

ENSAYOS DE DINTELES DE FÁBRICA DE LADRILLO ATIRANTADA, SOBRE LOS NUEVOS APOYOS PI, DISTANCIADOS 6m ENTRE SÍ.

Adell, J.M. (1), García-Santos, A. (1), Vega, S. (1), López-Hombrados, C. (2), Peña, J. (3), Timperman, P. (4), Yáñez, E.(5)*

(1) Investigadores del Grupo Tise. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid. España;

(2) Investigador del Instituto Eduardo Torroja. Madrid. España;

(3) Técnico de AllWall Systems. Madrid. España;

(4) Técnico de Bekaert. Bélgica;

(5) Técnico de Halfen-Deha. Alemania.

() josep.adell@upm.es*

1. INTRODUCCIÓN

Comparando la Arquitectura de Ladrillos del s.XIX [1], con el empleo del ladrillo en la Arquitectura del s.XX, se puede observar que abunda mayor patología en las fábricas de ladrillo cara vista recientes que en las más antiguas.

El primer paso para prevenir la abundante fisuración de la albañilería apreciada en España a finales del siglo pasado, se dio en 1992, con la realización del “Manual Murfor: La fábrica armada” [2], estableciéndose en él, los criterios posteriormente contemplados en el “Eurocódigo 6: Estructuras de Fábrica”, de recomendar armar con el 0,03% de la sección del muro, y a distancias verticales no mayores de 600mm

Las primeras aplicaciones arquitectónicas de la fábrica armada en España, fueron realizadas por este Arquitecto en sus obras de la Plaza de la Remonta y de El Espinillo, divulgándose por su potencial arquitectónico, tanto en Europa [3] [4] como en América [5].

La diferencia principal del Manual Murfor español [2], respecto a los manuales de otros países, consiste en que además de controlar la fisuración, se ofrece la posibilidad de hacer trabajar el acero hasta los límites de deformación, equivalentes a los del hormigón armado. Y en consecuencia, con ello se logra incrementar notablemente las luces de los dinteles de fábrica armada, llegando a duplicarse para una misma carga.

Esta importante novedad de dinteles de ladrillo con fábrica armada Murfor, fue objeto de múltiples ensayos en laboratorios españoles, con dinteles de 3m de longitud, cuyos resultados fueron publicados en la 7th International Masonry Conference (Londres, 1995) [6].

La expresión formal de este avance técnico aplicado al edificio de viviendas de la Plaza de la Remonta con “arcos atirantados ciegos”, portada del libro “Maçonnerie Portante” [7].

Con posterioridad a estas fechas, el Prof. Adell publicó un libro referido a la patología de las fábricas [8] y otro sobre las posibilidades de la fábrica armada para controlar la fisuración e incrementar las prestaciones de la albañilería [9].

Toda esta labor científica e investigadora, le permitió a este Arquitecto, Presidir y Organizar el 12th IBMAC, International Brick/Block Masonry Conference, en el año 2000 en Madrid.

Aprovechando este encuentro científico, se construyó el “Millennium Arch” [10] delante del Palacio de Congresos de Madrid, empleando el “flowerbrick”, que posibilita el armado vertical a su través para poder soportar, además de la flexión vertical, las torsiones que se

generaban por su forma curva fuera de la vertical, lo que fue ampliamente publicado [11] y divulgado [12] internacionalmente.

En este paper, se retoman las posibilidades del incremento de prestaciones de la fábrica armada Murfor con “arcos atirantados ciegos de gran luz”, establecidas por primera vez en el Manual español, lo que permite salvar 6m de luz con solamente 2 armaduras Murfor de 5mm de diámetro en la parte inferior de los dinteles.

En el año 2002, este Arquitecto-Investigador patentó la Invención de un nuevo Apoyo, que aprovecha el atirantado de la fábrica armada, y desarrolla un nuevo Sistema de Apoyo Distanciado para las fábricas hasta unos 6m para hacer coincidir la descarga del peso del muro en la vertical de los soportes de la estructura porticada, lo que venía ofreciéndose a través de AllWall Systems [13].

En el año 2005, Halfen Group se interesó por el desarrollo comercial de esta Patente, elaborando en base a ella, una patente mejorada, que es la que se comercializa con el nombre de “Halfen-AllWall” Pi-Brackets [14].

Este paper cuenta el diseño del nuevo apoyo “Halfen-AllWall”, así como los primeros ensayos de laboratorio tanto del propio apoyo como de los muros de ladrillo armado que descansan sobre ellos, habiendo servido para la validación de este nuevo sistema constructivo en España.

2. EL SISTEMA ALLWALL APLICADO AL CERRAMIENTO DE LADRILLO

Así como en la mayor parte de Europa los muros suelen ser de 2 hojas de fábrica unidas con llaves de atado, las llaves no se usan en España, ya que no se emplea una hoja interior suficientemente resistente, al tratarse de cerramientos de estructuras porticadas, en lugar de muros de carga.

En los cerramientos de fábrica de ladrillo de medio pie de ancho (11,5cm con el ladrillo castellano de 24x11,5x5cm), la acción horizontal del viento es prioritaria frente a la carga vertical propia de los paños de fábrica. Y como en España la hoja exterior del cerramiento no puede atarse a la hoja interior, se hace necesario anclarla a los pilares de la estructura, que suelen estar entre 6 y 7m entre sí.

