

MEJORA DE LA ADHERENCIA LADRILLO-MORTERO EN MUROS CONFINADOS CONSTRUIDOS CON UNIDADES SILICO-CALCAREAS

Por: **Ursula Deza, Gaby Quesada y Angel San Bartolomé**
Pontificia Universidad Católica del Perú

RESUMEN

Los ladrillos sílico-calcáreos pueden calificarse como unidades ecológicas, porque no utilizan suelo de cultivo en su materia prima; sin embargo, sus superficies lucen prácticamente vitrificadas, lo que genera una reducción en su adherencia con el mortero, motivo por el cual no se aprovecha las ventajas de esta unidad como son: su perfección geométrica, así como su alta resistencia a compresión y contra el intemperismo. Por esta razón, el proyecto tuvo por objetivo estudiar una serie de alternativas que permitan mejorar la resistencia al corte, para lo cual se realizaron ensayos de compresión diagonal sobre 36 muretes y de carga lateral cíclica sobre 3 muros confinados a escala natural. Paralelamente, como tema adicional, se efectuó una comparación entre el comportamiento sísmico-experimental de un muro confinado y otro de albañilería armada interiormente.

1. LINEAMIENTOS GENERALES

En este proyecto se busca alternativas a utilizar en la construcción de los muros de albañilería confinada empleando unidades sílico-calcáreas, de tal modo que produzcan una mejora en la adherencia mortero-unidad, lo que repercutirá en un incremento de la resistencia a fuerza cortante cuando los muros se vean sujetos a cargas sísmicas coplanares. Para este estudio, se seleccionaron tres unidades sílico-calcáreas (Fig.2) de uso estructural, clasificadas como tipo IV según la Norma E-070; estas unidades presentaban distintas características en su cara de asiento, y fueron:

1. King Kong Normal (KKN), con dimensiones 24x14x9 cm, de caras lisas, 100% sólidos, $f'b = 162 \text{ kg/cm}^2$, succión = 41 gr / 200 $\text{cm}^2\text{-min}$.
2. King Kong con una hendidura en una de las caras de asiento (KKH), con dimensiones 25x14x9 cm, $f'b = 155 \text{ kg/cm}^2$, succión = 19 gr / 200 $\text{cm}^2\text{-min}$.
3. Dédalo (D), con dimensiones 24x11.5x14 cm, con una cara lisa y la opuesta con 14 perforaciones de 2.5 cm de diámetro, $f'b = 144 \text{ kg/cm}^2$, succión = 26 gr / 200 $\text{cm}^2\text{-min}$

En primer lugar, el estudio se realizó sobre pequeños especímenes (Pilas y Muretes), investigándose la influencia de dos mezclas de mortero, dosificados en volúmenes de cemento, cal y arena gruesa en proporciones: 1 : ½ : 3; y, 1 : ½ : 4. Para la construcción de las Pilas y Muretes se adoptaron dos tratamientos en la unidad:

1. **SATURADO SUPERFICIAL (H)**. Sobre la ruma de unidades se vertió agua, cuidando de que no se asentaran hasta que el agua haya sido absorbida; bajo este tratamiento la succión bajó a 29,13 y 18 gr/200 $\text{cm}^2\text{-min}$, para las unidades KKN, KKH y D, respectivamente.
2. **LIMPIEZA CON BROCHA (B)**. Este procedimiento es recomendado por el fabricante. Con una brocha se limpiaron las caras de asiento de las unidades, retirándoles el polvo.

En total se elaboraron doce muestras y para cada una se construyeron tres especímenes, dando en total 36 pilas y 36 muretes. Con los resultados encontrados se determinó el tratamiento ideal al que debe someterse el ladrillo sílico-calcáreo y el mortero adecuado para la construcción y ensayo de tres muros de albañilería confinada a escala natural.

