



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y MECÁNICA

TESIS DOCTORAL

**INVESTIGACIÓN TEÓRICO – EXPERIMENTAL SOBRE
ENSAYOS LIGERAMENTE DESTRUCTIVOS (MDT)
UTILIZADOS PARA LA CARACTERIZACIÓN MECÁNICA
IN SITU DE ESTRUCTURAS DE FÁBRICA DEL
PATRIMONIO CONSTRUIDO**

Autor

IGNACIO LOMBILLO VOZMEDIANO
INGENIERO DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

Director

PROF. DR. LUIS VILLEGAS CABREDO
DOCTOR INGENIERO DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

SANTANDER, MAYO DE 2010

6

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

La investigación presentada ha tratado de incidir, dentro del proceso metodológico general, en la fase del reconocimiento experimental, in situ, ligeramente destructivo, y a su vez, dentro de éste, en las técnicas orientadas a obtener información útil desde un punto de vista de caracterización mecánica de elementos estructurales de fábrica (integrable en la fase de análisis) y desde el punto de vista de la optimización de los modelos analíticos (datos para su calibración).

El hecho de focalizar los esfuerzos en las técnicas in situ se debe a la práctica imposibilidad de reproducir en laboratorio el comportamiento de una fábrica real, tanto en lo que respecta a la reproducción material de la misma, en lo relativo a las dimensiones del espécimen para que sean representativas del comportamiento in situ, al daño existente en la obra de fábrica real, o incluso en lo relacionado con las acciones a las que está sometida. Igualmente, como todos los condicionantes referidos cambian de una construcción a otra, e incluso dentro de la misma construcción, los datos obtenidos en laboratorio difícilmente podrán extrapolarse a otros elementos constructivos.

Por todo ello, el objetivo principal contemplado en la Tesis Doctoral ha sido el contribuir a la puesta a punto, en España, de métodos para la evaluación in situ de la fiabilidad de los elementos estructurales existentes en construcciones históricas de obra de fábrica.

6.1 Conclusiones relativas al estado del arte.

En primer lugar cabe referir que todas las técnicas puestas a punto por la Comunidad Científico-Técnica para la deducción de los esfuerzos que soporta en servicio un elemento estructural son necesarias y complementarias. No obstante cada una de ellas debe de ser aplicada en los casos donde su utilidad sea más adecuada.

6.1.1 Sobre las técnicas de gatos planos.

1.- La técnica de gato plano simple proporciona el **nivel de tensiones en dirección perpendicular al plano del gato sin ensayos adicionales**, presentado aplicabilidad en elementos portantes de ciertas dimensiones y sobre todo donde la dirección de la transmisión de cargas sea razonablemente conocida. En principio, es **aplicable a todo tipo de materiales y fábricas**, y en cualquier posición de la misma.

2.- Los **resultados** obtenidos quedan **estrechamente ligados a la capacidad del operario** que lleva a cabo el ensayo. La **fiabilidad de los resultados** obtenidos **depende**, en gran medida, de la **ejecución de las rozas para la inserción de los gatos**. El personal no experto puede causar daños a la estructura y provocar situaciones de peligro para él mismo durante el desarrollo del ensayo.

3.- Las técnicas de gatos planos presentan un **coste reducido respecto a los ensayos de laboratorio y mayor representatividad de los resultados obtenidos**. El hecho de extraer una probeta de una de fábrica histórica, para caracterizarla mecánicamente en laboratorio supone infringir una alteración de las propiedades que presenta el elemento portante in situ, asociada principalmente a los procesos de extracción y de transporte. En este sentido, la diferencia entre los valores obtenidos in situ, mediante la técnica de gato plano doble, y en laboratorio pueden diferir considerablemente.

De la misma forma, la disminución de la rigidez obtenida en los ensayos de laboratorio se asocia, en parte, con la carencia de confinamiento lateral respecto de la situación in situ. Por ello que una investigación basada únicamente en **una caracterización mecánica destructiva en laboratorio**, aunque las probetas sean de grandes dimensiones, **puede inducir a subestimar el módulo de deformación de la fábrica**, tanto más cuanto mayor sea el grado de deterioro sufrido por las muestras durante la extracción. En las referencias citadas, se afirma que en los ensayos de deformabilidad, para niveles tensionales bajos (< 20% de la tensión última), el confinamiento lateral tiene un efecto que puede ser despreciable, si bien para mayores niveles de tensión, se experimenta un incremento del módulo de deformación de la fábrica de un 10% respecto del que se obtendría en un ensayo a compresión con la probeta no confinada.

4.- Otra conclusión es que **puede evaluarse la tensión límite de la fábrica** durante la puesta en carga con 2 gatos planos, incrementando la carga **hasta que aparezca la primera fisura** en los ladrillos.

5.- El ensayo de gato plano puede ser empleado para la **verificación de la existencia** de eventuales **excentricidades de carga** en muros y pilares.

6.- **En fábricas de ladrillo**, los resultados obtenidos con **gatos planos de tamaño apreciable** (por ejemplo, rectangulares de 40x20 cm) han ofrecido **fiabilidad tanto en los resultados de tensión como en los de deformación**. Por el contrario, el uso de **gatos planos de menores dimensiones** debía **limitarse**, únicamente, a los **ensayos de tensión**, dado que el comportamiento del área de ensayo movilizada no es representativa del conjunto de la fábrica. Como regla general, para obtener resultados representativos del estado de tensión real del conjunto de la fábrica es conveniente emplear el mayor tamaño posible de gato plano, en este sentido la normativa ASTM C1196-91 requiere una longitud del gato, dimensión A, igual o mayor que la longitud de una pieza aislada de fábrica pero no menor que 20 cm, mientras que la normativa RILEM refiere que el área del gato no debe ser menor que la de las piezas componentes de la fábrica.

7.- La técnica de gatos planos es aplicable a **sillerías** realizadas con bloques de tamaños importantes. Cuando se emplean gatos **cuya área sea mayor del 50% del área de los bloques pétreos movilizados**, el comportamiento del ensayo es similar al encontrado en fábricas de bloques o de ladrillo. Por su parte, el comportamiento difiere bastante al emplear gatos planos de área inferior al 50% de la de los sillares, especialmente en aquellas configuraciones de ensayos en que los gatos están lejos de los contornos de las piezas.

8.- Rossi (1988) refiere que el comportamiento deformacional de una probeta de fábrica delimitada por dos gatos planos puede describirse de forma adecuada mediante un diagrama bilineal. Este diagrama es similar a la curva tensión-deformación obtenida mediante un ensayo de compresión uniaxial convencional llevado a acabo sobre un espécimen del mismo volumen que el delimitado por los dos gatos planos. La comparación entre los dos diagramas muestra que, después de una primera fase elástica, **la curva tensión-deformación obtenida mediante el ensayo de gato plano doble es del orden de un 10-15% mayor que la determinada mediante un ensayo convencional de compresión**.

9.- Se recomienda que si el ensayo de doble gato plano es llevado a cabo hasta la aparición de las primeras grietas en la fábrica en el caso de un muro “indefinido” (con restricción lateral), la **tensión de rotura debería ser reducida un 20% para obtener la resistencia a compresión en el caso de porciones de fábrica sin restricciones laterales (exenta)**.

10.- Los datos obtenidos en los ensayos de calibración encontrados en la bibliografía indican que **es razonable aplicar los mismos principios empleados para la medida de las tensiones verticales, que para obtener las tensiones horizontales**.

