

PatvAc

PSE-380000-2009-3

## Patrimonio Accesible: I+D+i para una cultura sin barreras

### E2.21 – Descripción Técnica de Sistemas de Cosido, Refuerzo y Consolidación.



### Índice

1. INTRODUCCION. ANTECEDENTES	4
1.1.DETERMINACIÓN DE DAÑOS TÍPICOS EN BIENES DE PATRIMONIO INMUEBLE	4
1.1.1. Causas y Daños.	5
1.1.1.1. Humedades	5
1.1.1.2. Biológicas	7
1.1.1.3. Geotécnicas	9
1.1.1.4. Estructurales	10
1.1.1.5. Materiales	12
1.1.1.6. Ambientales	1314
1.1.1.7. Humanas;Error! No se encuentra el origen de la referencia.	13
1.1.2. Causas y Daños.	14
1.1.2.1. Trabajos “in situ”	19
1.1.2.2. Trabajos en laboratorio	20
1.1.2.3. Trabajos en gabinete	
2. INTERVENCIONES TÍPICAS.	21
2.1.SISTEMAS DE CORTE	21
2.1.1. Agua a Alta Presión.	21
2.1.2. Sierra de Disco de Diamante.	22
2.1.3. Hilo de Diamante.Causas y Daños.	23
2.2.TÉCNICAS DE REFUERZO Y CONSOLIDACIÓN EN EL PATRIMONIO INMUEBLE	24
2.2.1. Agua a Alta Presión.	24
3. APLICACIÓN EN LABORATORIO. ANÁLISIS DE RESULTADOS.	34
3.1. MURO LADRILLO MACIZO	36
3.1.1. Puesta en Carga. Ensayo de Gato Plano.	36
3.1.2. Estudio de Vibraciones con Diferentes Sistemas de Corte	38

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

---

3.1.3. Ensayo de los Cosidos	53
<b>3.2. MURO TAPIAL</b>	<b>68</b>
3.2.1. Puesta en Carga <b>Puesta en Carga. Ensayo de Gato Plano.</b>	69
3.2.2. Estudio de Vibraciones con Diferentes Sistemas de Corte.	72
3.2.3. Ensayos de los Cosidos	87
<b>3.3. MURO MAMPOSTERÍA</b>	<b>99</b>
3.3.1. Puesta en Carga. Ensayo de Gato Plano	99
3.3.2. Estudio de Vibraciones con Diferentes Sistemas de Corte.	103
3.3.3. Ensayos de los Cosidos <b>Puesta en Carga. Ensayo de Gato Plano.</b>	117
	127
<b>3.4. MURO SILLERÍA MURO SILLERÍA</b>	<b>127</b>
3.4.1. Puesta en Carga.	128
3.4.2. Estudio de Vibraciones con Diferentes Sistemas de Corte.	139
3.4.3. Ensayo de los Cosidos. <b>Puesta en Carga. Ensayo de Gato Plano</b>	146
<b>4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. APLICACIÓN EN LABORATORIO. ANÁLISIS DE RESULTADOS.</b>	

### 1. INTRODUCCIÓN. ANTECEDENTES.

Toda intervención realizada en un bien perteneciente al Patrimonio Cultural requiere un estudio especializado sobre su estado de conservación. Si además, se tiene en cuenta que las modificaciones están ideadas para aumentar la Accesibilidad y que éstas generalmente están relacionadas con la creación de espacios reducidos para la instalación de escaleras, ascensores, rampas etc., entonces, en ese caso, el buen conocimiento se hace todavía más necesario para tomar la solución óptima.

En el momento de acometer una obra de restauración se deben tener en cuenta varios factores para que el resultado final satisfaga a todos los involucrados. Estos factores están relacionados con los materiales empleados. Las instituciones y propietarios son cada vez más partidarios de utilizar materiales similares a los originales y que además ofrezcan una mayor durabilidad y menor coste de mantenimiento. Además debe existir la certeza de que el bien tiene capacidad suficiente de admisión de las nuevas y previas solicitudes y verificar que sus propiedades mecánicas no se verán alteradas por deterioros o modificaciones en su composición geoquímica p.e. Las características mecánicas se pueden ver alteradas por un incremento excesivo de calor, una presión que sobrepase el límite elástico, etc.

Además, las obras de accesibilidad, generalmente, requieren la aplicación de técnicas de cosido refuerzo y consolidación. Hasta ahora no se han obtenido datos objetivos que permitan indicar su influencia ni en el comportamiento de los materiales típicos utilizados, ni en los elementos estructurales. Por este motivo, se han escogido los dos sistemas de corte más utilizados, el corte con hilo de diamante y el corte con sierra de disco. Y el cosido con varilla roscada de acero y fibra de vidrio en un elemento típico de este tipo de estructuras, los muros de carga. Así, se obtendrá una información que se podrá aplicar a un gran número de edificios o estructuras históricos.

La organización del presente documento se encuentra dividido en cuatro capítulos. En el primero de ellos se hará una breve introducción del trabajo realizado y la presentación de los daños típicos de inmuebles históricos. En el segundo capítulo se describirán las técnicas de corte, cosido y consolidación, en el tercero se describirán ensayos ejecutados y se analizarán los resultados y, en el cuarto se comentarán las conclusiones y se indicarán recomendaciones para trabajos futuros.

#### 1.1. Determinación de daños típicos en Bienes de Patrimonio Cultural.

En toda Restauración es esencial el conocimiento del estado actual del Monumento, antes de realizar la redacción del Proyecto, y aun así pueden aparecer durante el desarrollo de las obras elementos o circunstancias desconocidos que lo pueden modificar. Se suele decir que el Proyecto de Restauración está acabado, cuando se terminan las obras.

Para que una actuación de restauración sea eficaz y durable deberán conocerse los daños existentes y sus causas, pues éstas deben ser eliminadas antes y durante las obra. De otra forma, más bien pronto que tarde, se reproducirán los daños incluso con más virulencia que en fase inicial.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

Es por ello por lo que es preciso, efectuar los estudios previos, basados unas veces en la experiencia y otras en técnicas novedosas, pasando por aquellas que son de uso rutinario y la documentación histórico-arqueológica de la construcción. Para de esta manera conocer la causa que ha producido un determinado daño.

Inicialmente se van a enumerar, de forma sucinta, las causas de los daños, si bien normalmente existe una concatenación de varias de ellas, aunque solamente sea una la causa primera. Después se describirán los daños derivados, para por último definir la metodología y técnica de detección.

### 1.1.1. Causas y Daños.

#### 1.1.1.1. Humedades

- **Capilaridad:** se debe a la diferencia de polaridad entre el terreno y las fábricas, es producida por las aguas freáticas, escorrentías y/o riegos. Lleva emparejado una falta de estudios previos que determinen el nivel freático y sus oscilaciones, la inexistencia o defectos en la evacuación de la escorrentía y/o la carencia de impermeabilización para las aguas del riego. Este fenómeno denominado “el cáncer de la piedra” produce en conjunción con las sales criptoflorescentes, provenientes del terreno, y el hielo, la disgregación de las fábricas.

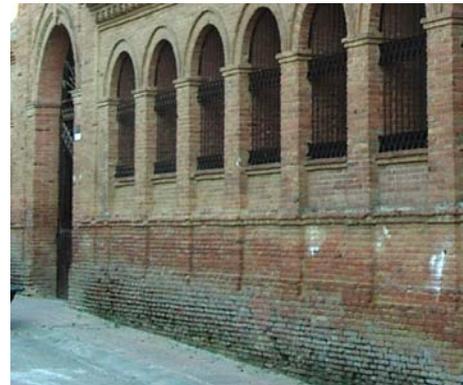


Figura 1.1.. Deterioros debidos a humedades en monumentos de sillería y fábrica.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

- **Infiltración:** se produce por falta de estanqueidad en cubiertas (defectos constructivos, falta de mantenimiento, ...) y huecos (cerramientos defectuosos, albardillas mal colocadas o sin goterón ....), existencia de grietas y/o fisuras, defectos del rejuntado (falta o disgregación del mortero) y por pérdidas o deterioro de elementos constructivos (mampuestos sillares, ladrillos ....).



Figura 1.2. Daños producidos por infiltraciones de agua

En el caso de los muros de dos hojas producen la disolución del aglomerante del relleno, que al quedar sueltos empujan y pueden llegar a fisurar las hojas. También pueden ser la causa de las humedades de condensación.



Figura 1.3. Daños producidos por infiltraciones de agua en muros

- **Condensación:** se produce por la presencia de otro tipo de humedad, bajas temperaturas, falta de ventilación y/o puentes térmicos.

Los daños se reflejan en pinturas, revocos, superficies interiores de las fábricas,...



Figura 1.4. La condensación daña las pinturas que encuentra en su zona de influencia.

Además de los daños específicos las humedades en general producen:

- Insalubridad
- Pudriciones.
- Corrosiones.
- Disgregaciones.
- Crecimiento de vegetación

### 1.1.1.2. Biológicas

- Crecimiento de líquenes y musgos, en lugares oscuros con humedad y/o una con una determinada orientación geográfica. Producen insalubridad y disgregaciones en las fábricas.



Figura 1.5. Efecto de la acción biológica sobre muros de sillería.

- Bacterias del ciclo del azufre, nitrógeno, etc., que sintetizan ácidos a partir de la contaminación atmosférica.
- Crecimiento de vegetales superiores enraizados en las fábricas y cubiertas, provocando agrietamientos, roturas y a veces hasta ruinas.



Figura 1.6. Muestra de vegetales enraizados en la piedra

- Animales que por un lado con sus excrementos producen ácidos y sales que llevan a la disgregación de la fábrica, y que por otro con sus anidamientos conllevan aumentos importantes de carga.



Figura 1.7. Diferentes tipos de nidos en edificios históricos y efecto de su permanencia.

### 1.1.1.3. Geotécnicas

Los motivos más usuales son:

- Asientos del terreno debidos a:
  - Falta de capacidad de carga, por elevadas presiones de trabajo.
  - Disoluciones de materiales (yesos...).
  - Movimiento por construcciones cercanas (demolición de edificios, excavaciones aledañas, carreteras a pie de talud,..).
  - Fractura de taludes (inundaciones, terremotos...).
- Movimientos alternativos por la variación del contenido de humedad en cimentaciones superficiales (arcillas...).

En cualquiera de los casos producen fisuras y grietas, debidas a fallo por esfuerzo cortante, por tanto, inclinadas a 45° indicando la zona fija del terreno. En el caso de movimientos importantes se puede llegar al colapso de la construcción.

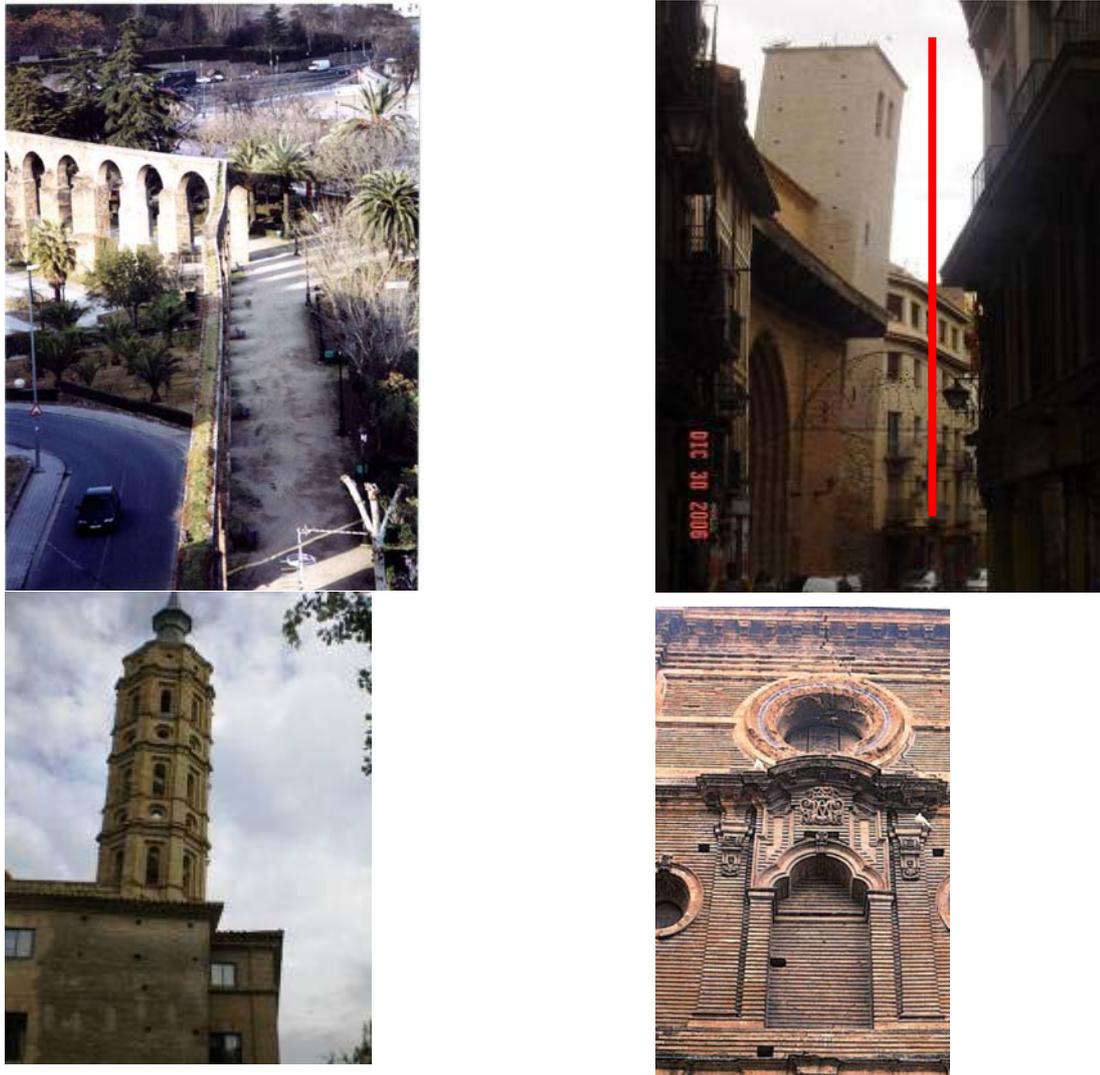


Figura 1.8. Los asentos y movimientos del terrenos se reflejan en deterioros de las estructuras.

### 1.1.1.4. Estructurales

En general en construcciones antiguas los daños estructurales son consecuencia de otras causas, que hacen evolucionar sus patologías hasta llegar al estado actual.

Entre las causas más comunes se encuentran:

- La eliminación de elementos de contrarrestos de empujes (contrafuertes, arbotantes,..).
- La eliminación de elementos de centrado de cargas (pináculos,..).
- La degradación de cubiertas que implican una sollicitación no considerada inicialmente (rotura o falta de tirantes, empujes no compensados,...).



Figura 1.9. **Grieta debida al empuje de la cubierta.**

- Alteración del equilibrio de cargas (reellenos no equilibrados de bóvedas, apoyos puntuales de la cubierta en arcos y bóvedas,...).



Figura 1.10. **Apoyo puntual en bóveda que resultan fisuras de la misma.**

- Sobrecargas excesivas debidas a degradación de elementos, sobreestimación de capacidad portante, cambios de uso, etc
- Incompatibilidades estructurales en otras actuaciones (rehabilitaciones,...).
- Degeneración por falta de mantenimiento (pudriciones, pérdidas de masas, corrosiones,...).
- Todo ello conlleva la aparición de fisuras, grietas, roturas y por último al hundimiento o ruina de la construcción.



Figura 1.11. Las termitas continúan siendo una causa de la degradación de las estructuras de madera antiguas.

### 1.1.1.5. Materiales

La utilización de materiales inadecuados en las actuaciones, también producen daños en las fábricas. Las causas más comunes son:

- Falta de capacidad de carga del material, que genera fisuras y en algunos casos hasta roturas.
- Incompatibilidad físico-química (porosidad, absorción, composición química,...), que produce disgregaciones físicas y descomposiciones químicas.



Figura 1.12. La elección de materiales compatibles es fundamental para el buen resultado de la obra de restauración.

- Incompatibilidad estructural (diferencia sustancial en los módulos de deformación,...). El efecto típico es la separación de los materiales por esfuerzos rasantes.

### 1.1.1.6. Ambientales

Los factores ambientales pueden condicionar las construcciones y entre estos factores se encuentran:

- La contaminación, que conjuntamente con la humedad da lugar a la disgregación de la fábrica.
- Ciclos de hielo-deshielo, producen fisuras, grietas y disgregaciones.
- El viento, aumenta las agresiones ambientales del tipo erosión y golpeteo. Por este motivo, en la antigüedad las ermitas eran protegidas de los vientos dominantes ubicándolas en la media ladera del monte.
- Aguas incontroladas, que pueden producir el hundimiento.
- Sismos, al igual que en el caso anterior pueden producir hundimientos, fallos por esfuerzo cortante, asentos, etc.

### 1.1.1.7. Humanas

Generalmente se producen por falta de un estudio técnico que respalde las actuaciones y de entre ellas destacan

- Restauraciones inadecuadas.



Figura 1.13. En algunos casos las restauraciones inadecuadas resultan un perjuicio para los bienes.

- Construcciones cercanas.
- Demoliciones no estudiadas.
- Impactos.
- Fuego.



Figura 1.14. El fuego es una causa obvia de daño para cualquier obra de Patrimonio Cultural.

Todo ello produce agrietamientos e incluso puede llevar a la ruina

### 1.1.2. Métodos de Estudio.

Una vez conocidos los daños se van a definir las diferentes metodologías y medios existentes para conocer sus causas y eliminarlos, teniendo en cuenta que algunas son obvias para cualquier técnico medianamente preparado, y otras necesitan de estudios profundos y técnicas vanguardistas. De cualquier modo, cualquier estudio debe ser iniciado “in situ”, en el mismo monumento, una vez conocida la bibliografía existente de su evolución en el tiempo. Posteriormente se seguirá en un laboratorio y/o gabinete técnico para tomar otra vez al pie de la construcción, y de esta manera comprobar los resultados teóricos y/o recabar nuevos datos no tomados inicialmente pero necesarios.

#### 1.1.2.1. Trabajos “in situ”

Lo primero y esencial es realizar un levantamiento de la construcción incluyendo y situando los diferentes daños observados y las características del monumento. Para ello además de la técnica visual se utilizarán diferentes pruebas o ensayos y de entre ellas las basadas en principios:

- Mecánicos: esclerómetro, arrancamiento, penetración....
- Eléctricos: resistivo, Inductivo, capacitivo, piezoeléctrico .
- Ultrasónicos (velocidad de propagación según la calidad o tipología del material).
- Ópticos: fotogrametría, topografía de precisión.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

- Cuerda vibrante (diferencia de frecuencia de vibración de acuerdo con la tensión).
- Hidráulicos (vasos comunicantes).
- Neumáticos (suministro de presión para abrir la válvula del aparato de medida).
- Magnéticos.
- Láser (emisión de luz coherente).
- Termografía (diferente modo de reacción de cada material a las sollicitaciones térmicas exteriores).
- Georradar (velocidad de las ondas de radar según la conductividad).
- Tomografía axial computarizada (T.A.C.): por ondas de rayos X, eléctricas (resistividad del suelo), ultrasónicas, electromagnéticas.

En particular para el estudio de materiales se pueden utilizar los siguientes ensayos o pruebas

- Homogeneidad: Rayos infrarrojos (cámaras termográficas), ultrasonido y esclerometría.
- Características resistentes: Ultrasonido y esclerometría conjuntamente con probetas extraídas y ensayadas en laboratorio
- Armaduras. Técnicas magnéticas (pachómetro)

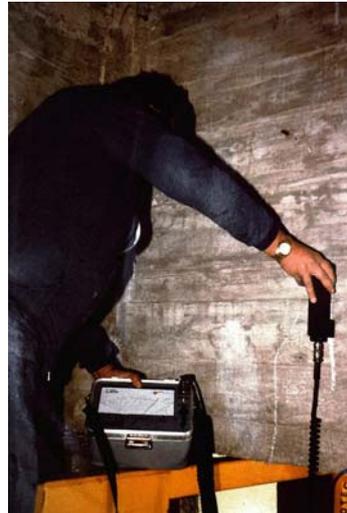


Figura 1.15. En algunos casos las restauraciones inadecuadas resultan un perjuicio para los bienes.

Los ensayos a utilizar en los estudios de las cimentaciones son:

- Cimentaciones superficiales. Catas.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

- Conocimiento del terreno y cimentaciones profundas.-Sondeo apoyado en toma de muestras para su ensayo en laboratorio. Penetrómetro por presión o rechazo. Placa de carga.
- Determinación del nivel freático y sus oscilaciones: Piezómetro eléctrico o mecánico.
- Discontinuidades y humedades. Georradar, tomografía axial computarizada (TAC) por ondas ultrasónicas, eléctricas, rayos X u ondas electromagnéticas.

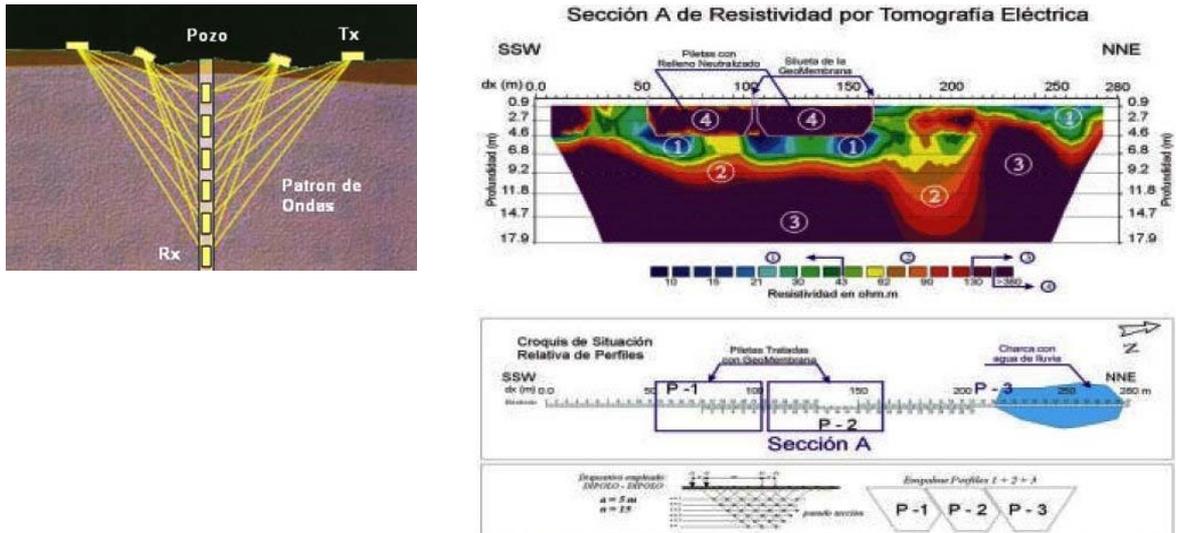


Figura 1.16. Demostraciones de funcionamiento de las técnicas de rayos x y tomografía eléctrica en el estudio del comportamiento del suelo.

- Movimientos del terreno en profundidad. Inclínómetro

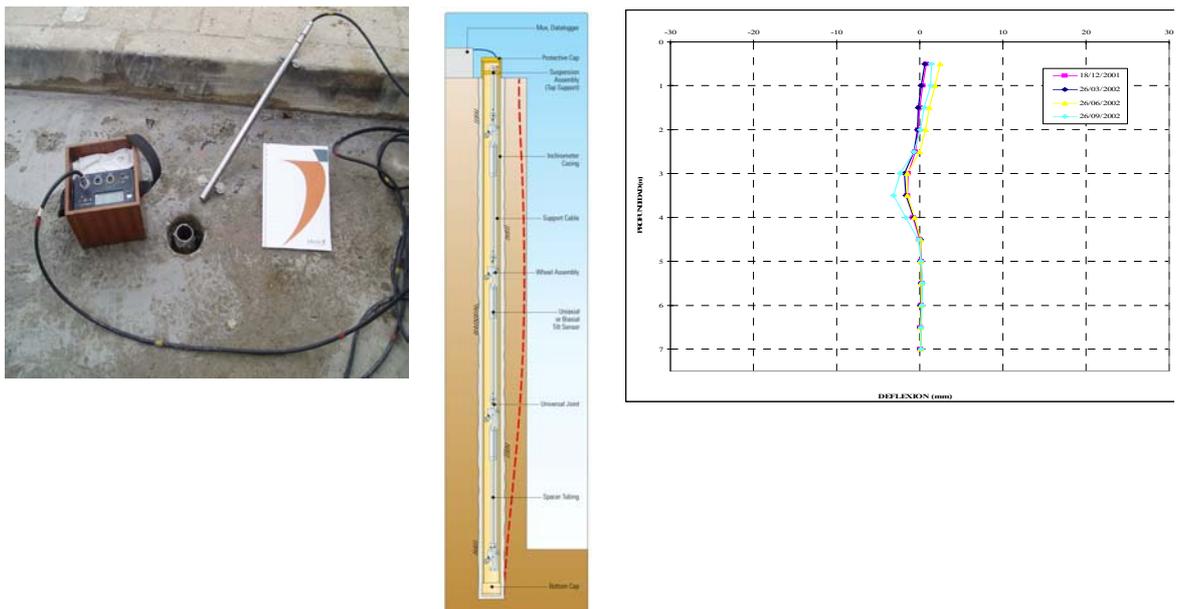


Figura 1.17. En el lado izquierdo se aprecia un inclinómetro, en la figura del centro su funcionamiento y en lado derecho una gráfica tipo de sus lecturas.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

Los ensayos a utilizar en los estudios de las estructuras son:

- Conocimientos de elementos ocultos y discontinuidades: Ultrasonidos, endoscopia, georradar, rayos infrarrojos.
- Levantamiento de la estructura: Topografía (nivel de precisión, teodolito informático...), fotogrametría, rayos láser.