2. ALBAÑILERIA SIMPLE

2.1 Ensayo de Pilas a Compresión Axial. Las pilas tuvieron una esbeltez del orden de 5. A continuación, se muestran los resultados promedios para los doce muestras, donde "H" y "B" identifican al tipo de tratamiento, mientras que el número 3 o 4 identifica la cantidad volumétrica de arena utilizada en el mortero, y "E" es el módulo de elasticidad.

UNIDAD	PILA	f'm (kg/cm ²)	E (kg/cm ²)	E / f'm	Promedio
King Kong Normal (KKN)	PH3	95	57588	606	f'm = 109 kg/cm ² E / f'm = 616
	PB3	117	66115	565	
	PH4	119	70442	592	
	PB4	105	73939	704	
King Kong con Hendidura (KKH)	PH3	85	53930	634	f'm = 94 kg/cm ² E / f'm = 611
	PB3	107	64964	607	
	PH4	87	51638	593	
	PB4	97	35096	---	
Dédalo (D)	PH3	115	65763	572	f'm = 103 kg/cm ² E / f'm = 593
	PB3	97	51624	532	
	PH4	97	59793	616	
	PB4	104	67981	654	

La falla ocurrida en las pilas fue a través de una grieta vertical. En promedio se puede observar que el valor f'm resulta ser prácticamente independiente del tipo de unidad, del tratamiento seguido y del tipo de mortero, lo propio ocurre con la relación E / f'm = 600, la cual es mayor que la especificada en la Norma E-070 (E / f'm = 500).

2.2 Ensayo de Muretes a Compresión Diagonal. Las unidades se asentaron en aparejo de sogá, y las dimensiones de los muretes fueron aproximadamente 75x75 cm. A continuación, se muestran los resultados promedios para los doce muestras, donde "H" y "B" identifican al tipo de tratamiento, mientras que el número 3 o 4 identifica la cantidad volumétrica de arena utilizada en el mortero, y "G" es el módulo de corte.

UNIDAD	MURETES	v'm (kg/cm ²)	G (kg/cm ²)	Tipo de Falla
King Kong Normal (KKN)	MH3	6.5	18699	I
	MB3	5.3	18516	I
	MH4	14.5	21963	II
	MB4	9.7	20365	I
King Kong con Hendidura (KKH)	MH3	7.3	22931	I
	MB3	5.3	21903	I
	MH4	5.5	20710	I
	MB4	4.9	21989	I
Dédalo (D)	MH3	8.0	15750	I
	MB3	7.3	16734	I
	MH4	9.8	16439	III
	MB4	8.2	14544	I

- **Tipo I:** "Falla por Corte", grietas escalonadas a través de las juntas (Fig.3).
- **Tipo II:** "Falla por Tracción Diagonal", la grieta atraviesa a las juntas y el ladrillo.
- **Tipo III:** "Falla Mixta", se presentan en simultáneo las falla tipo I y II (Fig.4).

En líneas generales, el tratamiento idóneo para el asentado de las unidades sílico-calcáreas King Kong Normal y Dédalo es el denominado "Saturado Superficial (H)", al haberse encontrado las mayores resistencias a compresión diagonal; asimismo, el tipo de falla asociado a ese tratamiento demuestra haberse mejorado considerablemente la adherencia entre el mortero y la unidad. Con éstas unidades y empleando mortero 1 : ½ : 4 se construyeron tres muros de albañilería confinada a escala natural, descartándose el empleo de las unidades King Kong con hendidura (KKH) por estar fuera de producción.

3. MUROS DE ALBAÑILERÍA CONFINADA A ESCALA NATURAL

3.1 Descripción de los Especímenes. Los muros se denominaron MU1, MU2 y MU3, con dimensiones de 2.60 x 2.60 m. (Fig.1), en aparejo de soga. En el muro MU1 se utilizó la unidad Dédalo (espesor 11.5 cm), mientras que en los muros MU2 y MU3 se utilizó King Kong Normal (espesor 14 cm). La conexión entre la columna y la albañilería fue:

- Muros MU1 y MU2: Conexión a ras, con chicotes de ϕ 6 mm cada 2 hiladas (Fig.5).
- Muro MU3: Conexión dentada, con dientes de 5 cm de largo.