11.- Las concentraciones de las tensiones de tracción en la zona central de la superficie de la roza y de compresión en las esquinas, sugieren que en un material de baja resistencia y con reducida capacidad a tracción, como son las **fábricas antiguas**, la deformación producida por el corte puede estar compuesto por una parte de deformaciones elásticas y otra de **deformaciones inelásticas**. En este sentido, si el fenómeno inelástico se evidencia se obtendría una **buena convergencia al valor correcto de la presión de cancelación mediante el punto común de intersección definido por las curvas de evolución de los puntos de control**, asociado con el momento en el que se produce la recuperación de la deformación elástica componente de la deformación total (denominado punto de desplazamiento residual).

12.- Es recomendable llevar a cabo una indagación previa, mediante métodos sónicos, de la zona susceptible de ensayar mediante técnicas de gato plano, de cara a comprobar la integridad de la misma y evitar esfuerzos improductivos asociados a la presencia de defectos importantes.

13.- Según las referencias consultadas, el grado de **precisión de las técnicas de gato plano** es generalmente **compatible con las necesidades de análisis** exigidas en los proyectos de intervención habituales. Además, a la vista de los ensayos realizados en los especímenes de laboratorio, los valores obtenidos informan del rango en el que se encuentra la tensión de trabajo del elemento ensayado, permitiendo localizar la existencia de valores elevados de carga.

14.- En vista de los resultados de la técnica de gato plano simple expuestos a lo largo de las referencias estudiadas en el estado del arte, en función de la tipología de fábrica involucrada (Tabla 2.45), puede concluirse que:

Tipo de fábrica	($\sigma_{\text{experimental}}/\sigma_{\text{teórica}}$)promedio	Coef. Variación
Ladrillo	1.00	19%
Sillería	0.90	25%
Mampostería	1.16	55%

En base a lo referido, la variabilidad referida para fábricas de ladrillo y de sillería se ajusta a lo referido por la normativa (RILEM LUM.D.3 1990; ASTM C 1197-91 1991) y por otras referencias.

En base a lo argumentado, se concluye que aunque la incertidumbre de la medida estimada mediante gato plano simple pueda llegar a resultar relativamente importante, se considera de **gran valor dado que aporta una vía de calibración experimental**.

6.1.2 Sobre la técnica hole drilling.

1.- La técnica permite deducir un estado tensional plano completo, siendo **posible obtener, además, estados a tracción**.

2.- La técnica hole drilling propuesta **no dispone de dispositivo estándar alguno para su ejecución**, a excepción de diversas herramientas convencionales de amplio uso.

3.- Además de este inconveniente experimental, la técnica hole drilling **requiere de ensayos complementarios** (obtención de constantes A y B) para la estimación del estado tensional a partir de las deformaciones captadas en las galgas. La metodología para la deducción de estas constantes en un material homogéneo, continuo e isótropo, como por ejemplo el acero, es muy diferente a la que es aplicable en roca, ladrillo y/o mortero, que precisan de un mayor muestreo de resultados experimentales:

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

- En relación con la obtención de las **constantes A_t y B_t** , mediante los parámetros a y b tabulados, **se requiere el conocimiento previo del módulo de elasticidad y del coeficiente de Poisson en el punto de ensayo.**
 - En el caso de **fábricas de sillería** la obtención de estos valores no presenta dificultad alguna siempre que se pueda conseguir un material de las mismas características al que forme parte del elemento portante en servicio. Esta afirmación, pese a que aparentemente involucra un procedimiento sencillo, es bastante optimista debido a la heterogeneidad del material y, por ende, la gran variabilidad de sus propiedades, incluso dentro de un mismo sillar.
 - En el caso de **fábricas de ladrillo** se dispone de dos alternativas. Una de ellas es construir y ensayar en laboratorio una probeta de fábrica de ladrillo similar a la que se está analizando in situ (harto complicado, debido fundamentalmente al estado de carbonatación del mortero de cal localizado in situ). Otra opción es caracterizar el mortero y el ladrillo mediante ensayos diferentes, con las consecuentes incertidumbres asociadas a esos métodos de ensayo, y emplear uno de los diversos métodos existentes en la bibliografía para obtener las características de la fábrica de ladrillo a partir de las de sus componentes individuales, si bien dichas correlaciones no siempre arrojan resultados adecuados.
- En relación con las **constantes A_s y B_s** , deben **determinarse experimentalmente sobre una probeta paralelepípedica de similar calidad al material ensayado in situ**, por lo que vuelven a surgir las incertidumbres relacionadas con anterioridad. Esta operación puede realizarse tanto en fábricas de sillería como en fábricas de ladrillo, no obstante deben de tenerse presente los comentarios realizados en el epígrafe anterior, así como que en el caso de la fábrica de ladrillo el taladro debe de abarcar una proporción similar de mortero y ladrillo al que se produce en la fábrica analizada en servicio, aspecto que complica el proceso.
- Lo **más correcto** sería **obtener dichas características mecánicas in situ para el punto concreto donde se va a realizar el ensayo**, debido a la dispersión que presentan las características mecánicas incluso de un punto a otro dentro de la misma piedra, si bien esta circunstancia se torna en harto compleja. Concretamente, a juicio del autor, **este aspecto es la mayor debilidad de la metodología expuesta.**

4.- Por todo lo referido, los **resultados de los ensayos de la técnica Hole Drilling** se encuentran **influenciados**, como no podía ser de otra manera, **por los valores de las constantes “de paso” utilizadas (A y B)**, que relacionan las deformaciones registradas en las bandas extensométricas con las tensiones deducidas en la zona de ensayo.

- Como regla general los **niveles tensionales calculados a partir de A_t y B_t** (obtenidas a partir de valores tabulados previa asunción de conocimiento del módulo de elasticidad, E , y del coeficiente de Poisson, ν) **minusvaloran el nivel tensional** aproximadamente en un 30% (26% en sillería y un 38% en ladrillo).
- Por su parte, los **niveles tensionales deducidos a partir de los valores A_s y B_s** obtenidos experimentalmente, sobre ensayos en el conjunto de la fábrica, **obtienen una mejor aproximación.** En sillería, empleando dichos parámetros A_s y B_s se ha obtenido en las referencias una buena aproximación, en promedio, del nivel teórico introducido, si bien a nivel individual se obtienen desde estimaciones a la baja del orden del 20%, hasta sobreestimaciones del 35%. En fábricas de ladrillo también se produce una estimación a la baja del nivel tensional teórico, con un error promedio del 14%.
- Finalmente, los **niveles tensionales deducidos a partir de los valores A_s y B_s obtenidos experimentalmente sobre ensayos realizados en sillares individuales**, en general **sobrevaloraron el nivel tensional**, con un error promedio del 16%.

5.- Las tensiones deducidas según las constantes A_t y B_t son menores en todos los casos que las deducidas mediante las constantes A_s y B_s (allí donde éstas pueden obtenerse).

6.- De las **deformaciones registradas** por las galgas extensométricas, sólo deben de considerarse como **válidos** aquellos registros en los que las **fluctuaciones del valor final sean menores de 5 $\mu\text{m/m}$** . Una fluctuación mayor es anómala y excesiva.

7.- Durante la ejecución de los ensayos relativos al proyecto SICEXPAR se observaron comportamientos no esperados en la distribución de deformaciones y cargas en las diferentes zonas de los muros de fábrica de sillería de arenisca y de ladrillo ensayados en laboratorio. Esta no homogeneidad alcanza valores apreciables. Obviamente, esta circunstancia de heterogeneidad debe de alcanzar límites aleatorios en edificaciones y construcciones del Patrimonio Arquitectónico.

