

ENSAYOS DE CARGA LATERAL CÍCLICA EN MUROS DE ALBAÑILERÍA CONFINADA –CORRELACIÓN DE RESULTADOS ENTRE ESPECÍMENES A ESCALA NATURAL Y PROBETAS PEQUEÑAS-

**Por: Ángel San Bartolomé
Profesor Asociado del Departamento de Ingeniería
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

RESUMEN

En el marco del convenio entre el Instituto de Investigación Tecnológica Industrial de Normas Técnicas (ITINTEC) y la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), se ejecutaron ensayos de carga lateral cíclica en 12 muros en voladizo (2.4x2.4m), de compresión axial en 30 pilas y de compresión diagonal en 30 muretes. Se utilizaron 3 tipos de ladrillos de arcilla y 2 tipos de mortero, estudiándose principalmente la correlación de resultados entre los muros a escala natural y los pequeños prismas de albañilería.

1. MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

1.1. Unidades. De las 45 fábricas de ladrillos de arcilla con fin estructural existentes en la ciudad de Lima [7], se seleccionaron 3 de alta productividad y de características muy diferentes (Fig.1). Se ejecutaron pruebas de clasificación según Normas ITINTEC 331.018 y los resultados aparecen en la Tabla 1. Estos ladrillos tuvieron que regarse con agua un día antes de asentado, debido a su elevada succión inicial.

1.2. Mortero. Se utilizó arena gruesa tamizada por la malla #4 ASTM. Se preparó el mortero en cantidad suficiente como para usarlo en menos de 1 hora de trabajo y cada tanda estuvo compuesta por la proporción volumétrica indicada en la Tabla 2.

1.3. Concreto. Se utilizó concreto de resistencia a compresión a los 28 días igual a $f'_c = 145 \text{ kg/cm}^2$, aunque el valor promedio de 36 probetas estándar fue 158 kg/cm^2 .

1.4. Refuerzo. En la Tabla 3 se muestra las características principales del acero utilizado.

2. ESPECÍMENES

En la Fig.10 se muestra las dimensiones nominales de muros, muretes y pilas. En la Fig.11 se detalla el refuerzo de los muros. En la Tabla 4 se muestra la identificación de los especímenes.

3. ENSAYOS

3.1. Pilas a Compresión Axial. Se ensayaron a los 28 días de edad en una máquina universal de 100 ton de capacidad, la velocidad de carga fue 10 ton/min. La falla típica fue una grieta vertical que cortaba unidad y mortero (Fig.2).

3.2. Muretes a Compresión Diagonal. Se ensayaron a los 28 días de edad, la velocidad de carga fue 1 ton/min. La falla fue explosiva, sin registrar un patrón de grietas definido (Fig.3).

3.3. Muros en Voladizo a Carga Lateral Cíclica. La edad de los muros osciló entre 28 y 39 días. En la Fig.4 se muestra una vista panorámica de los dispositivos empleados. El ensayo constó de fases monotónicas y cíclicas, según se muestra en la Tabla 5. El patrón de agrietamiento fue diagonal, cortando ladrillos y mortero (Fig.5, los números sobre las grietas indican la fase del ensayo respectivo).

4. RESULTADOS

4.1. Pilas y Muretes. Para la determinación de la resistencia como carga de rotura aquella que generó el primer agrietamiento importante visible, esta carga coincidió por lo general con el valor máximo registrado. La resistencia unitaria se evaluó dividiendo la carga de rotura entre el área bruta de la sección (pilas) o el área bruta de la diagonal (muretes). En la Tabla 6 se muestran los valores promedios, así como las resistencias características definidas como el valor promedio menos una desviación estándar.

4.2. Muros. En las figuras 6 y 7 se aprecia uno de los gráficos fuerza cortante (V) – desplazamiento lateral (D). El punto “F” corresponde al instante en que se genera la primera fisura visible de tracción por flexión en el muro, el punto “R” está asociado al agrietamiento diagonal del muro con una elevada degradación de resistencia y rigidez lateral ($K = V/D$), y el punto “M” corresponde al valor máximo de fuerza cortante registrado durante el ensayo.

En la Tabla 7 aparecen los valores promedios de 2 muros de la misma serie, en esta Tabla los esfuerzos cortantes ($v_{F,R,M}$) fueron calculados dividiendo la fuerza cortante (V) entre el área bruta de la sección transversal del muro, la rigidez lateral inicial se definió como $K_0 = V_F / D_F$, el módulo de corte “G” se obtuvo experimentalmente en base a las deformaciones angulares registradas en las diagonales del muro, y el coeficiente de reducción por ductilidad “ R_D ”, Fig.7, de las fuerzas sísmicas elásticas se obtuvo utilizando el criterio de igualación de energías [6].

En la Fig.8 se ha dibujado los datos indicados en la Tabla 7, correspondientes al ciclo estable.

5. CONCLUSIONES

5.1. Efectos de la Cal en el Mortero. Observándose la Fig.8, no se aprecia mayor variación en el comportamiento de los muros construidos con cal o sin ella, lo propio se observa en pilas y muretes (Tabla 6).

5.2. Módulo de Elasticidad “E” de la Albañilería. Si se supone $G = 0.4E$ [8], y se correlaciona linealmente E con $f'm$ (Tablas 6 y 7), se obtiene $E = 500 f'm$ para la albañilería hecha con ladrillos de arcilla.