Las columnas de confinamiento ($f'c = 187 \text{ kg/cm}^2$) tuvieron un peralte de 30 cm y estuvieron reforzadas con 4 ϕ ½ " y estribos \square ϕ 6 mm, 1 @ 5, 4 @ 10 el resto @ 20 cm. Las vigas soleras tuvieron 20 cm de peralte y el mismo refuerzo que las columnas.

3.2 Ensayo de Muros. El ensayo realizado fue de carga lateral cíclica (ver la Fig.6 y los Gráficos 1, 2 y 3), sin carga vertical, sometiendo al muro a varias fases de desplazamiento lateral controlado. Por cada fase se aplicaron 3 ciclos hasta que el lazo histerético se estabilice. El ensayo culminó cuando la carga lateral degradó en 30%. Las fases fueron:

FASE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
MU1 δ (mm)	0.50	1.50	3.00	5.50	8.00	10.50	13.00	15.50	18.00	20.50	23.00
MU2 δ (mm)	0.50	1.50	3.00	5.50	8.00	10.50	13.00	15.50	18.00	--	--
MU3 δ (mm)	0.50	1.50	3.00	5.50	8.00	10.50	13.00	15.50	18.00	20.50	

4. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE MUROS

4.1 Rigidez Lateral Inicial (K_0). Para evaluar la rigidez lateral teórica se aplicó el criterio de la sección transformada, reemplazando a las columnas por secciones equivalentes de albañilería. El módulo de elasticidad "E" y el módulo de corte "G" fueron calculados con las expresiones reglamentarias $E = 500 f'm$, $G = 0.4 E$. Luego se aplicó la siguiente expresión correspondiente a un muro en voladizo (H es la altura del muro y A es el área de corte):

$$K_0 \text{ teórico} = 1 / [(H^3 / 3 E I) + (H / A G)] \text{ (ton/mm)}$$

Obteniéndose:

MURO	K_0 teórico (ton/mm)	K_0 ensayo (ton/mm)	% Error
MU1	16.35	13.64	20%
MU2	20.30	11.16	82%
MU3	20.30	16.96	20%

4.2 Primera Fisura por Flexión (punto F). Para predecir la carga lateral (V) que produce esta fisura, se igualó el esfuerzo de tracción máximo en la sección transformada a la resistencia a tracción por flexión del concreto ($2 \sqrt{f'c}$, en kg/cm^2), obteniéndose bastante diferencia en la carga V, pero los desplazamientos asociados fueron similares:

MURO	V teórico (kg)	d teórico (mm)	V ensayo (kg)	d ensayo (mm)
MU1	9120	0.558	6766	0.629
MU2	11510	0.567	6474	0.560
MU3	11510	0.567	6212	0.440

4.3 Agrietamiento Diagonal (punto R). Este punto se caracteriza por una degradación severa de la rigidez lateral; experimentalmente se encontraron los siguientes resultados:

MURO	DESPLAZAMIENTO (mm)	V _R (ton)	v _R (kg/cm ²)
MU1	2.468	10.43	3.5
MU2	2.490	11.90	3.3
MU3	2.566	11.58	3.2

4.4 Capacidad Máxima (punto M). Del Gráfico 4 se encontraron los siguientes resultados:

MURO	DESPLAZAMIENTO (mm)	V _M (Ton)	v _M (kg/cm ²)
MU1	10.150	17.4	5.8
MU2	9.943	18.4	5.1
MU3	7.328	15.6	4.3

5. COMPARACION DE MUROS DE ALBAÑILERIA ARMADA Y CONFINADA

Los resultados del muro confinado MG1 fueron comparados contra los obtenidos en la Ref.1 para el muro armado MU1. Ambos muros tuvieron la misma técnica de ensayo.

