
Campaña experimental cuasi-no destructiva desarrollada en elementos estructurales de fábrica: Ensayos in situ y en laboratorio

I. Lombillo, L. Villegas

Dpto. Ingeniería Estructural y Mecánica. Universidad de Cantabria (UC). Avda. Los Castros s/n, Santander 39005, España.

E-mail: ignacio.lombillo@unican.es

E-mail: luis.villegas@unican.es

Resumen: El propósito del artículo es aportar una visión actualizada de algunas de las metodologías no destructivas aplicadas, de forma general, al diagnóstico de muros de fábrica tanto de piedra como de ladrillo. Existe una necesidad imperante de regir los procesos de inspección y de intervención en rehabilitación de construcciones. Desde el punto de vista de la tecnología de estructuras es imprescindible conocer las características mecánicas de los elementos estructurales intervinientes, así como los niveles tensionales existentes en servicio. Actualmente la tendencia es obtener dicho conocimiento de forma no destructiva para dañar lo menos posible las construcciones involucradas.

A este respecto se va a aportar una descripción de las técnicas de gatos planos, hole-drilling y técnicas dilatómetricas, exponiendo los resultados obtenidos sobre un muro de sillería arenisca construido en laboratorio.

Palabras-clave: Gatos planos, hole drilling, dilatómetro, presiómetro, fábrica.

1 Introducción

El análisis de construcciones antiguas formula importantes desafíos debido a la complejidad de su geometría, la variabilidad de las propiedades de los materiales tradicionales, las diferentes técnicas de construcción, etc. Por ello que sea necesario disponer de una metodología racional de análisis fundamentada en la multidisciplinaridad para poder acometer dichas intervenciones con el máximo de rigor posible.

El empleo de técnicas no destructivas, en general, y en particular las basadas en aspectos de carácter tensional, puede encuadrarse dentro de la fase de reconocimiento experimental.

Los datos obtenidos mediante dichas técnicas no destructivas son necesarios para obtener tanto las características mecánicas necesarias para el análisis y comprensión del comportamiento mecánico de las construcciones históricas (creación de modelos de cálculo), como para validar el análisis en si mismo.

En lo que sigue nos vamos a centrar en el empleo de técnicas basadas en aspectos tensionales (gato plano, hole drilling y dilatometría de fábricas). Para ello, en primer lugar se va a realizar una breve descripción de cada una de dichas técnicas, para a continuación exponer los resultados obtenidos sobre un muro de sillería arenisca construido en laboratorio.

2 Descripción de técnicas no destructivas basadas en aspectos tensionales

2.1 La técnica de gatos planos.

El ensayo de gatos es un método directo e in situ que requiere solamente la remoción de una porción de mortero de las juntas de una fábrica pétreo o de ladrillo, por ello que se considera un ensayo ligeramente destructivo al ser un daño temporal y fácilmente reparable después de realizar el ensayo.

Se emplea para la evaluación no destructiva de algunas propiedades mecánicas y de deformabilidad de los materiales que conforman la estructura de fábrica.

El ensayo de gato plano proviene del campo de la mecánica de las rocas. Fue inventado por el ingeniero francés Eugene Freyssinet en 1934 y a principios de los años 80 el investigador italiano Paolo Rossi, adaptó el método para poderlo emplear en fábricas de ladrillo y mampostería.

El objetivo de la técnica del gato plano consiste en obtener información estimativa y fiable sobre los siguientes parámetros:

- Estimación del estado tensional de compresión en una zona muy local de la estructura.
- Estimación de las características de deformabilidad (módulo de deformación y coeficiente de Poisson) de los materiales que la forman.

El ensayo queda dividido en dos fases, en la primera, se utiliza un gato plano para estimar el estado tensional de compresión en el punto elegido de la estructura; en la segunda fase, se emplean dos gatos planos con el fin de estimar las características de deformabilidad del material existente entre los dos gatos planos citados.