8.- El **método requiere de una gran laboriosidad**: es preciso elaborar “in situ” las rosetas y el cableado de medida. No existen accesorios estándar para el método requiriéndose de experiencia previa en su aplicación.

9.- **Se dispone de pocos datos de contraste**, sobretodo relacionados con su aplicación **en zonas afectadas, durante el ensayo, por dos elementos** (por ejemplo mortero y sillar a la vez), ni en fábricas de ladrillo. En el caso de fábricas de ladrillo, el taladro que se realiza en la técnica hole drilling incluye necesariamente mortero y ladrillo en proporciones variables. **Es posible que la relajación captada en las bandas dependa de la proporción de mortero y ladrillo eliminada**. Consecuentemente, como ya se ha referido, las constantes A_s y B_s deducidas experimentalmente en laboratorio para fábricas de ladrillo pueden depender, entre otros factores, de esa proporción.

10.- **Tampoco** se disponen de **datos** de su aplicación **en mamposterías irregulares**.

11.- Otro aspecto a tener en cuenta es el **carácter extremadamente local** de los estados tensionales deducidos.

12.- Finalmente, **la baja frecuencia adoptada en el registro de datos** en los ensayos existentes en bibliografía **puede afectar negativamente a la precisión del resultado obtenido**.

6.1.3 Sobre la técnica dilatométrica.

1.- En **muros de fábrica de varias hojas**, es necesario **valorar la deformabilidad de la parte interna de la fábrica** con la finalidad de estimar si, debido a la diferencia de rigidez entre las distintas partes componentes de la sección del elemento estructural, la carga tiende a concentrarse en las hojas externas, en general más rígidas, incrementando en éstas el nivel tensional medido experimentalmente respecto del obtenido por cálculo para el total de la sección.

2.- La **puesta a punto de esta metodología** entronca con la **necesidad de valorar el módulo de elasticidad de las partes internas de estructuras de fábrica de varias hojas**, como complemento a la técnica del gato plano doble, que como ya se ha insistido a lo largo de la Tesis, ofrece una estimación adecuada de dicho parámetro en las hojas externas del componente estructural.

6.1.4 Sobre la técnica FreD.

1.- En lo que respecta a la experiencia práctica, puede demostrarse que el desarrollo del método FreD **puede constituir una poderosa herramienta** para identificar las propiedades del material y el estado tensional de las estructuras de fábrica de ladrillo, en tanto que mediante su empleo **puede obtenerse la deformación causada por las cargas de servicio habituales**, registrar en tiempo real **la deformación liberada debida a la relajación de las tensiones** de la fábrica motivada por las cargas muertas, **obtener la ley σ - ϵ** y, por ende, evaluar un **módulo medio de elasticidad**, y aumentando la carga mediante el sistema FreD puede llegar a motivarse la rotura del espécimen aislado in situ, permitiendo obtener la **tensión y la deformación en rotura**.

2.- La **adaptación** de la técnica a **sillerías** requiere el **diseño de nuevos sistemas** debido a la mayor dimensión de las piezas involucradas.

3.- Su **aplicación a fábricas de mampostería parece complicada**.

6.1.5 Sobre el ensayo UIC.

1.- El ensayo UIC **parece estimar a la baja la resistencia a compresión**, aproximadamente en un 40%. Por ello que se intuye la **necesidad de introducir un coeficiente corrector**, en el entorno de 1.7, para obtener la resistencia a compresión considerando el efecto de concentración de tensiones que se produce en la zona central de la probeta.

2.- **Se requiere experimentación complementaria** a la realizada en las referencias bibliográficas consultadas para emitir conclusiones con el rigor adecuado.

6.1.6 Sobre la deformabilidad de las fábricas históricas.

1.- La **definición fiable del módulo de elasticidad no es fácil** para el caso de las estructuras de fábrica. La especialización de la mano de obra, la calidad del mortero, la existencia de grietas y el deterioro debido a los efectos ambientales, entre otros factores, pueden afectar a la rigidez.

2.- En relación con la **deformación última**, las referencias consultadas, fundamentalmente referidas a fábricas de ladrillo, la enmarcan entre el **1.5-4.5%**.

3.- **Diferentes autores** propugnan que el **módulo de elasticidad** de la fábrica debe obtenerse en el entorno del **50% del valor de la resistencia última**, para tener en cuenta el comportamiento no lineal del material. **Otros autores** refieren como razonable determinarlo entre los niveles tensionales correspondientes al **5% y al 33% de la carga última** (E33%).

4.- Parece **razonable** que el **módulo de deformación** a introducir en un modelo de cálculo debe **corresponderse con el módulo de elasticidad secante asociado al nivel tensional existente en servicio o susceptible de existir una vez finalizada la intervención**.

5.- Diferentes normativas y referencias proponen valores orientativos para la relación entre el entre el módulo de elasticidad y la resistencia característica a compresión de la fábrica ($E = \alpha \cdot f_{ck}$):

	Fábrica de ladrillo	Sillería	Mampostería
Normativa y otras referencias (Tabla 2.75)	200-2,500	400-3,000	400-2,500
Mediante compendio de ensayos de gato plano doble (Tabla 2.77)	275-1,176	≈ 1,000	170-3,620

6.- De la misma forma, en base al compendio de resultados experimentales obtenidos mediante la técnica de gato plano doble, el módulo de elasticidad obtenido para diferentes tipologías de fábricas históricas se ha encontrado entre los siguientes valores:

	Fábrica de ladrillo (Tabla 2.78), MPa	Sillería (Tabla 2.79), MPa	Mampostería (Tabla 2.80), MPa
Mediante compendio de ensayos de gato plano doble	462-4,500	800-50,000 ¹¹	90-4,000

¹¹ Obviamente tiene muchísima influencia la tipología de piedra empleada en la fábrica, así como el espesor de la junta de mortero.

6.2 Conclusiones relativas a la campaña experimental desarrollada en laboratorio.

Previamente a relacionar los aspectos más significativos en relación con la campaña experimental desarrollada en laboratorio en la presente tesis doctoral, en la tabla siguiente se compendian los principales resultados obtenidos.

Muro	Hole drilling		Gato plano simple		Gato plano doble	
	$(\sigma_{exp}/\sigma_{teór})_{promedio}^*$	Coef. Variación (%)	$(\sigma_{exp}/\sigma_{teórica})_{promedio}^*$	Coef. Variación (%)	E (MPa)	v
Sillería	0.95	10.09	1.30	16	3,110.3	0.19
Mampostería	0.26	989.75	1.31	-	3,092.6	0.14
Ladrillo	0.61	16.39	1.24	10	8,147.3	0.09
Tapial	0.91	-	1.22	-	3,170.7	0.16
Adobe	-	-	1.10	-	1,402.3	0.32

* Se trata del promedio de las relaciones entre la tensión obtenida experimentalmente mediante hole drilling o gato plano simple y la tensión teórica estimada en el punto de ensayo, en cada uno de las pruebas realizadas.

En lo que sigue, se comentan los aspectos más significativos de los ensayos realizados.

6.2.1 Sobre los ensayos realizados en el muro de sillería.

1.- En relación con los **ensayos hole drilling**, la relación promedio entre la tensión experimental obtenida y la estimada teóricamente, como valor medio en el plano horizontal de ejecución de los ensayos suponiendo un ángulo de apertura de cargas de 23°, es de 0.95, presentando un coeficiente de variación del 10.09% (desviación típica de 0.10).

Por su parte, la relación promedio entre la tensión experimental obtenida y la estimada teóricamente, mediante elementos finitos, es de 0.91, presentando un coeficiente de variación del 23.71% (desviación típica de 0.12).

