



# Mampostería Reforzada con Materiales Compuestos

Mario W. E. Toledo<sup>1</sup>, Alejandra Ceballos<sup>1</sup>, Leonardo Serapio<sup>1</sup>, Viviana Rougier<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Salta, Facultad de Ingeniería, ICMASa Instituto de Ingeniería Civil y Medio Ambiente de Salta. Avda. Bolivia 5150. Campo Universitario. (4400) Salta - Tel/fax: 0387-4258616.

<sup>2</sup> Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Concepción del Uruguay  
Ingeniero Pereira 676 (3260), Concepción del Uruguay, Entre Ríos, Tel/fax: 03442 425541, Email: rougierv@frcu.utn.edu.ar

**RESUMEN** - El uso de materiales compuestos (materiales de matriz polimérica reforzados con fibras) para el refuerzo de muros de mampostería ha demostrado que tal sistema puede aumentar sustancialmente la estabilidad lateral de la estructura con un mínimo impacto en la fundación existente, así como también ha resultado ser eficiente en el refuerzo de estructuras antiguas deterioradas. Sin embargo, resulta necesario evaluar diferentes aspectos del sistema de reparación y / o refuerzo con materiales compuestos, tales como formas de colocación, anclaje, cantidad óptima de refuerzo a ser aplicado y modos de falla.

En el presente trabajo se evalúa experimentalmente el comportamiento de pequeños muros de mampostería reforzados con láminas de material compuesto y sometidos a compresión diagonal. La variable de diseño considerada incluye dos espesores del laminado. Los resultados obtenidos se comparan cuantitativa y cualitativamente con el comportamiento de la mampostería no reforzada.

**Palabras clave:** Mampostería, Materiales Compuesto, Refuerzo

## Retrofitted Masonry with Composite Material

**ABSTRACT** Nowadays composite materials used as external reinforcement of masonry walls have been proved to certainly improve structural stability with a minor impact over foundations. Besides they can be used to retrofit historical buildings. However, different aspects of this retrofitting system should be still analyzed. This analysis involves applying techniques, anchorage length, amount and layout of the reinforcement and failure modes of the reinforced element.

The behaviour of masonry panels retrofitted with composite laminates is experimentally assessed in this work. The panels have been subjected to diagonal compression loading. Design variable involve two reinforcement thickness. Results are quantitative and qualitatively compared with those of unretrofitted walls.

**Key words:** Masonry, Composite Material, Reinforcement

## INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presentan experiencias de laboratorios realizadas sobre pequeños muretes de mampostería de unidades macizas de arcilla construidos con materiales locales y reforzados con láminas de material compuesto. Salta es una zona considerada por el INPRES-CIRSOC como de alta peligrosidad sísmica y teniendo en cuenta que las construcciones de mampostería no reforzadas tienen un comportamiento deficiente ante cargas laterales, es importante evaluar la respuesta a corte de los muros no reforzados y reforzados con material compuesto.

Muchos de los sistemas de refuerzo utilizados corrientemente resultan estéticamente inapropiados y restringidos al uso de ciertos tipos de estructuras. Los métodos de reparaciones de grietas rellenadas mediante inyección de materiales similares o diferentes a la mampostería original, tales como resinas epoxicas, morteros epóxicos o morteros fluidos de cemento aunque son eficientes, resultan muy laboriosos y requieren mano de obra capacitada (Alcocer, 2002). Técnicas tales como aplicación de revestimiento estructural de hormigón armado (Manual de construcción, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica) y encamisado con mallas metálicas (Alcocer, 2002) si bien permiten alcanzar un incremento importante en resistencia y rigidez tienen el inconveniente que agregan una masa considerable a la estructura, lo cual modifica su respuesta dinámica resultando en un incremento de la fuerza sísmica (Triantafillou, 1998). El uso de materiales compuestos para el refuerzo de muros de mampostería, ha demostrado que tal sistema puede aumentar la estabilidad lateral de la estructura con un mínimo de impacto en la fundación existente (Bradley et. al, 1996). Este sistema es

eficiente en el refuerzo y/o reparación de edificaciones de mampostería de ladrillos cerámicos de valor histórico.