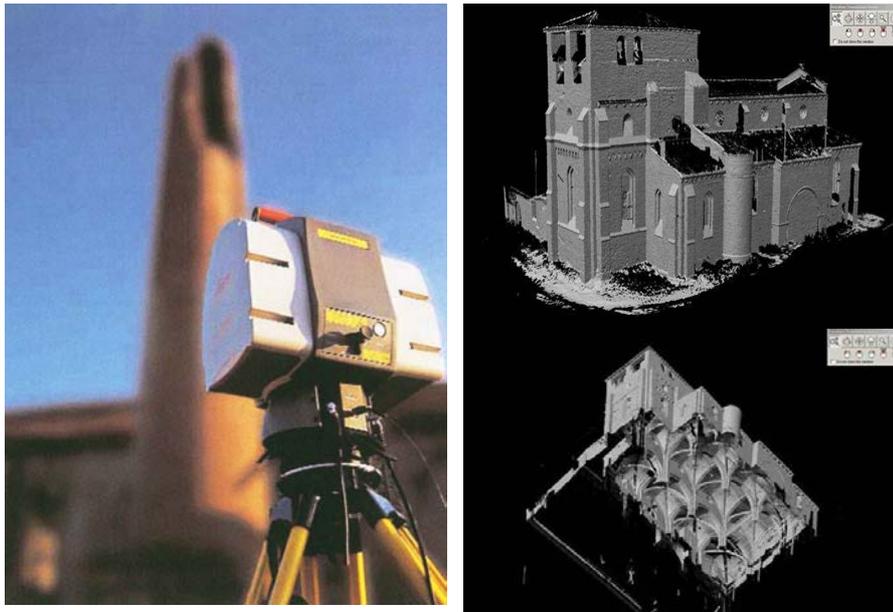


Figura 1.18. En el lado izquierdo aparece la imagen de un escáner láser y en el lado derecho aparecen sus resultados una vez tratados.

- Estado tensional: Termografía, gatos planos, liberación de tensiones (hole drilling, extracción de testigos instrumentados,...).
- Corrosión y su estado actual. Corrosímetro.
- Movimientos de fisuras y grietas. Testigo de yeso. En este sistema hay que cerciorarse que esté bien pegado y de cualquier manera solo indica si ha habido o no movimiento. Se debe acompañar de un marcado fechado de los extremos de la fisura.
- Extensómetro mecánico, eléctrico o inductivo.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

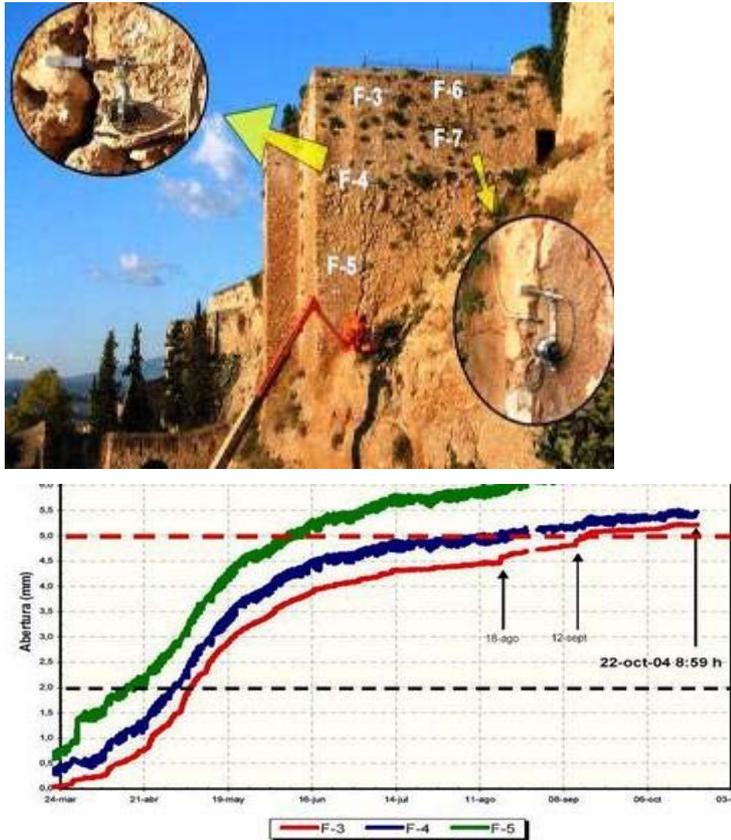


Figura 1.19. Aplicación de extensómetros a un castillo en la gráfica de abajo se muestran sus movimientos.

- Control de temperatura y humedad. Termohigrómetro, termopar.
- Giros y desplomes. Clinómetro, péndulo, cinta de invar de convergencia.
- Movimientos generales. Fotogrametría, rayos láser, topografía de precisión.

En cuanto al medioambiente se monitoriza con estaciones medidoras de la contaminación

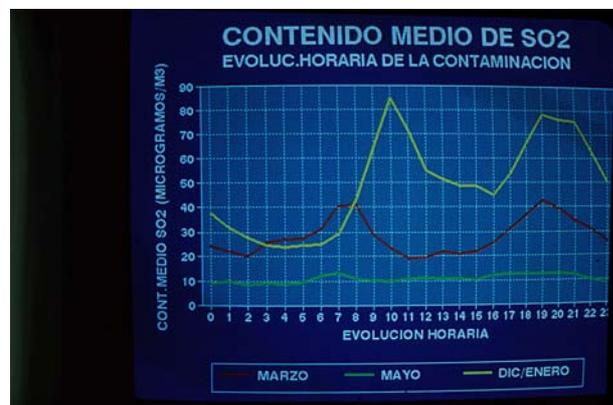


Figura 1.20. En la foto de la izquierda se observa una estación medidora de la contaminación y en la derecha una gráfica de control de  $SO_2$ .

### 1.1.2.2. Trabajos en laboratorio

- Caracterización físico-química del material: Lámina delgada, microscopio electrónico, absorción, porosidad, contenido en sales (propias y de absorción), humedad, densidad.



Figura 1.21. En el lado izquierdo aparece la imagen tomada con un microscopio electrónico y en el lado derecho se muestra la fotografía del mismo.

- Tensión de rotura, límite elástico, deformabilidad. Ensayos mecánicos.
- Durabilidad (material original y de los tratamientos). Ensayos hielo-deshielo, rayos UVA, compatibilidad físico-química y estructural,...
- Estudios geotécnicos. Ensayos compresión, corte directo, hinchamiento, triaxial, edométrico.



Figura 1.22. En el lado izquierdo aparece la prensa para realizar ensayos a compresión y en el lado derecho se muestra la imagen de un ensayo de edometría.

### 1.1.2.3. Trabajos en gabinete

Con todos los datos tomados “in situ” y los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio se realiza un estudio teórico para conocer el monumento y su comportamiento estructural evolutivo. En el caso de las fábricas se deben tener en cuenta las heterogeneidades, que impiden una excesiva precisión pero no el conocimiento del estado actual; por lo que los cálculos deben ser elementales (geométricos...) ya que pequeñas imprecisiones no impiden la toma de decisión.

Con la recopilación de toda la información mencionada se podrá emitir un informe en el cual se dictamine la causa de los daños, su evolución actual y las posibles soluciones de manera que se puedan integrar en el Proyecto de Restauración.

### 2. INTERVENCIONES TÍPICAS

En la mayoría de las obras que se realizan en un edificio para aumentar la accesibilidad del Bien se realizan cortes y aplican técnicas de cosido, refuerzo y consolidación en elementos estructurales, esto es, en los elementos que deben responder satisfactoriamente a todas las sollicitaciones, nuevas y anteriores. Este apartado no trata de hacer un análisis en profundidad son de verificar la utilidad de algunas de estas técnicas en la elección de soluciones de accesibilidad en muros de carga.

#### 2.1. Sistemas de Corte

Existen diversas técnicas a utilizar para cortar muros, dependiendo de su tipología (fábrica u hormigón, mucho o poco espesor,...). A continuación van a ser descritas las tipologías más utilizadas indicando sus ventajas e inconvenientes.

##### 2.1.1. Agua a Alta Presión.

Elimina cualquier material por la fuerza del impacto directo sobre la superficie del material y por la presurización del entramado de poros y fisuras existentes (Figura 2.1).

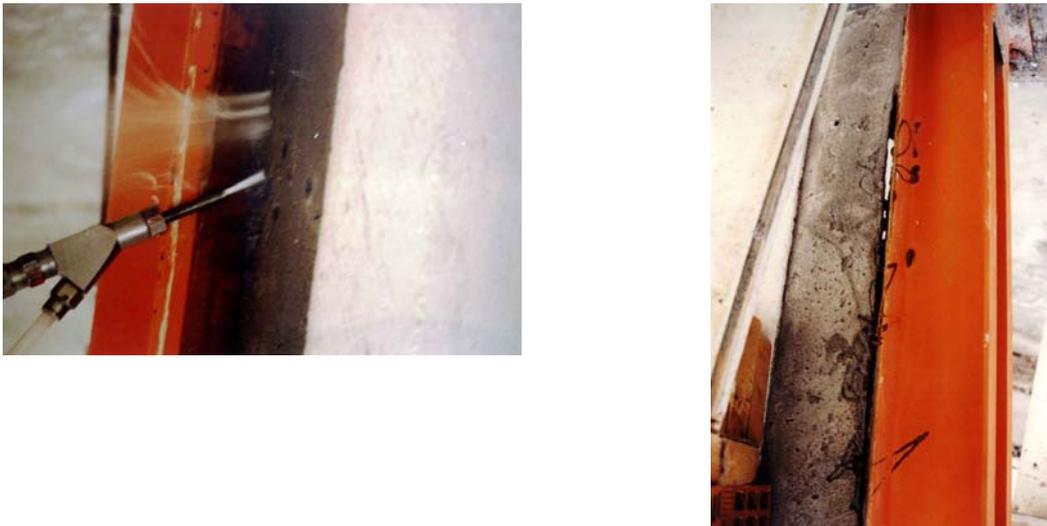


Figura 2.1. En el lado izquierdo se muestra un momento del corte realizado con agua a presión y en el lado derecho figura el acabado de este tipo de corte.

Las ventajas que presenta son:

- No transmite vibraciones.
- No provoca microfisuraciones.
- La superficie de corte es idónea para su posterior tratamiento.
- No produce ruidos, ni polvo.
- Rapidez.
- Precisión.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

Los inconvenientes son:

- Evacuación del agua.
- Generalmente existen problemas en las fábricas de composición heterogénea.

Esta técnica se puede aplicar a:

- Muros de hormigón.
- Muros de sillería.
- Muros homogéneos en general, donde el agua no altera la composición de los materiales y sea fácilmente evacuable.

### 2.1.2. Sierra de Disco de Diamante.

En este caso el corte se lleva a cabo con una sierra compuesta por una central hidráulica y una cabeza que soporta el disco diamantado. El carro es instalado sobre una guía a lo largo de la cual se efectúa el corte, según la dirección marcada por ella.

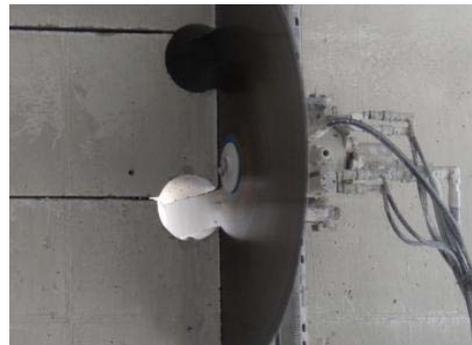


Figura 2.2. En el lado izquierdo se aprecia el corte de un muro de hormigón con esta técnica y en el lado derecho se observa un detalle del corte.

Las ventajas que esta técnica presenta son:

- Corte limpio.
- Vibraciones limitadas.
- Corte automatizado.
- Ausencia de polvo.
- Seguridad.

Mientras que los inconvenientes son:

- Limitación de espesores.
- El montaje debe ser realizado por especialistas.
- Forma del útil de corte.

Se puede aplicar a todo tipo de muros y materiales con la limitación de su espesor

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

### 2.1.3. Hilo de Diamante.

Permite el corte de muros que con otras técnicas serían muy problemáticos. Se suele aplicar a elementos con un espesor mínimo de 70cm.

Consiste en un cable de acero en el que van insertadas, a intervalos regulares, anillos con diamantes electropositados. El cable es accionado mediante una polea motorizada que lo arrastra por la superficie a cortar, consiguiendo un gran acabado en muros continuos de cualquier material.

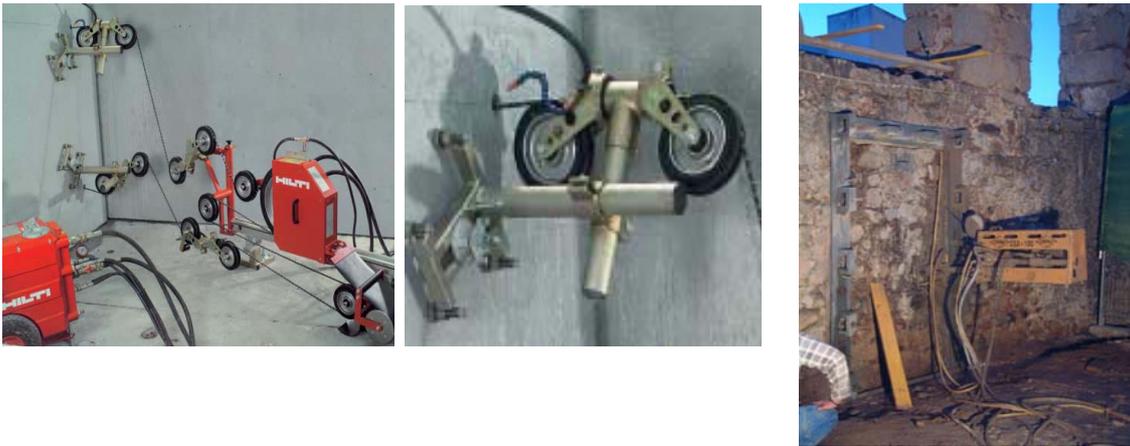


Figura 2.3. En el lado izquierdo se muestra el montaje de esta técnica; en el centro un detalle y en el lado derecho el corte en una estructura de mampostería.

Las ventajas que presenta esta técnica son:

- Gran versatilidad.
- Vibraciones limitadas.
- Ruidos mínimos.
- Corte automatizado.
- Cortes submarinos.
- Ausencia de polvo.

Y las desventajas son

- El montaje debe ser realizado por especialistas.
- Posibilidad en la zona final de corte de, aparición de fisuras superficiales y/o desprendimientos locales.

Se suele aplicar a:

- Todo tipo de muros con la limitación de los muros heterogéneos.
- Muros de gran espesor.
- Muros submarinos.

### 2.2. Técnicas de Refuerzo y Consolidación en el Patrimonio Inmueble

Los refuerzos en una estructura son necesarios cuando ésta ha sufrido una degradación y no es capaz de tolerar las cargas a las que está sometida, o estando en buenas condiciones no puede aguantar el incremento de ellas por motivos funcionales.

Para el diseño de los refuerzos es preciso, primeramente, conocer la estructura existente y su funcionamiento actual, por lo que se deben efectuar los estudios previos adecuados. Siendo necesario tener en cuenta las siguientes premisas:

- Conocimiento del terreno sobre el que se asienta (por si fuese necesario reforzarlo) y el entorno en el que se ubica (desmontes, corrientes fluviales, escorrentías, etc..).
- Tipología de la estructura, teniendo en cuenta que los Bienes de Patrimonio se construían para su funcionamiento a compresión aunque existan elementos aislados en los que no es así (forjados-flexotracción, tirantes-tracción, ...). Para el contrarresto de las cargas horizontales eran contrahuercos y arbotantes, y para el centrado de cargas los pináculos.
- Tipología del material (tapial, adobe, madera, mampostería, sillería, cerámico, terrenos estabilizados, etc..).

En el apartado 1.1 se han indicado los daños más típicos y sus causas, que serán precisos eliminar antes de proceder al refuerzo o proteger la estructura contra ella.

#### 2.2.1. Técnicas de Refuerzo.

Una vez realizados los estudios conocidas las causas y eliminadas éstas se procederá al refuerzo estructural siempre y cuando sea preciso. En este punto se va a enumerar y describir someramente, las técnicas más utilizadas y adecuadas.

- Ampliación de zapatas. Consiste en colocar unos conectores a las existentes, para posteriormente adosar un mallazo cogidos a ellos para una vez encofrada, hormigonar. Se suele utilizar cuando los problemas puedan venir del aumento de la sobrecarga del edificio.
- Micropilotes. Cuando la capacidad del terreno no es la adecuada o hay un aumento de la sobrecarga, ésta se traslada a un terreno competente más profundo. Para ello se efectúan perforaciones a rotación a través de la cimentación existente, para posteriormente colocar unas armaduras y hormigonar. La profundidad de la perforación debe sobrepasar más de 1m. el terreno competente.



Figura 2.4. Ejecución de micropilotes.

- Inyecciones a presión (jet grouting). Este método consiste en realizar inyecciones a alta presión en el terreno, para su desagregación y mezcla con el cemento, rellenando huecos y discontinuidades. Para ello se realizan perforaciones a rotación o rotopercusión (según el tipo de terreno) a modo de los micropilotes, para posteriormente inyectar lechada a alta presión a través de toberas existentes en las camisas de perforación. Para la utilización de esta técnica el terreno debe ser adecuado para la formación de columnas mezclas del terreno y de la inyección. Es preciso controlar posibles movimientos del terreno que puedan afectar a la durabilidad de las construcciones existentes en el entorno.
- Cosidos inclinados. En este caso es necesario realizar perforaciones a rotación en las fábricas, para que una vez limpias, inyectar un producto aglutinador (morteros, lechadas, resinas...) y a continuación introducir, girando para evacuar el posible aire ocluido, varillas de acero corrugado (galvanizado o inoxidable) o de fibra de vidrio.

En este tipo de cosidos las perforaciones se deben cruzar, nunca deben estar en el mismo plano.



Figura 2.5. Esquema de realización de cosido inclinado.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

- Cosidos verticales. Las perforaciones, como en todos los casos deben efectuarse a rotación, alcanzarán una profundidad de al menos un metro, y su número el necesario para su correcto funcionamiento estructural. En estas perforaciones se introducirán varillas metálicas corrugadas de acero galvanizado o inoxidable, previa inyección. Estas estarán conectadas al armado de una viga de atado de la fábrica.



Figura 2.6. Esquema de realización de cosido vertical.

- Cosidos en hilada. Estos tipos de cosidos son horizontales y cogen la fábrica perforando horizontalmente los distintos elementos componentes de la misma. El número de cosidos en cada plano horizontal dependerá del espesor de la fábrica.

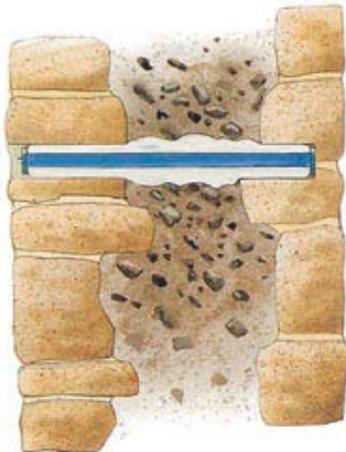


Figura 2.7. Esquema de realización de cosido en hilada.

- Cosidos en tendel. Son similares a los anteriores si bien las perforaciones son efectuadas en las juntas. En ocasiones cuando se ha demolido parte del muro, las armaduras se van colocando conforme se va levantando el nuevo muro. En este caso y en el anterior las armaduras deben preferentemente ser metálicas.
- Grapados. Se utilizan para coser grietas, para ello son realizadas perforaciones a ambos lados de la misma, para una vez inyectadas colocar la grapa. La profundidad de perforación debe ser lo suficiente para que no se produzcan tensiones superficiales nocivas.
- Inyecciones de lechadas. Realizadas las perforaciones pertinentes, las lechadas son inyectadas, a baja presión, para rellenar espacios donde no existen rellenos o se han perdido. En la mayoría de los casos deben ser de cal

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

para compatibilizar los módulos de deformación, preferiblemente serán de cal aérea aditivadas con resinas, pues su carbonatación puede dilatarse en el tiempo dada la dificultad de penetración del anhídrido carbónico. Una solución puede ser la inyección de cal hidráulica, pues la inyección de lechada de cemento Pórtland es nociva y, además, el módulo de deformación suele ser muy diferente del mortero de cal de tal forma que crea puntos duros, por la adición de sales criptoeflorescentes.



Figura 2.8. Aplicación de inyecciones en un muro de mampostería donde parte del relleno se ha perdido..

- Inyecciones de microlechadas. En este caso, como en el anterior, hay que contemplar la posible incompatibilidad de los módulos de deformación, aunque tiene menos importancia, y el contenido en sales criptoeflorescentes. Estas microlechadas tienen tamaño de micrones y por lo tanto un gran poder de penetración, por lo que son utilizadas para la consolidación de rellenos disgregados por haber perdido el material aglomerante (disolución de cales...).
- Riegos con lechada de cal. Son utilizados para la consolidación de fábricas térreas que han perdido el aglutinante y son accesibles.
- Reposiciones superficiales. Si son elementos completos o el volumen perdido del elemento importante, se sustituirán por otros similares asentados con mortero de cal. Si las pérdidas son importantes aunque superficiales, se repondrán los volúmenes perdidos mediante morteros pétreos de cal aditivados con resina, prendidos con un mallazo de fibra de vidrio o acero galvanizado y que a su vez esté apresado a la base a través de conectores



Figura 2.9. Ejemplos de reposiciones de material en columnas.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

El mortero debe tener un árido similar a la piedra existente y la resina, preferentemente acrílica pues permite la transpiración y no “calea” frente a los rayos UVA (resina epoxi).

- Consolidaciones e hidrofugaciones. Cuando las fábricas se encuentran deterioradas superficialmente por disgregación es necesario tratarlas mediante pintura con productos consolidantes una vez limpiada en seco la superficie. Si la degradación afecta en profundidad, se tratar mediante inyección.
- Como medida de protección preventiva, es utilizado el pintado con una pintura hidrofugante, previa limpieza superficial. También es recomendable, después de aplicar el consolidante, pintar con un hidrofugante.
- Refuerzo con chapas de acero. Primeramente debe prepararse la superficie del elemento a reforzar (eliminación de elementos en precario, limpieza en seco, ...). A continuación será colocada la chapa impregnada con un mortero epoxidico y para conseguir una mejor adherencia la chapa debe estar presionada contra el elemento. La mejor solución de apriete es hacerlo con conectores que además absorberán los posibles esfuerzos rasantes.



Figura 2.10. El acero también puede utilizarse como material de refuerzo en Bienes de Patrimonio Inmueble.

El espesor de la chapa no debe sobrepasar los 2mm. Para permitir su adaptación a la superficie. Si hiciera falta más espesor serían colocadas diferentes capas de chapa. El espesor del mortero no debe sobrepasar 1mm.

- Refuerzo con fibra de carbono. Es similar al de chapa de acero, si bien es más dúctil y manejable. La preparación de superficies debe ser similar a la de la chapa, si bien su ductibilidad permite más imperfecciones en la superficie del elemento.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación



Figura 2.11. El acero también puede utilizarse como material de refuerzo en Bienes de Patrimonio Inmueble.

- Refuerzo con perfilaría metálica. Como en los casos anteriores previamente deben prepararse las superficies, si bien si se utilizan como conexión morteros de cemento, es recomendable hacerlo con agua.

Para unificar el refuerzo de la perfilaría, es preciso coger los perfiles entre sí con pletinas soldadas en el caso de estar exentos. En los casos que los perfiles estén parcialmente oculto en la fábrica deberán cogerse a la misma mediante conectores, además de las conexiones entre ellos con las pletinas.

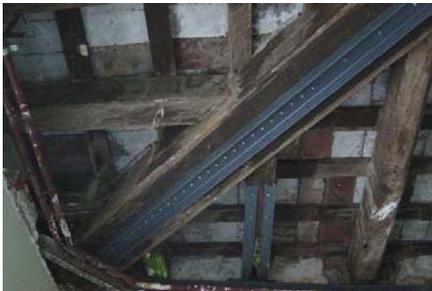


Figura 2.12. Los perfiles de acero pueden utilizarse solos o con otros materiales para reforzar las estructuras.

Los refuerzos se pueden ejecutar con soldaduras cuando se trata de reforzar o aumentar la inercia de otro elemento metálico. Si lo perfiles existentes fuesen antiguos será necesario unos ensayos de soldabilidad, por si no lo fueran, en cuyo caso la unión se efectuaría mediante atornillado.

- Refuerzo con hormigón. En estos casos, una vez preparada la superficie (limpieza, eliminación de zonas degradadas, picado debajo de las armaduras,...) serán colocados unos conectores a los cuales estará cogida una nueva armadura, después de lo cual se procederá al hormigonado.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación



Figura 2.13. La utilización del hormigón como material de refuerzo es una práctica común en estructuras construidas con ese mismo material.

El hormigonado, en determinados casos, se puede hacer mediante proyección, en cuyo caso se puede sustituir la armadura convencional por fibra metálica incluida en el mortero de proyección, que tiene la ventaja de funcionar por igual en todas las direcciones.

- Refuerzo mediante la colocación de nuevos elementos o por sustitución de los existentes. Cuando un conjunto estructural está falto de capacidad de carga, pueden intercalarse nuevos elementos que aumenten esta capacidad. O en casos de deterioro irreversible, sustituir los elementos dañados por otros similares.

Para ello es necesario apeo o entibar, y descargar el conjunto estructural, para que una vez reparado y sustituidos los elementos deteriorados, devolverlo a la posición inicial.

- Reposición parcial de elementos. Cuando un elemento estructural presente una zona deteriorada irrecuperable, pero el conjunto se encuentre en buenas condiciones, se puede demoler la parte dañada previo apeo, para después colocar una prótesis de, mortero de resina (sistema Beta), hormigón o mortero de cemento, conectada al elemento con varillas (fibra de vidrio o acero galvanizado) adheridas al mismo en perforaciones rellenas de resina epoxi.

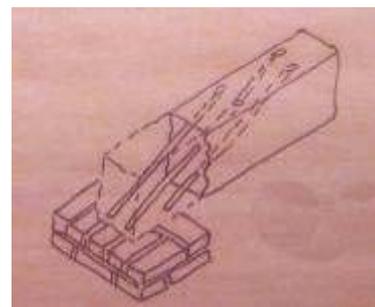


Figura 2.14. La utilización del hormigón como material de refuerzo es una práctica común en estructuras construidas con ese mismo material.

- Atirantados. Se utilizan evitar desplazamientos de elementos estructurales por causas patológicas, bien como prevención, bien como refuerzo.