5.1. Características del Muro Armado MG1

- Dimensiones: 2.70 x 2.60 x 0.12 m (Fig.7)
- Unidad de Albañilería limpiada con brocha: Estándar, Tipo V, $f'_{b} = 190 \text{ kg/cm}^2$
- Refuerzo vertical: 10 ϕ 3/8", repartidos a lo largo del muro
- Refuerzo horizontal: 2 ϕ 6 mm cada 3 hiladas
- Mortero Líquido en todos los alvéolos: 1 : 1/10 : 3 (cemento : cal : arena)
- Mortero en las juntas: 1 : 1 : 4 (cemento: cal: arena)

5.2 Comparación de Resultados. Puesto que ambos muros tenían distinta sección transversal, la comparación se hizo a nivel de esfuerzos cortantes (Gráfico 5) y la rigidez lateral inicial (K_0) se dividió entre el área de la sección de cada espécimen, resultando:

ALBAÑILERIA	MURO	Ko (Ton/mm x m ²)
ARMADA	MG1	37.41
CONFINADA	MU1	45.48

MURO	PUNTO F		PUNTO R		PUNTO M	
	d (mm)	v (kg/cm ²)	d (mm)	v (kg/cm ²)	d (mm)	v (kg/cm ²)
ARMADO	0.198	0.73	1.927	2.75	7.63	4.73
CONFINADO	0.629	2.27	2.468	3.50	10.15	5.83

6. CONCLUSIONES

Previamente, debe indicarse que las unidades sílico-calcáreas de proyectos pasados presentaban una superficie casi vitrificada, con una succión inicial por debajo de 15 gr/200cm²-min, por lo que el fabricante especificaba que el tratamiento previo al asentado debía ser una limpieza con brocha. Actualmente se tiene entendido que se ha variado la dosificación de los componentes de esta unidad, volviéndose más porosa, lo que ha hecho que incluso su resistencia a compresión disminuya (pasando del tipo V al IV). Entonces, este cambio obliga a que las unidades actuales deban regarse antes de ser asentadas.

6.1 Tratamiento de las Unidades. Inicialmente se plantearon dos tipos de tratamientos, denominados "saturado superficial" y "limpiado con brocha", puesto que los resultados de

los ensayos de compresión diagonal proporcionaron las mayores resistencias al corte (v'_m) para unidades tratadas con agua, se recomienda utilizar ese tratamiento empleando mortero en proporción volumétrica 1 : $\frac{1}{2}$: 4 (cemento : cal : arena), indicándose que con el uso de mortero 1 : $\frac{1}{2}$: 3, no se logró mejorar la adherencia ladrillo-mortero.

En cuanto los muros, cabe mencionar que con el tratamiento "saturado superficial", las fallas fueron por corte, ocurriendo escalonadamente por la junta y atravesando también a las unidades ("Falla Mixta"). En investigaciones anteriores realizadas en la Universidad Católica (Fig.8, Ref.3), se observó que en los muros confinados construidos con unidades sílico-calcáreas, el agrietamiento por corte era escalonado, asimismo, se formaban fisuras en la zona de conexión columna-albañilería, que resultan peligrosas para mantener la integridad del muro. En cambio, en esta investigación, no se presentaron esas fisuras (Fig.6), debido a la mejora lograda en la adherencia con el tratamiento "saturado superficial" utilizado.

Respecto al ladrillo "Dédalo", cabe la posibilidad de que si sus dos superficies de asentado tuvieran perforaciones, podría mejorarse su engrape con el mortero, lo que elevaría su resistencia al corte. A pesar de que esta unidad presentaba una de sus caras de asentado lisa, la resistencia unitaria al agrietamiento diagonal de los muros fue 6% mayor que la correspondiente al muro construido con ladrillo King Kong Normal, lo propio ocurrió con la resistencia máxima, donde el incremento fue 14%.