La reparación y/o refuerzo con polímeros reforzados con fibras (PRF) es una tecnología relativamente nueva que consiste en la aplicación de fibras delgadas de vidrio o carbono que se adhieren por medio de resinas epoxi. Entre las ventajas del refuerzo con PRF (Alcocer, 2002) se pueden mencionar: aumento de la resistencia a flexión fuera del plano del muro, mejora de la resistencia a corte en el plano, despreciable aumento de masa y espesor, rapidez de construcción y facilidad de ejecución (Hamoush et al, 2001) (Tan y Patoary, 2004), (Valluzzi et al, 2002), (Santa María et al, 2006), (Shrive, 2006), (Rougier, 2007).

### DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO

El programa experimental incluyó las siguientes etapas:

1ra Etapa: Determinación de las características mecánicas de los materiales constituyentes de la mampostería, mampuestos y mortero. Ensayos realizados: a) Ensayo de resistencia a la compresión del mampuesto; b) Ensayo de absorción de agua por inmersión en agua fría; c) Ensayo de determinación de las resistencias a la compresión y flexión de morteros de cemento Pórtland.

2da Etapa: Ensayo de compresión diagonal sobre pequeños paneles de mampostería sin reforzar y reforzados con polímeros reforzados con fibra de carbono (PRFC).

#### 1ra Etapa

##### a. Ensayo de resistencia a la compresión del mampuesto

Para determinar la resistencia a compresión uniaxial de los mampuestos se utilizó una máquina de ensayos a la compresión con capacidad de 1100 kN. El ensayo se realizó de acuerdo a lo establecido por la Norma IRAM 12.586, con carga controlada respetando la velocidad máxima establecida por dicha norma. Se ensayaron 10 probetas.

Se obtuvo la resistencia característica a la compresión mediante la siguiente expresión:

$$\sigma'_{pk} = \sigma'_{pkm} (1 - 1,81 \cdot \delta) \quad (1)$$

donde  $\sigma'_{pk}$  es la resistencia a compresión característica,  $\sigma'_{pkm}$  el promedio de las resistencias obtenidas y  $\delta$  la dispersión relativa:

$$\delta = \frac{1}{\sigma'_{pkm}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\sigma'_i - \sigma'_{pkm})^2}{n-1}} \quad (2)$$

donde  $\sigma'_i$  es la resistencia a compresión en MPa.

En la Fig. 1 se muestra un ladrillo macizo ensayado a compresión.

En la Tabla 1 se pueden ver las dimensiones, pesos y áreas de las probetas y sus respectivos promedios. En la Tabla 2 los valores de la resistencia a compresión obtenidos.



Fig. 1 – Mampuesto ensayado a compresión

Ladrillo macizo	Ancho [cm]	Largo [cm]	Espesor [cm]	Peso [kg]	Área bruta
1	11,89	24,90	5,03	2,700	296,061
2	12,35	25,50	5,08	2,687	314,925
3	12,11	25,00	4,73	2,552	302,750
4	12,39	26,00	4,98	2,616	322,140
5	12,41	25,70	5,02	2,532	318,937
6	12,22	25,70	5,08	2,701	314,054
7	11,90	25,25	5,08	2,725	300,475
8	11,83	25,10	4,98	2,735	296,933
9	12,61	25,80	5,05	2,603	325,338
10	11,90	25,30	5,06	2,727	301,070
<b>Promedio</b>	<b>12,16</b>	<b>25,43</b>	<b>5,01</b>	<b>2,66</b>	<b>309,268</b>