Existen varias normativas vigentes para la evaluación de fábricas mediante la técnica de gatos planos. En Estados Unidos fueron desarrolladas por el ASTM (American Society for Testing and Materials), siendo aprobadas en 1991, actualmente existe una actualización de las mismas (C1196-04: "Standard test method for in situ compressive stress within solid unit masonry estimated using flatjack measurements"; C1197-04: "Standard test method for in situ measurement of masonry deformability properties using the flatjack method"). En Europa, se emplea la normativa RILEM aprobada en 1990 (RILEM LUM.D.2: "In-situ stress tests on masonry based on the flat jack"; RILEM LUM.D.3: "In-situ strength/elasticity tests on masonry based on the flat-jack").

Un gato plano, en general, consiste en dos planchas de acero inoxidable soldadas a lo largo de las esquinas con uno o dos puertos de entrada y salida, que conectados a un circuito hidráulico con bomba son capaces de suscitarle una presión interna.

Se puede fabricar con diferentes formas y tamaños. Las dimensiones actuales están determinadas por su función, por la técnica empleada para preparar la hendidura y por las propiedades de la fábrica que va a ser ensayada. Una regla general para obtener resultados representativos del estado de tensión real del conjunto de la fábrica es emplear el mayor tamaño posible de gato plano. Un gato plano ideal ha de rellenar completamente la hendidura en la junta de mortero, si un gato plano no tiene la dimensión suficiente para rellenar la roza por completo, se emplean placas de relleno.

El ensayo con gato plano se lleva a cabo en dos fases. En primer lugar se determina el estado tensional a compresión de la fábrica y en la segunda, las características de deformabilidad.

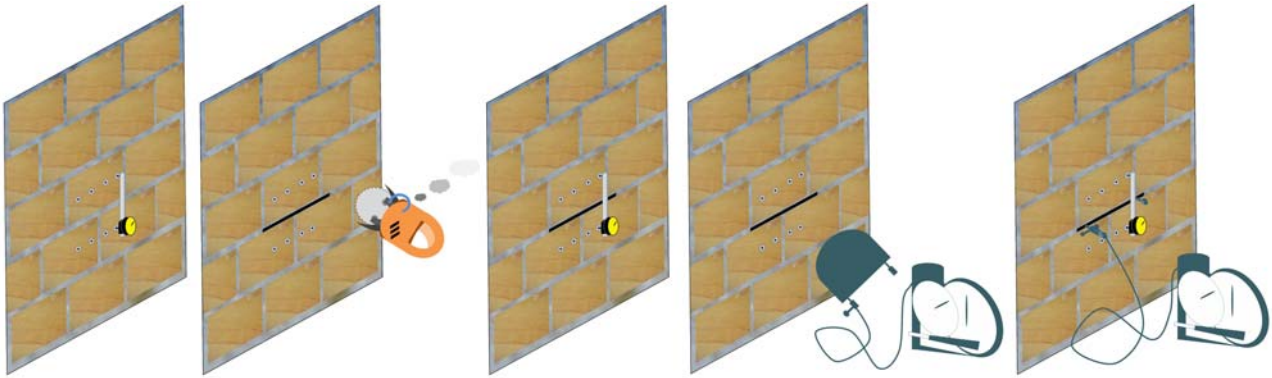
No es necesario y a menudo no es posible poner en carga todo el grosor de la pared, dado los grandes espesores que pueden alcanzar los muros de fábrica antiguos. No obstante, en todos los casos ha de ser ensayada al menos una de las hojas de la fábrica. Los resultados obtenidos se refieren solamente a la hoja que ha sido ensayada.

2.1.1 Estimación in situ del estado tensional a compresión

Este ensayo está basado en el principio de liberación parcial de tensiones. Implica la eliminación local de tensiones, seguida de una restitución controlada del nivel de tensiones eliminado (Figura 1).

Inicialmente se colocan sobre la estructura unas bases verticales de medida midiéndose la distancia d_i entre puntos por medio de un comparador. A continuación, se realiza un corte normal entre los dos puntos mencionados empleando una sierra con disco de diamante u otro útil de corte adecuado. Debido al reajuste tensional, la distancia d existente entre dichos puntos será menor que la inicial: $d < d_i$. Con posterioridad se coloca un gato plano en el corte realizado, conectándose a una bomba hidráulica para, seguidamente, incrementar gradualmente la presión en el gato (Figura 2) hasta que se recupera la distancia original existente entre los puntos de medida $d = d_i$.