6.2 Conexión Columna-Albañilería. El uso de la conexión a ras, agregando "chicotes" de anclaje en los muros MU1 y MU2, permitió el desarrollo de una adherencia adecuada entre la columna y la albañilería. En el muro MU3 se usó la conexión dentada con una longitud de diente de 5 cm, lográndose iguales resultados. Por lo que al comparar económicamente la conexión a ras con la conexión dentada, ésta última resulta más conveniente; sin embargo, la conexión dentada puede traer problemas constructivos en obra, como la formación de cangrejas bajo los dientes, la rotura de los dientes por efectos del chuceo o vibrado y la formación de juntas frías por la caída de desperdicios de mortero sobre los dientes, por lo tanto, se recomienda utilizar la conexión a ras con "mechas" de anclaje.

6.3 Comportamiento Elástico de los Muros Confinados. Empleando el criterio de la sección transformada, se pudo predecir con 20 % de error la rigidez lateral inicial K_0 para los muros MU1 y MU3; sin embargo, este error fue 82% para el muro MU2, por lo que se presume que hayan existido microfisuras en las columnas de ese muro, ya que sus características eran similares al muro MU3 (excepto la conexión columna-albañilería). Por otro lado, la carga lateral asociada a la primera fisura visible (punto F) no pudo ser predecida, posiblemente esto se deba a la alta variabilidad que tiene el concreto en su resistencia a tracción por flexión ($2\sqrt{f'_c}$).

6.4 Comportamiento Inelástico de los Muros. La mayor cantidad de fisuras se produjeron para un desplazamiento de 10.5 mm, por lo que se propone adoptar como límite de reparabilidad una distorsión angular igual a 1/200, destacando que para esa distorsión no existe trituración de la albañilería, tampoco en las columnas; mientras que para una distorsión de 1/1000 se produjo el agrietamiento diagonal (punto R) en los tres muros

En la Ref.2 se propone la expresión $v_R = 0.5 v'_m$ (en kg/cm^2) para determinar la resistencia al corte asociada al agrietamiento diagonal de los muros confinados compuestos por unidades de arcilla, sin carga vertical, donde v'_m es la resistencia a compresión diagonal de los muretes. Pero, en este proyecto se obtuvo para el muro MU1, con unidades Dédalo, la expresión $v_R = 0.35 v'_m$ y para los muros MU2 y MU3, con unidades King Kong Normal (maciza), se obtuvo $v_R = 0.23 v'_m$; por lo que se concluye que esta expresión depende del tipo de engrape que ofrecen los ladrillos en las caras de asiento y el coeficiente 0.35 para el

ladrillo Dédalo, podría incrementarse si existiese perforaciones en sus dos superficies de asiento que permitan cambiar su forma de falla "Mixta" a una falla por tracción diagonal.

6.4 Comparación del Muro Armado (MG1) con el Muro Confinado (MU1). En el rango elástico, se puede afirmar que en el muro confinado, las columnas son las que determinan un mejor comportamiento incrementando su rigidez lateral hasta en 22% con respecto al muro armado. Asimismo, en el muro confinado la primera fisura por flexión apareció para un desplazamiento y esfuerzo cortante tres veces superior a los que se registraron en el muro armado; esto significa que en el muro armado la primera fisura aparece en una etapa temprana de sollicitación.

En cuanto al comportamiento en el rango inelástico, los resultados reflejan que en el muro confinado las resistencias al agrietamiento diagonal y máxima fueron 25% mayores que las obtenidas en el muro armado. Adicionalmente, después de haberse producido la capacidad máxima de carga en el muro armado (MG1), ésta decayó considerablemente, porque se generó una falla por traslape del refuerzo vertical; en tanto que en el muro confinado (MU1) esta falla no ocurrió debido a que el refuerzo vertical era continuo; más bien, en el muro confinado el daño se concentró en los talones de las columnas. Por otro lado, hasta el instante en que la carga lateral máxima degradó en 25%, la capacidad de deformación inelástica del muro confinado alcanzó 20 mm, mientras que en el muro armado tan sólo fue 13 mm, lo que significa que el muro confinado tiene mayor ductilidad que el armado.