Al emplearse en España una sola hoja exterior de fábrica de ladrillo en el cerramiento, ésta queda situada semiapoyada en el borde del forjado, para poder al mismo tiempo, chapar su frente con plaquetas del mismo material. Ello suele llevar a importantes errores del apoyo del cerramiento en el borde del forjado, que puede quedar en precario. (Fig.1)

Para que el muro de fábrica tenga una adecuada eficacia higrotérmica, se hace necesario separar el apoyo de los muros, por delante de los forjados de la estructura, para poder así dejar espacio para disponer la cámara de aire y el aislamiento continuo.

En Centroeuropa la solución de apoyo consiste en disponer consolas en el frente del forjado cada medio metro de distancia, las cuales se fijan a una guía corrida dispuesta previamente al hormigonado del forjado (Fig.2).

Este sistema europeo cuya calidad y eficacia no se discute, es de coste muy elevado, además de tener que prever a tiempo la incorporación de los perfiles de apoyo en fases previas a la construcción de la albañilería del cerramiento (proyecto y estructura), lo que no suele contemplarse con tanta antelación en nuestro país.



Fig.1: Sistema tradicional de apoyo de la fábrica semivolando sobre el borde del forjado y con plaquetas en su frente. Como se muestra en la foto, habitualmente el exiguo apoyo compromete la estabilidad del muro.

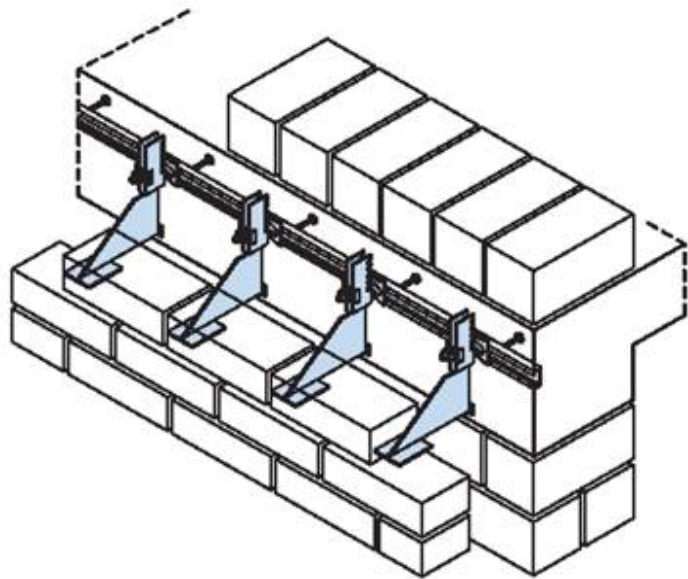


Fig.2. Sistema estándar centroeuropeo "Halfen HK4", de ménsulas de apoyo de la hoja exterior, ancladas a una guía previamente empotrada en el hormigón armado, donde se disponen las ménsulas de apoyo de cada ladrillo.

La nueva tipología de apoyo Halfen-AllWall que ahora se presenta, además de permitir economizar sustancialmente el Sistema de apoyo, al distanciarse las consolas entre sí a los 6m, si bien tienen una constitución más resistente, evita tener que prever la disposición de los perfiles corridos durante el hormigonado de los forjados.

El denominado "Pi Bracket", ofrece la posibilidad de regularse en las tres direcciones del espacio (X, Y, Z) garantizando la perfecta ejecución del plano de fachada y su correcto apoyo sin tener que emplear plaquetas, cualquiera que sean las habituales tolerancias de ajuste entre las fases de la estructura hormigonada y de la albañilería.

Con este nuevo apoyo, los paños de fachada de cualquier tipo de ladrillo, pueden descargar su peso junto a los soportes de fachada, empleando para ello el efecto arco atirantado que permite la fábrica armada, de acuerdo a los cálculos del Manual Murfor español, y gracias a la nueva tipología de apoyo ideado por la sociedad española AllWall Systems, S.L. y desarrollado técnicamente por la empresa alemana Halfen Group, con una patente específica.

3. NUEVO TIPO DE APOYO HALFEN-ALLWALL PARA LA FÁBRICA ARMADA

El Sistema AllWall permite separar los apoyos de los muros a 6m de distancia, al emplear la fábrica armada y actuar, las armaduras de tendel, como tirantes del efecto arco que se genera en el interior de la fábrica al apoyarla puntualmente.

El armado entre los apoyos distanciados, es el mismo cualquiera que sea la altura del arco que soporte, ya que el empuje que proporciona el arco en su base depende de la luz y no de la altura si consideramos como carga la derivada de su peso propio, valiendo por tanto el mismo tirante tanto para arcos adintelados rebajados o dinteles pared peraltados (Fig.3a).

Si los muros se apoyan puntualmente a distancias regulares coincidiendo con la vertical de los soportes, el conjunto del cerramiento deja de cargar en los forjados para cargar directamente junto a la vertical de los soportes, evitando patologías derivadas de la deformación de los forjados y sus transmisiones en el cerramiento .