5.3. Correlación de Resultados entre la Resistencia al Corte de los Muros y los Prismas de Albañilería. En la Fig.9 se ha dibujado los valores de la resistencia al corte correspondientes al agrietamiento diagonal de los muros (v_R) versus las resistencias características de las pilas ($f'm$) y muretes. Excluyendo los valores de la Ref.12 (muros con ladrillos sílico-calcáreos, con fallas escalonadas por las juntas), se obtiene:

$$v_R = 0.56 v'm = 0.56 \sqrt{f'm}, \text{ en kg/cm}^2$$

Alcanzándose menor dispersión de resultados con las pilas (4%) que con los muretes (17%).

5.4. Resistencia Admisible al Corte (va). Empleándose el planteamiento de Rosenblueth y Esteva, basado en la teoría de segundos momentos con aproximaciones de primer orden, y siguiéndose los lineamientos de Meli [6], se obtiene: $va = 0.25 v'm = 0.25 \sqrt{f'}m$, en kg/cm^2 .

5.5. Factor de Reducción de las Fuerzas Sísmicas Elásticas por Ductilidad (R_D). De la Tabla 7 se obtiene un valor promedio de $R_D = 2.3$.

5.6. Debe quedar claro que estas conclusiones son aún prematuras (*) y solamente válidas para ladrillos semejantes a los utilizados en este proyecto. Este trabajo debe ampliarse estudiándose la influencia de otras variables.

(*) *Luego de trabajos posteriores, se vio que una mejor correlación de la resistencia al corte de los muros v_R se alcanzaba con la resistencia $v'm$ de los muretes.*

Es interesante indicar que este trabajo se realizó en 1982. Actualmente, en la Norma E.070 del 2006 se especifica: 1) $v_R = 0.5 v'm$, con $v'm \leq \sqrt{f'}m$ para muros cuadrados sin carga vertical; 2) la resistencia mínima del concreto es $f'c = 175 \text{ kg}/\text{cm}^2$; 3) $R = 3$; 4) el método de diseño es a la rotura; y, 5) la resistencia a compresión de los ladrillos debe calcularse sobre el área bruta, no permitiéndose el uso de ladrillos con más de 30% de huecos en la zona sísmica 3 (Figs. 14 y 15). Además, ITINTEC fue substituido por INDECOP, e ININVI por SENCICO.

REFERENCIAS

1. Ensayo de Carga Lateral en Muros de Albañilería de Ladrillo No Reforzado - Variable: Carga Vertical. Convenio ITINTEC-PUCP, 1981.
2. Ensayos de Carga Lateral en Muros de Albañilería de Ladrillo Confinados por Elementos de Concreto Armado. Variable: Estudio de la Ductilidad. Ernesto Valle. Universidad Católica del Perú, 1981.
3. Ensayos de Compresión Diagonal en Muros de Albañilería de Ladrillo Confinados por Elementos de Concreto Armado. Variable: Refuerzo Vertical. Gallegos, Ríos, Casabonne, Uccelli, Icochea, Arango Ingenieros Civiles, 1980. Por publicar.
4. Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería. Norma Mexicana, 1977.
5. Specification for the Design and Construction of Load-Bearing Concrete Masonry.
6. Comportamiento Sísmico de Muros de Albañilería. R. Meli, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM.
7. Estudio de la Variabilidad en la Calidad de Ladrillo Producido en la Ciudad de Lima. Universidad Católica del Perú, 1981. Elena Sánchez Borea.
8. Normas Técnicas de Edificación - Norma E-070 Albañilería ININVI, Ministerio de Vivienda - NTE-82.
9. Reinforced Masonry Engineering Handbook. J.E. Amrhein Clay and Concrete Masonry.
10. Estudio Experimental sobre la Resistencia de Muros de Albañilería Sometidos a Carga Horizontal. L. Jorquera IDIEM, 1964.
11. Reinforced Brick Masonry Lateral Force Design. Por Plummer y Blume. Clay Brick Tile Association. San Francisco, California.
12. Cyclic Test of three different types of Masonry Walls. by H. Gallegos ind C. Casabonne. Perú

TABLA N° 1
RESUMEN DE LAS PRUEBAS DE CLASIFICACION DE LA UNIDAD

UNIDAD	A	B	C	CANTIDAD DE ESPECIMENES
Dimensión Promedio (cm)	Largo Ancho Altura	23.4(1.2%) 13.5(1.4%) 8.8(2.6%)	23.3(0.5%) 12.8(0.7%) 9.1(0.9%)	25.2(0.8%) 11.9(0.6%) 9.4(0.6%)
Resistencia a la compresión (Kg/cm ²)	57(28.1%)	145(16.7%)	215(19.8%)	6
Densidad (gr/cm ³)	1.74(3.8%)	1.94(0.6%)	1.94(0.9%)	5
Area Neta/Area Bruta (%)	100 (solido)	79 (solido)	65 (hueca)	5
Peso Natural (grs)	4,900	4,100	3,600	8
Absorción en 24 horas (%)	15	14	13	8
Succión (grs/200 cm ² Area Neta/min.)	70(34.5%)	75(14.3%)	60(9.1%)	5
Succión luego del tratamiento (grs/200 cm ² Area Neta/min.)	19(32%)	17(36%)	11(14%)	3

NOTAS: 1) Las cantidades entre paréntesis indican la dispersión porcentual de resultados.

2) La resistencia a la compresión está referida al área bruta para las unidades sólidas y al área neta para las unidades huecas.

3) La succión luego del tratamiento, fué medida al día siguiente del tratamiento en el momento del asentado.

