

COMPORTAMIENTO A FUERZA CORTANTE DE MURETES DE CONCRETO REFORZADOS CON MALLA ELECTROSOLDADA, ACERO DÚCTIL Y FIBRA METÁLICA

Por: Ángel San Bartolomé, Alejandro Muñoz y Fernando Madalengoitia

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Departamento de Ingeniería – Sección Civil

RESUMEN

Mediante ensayos de compresión diagonal efectuados en 18 muretes cuadrados, de 70 cm de lado y 10 cm de espesor, reforzados con: malla electrosoldada, acero dúctil y fibra de acero, se estudió la influencia del refuerzo en su comportamiento a fuerza cortante pura.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad se vienen construyendo en Lima numerosos edificios de mediana altura, estructurados con muros de concreto de 10 cm de espesor (Fig.1), reforzados con malla electrosoldada en su parte central y varillas verticales de acero dúctil en los extremos. Esta tendencia por el uso de mallas electrosoldada se debe a la reducción de horas-hombre en la partida de habilitación e instalación del acero de refuerzo.

Fig.1

Edificio construido con muros delgados de concreto y vista de la malla electrosoldada.



En estos edificios existen muros con secciones transversales en forma de **T**, **L** o **I** que podrían tener una falla por fuerza cortante, debido a la sobre resistencia a flexión proveniente del refuerzo y la carga vertical existentes en los muros perpendiculares al analizado. Puesto que se desconoce el comportamiento inelástico a fuerza cortante que tendrían los muros reforzados con estas mallas, se decidió realizar un proyecto de largo alcance, iniciándolo con el estudio de muretes reforzados con malla electrosoldada, sometidos a corte puro en ensayos de compresión diagonal.

Además, con fines comparativos, se ensayaron a compresión diagonal muretes de concreto reforzados con malla de acero dúctil, con cuantías equivalentes al de las mallas electrosoldadas. Como se sabe, el acero convencional posee un comportamiento inelástico dúctil a la tracción pura, con un escalón de fluencia prolongado, mientras que el acero de las mallas electrosoldadas posee una mayor resistencia a la tracción, pero carece de escalón de fluencia definido.

Como una variable adicional, se estudió el comportamiento a cortante puro de muretes reforzados con fibra metálica (Fig.2), con la finalidad de analizar la posibilidad de utilizar fibra de acero en reemplazo de la malla electrosoldada, ya que con el uso de esta fibra se reduciría aún más las horas-hombre involucradas en la partida de instalación de la malla, además de evitar la congestión de

refuerzo que podrían causar cangrejas en los muros delgados (Fig.3), y reducir la posible generación de fisuras por contracción de secado del concreto.



Fig.2. Fibra de acero Dramix



Fig.3. Cangrejas en muros delgados.

También se ensayaron a compresión diagonal muretes de concreto puro (sin ningún tipo de refuerzo), los resultados obtenidos en estos muretes fueron tomados como patrón de comparación.

2. PARÁMETROS ANALIZADOS

Se analizaron 6 parámetros clasificados según el tipo refuerzo y su cuantía respectiva. Por cada parámetro se construyeron 3 muretes cuadrados de 70 cm de lado y 10 cm de espesor, dando un total de 18 muretes. En la tabla 1 se presentan los parámetros analizados, el tipo de refuerzo, la nomenclatura asignada a los muretes y la cuantía de refuerzo empleada.

TABLA 1. PARÁMETROS ANALIZADOS						
PARÁMETRO	I	II	III	IV	V	VI
MURETES	M1 a M3	M4 a M6	M7 a M9	M10 a M12	M13 a M15	M16 a M18
REFUERZO	Concreto Puro	Malla electrosoldada Q257 φ 7mm@15cm	Malla electrosoldada Q128 φ 7mm@30cm	Malla de acero dúctil φ 8mm@16.5cm	Malla de acero dúctil φ 8mm@33cm	Fibra metálica
CUANTÍA	---	0.257 %	0.128 %	0.305 %	0.152 %	30 kg/m ³

Cabe señalar que la mayor cuantía (19%) que tienen los muretes con acero dúctil (IV y V) respecto a los reforzados con malla electrosoldada (II y III) se debe a que el acero dúctil presenta una resistencia a la fluencia ($f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$) 19% menor que la correspondiente al acero de la malla electrosoldada ($f_y = 5000 \text{ kg/cm}^2$, información proporcionada por el fabricante). Adicionalmente, las cuantías en los parámetros III y V son menores que el valor mínimo especificado por la Ref.1.