Esto tiene la ventaja de que en un cerramiento con huecos, el arco que se forma interiormente en la fábrica, puede pasar tanto por debajo como por encima de un hueco en el paño de la altura normal de una planta de vivienda, necesiéndose solamente, 2 ó 3 armaduras Murfor de 5 ó 4mm de diámetro respectivamente, para una distancia entre apoyos de 6 a 7m (Fig.3b).

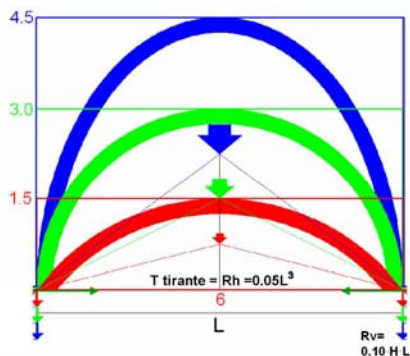


Fig.3.a. Arcos atirantados de distinta altura y forma (rebajado, de medio punto, peraltado) entre dos apoyos distanciados, que sólo requieren del mismo, ya que su sección sólo depende de la luz entre apoyos.

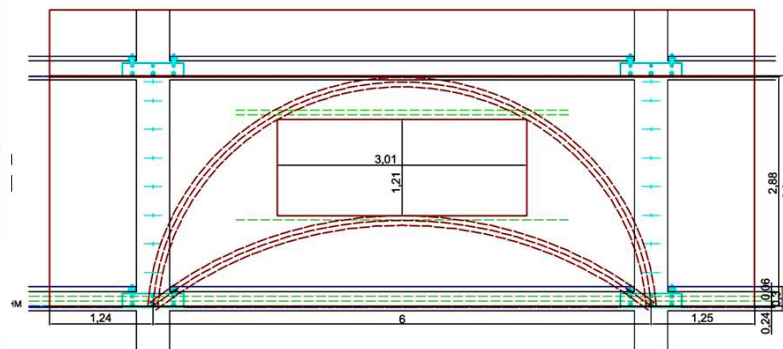


Fig.3.b. Cerramiento de fábrica atirantada apoyado en sus extremos sobre los Apoyos Pi distanciados, que pueden funcionar con dos tipos distintos de efecto arco atirantado con sólo 2 armaduras de tendel, sin llegar a transmitir la carga a los forjados.

La sección por el apoyo Halfen-AllWall de este tipo de fachada del Sistema AllWall, tiene todos los componentes de regulación adecuados para dejar el ancho de la cámara apropiada y el aislamiento continuo por delante del frente del forjado (Fig.4), e incorpora el armado Murfor entre los apoyos distanciados a 6m (Fig.5) de 5,9m de longitud.

Por el contrario, la sección de este mismo muro por el centro del paño, muestra con claridad como no es necesario apoyar la fábrica gracias al “efecto arco atirantado”.

Se sobreentiende que para soportar la presión horizontal del viento en un muro de sólo ½ pie de grueso (11,5cm), se deberá además de anclar dicho cerramiento a los pilares de la estructura y en caso necesario disponer 1 ó 2 postes metálicos intermedios de trasdós también convenientemente anclados a la fábrica, o bien costillas fijadas arriba y abajo de los forjados, que quedarán embebidas en el interior del grueso de la fábrica, a fin de soportar dicho empuje.

4. ENSAYOS REALIZADOS

A continuación, se presentan los ensayos realizados para avalar experimentalmente, la validez de este nuevo planteamiento constructivo, previamente refrendado por el cálculo.

Los ensayos que refrendan esta investigación, se han realizado en 2 laboratorios de países distintos: Alemania y España.

En Alemania, se han ensayado 3 prototipos del Apoyo Halfen-AllWall.

En España, se han ensayado muros de ladrillo de 6m sobre los apoyos anteriores.

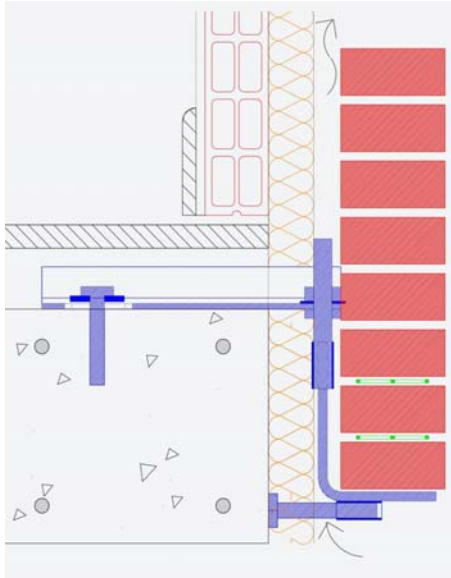


Fig. 4. Sección en la vertical del Apoyo Pi (Halfen-AllWall) anclado al forjado, que muestra las dos armaduras de tendel Murfor del tirante, y la capacidad de aislamiento y ventilación de la cámara continua, y capacidad de regulación del Apoyo Pi.



Fig.5. Armadura de tendel Murfor RND.5/S-80mm, fabricada de 1 pieza con la longitud de 5,85m. Se evitan así errores de falta de solape en el tirante de los dinteles de 6m de luz.

4.1. Ensayos en Alemania del Prototipo del Nuevo Apoyo Pi (Halfen-AllWall).

Los ensayos del Apoyo “Halfen AllWall Pi-Brackets”, se han realizado en el laboratorio Hegger + Partner de Aachen (Alemania), habiendo sido responsabilidad de Dr.-Ing. Rüdiger Beutel y Dipl.-Ing. Marko Balen, por encargo de Halfen Group en marzo 2006.