TABLA N° 2
MORTEROS

TIPO	PROPORCION VOLUMETRICA CEMENTO CAL ARENA AGUA	SLUMP (PULG.)	RESISTENCIA PROMEDIO A LA COMPRESION A LOS 28 DIAS SOBRE 16 ESPECIMENES
0	1 0 5 2	6.5	82 Kg/cm ²
1	1 1 5 2	6.5	92 Kg/cm ²

TABLA N° 3
REFUERZO DE ACERO

(VALORES PROMEDIOS DE 3 ESPECIMENES)

DIAMETRO	CARACTERISTICAS	f_y (Kg/cm ²)	$f_{máximo}$ (Kg/cm ²)
1/4"	LISO	4450	6900
3/8"	CORRUGADO	5000	7315
1/2"	CORRUGADO	4370	6770

TABLA N° 4

IDENTIFICACION DE ESPECIMENES

SERIE UNIDAD - MORTERO	CARACTERISTICA		
	ESPESOR (cm)	MORTERO	CANTIDAD
A - 0	13.5	SIN CAL	CADA SERIE ESTABA CONSTITUIDA POR: 2 MUROS 5 MURETES 5 PILAS
B - 0	13.0		
C - 0	12.0		
A - 1	13.5	CON CAL	
B - 1	13.0		
C - 1	12.0		

TABLA N° 5

FASES DEL ENSAYO DE CARGA LATERAL EN MUROS

FASE	CARACTERISTICA		VELOCIDAD	TOPES EN EL DESPLAZAMIENTO LATERAL
1	MONOTONICA		EMPUJAR HASTA EL AGRIETAMIENTO	
2	MONOTONICA		JALAR HASTA EL AGRIETAMIENTO	
3	CICLICA		MINIMO 3 CICLOS HASTA ESTABILIZAR EL LAZO DE HISTERESIS	0.5 mm/min.
4				1 CICLO EN 4 MINUTOS
5				+ - 5 mm. + - 10 mm. + - 15 mm.

TABLA N° 6

RESISTENCIAS DE PILAS Y MURETES (Kg/cm²)

SERIE	PILAS			MURETES		
	\bar{f}_m	cv(%)	$f'm$	$\bar{v} m$	cv(%)	$v'm$
A - 0	41.2	3.8	40	5.76	5.0	5.47
A - 1	38.9	8.3	36	5.45	11.1	4.84
B - 0	75.1	9.4	68	10.44	9.8	9.41
B - 1	76.2	18.4	62	9.58	12.0	8.43
C - 0	98.8	3.1	96	10.72	10.9	9.56
C - 1	92.4	15.1	78	10.54	5.3	9.98

NOTAS : - Valores promedios : \bar{f}_m , $\bar{v} m$ (Kg/cm²)

- cv = desviación estandar/valor promedio

- Valores caracteristicos : $f'm$, $v'm$ (Kg/cm²)= valor promedio $\times (1-cv)$

SERIE	F	R	M	Valores Elásticos		R _D	Post-agrietamiento. Ciclo estable			
	v _F kg/cm ²	v _R kg/cm ²	v _M kg/cm ²	K _o ton/mm	G kg/cm ²		D	5mm	10mm	15mm
A-0	3.33	3.49	4.66	8.65	7950	2.13	v (kg/cm ²)	2.85	3.55	3.58
							K/K _o	0.21	0.13	0.09
A-1	3.01	3.42	4.38	9.45	8207	2.52	v (kg/cm ²)	2.47	3.53	3.81
							K/K _o	0.17	0.12	0.09
B-0	3.73	4.66	5.07	12.46	14025	2.32	v (kg/cm ²)	3.67	3.75	3.89
							K/K _o	0.18	0.09	0.06
B-1	3.78	4.69	6.25	12.35	17564	2.15	v (kg/cm ²)	4.34	4.52	4.23
							K/K _o	0.22	0.11	0.07
C-0	4.15	5.45	6.64	15.66	18094	2.45	v (kg/cm ²)	4.51	4.89	2.74
							K/K _o	0.17	0.09	0.03
C-1	4.32	4.96	5.94	13.89	16543	2.35	v (kg/cm ²)	4.44	4.91	4.03
							K/K _o	0.18	0.10	0.05

Fig.1.
Unidades utilizadas.

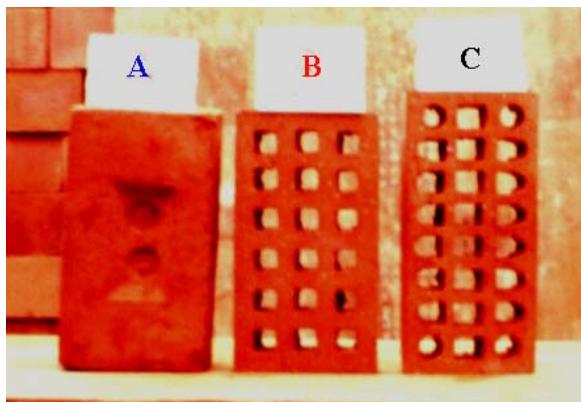


Fig.2. Pilas de la serie B (izquierda) y C (derecha).

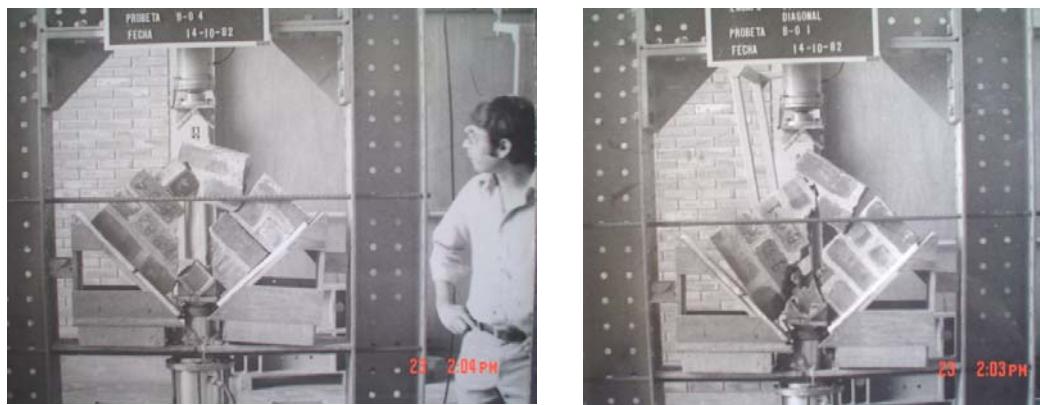


Fig.3. Muretes de la Serie B.