Para esto, son ancladas placas en las fábricas por medio de conectores y entre sí con tirantes metálicos, puestos en tensión con tuercas enroscadas.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

- Zunchos de atado. Es una combinación de un cosido vertical unido a una viga de hormigón perimetral, con tirantes intermedios entre caras opuestas del zuncho.



Figura 2.15. Ejecución de un zuncho de atado.

- Contrarrestos. Consiste en la reposición de los inicialmente existentes y desaparecidos en la actualidad (contrafuertes, arbotantes, elementos de centrado de cargas...).

En gran parte de los refuerzos descritos, es recomendable descargar los elementos a reforzar para que una terminada la operación volverlos a cargar. Consiguiéndose de esta manera un trabajo conjunto del elemento y su refuerzo.

Una vez conocidos algunos de los más típicos sistemas de refuerzo, se va a concretar en qué casos se suelen utilizar.

- Refuerzo de la cimentación
  - Ampliación de las zapatas.
  - Micropilotes.
  - Inyecciones del terreno
- Refuerzos de muros
  - a) Sillería o mampostería.
    - Cosidos inclinados.
    - Grapados.
    - Cosidos verticales (zuncho de atado).
    - Inyecciones de microlechadas (muros de dos hoja scon relleno degradado).

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

---

- Inyecciones de lechadas (muros de dos hojas sin relleno o con pérdidas importantes en el existente).
  - Reposiciones superficiales.
  - Consolidaciones y/o hidrofugaciones.
- b) Tapial y adobe
- Inyecciones de microlechadas.
  - Riego con lechada de cal.
  - Reposición de enlucidos.
- c) Ladrillo cerámico
- Cosidos inclinados.
  - Cosidos en tendel.
  - Cosidos en hiladas.
  - Inyecciones de microlechadas (muros de dos hojas con relleno degradado).
  - Inyecciones de lechada (muros de dos hojas sin relleno o con pérdidas importantes de relleno).
  - Reposiciones superficiales.
  - Hidrofugaciones.
- Forjados
    - a) Maderas
      - Colocación de conectores y losa de hormigón.
      - Reparación de vigas (sistema Beta).
      - Refuerzo inferior con fibras de carbono.
      - Refuerzo con chapas de acero.
      - Sustitución de elementos.
      - Inclusión de nuevos elementos.
    - b) Hormigón<sup>1</sup>
      - Refuerzo con fibra de carbono.
      - Refuerzo con perfilera metálica.
      - Recrecido de hormigón con conectores.
      - Proyección de mortero, en la cara inferior, con fibras.
      - Colocación de nuevos elementos.
      - Eliminación de elementos deteriorados.

<sup>1</sup> Poco normal su existencia en las construcciones patrimoniales

### c) Metálico <sup>1</sup>

- Refuerzo con perfilaría metálica soldada o atornillada.
- Recrecido de hormigón con conectores.
- Colocación de nuevos elementos.
- Eliminación de elementos deteriorados.
- Pilares
  - Zunchado metálico.
  - Zunchado con fibra de carbono.
  - Recrecido de hormigón a través de conectores
- Bóvedas y arcos
  - Atirantados.
  - Encamisados de hormigón cogidos con conectores.
- Estructuras de cubiertas
  - Reparaciones puntuales (sistema Beta ..).
  - Atirantados.
  - Sustitución de elementos.
  - Refuerzos con chapas metálicas.
  - Refuerzos con perfilaría metálica.
  - Refuerzo con fibra de carbono.
- Estructuras globales
  - Atirantados.
  - Zunchos de atado.
  - Contrarrestos.

### 3. APLICACIÓN EN LABORATORIO. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En los apartados anteriores se han descrito el estado de conservación en el que se puede encontrar un Bien de patrimonio histórico así como técnicas de muy frecuente uso en obras de Restauración. En este punto se presenta el trabajo realizado en laboratorio, analizando los resultados obtenidos. En el entregable 2.20 se explicaron con detalle los ensayos y pruebas propuestas.

A modo de recordatorio se indicará que las estructuras ensayadas han sido seis muros. Dos de ladrillo hueco, uno de ladrillo macizo, uno de tapial, uno de sillería y otro de mampostería. Los resultados de los dos primeros se analizaron en el entregable de la anualidad anterior, todos ellos engarzados con mortero de cal aérea aditivado con cemento para acelerar su fraguado, excepto el de sillería que se ejecutó con cemento blanco. Sus dimensiones son 2 x 1 x 0.5 m excepto para el muro de sillería cuyo espesor es de 0.35 m. (Figura 3.1).

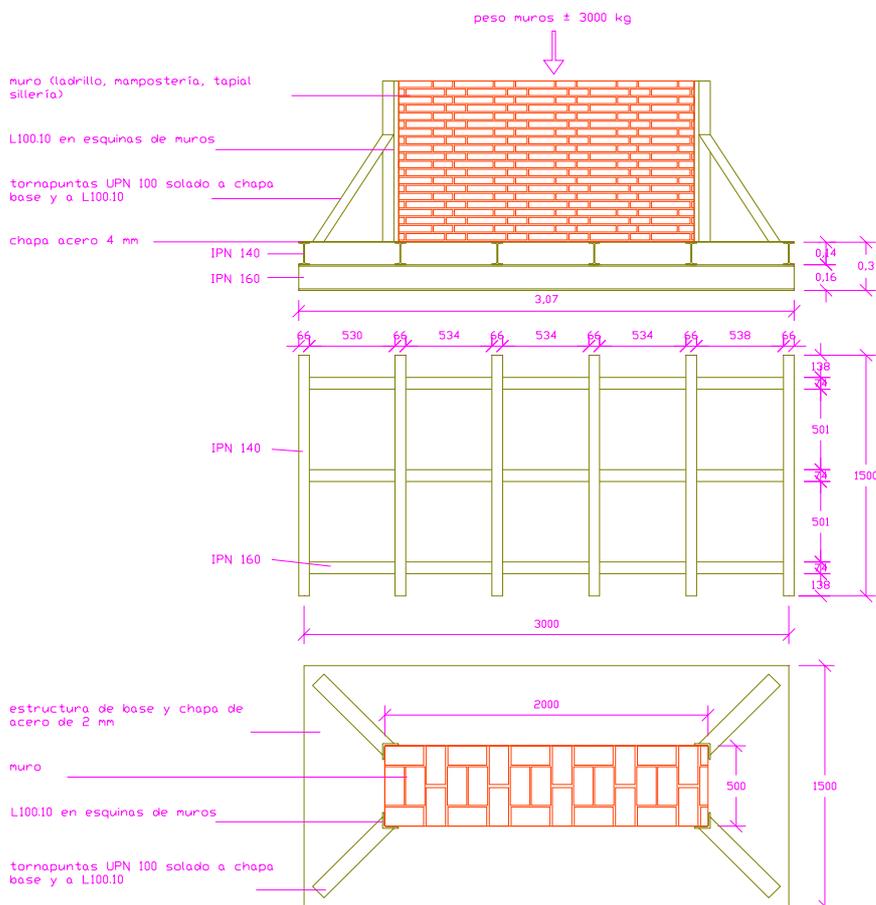


Figura 3.1. Planos de ejecución de muros.

Todos ellos se han ensayado sin confinar, aplicándoseles el 50% de su carga teórica de rotura de acuerdo a la normativa existente, en escalones de 1 Kg/cm<sup>2</sup> al comienzo y

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

---

aumentándola gradualmente siguiendo el criterio del ingeniero responsable del trabajo, hasta un máximo de  $5 \text{ Kg/cm}^2$ . Se han determinado las curvas carga-deformación.

Posteriormente, se han medido las tensiones en el muro, en su zona central, aplicando la técnica del gato plano, siguiendo el protocolo descrito en el entregable 2.20 comparando los resultados con los correspondientes de extensometría. De esta manera se ha determinado la tensión a la que se ha sometido el muro y se ha hallado la relación entre carga aplicada y absorbida por el elemento.

A continuación, se realizaron los ensayos de corte. Éstos se han acometido con útiles típicos, esto es, una sierra de disco e hilo de diamante. En cada muro se han efectuado dos cortes, uno con cada método, de manera que han quedado tres probetas iguales. Previamente, cada zona de las probetas ha sido instrumentada con sensores alámbricos e inalámbricos. Estos han sido acelerómetros, termistores, higrómetros y transductores de desplazamiento. Los muros se cargaron al 50% de su carga de rotura estimada. Así se ha estudiado el efecto de las vibraciones en estos elementos. Igualmente, quedó registrado con la cámara termográfica este proceso sincronizado con los demás sistemas de adquisición.

La siguiente operación a realizar ha sido el cosido de las partes anteriormente independizadas, por las dos caras, de forma que las varillas se crucen. Éstas serán 4 varillas roscadas de acero, inoxidable o galvanizado, y de fibra de vidrio de 12 mm de diámetro. Previamente, las juntas han sido cogidas con mortero de cal hidráulica aditivado con resina acrílica y el conjunto zunchado mediante encintado, para asegurar los cosidos e inyecciones.

Posteriormente, una vez alcanzada la resistencia debida en el producto de inyección, para comprobar la eficacia de los cosidos, el resto del muro será sometido a carga, de forma que los extremos (1/6 L) serán apoyados en toda su longitud y en la zona central (1/3 L) será suministrada una carga uniforme hasta llegar a la rotura de una de las uniones.

En la

Figura 3.2 se ha representado las operaciones apenas mencionadas.

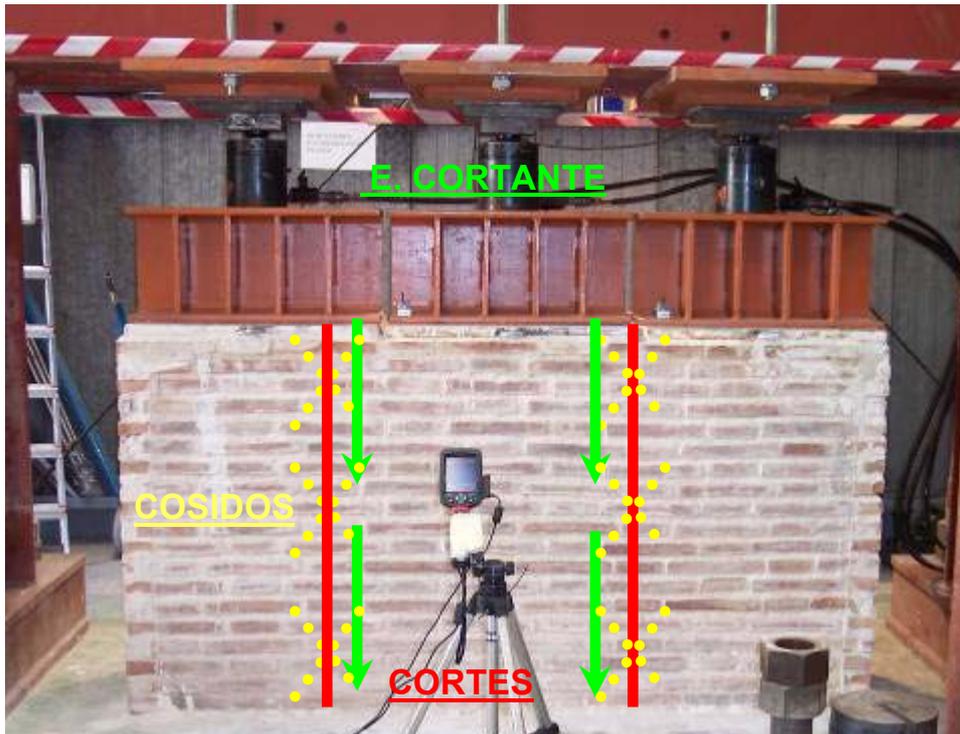


Figura 3.2. Actuación acometida en todos los muros ensayados. En rojo vienen indicados los cortes, con hilo de diamante y sierra de disco. En amarillo los cosidos con varillas roscadas de acero y de fibra de vidrio. Y finalmente, en verde, la dirección y zona de la carga a la que se someterá a los perfiles.

### 3.1. MURO LADRILLO MACIZO

En el entregable anterior ya se analizaron los resultados provenientes de todas las posibles pruebas aplicables antes de acometer el estudio sobre el corte y cosido.

#### 3.1.1. Puesta en Carga. Ensayo de Gato Plano.

Lo primero que se ha estudiado es la relación entre la carga aplicada por los gatos hidráulicos y la realmente absorbida por la estructura. Para ello, se sometió al muro a una precarga equivalente a la mitad de la carga de rotura estimada del ladrillo para, por un lado simular las condiciones reales de trabajo; por otro lado impedir posibles desplazamientos indeseados en la ejecución de otras operaciones. En la Figura 3.3 se muestra el estado final de carga.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

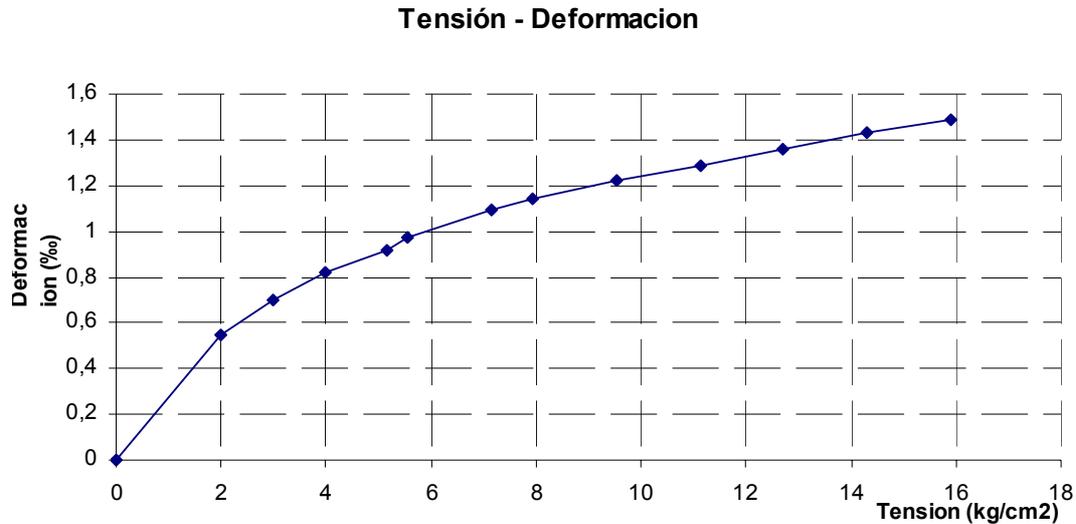


Figura 3.3. Gráfico de tensión deformación en el muro de ladrillo macizo durante el proceso de carga al 50% de la carga de rotura.

Posteriormente se realizó un ensayo de gato plano para verificar el estado tensional del muro. Como demuestra la Figura 3.4, la tensión puntual en la zona central inferior del muro era de 1.3 N/mm<sup>2</sup> frente a los 1.5 N/mm<sup>2</sup> de aplicación de carga con los pistones. Esta diferencia se debe a la absorción de carga en la zona superior del muro, la precisión de los instrumentos de lectura y al tipo de lectura, manual, que siempre puede ofrecer un nivel de incertidumbre mayor. Por tanto, de la comparación de estos gráficos se puede extraer la validez de este ensayo en estructuras de fábrica y a su vez certificar la entrada en carga del muro.

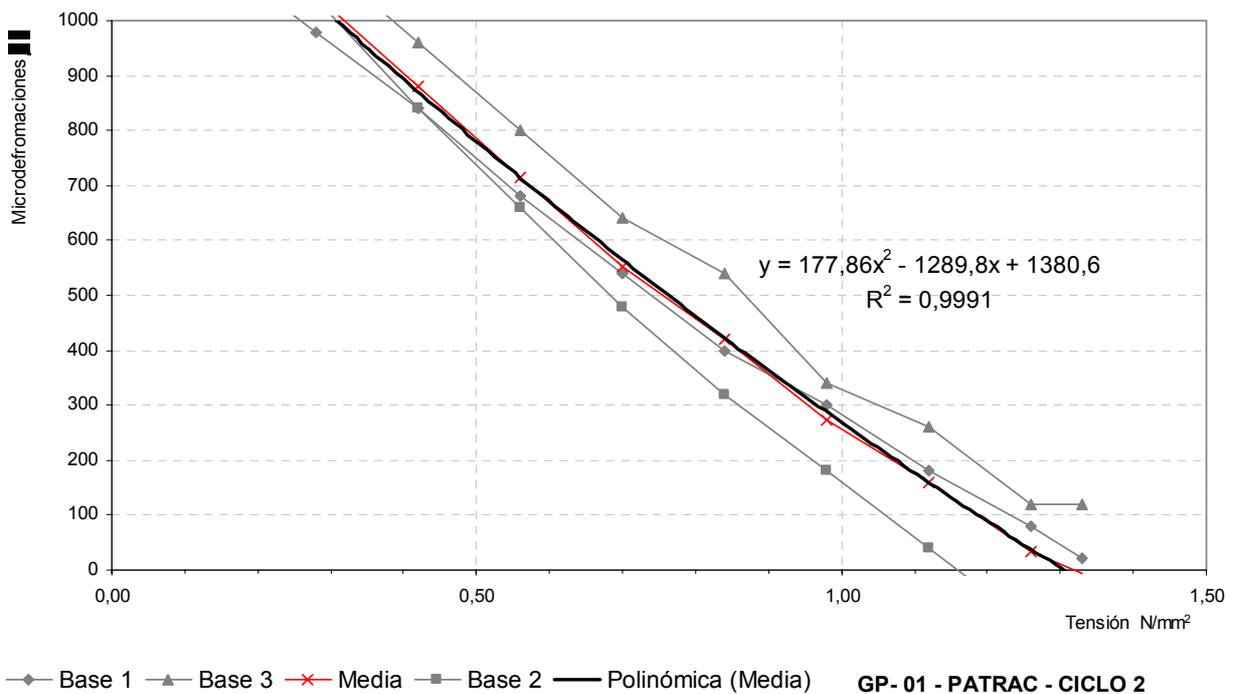


Figura 3.4. Resultado ensayo de gato plano para el muro de ladrillo macizo.

### 3.1.2. Estudio de Vibraciones con Diferentes Sistemas de Corte

Como estaba planificado, la siguiente tarea que se llevó a cabo fue el corte del muro con dos métodos diferentes: El hilo de diamante y la sierra de disco para estudiar la vibración transmitida a la estructura.

En ambos casos se realizó a un tercio de un extremo del muro (Figura 3.5) En e,a corte con hilo de diamante Antes del corte propiamente dicho, fue necesario realizar un taladro en la parte inferior de muro para poder cerrar el lazo del hilo.



Figura 3.5. A la izquierda se aprecia la ejecución del taladro pasante y a la derecha el tensado del cable en el las operaciones de montaje de un corte con hilo de diamante.

Se efectuaron medidas de vibraciones durante el taladro y corte del muro.

Sin embargo el corte con sierra de disco requirió anclar la máquina de corte al muro mediante dos varillas de acero roscado por cada uno de los lados.

Debido a las dimensiones del muro, el corte se realizó atacando el muro por ambos lados. (Figura 3.6) Obteniéndose medidas de vibraciones en todo momento.

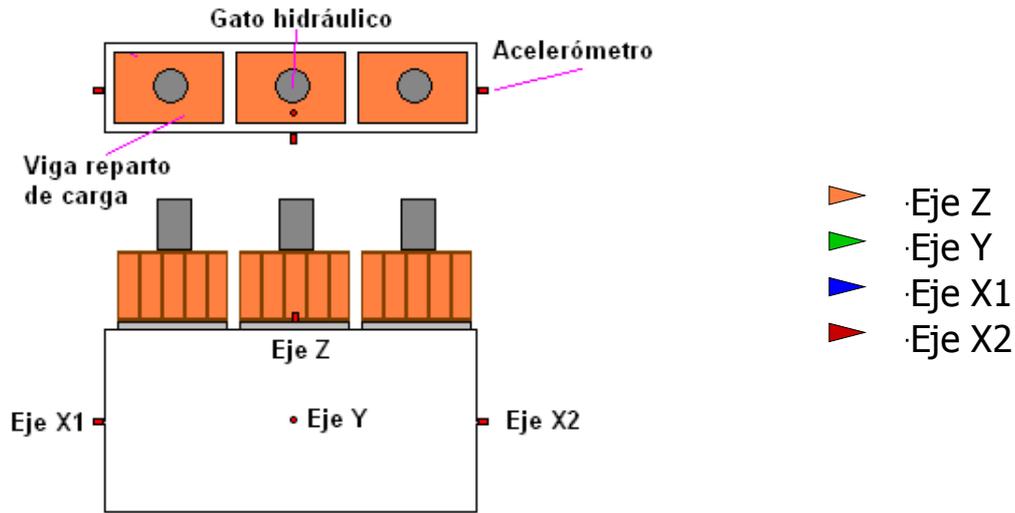


Figura 3.6. Pernos de anclaje para la máquina de corte con sierra de disco.

Para el estudio de las vibraciones se posicionaron cuatro acelerómetros unidireccionales alámbricos en las tres direcciones principales, dos de ellos en los laterales del muro ya

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

que los cortes inutilizarían recíprocamente los registros., como muestra la Figura 3.7 además en las zonas susceptibles de obtener un registro más limpio.



Visto desde el pasillo junto a la pared de la nave

Figura 3.7. Esquema de ubicación de acelerómetros, así como leyenda de los mismos.

También se registraron los valores de temperatura, humedad relativa, presión atmosférica y luminosidad no tanto por la influencia que pudieran tener esos valores sino por conocer la validez de la instrumentación inalámbrica en este tipo de actuaciones, la vida útil de las baterías aparición de ruidos ajenos a las operaciones, conectividad entre las mismas, etc.

Como se puede apreciar en la Figura 3.9 la frecuencia más excitada es la de 4 kHz en el sentido longitudinal del muro, mientras que también se aprecia la frecuencia de 2.1 kHz, esto significa que el modo de excitación es el segundo en el sentido longitudinal. Los sensores que miden las vibraciones producidas por el hilo de diamante son X2, Y y Z. Nótese que al estar intacto todavía el muro, el sensor X1 recoge medidas muy similares al sensor X2 durante el taladrado inicial y las primeras fases del corte. Al final de la adquisición, el sensor X1 es menos sensible al proceso de corte.

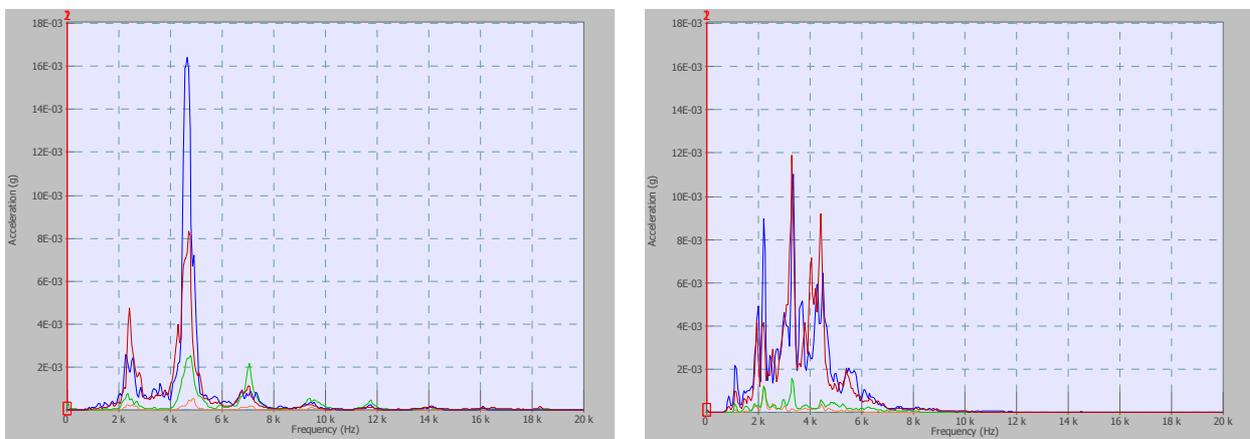


Figura 3.8. Espectros de frecuencia obtenidos del corte con hilo de diamante durante el taladro inicial.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

El segundo espectro se corresponde con arranques del motor de la taladradora apoyando la broca con la superficie del muro. Por lo tanto, es obvio que los valores máximos de las frecuencias de los espectros varíen ligeramente, e incluso que la presencia de ruido impida ver los picos tan claramente como en el primer gráfico. Además, se puede apreciar en ambos gráficos que apenas se percibe respuesta en las direcciones y y z y sin embargo, en la dirección x se detectan los tres primeros modos de vibración inducidos por la rotación del taladro. Este hecho es debido a dos motivos: Uno, al poco esfuerzo que requiere realizar el taladro mientras que la máquina gira a una velocidad significativa, a la vez que se produce el arrastre de material hacia el exterior, por lo tanto perdiendo masa; y segundo porque la operación la ejecuta un operario y su movimiento poco estable desemboca en este tipo de respuesta. De hecho, esta situación se repite cuando se realiza el corte con el equipo de hilo de diamante, pero como cabía esperar, a diferente frecuencia de vibración. Es más, también se puede apreciar el decremento en la frecuencia entre el inicio y el fin de esta operación como consecuencia de la disminución de masa a movilizar. (Figura 3.9). En apartados posteriores se analizará si se produce el mismo tipo de respuesta en los demás muros.

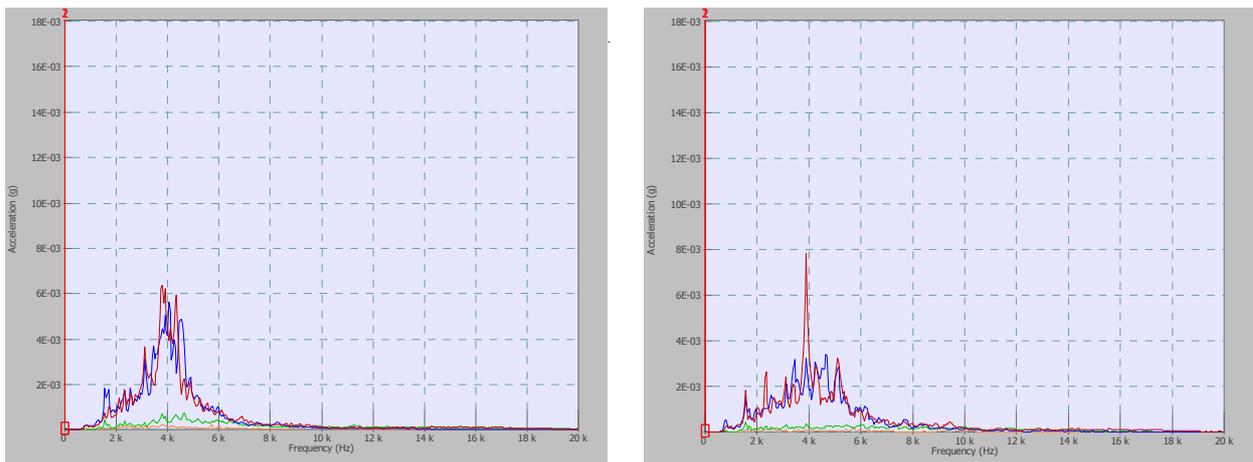


Figura 3.9. Espectros de frecuencia obtenidos del corte con hilo de diamante Inicio y final del proceso de corte con hilo de diamante.