Figura 1. Fases del ensayo de la medida del estado de tensión.



En este punto la presión en el interior del gato plano (p_i) puede relacionarse con el estado tensional preexistente en la dirección normal al plano de corte (p). Dicho estado tensional en un punto de la estructura se calcula según la expresión:

$$\sigma = p \cdot K_m \cdot K_a \quad (1)$$

donde:

- p : Presión comunicada al gato plano por la bomba hidráulica, en Kp/cm^2 ,
- K_m : Constante adimensional propia de cada gato plano,
- K_a : Relación entre el área de contacto del gato plano y el área media del corte realizado en la estructura ($K_a < 1$), ver figura 3.

Los gatos planos están diseñados para suministrar una presión a la fábrica donde son ensayados, linealmente dependiente de la presión hidráulica interna. Dicha dependencia se explicita mediante la constante adimensional K_m determinada durante el proceso de calibración, función de las propiedades geométricas del gato plano y de su rigidez. Dicha constante siempre es menor que la unidad ($K_m < 1$) pues por la rigidez inherente al dispositivo parte de la presión interna es absorbida por el propio gato plano y por ende no es transmitida a la fábrica circundante.

Figura 2. Ensayo de gato plano simple en un muro de ladrillo en el Laboratorio de Estructuras de la UC (Colaboración GTED - AIDICO).

Figura 3. Relación entre el área de contacto del gato plano y el área media del corte realizado (demolición controlada de un muro de mampostería, empleado para realizar varios ensayos en el Laboratorio de Estructuras de la UC).



2.1.2 Determinación de las características de deformabilidad

En este ensayo se realizan dos cortes normales a la superficie de la estructura de estudio a una distancia entre ellos. Previamente se sitúan unas bases verticales de medida, de la forma más simétrica posible sobre la fábrica, dentro de la zona comprendida entre los futuros cortes, a una distancia determinada mediante comparador.

A continuación se realizan dos cortes paralelos para insertar los gatos planos. Estos cortes producen el aislamiento de la parte del muro de fábrica existente entre las rozas constituyendo una "probeta" in situ que se considera liberada de cargas.

Una vez introducidos los gatos planos en los cortes (Figura 4), se comunican pequeños escalones de presión mediante bomba hidráulica, se tomará lectura de la distancia entre puntos de referencia d_i ($d_i < d$) para cada escalón de presión i .

Figura 4. Ensayo de gato plano doble en el Seminario Mayor de Comillas, Cantabria.



Mediante incrementos graduales de la presión puede determinarse la relación entre tensión y deformación. También pueden simularse ciclos de carga-descarga.

El valor estimado de la tensión, en la zona delimitada por los gatos planos, para cada estado de presión i se calcula de la misma forma, ecuación (1) que en el ensayo de tensión in situ aludido con anterioridad. Para cada escalón de presión i corresponderá una deformación que se calcula mediante la expresión:

$$\varepsilon_i = (d - d_i) \cdot K_e \quad (2)$$

donde:

- ε_i : Deformación correspondiente al estado de presión del escalón i .
- d : Distancia inicial existente entre los puntos de referencia.
- d_i : Distancia entre puntos de referencia para el escalón de presión i .
- K_e : Constante de deformación del comparador.

Estimada la presión y deformación para cada uno de los escalones de presión i , se puede dibujar la gráfica tensión-deformación que permite estimar el módulo de elasticidad para cada uno de los escalones de presión i , según la ecuación:

$$E_i = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} \quad (3)$$

Las tensiones que se van a deducir no son Tensiones Residuales sino Estados Tensionales en Servicio. La Técnica Hole Drilling en Patrimonio Arquitectónico consiste, por tanto, en adaptar experimentalmente un procedimiento normalizado para la cuantificación de las Tensiones Residuales (tensiones cercanas a la superficie del material). El método propuesto permite deducir las tensiones principales (σ_{\max} y σ_{\min}), y su dirección (β), a partir de tres deformaciones (ϵ_1 , ϵ_2 y ϵ_3) registradas en tres direcciones (Figura 5).

