

DISEÑO SISMICO DE CONSTRUCCIONES DE ADOBE

Autores: Ing. Roberto Morales M.
Dr. Ricardo Yamashiro K.
Ing. Alejandro Sánchez O.
Dr. Rafael Torres C.
Ing. Carlos Irala C.
Ing. Oswaldo Morales M.
Arq. Luis Rengifo Z.

**INVESTIGACION EXPERIMENTAL DE
CONSTRUCCIONES DE ADOBE
Y BLOQUE ESTABILIZADO**

**Ing. Roberto Morales Morales
Dr. Ricardo Yamashiro Kamimoto
Ing. Alejandro Sanchez Olano**

INTRODUCCION

La gran actividad sísmica de nuestro territorio ha cobrado siempre sus mayores víctimas en las construcciones de adobe. Según Kuroiwa, Deza y Jaén (1)* en el terremoto del 31 de Mayo de 1970 "...Más del 90 por ciento de los edificios dañados eran de adobe y su colapso causó más de 40.000 muertes". Por otro lado, sin embargo, algunas construcciones de adobe resistieron sorprendentemente, los embates del sismo. "...En Coishco, a 40 kilómetros del epicentro y sobre terreno rocoso, el daño fué mínimo y muchas de las construcciones de adobe sobrevivieron y están habitadas".

Debe aceptarse, entonces, que existen ciertas condiciones bajo las cuales este tipo de construcción puede ofrecer un comportamiento "satisfactorio" ante sismos severos.

Lo que constituye un comportamiento "satisfactorio" ante sismos, está adecuadamente resumido en una de las filosofías en boga en la ingeniería antisísmica. Según Fintel (2), los objetivos implícitos en la mayoría de las normas de diseño antisísmico son que la estructura sea capaz de:

1. resistir sismos sin daños,
2. resistir sismos moderados con algunos daños estructurales leves y con daños no estructurales moderados,
3. resistir sismos catastróficos sin colapsar.

Por colapso se entiende (2) "... aquel estado que no permite que los ocupantes salgan del edificio debido a la falla de la estructura primaria".

En el presente trabajo se trata de sintetizar la información disponible sobre construcciones de adobe en formas de normas de diseño que permitan proyectar con este material, satisfaciendo los objetivos expuestos, en la mejor forma posible.

Se estudió, primeramente, el comportamiento sísmico de las construcciones de adobe con énfasis principal en la detección de los mecanismos de falla, lo que permitió identificar los tipos de esfuerzos que era necesario estudiar principalmente. Se estudió luego, experimentalmente, algunas de las propiedades mecánicas de la albañilería de adobe -especialmente su resistencia- bajo diferentes sollicitaciones. A continuación, en base a estos estudios se establecieron los esfuerzos admisibles para el diseño

Finalmente, usando información de diversas fuentes y cálculos adicionales preparó una propuesta de normas para el diseño de estas construcciones

COMPORTAMIENTO SISMICO DE CONSTRUCCIONES DE ADOBE

Las fallas en las construcciones de adobe pueden atribuirse, principalmente, a su poca resistencia en tracción y reducida adherencia entre el adobe y el mortero. Los tipos principales de falla, que a menudo se presentan combinados, son los siguientes

1. Falla por tracción en los encuentros de muros.- En la figura 1 se ilustra este tipo de falla, que se debe principalmente a esfuerzos de tracción directa que se produce en uno de los muros, al dar arrioste lateral a otros muros del encuentro. Esta situación se agrava cuando a este efecto se superponen los esfuerzos de flexión
2. Falla por flexión.- En la figura 2, se ilustra algunas de las variantes de este tipo de falla que se debe a los esfuerzos de tracción por flexión al actuar el muro como una losa, apoyada en su base y en los elementos verticales que lo arriostan. La falla puede ocurrir en secciones horizontales, verticales u oblicuas

- 3 Falla por corte.- En la figura 3, se ilustra este tipo de falla, que se produce cuando el muro trabaja como muro de corte. Se debe, principalmente, a los esfuerzos tangenciales en las juntas horizontales

En un trabajo experimental muy ingenioso, Corazao y Blondet (5) encontraron tipos de falla similares.

PROPIEDADES MECANICAS DE ALBAÑILERIA DE ADOBE Y BLOQUE ESTABILIZADO

Del estudio de los mecanismos de falla de las construcciones de adobe se determinó que las características mecánicas que más interesa conocer son.

1. la resistencia en tracción,
2. la resistencia en flexión.
3. la resistencia al corte.

Además, a pesar de que no se ha observado fallas por compresión, interesa conocer la resistencia de la albañilería en compresión, por ser esta una conveniente medida de la calidad estructural del material, siendo además, más fácil de determinar que las otras resistencias indicadas.

La resistencia de la albañilería de adobe se determinó mediante especímenes a escala natural y también mediante especímenes normalizados.

ESPECIMENES A ESCALA NATURAL

Resistencia en tracción.- En un estudio experimental, Vera (6) encontró, como era de esperar, una bajísima resistencia en tracción, de la albañilería de adobe, apenas 0.036 kg/cm^2 , como se muestra en la figura 4. Para su aplicación al diseño de muros reforzados, se ensayó también algunos encuentros de muros reforzados con caña. Se encontró un dramático aumento en la resistencia del encuentro, hasta de 14.7 veces la resistencia del espécimen sin reforzar.

Resistencia en flexión - Morom (7) estudió, experimentalmente, la resistencia en flexión en un plano horizontal de la albañilería de adobe con y sin refuerzo (Fig. 5). Nuevamente, la resistencia del muro sin reforzar resultó muy pequeña, mientras que con refuerzo se llegó hasta una resistencia 39 veces mayor cuando se usó mortero de barro con cemento, pero solo 4 veces mayor cuando se usó mortero de barro simple.

Resistencia en corte.- Minchola (8), Guanilo (9) y Merino (10), estudiaron experimentalmente, la resistencia de muros de corte de albañilería de adobe con/sin refuerzo (Fig. 6). La resistencia del muro sin reforzar (especimen N° 1) fué de 0.123 kg/cm^2 y la más alta resistencia obtenida fué 0.268 kg/cm^2 , correspondiente al espécimen N° 6, reforzado en ambos bordes verticales y también horizontalmente cada tres hiladas. Es digno de notar que el muro sin refuerzo, con juntas de barro con cemento, resistió 0.236 kg/cm^2 , es decir, más que la mayoría de los muros reforzados y casi tanto como el más resistente. Debe descartarse, sin embargo, que la capacidad de deformación de los muros reforzados fué significativamente mayor que la de los muros sin refuerzo.