Tabla 1: Dimensiones, peso y área de mampuestos ensayados

Probeta	Carga de rotura [kg]	Resistencia a compresión [Mpa]	$(\sigma'_i - \sigma'_m)^2$
1	75500,00	23,92	5,63
2	56350,00	17,86	13,65
3	65400,00	20,72	0,68
4	59450,00	18,84	7,36
5	87750,00	27,81	39,13
6	75000,00	23,77	4,91
7	55200,00	17,49	16,48
8	75320,00	23,87	5,37
9	49820,00	15,79	33,22
10	80310,00	25,45	15,19
	<b><math>\sigma_{pmk}'</math></b>	<b>21,55</b>	<b>141,62</b>

Tabla 2 – Resistencia a compresión del mampuesto

La resistencia promedio es:

$$\sigma'_{pmk} = 21,55 \text{ MPa} \quad (3)$$

La dispersión:  $\delta = 0,18407$

La resistencia característica obtenida es:

$$\sigma'_{pk} = 14,37 \text{ MPa} \quad (4)$$

Se debe destacar que los mampuestos de la región en general presentan una alta resistencia a compresión.

#### b. Ensayo de absorción de agua por inmersión en agua fría del mampuesto

Se realizó conforme lo establecido por la Norma IRAM 12.588. En Tabla 3 se presentan los resultados obtenidos.

Nº	M saturado [gr]	M seco [gr]	Capacidad de Absorción $A_i$	$(A_i - A_m)^2$
1	2927	2411	21,40	44,15
2	3091	2604	18,70	15,56
3	2913	2510	16,06	1,69
4	3015	2621	15,03	0,08
5	2849	2555	11,51	10,57
6	2992	2673	11,93	7,97
7	2890	2438	18,54	14,31
8	2898	2625	10,40	18,99
9	2859	2568	11,33	11,74
10	2908	2581	12,67	4,36
	Promedio	$A_m =$	<b>14,76</b>	<b>129,40</b>

Tabla 3 – Capacidad de absorción

Se obtuvieron los siguientes valores característicos de la capacidad de absorción de agua del conjunto de probetas:

$$A_k = A_m(1 \pm 1,81 \cdot \delta) = 21,27 \text{ y } 8,25 \tag{5}$$

$$\delta = \frac{1}{A_m} \sqrt{\frac{\sum_1^n (A_i - A_m)^2}{n}} = 0,24 \tag{6}$$

donde  $A_i$  capacidad de absorción de cada probeta y  $A_m$  el valor medio = 14.76  $n=10$

*c. Ensayo de determinación de las resistencias a la compresión y flexión del mortero de cemento portland*

El mortero utilizado en la ejecución de juntas horizontales y verticales de los diferentes especímenes se tipificó de acuerdo al reglamento IN-PRES-CIRSOC 103, resultando un mortero tipo N. Las características mecánicas del mortero se determinaron mediante ensayos de flexión y compresión uniaxial según norma IRAM 1622. Los valores de resistencia última a compresión corresponden al promedio de 20 mitades de probetas de 40x40x160 [mm<sup>3</sup>].

En las Tablas 4 y 5 se presentan los resultados obtenidos.

Probeta	Carga P (kg)	Tensión F (kg/cm <sup>2</sup> )
1,000	0,506	0,118
2,000	0,497	0,116
3,000	0,501	0,117
4,000	0,510	0,119
5,000	0,511	0,120
6,000	0,508	0,119
7,000	0,504	0,118
8,000	0,502	0,117
9,000	0,493	0,115
Promedio		0,118

*Tabla 4 – Tensiones de rotura a flexión del mortero*

Nº	Mitad 1 (kg)	Mitad 2 (kg)	Tensión f1 kg/cm <sup>2</sup>	Tensión f2 kg/cm <sup>2</sup>
1	2034,55	2034,55	127,16	127,16
2	1578,08	1721,54	98,63	107,60
3	1721,54	402,84	107,60	25,18
4	1186,82	277,72	74,18	17,36
5	1597,65	373,85	99,85	23,37
6	1043,36	244,15	65,21	15,26
7	1252,03	292,98	78,25	18,31
8	106,00	1434,62	6,63	89,66
9	1356,37	1271,60	84,77	79,47
Promedio			82,48	55,93
Promedio [Mpa]			6,92	

*Tabla 5 – Ensayo de compresión del mortero*

En la Fig. 2 se muestran las probetas de mortero que se ensayaron y en la Fig. 3 el ensayo de flexión.