En el caso de fábricas de sillería o mampostería la zona de medida se elige de tal modo que todo el proceso experimental pueda realizarse en un sillar. Nunca las bandas o el taladro deben de incluir el mortero. En lo que respecta a las fábricas de ladrillo el pulido superficial debe de abarcar una zona tal que asegure que las bandas extensométricas se colocarán sobre ladrillo y que el taladro, a ser posible, se centre en otro. En todo caso, en el análisis de fábricas de ladrillo el taladro abarcará forzosamente mortero y ladrillo.

El procedimiento experimental es laborioso y se compone de varios pasos que tienen todos ellos una fuerte incidencia en los resultados. En vez de utilizar tres bandas extensométricas como propone la Norma ASTM E837-95, para el análisis de las fábricas de sillería se aconseja emplear siempre un mayor número de bandas (en general 8) con el objeto de eliminar o modular posibles errores experimentales. En general, no es posible utilizar un número tan elevado de galgas en fábricas de ladrillo. La praxis es la siguiente:

1. Elección y pegado de las bandas extensométricas
2. Una vez adheridas las bandas extensométricas, se conectan mediante “medio puente de Wheastone” a un equipo multicanal de registro de deformaciones.
3. Registro de deformaciones antes del taladrado
4. Taladrado (Figura 6)
5. Registro de las deformaciones después del taladro (Figura 7)
6. Obtención de los estados tensionales

Figura 6. Detalle de un instante durante el proceso de taladrado de muro de ladrillo en el Laboratorio de Estructuras de la UC.

Figura 7. Detalle de la zona de ensayo, una vez finalizado, en un muro de mampostería caliza del Seminario Mayor de Comillas, Cantabria.



Las tensiones principales y sus direcciones se obtienen a partir de las siguientes expresiones:

$$\sigma_{\max} = \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1}{A} - \frac{1}{B} \cdot \sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2 \cdot \varepsilon_2)^2} \quad (4)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1}{A} + \frac{1}{B} \cdot \sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2 \cdot \varepsilon_2)^2} \quad (5)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \cdot \arctan g \left(\frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2 \cdot \varepsilon_2}{\varepsilon_3 - \varepsilon_1} \right) \quad (6)$$

siendo ε_1 , ε_2 y ε_3 las deformaciones registradas a 0° , 225° y 90° con una dirección de referencia, σ_{\max} y σ_{\min} son las tensiones principales máxima y mínima respectivamente y β es el ángulo entre σ_{\max} y la dirección de ε_1 medido en sentido antihorario (también es el ángulo entre σ_{\min} y la dirección de ε_3). Para la deducción del ángulo β debe de tenerse en cuenta los signos del numerador y del denominador.

La deducción de los estados tensionales a partir de las deformaciones registradas en las bandas está fuertemente influenciada por las Constantes A y B que relacionan aquéllas con los estados tensionales que las originan. Dichas constantes A y B pueden determinarse de forma teórica en función de unos parámetros adimensionales (a y b), del módulo de Elasticidad (E) y del coeficiente de Poisson (ν), o bien experimentalmente mediante un ensayo basado en la realización de un taladro idéntico al llevado a cabo en el elemento portante en servicio, pero en este caso en una probeta paralelepípedica de similar calidad al material ensayado in situ.