ESPECIMENES NORMALIZADOS

Generalidades.- Los ensayos de modelos a escala normal (6) (7) (8) permiten determinar la resistencia a los diversos tipos de esfuerzos con cierto grado de confiabilidad. Por otro lado, sin embargo, son extremadamente morosos, requieren personal relativamente especializado y son, sobre todo, muy costosos. Estos inconvenientes se pueden subsanar usando especímenes

y procedimientos de ensayo diseñados de modo de simplificar, lo más posible, el trabajo, con un sacrificio aceptable en la confiabilidad de los índices de resistencia que así se determinen.

A continuación se presenta los resultados de ensayos de albañilería de bloque estabilizado usando los especímenes de prueba propuestos por Meli y Reyes (11). Estos especímenes, que son fáciles de construir y ensayar, permiten obtener índices de resistencia de la mampostería en compresión, corte y tracción diagonal. Correlacionando estos índices con los resultados de ensayos de muros a escala natural, será posible en el futuro cuando se disponga de un volumen suficiente de información determinar con mayor exactitud las propiedades mecánicas necesarias para el diseño

Especimen para el ensayo de compresión axial - Proporciona un índice de la resistencia de un muro a la acción de cargas verticales.

El tipo de especimen utilizado se muestra en la figura 7 (a). Consiste en una pila de bloques unidos por mortero. La relación altura-espesor de las pilas fué aproximadamente igual a 2. Con el fin de asegurar una aplicación uniforme de esfuerzos se procuró que las caras extremas de la pila fueran lisas, planas y paralelas.

Esto se logró puliendo la cara inferior y enrasando la cara superior con una capa de yeso de aproximadamente 3 mm. de espesor. Los ensayos se efectuaron en un marco metálico, aplicando la carga mediante un gato hidráulico de 30,000 lbs. por incremento de 2000 lbs. Para cada incremento de carga se midió la deformación axial mediante un deformómetro de dial. Los ensayos se efectuaron a los 35 días de fabricadas las pilas.

Especímenes para el ensayo de corte directo - Proporcionan un índice de la resistencia de muros a cargas horizontales en su plano, cuando fallan en la junta de mortero que une los bloques. Se trata de una falla debida básicamente a esfuerzos tangenciales.

El tipo de especimen utilizado se muestra en la figura 7 (b). Consiste en una pila de tres bloques. El intermedio está cortado verticalmente por la mitad. Estos medios bloques están ligeramente separados, con su junta vertical sin mortero

Al aplicar cargas en los medios bloques intermedios, se produce una falla por esfuerzos tangenciales en cualquiera de las dos mitades. Los ensayos se efectúan aplicando además cargas de confinamiento en los bloques extremos, simulando de esta manera el estado de esfuerzos en un punto de un muro de albañilería. Las cargas de confinamiento aplicadas fueron de 1, 2 y 4 kg/cm². Los ensayos se efectuaron a los 35 días de fabricadas las pilas

Especímenes para el ensayo de compresión diagonal.- Proporcionan un índice de la resistencia de un muro a cargas horizontales en su plano, tanto para el caso en que la falla se deba a esfuerzos tangenciales en las juntas como para el caso en que esta se deba a esfuerzos de tracción, tanto para el caso en que la falla se deba a esfuerzos tangenciales en las juntas como para el caso en que esta se deba a esfuerzos de tracción inclinada en los bloques.

El tipo de especimen utilizado se muestra en la figura 7 (c). Consiste en una pila de tres bloques. El intermedio está formado por dos medios bloques. Las pruebas se efectuaron en una máquina Universal Tinius Olsen, de tal forma que la carga se aplicaba según la dirección de una de las diagonales a través de angulares colocados en dos aristas opuestas y asentados sobre una capa delgada de yeso. Los ensayos se efectuaron a los 35 días de fabricados los especímenes

Resultados de los ensayos de compresión axial - En el cuadro N°1 se presenta un resumen de los resultados de estos ensayos. Puede observarse lo siguiente:

- 1 Las resistencias en compresión f_m fueron iguales en los especímenes con mortero 1-10-1% y S-2%. Con estos morteros la resistencia resultó 25% mayor que para los especímenes sin estabilizar (adobe)

2. La deformación correspondiente al esfuerzo máximo fué también mayor en los especímenes con suelo estabilizado.
3. El módulo de elasticidad fué también mayor en los especímenes con suelo estabilizado. El mayor valor se obtuvo con el mortero S-2%.

Resultados de los ensayos de corte directo.- En la figura 8 se observa que los resultados de estos ensayos responden satisfactoriamente a la expresión de Coulomb

$$v = \mu + f \sigma$$

donde: v = esfuerzo tangencial de falla, kg/cm^2
 μ = resistencia por adherencia, kg/cm^2 .
 f = coeficiente de fricción.
 σ = esfuerzo de confinamiento, kg/cm^2

En estos sismos gráficos y también en el cuadro N° 2 se dan los valores de μ y de f para cada tipo de mortero, que fué la variable principal.

Puede notarse lo siguiente:

1. Los especímenes con suelo estabilizado exhiben una resistencia por adherencia, μ , significativamente superior a los especímenes de adobe (sin estabilizar). En orden descendente de la resistencia por adherencia se tiene la siguiente clasificación de los especímenes ensayados:

a. Con mortero 1:2:3:1/2	$\mu = 1.8 - 1.98 \text{ kg/cm}^2$.
b. Con mortero 1:10:1%	$\mu = 1.3 - 1.4 \text{ kg/cm}^2$.
c. Con mortero S - 2%	$\mu = .75 - 0.90 \text{ kg/cm}^2$.
d. Con mortero simple	$\mu = 0.55 \text{ kg/cm}^2$.

2. Los especímenes con suelo estabilizado tienen un coeficiente de fricción, f , superior a los especímenes sin estabilizar, aunque la diferencia en este caso no es tan marcada como para la adherencia. En orden descendente de los valores del coeficiente de fricción, se tiene la siguiente clasificación de los especímenes:

a. Con mortero 1:2.3:1/2	$f = 0.98 - 1.06$
b. Con mortero S - 2%	$f = 0.78 - 0.80$
c. Con mortero 1:10:1%	$f = 0.60 - 0.63$
d. Con mortero simple	$f = 0.58$

3. No se observa una diferencia sistemática, ni significativa, entre los resultados para especímenes fabricados con bloques grandes y chicos.