3. MATERIALES

3.1 Concreto

Los resultados promedios del ensayo de compresión, hecho en 3 probetas estándar por cada 2 parámetros, aparecen en la tabla 2. La resistencia a compresión a los 28 días fue $f'_c = 338 \text{ kg/cm}^2$.

TABLA 2. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y SLUMP			
FECHA DE VACIADO	PARÁMETROS	RESISTENCIA (kg/cm ²)	SLUMP (cm)
17-03-2004	II y III	334	8.5
19-03-2004	I y IV	348	9.0
26-03-2004	V y VI	333	15.0
PROMEDIO		f'c = 338	10.8

3.2 Acero de Refuerzo

En la Fig.4 se muestra las curvas esfuerzo de tracción - desplazamiento entre cabezales de la máquina universal para los 3 tipos de acero empleados. Cabe indicar que los desplazamientos incluyen posibles resbalamientos de la varilla entre las mordazas, por lo que la Fig.4 proporciona tan sólo una idea del comportamiento real de las varillas. En la Fig.5 se aprecia la forma de falla y las elongaciones obtenidas tanto para el acero dúctil como para el de la malla electrosoldada.

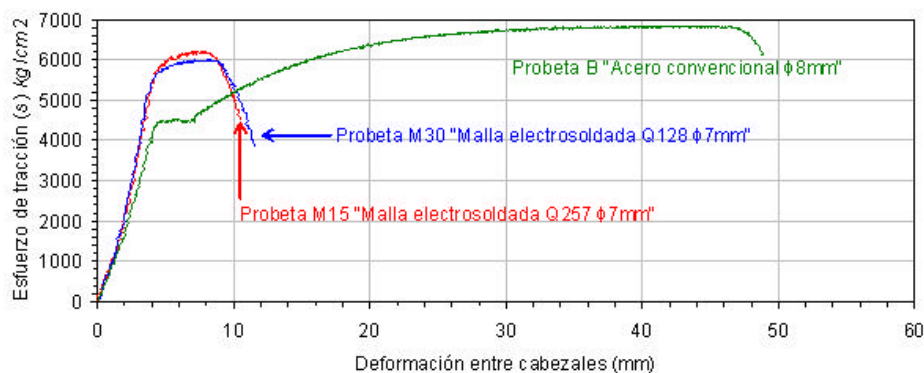
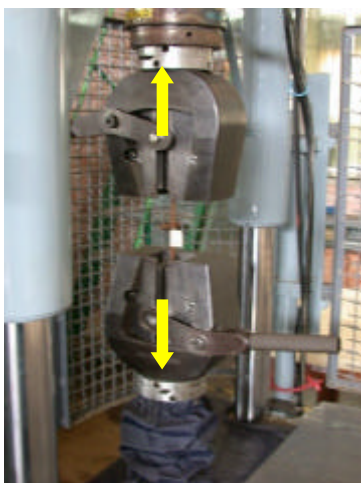


Fig.4. Ensayos de tracción en los 3 refuerzos empleados.



Electrosoldada:
elongación = 2.2%



Acero dúctil:
elongación = 15.8%

Fig.5. Formas de falla de las varillas ensayadas a tracción.

4. CONSTRUCCIÓN DE MURETES

Se utilizó un molde de madera (Fig.6), con tapas interiores deslizantes, que permitió la construcción de 6 muretes (correspondientes a 2 parámetros, ver la tabla 1) en simultáneo. El concreto fue preparado en una mezcladora y fue compactado con una vibradora. Estos muretes fueron curados regándolos con agua durante su primera semana de edad para enseguida cubrirlos con yute húmedo. Cabe indicar que algunos muretes (M7, M15 y M18) presentaron defectos constructivos (Fig.7).



Fig.6. Secuencias de la construcción de los 18 muretes.