2.3 Técnicas dilatométricas

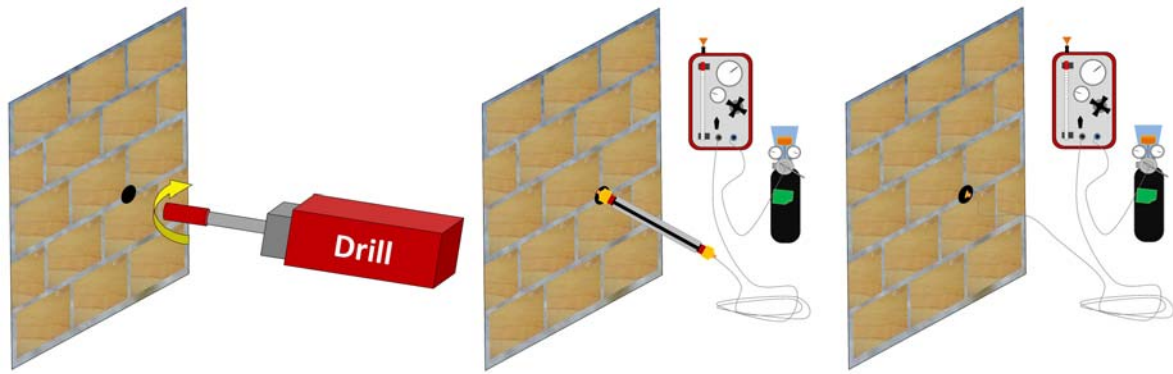
La técnica dilatométrica o presiométrica se trata de un ensayo de carga in situ realizado sobre un muro en el que se introduce una tensión mediante una sonda cilíndrica que alojada en una perforación practicada en la pared puede dilatarse radialmente (Figura 8).

Figura 8. Dilatómetro del Grupo de Tecnología de Edificación de la UC.



El procedimiento de ensayo (figura 9) consiste en taladrar una perforación, cuidando de reducir al mínimo la perturbación en la pared, con un diámetro compatible con el tamaño de sonda a introducir. A partir de las lecturas del ensayo, presión suministrada por la sonda e incremento de volumen, puede obtenerse la curva presión – volumen inyectado, de la que puede estimarse el módulo de deformación de la fábrica.

Figura 9. Fases del ensayo dilatométrico.



3 Campaña experimental en laboratorio sobre un muro de sillería de arenisca.

3.1 Construcción y transporte del muro.

En primer lugar fue necesaria la construcción del elemento estructural, a base de sillares de arenisca y mortero bastardo de cal y cemento 1:2:10 (partes en volumen de cemento: cal: arena), así como su transporte bajo el pórtico de carga.

Figura 10. Transporte del muro.

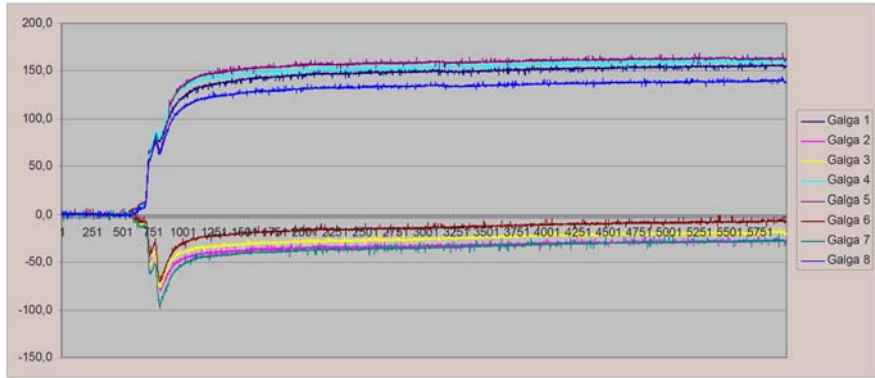
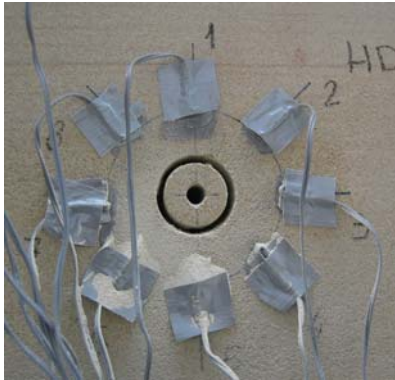
Figura 11. Apertura de cargas.



3.2 Obtención de parámetros previos

Para poder estimar el nivel tensional medio existente fruto de la aplicación de un determinado nivel de carga, fue necesario obtener previamente el ángulo de apertura de la carga introducida por la sufridera metálica en el muro. Para ello se dispusieron una serie de galgas extensométricas, ver figura 11, para captar dicho fenómeno. Se adoptó una apertura de 23° .

Figuras 12 y 13. Ensayo hole drilling una vez realizado y resultados del mismo.