En cuanto al corte con la sierra de disco conviene decir que los sensores que miden las vibraciones producidas por la sierra radial son X1, Y y Z. Obviamente, las lecturas registradas por x2 carecen de sentido físico. Nótese, también que el muro no ha sido excitado en las direcciones vertical y perpendicular al eje en ninguno de los casos.

En las siguientes figuras (Figura 3.10 y .Figura 3.11) se muestran gráficos de los espectros de frecuencia relativos a instantes aleatorios del proceso de corte con sierra radial en la cara trasera del muro y delantera.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

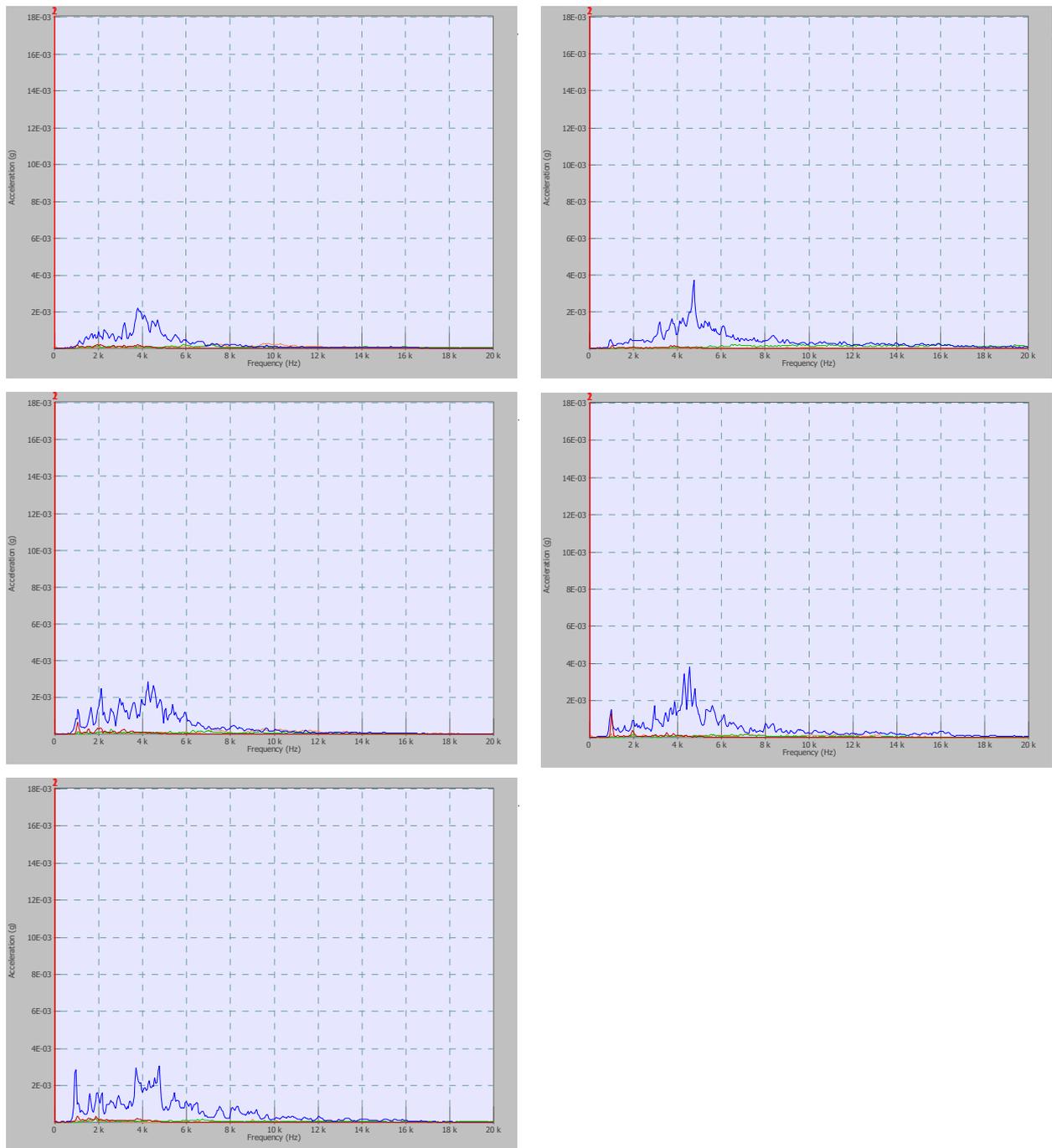


Figura 3.10. Espectros de frecuencia obtenidos en instantes aleatorios del proceso de corte con sierra radial en la cara trasera del muro.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

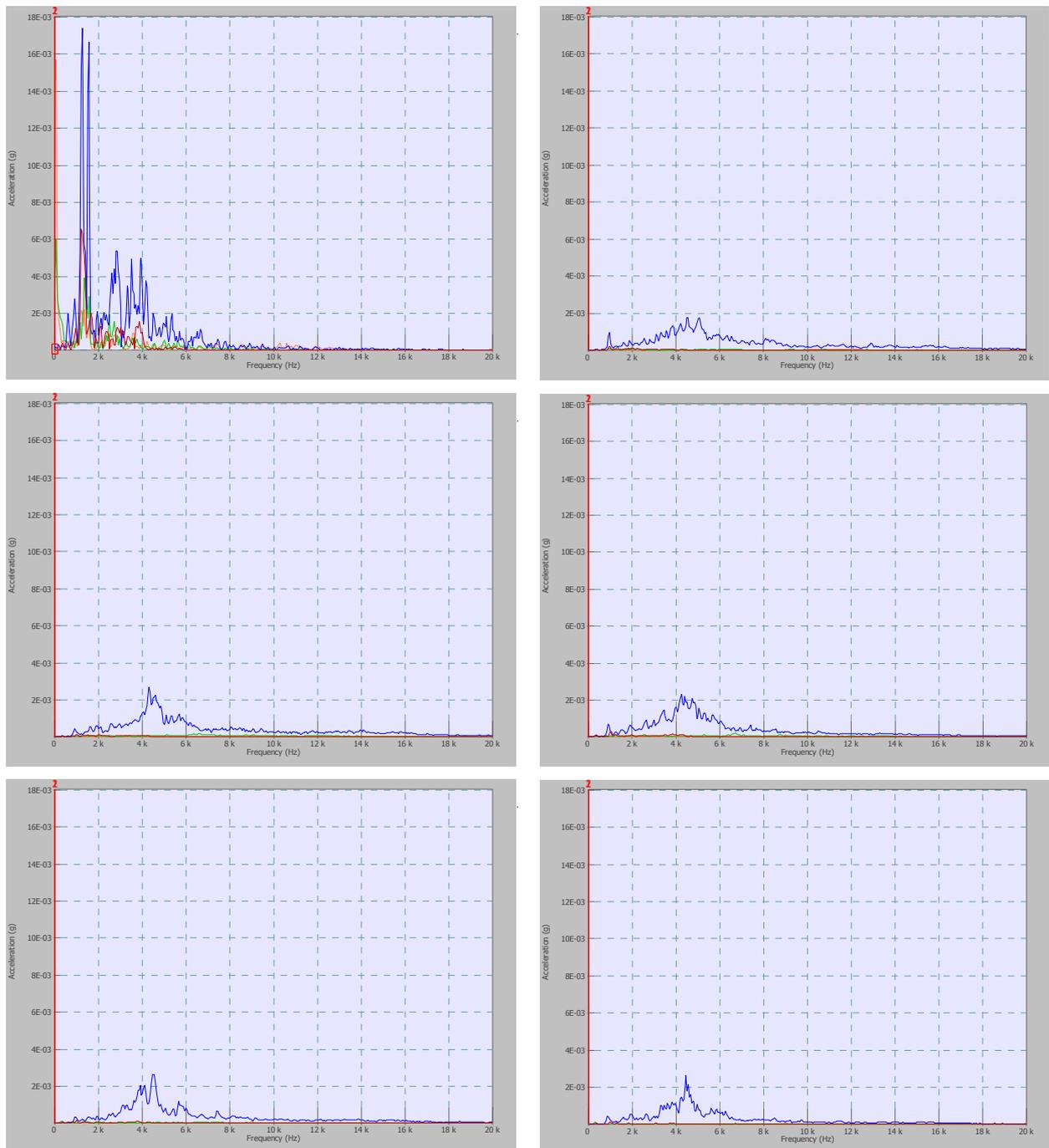


Figura 3.11. Espectros de frecuencia obtenidos en instantes aleatorios del proceso de corte con sierra radial en la cara delantera del muro.

Del estudio de los gráficos puede observarse que las vibraciones más importantes se producen en los momentos de toma (o cese) de contacto entre las máquinas herramientas y el muro.

Además, el corte con sierra radial produce valores de aceleración de 2 a 4mG, inferiores a los obtenidos con el hilo de diamante, 6 a 8mG, por lo que, según se desprende la

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

norma DIN 4150-3 “Structural Vibration. Effects Of Vibration On Structures”, (Tabla 3.1 y Tabla 3.2), las estructuras no se dañarían con ninguno de los dos métodos de corte.

Line	Type of structure	Guideline values for velocity, $v_i$ , in mm/s			
		Vibration at the foundation at a frequency of			Vibration at horizontal plane of highest floor at all frequencies
		1Hz to 10Hz	10Hz to 50Hz	40Hz to 100Hz*)	
1	Buildings used for commercial purposes, industrial buildings, and buildings of similar design	20	20 to 40	40 to 50	40
2	Dwellings and buildings of similar design and/or occupancy	5	5 to 15	15 to 20	15
3	Structures that, because of their particular sensitivity of vibration, cannot be classified under lines 1 and 2 and are of great intrinsic value (e.g. listed buildings under preservation order)	3	3 to 8	8 to 10	8

\*) At frequencies above 100Hz, the values given in this column may be used as minimum values.

Tabla 3.1. **Guideline values for vibration velocity to be used when evaluating the effects of short term vibration on structures.**

Line	Type of structure	Guideline values for velocity, $v_i$ , in mm/s of vibration in horizontal plane of highest floor, at all frequencies
1	Buildings used for commercial purposes, industrial buildings, and buildings of similar design	10
2	Dwellings and buildings of similar design and/or occupancy	5
3	Structures that, because of their particular sensitivity of vibration, cannot be classified under lines 1 and 2 and are of great intrinsic value (e.g. listed buildings under preservation order)	2,5

\*) At frequencies above 100Hz, the values given in this column may be used as minimum values.

Tabla 3.2 **Guideline values for vibration velocity to be used when evaluating the effects of long term vibration on structures**

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

---

Asimismo durante todo el proceso de corte se han tomado imágenes con cámara infrarroja para detectar posibles cambios, bruscos o no, de temperatura en la superficie de la probeta que pudiesen afectar a las propiedades de los materiales. En este sentido, básicamente, lo que ha detectado la cámara infrarroja es la temperatura del agua usada como refrigeración de la herramienta de corte.

Los importantes cambios de color que presentan las imágenes entre sí se deben a que la cámara estaba programada para el ajuste automático de la escala de medida, lo que produce una variación de la escala de colores casi continua.

Para facilitar la interpretación, cada imagen térmica está acompañada de su correspondiente imagen en el espectro visible. Al tratarse de cámaras diferentes, el ángulo de visión no es el mismo.

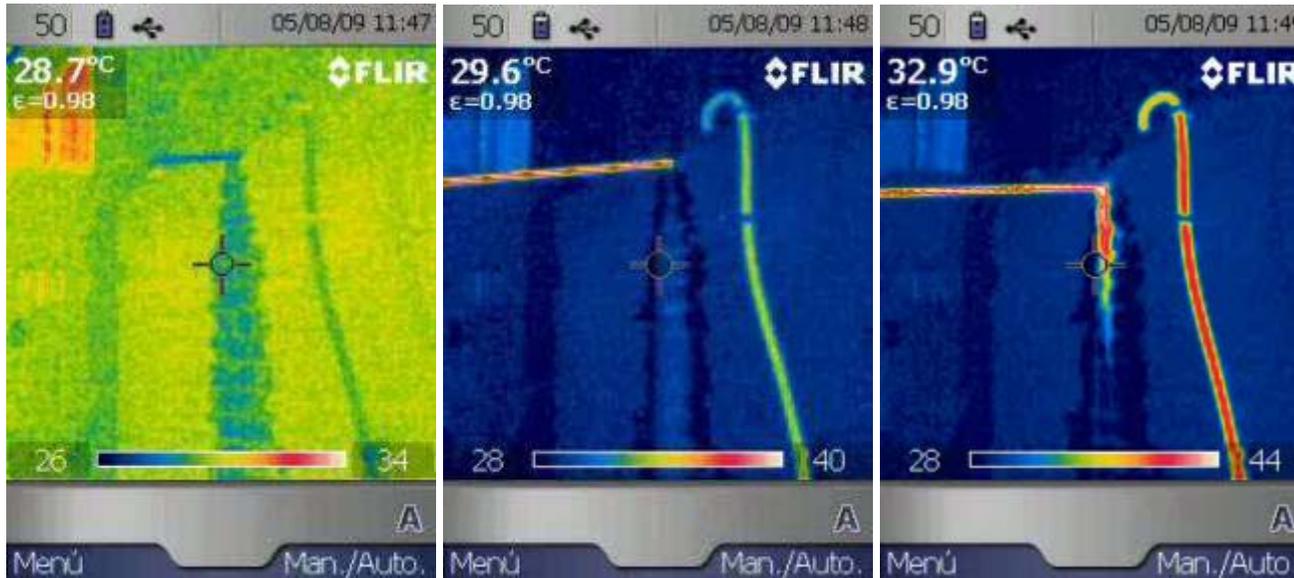
Respecto al corte con hilo de diamante únicamente puede obtenerse alguna información de la temperatura alcanzada durante el corte de la pared estudiando la sexta imagen infrarroja. La proyección de agua por la parte inferior del lazo del hilo de diamante muestra valores cercanos al máximo de la escala de temperatura (48°C).

Sin embargo en el caso de corte con sierra de disco la refrigeración de la sierra se realiza mediante un chorro de agua sobre una de las caras del disco; de esta manera, solo queda empapada la superficie del muro por uno de los lados del corte.

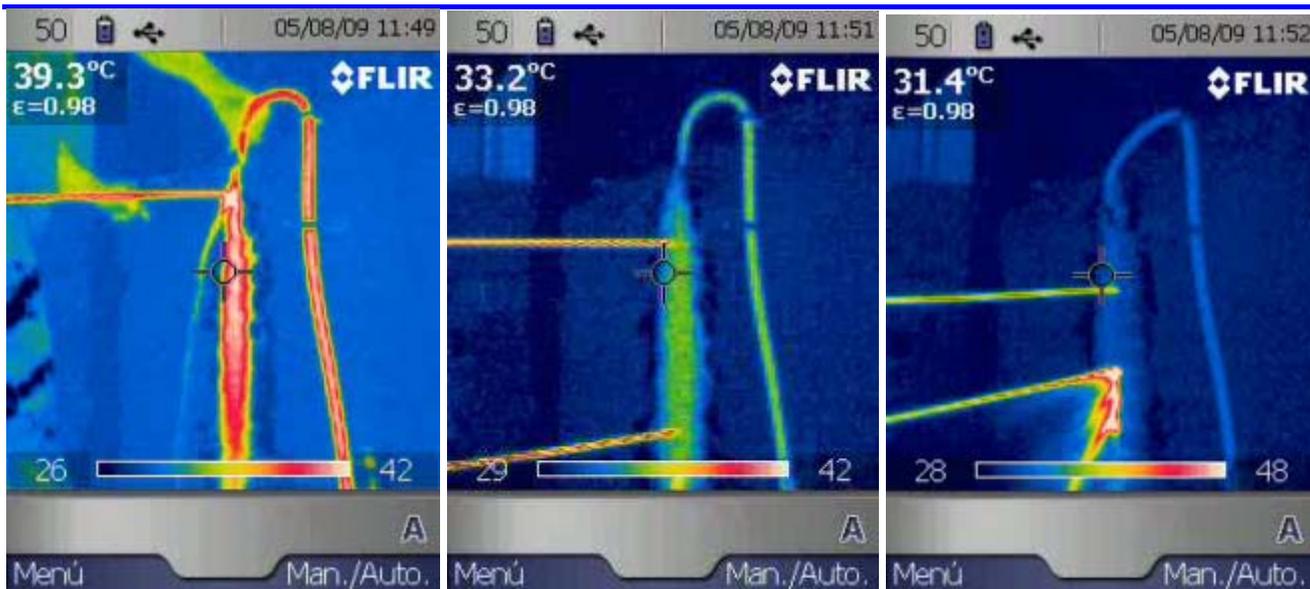
La salida de agua queda en el lateral opuesto a la posición de la cámara térmica; puede apreciarse en las imágenes térmicas que el lado seco presenta una uniformidad de tonos con el resto de la pared, mientras que el lado mojado tiene variación de color según la temperatura del agua (imagen 4 infrarroja del corte en la cara delantera).

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

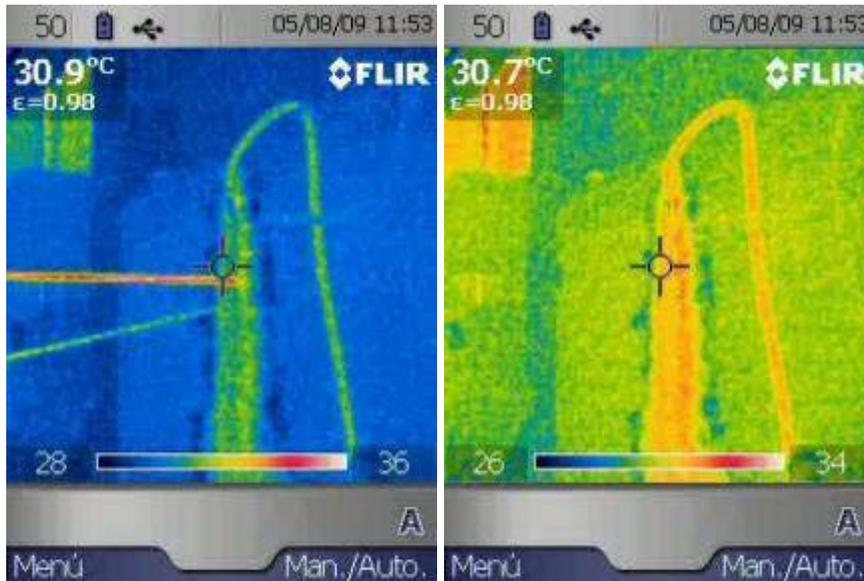
Corte con hilo diamante.



## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

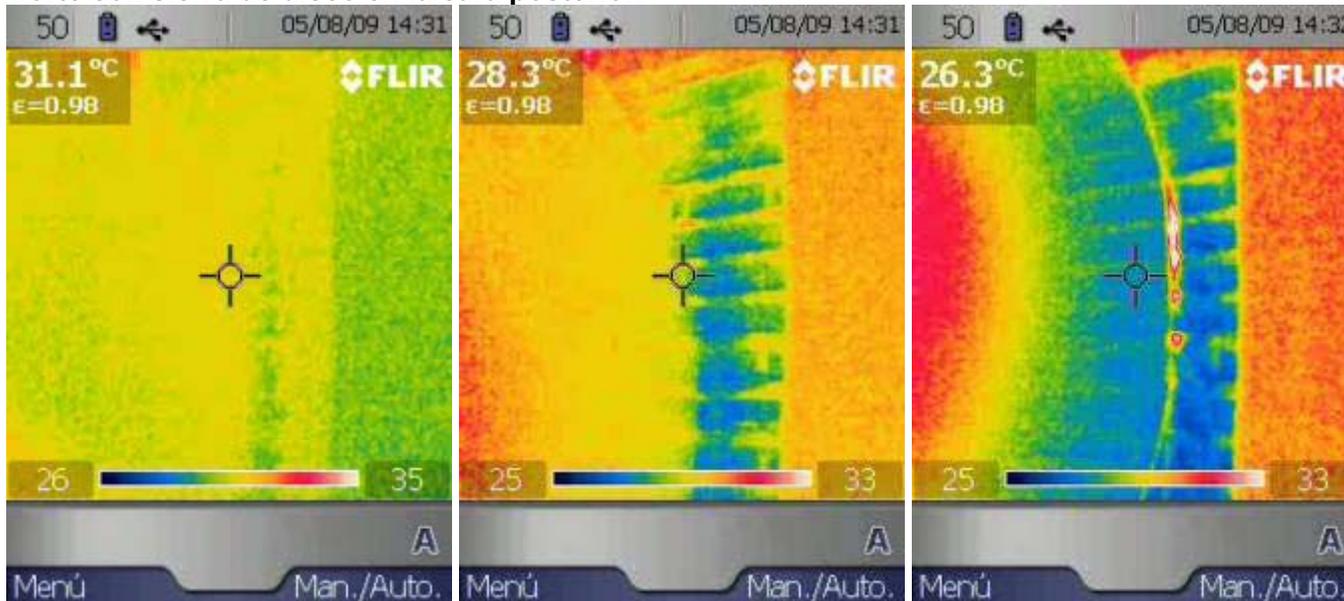


## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

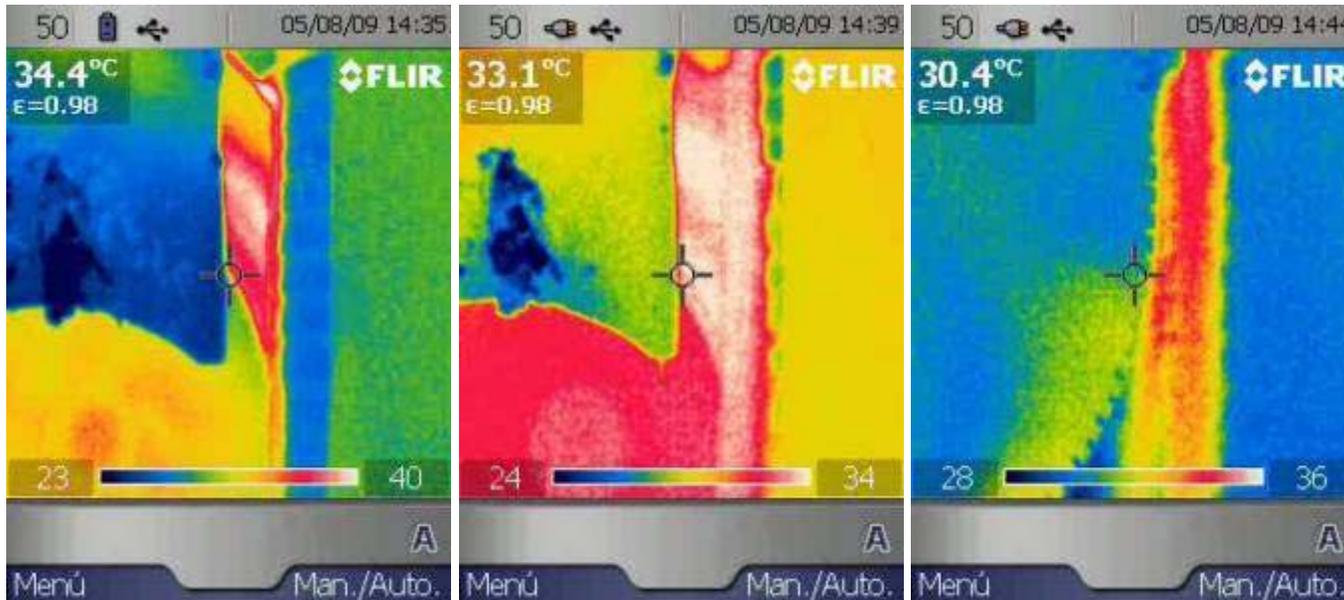


## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

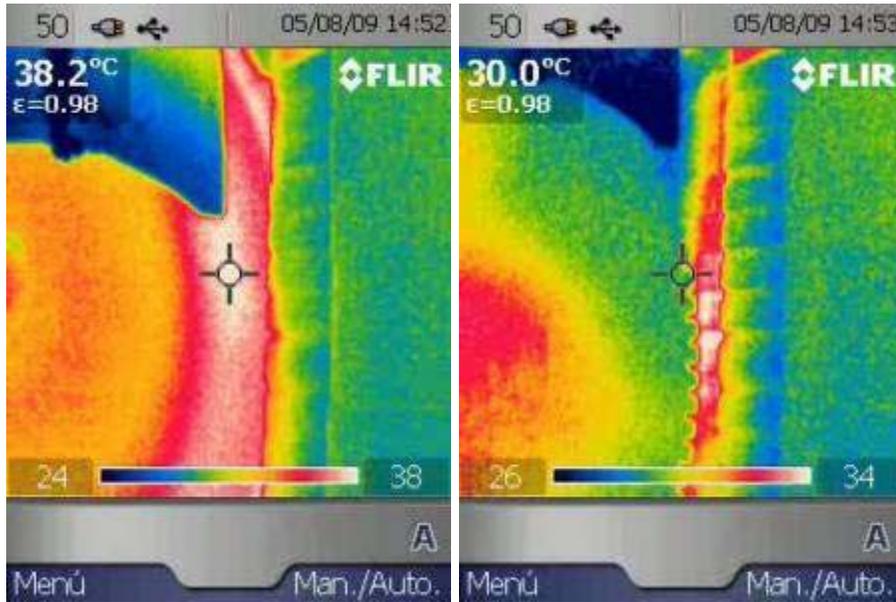
Corte con sierra de disco en la cara posterior.



## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

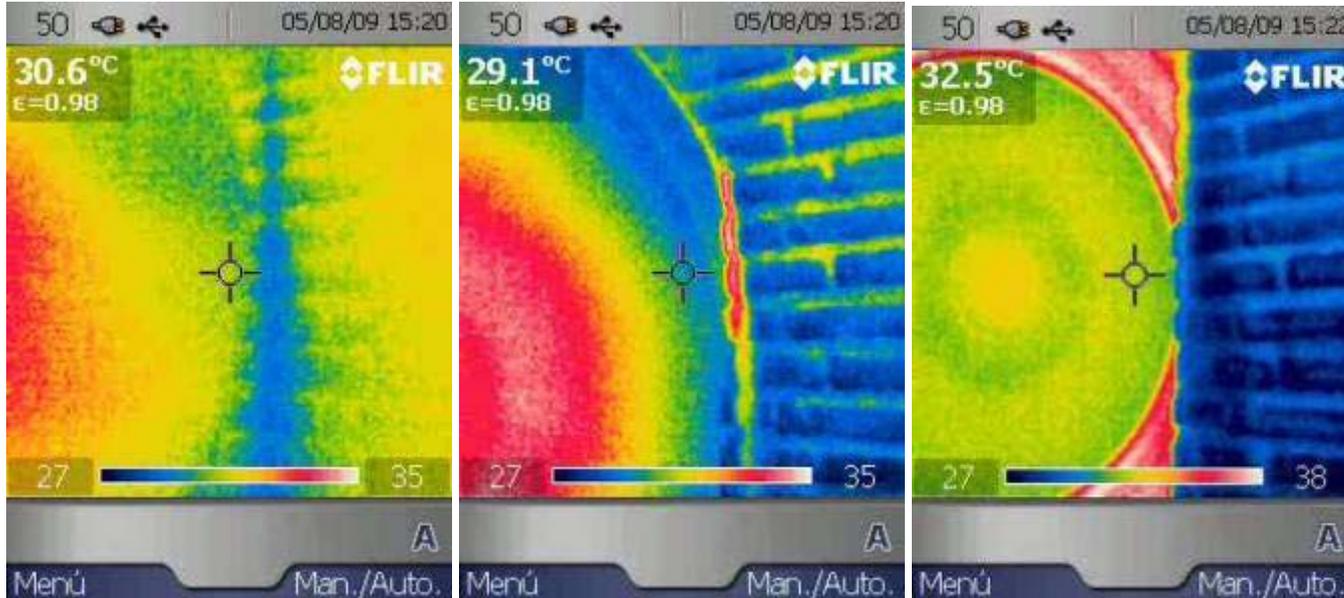


## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

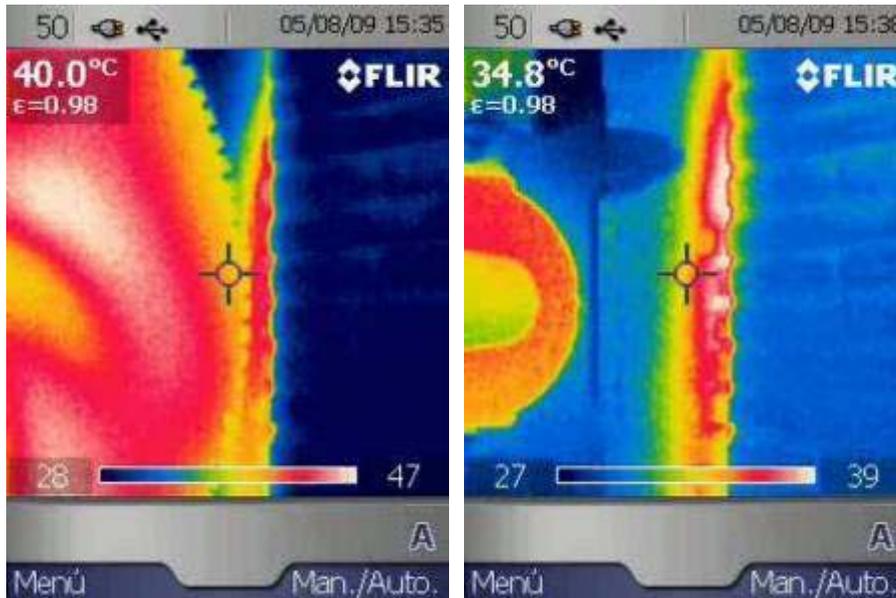


## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

Corte con sierra de disco en la cara anterior.



## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación



### 3.1.3. Ensayo de los Cosidos

El siguiente objetivo cumplido ha sido el estudio del efecto del cosido en estructuras de este tipo. Para ello, se ha debido dar continuidad a las partes cortadas, este proceso se ha realizado inyectando un mortero de cal hidráulica igual al de ejecución del muro. Para conocer el momento en el que se podría acometer el cosido, se han realizando ensayos de compresión y flexotracción a los dos y veinte días, estos valores han sido 0.3 y 0.56 MPa cantidades extremadamente bajas para este tipo de material, pero suficientes para la continuación de la tarea. Una vez alcanzada una madurez suficiente, se ha realizado el cosido. Estos han sido ejecutados con dos materiales diferentes el acero galvanizado y la fibra de vidrio, los materiales más utilizados en obras de restauración. Las varillas en ambos casos han tenido un diámetro de 12 mm y las longitudes han sido de 35 cm. En el corte de hilo de diamante se han utilizado seis varillas de acero galvanizado y en el corte con la sierra de disco se han utilizado seis varillas de fibra de vidrio. Se han introducido a tresbolillo, tres varillas por cara diagonalmente opuestas como muestra la Figura 3.12. Distanciadas entre ellas unos 33 cm aproximadamente, introduciendo primero una lechada aditivada con algo de resina epoxi y después roscando las varillas hasta conseguir que la lechada rebose la perforación. Del mismo modo que en el mortero, se han realizado ensayos de compresión y flexotracción de la lechada para determinar la ocasión de abrir el hueco en la base del muro, sus resistencias fueron 2.19 y 1.13 MPa, respectivamente.



Figura 3.12. A la izquierda se muestra el esquema de ejecución del cosido, el plano verde representa el corte y las flechas rojas las varillas de cosido. A la derecha un momento de la ejecución del mismo.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación



Figura 3.13. Preparación de ensayo a cortante..

Una vez preparada la probeta se estudiaron varios aspectos, por un lado el estudio de los cosidos como tal por medio de las bases de extensometría y la termografía; y por otro la verificación de la instrumentación inalámbrica. Para ello se va ha aplicado carga en el tercio central en escalones que se indican en la Tabla 3.3.

Comenzando por este último se indicará que para monitorizar el proceso se han colocado dos sensores inalámbricos

En la realización de los ensayos se han utilizado los siguientes equipos:

- Transductor inductivo de desplazamiento (L.V.D.T.) de SOLARTRON-SCHLUMBERGER, mod. ST-1000, de núcleo libre, con rango de medida  $\pm 2.5$  cm y resolución 0.01 mm.
- Ordenador de sobremesa Dell Optiplex GX270 con S.O. Windows XP.
- Estación base de recepción de sensores inalámbricos tipo Mota (Crossbow).
- Módulo inalámbrico tipo Mota (Crossbow) con electrónica de adaptación para medida de sensor LVDT.
- Módulo inalámbrico tipo Mota (Crossbow) para medida de parámetros ambientales.
- Software de monitorización de sensores inalámbricos desarrollado en GEOCISA



Figura 3.14. Equipos utilizados en la instrumentación inalámbrica.

El transductor de desplazamiento (L.V.D.T.) se situó sobre el segmento central del muro a ensayar, de forma que fuera capaz de medir el desplazamiento del muro provocado por la presión. Para su instalación se dispuso en una pieza mecanizada que permitía su amarre por un extremo a una pesa que descansaba sobre la plancha metálica que transmite la fuerza del pistón al muro y por el otro a un cable acerado sujeto a un tirante en la parte superior de la estructura de la instalación.

El acondicionador de señal de la LVDT. se conectó al módulo inalámbrico que se situó sobre una de las vigas de reparto de carga de la estructura.

El módulo inalámbrico de parámetros ambientales se situó igualmente sobre una de las vigas de la estructura. Ambos módulos quedan posicionados fuera de la zona de influencia de los pistones del gato hidráulico y de la zona del muro que sufre el desplazamiento

La estación base se conectó al ordenador de adquisición. Éste se encontraba a unos seis metros de la zona de ensayo y los dos módulos inalámbricos quedaron en la visual de la misma. La aplicación de monitorización de las motas inalámbricas Se inició comprobándose que se recibían datos correctamente de los dos módulos.

El ordenador de adquisición se encontraba conectado a la red interna de GEOCISA, pudiéndose visualizar la evolución del ensayo a través de otros equipos de la red.

Con un gato hidráulico se aplicaron diferentes niveles de carga (Tabla 3.3), hasta la rotura de los elementos de cosido. Durante todo el proceso los sensores enviaron a la aplicación de monitorización los datos medidos por los transductores. Estos módulos enviaron una medida cada segundo.

El registro de datos obtenido comprende las medidas siguientes

- Desplazamiento del segmento central del muro (mm)
- Condiciones ambientales del recinto del ensayo
  - Temperatura ambiente (°C)
  - Humedad relativa (%)

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

- Presión atmosférica (bar)
- Luminosidad (lux)

Se presenta a continuación la gráfica de evolución del desplazamiento (

Figura 3.15) frente al tiempo. En ella se aprecia claramente el comportamiento de la estructura en respuesta a los escalones de carga.

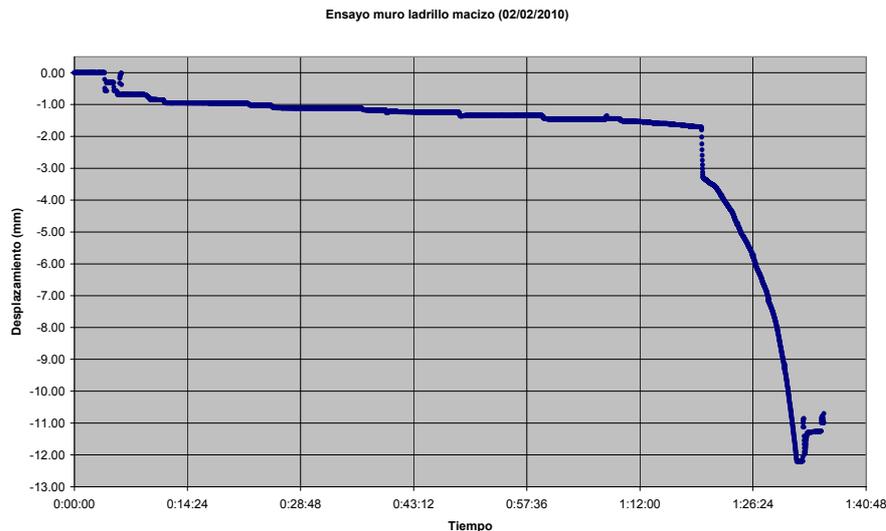


Figura 3.15. Desplazamiento del bloque central del muro medido con los sensores inalámbricos.

La tabla siguiente indica los escalones de carga y el desplazamiento relativo a la posición inicial.

Carga muro (t)	Presión gato (kg/cm <sup>2</sup> )	Desplazamiento (mm)	Temperatura °C
0.000	0	0	18.7
5.296	40	-0.312	18.6
7.944	60	-0.581	18.6
10.592	80	-0.863	18.4
13.240	100	-0.955	18.3
15.088	120	-1.024	18.2
18.536	140	-1.109	18.1
21.184	160	-1.176	17.9
26.480	200	-1.234	17.8
31.776	240	-1.347	17.7
37.072	280	-1.472	17.6
42.368	320	-1.525	17.9
42.368	320	-12.196	18.2

Tabla 3.3. Datos obtenidos con la instrumentación inalámbrica.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

---

El registro ha permitido comprobar que los tiempos utilizados entre escalones de carga han sido suficientes para lograr la estabilización del desplazamiento del segmento central del muro y como a partir de la aplicación de los 320 bares de presión el desplazamiento se ha hecho de manera continua.

Al inicio del ensayo se han observado grandes variaciones del valor de desplazamiento medido. Estas medidas iniciales han estado afectadas por la respuesta de la mecánica asociada al transductor L.V.D.T., su posicionado o respondido a variaciones reales de la estructura causadas por la aplicación inicial de carga.

Por ello ha sido necesario observar con cierta precaución la interpretación de los datos de desplazamiento absoluto registrados.

Por este motivo se puede decir que la automatización de las medidas y la alta velocidad de la adquisición de datos permiten obtener una información muy detallada del comportamiento de la estructura. Además, la transmisión inalámbrica permite que el técnico haga un seguimiento del ensayo a una cierta distancia de la estructura, con la consiguiente disminución de los riesgos a los que se ve expuesto. También hace posible un seguimiento remoto por parte de terceras personas si el ordenador de adquisición se encuentra conectado a una red.

En relación al estudio termográfico se debe indicar que las cámaras se situaron a 2m del muro, en perpendicular y centradas; esta posición es la misma que se utilizó en el ensayo del segundo muro de ladrillos huecos. En esta situación se ve el hueco resultante del ensayo de sustitución de cargas y los extremos exteriores de las varillas de cosido. En la cámara se programó un coeficiente de emisividad de 0.98 y se tomaron fotos térmicas en cada escalón de carga. Durante todo el ensayo se realizó una grabación continua de la imagen de la cámara térmica y de la cámara de video ordinaria.

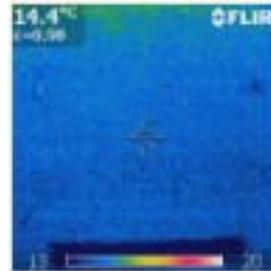
Para evitar variaciones en la escala de color que pudieran confundir durante el ensayo, se canceló la opción de ajuste automático del rango de medida, quedando la escala entre los valores de 13 a 20°C.

A continuación se muestran todas las fotos tomadas durante esta prueba. Todas ellas están en el rango de medida de 13 á 20 °C excepto la primera, en la que se aprecia la influencia del sistema calefactor de la nave de ensayo; una vez desconectado, se esperó hasta que el muro alcanzó el equilibrio térmico para comenzar el ensayo.

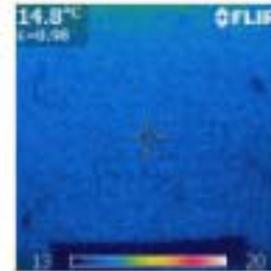
## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación



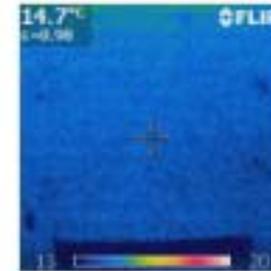
IR\_0248.jpg



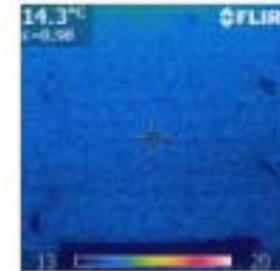
IR\_0249.jpg



IR\_0250.jpg



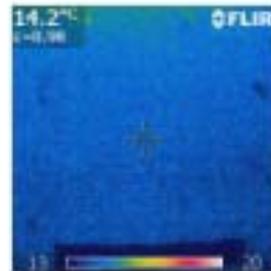
IR\_0251.jpg



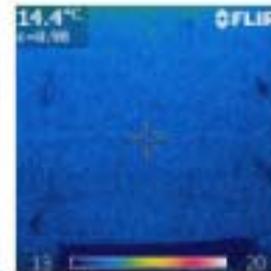
IR\_0252.jpg



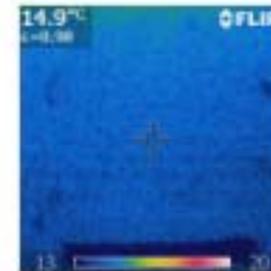
IR\_0253.jpg



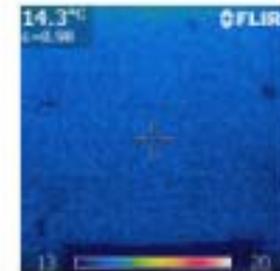
IR\_0254.jpg



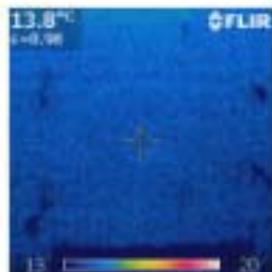
IR\_0255.jpg



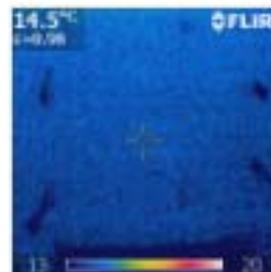
IR\_0256.jpg



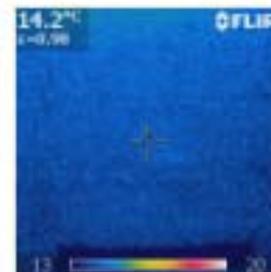
IR\_0257.jpg



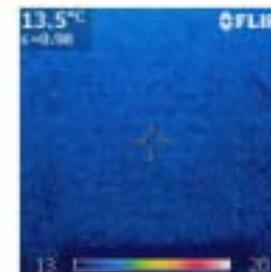
IR\_0258.jpg



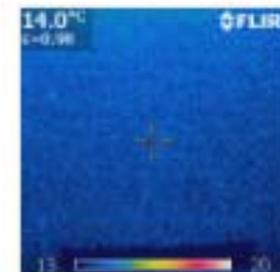
IR\_0259.jpg



IR\_0260.jpg



IR\_0261.jpg



IR\_0262.jpg

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

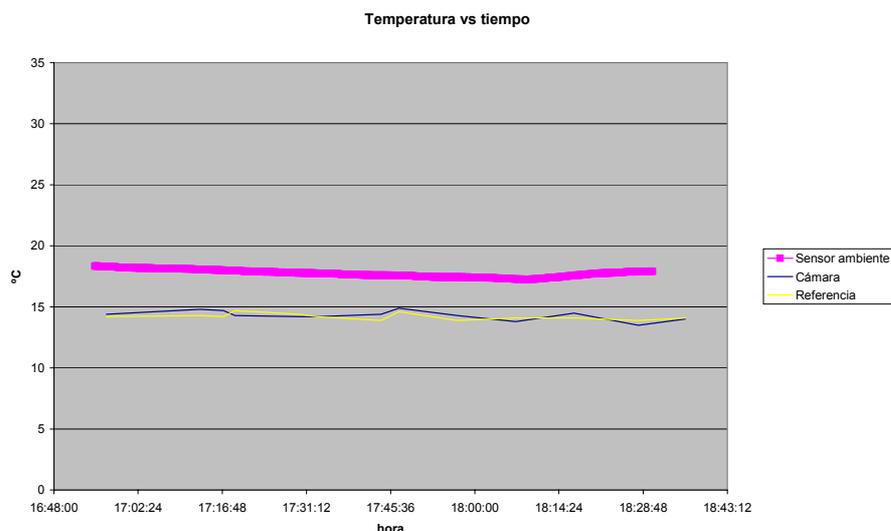


Figura 3.16. Correlación de medida de temperaturas entre la medida por el sensor inalámbrico, la cámara termográfica y un sensor de referencia.

El aumento de temperatura detectado por el sensor de ambiente a las 18:09 se debe al cierre total de la puerta de la nave y al encendido de los focos de iluminación.

Para determinar si se han producido cambios en la temperatura del muro al aplicar las cargas, se ha obtenido de la grabación de video un valor de referencia; este valor se corresponde con la temperatura instantánea que se registra en el momento que el reloj cambia de un minuto al siguiente.

Presión gato (kg/cm <sup>2</sup> )	Salto Presión (kg/cm <sup>2</sup> )	Número imagen	Hora	Temperatura (°C)	Temperatura referencia (°C)	Salto Temperatura (°C)
40	40,0	250	17:17	14,7	14,2	-0,5
60	20,0	251	17:19	14,3	14,7	0,4
80	20,0	252	17:30	14,2	14,4	0,2
100	20,0	253	17:33	14,2	14,2	0,0
120	20,0	254	17:44	14,4	13,9	-0,5
140	20,0	255	17:47	14,9	14,6	-0,3
160	20,0	256	17:57	14,3	13,9	-0,4
200	40,0	257	18:07	13,8	14,1	0,3
240	40,0	258	18:17	14,5	14,1	-0,4
280	40,0	259	18:28	13,5	13,9	0,4
320	40,0	260	18:36	14	14,1	0,1

Tabla 3.4. Datos termográficos e hidráulicos.

Representando los saltos de temperatura frente a la presión y al diferencial de presión se observa que no existe correlación entre las variables, es decir, todos los saltos de temperatura se pueden producir a cualquier carga o salto de carga.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

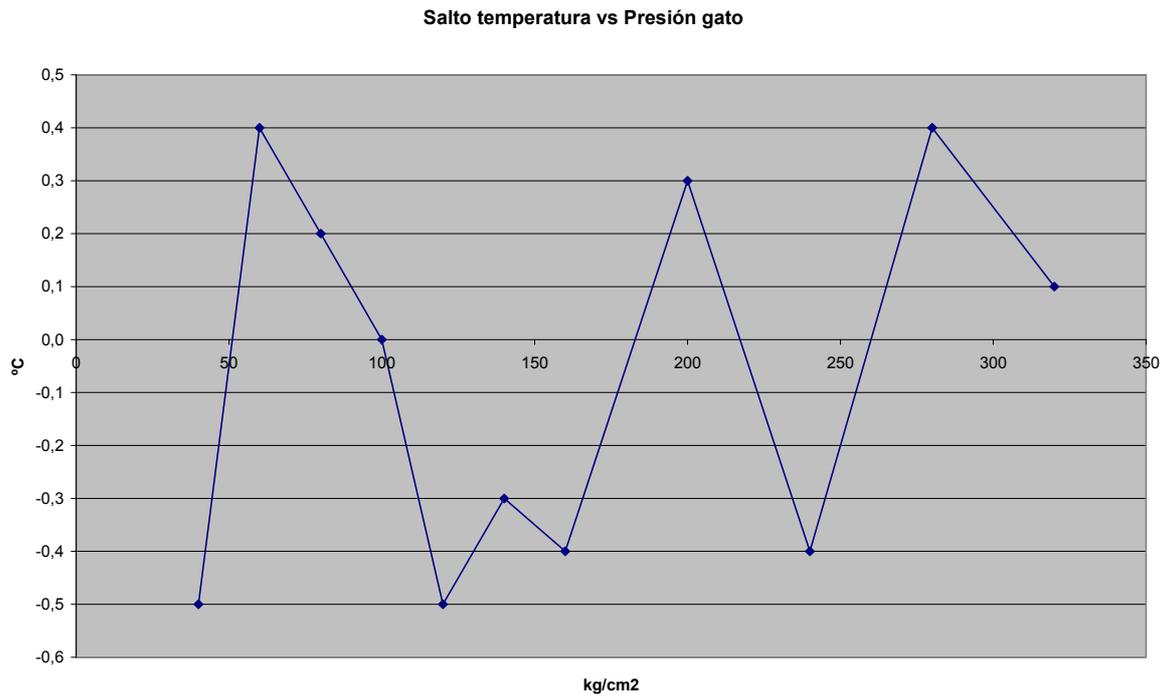


Figura 3.17. Correlación de medida de temperaturas y presión en el gato hidráulico.

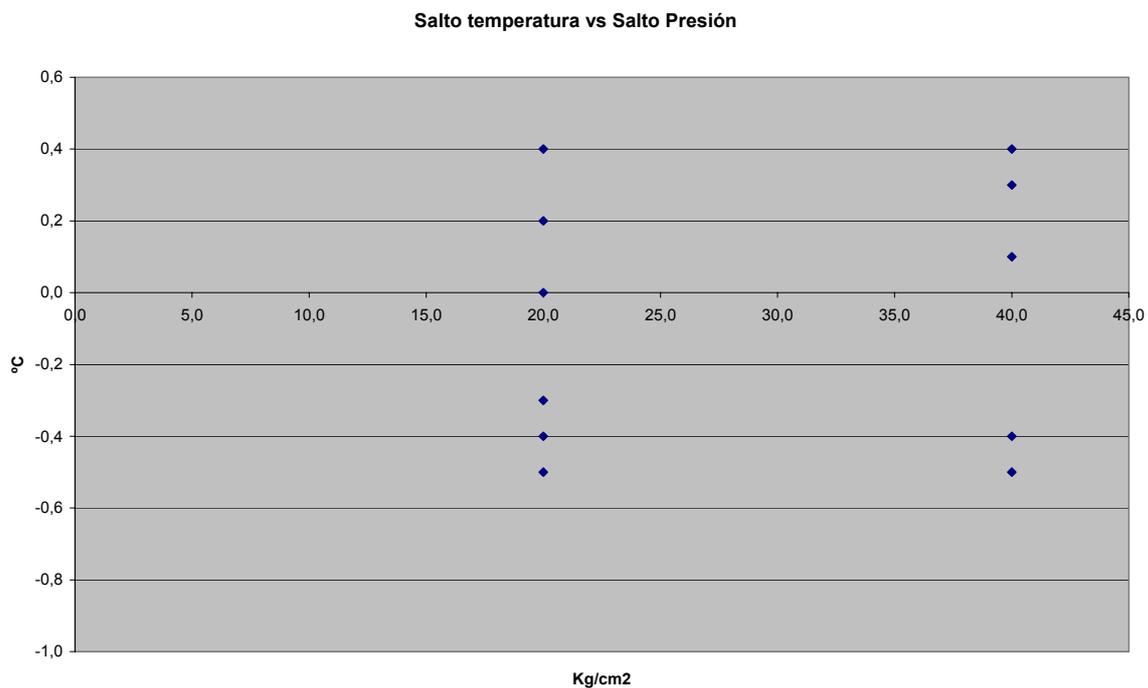


Figura 3.18. Correlación de medida entre los saltos de temperatura y los saltos de presión.

Durante el proceso de prueba de los cosidos no se han detectado cambios en la temperatura que puedan achacarse al aumento de la carga.

Las causas posibles de este resultado son:

- La variación propia del instrumento: Lecturas consecutivas del mismo punto pueden diferir en 0,6°C.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

- Aunque se han producido saltos de presión considerables, la velocidad de aplicación de las cargas era demasiado lenta como para que el incremento de temperatura de un escalón individual sea detectable.
- La elevada masa del muro.
- El tiempo empleado entre escalones consecutivos es demasiado grande, ya que se esperaba hasta que la lectura de deformación del muro fuese estable, por lo que se disipa el calor producido por el escalón e impide un efecto acumulativo sobre la temperatura del muro.