Los resultados obtenidos mejoran los alcanzados en experiencias previas, circunstancia que **demuestra la idoneidad del método aplicado a sillerías, a nivel de laboratorio**. La optimización se achaca, principalmente, a que el registro de las deformaciones ha sido mucho más continuo (con una frecuencia de muestreo de un dato por segundo) lo cuál ha permitido determinar de forma más exacta los valores de estabilización de las deformaciones antes y después del taladrado. Igualmente, como se ha justificado, también se han obtenido las características mecánicas (E y v) en cada uno de los puntos de control, aspecto que también tiene un impacto importante en la bondad de los resultados.

En base a los resultados obtenidos en los **ensayos de comparación entre extensometría resistiva y óptica**, puede concluirse que los **niveles tensionales estimados fueron bastante aproximados**. Además, **ambos casos** alcanzaron una **buena estimación del nivel tensional teórico existente**. A día de hoy, el hecho de que la extensometría resistiva ofrezca unas condiciones de instalación en el elemento portante mucho más sencilla y menos cuidadosa que el requerido en la puesta en obra de la cadena óptica, sumado a que el precio de la extensometría resistiva es mucho más reducido que el relacionado con la solución óptica, hace que **para la práctica habitual de la técnica de hole drilling sea mucho más apropiado el empleo de extensometría resistiva**. Solo en casos más específicos, como en los que se emplee la técnica hole drilling para tratar de monitorizar a largo plazo el estado tensional en función del tiempo, podría ser más rentable el empleo de extensometría óptica, si bien se debe tomar conciencia previa de las dificultades relacionadas.

En relación con la **videocorrelación**, pese a que la técnica resulta muy atractiva e intuitiva, en lo que se refiere a la interpretación de los fenómenos que se desarrollan en el área de ensayo a lo largo del proceso, en estos momentos y circunscrito al equipamiento empleado en el ensayo realizado, se concluye que **la precisión de las medidas alcanzadas no se ajusta a los requerimientos esperados para la interpretación de las deformaciones registradas mediante ensayos hole drilling en estructuras de fábrica**.

2.- En relación a la estimación de los niveles tensionales mediante la **técnica de gato plano simple**, de los diferentes **coeficientes correctores geométricos, k_a** , tanteados, el propuesto por la normativa de referencia **basado en la relación entre el área del gato plano y el área de la hendidura practicada para su inserción**, es el que ofrece una **mejor aproximación** a la tensión teórica de contraste.

Para el **primero de los ensayos** realizados, la **relación entre la tensión experimental obtenida y la estimada teóricamente** mediante un macromodelo de elementos finitos, en el que se ha supuesto comportamiento lineal, elástico e isótropo, de características mecánicas equivalentes a las obtenidas experimentalmente mediante gato plano doble, ha sido de **1.45**. Dicho valor es superior al que cabría esperar en base a la incertidumbre del ensayo encontrada en las referencias consultadas en el estado del arte.

Por su parte, para el **segundo ensayo** la relación entre la tensión experimental obtenida y la estimada teóricamente, como valor medio en el plano horizontal de ejecución del ensayo suponiendo un ángulo de apertura de cargas de 23° , es de **1.16**. En este caso dicho valor entraría dentro del margen de error del ensayo.

Finalmente, referir que fue **reproducido el proceso ideal del ensayo mediante el macromodelo** referido, obteniendo el **nivel de tensión** que es necesario transmitir a la fábrica mediante el gato plano **para recuperar las distancias** mensuradas entre los puntos de control previamente a la ejecución de la roza. Dicho valor **fue de de 3.00 MPa frente a los 2.40 Mpa de tensión teórica** existente en el punto de ensayo, circunstancia que conduce a concluir que, en base un macromodelo de elementos finitos lineal, elástico e isótropo, un ensayo de tensión in situ, mediante gato plano simple, **puede llegar a sobreestimar el estado de tensión real en hasta un 25%**, valor superior al encontrado por Sacchi y Talercio (1988) que lo estimaron en un 10% empleando análisis no lineal mediante elementos finitos.

3.- En relación con los **ensayos de gato plano doble**, no se encontró un buen ajuste entre el módulo de elasticidad obtenido experimentalmente mediante gato plano, respecto del obtenido para un área local del muro mediante transductores potenciométricos, y más que por la incorrecta ejecución de los ensayos de gato plano doble, podría relacionarse con que **el módulo de deformación obtenido mediante transductores resultó ser bastante reducido**.

En lo que respecta a la comparación de los módulos de deformación obtenido **en sendos ensayos de gato plano doble**, respecto de los valores obtenidos en otras fábricas de sillería por otros autores, dada la escasa compacidad de la arenisca empleada en la construcción del muro y la ternura del mortero bastardo de cal y cemento (en el que la cal apenas tuvo siete meses para sufrir procesos de carbonatación), **los parámetros mecánicos alcanzados** empleando el coeficiente geométrico propuesto por la normativa, que relaciona el área del gato plano con el área de la roza ($K_{\text{gato-roza}}$), **parecen razonables**.

De la misma forma **fue estimada la tensión de rotura** de la sillería mediante un **ajuste logarítmico a la parte de comportamiento no lineal de cada una de las dos envolventes obtenidas en otros tantos ensayos de gato plano doble**, alcanzan un valor de **5.43 MPa** para una deformación en rotura del 3%. A juicio del autor, en vista de la escasa competencia de la roca arenisca forme de la sillería y de la ternura del mortero bastardo de cal y cemento empleado, **el valor estimado experimentalmente parece un umbral razonable para la tensión de rotura**.

Por su parte la relación entre el módulo de deformación secante obtenido mediante gato plano doble y la tensión característica en rotura estimada, σ_k , toma un valor de 600.16 y 1,119.80 en cada uno de los dos ensayos de gato plano doble realizados. Estas cifras que están en la línea de lo propuesto por el CIB, la DIN 1053 y el EC-6, y por los intervalos presentados con anterioridad en relación a las conclusiones sobre la deformabilidad de las fábricas.

4.- En relación con los **ensayos mini-presurométricos**, fue alcanzada la máxima capacidad del dispositivo mini-presurométrico con el que se realizaron los ensayos (24 Ba de presión), no alcanzándose la plastificación del área de ensayo y, por ende, **no pudo estimarse el modulo presurométrico (E_{PMT}) de la fábrica**.

6.2.2 Sobre los ensayos realizados en el muro de mampostería.

1.- En relación con los ensayos hole drilling, puede concluirse que **el método hole drilling no se ha mostrado eficaz en lo referente a estimar las tensiones verticales de compresión en el muro ensayado en el laboratorio.**

Esta circunstancia se relaciona con que, debido a la geometría del mismo, las condiciones de contorno del muro tienen una fuerte influencia en los resultados, debido a que las deformaciones experimentadas por los mampuestos y, por ende, los estados tensionales movilizados, dependen mucho de las relaciones existentes entre éstos. Obviamente, esta dependencia depende de la rigidez del mortero de unión (y relleno), cuanto más deformable más impera el fenómeno referido, por lo que un mortero de cal tierno, sin carbonatar, redundará negativamente en las interacciones locales desarrolladas entre los mampuestos. Este asunto genera que pese a que la carga introducida sea eminentemente vertical, no necesariamente las deformaciones registradas dentro de un mampuesto deben de experimentar variaciones en dicha dirección (considerando los mecanismos de sólido rígido movilizados fruto de los contactos existentes entre las piedras).

En tanto que es la **primera ocasión que en la comunidad científico-técnica internacional se aplica la técnica de hole drilling a una mampostería en laboratorio** no se disponen de datos de contraste.