En segundo lugar, para tener datos experimentales de contraste, se determinó, mediante la disposición de una serie de transductores electrónicos, el módulo de elasticidad del muro. Para ello se realizó un ensayo de compresión en cuatro escalones de carga (hasta alcanzar una carga total en cabeza del muro de 900 kN). El módulo de elasticidad obtenido fue de 1,992.00 N/mm².

3.3 Realización de ensayos de Hole drilling.

En las figuras que se adjuntan puede observarse tanto el taladrado realizado, como la evolución de las medidas de deformación de las galgas dispuestas.

En las tablas siguientes se recogen las deformaciones finales registradas, así como las tensiones principales y la tensión vertical en servicio de cada una de las 8 combinaciones de ternas de galgas extensométricas disponibles.

Tabla 1. Deformación final registrada tras taladrado ($\mu\text{m}/\text{m} = 10^{-6} \text{ m}/\text{m}$)

Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 6	Canal 7	Canal 8
155	-28	-19	160	163	-7	-28	139

Tabla 2. Tensiones principales y la tensión vertical en servicio

Combinación	Canales	$\sigma_{\text{max}} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	$\sigma_{\text{min}} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	B (°)	$\sigma_{\text{vertical}} \text{ (N/mm}^2\text{)}$
1	1, 3, 6	-0.22	-1.83	70	-1.64
2	2, 4, 7	-0.06	-1.93	23	-1.67
3	3, 5, 8	-0.29	-1.88	-18	-1.73
4	4, 6, 1	-0.35	-1.95	-68	-1.71
5	5, 7, 2	-0.07	-1.96	68	-1.69
6	6, 8, 3	-0.21	-1.78	25	-1.60
7	7, 1, 4	-0.02	-1.89	-23	-1.60
8	8, 2, 5	0.12	-1.79	-64	-1.59

Los resultados obtenidos por las 8 combinaciones son válidos, pudiendo concluir que la tensión vertical es de 1.65 N/mm² (fruto de una carga mantenida en cabeza del muro de 900 kN).

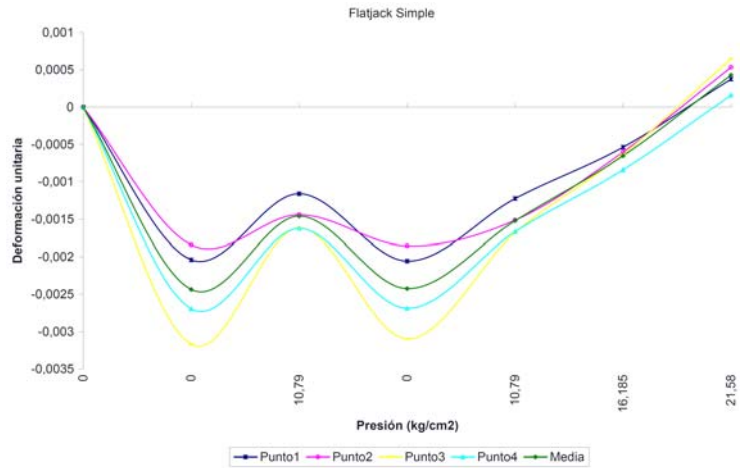
3.4 Realización de ensayos de Gato plano.

Al igual que se realizó en los ensayos de hole drilling, se mantuvo constante una carga, en cabeza del muro, de 900 kN.

Seguidamente se procedió a la realización de los ensayos de gato plano simple. A continuación se muestra una fotografía y el resultado de uno de los ensayos realizados en el muro de sillería arenisca.

Figura 14. Instante de un ensayo de gato plano simple.