En cuanto a las bases de extensometría han medido las deformaciones producidas por el mortero que es el material más deformable, y por tanto, el limitante a la hora de resistir una carga.

Las bases se colocaron en la zona central del muro con la numeración y posición que se indica en el siguiente esquema (Figura 3.19 y Figura 3.20).

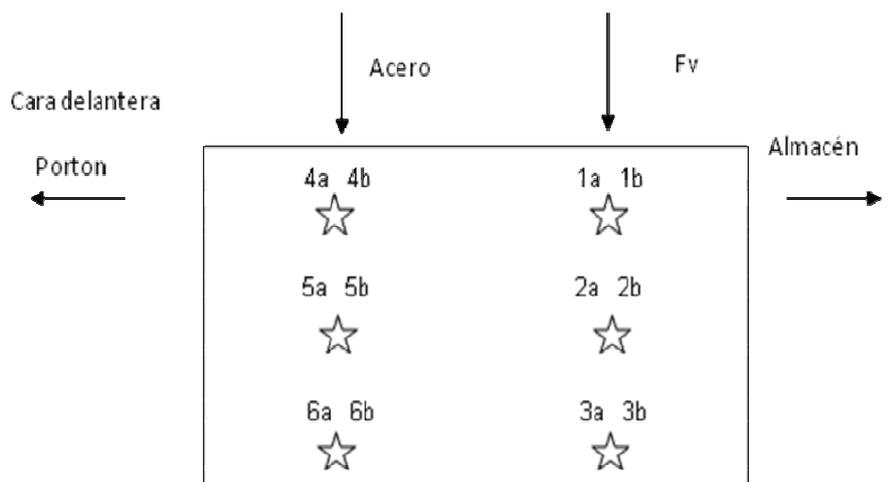


Figura 3.19. Esquema de colocación y fotografía de las bases de extensometría en la cara delantera del muro.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

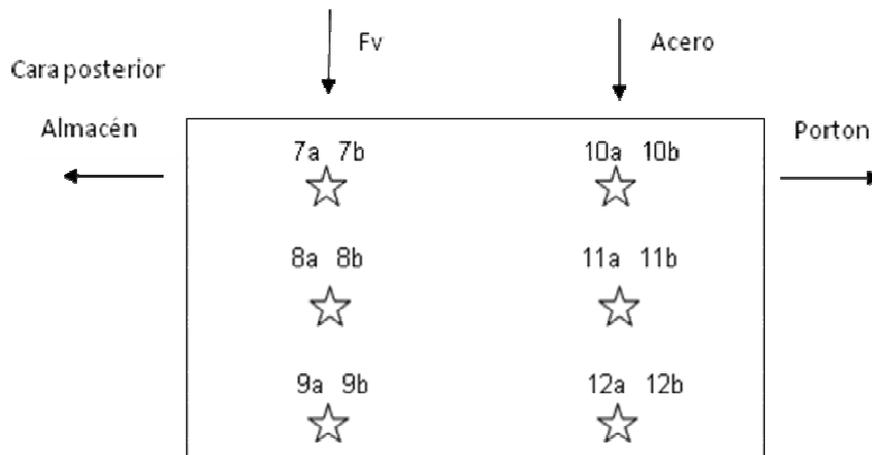


Figura 3.20. Esquema de colocación y fotografía de las bases de extensometría en la cara trasera del muro.

Como ya se ha comentado en apartados anteriores también se utilizó un reloj comparador que indica el desplazamiento relativo a la posición inicial, así se ha podido saber cuando el cosido ha fallado y verificar la instrumentación inalámbrica. En la Tabla 3.5 se muestran los datos obtenidos por este reloj así como la tensión que experimentaba la zona central del muro en cada escalón de carga. En la figura 3.23 se muestra el gráfico de tensión-deformación de la parte central, como se aprecia a partir de  $11 \text{ kg/cm}^2$  de tensión el muro sufre rotura frágil y los cosidos son los que empiezan a trabajar. Por otra parte, los valores de desplazamiento vertical tanto del reloj comparador como del LVDT inalámbrico coinciden, lo que indica el buen funcionamiento del sistema y la adecuación para este tipo de ensayos.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

Q Sección Central (t)	P gato (kg/cm <sup>2</sup> )	Micrómetro (mm)	Tensión (kg/cm <sup>2</sup> )
0,0	0	0	0
5,3	40	0,282	2
7,9	60	0,395	2
10,6	80	0,489	3
13,2	100	0,555	4
15,9	120	0,641	5
18,5	140	0,698	6
21,2	160	0,75	6
26,5	200	0,872	8
31,8	240	0,99	9
37,1	280	1,135	11
42,4	320	4,38	13

Tabla 3.5. Relación entre la presión aplicada y tensión resistida por la parte central del muro.

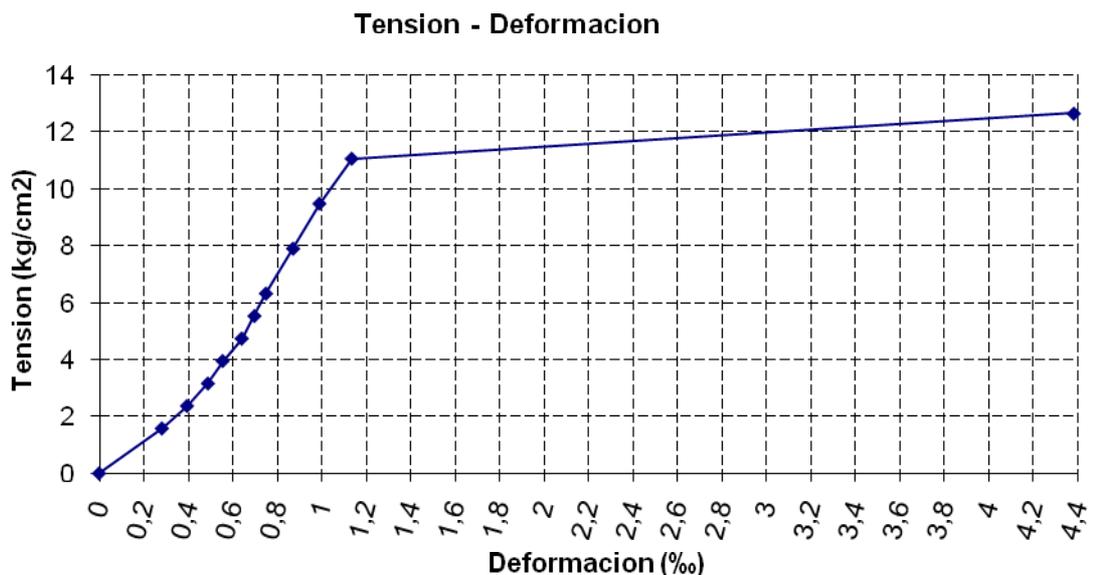


Figura 3.21. Diagrama tensión deformación de la zona central de muro.

En las Figura 3.22 y Figura 3.23 se ha representado las medidas tomadas con las bases de extensometría. En la primera figura se han representado las gráficas relacionadas con el cosido de las varillas de fibra de vidrio mientras que la figura siguiente muestra los valores obtenidos en el cosido de acero. Además están agrupado por alturas de tal manera que el ubicado en la parte superior coincide con la parte superior del muro. Analizando estos gráficos se observa que, como era de esperar, la zona superior del muro se deforma más ya que es ahí donde se recibe la carga. En el caso de las varillas de fibra de vidrio las medidas dependen significativamente de la ubicación de las bases, esto es, si las bases se colocan cerca las varillas las lecturas indicarán cada deformación de ese punto, por pequeña que sea, este es el caso de las bases 8 y 2. (Figura 3.22). Por

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

---

otro lado las varillas de acero han tenido un comportamiento más lineal y homogéneo como se desprende de la figura 3.24. De la comparación de ambos materiales se puede deducir que las varillas de fibra de vidrio están menos tensionadas, ya que a la misma altura se deforman menos. Por lo que a la vista de estos primeros resultados se recomendaría la utilización de este tipo de varillas. Este consejo fue reafirmado cuando al desmontar la estructura y comprobar los daños interiores, se vio que las varillas de acero quedaban sueltas en la lechada mientras que las varillas de fibra de vidrio permanecían todavía íntimamente ligadas (Figura 3.25)

Deformaciones medidas en mortero de cal para cosido con varillas de fibra de vidrio

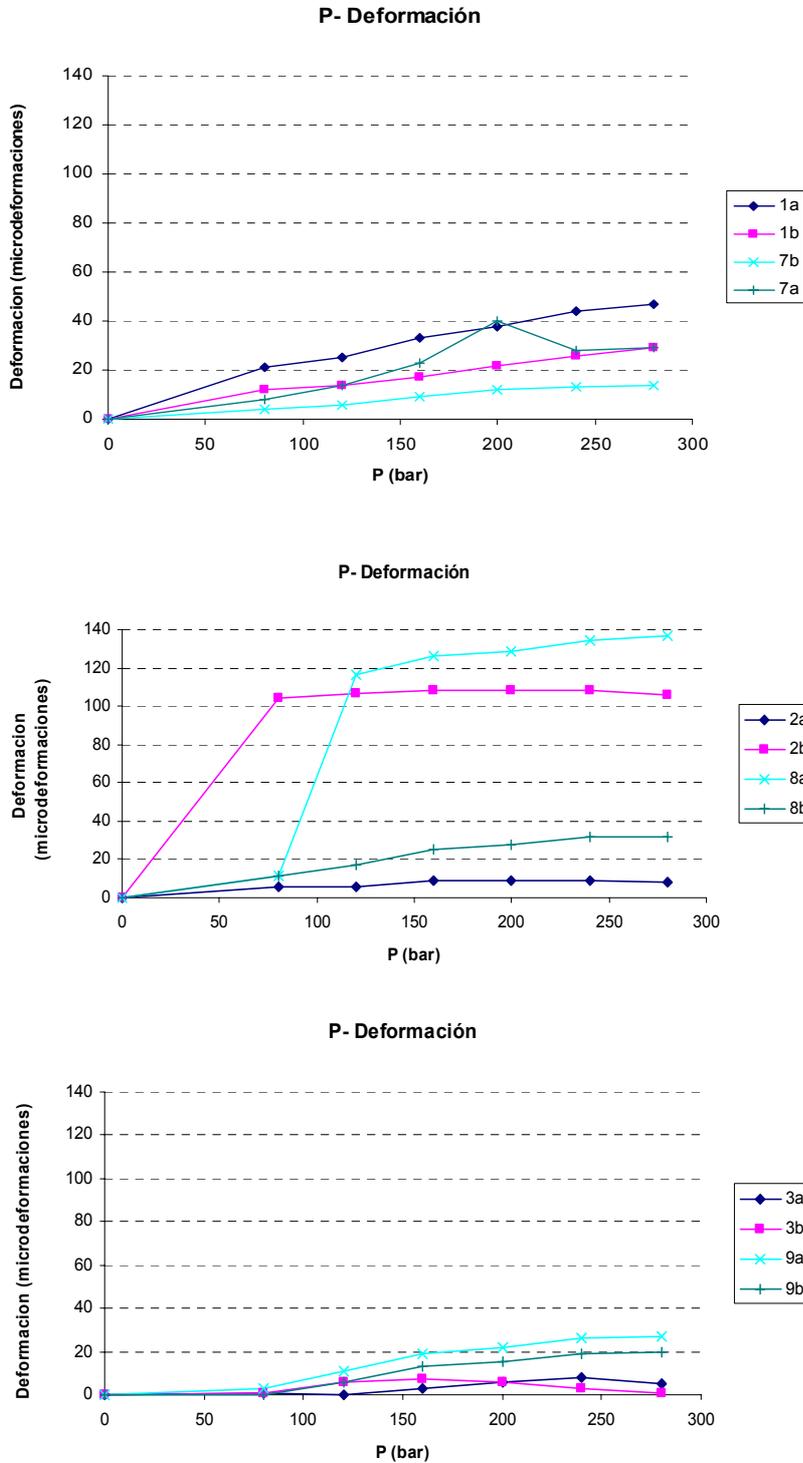


Figura 3.22. Deformaciones medidas en el cosido realizado con varillas de fibra de vidrio.

Deformaciones medidas en mortero de cal para cosido con varillas de acero

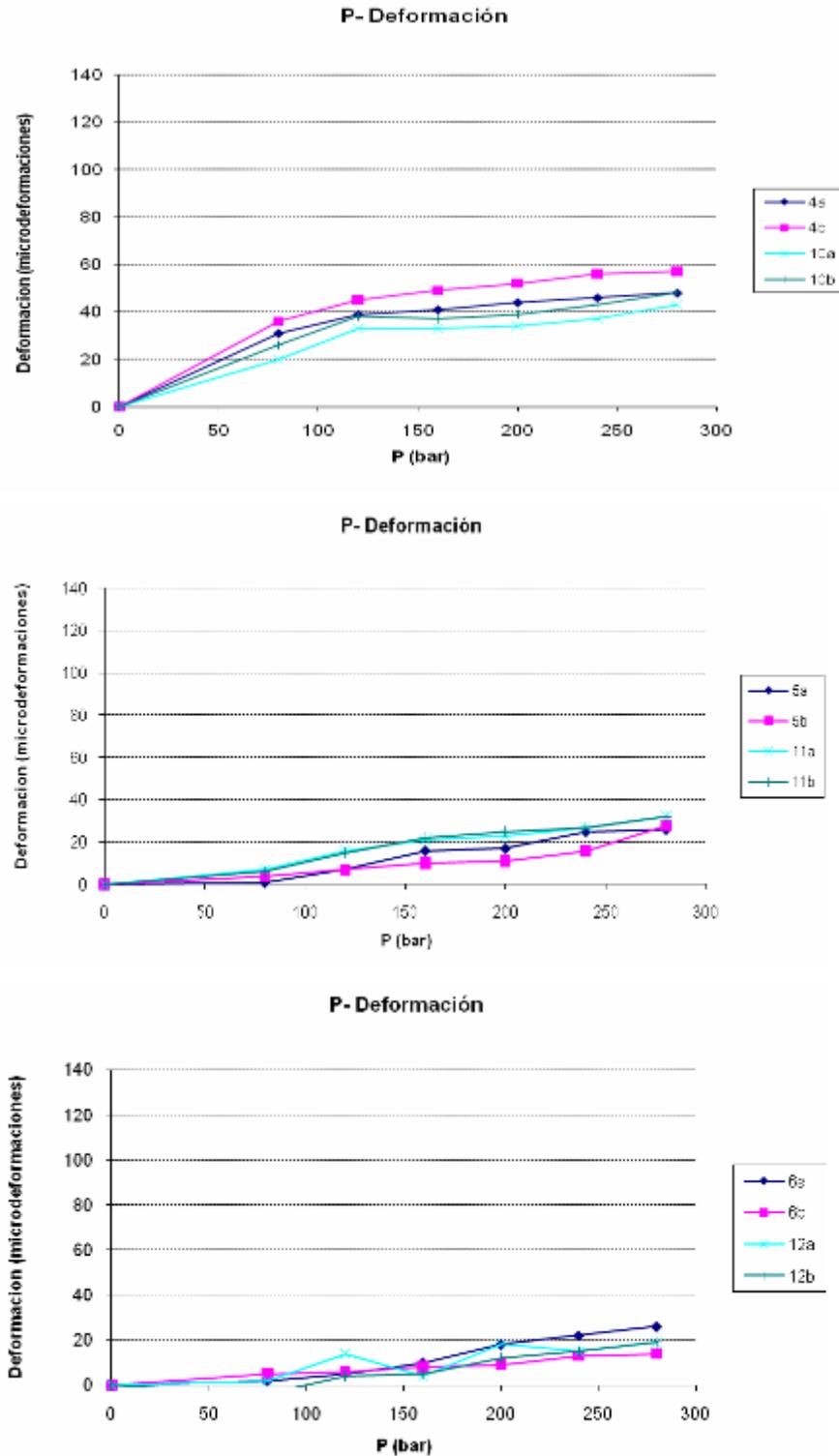


Figura 3.23. Deformaciones medidas en el cosido realizado con varillas de acero.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación



Figura 3.24. Detalle de ubicación de las bases de extensometría.



Figura 3.25. A la izquierda detalle del estado de una varilla de acero después del ensayo de cortante en el centro imagen general del retiro del muro y a la derecha el detalle de las varillas de fibra de vidrio después de ensayo de cortante.

Después de haber realizado el ensayo de cortante de los cosidos se procedió a inspeccionar el estado de conservación de los extremos del muro. Dado los daños que habían sufrido los ladrillos se procedió a ejecutar el ensayo a compresión de parte de un extremo. La evolución se muestra en la Figura 3.26, de ahí se deduce que la tensión de rotura es  $25 \text{ kg/cm}^2$ , ya que después entra en el campo plástico y las leyes lineales ya no rigen. Este valor es menor que el valor de rotura típico del ladrillo macizo ( $40 \text{ kg/cm}^2$ ) porque el bloque está engarzado con un mortero de cal hidráulica y es éste el factor determinante en este ensayo. Las oscilaciones que aparecen en la gráfica se deben a las variaciones de presión del grupo hidráulico. En la Figura 3.27 aparecen la probeta ensayada y detalles de los lados más representativos de este tipo de rotura, en el se aprecian las grietas verticales típicas de este tipo de ensayo, y que además indican la verticalidad de la aplicación de la carga.



Figura 3.26. Diagrama de ensayo a compresión del muro de ladrillo macizo..



Figura 3.27. A la izquierda se muestra una imagen general del ensayo a compresión en el centro y a la derecha se exhiben los detalles del estado final de la probeta.

### 3.2. MURO TAPIAL

El siguiente muro estudiado ha sido el muro de tapial. Éste es un material muy deformable y delicado, hecho con arena y cal, cuya resistencia es muy baja, se encuentra entre los 10-15 kg/cm<sup>2</sup>. Además, es uno de los materiales típicos en del patrimonio, muy vulnerable al contacto con el agua, como se comprobará más adelante. En este caso, se ha procurado respetar las circunstancias reales, esto es, no se ha

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

protegido con el calicastrado para comprobar el efecto del corte sobre el muro como tal, no en la capa protectora (Figura 3.28). A continuación, se ha realizado la prueba de corte y seguidamente se ha unido con mortero de cal, en las mismas proporciones que en el mortero inicial, esto es, 4 partes de arena por una de cal en un litro de agua. Posteriormente se cosió con las mismas varillas que en el muro anterior, es decir, varillas de acero y varillas de fibra de vidrio de 12 mm de diámetro embebidas en una lechada cuyas proporciones son 4 kg de cal hidráulica, 2 tapones de resina acrílica y 4 l de agua, y se estudió convenientemente sin acometer el hueco en el bloque central, debido a las particularidades de este material. Finalmente, se realizaron las pruebas de compresión sobre los fragmentos restantes.



Figura 3.28. A la izquierda se muestra el desencofrado del muro de tapial y a la derecha se ilustra el rafrantado del muro para la posterior colocación de las placas de distribución de cargas.

### 3.2.1. Puesta en Carga

Como se acaba de indicar la primera tarea que se ha realizado fue la entrada en carga. Ésta se realizó en pequeños escalones como se presenta en la Tabla 3.6. En esta ocasión los incrementos de carga han debido de ser muy pequeños a causa de la fragilidad de este material, no llegando a sobrepasar la resistencia máxima a compresión, comunicando el muro a lo que a priori debería ser menor al 50% de la tensión de rotura,  $0.8 \text{ Kg/cm}^2$ .

Q muro (t)	P gato ( $\text{kg/cm}^2$ )	Micrómetro (mm)	Tensión ( $\text{kg/cm}^2$ )	Numero imagen	Temperatura °C
0,0	0	0	0,0	263	14,8
1,2	3	0,285	0,1	264	15,2
2,8	7	0,509	0,3	265	14,8
4,4	11	0,939	0,4	266	14,7
7,9	20	1,591	0,8	267	15,1

Tabla 3.6. Escalones de carga aplicados al muro de tapial.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

Si además, estos valores se representan en la gráfica tensión – deformación (Figura 3.29) se puede observar que el comportamiento del material es muy lineal, y que por lo tanto en ningún momento se ha llegado al comportamiento plástico del mismo.

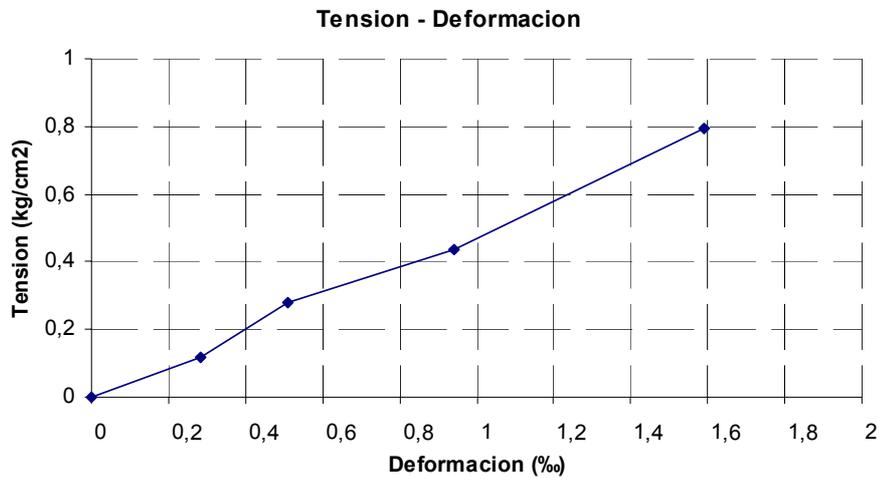


Figura 3.29. **Diagrama tensión-deformación referente a la entrada en carga del muro de tapial.**

Al igual que en el muro anterior se utilizó la instrumentación inalámbrica con los mismos sensores y resultados de calidad similares. De todas maneras, se ofrece una descripción más detallada en el punto siguiente.

En cuanto al estudio termográfico, la cámara se situó a 2,5m del muro, en perpendicular y desplazada hacia el lado izquierdo del muro. En esta situación se ven la chapa metálica de reparto de cargas y el borde izquierdo del muro. La cámara se programó con un coeficiente de emisividad de 0.98.

Para evitar variaciones en la escala de color que pudieran confundir durante el ensayo, se canceló la opción de ajuste automático del rango de medida; primero se realizaron dos tomas con rango entre 15 y 22 °C y, finalmente, la escala se fijó entre los valores de 12 a 19 °C.

Mediante gatos hidráulicos se aplicaron diferentes niveles de carga hasta la presión máxima prevista. Cada vez que la carga alcanzaba el valor predeterminado se tomaba una foto térmica.

La imagen muestra todas las imágenes térmicas tomadas durante el ensayo; las dos primeras se captaron con un rango de medida entre 15 y 22 °C; el resto está en el rango de 12 a 19 °C.

El cambio de tonalidad de azul a verde se corresponde con el cambio de escala durante la ejecución del ensayo

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

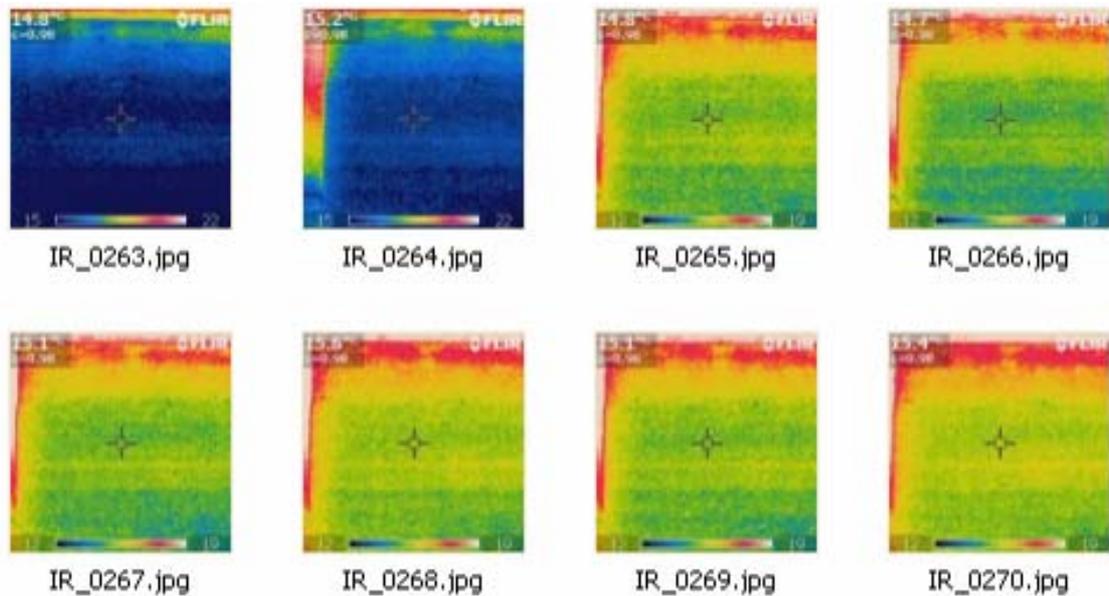


Figura 3.30. Fotos térmicas tomadas durante la precarga del muro de tapial.

Si se representan las temperaturas tomadas con la instrumentación inalámbrica y la cámara se aprecia que la diferencia de temperatura entre el sensor de ambiente y la cámara térmica se debe a la acumulación del aire caliente de la calefacción en la zona alta de la nave, que corresponde con la colocación del sensor ambiental.

Desde la desconexión del calefactor, hacia las 13:00 horas, se observa un descenso progresivo de la temperatura; el muro, debido a su masa, es más insensible a la calefacción y permanece estable durante todo el tiempo.

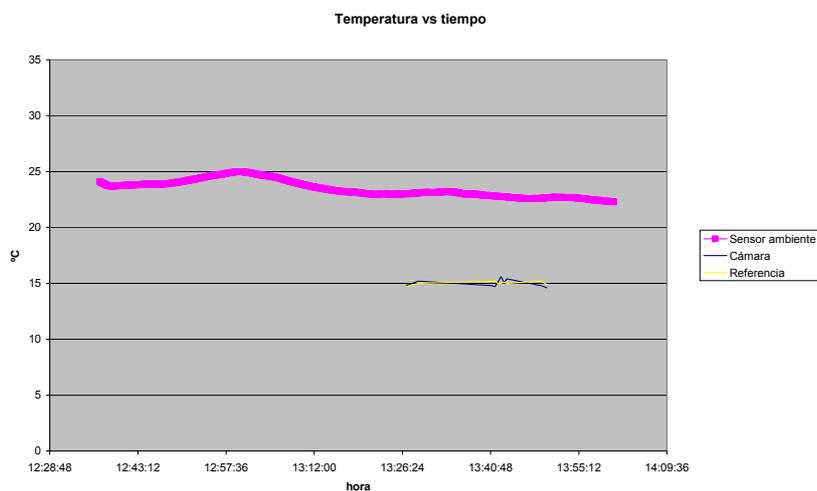


Figura 3.31. Fotos térmicas tomadas durante la precarga del muro de tapial.