7. REFERENCIAS

1. Efectos de la Carga Vertical sobre el Comportamiento Sísmico de los Muros de Albañilería Armada Construidos con Unidades Sílico-Calcáreas, por Jaime Tumialán, Tesis de Investigación desarrollada en la Pontificia Universidad Católica del Perú, 1996. Reporte Presentado en el XI Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Trujillo, 1997.
2. Construcciones de Albañilería, Comportamiento Sísmico y Diseño Estructural. A. San Bartolomé. Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú, 1994.
3. Pruebas Cíclicas de Tres Tipos Diferentes de Muros de Albañilería. H. Gallegos y C. Casabonne. V Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Tacna, 1984.

Gráfico 1
Lazos
histeréticos
V-D, muro
MU1

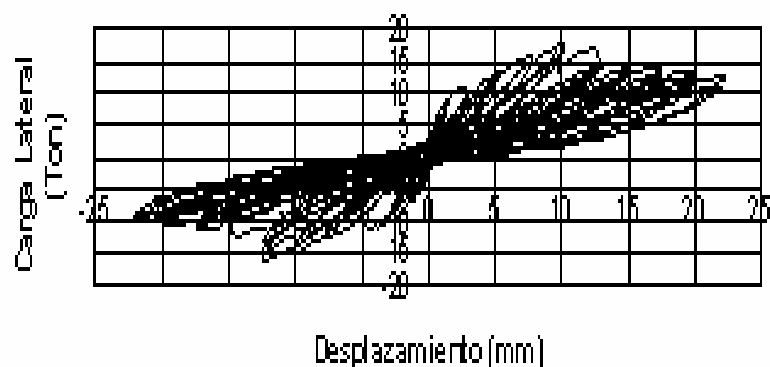


Gráfico 2
Lazos histeréticos V-D del muro MU2



Gráfico 3
Lazos histeréticos V-D del muro MU3

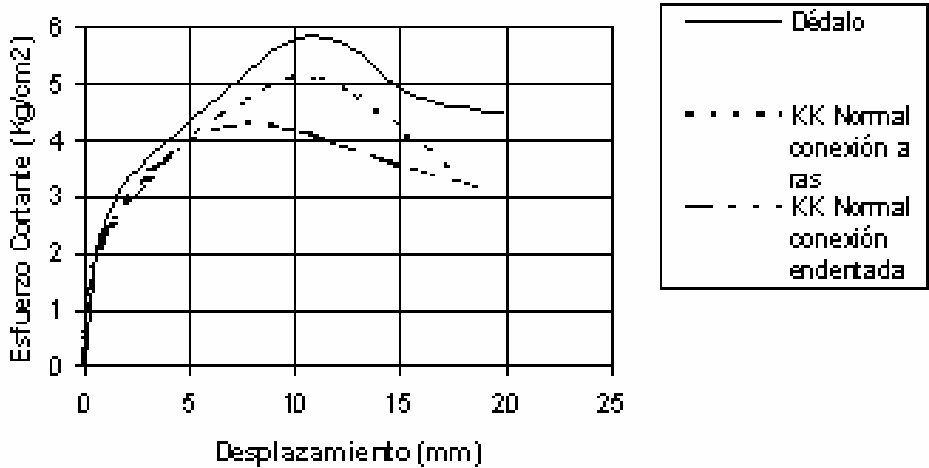


Gráfico 4. Envoltente V-D del primer ciclo. Muros MU1, MU2 y MU3.