Fig.4
Vista global de los dispositivos empleados para el ensayo de carga lateral cíclica.

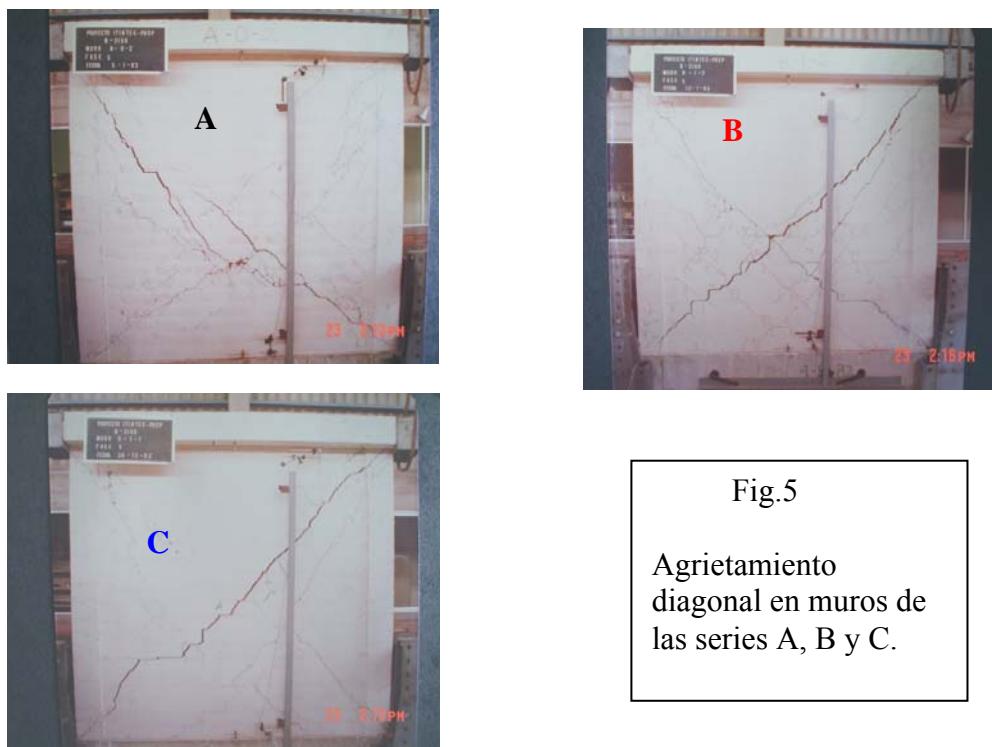


Fig.5
Agrietamiento diagonal en muros de las series A, B y C.

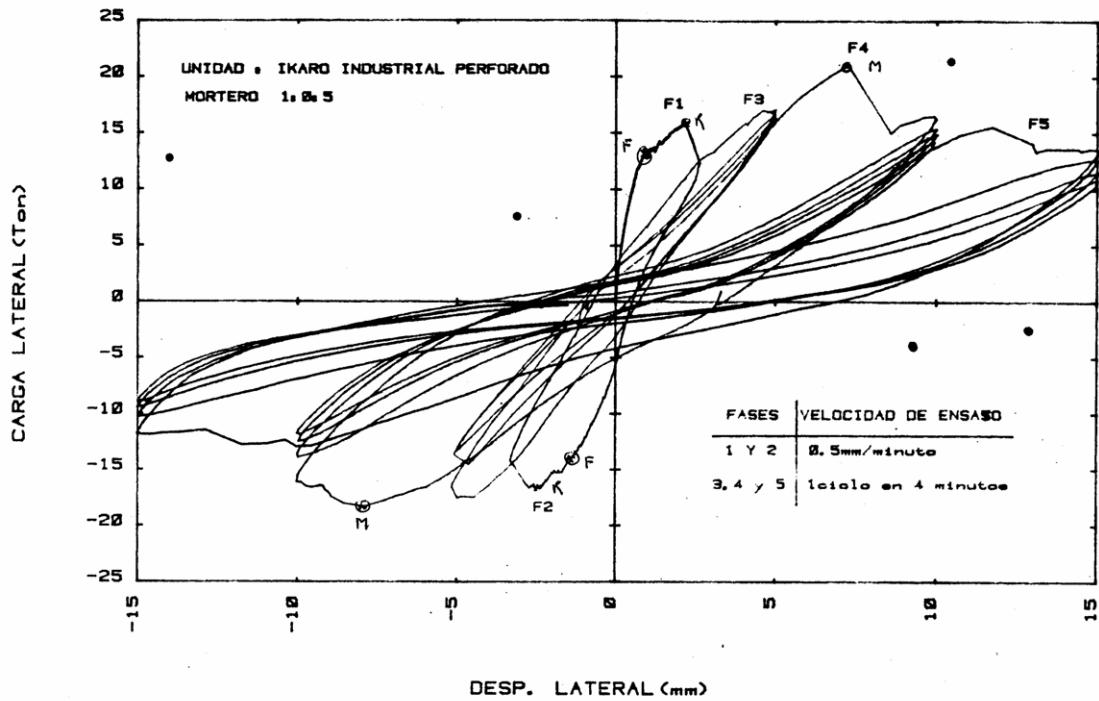


Fig.6. Fases del Ensayo. Ejemplo Muro C-0-1.