Fig. 2 – Probetas de mortero



Fig. 3 – Ensayo a flexión de probeta de mortero

## 2da Etapa

### Ensayo de compresión diagonal de muretes de mampostería. Descripción del prototipo

Se construyeron tres paneles de  $650 \times 620 \times 124$  [mm<sup>3</sup>] (Fig. 4), se utilizaron unidades macizas de arcilla con medidas promedio de  $156 \times 124 \times 50$  [mm<sup>3</sup>] y juntas de mortero de 20 mm. En la Fig. 4 también se puede ver el esquema de refuerzo adoptado para dos de los especímenes. Se emplearon bandas unidireccionales de polímeros reforzados con fibras de carbono de dimensiones  $900 \times 70$  [mm<sup>2</sup>] y  $300 \times 70$  [mm<sup>2</sup>] aplicadas en ambas caras de los paneles y dispuestas ortogonalmente a la dirección de aplicación de la carga.

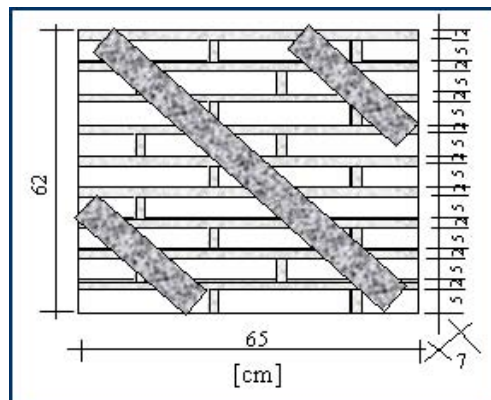


Fig. 4 – Muro reforzado con tejido de fibras de carbono

Los tres paneles se ensayaron a corte en el plano según la siguiente denominación: d1. Murete sin refuerzo; d2. Murete reforzado con bandas de tejido de fibras de carbono de 1 mm y d3. Murete reforzado con bandas dobles de tejido de fibras de carbono.

### Descripción del ensayo

El reglamento INPRES CIRSOC 103 propone el ensayo de compresión diagonal sobre muretes de mampostería a los efectos de estimar la resistencia básica al corte de los mismos. El ensayo de compresión diagonal reproduce un estado predominante de corte en un muro de mampostería. Se efectúa aplicando una carga de compresión según una diagonal del murete hasta llegar a la rotura.

La resistencia al corte del espécimen ensayado se determina dividiendo la proyección de la carga de rotura sobre la dirección paralela a las hiladas, por el área bruta de la sección transversal del murete según la misma dirección. Se usa la siguiente expresión:

$$D = 0,7P \quad (7)$$

$$\tau_m = \frac{D}{d \cdot e_o} \quad (8)$$

donde  $D$  es la proyección de la carga de rotura sobre la dirección paralela a las hiladas,  $P$  la carga de rotura a compresión diagonal,  $\tau$  la resistencia al corte del murete,  $d$  longitud promedio del lado del murete ensayado y  $e_o$  espesor del murete ensayado

Para el ensayo se utilizó una prensa con capacidad de 500 kN, con control de carga. Los ensayos se realizaron bajo carga de compresión monótona creciente. Para la medición de los desplazamientos a lo largo de las diagonales comprimida y traccionada de los especímenes de mampostería se usaron comparadores analógicos de rango 50 mm y sensibilidad 0,01 mm. Por razones de seguridad, dicho instrumental de medición fue retirado en todos los ensayos, antes de alcanzarse la carga de rotura. En la Figura 5 se presenta la disposición del ensayo de un muro reforzado.