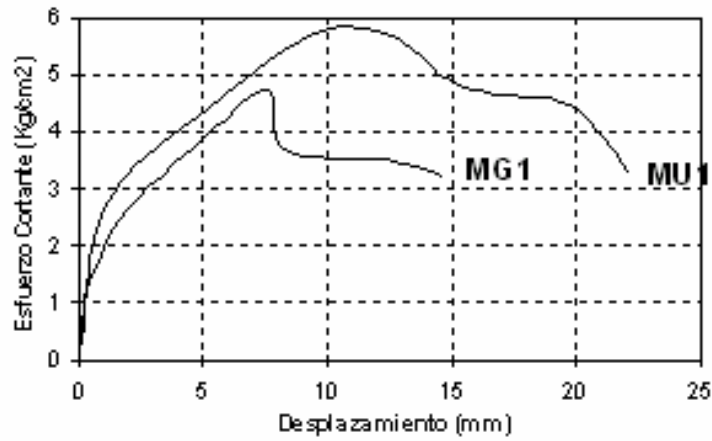


Gráfico 5. Envolvente V-D para el Muro Armado MG1 (Ref.1) y el Muro Confinado MU1.

Fig. 1
Características de los muros a escala natural

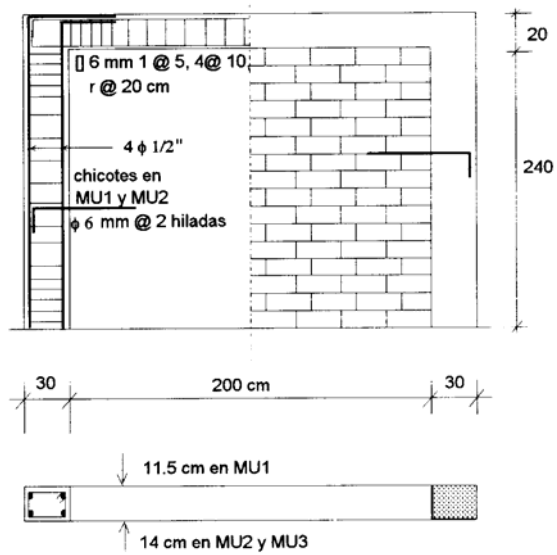


Fig.2. Superficies de Asentado de las Unidades KKH, D y KKN.



Fig.3. Falla Escalonada en un Murete.



Fig.4. Falla por Tracción Diagonal en un Murete.



Fig.5. Conexión a Ras con Mechas de Anclaje.



Fig.6. Muro MU1. Fase 10.

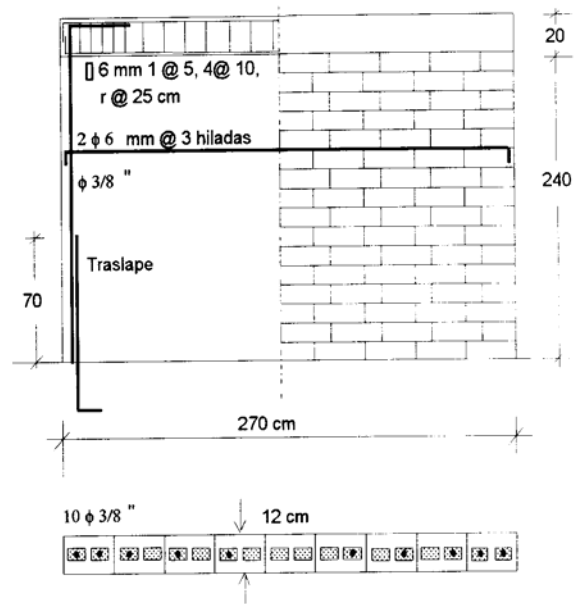


Fig.7. Muro Armado MG1 de la Ref.1.



Fig.8. Muro Confinado de la Ref.3.



Fig.9. Cangrejera en la Conexión Dentada. Muro de la Ref.3.



Fig.10. Regado de Unidades (tratamiento "H").