Los componentes metálicos empleados son de acero galvanizado cumpliendo con las prescripciones normativas para su durabilidad en ambientes exteriores, a excepción de los espárragos roscados y sus casquillos, que son de acero inoxidable dada la significativa magnitud de esfuerzos que han de soportar.

Se han ensayado 3 Apoyos Halfen-AllWall, dispuestos en su posición natural de trabajo, es decir, fijados por encima de un forjado de hormigón y reaccionando por su parte frontal.

El método de medición de la deformación se expresa en gráficos, donde los valores “d0”, “d1”, “d2” y “d3”, se refieren a deformaciones verticales y los valores “d4” y “d5” se refieren a deformación horizontal, producida por el momento que se genera con la aplicación de la carga (Fig. 6 a, b, c)

El ensayo ha consistido en cargar verticalmente dichos apoyos mediante un gato sobre un perfil que reparte la carga uniformemente sobre el Apoyo Halfen-AllWall, hasta obtener el valor máximo de trabajo, comprobando al mismo tiempo si las deformaciones del apoyo son admisibles.

Las muestras ensayadas en relación a la carga aplicada en el tiempo, ofrecieron los diversos valores de deformación vertical “d3” y horizontal “d5”.

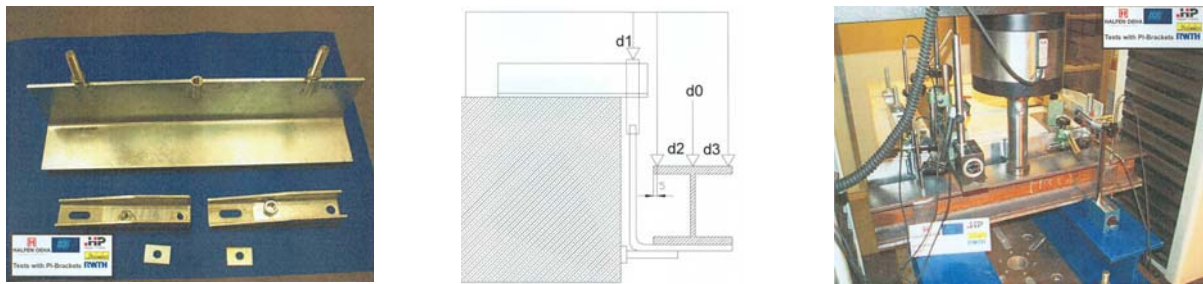


Fig.6. Prototipo del Apoyo Pi para ensayar en Alemania: a) Componentes desmontados; b) Disposición de los captadores de desplazamientos verticales; c) Proceso de ensayo con gato cargando sobre perfil de reparto.

Los 2 primeros ensayos alcanzaron una carga de 66kN, sin llegar a la deformación plástica, marcándose la reacción horizontal de los tornillos en el hormigón. A la carga máxima de deformación, la rotación del Apoyo Pi-Bracket, fue evidente. Y en el 3^{er} ensayo, se llegó a la carga máxima de 104kN, produciéndose el agrietamiento del hormigón junto a los apoyos de los angulares en “U”, y junto a los tornillos de reacción horizontal.

4.2. Ensayos en España de Dinteles de Fábrica Armada Murfor sobre Apoyos Pi a 6m

Los ensayos de los muros de fábrica de ladrillo perforado sobre los apoyos “Halfen-AllWall Pi-Brackets” (fabricados y ensayados en Alemania), se complementan con los ensayos de los muros a tamaño real, empleando la fábrica armada Murfor de Bekaert.

Los ensayos se han realizado entre los años 2006-2007, en el Instituto Eduardo Torroja de Madrid, bajo la dirección del Prof.Dr. Josep M^a Adell y del Dr. Ing. Cecilio López.

Para caracterizar el material de fábrica empleado, se han ensayado probetas de fábrica de 60x60x11,5cm construidas con ladrillo perforado común de 24x11,5x5cm de Cerámica La Oliva, que ofrece una resistencia normalizada mínima de 10N/mm², y mortero de cemento de proporción 1:3.

De ellas se ha determinado la resistencia a compresión en la dirección perpendicular a los tendeles, la resistencia a compresión en la dirección paralela a los tendeles, y la resistencia a cortante.

En el ensayo se ha empleado un ladrillo cerámico perforado común de Cerámica La Oliva con 12 perforaciones iguales, obteniéndose los siguientes valores de resistencia de la fábrica para las probetas ensayadas: Resistencia a compresión normal de la fábrica = 11,73N/mm²; Resistencia a compresión paralela a los tendeles = 9,53N/mm²; Resistencia a cortante = 0,81N/mm².

Con el mismo tipo de fábrica, se han construido 3 dinteles para ensayar a flexión vertical sobre los apoyos Halfen-AllWall, dispuestos a 6m de separación entre ejes, lo que deja una luz libre entre ellos de 5,25m. Todos estos muros disponen de 2 armaduras Murfor RND.5-80mm, dispuestas sobre la primera y la segunda hilada en el arranque del dintel sobre el apoyo. En ningún caso se han previsto ganchos de cuelgue a fin de evitar el desprendimiento de los ladrillos del tendel inferior, dado que las perforaciones de las piezas aseguran su adecuada adherencia con el armado y el mortero.