Fig.7
Cangrejera en algunos muretes



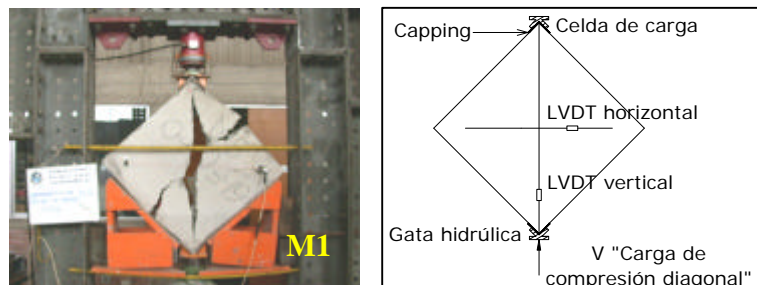
5. ENSAYO DE COMPRESIÓN DIAGONAL

5.1 Técnica de Ensayo y Nomenclatura

El equipo utilizado (Fig.8) constó de un marco metálico sobre el cual reaccionó en su parte inferior una gata hidráulica (accionada con una bomba eléctrica) y en su parte superior una celda de carga. Con la gata se aplicó al murete la carga de compresión diagonal "V", a una velocidad de 1 ton/min, medida con la celda de carga. La resistencia unitaria al corte puro (R) fue calculada dividiendo a la carga "V" entre el área de la diagonal cargada: $R = V / A$, donde $A = 10 \times 70 \sqrt{2} = 990 \text{ cm}^2$.

El desplazamiento horizontal al centro del murete (δ), entre 2 puntos distanciados en $L = 70 \text{ cm}$, se midió con un LVDT, esto permitió calcular la deformación unitaria horizontal (ϵ) como: $\epsilon = \delta / L$. El desplazamiento vertical se midió con otro LVDT ubicado entre los cabezales angulares.

Fig.8
Vista de los dispositivos empleados en el ensayo de compresión diagonal.



5.2 Resistencia Aportada por el Concreto (Rc)

En la tabla 3 se presenta las resistencias aportadas por el concreto por cada parámetro en estudio, así como sus respectivas deformaciones unitarias horizontales. Esta resistencia corresponde a la formación de la primera fisura diagonal visible. Cabe indicar que los valores resaltados corresponden a muretes que tuvieron defectos constructivos (Fig.7), por lo que fueron eliminados.

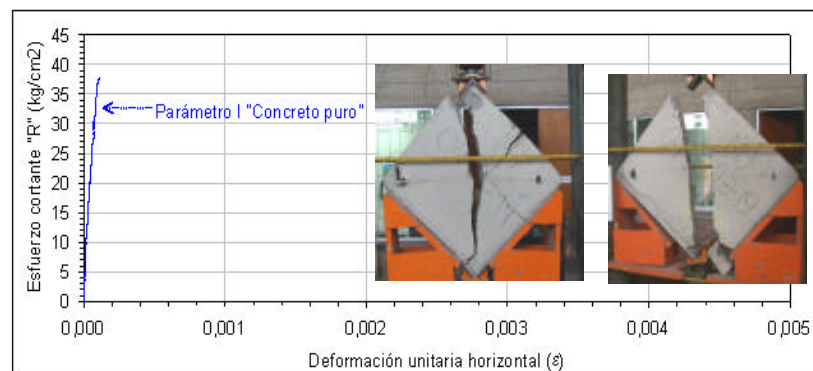
TABLA 3. RESISTENCIA UNITARIA APORTADA POR EL CONCRETO Y DEFORMACIÓN UNITARIA HORIZONTAL INSTANTES ANTES DE LA FRACTURA								
PARÁMETRO I (concreto puro)			PARÁMETRO II (malla Q257)			PARÁMETRO III (malla Q128)		
Murete	Rc Kg/cm ²	e _c x10 ⁻⁴	Murete	Rc Kg/cm ²	e _c x10 ⁻⁴	Murete	Rc Kg/cm ²	e _c x10 ⁻⁴
M1	40.2	0.3	M4	35.7	1.0	M7	27.6	0.9
M2	37.6	1.1	M5	35.3	0.8	M8	35.5	0.7
M3	38.4	1.2	M6	35.9	1.1	M9	37.3	0.8
Promedio	38.7	0.9	Promedio	35.6	1.0	Promedio	36.4	0.8
PARÁMETRO IV (acero dúctil: 8mm @ 16.5 cm)			PARÁMETRO V (acero dúctil: 8mm @ 33 cm)			PARÁMETRO VI (fibra metálica)		
Murete	Rc Kg/cm ²	e _c x10 ⁻⁴	Murete	Rc Kg/cm ²	e _c x10 ⁻⁴	Murete	Rc Kg/cm ²	e _c x10 ⁻⁴
M10	37.0	1.2	M13	36.6	1.4	M16	38.2	1.6
M11	38.8	1.4	M14	37.1	1.2	M17	40.1	1.2
M12	40.7	1.1	M15	29.0	0.7	M18	31.1	1.8
Promedio	38.8	1.2	Promedio	36.9	1.3	Promedio	39.2	1.4