Para determinar si se han producido cambios en la temperatura del muro al aplicar las cargas, se ha obtenido de la grabación de video un valor de referencia; este valor se corresponde con la temperatura instantánea que se registra en el momento que el reloj cambia de un minuto al siguiente.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

Representando los saltos de temperatura frente a la presión y al diferencial de presión se observa que no existe correlación entre las variables, es decir, todos los saltos de temperatura se pueden producir a cualquier carga o salto de carga.

Durante el proceso de carga no se han detectado cambios en la temperatura que puedan achacarse al aumento de la carga.

Las causas posibles de este resultado son:

- La precisión propia del instrumento, ya que lecturas consecutivas del mismo punto pueden diferir en 0,6°C.
- Aunque se han producido saltos de presión considerable (hasta 10 bares) la velocidad de aplicación de las cargas era demasiado lenta como para que el incremento de temperatura de un escalón individual sea detectable.
- La elevada masa del muro.
- El tiempo empleado entre escalones consecutivos es demasiado grande, ya que se esperaba hasta que la lectura de deformación del muro fuese relativamente estable, por lo que se disipa el calor producido por el escalón e impide un efecto acumulativo sobre la temperatura del muro.

Por otra parte, se decidió no realizar el ensayo de gato plano ya que al cortar con la sierra de disco desaparecería material que podría desvirtuar los resultados de ensayos posteriores. Aparte de que ya se verificó en el muro anterior la validez de este ensayo.

### 3.2.2. Estudio de Vibraciones con Diferentes Sistemas de Corte.

Ya se ha advertido la intención de estudiar las vibraciones transmitidas durante la realización de los cortes al muro en sí, ya que es éste y no otro elemento el que resiste las cargas. Para ello, se ha utilizado una vez la instrumentación inalámbrica, la alámbrica y la cámara termográfica.

Comenzando por el primer tipo de instrumentación se debe indicar que estaba constituida por:

- Transductor inductivo de desplazamiento (L.V.D.T.) de SOLARTRON-SCHLUMBERGER, mod. ST-1000, de núcleo libre, con rango de medida  $\pm 2.5$  cm y resolución 0.01 mm.
- Ordenador de sobremesa Dell Optiplex GX270 con S.O. Windows XP.
- Estación base de recepción de sensores inalámbricos tipo Mota (Crossbow).
- Módulo inalámbrico tipo Mota (Crossbow) con electrónica de adaptación para medida de sensor LVDT.
- Módulo inalámbrico tipo Mota (Crossbow) para medida de parámetros ambientales.
- Módulo inalámbrico tipo Mota (Crossbow) para medida de sensor de presión.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

- Software de monitorización de sensores inalámbricos desarrollado en GEOCISA

El transductor de desplazamiento (L.V.D.T.) se situó sobre el segmento central del muro a ensayar, de forma que fuera capaz de medir el desplazamiento del muro provocado por la presión. Para su instalación se dispuso en una pieza mecanizada que permitía su amarre por un extremo a una pesa que descansaba sobre la plancha metálica que transmite la fuerza del pistón al muro y por el otro a un cable acerado sujeto a un tirante en la parte superior de la estructura de la instalación (Figura 3.32).

El acondicionador de señal de la LVDT. se conectó al módulo inalámbrico que se situó sobre una de las vigas de reparto de carga de la estructura. (Figura 3.32).

El módulo inalámbrico de parámetros ambientales se situó igualmente sobre una de las vigas de la estructura. Ambos módulos quedan posicionados fuera de la zona de influencia de los pistones del gato hidráulico y de la zona del muro que sufre el desplazamiento. (Figura 3.32).



Figura 3.32. **A la izquierda se presenta el aspecto del muro de tapial instrumentado inalámbricamente; en el centro se muestra el transductor de desplazamiento (LVDT) y a la derecha el sistema de adquisición remoto.**

El módulo inalámbrico de medida de sensores de presión se conectó a la salida del sensor electrónico de presión de la estación de presión conectada al gato hidráulico.

La estación base se conectó al ordenador de adquisición. Este se encontraba a unos seis metros de la zona de ensayo y los tres módulos inalámbricos quedaban en la visual de la misma. Se inició la aplicación de monitorización de las motas inalámbricas comprobándose que se recibían datos correctamente de los dos módulos.

El ordenador de adquisición se encontraba conectado a la red interna de GEOCISA, pudiéndose visualizar la evolución del ensayo a través de otros equipos de la red.

El primer corte que se realizó fue el corte de hilo de diamante. Éste se realizó en el tercio izquierdo de la pared visto desde el centro de la nave. Antes del corte propiamente dicho, fue necesario realizar un taladro en la parte inferior de muro para poder cerrar el lazo del hilo, del que se efectuaron medidas de vibraciones durante el corte de la pared (Figura 3.33).

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación



Figura 3.33. Detalles del montaje del sistema de corte con hilo de diamante.

En cuanto al corte con sierra de disco, éste se realizó en el tercio derecho de la pared visto desde el centro de la nave. Antes del corte propiamente dicho, fue necesario instalar el sistema de anclaje y guiado del disco. Pese al tamaño de la sierra, un único disco no fue capaz de cortar el muro, en toda su profundidad de una sola pasada. Para evitar instalar en ambas caras la máquina de corte, se utilizaron dos discos de tamaño diferente (Figura 3.34). Se efectuaron medidas de vibraciones durante las perforaciones para instalar los elementos de sujeción de la sierra y durante el corte con ambos discos.



Figura 3.34. Utilización de dos discos con sierra en el muro de tapial.

Los registros adquiridos han sido:

- Desplazamiento del segmento central del muro durante los proceso de corte
- Condiciones ambientales del recinto del ensayo
  - Temperatura ambiente (°C)
  - Humedad relativa (%)
  - Presión atmosférica (bar)
  - Luminosidad (lux)

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

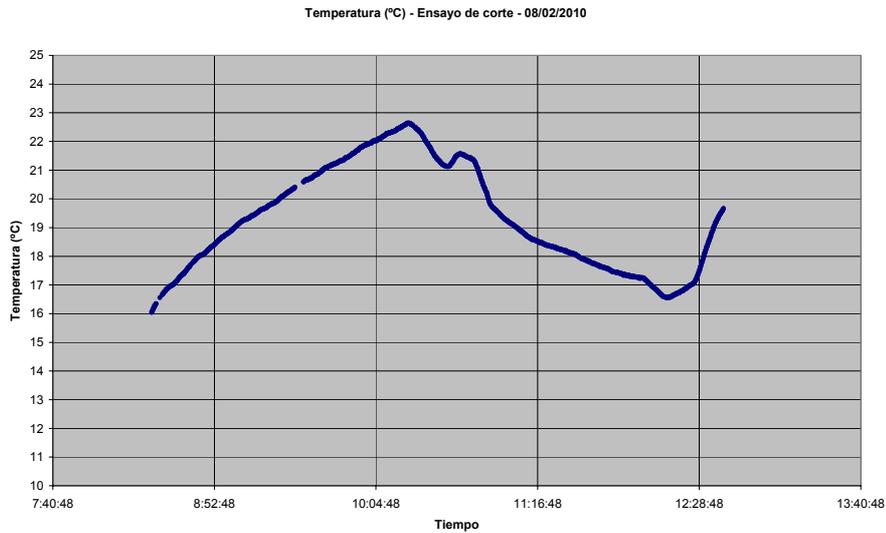


Figura 3.35. Evolución de la temperatura durante el ensayo de corte.

La evolución de la temperatura es ascendente en el primer tramo de la curva porque se encendió el sistema de calefacción de la nave de ensayos, posteriormente se apagó y la temperatura se elevó de nuevo debido a la numerosa visita de los socios del proyecto y evaluadores del Ministerio, para continuar decayendo cuando abandonaron el lugar y posteriormente se encendió de nuevo el sistema de calefacción.

El registro del desplazamiento del bloque central se muestra en la gráfica siguiente (Figura 3.36). Como se aprecia el desplazamiento máximo que se produce es 0.28 mm, y es al final del corte con sierra de disco. La posible razón para este comportamiento es la pérdida de material durante el corte, como se aprecia en la fotografía de la Figura 3.36., ya que el sistema de corte fue el más traumático para el muro, ya que el sistema de intervención eliminaba parte de la superficie del muro en cada pasada del sistema de guiado de la maquina de corte y, además, requirió la instalación de unas placas de anclaje que impidiesen el hundimiento de los pernos de anclaje de la sierra (0.4 x 0.4 m). Aun así la degradación del muro comienza desde las operaciones de preparación del sistema de corte con hilo de diamante, en ellos el desplazamiento que se produce llega a los 0.08 mm y alcanza los 0.13 mm, cantidad suficiente para dañar esta estructura, donde el material apenas está ligado. En añadidura, el corte no fue recto como era de esperar sino que debido a que las tongadas fueron de diferente material, las resistencias que ofrecieron al corte con hilo fueron diferentes y el resultado no sería admisible en una obra real. También, es verdad, que en una obra real este inconveniente se suele solventar incluyendo un sistema de poleas a la máquina de corte.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

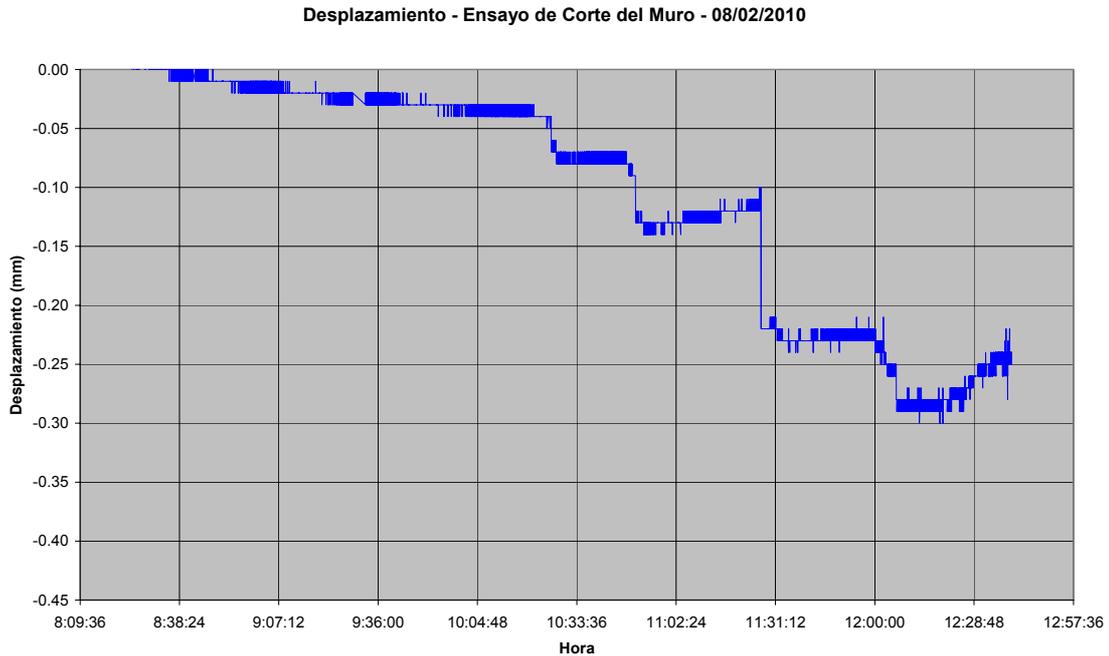


Figura 3.36. **Arriba:** Evolución del desplazamiento del bloque central durante el ensayo de corte. **Debajo:** Izquierda. Aspecto del muro al finalizar los cortes; Derecha. Detalle del sistema de anclaje del sistema de corte con sierra de disco.

Asimismo, como se aprecia en el gráfico, las vibraciones producidas por el sistema de corte se transmitieron por toda la estructura provocando señales con una gran cantidad de ruido.

En cuanto al estudio dinámico, la posición de los sensores fue la misma que en el muro anterior (Figura 3.7)



Figura 3.37. Detalles de localización de los acelerómetros en el muro de tapial.

En cuanto a las imágenes térmicas registradas, la cámara se situó en una posición alejada de la perpendicular del muro por el elevado volumen de las máquinas de corte y para evitar salpicaduras del líquido de refrigeración. En esta situación, la cámara quedó a 3 m de la línea de corte de hilo de diamante y a 2.2 m de la línea de corte con radial. La imagen muestra el muro en casi toda su altura. La cámara se programó con un coeficiente de emisividad de 0.98, igual que en anteriores ocasiones.

Durante todo el ensayo se realizó una grabación continua de la imagen de la cámara térmica; el rango de medida de la cámara se seleccionó manualmente en función de las condiciones de cada etapa del ensayo.

Los registros continuos de vibraciones se procesaron para obtener el espectro de frecuencias de la aceleración y, por integración, el espectro de frecuencias de velocidad. Este cálculo se realiza para poder comparar los resultados de las medidas con la norma DIN 4150.

Cada uno de los registros se estudia hasta obtener el espectro más significativo, obteniéndose entonces el valor máximo de aceleración y velocidad junto con la frecuencia a la que se producen.

Todos los gráficos que se muestran a continuación tienen la misma asignación de colores que en el muro anterior (Figura 3.7)

Por simplicidad, solo se muestran los gráficos de aceleración; en el anejo 1 pueden verse los resultados completos. Comenzando por el corte de hilo de diamante debe notarse que los sensores que miden las vibraciones producidas por el hilo de diamante son X2, Y y Z. De advertirse que al estar intacto todavía el muro, el sensor X1 recoge medidas muy similares al sensor X2 durante el taladrado inicial y las primeras fases del corte. Al final de la adquisición, el sensor X1 es menos sensible al proceso de corte. (Figura 3.38). En esta ocasión el ruido de las señales es mucho mayor que en el muro de ladrillo macizo, esto es porque en el caso anterior la estructura es más rígida y resistente. Sin embargo hay otros aspectos que se repiten como ya se comentó en el apartado 3.1, esto es, se detecta casi exclusivamente señales apreciables en el sentido longitudinal del muro, x, además se detectan varios modos de vibración, debidos a las mismas causas. Por un

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

lado, la baja resistencia que ofrece el muro a ser taladrado con una máquina que gira a una velocidad alta y constante mientras arrastra ese material hacia el exterior, por lo tanto, perdiendo masa. Y por otro, porque la operación la lleva a cabo un trabajador el cual tiene un movimiento poco estable.

Además, también hay que resaltar que, como cabía esperar, el modo más excitado en esta ocasión es el primero y no el segundo, como en el caso anterior. Por lo tanto, se puede concluir que las frecuencias que se aprecian son las correspondientes a las de las máquinas, filtradas por un elemento transmisor como es el muro.

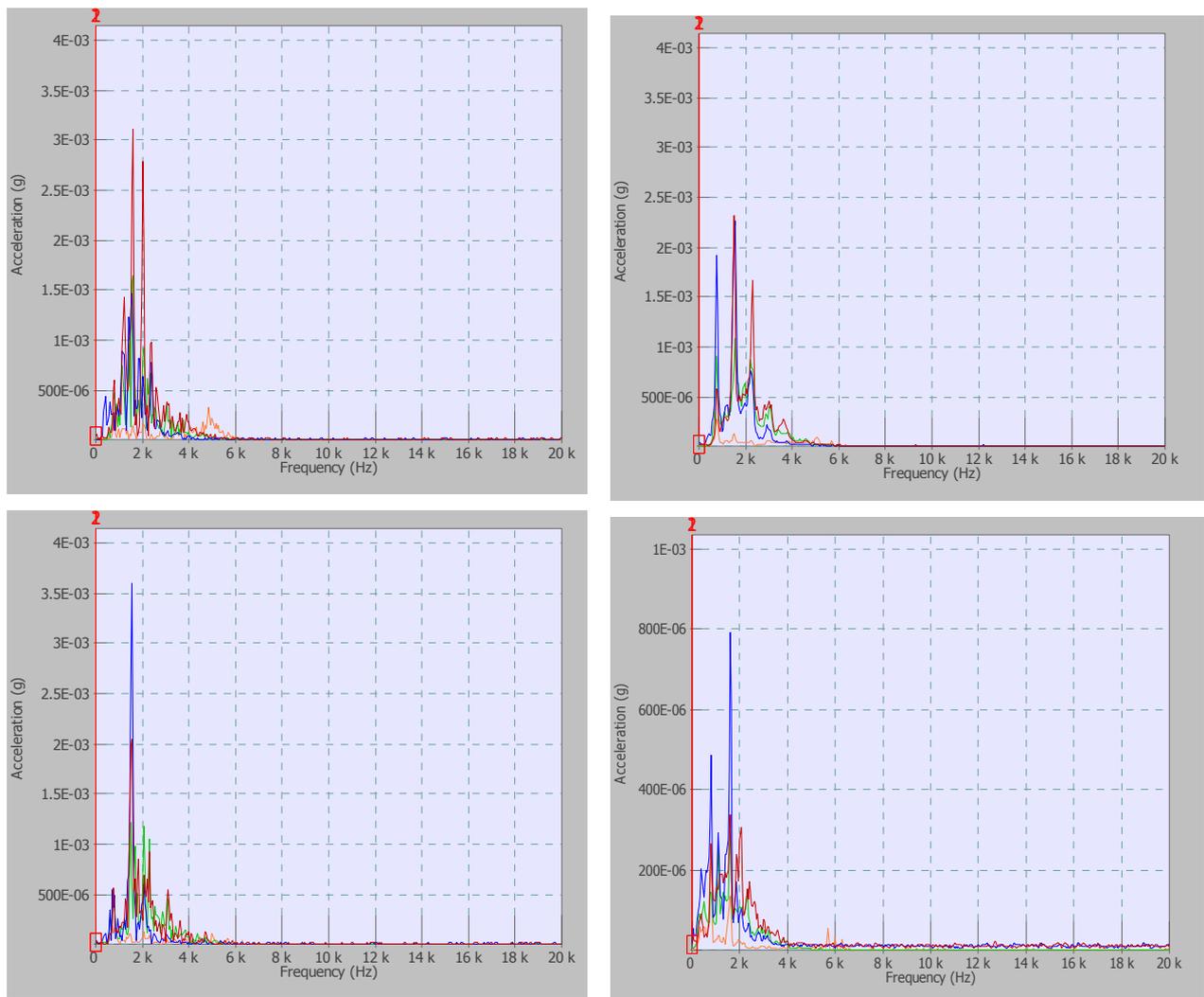


Figura 3.38. Espectros de frecuencia obtenidos en instantes aleatorios del proceso de corte con hilo de diamante en el muro de tapial.

En el caso de la sierra de disco se van a presentar varias gráficas, primero la relacionada con el sistema de anclaje de la máquina (Figura 3.39). En estas gráficas se puede apreciar como la dirección Y es la más excitada, esto es debido a que el material estaba muy disgregado y al producirse los taladros muy cerca del sensor, éste lo ha detectado

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

casi exclusivamente, y en el caso del perno superior el acelerómetro vertical también lo ha registrado a la misma frecuencia pero con valores de un orden de magnitud más bajo.

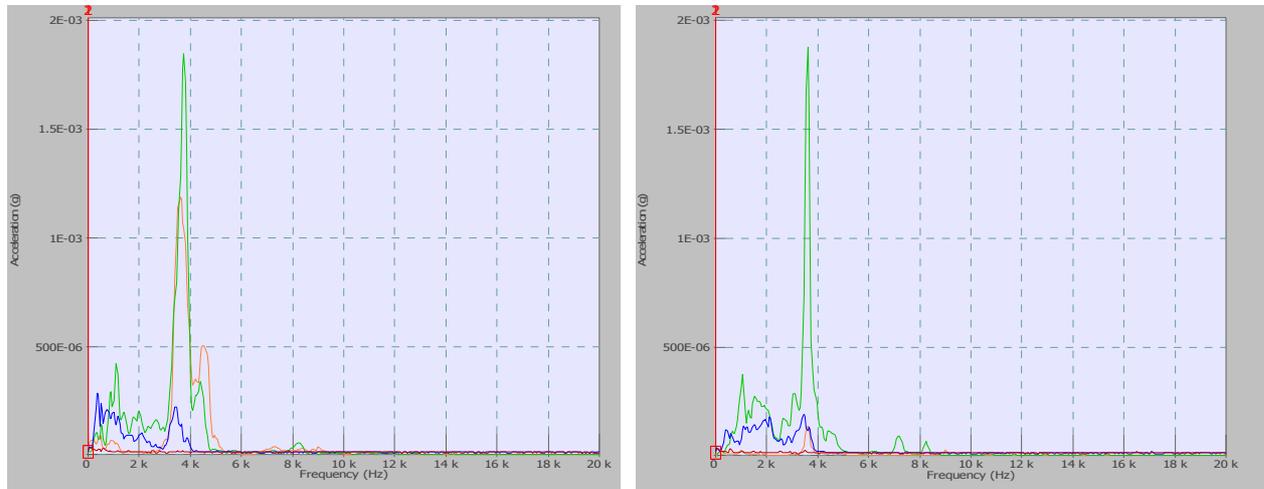


Figura 3.39. Espectros de frecuencia obtenidos durante el anclaje del sistema de guiado de la sierra de disco en el muro de tapial.

En la Figura 3.40 se muestran los espectros de aceleración cuando se utiliza el disco pequeño. Al comienzo del corte la señal contiene mucho ruido, de ahí que presente muchos máximos, posteriormente la señal se hace mucho más nítida y se puede determinar la frecuencia excitada, es la que se corresponde con el primer modo de vibración. También se nota la excitación fuera del plano, pero siendo ésta entre 3 y 5 órdenes menor que la anterior, la dirección vertical apenas se excita con este tipo de actuación.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

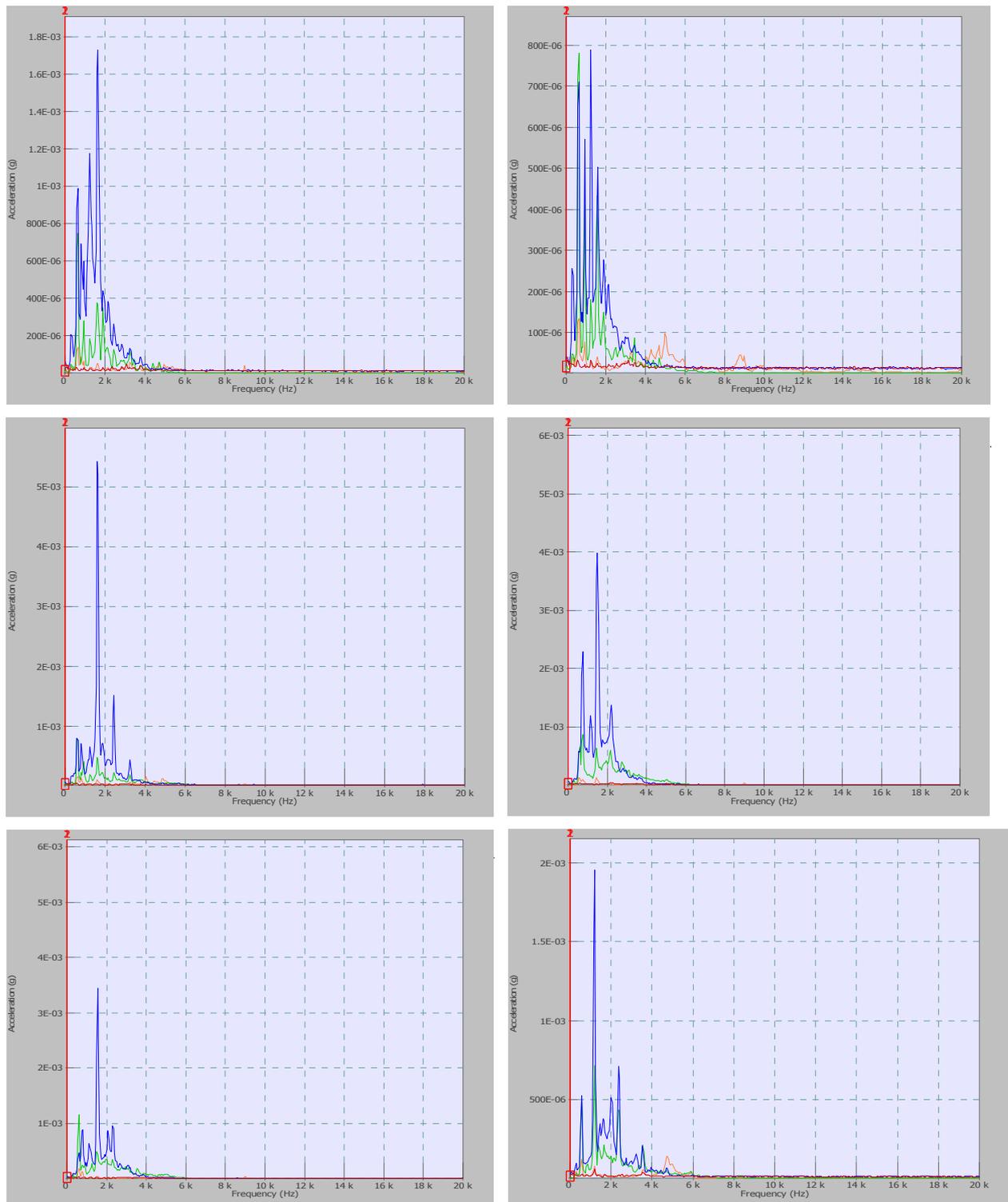


Figura 3.40. Espectros de frecuencia obtenidos durante la utilización del primer disco de la sierra en el muro de tapial.

En la Figura 3.41 se muestran los espectros de frecuencia para las aceleraciones medidas cuando se utilizó el segundo disco, como era de esperar, al estar ya una parte

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

separada, la señal no es tan nítida como al comienzo del corte, del mismo modo la excitación fuera del plano también se registra, aunque también no tan significativa como la longitudinal.