Los 3 dinteles ensayados tienen las siguientes variaciones entre sí, que se describen a continuación, para lograr con ello optimizar el Sistema AllWall con Halfen y Murfor:

1. Muro de ladrillo de calidad estándar (con M-10), armado sólo con 2 armaduras Murfor como tirante ("A" y "B"), añadiendo la variación de con o sin neopreno interpuesto entre la fábrica y los apoyos Halfen-AllWall. Acero Inox. de 5mm B800. (Fig.7a)
2. Muro de ladrillo de calidad estándar (con M-10) y además del tirante con Murfor ("A" y "B") 2 armaduras para el armado homogéneo ("C" y "D") cada 30cm (5 hiladas). La fábrica se apoya directamente sobre los apoyos Halfen-AllWall en ambos lados, sin interponer neopreno. Acero Inox. de 5mm B800. (Fig.8a)
3. Muro de ladrillo de calidad estándar (con M-10) y además del tirante con Murfor ("A" y "B") 3 armaduras para el armado homogéneo ("C", "D", "E") cada 30cm (5 hiladas). La fábrica se apoya directamente sobre los apoyos Halfen-AllWall en ambos lados, sin interponer neopreno. Acero galvanizado de 5mm B500 (Fig. 9a)

Los muros se han ensayado a flexión vertical empleando 2 gatos hidráulicos con la misma carga, dispuesto a los tercios de su luz, para simular el efecto de carga uniforme equivalente a un peso repartido. Los muros se han instrumentalizado con los correspondientes captadores de deformaciones verticales, además de haber dispuesto 2 galgas extensométricas en el centro de cada una de las armaduras longitudinales de las cerchas Murfor "A" y "B" que constituyen el tirante de la fábrica.

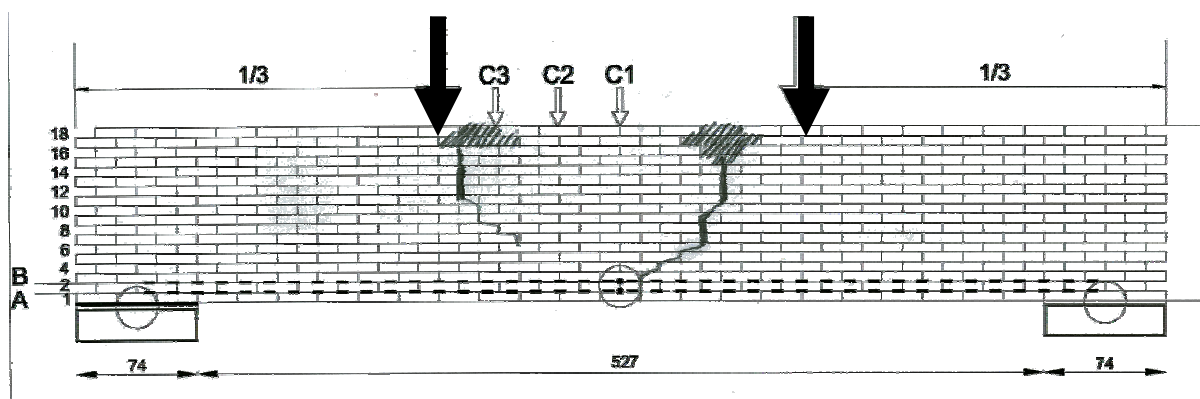


Fig.7.a) 1^{er} Ensayo con 2 armaduras Murfor inox. B800. b) Fallo del dintel por falta de capacidad resistente a compresión de la fábrica, en la dirección paralela a los tendeles.

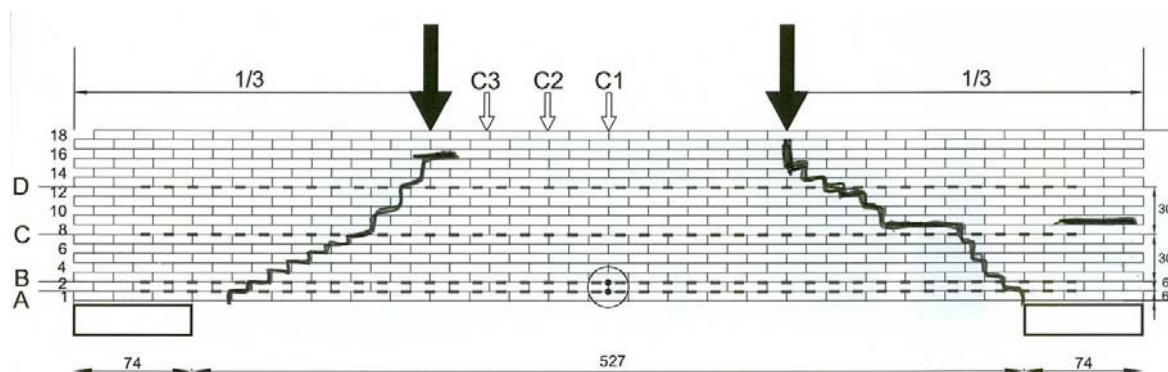


Fig.8.a) 2^o Ensayo con 2 armaduras Murfor inox. B800 más 2 armaduras respartidas cada 30cm (5 hiladas). b) Fallo del dintel por falta de resistencia a cortante de la fábrica.