Analizando las resistencias al agrietamiento diagonal del concreto (Rc) para todos los parámetros, puede concluirse que los resultados presentan baja dispersión (4%) y además son directamente proporcionales a la resistencia a compresión f'c del concreto: **Rc = 0.11 f'c**. Es decir, prácticamente el refuerzo no aporta resistencia al agrietamiento diagonal del concreto.

5.3 Comportamiento de los Muretes No Reforzados (Parámetro I)

Los muretes no reforzados tuvieron una falla sumamente frágil y explosiva al instante en que ocurrió el agrietamiento diagonal. Este comportamiento puede apreciarse en la Fig.9.

Fig.9
Gráfico R-ε y forma de falla de los muretes no reforzados.



5.4 Comportamiento de los Muretes Reforzados con Malla (Parámetros II, III, IV y V)

En la Fig.10 se presenta las curvas esfuerzo cortante (R) - deformación unitaria horizontal (ϵ), correspondientes a los muretes más representativos de los parámetros II, III, IV y V. Puede apreciarse que todos los muretes presentan una etapa elástica hasta que se produce el agrietamiento diagonal, a partir de ese instante se inicia el comportamiento inelástico, el mismo que depende del tipo de refuerzo utilizado en cada parámetro.

En la Fig.10 puede apreciarse que a mayor cuantía de refuerzo, la resistencia máxima en la etapa inelástica se incrementa levemente, para luego degradarse. Este efecto fue causado por una falla local (trituration del concreto) que se presentó en la esquina superior cargada en todos los muretes reforzados (Fig.11). Esta falla local apareció poco después de haberse producido el agrietamiento diagonal del concreto y motivó la suspensión del ensayo, por lo cual, no pudo determinarse la influencia del refuerzo en el comportamiento inelástico.

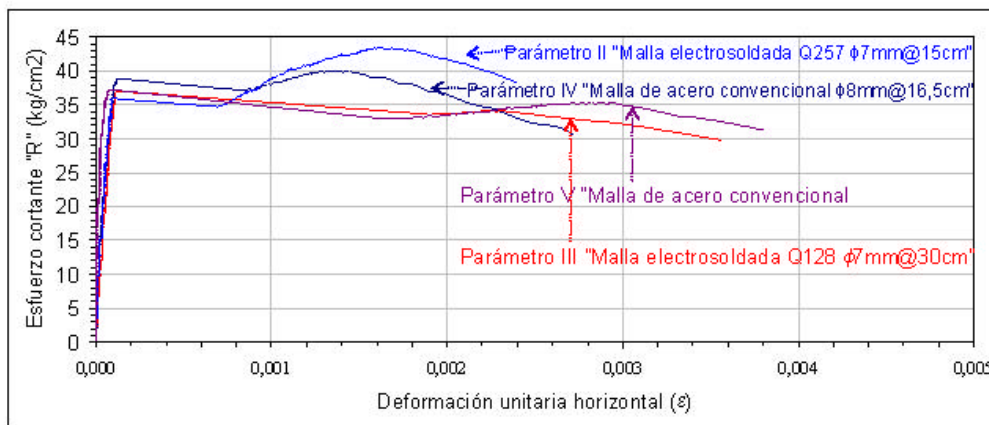
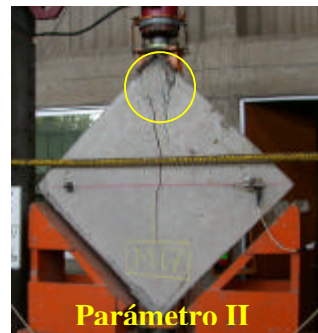


Fig.10. Gráfico R- ϵ de los muretes reforzados con malla.

Fig.11
Falla local en muretes reforzados con malla.