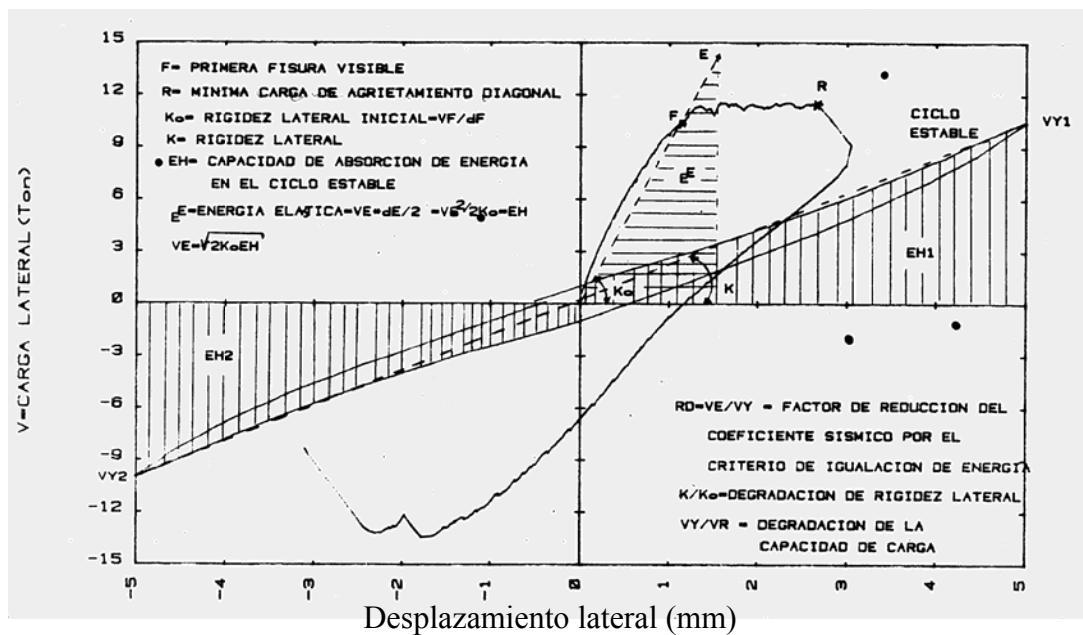


Fig.7. Definiciones. Ejemplo Muro A-1-1.

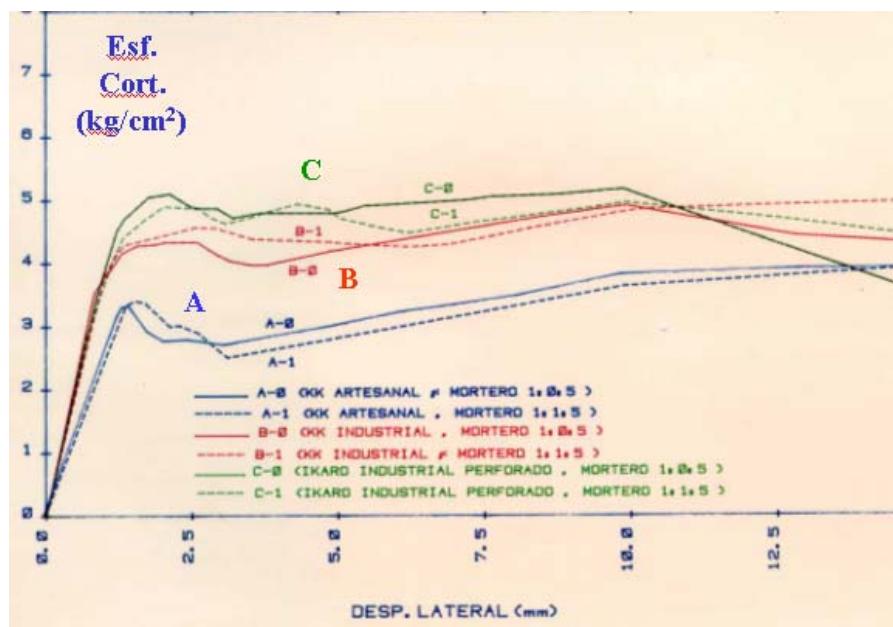


Fig.8. Envolvente de los esfuerzos cortantes para el promedio de 2 muros de las mismas características. Ciclo estable.