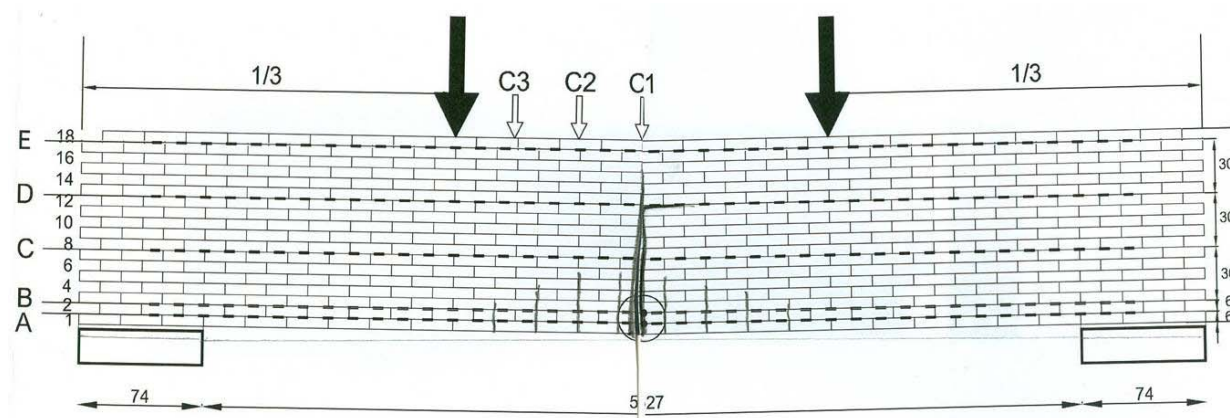


Fig.9. a) 3^{er} Ensayo con 2 armaduras Murfor galvanizadas B500 más 3 armaduras respartidas cada 30cm (5 h.).
b) Rotura del dintel al llegar al límite de tracción de las 2 armaduras de tendel inferiores.

El ensayo del primer dintel ha sido plenamente satisfactorio dentro de los márgenes de seguridad fijados para los materiales, si bien su rotura se ha producido por falta de capacidad resistente de la fábrica en el sentido paralelo a los tendeles, sin llegarse a romper el alambre de las 2 armaduras que constituyen el tirante Murfor, tal y como se muestra en el gráfico adjunto (Fig.7b)

Es importante significar que, si bien la rotura de los ladrillos fue clara y las fisuras derivadas de esfuerzos cortantes en estados últimos llegaron al medio centímetro, la fisura en el centro del dintel de la zona traccionada, apenas superó el milímetro manteniendo la cohesión global del muro, inclusive sin haberse empleado ganchos de cuelgue de los primeros ladrillos respecto de la armadura dispuesta sobre el primer dintel.

A la vista del tipo de rotura del 1^{er} dintel y para aproximarnos más a la capacidad resistente de la tracción del tirante en el ensayo del 2^o dintel, se decidió proceder a armarlo homogéneamente, disponiendo 2 armaduras más cada 30cm (5 hiladas), manteniendo el mismo tipo de armadura Inox. B800.

El tipo de rotura del 2^o ensayo, fue más satisfactoria, mostrando una perfecta rotura a cortante del conjunto de la fábrica. A pesar de ello, no se logró romper las armaduras del tirante, ni siquiera la deformación excesiva de dichas armaduras (Fig.8b).

A la vista de la rotura del 2^o ensayo, se decidió incrementar el armado homogéneo del 3^{er} dintel, añadiendo una tercera armadura, dispuesta igualmente cada 30cm (5 hiladas). Y con el fin de disminuir la resistencia conjunta del dintel de fábrica, se varió la armadura Inox. por armadura de tendel de acero galvanizado de 5mm de diámetro.

La rotura del ensayo del 3^{er} dintel, logró por fin llegar al objetivo deseado de determinar la resistencia de un dintel de fábrica sobre apoyos Pi distanciados 6m entre sí, al romperse las 2 armaduras que constituyen el tirante de dicho dintel (Fig.9b).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Analizamos a continuación los ensayos realizados sobre el Apoyo Halfen-AllWall en Aachen (Alemania) y sobre el muro en Madrid (España).

5.1. Ensayos en Alemania del Nuevo Apoyo Pi (Halfen-AllWall).

Los ensayos en Alemania del Apoyo Halfen-AllWall, arrojaron valores entre 66 y 104kN. En el caso del ensayo de carga máxima de 66kN, el gráfico de tensión deformación muestra una deflexión de unos 4mm en el borde exterior del perfil, al alcanzar los 40kN.

5.2. Ensayos en España de Dinteles de Fábrica Armada de 6m (Murfor)

El primer ensayo realizado en el I.E. Torroja de Madrid, nos muestra con claridad las siguientes situaciones (Fig.10):



Fig.10. Dintel sobre los apoyos Pi a 6m de distancia, antes de su ensayo.