Resultados de los ensayos de compresión diagonal.- En el cuadro N° 3, se presenta un resumen del análisis de los resultados de los ensayos de compresión diagonal. Los esfuerzos de corte experimentales y los "teóricos" fueron determinados siguiendo los lineamientos del trabajo de Meli y Reyes. Se observa lo siguiente.

1. El esfuerzo de corte de rotura es significativamente mayor para los especímenes de suelo estabilizado, habiendo resultado una resistencia mucho mayor en los especímenes con mortero 1:10 1% que en los especímenes con mortero S - 2%.
2. La aplicación de las expresiones para las resistencias "teóricas" para fallas por tracción diagonal y por corte, indican que los especímenes debieron fallar por corte, lo que concuerda con lo observado.
3. Sin embargo, las resistencias "teóricas" calculadas con la expresión (3) resultan excesivamente altas en comparación con los valores experimentales.

Conclusiones.- De los resultados obtenidos se puede extraer las siguientes conclusiones.

- a. En general, la estabilización mejora las características mecánicas del suelo
- b. la expresión $v = \mu + f\sigma$ relaciona satisfactoriamente las diferentes variables.*
- c. Pueden usarse especímenes con bloques pequeños (26.5 x 26.5) para obtener las propiedades mecánicas de la mampostería de bloques más grandes.
- d. La expresión $v = \frac{0.8 \mu}{1 - 0.9 f h/l}$ para las pruebas de compresión diametral no es aplicable para los especímenes ensayados.**

PROPIEDADES MECANICAS DE LA CAÑA

La caña se comporta elásticamente casi hasta la rotura. Echazú (12) determinó, experimentalmente, un valor medio del módulo de elasticidad de 1.52×10^5 kg/cm² con un coeficiente de variación de 6.2%, y un valor medio de la resistencia de 1350 kg/cm² con un coeficiente de variación de 17.7%.

Con la humedad se encontró una disminución de la resistencia del orden de 25 por ciento. En otros experimentos, se ha encontrado una disminución mayor.

CUADRO N° 1

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE COMPRESION AXIAL

Tipo de mortero	1.10 - 1%	S - 2%	Simple
Resistencia, f'_m	12.8 kg/cm ²	12.8 kg/cm ²	10.3 kg/cm ²
Deformación Unitaria	12.3×10^{-3}	13.5×10^{-3}	9.7×10^{-3}
Módulo de Elasticidad	1788 kg/cm ²	2140 kg/cm ²	1600 kg/cm ²

Los valores indicados representan el promedio de 3 a 5 especímenes

* Debe notarse, sin embargo que para valores pequeños del esfuerzo de confinamiento los gráficos que se muestran en el trabajo de Meli y Reyes indican que esta expresión puede dar errores importantes

** Aparentemente, debido a que los esfuerzos de confinamiento eran pequeños

CUADRO N° 2

VALORES DE LA ADHERENCIA, μ , Y COEFICIENTE DE FRICCIÓN, f , DE ACUERDO A LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE DIRECTO

Mortero	1 10.1%	S - 2%	Simple	1 2 3 1/2
Bloque	Chico Grande	Chico Grande	Chico Grande	Chico Grande
Adherencia μ , kg/cm ²	1.40 1.30	.90 .75	.55 ---	1.80 1.98
Coefficiente de fricción, f	.60 .63	.78 .80	.58 ---	1.06 .98

NOTAS

- Los valores de μ y f corresponden a la ecuación de falla

$$v = \mu + f \sigma$$

donde:
 v = esfuerzo tangencial de falla
 σ = esfuerzo de confinamiento

- Los valores de la tabla se obtuvieron ajustando líneas rectas a los puntos experimentales y sin considerar los valores para confinamiento nulo

CUADRO N° 3

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE COMPRESIÓN DIAGONAL

Tipo de Mortero	Kg/cm ²	f	f'_m Kg/cm ²	Esfuerzo de Corte de Rotura		
				Experimental (1)	Falla por fricción diagonal (2)	Falla por corte (3)
1:10:17 Blo. Chico	1.40	.60	12.8	1.01	3.56	2.44
1:10:15 Blo. Grande	1.30	.63	12.8 ^{sc}	1.15	3.56	2.65
S - 2%	.90	.78	12.8	.45	3.56	2.40
Simple	.55	.58	10.3	.30	3.19	.92

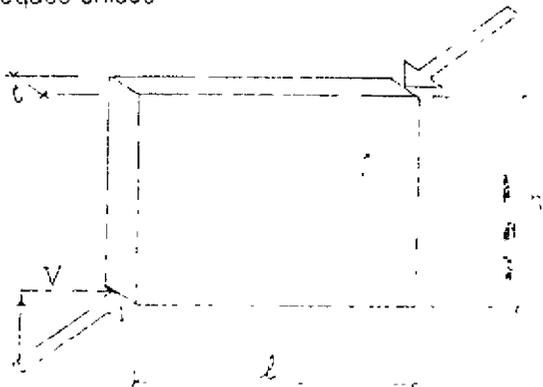
Se ha tomado el mismo valor que para los bloques chicos
 Del trabajo de Meli y Reyes