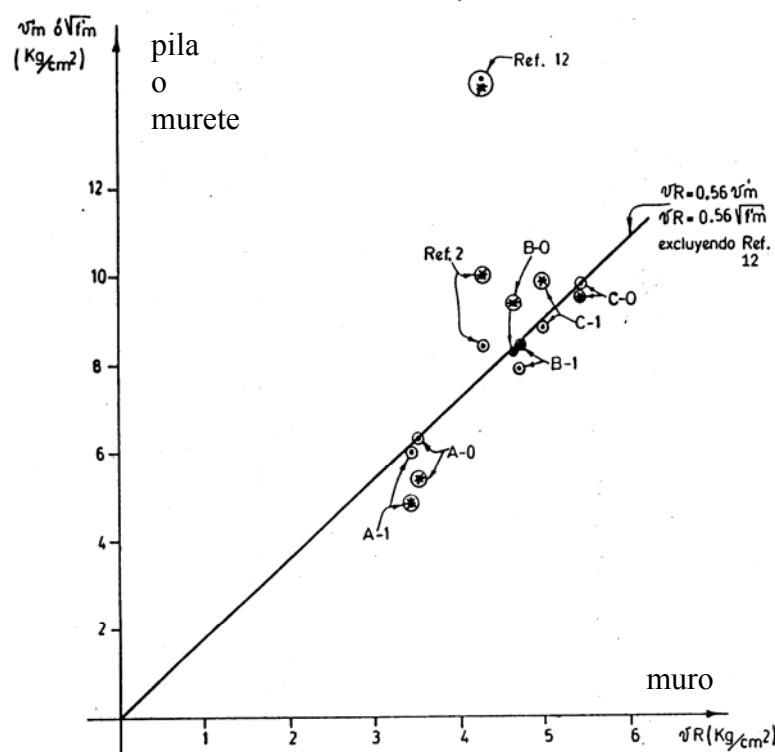


Fig.9. Correlación de resistencia Muro-Pila o Muro-Murete

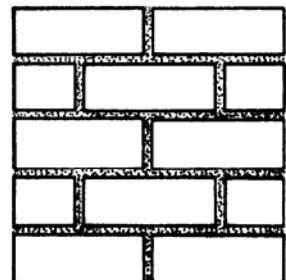
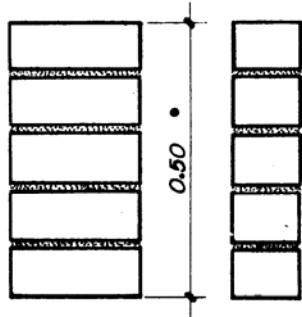
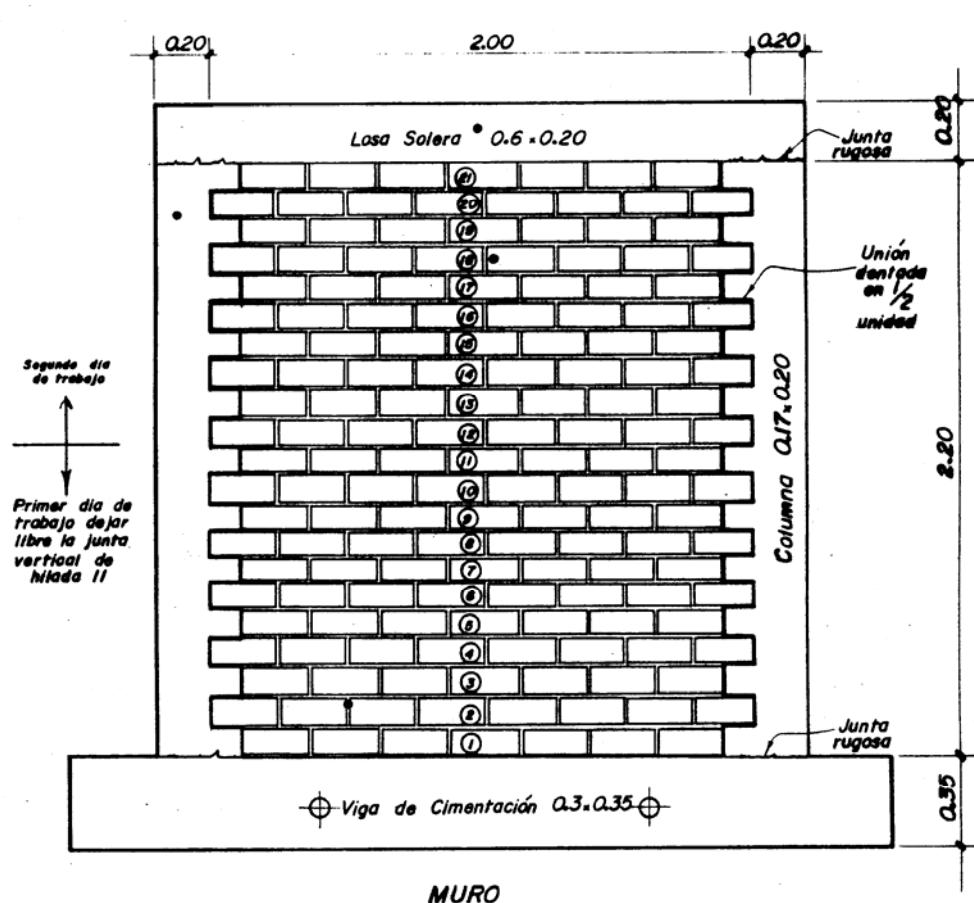


Fig.10. Características de los especímenes. Medidas en metros.