- No se ha observado ninguna diferencia en el comportamiento de la fábrica sobre los Apoyos Pi del 1^{er} ensayo, dispuesta con y sin neopreno interpuesto (el izquierdo, con neopreno intermedio y el derecho, apoyando directamente el ladrillo sobre el acero del apoyo Halfen-AllWall). Esta positiva circunstancia, llevó a quitar el neopreno intermedio entre el ladrillo y el metal, en el 2^o y 3^{er} ensayo.
- No se dispuso ningún tipo de sujeción para los ladrillos que colgaban (a través del mortero) de la armadura sobre la 1^a hilada. Ninguno de los ladrillos de la 1^a hilada, mostraron ningún tipo de desplazamiento o descuelgue en ninguno de los 3 ensayos.

- En el 1^{er} ensayo, la carga de rotura total llegó a los 90kN, lo que supone 45kN en cada apoyo Pi. Esta carga distribuida por los 85.000mm² de cada apoyo, implica una carga de 0,53N/mm². Esta carga sigue siendo conservadora para los valores de resistencia de un tipo de fábrica de ladrillo con mortero M-10. La carga de rotura llega a tener un coeficiente de seguridad de 2,4 veces la carga de un muro de ½ pie de 3m de altura (muro de 2,4 plantas de altura).
- En el 2^o ensayo, la carga de rotura llegó a 160kN, lo que supone 80kN en cada Apoyo Pi. Esta carga, distribuida en cada apoyo, supone 0,94N/mm², prácticamente doble de la del 1^{er} ensayo. La carga de rotura llega al coeficiente de seguridad de 4,0 veces la carga de un muro de ½ pie de 3m de altura (muro de 4 plantas de altura).
- Con el fin de lograr romper las armaduras de tendel traccionadas en la parte inferior del dintel (lo que no se logró ni en el 1^o ni en el 2^o ensayo), la construcción del 3^{er} dintel se hizo cambiando la armadura inox. de 800, por alambre de acero galvanizado B500, de menor resistencia.
- En el 3^{er} ensayo, la carga total de rotura llegó a 140kN, lo que supone 70kN en cada Apoyo Pi. Esta carga, distribuida en cada apoyo, supone 0,82N/mm², que sigue siendo conservadora con este tipo de fábrica de ladrillo perforado con mortero M-10. La carga de rotura llega al coeficiente de seguridad de 3,6 veces la carga de un muro de ½ pie de 3m de altura (3,6 plantas de altura). La fisuración de la fábrica durante el ensayo previa a la rotura, junto a las armaduras traccionadas, no superó 1mm de grueso, hasta que se produjo la rotura instantánea de las armaduras de tendel inferiores del muro (Fig.11) (Fig.12).



Fig.11. Detalles de la rotura del 3^{er} dintel; a) Imagen frontal de la rotura de las armaduras de tendel inferiores; b) Detalle de la deformación del armado en su rotura.

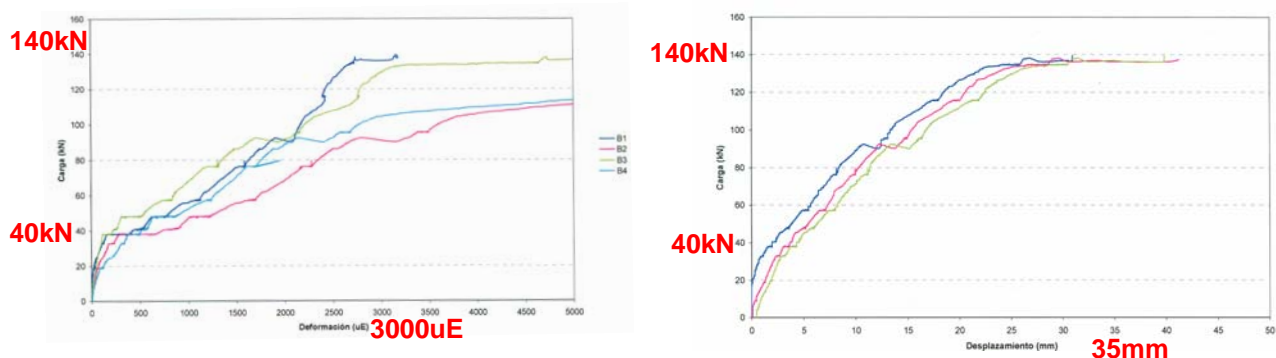


Fig.12. Diagramas del 3^{er} ensayo: a) Tensión-deformación de las 4 bandas extensométricas de las armaduras; b) Desplazamiento vertical de la fábrica medido por los 3 LVDTs, 1 vertical y 2 frontales al muro.

6. CONCLUSIONES

En los 3 ensayos realizados en Alemania por Halfen-Deha sobre los prototipos metálicos del Apoyo Pi, la rotura se produjo en el hormigón de apoyo, debajo de las 2 “U” de cuelgue de dicho apoyo, y después de superar los coeficientes de seguridad establecidos en el cálculo.

El 1^{er} dintel ensayado en el I.E. Torroja, mostró falta de resistencia de la fábrica en la dirección de los tendeles, admitiendo una gran deformación antes de su agotamiento, sin que se llegaran a romper las 2 únicas armaduras de la zona inferior atirantada del dintel.

