.12. Requisitos mínimos para que un muro se considere confinado

3. El área mínima de las columnas de confinamiento debe ser:

$$A_c (\text{mín}) = 20 t (\text{cm}^2); \text{ donde: } t = \text{espesor efectivo del muro (cm)}$$

Con respecto a la solera, ésta puede tener un peralte igual al espesor de la losa del techo, con un área suficiente para alojar al refuerzo respectivo; esto se debe a que la solera trabaja a tracción y más bien debe servir como un elemento transmisor de cargas verticales y horizontales hacia la albañilería. Cabe mencionar que estudios realizados mediante el método de Elementos Finitos, variando el peralte de la solera de 0.2 a 0.6 m, en muros confinados de forma cuadrada, demostraron que era innecesario incrementar dicho peralte, en vista que los esfuerzos producidos por la carga vertical (en las columnas y en la albañilería) resultaron ser prácticamente independientes de esa variable.

4. El área de acero mínimo del refuerzo a emplear en los elementos de confinamiento horizontales y verticales, debe ser:

$$A_s (\text{mín}) \geq 0.1 f_c A_c / f_y$$

Esta expresión proviene de suponer que en caso el concreto fisure por tracción, debe existir un refuerzo mínimo capaz de absorber esa tracción (T); esto es:

$$T = f_t A_c = (0.1 f_c) A_c \leq A_s f_y \rightarrow A_s (\text{mín}) \geq 0.1 f_c A_c / f_y$$

Al respecto, en la Ref. 2 se aconseja utilizar como mínimo  $4 \phi 3/8"$ , de manera que exista un núcleo de concreto bordeado por una canastilla de acero que lo confine (Fig. 1.12). Adicionalmente, en dicha referencia se indica que debe emplearse un concreto cuya resistencia mínima sea  $f_c = 175 \text{ kg/cm}^2$ .

5. El anclaje del refuerzo vertical y horizontal, así como los traslapes, deben ser diseñados a tracción. De esta manera, la longitud de traslape de acuerdo a la Norma de Concreto E-060 es:  $L_T (\text{clase C}) = 1.7 (0.006 D f_y) \approx 45 D$ ; donde  $D$  = diámetro de la barra  $\leq 3/4"$ , y  $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ ; en tanto que la longitud de desarrollo de la parte recta de una barra que termina en gancho estándar es:  $L_{dg} = 318 D / \sqrt{f_c} \geq 8 D$  o 15 cm. Esto último conlleva a que las columnas deban tener un peralte adecuado (mínimo 20 cm), de modo que permita anclar el refuerzo longitudinal empleado en las soleras.
6. En previsión del corrimiento de la falla diagonal del muro sobre los elementos de confinamiento, debe existir concentración mínima de estribos en las esquinas del marco de confinamiento. Según la Norma E-070, la longitud a confinar es 50 cm o 2.5 d (d = peralte de la columna o solera). Al respecto, en la Ref. 2 (basada en los múltiples ensayos realizados en la PUCP) se aconseja utilizar como mínimo el siguiente espaciamiento entre estribos:  $[\phi 1/4", 1 @ 5, 4 @ 10 \text{ cm, resto } @ 25 \text{ cm (montaje), con una zona a confinar igual a } 45 \text{ cm o } 1.5 d \text{ (menor a la especificada en la Norma E-070), adicionando por lo menos 2 estribos en los nudos (Fig. 1.13).}$



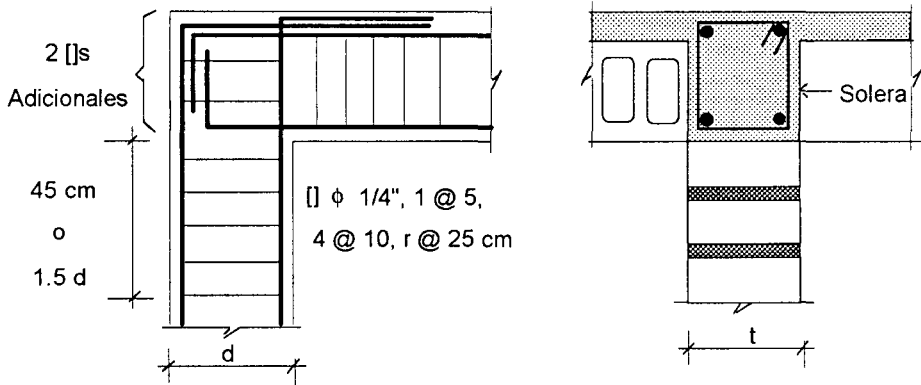


Fig. 1.13. Disposición mínima de estribos según la Ref. 2



Fig. 1.14. Extremo superior de una columna con estribos a corto espaciamiento (izquierda) y a gran espaciamiento (derecha).

7. Aunque este punto no está contemplado por la Norma E-070, debe señalarse que los múltiples ensayos realizados sobre muros confinados indican que, cuando ellos están sujetos a una elevada carga vertical (definida como un esfuerzo axial que excede el 5% de la resistencia a compresión de las pilas de albañilería:  $\sigma > 0.05 \text{ f'm}$ ), tienen un mal comportamiento sísmico, disminuyendo drásticamente su ductilidad. Para evitar este problema, debe adicionarse una cuantía mínima de refuerzo horizontal (0.001),

el cual debe ser continuo y anclado en las columnas con ganchos verticales (Figs. 1.15 y 1.16). El doblé de estos ganchos debe ser vertical, en previsión de fallas por anclaje que podrían generarse cuando se formen fisuras horizontales de tracción por flexión en las columnas. Sin embargo, aun existiendo ese refuerzo horizontal, el esfuerzo axial actuante no debe exceder de  $0.15 f'm$ .

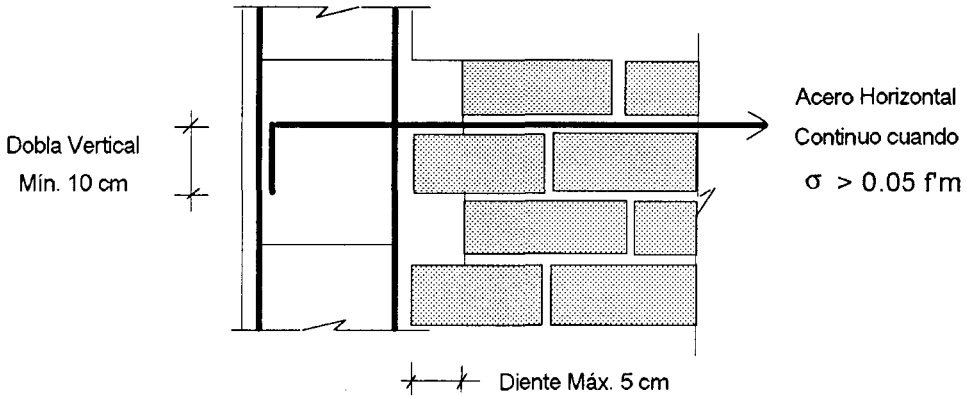


Fig. 1.15. Detalle del anclaje del refuerzo horizontal continuo en un muro confinado (Ref. 2)

Fig. 1.16

Refuerzo horizontal mínimo en un muro con esfuerzo axial mayor a  $0.05 f'm$  (Ref. 2).