2.- En relación a la estimación de los niveles tensionales mediante la técnica de gato plano simple, la **relación entre la tensión registrada experimentalmente y la estimada de forma teórica**, como valor medio en el plano horizontal de ejecución del ensayo suponiendo un ángulo de apertura de cargas de 30°, **es de 1.31**, valor que se ajusta a los resultados encontrados en el estudio bibliográfico realizado en el estado del arte.

3.- En relación con los ensayos de gato plano doble, el **valor obtenido** para el módulo de elasticidad **empleando el coeficiente geométrico propuesto por la normativa** es el que presenta una **mayor aproximación al módulo de deformación obtenido mediante transductores** (valor a considerar con cautela ya se responde a una estimación local de la fábrica, distinta de la que se localizó el ensayo de gato plano doble). La **relación encontrada es de 0.73**, es decir se ha estimado a la baja el módulo de elasticidad en un 27%.

Igualmente, fue estimada la **tensión de rotura de la mampostería** mediante un ajuste logarítmico a la parte de comportamiento no lineal de la envolvente obtenida en el ensayo de gato plano doble, alcanzando un valor de **3.12 MPa** para una deformación en rotura del 3%. En vista de la justificación realizada, el valor estimado experimentalmente **parece un umbral razonable para la tensión de rotura.**

Por su parte la relación entre el módulo de deformación secante obtenido mediante gato plano doble y la tensión característica en rotura estimada, σ_k , toma un valor de 1,416.02. Esta cifra está dentro del intervalo de relaciones encontradas en el estudio bibliográfico.

4.- En relación con la campaña experimental desarrollada con el minipresurómetro sobre componentes de mampostería cabe argumentar que dado que el campo de aplicación de esta técnica se relaciona con la posibilidad de caracterizar mecánicamente los rellenos internos, bastante deformables, y teniendo en cuenta que la naturaleza inherente de los rellenos internos de las mamposterías se traduce en la existencia de un número importante de defectos internos, de dimensiones apreciables, dispersos en el volumen del muro; debido a estos defectos y a la escasa resistencia a tracción de la goma de cobertura de la sonda, y frente a cortadura de los elementos plásticos de conexión de ésta con la sonda, si no se garantiza una transmisión uniforme de la presión introducida a las paredes de la perforación se produciría la rotura del dispositivo.

Por ello que, por una parte, en vista de la gran probabilidad que existe de intersectar un defecto a lo largo de la profundidad de la perforación en el material de relleno que se pretende caracterizar y, por otra, debido a la reducidas prestaciones resistentes de la sonda, **se considera que el dispositivo mini-presurométrico empleado en la realización de los ensayos no es adecuado para el fin que se le pretende, desaconsejando al lector su empleo**, en tanto que en una cantidad apreciable de ensayos se producirá la rotura de la envolvente de goma no conduciendo a ningún resultado válido.

6.2.3 Sobre los ensayos realizados en el muro de ladrillo.

1.- En relación con los **ensayos hole drilling**, la **relación promedio entre la tensión experimental obtenida y la estimada teóricamente**, como valor medio en el plano horizontal de ejecución de los ensayos suponiendo un ángulo de apertura de cargas de 18°, es de **0.61**, presentando un coeficiente de variación del 16.39% (desviación típica de 0.10). Dichos **resultados son equivalentes a los alcanzados en experiencias previas**.

2.- En relación a la estimación de los niveles tensionales mediante la **técnica de gato plano simple**, la **relación entre la tensión medida experimentalmente y la estimada de forma teórica**, suponiendo un ángulo de apertura de cargas de 18°, **se ajusta a los resultados encontrados en el estudio bibliográfico previo** para el caso del ensayo GPL-A Simple, mientras que la relación obtenida en el ensayo GPL-B Simple es superior a lo que hubiese sido esperado.

3.- En relación con los **ensayos de gato plano doble**, la **relación entre el valor experimental y el teórico** obtenido mediante transductores potenciométricos **guarda buena aproximación** (respectivamente se alcanzaron relaciones de **0.84 y 1.10**) con otras obtenidas por otros autores en otros ensayos de calibración realizados. En estos ensayos no se ha estimado la tensión a rotura dado que la estimación en base a una regresión eminentemente lineal ofrecería una tensión de rotura, supuestamente determinada para una deformación del 3%, superior a la real.

4.- En relación con los **ensayos mini-presurométricos**, durante el ensayo fue alcanzada la máxima capacidad del dispositivo mini-presurométrico con el que se realizaron los ensayos (24 Ba de presión), no alcanzándose la plastificación del área de ensayo y, por ende, **no pudo estimarse el módulo presurométrico (E_{PMT}) de la fábrica**.

5.- En lo que respecta a la **caracterización dinámica del muro de ladrillo mediante técnicas acústicas**, la **correspondencia entre los modos resonantes obtenidos experimentalmente y los deducidos a partir de un modelo simplificado de elementos finitos**, configurado a partir de las características mecánicas obtenidas según la inspección ultrasónica llevada a cabo previamente, **fue muy limitada**.

En lo que respecta a la **variación del módulo de elasticidad dinámico frente a cargas crecientes**, cabe relacionar que el módulo elástico dinámico obtenido mediante inspección por ultrasonidos, sigue un **tendencia creciente y relativamente logarítmica** con la carga incremental aplicada.

6.2.4 Sobre los ensayos realizados en los muretes de ladrillo hueco.

1.- En relación con los ensayos realizados (murete nº 1 y nº 2) para **comprobar la similitud de las curvas σ - ϵ obtenidas**, por un lado, en el caso de un **ensayo a compresión frente a carga monotónica creciente hasta rotura** y, por otro, la **envolvente de las curvas σ - ϵ obtenidas en un ensayo de gato plano doble, ejecutado también hasta rotura del muro**, cabe referir las siguientes conclusiones:

- La **tensión de rotura** estimada mediante ambos ensayos **fue del mismo orden**. La relación entre las mismas es $\frac{\sigma_{r,gato\ plano}}{\sigma_{r,compresión}} = 0.97$.
- El **módulo de deformación fue significativamente distinto**, circunstancia que puede justificarse en base a que los ensayos fueron realizados en componentes de fábrica diferentes.
- La deformación horizontal, transversal al sentido de aplicación de la carga, lógicamente, es mayor en el caso del ensayo de gato plano doble que en el ensayo a compresión mediante carga monotónica creciente hasta rotura.
- **La fase no lineal del ensayo mediante gato plano doble puede ajustarse con bastante aproximación mediante una curva logarítmica**.