Ensayo Dintel	Nº Armaduras	Calidad Acero	Tipo de rotura	Carga (kN)	Coefficiente Seguridad (*)
1º	2	B-800	Rotura Horizontal	90	2.4
2º	4	B-800	Rotura a cortante	160	4.0
3º	5	B-500	Rotura del alambre	140	3.6

(*) Siendo “1”, la carga de 3m de alto x 6m de largo de una fachada de ladrillo de 11,5cm de grueso.

El 2º y el 3^{er} dintel ensayados en el I.E. Torroja (homogéneamente armados con 2 y 3 armaduras respectivamente a las dos inferiores del tirante), han permitido un comportamiento de la fábrica en el ensayo mucho más uniforme que el 1^{er} ensayo, llegando a duplicar tanto las cargas de rotura como los coeficientes de seguridad.

En conclusión, puede afirmarse que tanto por los ensayos realizados en Alemania sobre los nuevos Apoyos Pi, como por los ensayos realizados en España de los muros sobre dichos apoyos, se han superado las expectativas respecto al comportamiento de la fábrica armada.

El grado de seguridad demostrado por los ensayos respecto a los márgenes de viabilidad del sistema que se había previsto inicialmente para soportar 1 planta de altura (3m de fábrica de ½ pie), permite asegurar su viabilidad para una altura de 2 plantas (6m).

Esta experimentación realizada entre los laboratorios de Alemania y España, permite poner en el mercado, con toda seguridad, una investigación española, fabricada con tecnología alemana en la edificación de las fachadas de ladrillo de nuestro país (Fig.13 a,b,c,d,e).



Fig.13.a) Edificio residencial en Lleida con fachada de ladrillo catalán (13,5cm) sobre Apoyos Pi.



Fig. 13. Proceso constructivo del Apoyo Pi en la Fachada de un edificio residencial en Lleida.

- b) Paño de fábrica ya arrancado sobre Apoyo Pi en su izquierda con su tirante Murfor incluido;
- c) Apeo de la 1ª hilada de ladrillo de un Apoyo Pi a la derecha del paño;
- d) Vista lateral del Apoyo Pi dejando la cámara de aire continua por delante del forjado;
- e) Vista posterior del apoyo Pi anclado al forjado junto en la vertical del soporte.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la inestimable colaboración de los Institutos de Investigación IBAC de Aachen (Alemania) y el I.E. Torroja de Madrid (España), por haber hecho posible esta interesante colaboración investigadora europea de valor internacional.

REFERENCIAS

ADELL, J.M. 1987. *Arquitectura de ladrillos del siglo XIX. Técnica y Forma*. Ed. Fundación Universidad-Empresa. (2), 287, Madrid [1]

ADELL, J.M. 1992. The Architectural Potential of Bed Joint Reinforcement . 3rd. International Masonry Conference. British Masonry Society. 4, London 1992 [4].

ADELL, J.M. 1994. Architecture and Research with Reinforced Masonry. 10th International Brick and Block Masonry Conference. 10th IBMAC. 10, Calgary [5].

ADELL, J.M. 1995. Vertical flexural bending in lintels of bed joint reinforced clay masonry in Spain. British Masonry Society. 4th International Masonry Conference. 7, London [6].

ADELL, J.M. 2000. *Arquitectura sin fisuras*. Ed. Munilla-Lería. 175, Madrid [8].

ADELL, J.M. 2000. *La fábrica armada*. Ed. Munilla-Lería. 350, Madrid [9].

ADELL, J.M. 2000. Millennium Arch. Structural Analysis and Construction. 12th International Brick/Block Masonry Conference. 36, Madrid [10].

ADELL, J.M. 2003. Millenium Arch: construction and structural analysis. Masonry International. British Masonry Society. 2, Londres [12].

ADELL, J.M. 2002 Patent nº 200202837: "Sistema de apoyo para muros de albañilería" (Pi Brackets). Madrid [13].

ADELL, J.M. y otros. 2006. "TESTS ON LONG SPAN LINTELS SUPPORTED ON WALL BRACKETS". 7 IMC (*International Masonry Conference*), Londres [17].

ADELL, J.M. y otros. 2008 "6m SPAN LINTELS TESTS ON A NEW WALL PI-BRACKETS TYPE". 14th IBMAC (*International Brick Block Masonry Conference*). Sidney, Australia [18].

FISHER, K. 2000. Reference of the 12th IBMAC held in Madrid 2000. Masonry International. 2, London [11].

HALFEN GROUP-ADELL, J.M. 2005. Konsolanker für eine Gebäudewand. International Patent. Germany [4].

HALFEN GROUP - BEUTEL, R & BALEN, M. 2006. Testereport of three Halfen Pi-Brackets to examine de load capacity and the defelction behaviour of the brickwork supoorts. Germany [15].

I.E. TORROJA - ADELL, J.M. - LÓPEZ, C. 2006. Ensayos a flexión vertical de muros de fábrica armada (Murfor) de 6m de luz entre apoyos Pi (Halfen-AllWall). Madrid. [16].

LAHUERTA, J.A. & ADELL, J.M. 1992. Manual Murfor: La Fábrica Armada. Bekaert Ibérica, S.A. (1), 129, Barcelona [2].

PFEFFERMANN, O. 1999. *Maçonnerie Portante*. Cover. Editorial: Kluwer. Bélgica, 1999 [7]

TIMPERMAN, P. & RICE, J.A. 1992. Murfor Reinforced Masonry. Masonry International 6, 2, London [3].