Cabe además mencionar que después del ensayo se efectuó una inspección del estado del refuerzo, encontrándose que no existió signos de que éste haya entrado en fluencia (disminución de la sección transversal de la varilla, Fig.12), tampoco existió falla por adherencia con el concreto, por lo que el refuerzo no llegó a trabajar con toda su eficiencia ya que antes se presentó la falla local (Fig.11).

Fig.12
Inspección del refuerzo después del ensayo.



5.5 Comportamiento de los Muretes Reforzados con Fibra de Acero (Parámetro VI)

En la Fig.13 se presenta la curva R - ε correspondiente al murete representativo del Parámetro VI y la curva del murete M18, el cual tuvo problemas constructivos que produjeron un comportamiento particular. Para el murete representativo del Parámetro VI la carga decae luego del agrietamiento diagonal, pero la fibra evitó que se produzca una falla frágil como la que tuvieron los muretes no reforzados (Fig.9), mas bien, los muretes reforzados con fibra fallaron localmente por aplastamiento en la esquina superior (Fig.14) al igual que los muretes reforzados con malla (Fig.11).

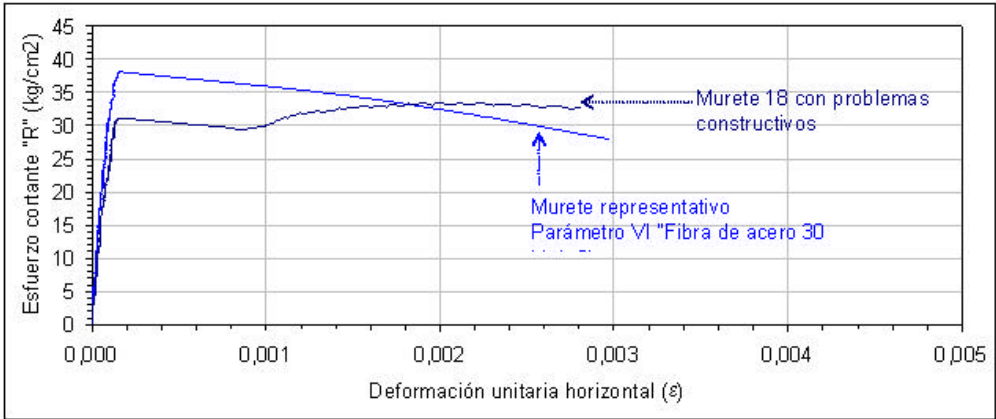


Fig.13. Curvas R-ε para muretes reforzados con fibra.

Fig.14
Murete representativo del Parámetro VI y murete M18



En el murete M18, la fibra metálica permitió incrementar la carga luego del agrietamiento diagonal, esto se debió a que la carga de agrietamiento fue pequeña por los defectos presentados en su construcción. En consecuencia, se piensa que la cantidad de fibra añadida al murete representativo

(30 kg/m^3) no fue suficiente como para soportar su elevada carga de agrietamiento diagonal, producto de la alta resistencia que tuvo el concreto ($f'c = 338 \text{ kg/cm}^2$).

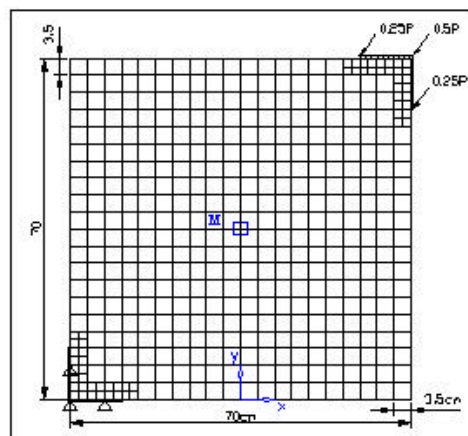
6. ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS

Mediante la técnica de elementos finitos y haciendo uso del programa SAP 2000, se analizaron dos casos: murete no agrietado y murete reforzado-agrietado. En los 2 casos los cabezales angulares metálicos fueron modelados con barras rígidas y se analizó la distribución de esfuerzos para una carga de compresión diagonal $P = 10 \text{ ton}$, luego los valores obtenidos se extrapolaron linealmente para la carga máxima de cada caso.