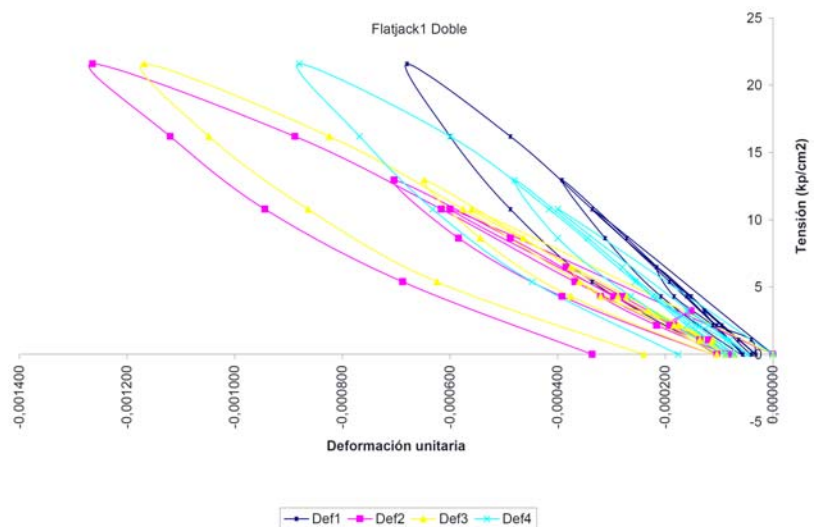
Figura 15. Resultado del ensayo, el nivel tensional determinado en este caso fue de 1.94 N/mm^2 .



Finalmente, se realizaron los ensayos de gato plano doble. En lo que sigue se muestra una fotografía y el resultado de uno de los ensayos realizados.

Figura 16. Instante de un ensayo de gato plano doble.

Figura 17. Resultado del ensayo, el módulo de elasticidad (E) estimado fue de $2,019.20 \text{ N/mm}^2$, y coeficiente de Poisson (ν) de 0.17.



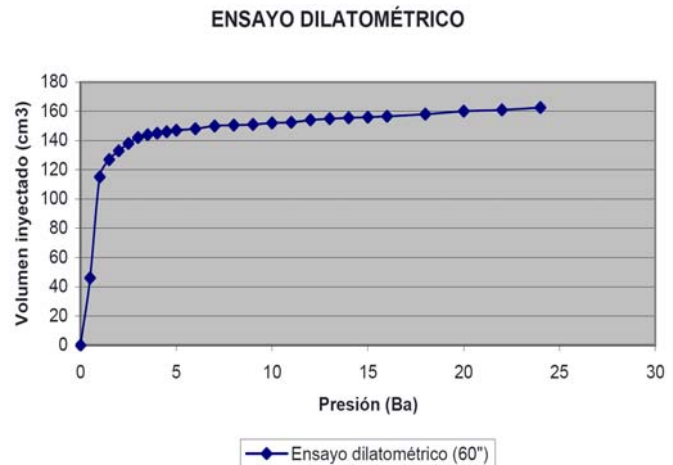
3.5 Realización de ensayos dilatométricos.

También se procedió a la realización de ensayos dilatométricos o presiométricos en el muro objeto de estudio. Para ello previamente fue necesario realizar la perforación necesaria para albergar en su interior la sonda presiométrica.

Una vez finalizada la perforación se introdujo la sonda, realizando ciclos de presión y leyendo los incrementos de volumen derivados. La gráfica obtenida, así como un instante del ensayo, se muestra a continuación.

Figura 18. Instante de un ensayo presiométrico.

Figura 19. Grafica obtenida en el ensayo.



Con las presiones disponibles no se consiguió alcanzar la fase plástica y por ende la formulación para obtener E no fue aplicable.

4 Conclusiones

A continuación se presenta una tabla resumen de los resultados expuestos con anterioridad.

Tabla 3. Resumen de resultados

Parámetros ⁽¹⁾	Datos de contraste (N/mm ²)	GP-A (N/mm ²)	GP-B (N/mm ²)	HD (N/mm ²)	DILAT. (N/mm ²)
Nivel tensional en el plano de ejecución de GP-A	2.06	2.45 (ε = 15.75 %)			
Nivel tensional en el plano de ejecución de GP-B	2.15		1.94 (ε = 9.72 %)		
Módulo de deformación del muro de sillería	1,992.00	2,320.50 ⁽²⁾ (ε = 14.16 %)	2,019.20 ⁽²⁾ (ε = 1.35 %)		----
Nivel tensional en el plano de ejecución del HD	1.72			1.65 (ε = 3.61 %)	

⁽¹⁾ Se considera una apertura de cargas 23°, y como nivel tensional el medio en el plano. La anchura del muro son 31 cm.

⁽²⁾ Se considera el módulo secante medio en el ciclo de carga 1.