$$(1) v = V \sigma$$

$$(2) v_{TD} = \sqrt{E'_m}$$

$$(3) v_c = \frac{0.8 \mu}{1 - 0.9 E h^2 / z}$$

En estos ensayos $h/z = 1$



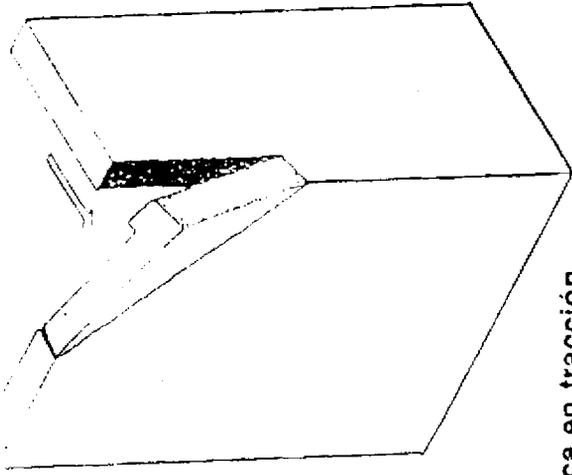


Fig. N° 1
Falla Típica en tracción

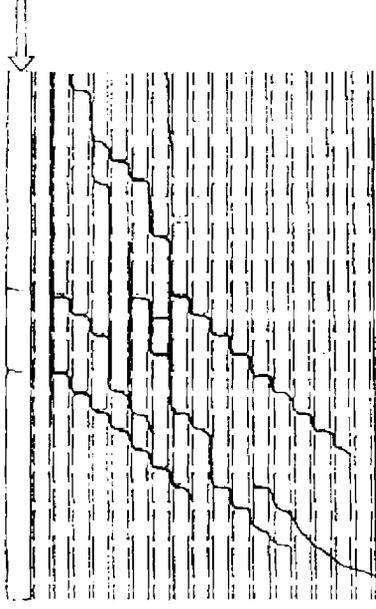
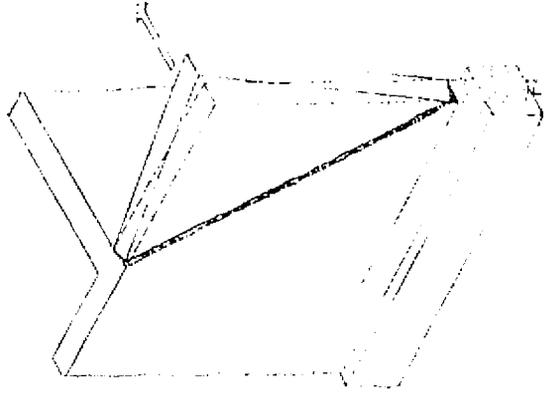
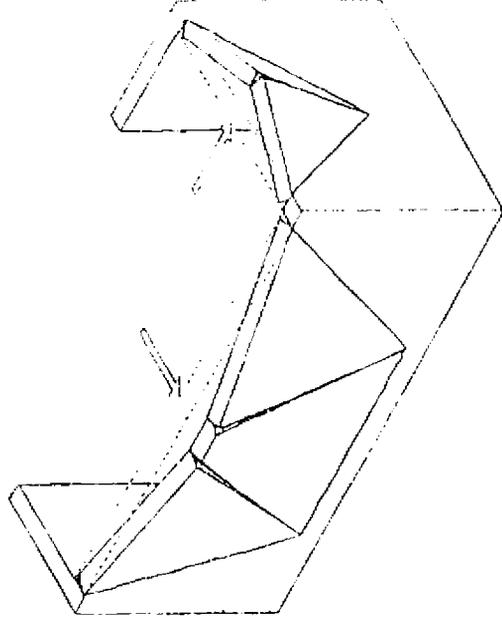


Fig. N° 3
Falla Típica por corte

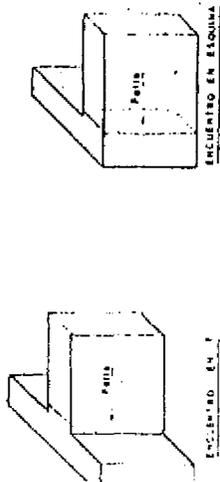


a) Muro arriostrado en dos bordes

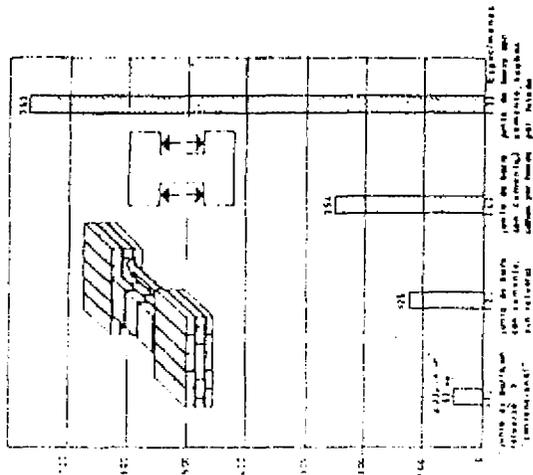


b) Muros arriostrados en tres bordes

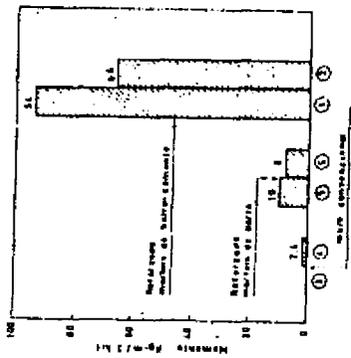
Fig. N° 2
Fallas típicas por flexión



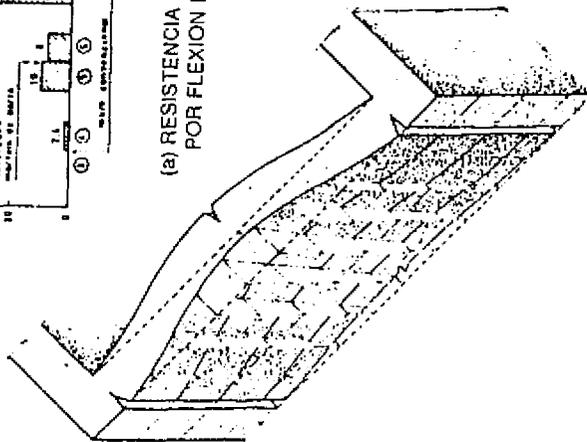
(a) FALLAS TÍPICAS DE MUROS DE ADOBE AL OCURRIR SISMO



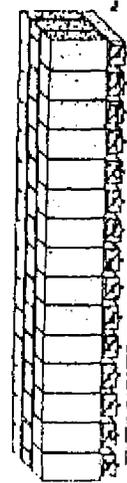
(b) RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE ENCUENTROS DE MUROS DE ADOBE