6.1. Caso 1. Murete No Agrietado

Este estado representa al comportamiento elástico del murete antes que ocurra el agrietamiento diagonal; esta falla se presentó para $P = 38 \text{ ton}$. En la Fig.15 se muestra el modelo “Wall” cuadrado de 70 cm de lado, el cual se subdividió en áreas cuadradas de 3.5 cm de lado. En el análisis de este estado a todas las áreas se les asignó las propiedades del concreto obtenidas experimentalmente.

Fig.15
Caso 1. Murete
No Agrietado.



Se analizó la concentración de esfuerzos principales máximos a lo largo de la diagonal cargada del murete. En el instante del agrietamiento diagonal ($P = 38 \text{ ton}$), el máximo esfuerzo de tracción diagonal fue 26.4 kg/cm^2 y se presentó en el punto medio de la diagonal (punto M en la Fig.15), este resultado es el 8% de $f'c$ y resulta similar al valor experimental ($0.11 f'c$, ver 5.2). Finalmente, se analizó la concentración de esfuerzos de compresión en las esquinas cargadas, obteniéndose que el esfuerzo de compresión máximo fue 320 kg/cm^2 , valor que representa el 95% de $f'c$, por lo que en este estado los esfuerzos de compresión en las esquinas cargadas eran elevados.

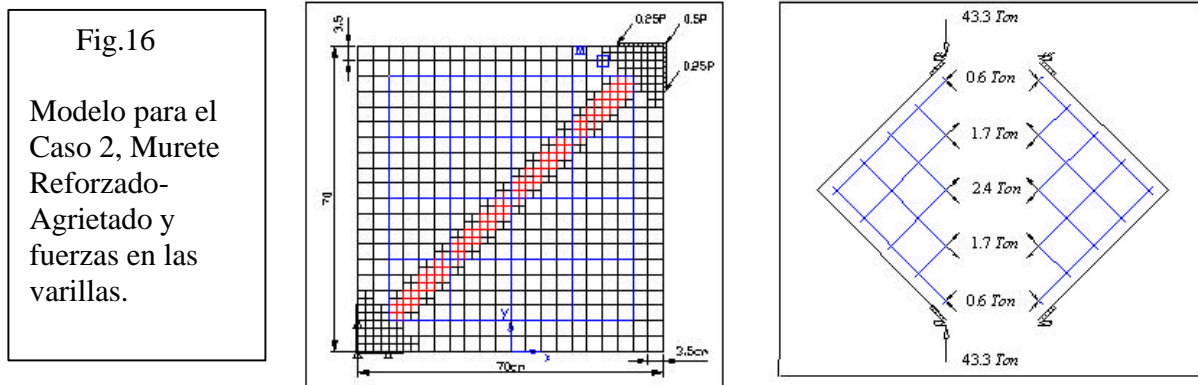
6.2 Caso 2. Murete Reforzado-Agrietado

Este estado representa a los parámetros II y IV, correspondientes a los muretes reforzados con malla electrosoldada Q257 y su equivalente en acero dúctil, después del agrietamiento diagonal y antes de triturarse las esquinas. En los ensayos respectivos pudo observarse un corrimiento de la grieta diagonal hasta lugares cercanos a los cabezales angulares, para luego triturarse la esquina superior. En este estado la carga diagonal máxima correspondiente al Parámetro II fue $P = 43.3 \text{ ton}$.

Para representar la zona fisurada diagonalmente, a las áreas ubicadas en la diagonal cargada se les asignó un material con módulo de elasticidad muy bajo y se las subdividió en las zonas rojas que aparecen en la Fig.16. El acero de refuerzo fue modelado por barras (azules en la Fig.16) conectadas a los nudos de los elementos de concreto.

Se analizó la concentración de esfuerzos de compresión en las esquinas cargadas (punto M en la Fig.16), obteniéndose 428 kg/cm^2 . Este resultado es 127% mayor que la resistencia f'_c , con lo cual se confirma la falla local por aplastamiento presentadas en las esquinas del murete (Fig.11).

Finalmente, se determinó las cargas axiales generadas en las varillas transversales a la diagonal agrietada (Fig.16), obteniéndose para la barra central (la más solicitada) una fuerza de tracción igual a 2.40 ton, en tanto que la fuerza de fluencia correspondiente a la barra de 8 mm (Parámetro IV) es 2.21 ton (Fig.4), por lo cual, puede decirse que el refuerzo central en la diagonal cargada recién estaba entrando en fluencia cuando se produjo la falla local.