Fig. 5 – Ensayo de compresión diagonal de murete reforzado

## Materiales

### 1. Mampostería

1.1. Mampuesto: considerando la resistencia a compresión de los ladrillos cerámicos macizos y en comparación a lo establecido por la Norma INPRES CIRSOC 103, los mampuestos utilizados en este ensayo resultaron de *Clase A*

1.2 Mortero: dada la tipificación de la norma INPRES CIRSOC 103, en función de la resistencia mínima a compresión a 28 días, y de manera de obtener un mortero de resistencia normal se empleó una dosificación: 1:3 (1 cemento; 3 are-na).

### 2. Refuerzo de material compuesto

Se utilizó un tejido unidireccional de fibra de carbono de alto módulo y alta resistencia (Sika Wrap Hex 103 C) saturado en resina epoxídica (Sikadur Hex 300).

La técnica de refuerzo y/o reparación se realizó aplicando el tejido de fibra de carbono embebido en resina epoxi sobre la superficie del panel previamente imprimada con resina, siguiendo el proceso denominado húmedo. Antes de la colocación del material de refuerzo y /o reparación, las superficies de los especímenes fueron cuidadosamente pulidas con cepillo de cerdas de acero a los efectos de eliminar incrustaciones de mortero y suciedades. Finalmente y para dejarlas perfectamente limpias, se aplicó aire a alta presión.

Las propiedades mecánicas del tejido de fibra de carbono y la resina epoxi suministradas por el fabricante



se detallan en Tablas 6 y 7.

Resistencia a la tracción	960 MPa
Módulo de elasticidad	73.100 MPa
Alargamiento a la rotura	1,33%
Espesor	1 mm

Tabla 6: Propiedades mecánicas del tejido de fibra de carbono

Resistencia a la tracción	73,5 MPa
Módulo de tracción	3.213 MPa
Alargamiento a la rotura	4,8%
Módulo de flexión	3.164 MPa
Resistencia a flexión	125,3 MPa

Tabla 7: Propiedades mecánicas de la resina epoxi

### RESULTADOS EXPERIMENTALES

#### Muro sin refuerzo

Con el objetivo de determinar la resistencia última al corte y analizar el tipo de falla se ensayó un panel sin refuerzo. La falla observada fue con rotura del mampuesto y deslizamiento de juntas del mortero (Fig. 6a). En Fig. 6b se puede ver la curva carga-desplazamiento axial. La carga última alcanzada por el panel fue de 12,8 kN.

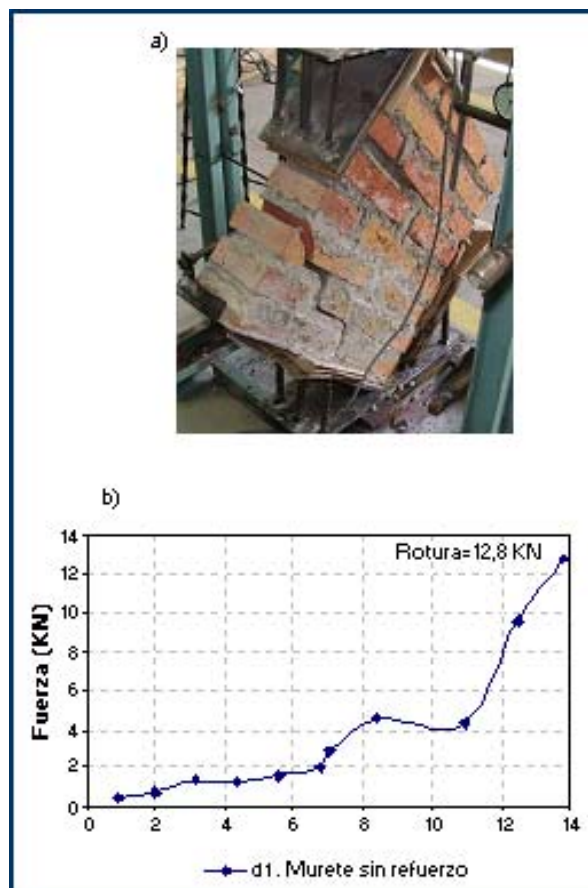


Fig. 6 – Ensayo de compresión diagonal de murete d1 sin re-fuerzo: a) Tipo de falla; b) Diagrama carga-desplazamiento