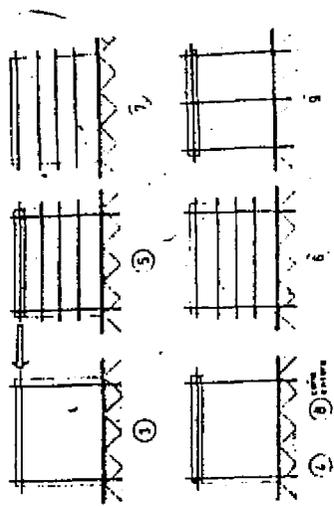
(a) RESISTENCIA DE MUROS DE ADOBE POR FLEXIÓN HORIZONTAL



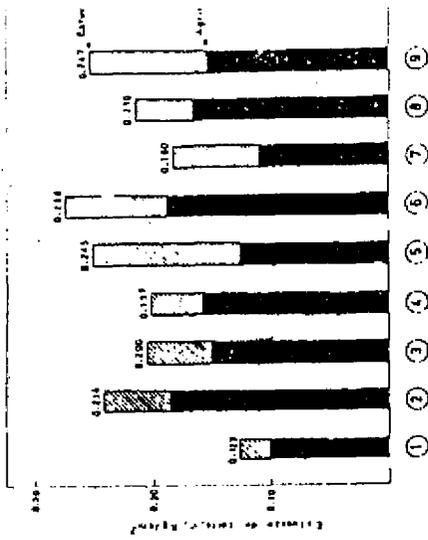
(b) EFECTO DE UNA CARGA NORMAL AL MURO



(c) ESQUEMA DE ENSAYOS EFECTUADOS



(a) ESPECIMENES ENSAYADOS



Resistencia tracción A ejes horizontales	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A carga normal, kg/cm²	1.07	1.63	1.66	1.26	1.18	1.44	1.71	1.13	1.13
A carga diagonal, kg/cm²	1.1	1.5	1.7	1.4	1.5	1.6	1.4	1.2	1.2

(b) COMPARACION DE LA

RESISTENCIA DE MUROS DE ADOBE CON DIFERENTES

Fig N° 4 RESISTENCIA EN TRACCION DE MUROS

Fig N° 5 FLEXION HORIZONTAL EN MUROS

Fig N° 6 RESISTENCIA DE MUROS DE CORTE

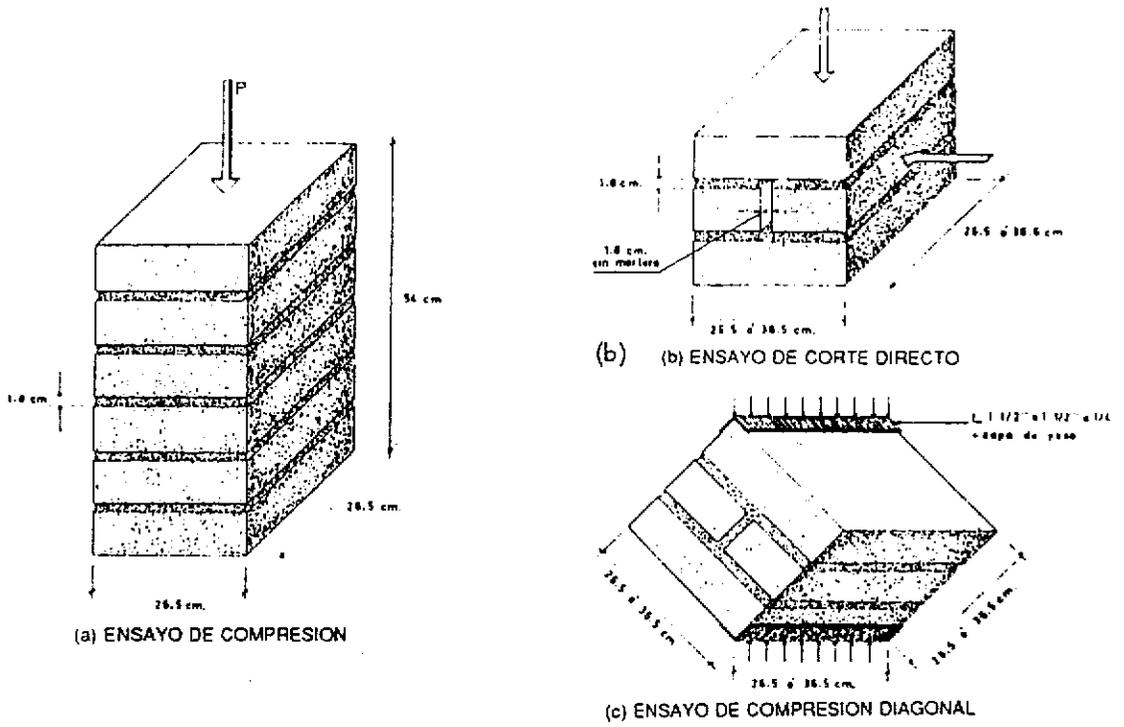
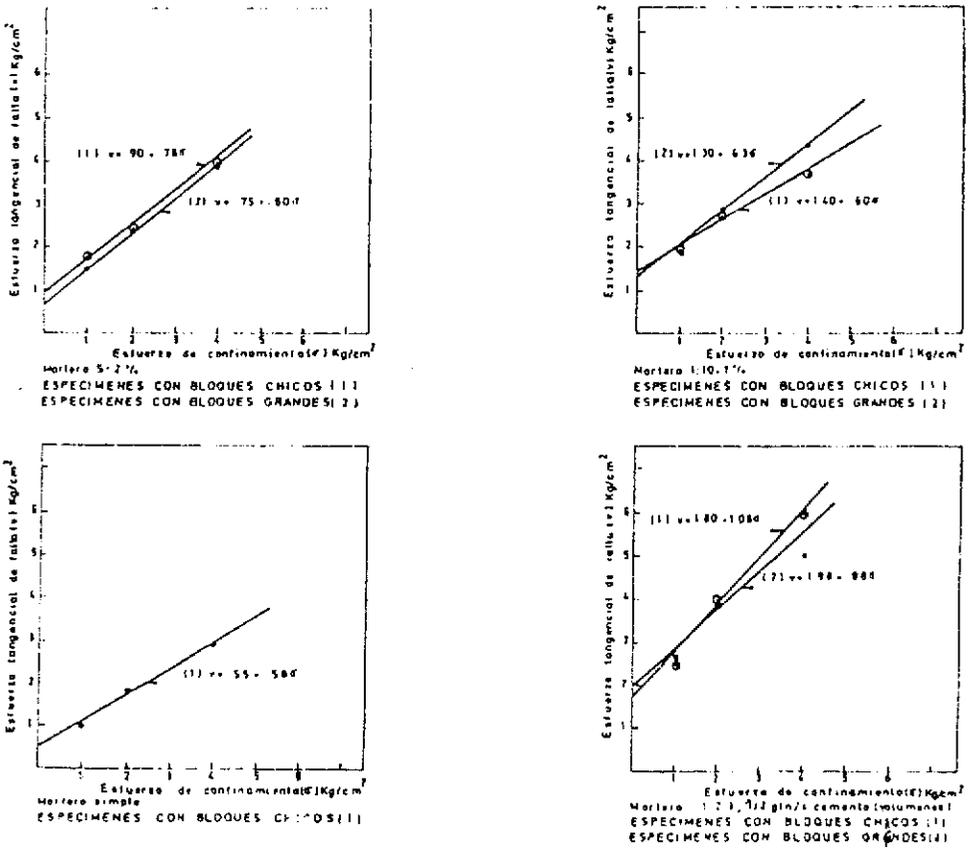
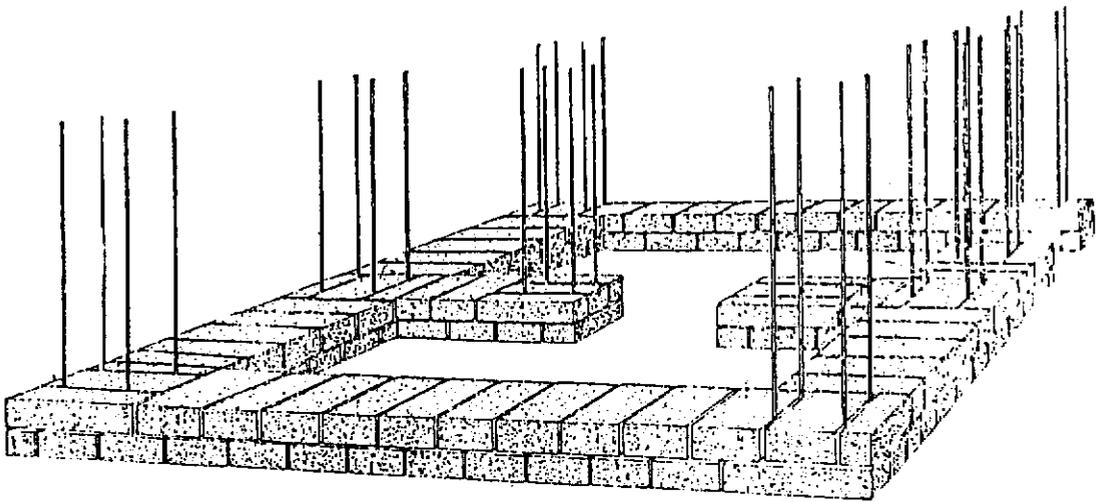