7. CONCLUSIONES

Ante el desconocimiento del comportamiento inelástico a fuerza cortante de los muros delgados de concreto reforzados con mallas electrosoldadas, se dio inicio a un proyecto de largo alcance, ejecutándose en esta primera etapa ensayos de compresión diagonal en muretes de concreto con diversos tipos de refuerzo. Esta técnica de ensayo no fue apropiada ya que poco después del agrietamiento diagonal se produjo en los muretes reforzados una falla local en su esquina superior, que impidió analizar la influencia del refuerzo en el comportamiento inelástico (objetivo principal del proyecto), por lo que es necesario cambiar la técnica de ensayo. Otras conclusiones fueron:

- El comportamiento del concreto sometido a compresión diagonal fue elástico hasta que se produjo el agrietamiento por tracción diagonal. Se obtuvo que la resistencia al corte puro aportada por el concreto “ R_c ”, es independiente del refuerzo empleado y mantiene una relación lineal con la resistencia a la compresión del concreto (f'_c): **$R_c = 0.11f'_c$** .
- Los muretes no reforzados tuvieron una falla por tracción diagonal sumamente frágil y explosiva, por lo que es necesario la presencia de refuerzo. Incluso la fibra metálica empleada en el Parámetro VI evitó el carácter explosivo de este tipo de falla.

- Se encontró que la malla electrosoldada Q257 y su malla equivalente en acero dúctil, controlaron en forma satisfactoria el grosor de la grieta diagonal instantes después de ocurrir la fractura, obteniéndose desplazamientos horizontales de 0.4 mm y 0.6 mm, respectivamente, mientras que en los muretes reforzados con la malla electrosoldada Q128, o con su respectiva malla de acero dúctil, estos desplazamientos horizontales fueron de 1.1 mm, casi el doble de las primeras. Es decir, la mayor cuantía de refuerzo redujo el grosor de las grietas diagonales.
- El acero de refuerzo de la malla electrosoldada Q257, y su malla equivalente en acero dúctil, fueron capaces de incrementar la carga luego del agrietamiento diagonal, obteniéndose resistencias máximas de 43.4 y 40.1 kg/cm², respectivamente, en tanto que la resistencia aportada por el concreto fue 35.6 y 36.9 kg/cm². Estas resistencias no se elevaron más debido a que los muretes fallaron localmente. La malla electrosoldada Q128, y su respectiva malla de acero dúctil, no fueron capaces de incrementar la carga y sólo evitaron que se produjera una falla frágil luego del agrietamiento, por lo cual, no se recomienda en el diseño por corte de muros delgados de concreto el uso de cuantías menores a las especificadas por la Norma E.060.
- Los resultados obtenidos para los muretes reforzados con fibra metálica indican que la dosificación de la fibra utilizada fue baja, ya que la fibra no permitió incrementar la carga luego del agrietamiento diagonal. Sin embargo, en uno de los muretes, un error constructivo hizo que disminuyera la resistencia a tracción diagonal aportada por el concreto y luego del agrietamiento diagonal, la fibra de acero fue capaz de aumentar la resistencia al murete. Este comportamiento presentado abriga la idea de realizar investigaciones en placas de concreto reforzadas por corte únicamente con fibra de acero. La dosificación utilizada en este proyecto de 30 kg/m³ se recomienda emplearla sólo para concretos con $f'c < 280 \text{ kg/cm}^2$.
- El análisis por elementos finitos reflejó el comportamiento y la resistencia presentada por los muretes en el ensayo de compresión diagonal. Así, por ejemplo, se pudo predecir: 1) la longitud de la grieta diagonal en la parte central del murete reforzado; 2) la no fluencia del acero de refuerzo luego del agrietamiento diagonal; y, 3) la concentración de esfuerzos de compresión en las esquinas cargadas que causaron la falla local de trituración.

8. REFERENCIAS

1. Norma E.060 de Concreto Armado. ININVI, 1989.
2. Norma ASTM C-172 “Standard Practice for Sampling Freshly Mixed Concrete”.
3. Norma ASTM C-39 “Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concretes”.

AGRADECIMIENTO

Los autores desean expresar su profundo agradecimiento a la empresa Productos de Acero Cassado S.A. (PRODAC), en especial al Ing. Antonio Aguilar, por habernos proporcionado las mallas electrosoldadas y la fibra metálica empleada en este proyecto.