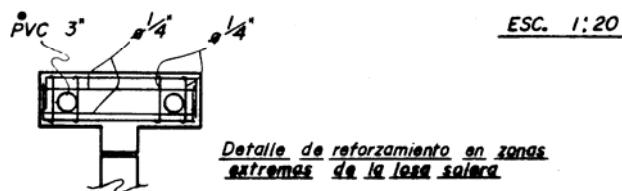
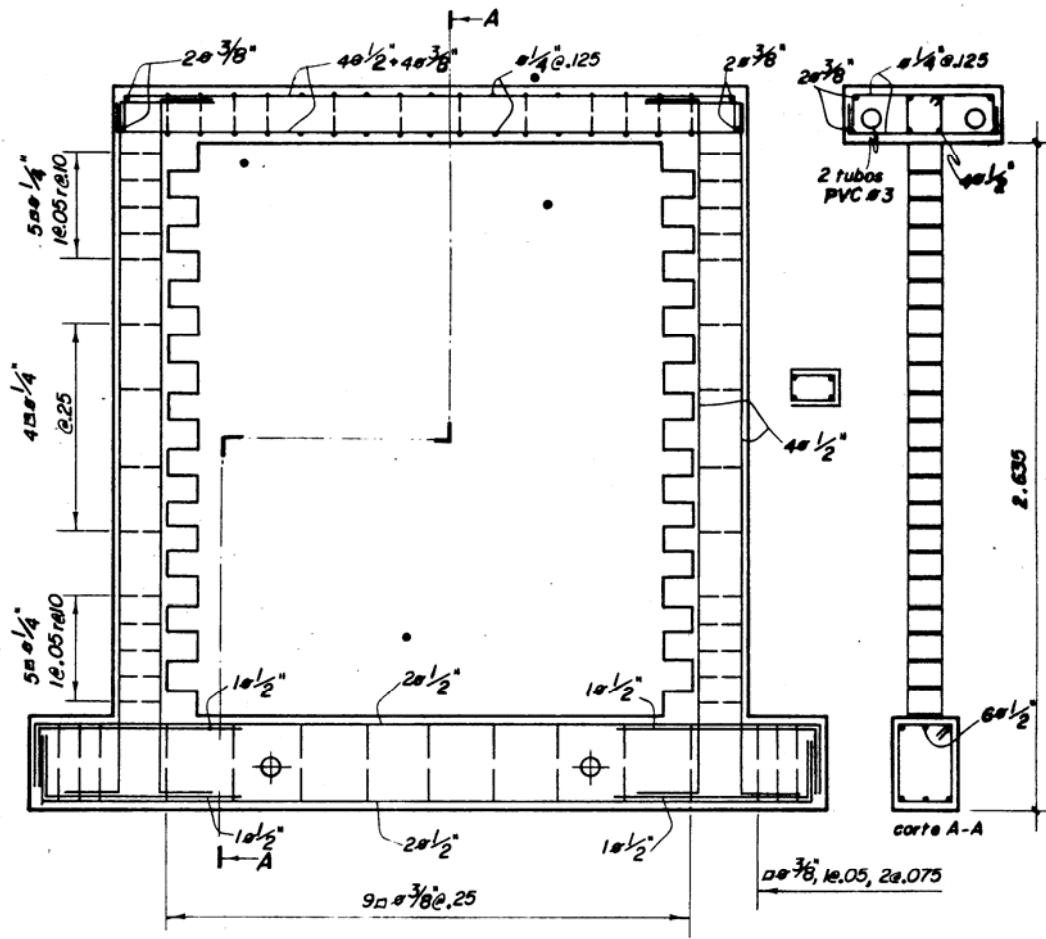


Fig.11. Refuerzo en los 12 muros. Serie A, B y C.

FIGURAS ADICIONALES AL ARTÍCULO

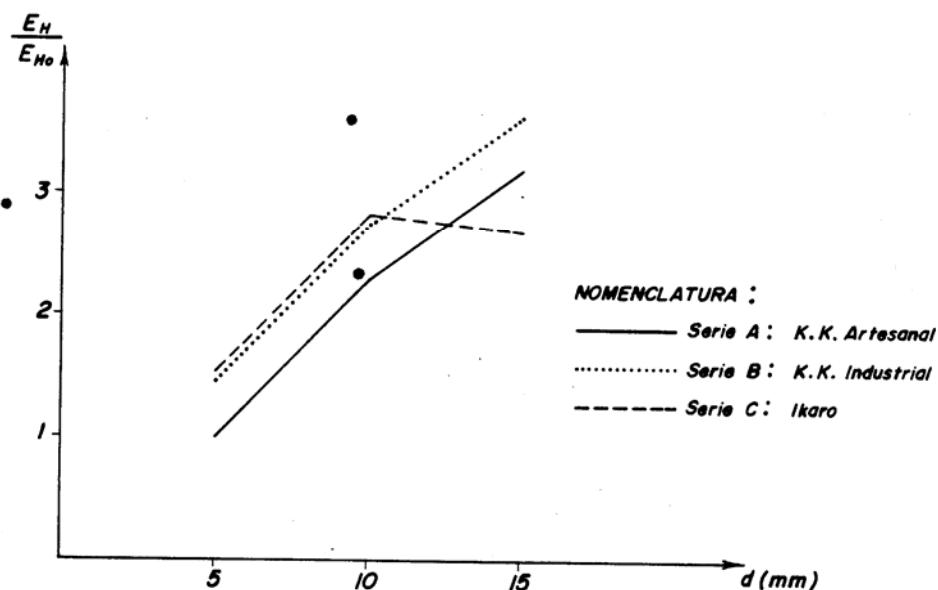


FIG. 12-CAPACIDAD DE ABSORCION DE ENERGIA E_H , RELATIVA A $E_{H_0}=24 \text{ ton} \times \text{mm}$