FIG. N° 7 ESPECIMENES DEL ENSAYO

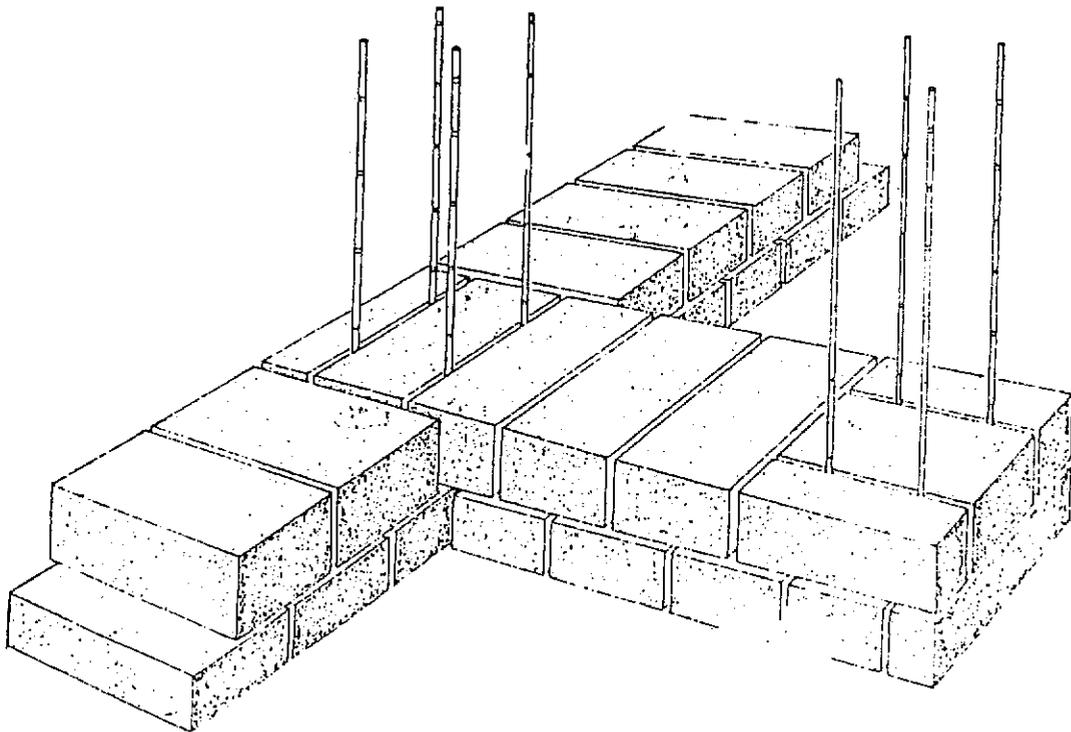


CURVAS V-6 PARA ENSAYOS DE CORTE DIRECTO

FIG. N° 8 RESULTADO DE ENSAYO DE CORTE

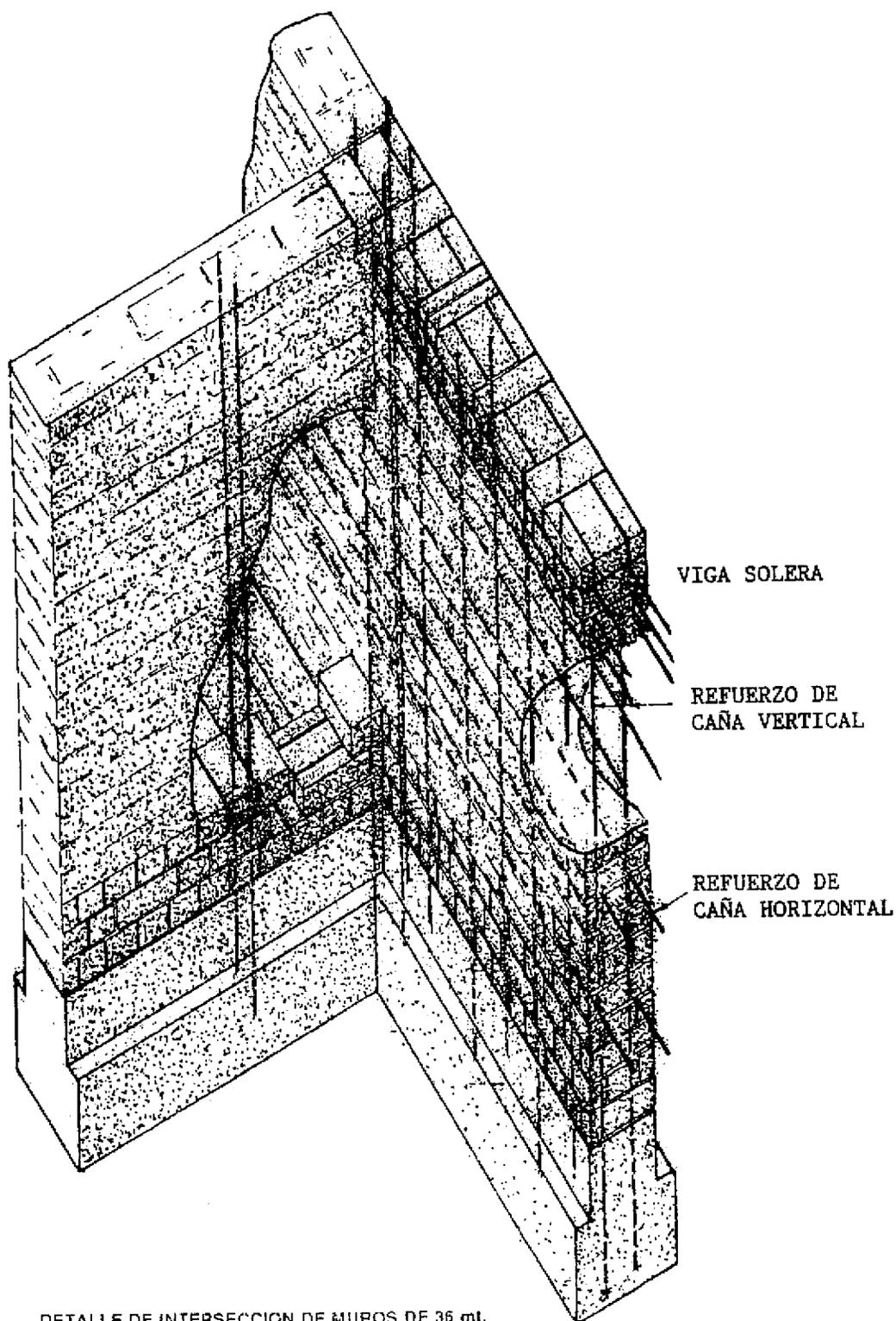


APAREJO EN VIVIENDA CON REFUERZO VERTICAL



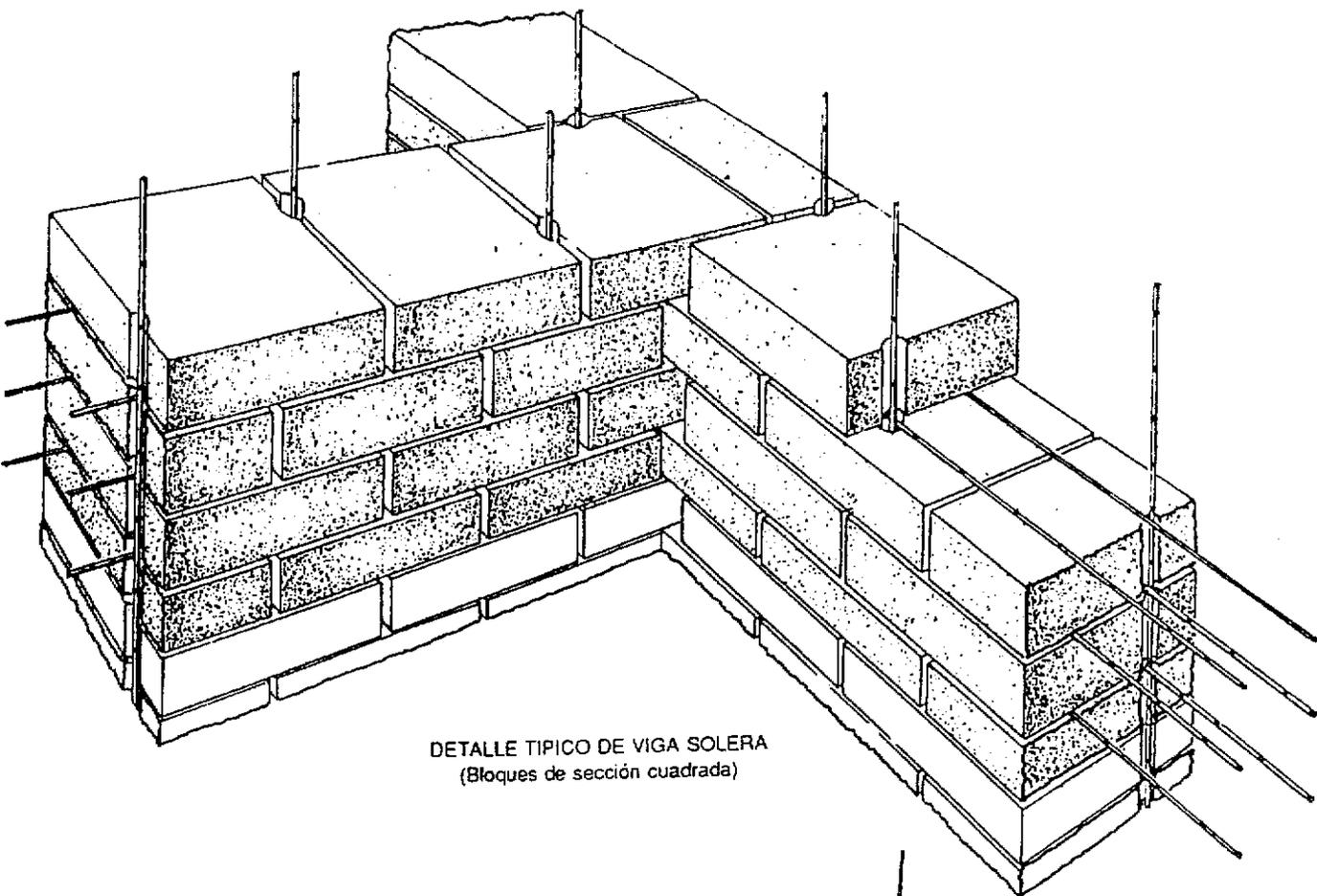
APAREJO EN ENCUENTRO DE MUROS

Fig. N. 9

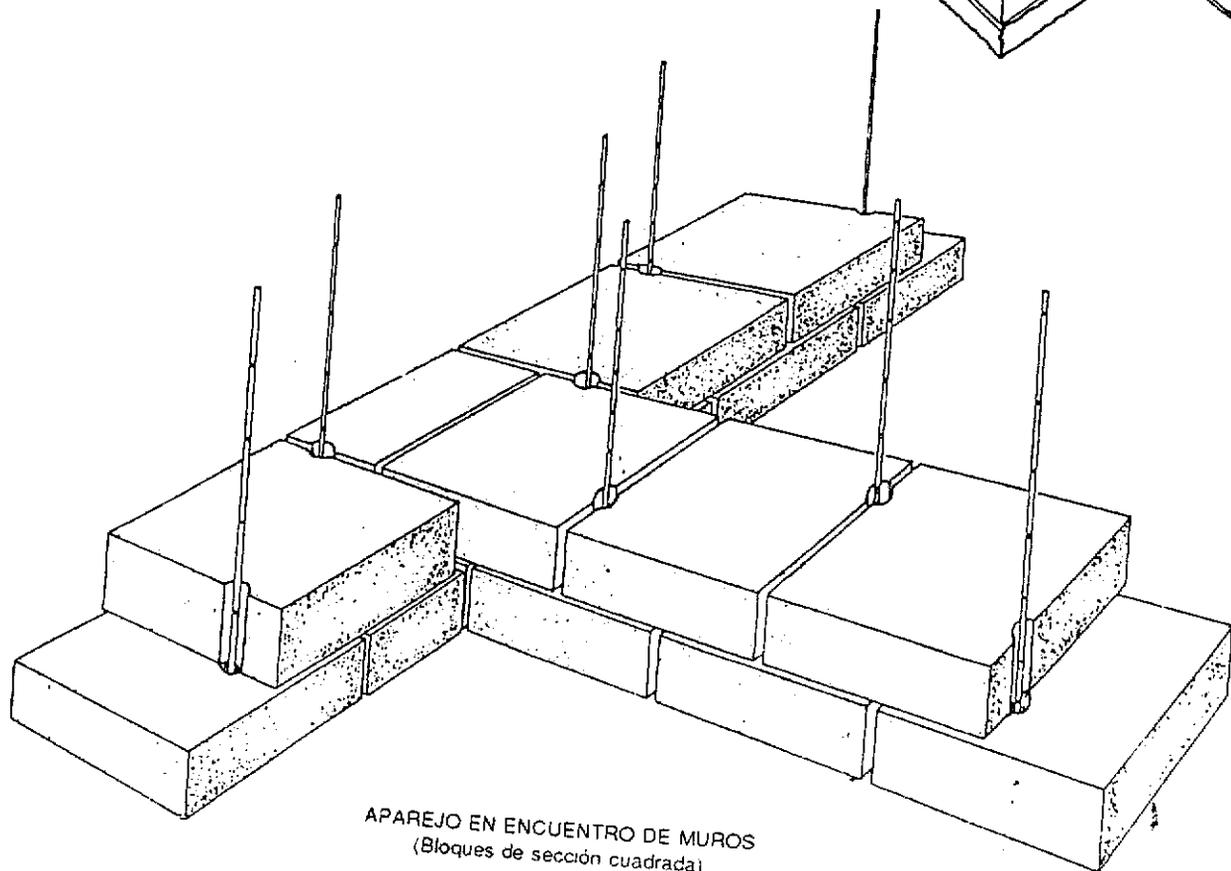


DETALLE DE INTERSECCION DE MUPOS DE 36 ml.

Fig. Nº 10



DETALLE TIPICO DE VIGA SOLERA
(Bloques de sección cuadrada)



APAREJO EN ENCUENTRO DE MUROS
(Bloques de sección cuadrada)

Fig. N. 11

BIBLIOGRAFIA

- 1 - KUROIWA, Julio, DEZA, Ernesto, JAEN, Hugo.
"Investigation on the Peruvian Earthquake of May 31, 1970", 5th World Conference on Earthquake Engineering, Rome, June 1973.
- 2.- FINTEL, Mark.
"Resistance to Earthquakes-Phisology, Ductility and Details", Publicación ACI SP-36, Response of Multistory Concrete Structures to Lateral forces 1973, pp 75-96