2.- En relación con los ensayos realizados (murete nº 3 y nº 4) para **comparar las leyes σ - ϵ obtenidas frente a cargas pseudo-dinámicas compresivas introducidas de forma convencional y mediante la técnica de gato plano doble**, con la finalidad era tratar de pulsar la posible aplicación de la técnica de gato plano doble para ejecutar ensayos in situ frente a cargas pseudo-dinámicas compresivas, con el objetivo de estimar, para fábricas in situ, la envolvente de rotura (“envelope curve”), la curva de los puntos comunes (“common point curve”) y la curva de estabilidad (“stability point curve”), cabe referir:

- El hecho de que el murete nº 3 haya registrado peores prestaciones mecánicas que el nº 4, tanto frente a cargas estáticas, como frente a cargas pseudo-dinámicas, provoca que fruto de la comparación de ambos ensayos no pueda pronunciarse, con rigor alguno, sobre la adecuación o no de la técnica de gato plano doble para analizar el comportamiento in situ de fábricas reales frente a mecanismos pseudo-dinámicos, es por ello que sea **necesario profundizar en esta propuesta en futuras campañas experimentales más intensas, focalizadas a estudiar esta problemática.**
- Por otro lado, se ha demostrado que **es posible la obtención de las curvas envolvente, de puntos comunes y de estabilidad mediante la técnica del gato plano doble.**

6.2.5 Sobre los ensayos realizados en el tapial.

1.- Al respecto de los **ensayos hole drilling**, la **relación entre la tensión experimental obtenida mediante los ensayos hole drilling realizados en el tapial y la estimada teóricamente**, como valor medio en el plano horizontal de ejecución de los ensayos suponiendo un ángulo de apertura de cargas de 20°, **fue de 0.91**, circunstancia que parece apuntar a que **la técnica podría ser aplicable a esta tipología de muros**, si bien las dificultades encontradas relacionadas con la dispersión de los áridos dentro del volumen del tapial hace que **la aplicabilidad práctica de la misma sea complicada.**

En tanto que es la **primera ocasión que en la comunidad científico-técnica internacional se aplica la técnica de hole drilling a un tapial** no se disponen de datos de contraste.

De la misma forma, se concluye que es **preciso realizar trabajos futuros** para refrendar la idoneidad de la técnica hole drilling aplicada en tapial, o caso contrario para desaconsejar su empleo, dado que en base a un único resultado es absurdo llegar a conclusiones con rigor suficiente.

2.- En relación a la estimación de los niveles tensionales mediante la **técnica de gato plano simple**, en tanto que es la **primera ocasión que en la comunidad científico-técnica internacional se aplica la técnica de gato plano simple a un tapial, en laboratorio**, no se disponen de datos de contraste. Si bien puede apreciarse como el **error cometido en la estimación del nivel tensional fue del 22%.**

3.- En relación con los **ensayos de gato plano doble** y con los **ensayos minipresurométricos**, la **resistencia a compresión obtenida** por ambos ensayos es, sensiblemente, **del mismo orden**, pudiendo establecerse en el umbral de los 2 a 3 MPa. Por el contrario, **no ocurre lo mismo en lo referente al módulo de deformación.**

En primer lugar es necesario referir que **el denominado módulo presurométrico (E_{PMT}) no parece corresponderse** de forma directa **con el módulo de elasticidad longitudinal**, en tanto que el valor que alcanza es bastante inferior al obtenido mediante gato plano doble o mediante transductores.

Finalmente, sorprende la diferencia manifestada entre el módulo de elasticidad obtenido mediante gato plano doble y el obtenido mediante transductores potenciométricos (relación 2.27/1), dado que aparentemente no existe ningún factor que pueda incidir en dicha divergencia. En este sentido se considera necesario, además de **ahondar en el aspecto experimental en trabajos futuros**, el realizar una **simulación numérica del tapial**, considerando respectivamente los parámetros

mecánicos obtenidos mediante gato plano doble y mediante transductores, para estudiar en base a que características se ajustan mejor los resultados obtenidos en los ensayos de gato plano simple y hole drilling realizados.

6.2.6 Sobre los ensayos realizados en el muro de adobe.

1.- En relación a la estimación de los niveles tensionales mediante la **técnica de gato plano simple**, cabe referir que en tanto que es la **primera ocasión que en la comunidad científico-técnica internacional se aplica la técnica de gato plano simple a un muro de adobe, en laboratorio**, no se disponen de datos de contraste. Si bien puede apreciarse como el **error cometido en la estimación del nivel tensional fue reducido, del 10%**.

2.- En relación con los **ensayos de gato plano doble** y con los **ensayos minipresurométricos**, la **resistencia a compresión obtenida por ambos ensayos es, sensiblemente, del mismo orden**, pudiendo establecerse en el umbral de 1 MPa. Por el contrario, **no ocurre lo mismo en lo referente al módulo de deformación**.

En primer lugar es necesario referir que el denominado **módulo presurométrico (E_{PMT}) no parece corresponderse de forma directa con el módulo de elasticidad longitudinal**, en tanto que el valor que alcanza es bastante inferior al obtenido mediante gato plano doble o mediante transductores.

Finalmente, al igual que ocurrió en el tapial, sorprende la diferencia manifestada entre el módulo de elasticidad obtenido mediante gato plano doble y el obtenido mediante transductores potenciométricos (relación 3.01/1), dado que aparentemente no existe ningún factor que pueda incidir en dicha divergencia. En este sentido se considera necesario, además de **ahondar en el aspecto experimental en trabajos futuros**, el realizar una **simulación numérica del muro de adobe**, considerando respectivamente los parámetros mecánicos obtenidos mediante gato plano doble y mediante transductores, para estudiar en base a que características se ajusta mejor el resultado obtenido en el ensayo de gato plano simple.

6.3 Conclusiones relativas a la campaña experimental desarrollada in situ.

Previamente a relacionar los aspectos más significativos desarrollados en relación con la campaña experimental in situ de la presente tesis doctoral, en la tabla siguiente se compendian los principales resultados obtenidos fruto de la aplicación de la técnica de gatos planos (simple, FJS, y doble, FJD) y mediante hole drilling (HD).

Fecha	Cód.	Comentarios	$E_{sec, prom}$ (MPa)	v_{prom}	$\sigma_{servicio}$ (MPa)	$\sigma_{Limite\ elástico}$ (MPa)	σ_{rotura} (MPa)	E/σ_k^{12}
27-08-09	FJS	Sillería arenisca (Torre de Iglesia, Zarratón, muro W)	-	-	1.24	-	-	-
27-08-09	HD-1	Sillería arenisca (Torre de Iglesia, Zarratón, muro W)	-	-	1.15	-	-	-
26-08-09	HD-2	Sillería arenisca (Torre de Iglesia, Zarratón, muro S)	-	-	1.62	-	-	-
26-08-09	FJD-1	Mampostería arenisca, hoja interior (Palacio de Casa-Fuerte)	608.3	0.25	-	0.25	0.55	1,580.00
27-08-09	FJD-2	Mampostería arenisca, hoja exterior (Palacio de Casa-Fuerte)	3,488.08	0.33	-	0.50	1.56	3,194.21
04-02-10	FJS	Mampostería caliza y marga (Palacio Riva-Herrera, Santander)	-	-	0.47	-	-	-
20-03-09	HD	Mampostería caliza y marga (Palacio Riva-Herrera, Santander)	-	-	0.46	-	-	-
04-02-10	FJD	Mampostería caliza y marga (Palacio Riva-Herrera, Santander)	9,746.4	0.21	-	1.30	3.04	4,580.1
22-07-09	HD	Chimenea de ladrillo, a sogas y tizones (Muriedas)	-	-	0.15 (t) ¹³	-	-	-
26-06-09	FJS-1	Arco de ladrillo, a tizón (Valladolid)	-	-	0.25	-	-	-
26-06-09	FJD-1	Arco de ladrillo, a tizón (Valladolid)	4,238.0	0.28	-	1.70	4.46	1,357.46
13-07-09	FJS-2	Arco de ladrillo, a tizón (Valladolid)	-	-	0.29	-	-	-
13-07-09	FJD-2	Arco de ladrillo, a tizón (Valladolid)	4,514.4	0.20	-	1.60	4.10	1,572.96
30-04-09	FJS-1	Mampostería caliza (Iglesia, Comillas)	-	-	0.59	-	-	-
30-04-09	FJD-1	Mampostería caliza (Iglesia, Comillas)	4,881.8	0.19	-	1.00	2.31	3,019.05
30-11-07	FJS-2	Mampostería caliza (Comillas, claustro E, crujía S)	-	-	0.55	-	-	-
30-11-07	FJD-2	Mampostería caliza (Comillas, claustro E, crujía S)	2,364.0	0.45	-	0.90	1.80	1,876.19
25-01-08	HD-1	Mampostería caliza (Comillas, claustro E, crujía S)	-	-	0.56	-	-	-
24-11-08	FJS-3	Mampostería caliza (Comillas, claustro W, crujía W)	-	-	1.07	-	-	-
25-11-08	FJD-3	Mampostería caliza (Comillas, claustro W, crujía W)	4,127.9	0.40	-	0.70	2.55	2,312.55
28-11-08	FJS-4	Mampostería caliza (Comillas, claustro W, crujía N)	-	-	0.57	-	-	-
24-11-08	HD-2	Mampostería caliza (Comillas, claustro W, crujía N)	-	-	0.60	-	-	-
28-11-08	FJD-4	Muro de ladrillo a sogas (Comillas, claustro W, crujía N)	1,789.1	0.30	-	0.60	1.56	1,638.37