#### Muros reforzados

El refuerzo con bandas unidireccionales de PRFC dispuestas ortogonalmente a la dirección de aplicación de la carga mejora la resistencia a corte (Rouquier et al. 2007), con una relación costo-beneficio adecuada. En el

presente trabajo se utilizó esta modalidad.

Se consideraron dos alternativas de refuerzo: banda simple de 1 mm de espesor (Muro d2) y doble capa de refuerzo, 2 mm de espesor (Muro d3).

En el caso del muro d2 si bien se obtuvo una carga de rotura superior al muro sin reforzar (31,8 kN) se observó una falla prematura por desprendimiento de una banda de refuerzo y deslizamiento de la interfaz mortero-mampuesto (ver Fig. 7a). En el caso del muro d3 se observó una falla frágil que se inició por deslizamiento de junta de mortero alcanzando una carga de rotura casi cinco veces superior a la del muro sin reforzar (52 kN). En todos los casos el instrumental de medición fue retirado antes de alcanzarse la carga de rotura (95% de dicho valor para todos los muros). En Fig. 7b) se observa el diagrama carga-desplazamiento para los tres muros y se identifica la carga de rotura.

En general, se observa que los muros reforzados mantienen su integridad en la zona comprendida entre bandas de refuerzo.

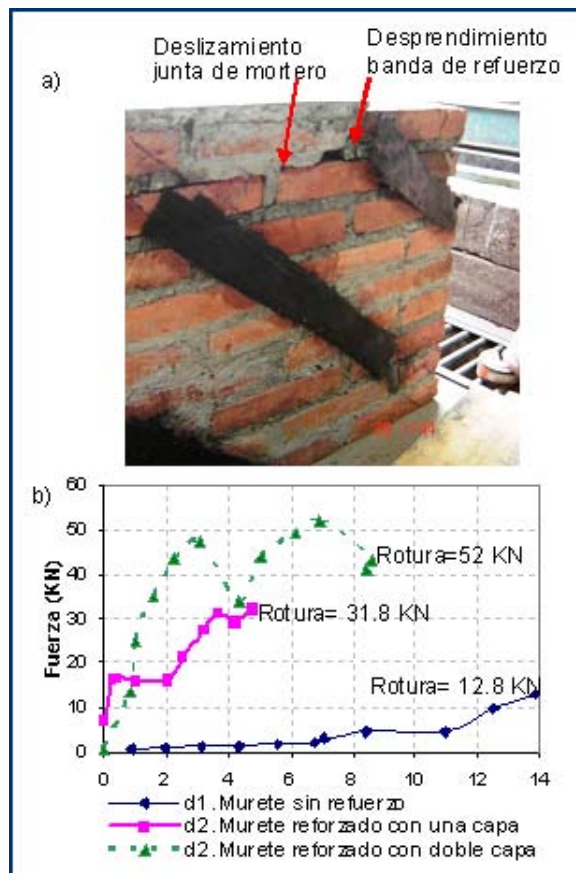


Fig. 7: Ensayo de compresión diagonal muros reforzados: a) tipo de falla; b) Diagrama carga-desplazamiento

### CONCLUSIONES

Se realizaron ensayos de compresión diagonal sobre paneles de mampostería de ladrillos cerámicos macizos de la zona, sin reforzar y reforzados con PRFC. También a efectos de caracterizar los materiales constituyentes de la mampostería se efectuaron ensayos sobre el mampuesto y el mortero.