- 3 - MATHIESSEN, Ralph.
Charlas en la UNI, Junio 1975
- 4 - COMISION TECNICA DE BLOQUE ESTABILIZADO (COBE).
Informe Final, Ministerio de Vivienda, Lima, 1974
- 5.- CORAZAO SAN ROMAN, Miguel, BLONDET SAAVEDRA, Marcial.
Estudio Experimental del Comportamiento Estructural de las Construcciones de Adobe Frente a Solicitaciones Sísmicas, Banco Peruano de los Constructores, Lima, 1974.
- 6 - VERA GUTIERREZ, Rodolfo.
Estudio sobre Losas de Suelo-Cemento Reforzadas con Carrizo y Encuentros de Muros de Adobe, Tesis de Ingeniería Civil, UNI, 1972.
- 7 - MOROMI, Isabel
Estudio de Vigas de Suelo-Cemento Reforzadas con Caña de Guayaquil y de Modelos de Muros de Adobe sometidos a Cargas Perpendiculares a su Plano. Tesis de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, 1971.
- 8 - MINCHOLA HARO, Carlos E
Estudio de Muros de Adobe Sometidos a Cargas Horizontales - Parte 5 (a), Tesis de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, 1974.
- 9 - GUANILO GARCIA, Horacio A.
Estudio de Muros de Adobe Sometidos a Cargas Horizontales - Parte 5 (b), Tesis de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, 1974
- 10.- MERINO ROSAS, Francisco A.
Estudio de Muros de Adobe Sometidos a Cargas Horizontales - Parte 5 (c), Tesis de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, 1974.
- 11 - MELI P , Roberto, REYES G., Alejandro
"Propiedades Mecánicas de la Mampostería". Publicación N° 288 del Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de Mexico. Julio 1971
- 12 - ECHAZU PERALTA, J F
Estudio del suelo-cemento y de la Caña de Guayaquil - Parte 1, Tesis de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería 1971