En lo que sigue, se comentan los aspectos más significativos de los ensayos realizados.

¹² De acuerdo con las recomendaciones del CEN, Eurocode 8, Part 1-4, el valor de σ_k (valor característico) debe ser obtenido multiplicando el valor medio, σ_{rotura} , por un factor de 0.7.

¹³ (t): Tensiones de tracción.

1.- En relación con la campaña experimental desarrollada en **muros de sillería arenisca** de la torre de la Iglesia parroquial de N^a S^a de la Asunción, s. XIII (Zarratón, La Rioja), los **niveles tensionales medidos en el muro Oeste están en torno a los 1.20 MPa**, mientras que los determinados en el **muro Sur rondan los 1.60 MPa**. Dicha diferencia de carga puede justificarse en base a que el **cimborrio de coronación de la iglesia no está centrado respecto al cuerpo prismático subyacente**, sino que está desplazado, en el eje Oeste-Este, hacia el Este.

En lo que respecta a los niveles tensionales determinados mediante la técnica de gato plano simple y mediante hole drilling en puntos aledaños del referido muro Oeste, puede comprobarse que fueron bastante aproximados, de forma que la relación $\sigma_{\text{gato plano}}/\sigma_{\text{hole drilling}}=1.08$.

Finalmente cabe referir que la tensión teórica media estimada en la base de la torre para el espesor total del muro alcanza un valor de aproximadamente la mitad de las medidas en el muro Oeste. Dicha circunstancia puede deberse a que el muro, supuesto de 1.20 m de grosor no esté formado por una sillería de buena calidad en todo su espesor y debido a ello las cargas descienden por caminos preferenciales, concentrándose en las hojas externas de mayor rigidez que los materiales que conforman el interior del muro. En este sentido se concluye que **el hecho de considerar el nivel tensional en un determinado plano, considerando el espesor total del muro, puede llegar a conducir a valores significativamente inferiores en relación con los niveles tensionales que realmente están presentes en los elementos portantes**, por ello que la ejecución de ensayos ligeramente destructivos como los estudiados en esta investigación adquieran una especial relevancia.

2.- En relación con la campaña experimental desarrollada en **muros de mampostería arenisca** de la Casona-Palacio de Casa Fuerte, s. XVI (Zarratón, La Rioja), cabe referir que se obtuvieron las características mecánicas de las dos hojas componentes de dichos muros de mampostería mediante gato plano doble.

Pudo comprobarse que **la diferencia existente entre la rigidez obtenida en las dos hojas componentes del muro es importante** ($E_{\text{ext}}=5.73 \cdot E_{\text{int}}$), al igual que ocurría con la tensión de rotura estimada ($\sigma_{r,\text{ext}}=2.84 \cdot \sigma_{r,\text{int}}$). Dicha circunstancia tiene una **influencia relativa en lo que atañe a la bajada de cargas**, en tanto que **los elementos de mayor rigidez tenderán a concentrar cargas aliviando a los más deformables**. De forma que, si no existen medios de conexión eficaces entre las hojas componentes del elemento portante, en vez de verificar el muro teniendo en cuenta todo su espesor, sería más restrictivo, desde un punto de vista de la seguridad, la hipótesis de repartir la carga en función de la rigidez inherente a cada hoja y verificar cada una a nivel individual.

Por otra parte, debe de llamarse la atención sobre que tanto los **módulos de deformación** como las **tensiones de rotura** estimadas **presentan valores bastante bajos**. La justificación de dicho comportamiento podría encontrarse, en parte, en que la piedra arenisca movilizada en la construcción es muy porosa y blanda, y por ende de prestaciones mecánicas reducidas, y en que el aparejo empleado involucra una cantidad significativa de mortero de cal (del orden del 20%, a nivel superficial). Ambas circunstancias influyen en que tanto la rigidez como la resistencia de la mampostería se vean reducidas. Ahora bien, el **factor fundamental que ha afectado a los resultados** se relaciona con que **no existía un nivel de carga vertical suficiente como para garantizar una adecuada transmisión de la presión introducida por los gatos, a la porción de la fábrica sometida a ensayo (debido a una carencia de reacción)**; como consecuencia de dicho fenómeno se produjo, literalmente, un levantamiento de la porción de fábrica ubicada sobre el gato plano superior, efecto que se manifestó en agrietamientos, a 45°, partiendo de los bordes libres del gato.

Como conclusión puede apuntarse que **la fiabilidad de los ensayos de gato plano debe de ponerse en entredicho cuando el nivel tensional vertical existente sea muy bajo**, circunstancia que acaeció en el caso presentado.

3.- En relación con la campaña experimental desarrollada en un **muro de mampostería caliza** del Palacio de Riva Herrera, s. XVI (Santander), cabe referir que el **nivel tensional medido en el muro**, tanto mediante gato plano simple, como mediante hole drilling ($\sigma_{\text{gato plano}}/\sigma_{\text{hole drilling}}=1.02$), se estableció en el entorno de los **0.45 MPa**.

Por su parte, la tensión teórica media estimada en la base del muro alcanza un valor de aproximadamente la mitad de los obtenidos experimentalmente, circunstancia que puede relacionarse, como ya se mencionó con anterioridad, a colocación de los ensayos realizados en la torre de la Iglesia de Zarratón (La Rioja), con que el muro, supuesto de 0.73 m de grosor no esté formado por la mampostería constituyente de la hoja exterior ensayada en todo su espesor, así lo demuestra la auscultación sónica y visual realizada en el punto 5.3.4.3 de la presente Tesis, en la que se constata un relleno interior de menores prestaciones mecánicas y una hoja interna de mampuestos de menores dimensiones. Todo ello desemboca en que **la mayor parte de su carga se concentra en la hoja externa analizada, debido a su mayor rigidez**.

Igualmente, cabe referir que la **estimación de la tensión de rotura** a partir de un ajuste logarítmico de la envolvente de los ciclos del ensayo de gato plano doble, en la zona de comportamiento no lineal, considerando una deformación en rotura del 3%, **ha conducido a valores muy razonables en la mayor parte de los casos analizados**. Cabe referir que **sería interesante ajustar los rangos de deformación en rotura asociados a cada tipología de fábrica de cara a obtener una mejor aproximación a la tensión en rotura mediante la metodología referida**.

A su vez, se ha obtenido un **coeficiente de seguridad, frente a mecanismos de compresión a peso propio**, en la fábrica ensayada **de 4.53**¹⁴.