La cantidad de ensayos realizados sobre los muretes resulta insuficiente para poder realizar una conclusión general, además debe tenerse en cuenta que este tipo de estructuras dependen en gran medida de las condiciones de ejecución (mano de obra, curado, etc.). No obstante, en función del análisis y comparación de los resultados obtenidos se puede concluir:

Bajo sollicitaciones de corte y en ausencia de tensiones normales, la falla de la mampostería no reforzada, se produce, en general, por deslizamiento de las juntas de mortero, resultando un tipo rotura muy frágil y repentina. En este aspecto, la adherencia entre mampuestos y juntas de mortero es fundamental y depende, en gran parte, de la calidad de la mano de obra. También resultan muy importantes las propiedades mecánicas de



los materiales componentes de la mampostería (mortero y mampuestos) y las condiciones de borde del ensayo, pues la falla se localiza en la zona de apoyos.

El refuerzo con materiales de matriz polimérica reforzada con fibras, mejora el comportamiento de la mampostería bajo esfuerzos de corte, aumentando la resistencia última y la rigidez. El tipo de rotura continúa siendo frágil, pero los especímenes conservan el monolitismo aún después de alcanzarse la carga de rotura.

La configuración de refuerzo adoptada (bandas unidireccionales de PRFC dispuestas diagonalmente en ambas caras) es de rápida y fácil ejecución y se utiliza una cantidad relativamente mínima de material compuesto, resultando una solución eficiente.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Salta, a Sika Argentina y a la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Reg. C del U.

### REFERENCIAS

- Alcocer S., "Rehabilitación de estructuras de mampostería, Instituto de Ingeniería, UNAM, México", (2002).
- Manual de Construcción, Evaluación y Rehabilitación Sismo Resistente de Viviendas de Mampostería, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica
- Triantafyllou T., "Composites: a new possibility for the shear strengthening of concrete, masonry and wood", (1998).
- Bradley J., Christensen J., Gilstrap J., y Dolan Ch., "Composite materials reinforcement of existing masonry walls", J. Arch. Engrg. 2, (2), 63-70, (1996).
- Hamoush S., Meginley M., Mlakar P., Scott, D. y Murray K., "Out-of plane- strengthening of masonry walls with Reinforced Composites", ASCE, Journal Composite for Construction, 5, 139-145, (2001).
- Tan K., y Patoary M., "Strengthening of Masonry Walls against Out-of-Plane Loads Using Fiber- Reinforced Polymer Reinforcement", ASCE Journal Composite for Construction, 8, 79-87, (2004).
- Valluzzi M. R., Tinazzi D., Modena C., "Shear behavior of masonry panels strengthened by FRP laminates", Construction and Building Materials, 16, 409-416, (2002).
- Santa María H., Alcaino P. y Luders, C., "Experimental response of masonry walls externally reinforced with carbon fiber fabrics", Proceedings of the 8<sup>th</sup> U.S. National Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, California, USA, (2006).
- Shrive N. G., "The use of fibre reinforced polymers to improve seismic resistance of masonry", Construction and Building Materials, 20, 269-277, (2006).
- Rougier V., "Refuerzo de muros de mampostería con materiales compuestos", Tesis (Doctorado en Ingeniería), Universidad Nacional de Tucumán, Tucumán, Argentina, 212, (2007).
- IRAM 12586, Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. Ladrillos y bloques cerámicos para la construcción de muros. Método de ensayo de resistencia a la compresión. Junio 2004.
- IRAM 12588, Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. Ladrillos y bloques cerámicos para la construcción de muros. Método de ensayo de la capacidad de absorción de agua por inmersión en agua fría y en agua hirviendo. Noviembre de 1980.
- Reglamento INPRES-CIRSOC 103. Normas argentinas para construcciones sismorresistentes. Agosto 1991.
- IRAM 1622, Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. Determinación de la resistencia a la compresión y a la flexión del cemento Portland. Julio 1962.
- Rougier, V.C., Pascual, A. y Contino S., "Refuerzo y Reparación de Muros de Mampostería", VII EIPAC, Salta, Argentina 15 al 18 de mayo de 2007, (2007).