En relación a la técnica **Hole Drilling** puede concluirse que se trata de un ensayo ligeramente destructivo. Ofrece la posibilidad de obtener las tensiones principales, y por ende la tensión en cualquier dirección. Tiene el inconveniente de necesitar ensayos complementarios para la obtención de las características mecánicas (E y ν) del material soporte de las galgas extensométricas. En relación a la obtención de los niveles tensionales involucrados, en fábricas de sillería, dada su regularidad, a priori, el ensayo se muestra como adecuado.

En relación a la técnica de **Gatos Planos** puede concluirse que también se trata de un ensayo ligeramente destructivo y muy intuitivo. La fase crítica del ensayo es realizar una roza adecuada, pues de su adecuación depende mucho la bondad de los resultados. Únicamente se obtiene el nivel tensional, de compresión, perpendicular al plano definido por el gato plano. Una ventaja es que mediante el complemento del gato plano doble, se pueden estimar las características mecánicas (E y ν) del muro, por lo que se muestra como un ensayo más completo que el hole drilling, no dependiendo de ensayos complementarios.

En relación a la técnica de **Dilatometría**, aludir a que se requiere un esfuerzo importante y útiles adecuados para realizar perforación. Como para calcular el módulo presiométrico es necesario, según la formulación relacionada, el alcanzar la fase plástica, es necesario disponer de capacidad para involucrar presiones importantes para caracterizar medios rígidos (como pueda ser la fábrica de sillería comentada), caso contrario únicamente se muestra aplicable a fábricas bastante deformables.

5. Agradecimientos

El Grupo de Tecnología de la Edificación de la Universidad de Cantabria reconoce la labor desarrollada y agradece la colaboración mostrada por AIDICO, Instituto Tecnológico de la Construcción de la Comunidad Valenciana, y por el Prof. Santiago Sánchez Beitia (UPV/EHU), en lo referente al desarrollo de metodologías no destructivas aplicadas a la rehabilitación del patrimonio construido. Igualmente, agradece al Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Cantabria su colaboración en la realización de los ensayos.

Bibliografía

- [1] Varios autores. Metodologías no destructivas aplicadas a la rehabilitación del patrimonio construido. Santander: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cantabria (Villegas, L.; Lombillo, I), ISBN 978-84-690-5269-3. 2007.
- [2] Varios autores. Tecnología de la Rehabilitación y Gestión del Patrimonio Construido. Santander: Grupo de Tecnología de la Edificación de la Universidad de Cantabria (Villegas, L.; Lombillo, I), ISBN 978-84-691-3612-6. 2008.
- [3] Villegas, L.; Lombillo, I. Metodologías no destructivas aplicadas a la rehabilitación del patrimonio construido: un estado del arte (Parte 1). Revista END de la Asociación Española de Ensayos No Destructivos, 1er cuatrimestre 2008: 8-15 pág.
- [4] Lombillo, I; Villegas, L. Metodologías no destructivas aplicadas a la rehabilitación del patrimonio construido: un estado del arte (Parte 2). Revista END de la Asociación Española de Ensayos No Destructivos, 2º cuatrimestre 2008: 12-20 pág.
- [5] S. Sánchez Beitia, J. Barrallo, A. Zulueta. El Método Donosita en torno a los 20 kp/cm². Ingeniería Civil, nº 125/2002, págs. 113-123.
- [6] P. Gregorczyk, P.B. Lourenço. A Review on Flat-Jack Testing. 2000.
- [7] L. Binda, A. Saisi, L. Zanzi. Sonic Tomography and Flat Jack Tests as Complementary Investigation Procedures for the Stone Pillars of the Temple of S.Nicolo' L'Arena (Italy). NDT & Evaluation Int. Journal, Vol. 36/4, pag. 215-227, 2003.
- [8] L. Binda, A. Saisi, C. Tiraboschi. Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries. Elsevier. January 2000.
- [9] M. P. Schuller. Nondestructive testing and damage assessment of masonry structures. Structural Masonry. Prog. Struct. Eng Mater. 2003; 5: 239–251.
- [10] ASTM E837-99: Standard test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain-gage method.