Finalmente, en lo que respecta a la **aplicación de la metodología de Impacto-Eco** sobre las mamposterías del edificio la conclusión más interesante es, sin duda, la **identificación de la composición de la sección transversal de los muros**, y también el hecho de que **los espesores estimados para cada hoja son compatibles con la estructura real interna del muro**.

4.- Al respecto de la campaña experimental desarrollada en una **chimenea de fábrica de ladrillo de finales del siglo XIX – principios del siglo XX** (Tejerías La Covadonga – Muriedas, Cantabria), cabe referir que **se realizó un ensayo de hole drilling con la finalidad de tratar de estimar las tracciones existentes en la zona de influencia de un hueco existente** en la chimenea, de dimensiones importantes. En este sentido **se estimaron unas tracciones del orden de 0.17 MPa** en la zona de ensayo, circunstancia que apunta a la capacidad de la técnica hole drilling para detectar estados tensionales en tracción (aspecto posible desde un punto de vista teórico). En cualquier caso **se considera necesario ahondar en la investigación experimental** referente a la determinación de tracciones, para verificar la asunción referida.

5.- En relación con la campaña experimental desarrollada en un **arco de fábrica de ladrillo del siglo XIX** (Arco de ladrillo de Campo Grande – Valladolid), se realizaron dos ensayos de gato plano simple y otros tantos dobles, en sendos estribos del arco. Tanto los **niveles tensionales** estimados, como las **características mecánicas** encontradas **fueron del mismo orden** en ambos estribos.

Se justificó experimentalmente el **reducido nivel de compresión existente en los apoyos del arco** (con un **coeficiente de seguridad** frente a mecanismos de compresión a peso propio de

¹⁴
$$\gamma = \frac{0.7 \cdot \sigma_{\text{rotura}}}{\sigma_{\text{servicio}}}$$

11.19) y se aportaron las propiedades relacionadas con la deformabilidad de la estructura de cara a evaluar la intervención futura a realizar en dicha construcción.

6.- Finalmente, en relación con la campaña experimental desarrollada en **muros de mampostería caliza y de ladrillo** de un edificio del **siglo XIX** (Seminario Mayor de Comillas, Cantabria), cabe referir que se realizaron con éxito un total de 4 ensayos de gato plano simple, 2 ensayos hole drilling y 4 ensayos de gato plano doble.

En base a los resultados obtenidos puede concluirse que el **nivel tensional detectado en los muros** del Seminario Mayor de Comillas, **en planta baja**, oscila entre 0.55-1.07 MPa, estando, en la mayor parte de los ensayos realizados, en el **umbral de los 0.60 MPa**.

En los dos puntos en los que se realizó de forma conjunta un ensayo de gato plano simple y un hole drilling se detectaron niveles tensionales muy próximos ($\sigma_{\text{gato plano}}/\sigma_{\text{hole drilling}}=0.96$), circunstancia que, en suma con las relaciones obtenidas en la torre de la Iglesia de Zarratón y en el palacio de Riva-Herrera de Santander, permiten **concluir que ambas técnicas arrojaron medidas de tensión equivalentes**.

Por otro lado, pese a que la **técnica hole drilling** no se mostró eficaz para estimar el nivel tensional sobre la mampostería construida en laboratorio, **si que parece mostrarse adecuada para detectar la tensión en servicio de fábricas históricas de mampostería**. Esta circunstancia pone de manifiesto, en primer lugar, que en un muro de dimensiones finitas como el ensayado en laboratorio, las condiciones de contorno invalidan la aplicación de la técnica. Igualmente, el hecho de que la rigidez del mortero de unión (y relleno), sea mucho mayor en fábricas reales históricas (debido a que en gran medida ya se ha desarrollado el proceso de carbonatación) que en el muro ensayado en laboratorio, contribuye a que el muro se comporte de forma más continua y, por ende, los niveles tensionales se vean menos influenciados por las interacciones entre los mampuestos.

Finalmente, pudo estimarse un **coeficiente de seguridad en servicio**, frente a mecanismos de compresión, **de 2.36**.

En base a todo lo referido, la técnica de gato plano simple, el método hole drilling y el ensayo de gato plano doble **pueden considerarse que aportan una información relevante y fidedigna del estado en servicio de las construcciones históricas de fábrica**.

Por el contrario, en lo que se refiere a la caracterización mecánica de rellenos internos de muros de varias hojas, **se desaconseja el empleo de la técnica mini-presurométrica** puesta en práctica a lo largo de la investigación.

6.4 Trabajos futuros.

En base a la investigación desarrollada se proponen una serie de líneas de trabajo susceptibles de realizar en un futuro.

En relación con la **técnica de gatos planos**:

1. Estudio de las **condiciones de contorno** que supone la **ejecución de los ensayos en laboratorio** sobre especímenes de menor dimensión que los existentes en edificios reales.
2. Estudio de la **influencia del nivel de carga vertical** en la estimación de los **parámetros mecánicos** obtenidos mediante gato plano doble.
3. **Ajustar los rangos de deformación en rotura** asociados a cada **tipología de fábrica**, de cara a obtener una mejor aproximación de la tensión en rotura mediante la técnica de gato plano doble.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

4. **Optimización del proceso de calibración de los gatos planos tras cada ensayo** (obtención del coeficiente k_m).
5. Formulación de directrices y posterior **desarrollo de un sistema de corte con posicionamiento forzado**, con la finalidad tanto de optimizar el proceso de corte, como para acometer ensayos en elementos estructurales en los que las isostáticas de compresión no sean necesariamente verticales.
6. **Automatización del ensayo de gato plano doble** por medio de la adaptación de las bombas existentes mediante dispositivos servohidráulicos automatizados y empleo de sensores de desplazamiento.
7. **Ahondar en la experimentación de muros de adobe y tapial**, en base a la realización de modelados por elementos finitos, para evaluar la idoneidad de las características mecánicas obtenidas mediante la técnica del gato plano doble (influencia de condiciones de contorno).
8. Ahondar en la **precisión de la técnica de gato plano simple mediante modelos numéricos no lineales**.
9. **Reforzar la experimentación** en relación al comportamiento de **fábricas frente a cargas pseudo-dinámicas**.
10. **Posibilidad de utilizar los gatos planos como controladores** de cualquier cambio en el estado de tensión de un elemento portante de fábrica durante la realización de trabajos de restauración, empleándolo a modo de **célula de carga**.

En relación con la **técnica hole drilling**:

1. **Estudio del incremento del diámetro y profundidad de la perforación** realizada a colación del ensayo hole drilling de cara a poder **estimar las características mecánicas, E y ν** , en el punto concreto de ensayo, con la finalidad de poder determinar las constantes A_t y B_t de forma rigurosa. Conlleva mayor destrucción, si bien se considera que tampoco debería de aumentarse el diámetro de forma considerable respecto del que se viene empleando (36 mm). En la Universidad de Cantabria hemos obtenido valores adecuados de las características mecánicas y de la resistencia a compresión de rocas a partir de probetas de 40 mm de diámetro. En el caso de fábricas de ladrillo debería de **estudiarse la posibilidad de integrar la técnica hole drilling y el ensayo UIC** de cara a obtener más información: tensión en servicio, tensión de rotura y características mecánicas.
2. **Ahondar en la aplicabilidad** de la técnica **hole drilling** en muros de **adobe y tapial**.

En relación con las **técnicas dilatómetricas**:

1. **Desarrollo de un dispositivo dilatómetrico** en el que la **deformación sea obtenida de forma directa** en vez de estimarse de forma indirecta por la variación volumétrica experimentada por la sonda.