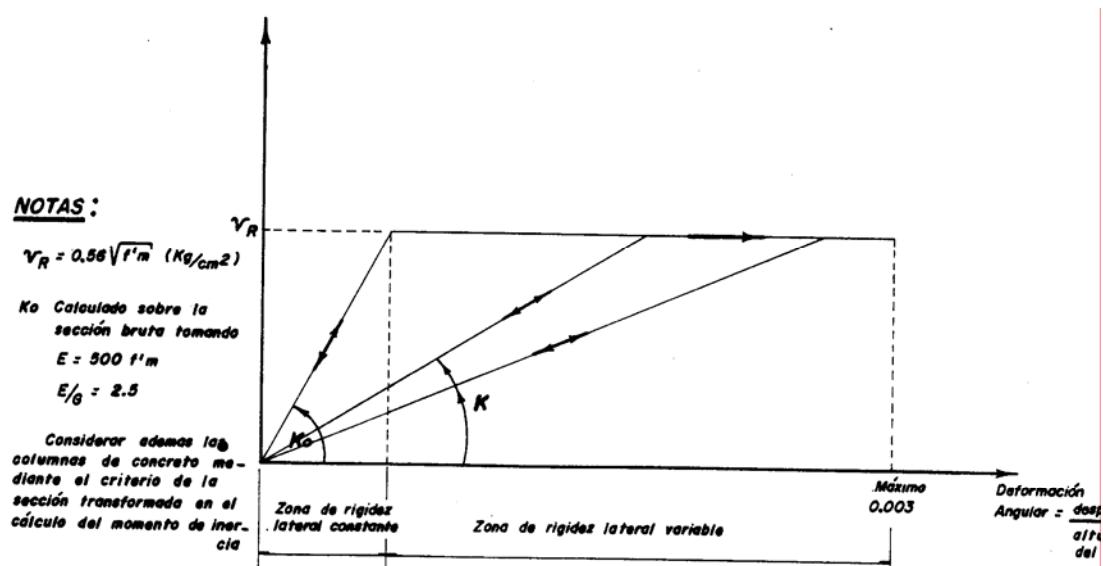


FIG.13-MODELO ELASTOPLASTICO PROPUESTO PARA ALBANILERIA CON LADRILLOS DE ARCILLA CONFINADA POR ELEMENTOS DE CONCRETO ARMADO.

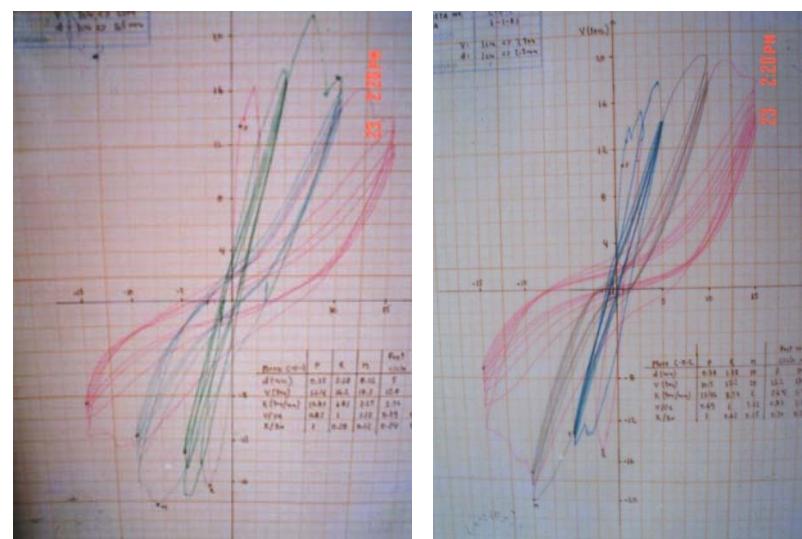


Fig.14. Muro de la serie C. El deterioro de los ladrillos (con 35% de huecos) y de las columnas con concreto de 140kg/cm², motivaron una fuerte degradación de resistencia al corte. En la Norma E.070 del 2006, la resistencia mínima del concreto es 175 kg/cm² y los ladrillos deben tener como máximo 30% de huecos.

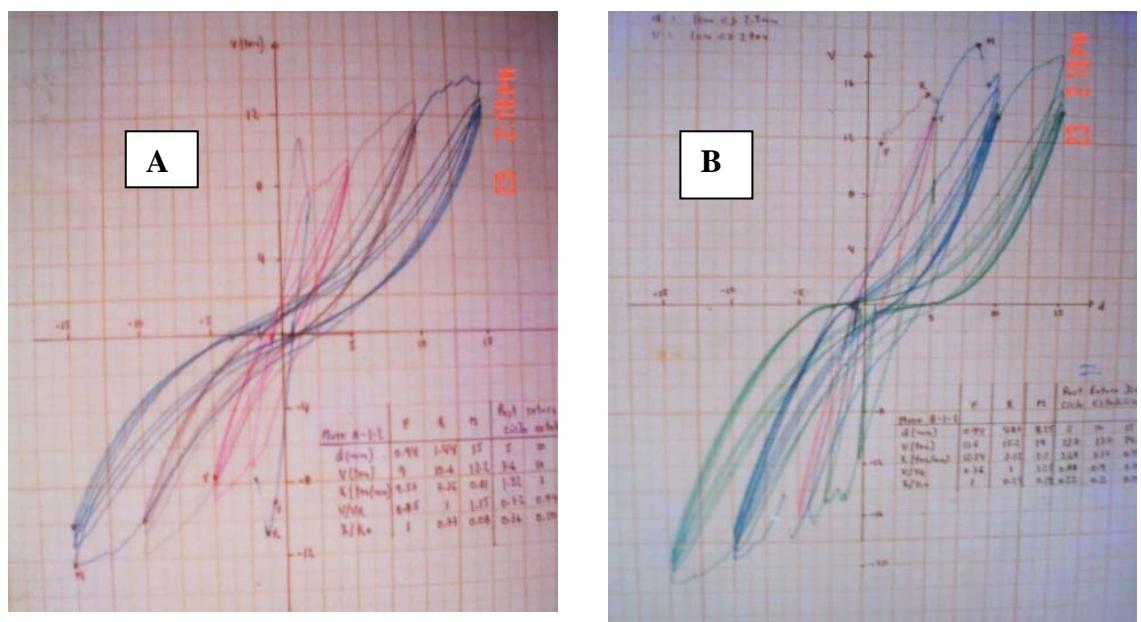


Fig.15. En los muros de la series A y B, con ladrillos sólidos, no se apreció degradación de resistencia.



Fig.16. Secuencia seguida en la construcción de los muros.