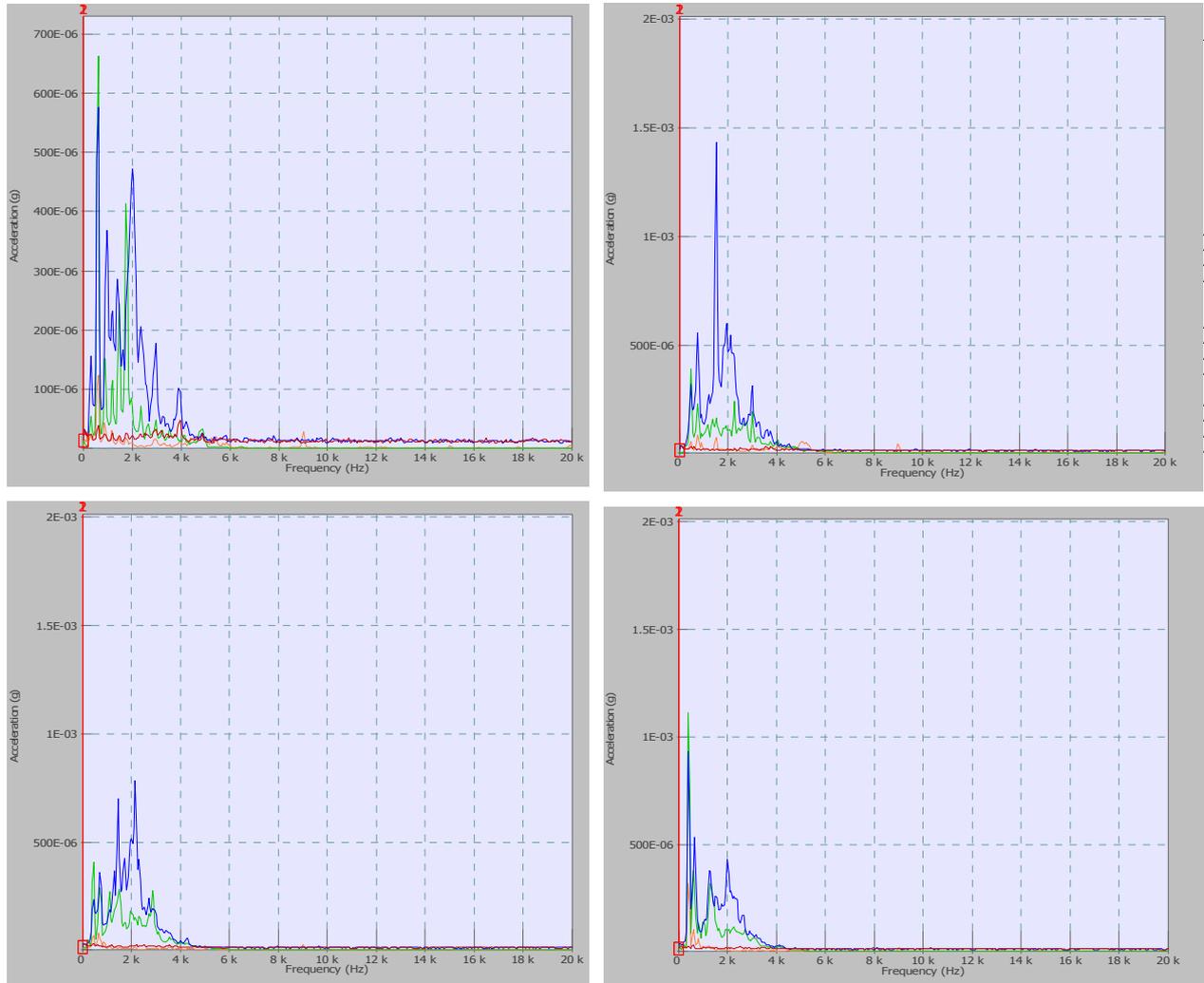


Figura 3.41. Espectros de frecuencia obtenidos durante la utilización del segundo disco de la sierra en el muro de tapial.

Si se comparan los espectros de los dos métodos de corte, se observa que la sierra radial produce valores de aceleración comprendidos entre 1 y 5.5mG mientras que las aceleraciones producidas con el hilo de diamante son menores, se encuentran entre 2.4 y 3.6 mG. Todas las velocidades de vibración medidas se encuentran en el rango de  $\mu\text{m/s}$ .

Las imágenes térmicas más representativas obtenidas en esta intervención se presentan a continuación. Para facilitar la interpretación, cada imagen térmica está acompañada de su correspondiente imagen en el espectro visible. Al tratarse de cámaras diferentes, el ángulo de visión no es exactamente el mismo. El hecho de que el ensayo se haya realizado en invierno ha influido positivamente en la obtención de resultados. En efecto, tanto el agua de refrigeración como el muro mismo se encontraban a una temperatura

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

---

muy inferior a la que se alcanza por la acción del corte, por lo que se obtiene un claro contraste en la imagen.

En el caso del corte con hilo la refrigeración del hilo se realizó con una manguera sobre la superficie de la pared, empapando toda la zona de corte. En la serie de imágenes se observa como se calienta el hilo de corte; la temperatura máxima detectada en la imagen se puede notar en el cursor gráfico que se desplaza por debajo de la escala de colores.

Puede obtenerse la temperatura alcanzada durante el corte de la pared estudiando el hilo y la proyección de agua por la parte inferior del lazo; la imagen 5 muestra valores próximos a 32°C.

Como muestra la octava imagen térmica, una vez finalizado el corte, la pared se enfría rápidamente y no queda huella térmica del corte.

En el caso del corte con sierra de disco, la refrigeración de la sierra se realiza mediante un chorro de agua sobre una de las caras del disco (la opuesta a la posición de la cámara térmica); de esta manera, solo quedó empapada la superficie del muro por uno de los lados del corte.

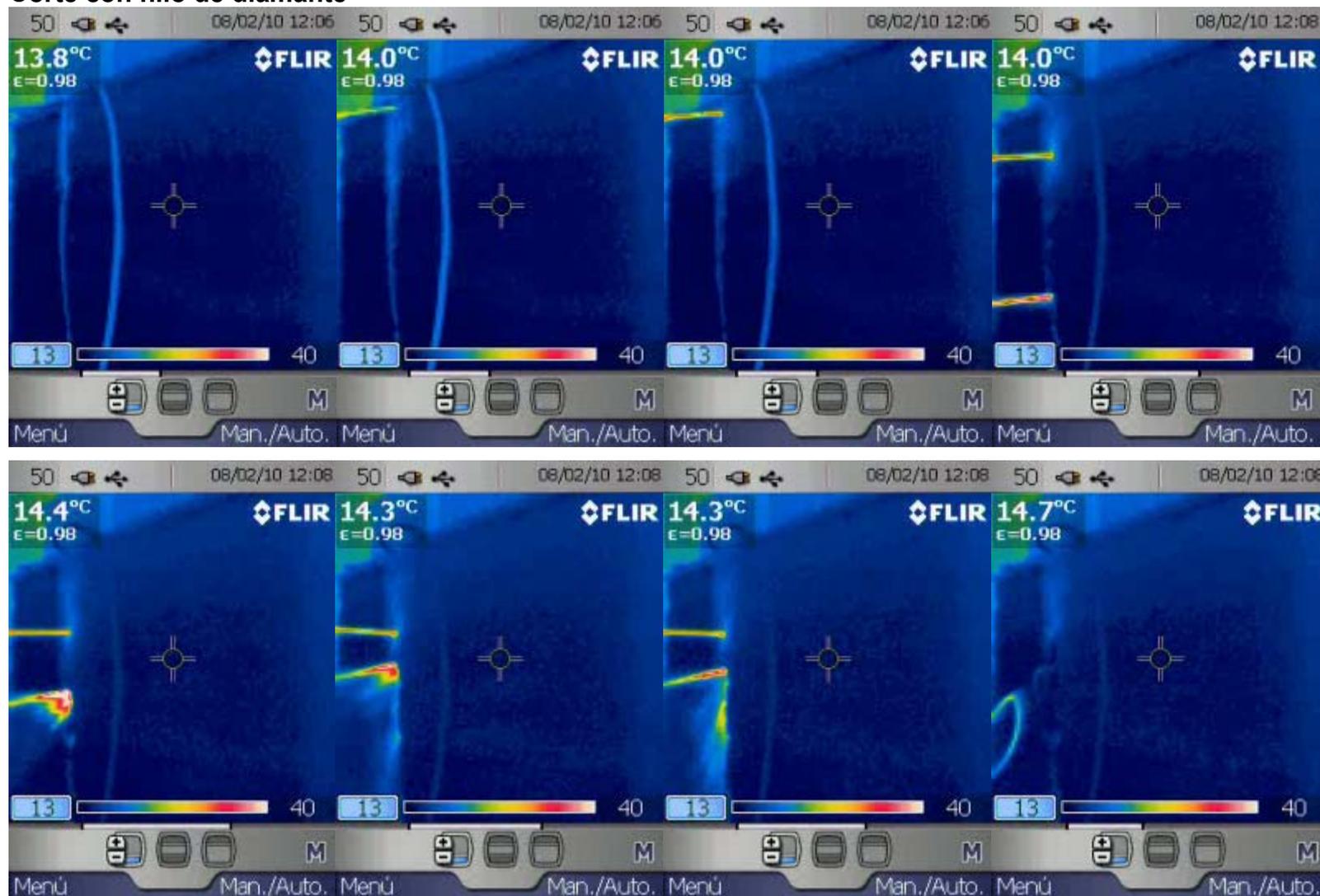
La proyección de agua por la parte inferior del disco de la imagen 2 y la huella del corte en la pared de la imagen 4, muestran valores próximos a 23°C.

Las imágenes 5 á 8 muestran la huella térmica que queda a ambos lados de la pared hasta 5 minutos después de finalizado el corte. No se dispone de escala de ancho.

Si se comparan ambos métodos se deduce que el corte con hilo de diamante genera mayor calentamiento, aproximadamente 32°C, que el disco de sierra, 23°C. Además se disipa más rápidamente que la del el corte por sierra radial. Sine embargo la zona de influencia térmica del corte por sierra radial es mayor que la de hilo de diamante, aunque no ha podido ser cuantificada.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

### Corte con hilo de diamante

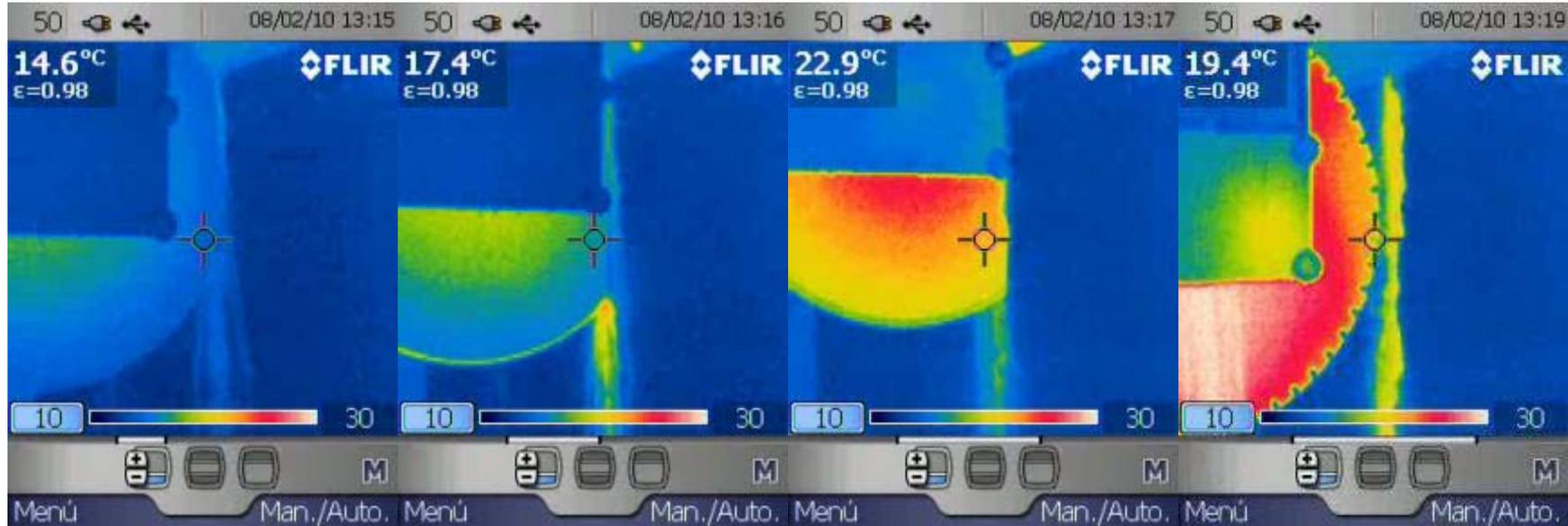


## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

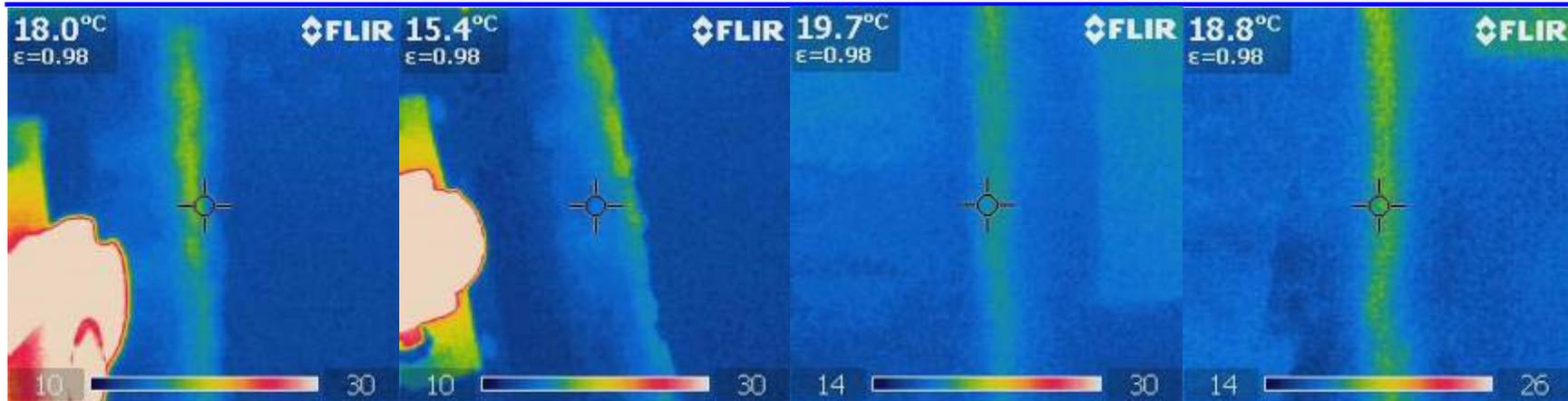


## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

### Corte con sierra de disco



## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación



### 3.2.3. Ensayos de los Cosidos

Dado el estado en el que se encontraba el muro una vez cortado y la delicadeza del material, se inspeccionó con detalle para determinar si se debía proceder a realizar alguna tarea de refuerzo o buscar estudios alternativos. Se determinó realizar un calicastro, con mortero de cal, para aumentar la resistencia del mismo, ya que se estaba comprobando que la resistencia estaba muy por debajo de los valores típicos y además, aumentar el confinamiento de un material muy disgregado. Posteriormente se procedió a su unión inyectando un mortero de cal aditivado con un 10 ml de resina epoxy. Las proporciones fueron las mismas que en el muro anterior. El control del mismo se realizó comprobando las resistencias a compresión y flexotracción a dos y siete días. Los valores obtenidos fueron 0.47 y 0.237 MPa respectivamente, para el primer caso; y 1.44 MPa y 0.860 MPa, para el segundo.

A continuación se cosió, con varillas de acero roscado y fibra de vidrio, ambas de 12 mm de diámetro y 50 cm de longitud, embebidas en una lechada de cal. Al igual que con el mortero se procedió a sus ensayos de curado para asegurar la total adherencia de la mezcla a las varillas (Figura 3.42).



Figura 3.42. Muro de tapial calicastroado y cosido.

En el estudio del cosido se utilizó de nuevo la instrumentación inalámbrica como comprobación de la alámbrica, la cámara termográfica y las bases extensométricas, con la diferencia del caso anterior que se ubicaron tanto en la zona móvil, zona central, como en las zonas inmóviles (extremos).

Como en las otras ocasiones los sensores utilizados han sido

- Transductor inductivo de desplazamiento (L.V.D.T.) de SOLARTRON-SCHLUMBERGER, mod. ST-1000, de núcleo libre, con rango de medida  $\pm 2.5$  cm y resolución 0.01 mm.
- Transductor de presión SENSOTEC de rango 0-250 bares con salida 4-20 mA.
- Ordenador de sobremesa Dell Optiplex GX270 con S.O. Windows XP.
- Estación base de recepción de sensores inalámbricos tipo Mota (Crossbow).
- Módulo inalámbrico tipo Mota (Crossbow) con electrónica de adaptación para medida de sensor LVDT.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

- Módulo inalámbrico tipo Mota (Crossbow) para medida de parámetros ambientales.
- Módulo inalámbrico tipo Mota (Crossbow) con electrónica acondicionadora para medida de sensor de presión (4-20mA).
- Micrómetro Digital Absoluto Mitutoyo, resolución 0.001 mm
- Software de monitorización de sensores inalámbricos desarrollado en GEOCISA

El transductor de desplazamiento (L.V.D.T.) se situó sobre el segmento central del muro a ensayar, de forma que fue capaz de medir el desplazamiento del muro provocado por la presión. Para su instalación se dispuso en una pieza mecanizada que permitía su amarre por un extremo a una pesa que descansaba sobre la plancha metálica que transmite la fuerza del pistón al muro y por el otro a un cable acerado sujeto a un tirante en la parte superior de la estructura de la instalación. El acondicionador de señal del LVDT se conectó al módulo inalámbrico que se situó sobre una de las vigas de reparto de carga de la estructura.

El módulo inalámbrico de parámetros ambientales se situó igualmente sobre una de las vigas de la estructura. Ambos módulos quedaron posicionados fuera de la zona de influencia de los pistones del gato hidráulico y de la zona central del muro.

El módulo inalámbrico de medida de sensores de presión se conectó a la salida del sensor electrónico de presión de la estación de presión conectada al gato hidráulico. Se obtuvo la recta de ajuste del transductor con los valores mostrados por el visor del sensor de presión.

La estación base se conectó al ordenador de adquisición. Éste se encontraba a unos seis metros de la zona de ensayo y los tres módulos inalámbricos quedaron en la visual de la misma. Se inició la aplicación de monitorización de las motas inalámbricas comprobándose que se recibían datos correctamente de los dos módulos.

El ordenador de adquisición se encontraba conectado a la red interna de GEOCISA, pudiéndose visualizar la evolución del ensayo a través de otros equipos de la red.

Para la ejecución del ensayo se aplicaron diferentes niveles de carga (Tabla 3.7) hasta llegar al fallo o bien del muro bien de las varillas a través de un gato hidráulico. Durante todo el proceso los sensores enviaron a la aplicación de monitorización los datos medidos por los transductores. Estos módulos envían una medida cada segundo.

El accionamiento del gato se efectuó con una bomba de presión manual, en cuya salida se habían instalados dos manómetros, uno digital con rango de medida hasta los 250 bar; y otro manual de rango de medida hasta los 1000 bar. De esta manera los escalones de presión son conocidos y se evitan posibles problemas de fallo de funcionamiento de los sistemas de lectura.

Las medidas obtenidas han sido las mismas que en las pruebas anteriores con esta instrumentación, esto es:

- Desplazamiento del segmento central del muro durante los proceso de corte
- Condiciones ambientales del recinto del ensayo

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

- Temperatura ambiente (°C)
- Humedad relativa (%)
- Presión atmosférica (bar)
- Luminosidad (lux)

A continuación se presentan en la Figura 3.43 los registros obtenidos por los sensores de desplazamiento y presión, tanto de medidas en continuo como de medidas manuales. El registro de las primeras se ha realizado con una frecuencia de adquisición de una medida por segundo. Como se observa la correlación existente por instrumentos equivalentes es mayor del 90 % y por lo tanto, se podría utilizar cualquiera de los dos tipos independientemente.

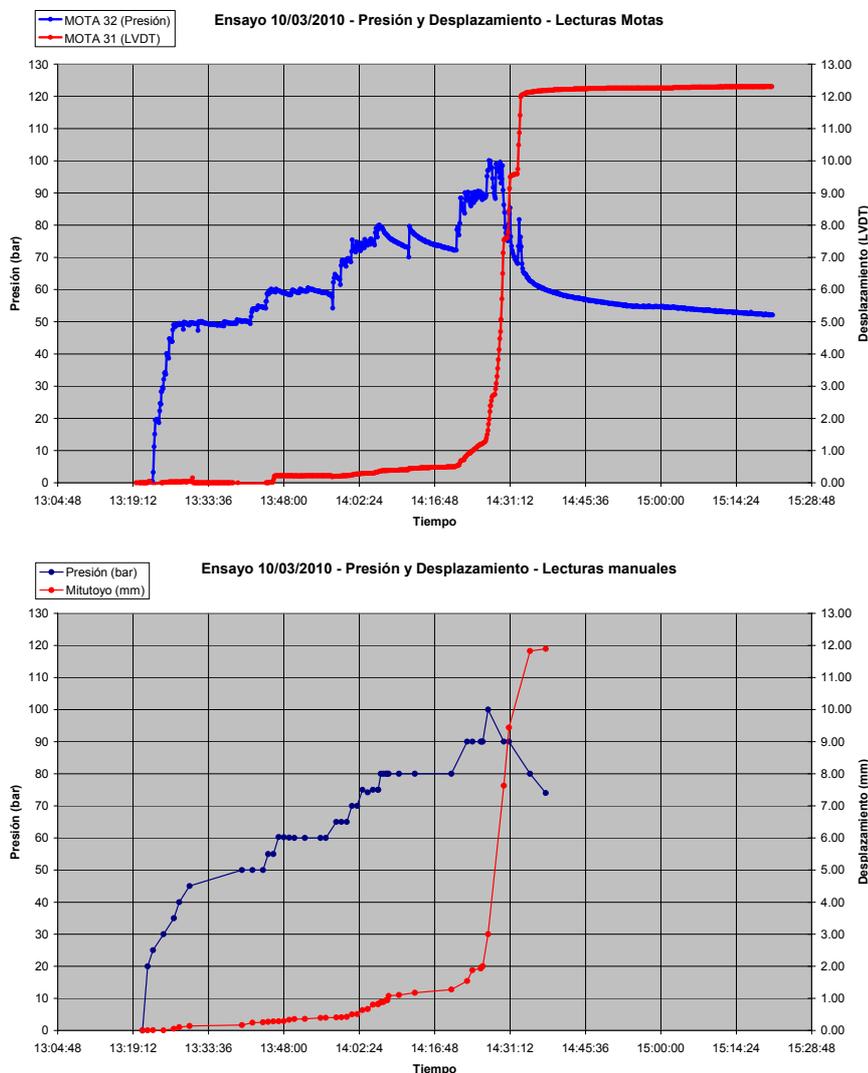


Figura 3.43. Comparativa de los registros de presión y desplazamiento de la instrumentación inalámbrica y manual.

El gráfico de la temperatura se adjunta en la Figura 3.44. Las oscilaciones se deben al funcionamiento del sistema de calefacción dentro de la nave de ensayos.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

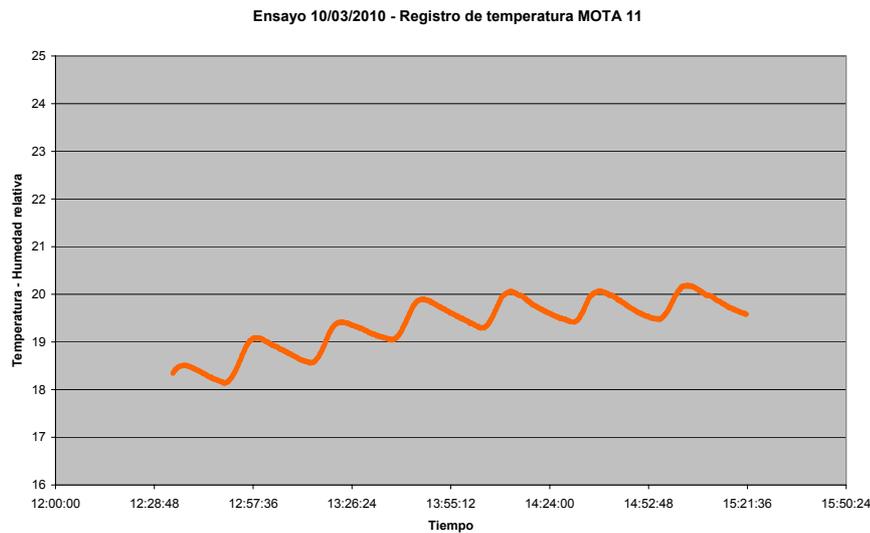


Figura 3.44. Evolución de la temperatura durante el ensayo de cosido en el muro de tapial.

En cuanto al estudio termográfico se debe notar que la cámara se situó a 2,5m del muro, perpendicular y centrada. En esta situación se veían la chapa metálica de reparto de cargas y casi toda la altura de la pared. Se programó un coeficiente de emisividad de 0.98. Además, para evitar variaciones en la escala de color que pudieran confundir durante el ensayo, se canceló la opción de ajuste automático del rango de medida y la escala se fijó entre los 14 y 21 °C. En cada escalón de carga se tomó una foto térmica.

Los resultados utilizados en el estudio con la cámara termográfica se presentan en la Tabla 3.7, sus imágenes se muestran en la figura siguiente.

Carga muro (t)	P gato (kg/cm <sup>2</sup> )	Salto Presión (kg/cm <sup>2</sup> )	Número imagen	Temperatura °C
2.648	20	--	294	14.4
3.31	25	5	295	14.9
3.972	30	5	296	14.8
4.634	35	5	297	15
5.296	40	5	298	14.4
5.958	45	5	299	14.6
6.62	50	5	300	15.4
7.944	60	5	301	15.4
8.606	65	5	302	15.3
9.268	70	5	303	15.3
9.93	75	5	304	15.8
10.592	80	5	305	16
11.916	90	10	306	15.6

Tabla 3.7. Datos utilizados en el ensayo de cosido con la cámara termográfica en el muro de tapial

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

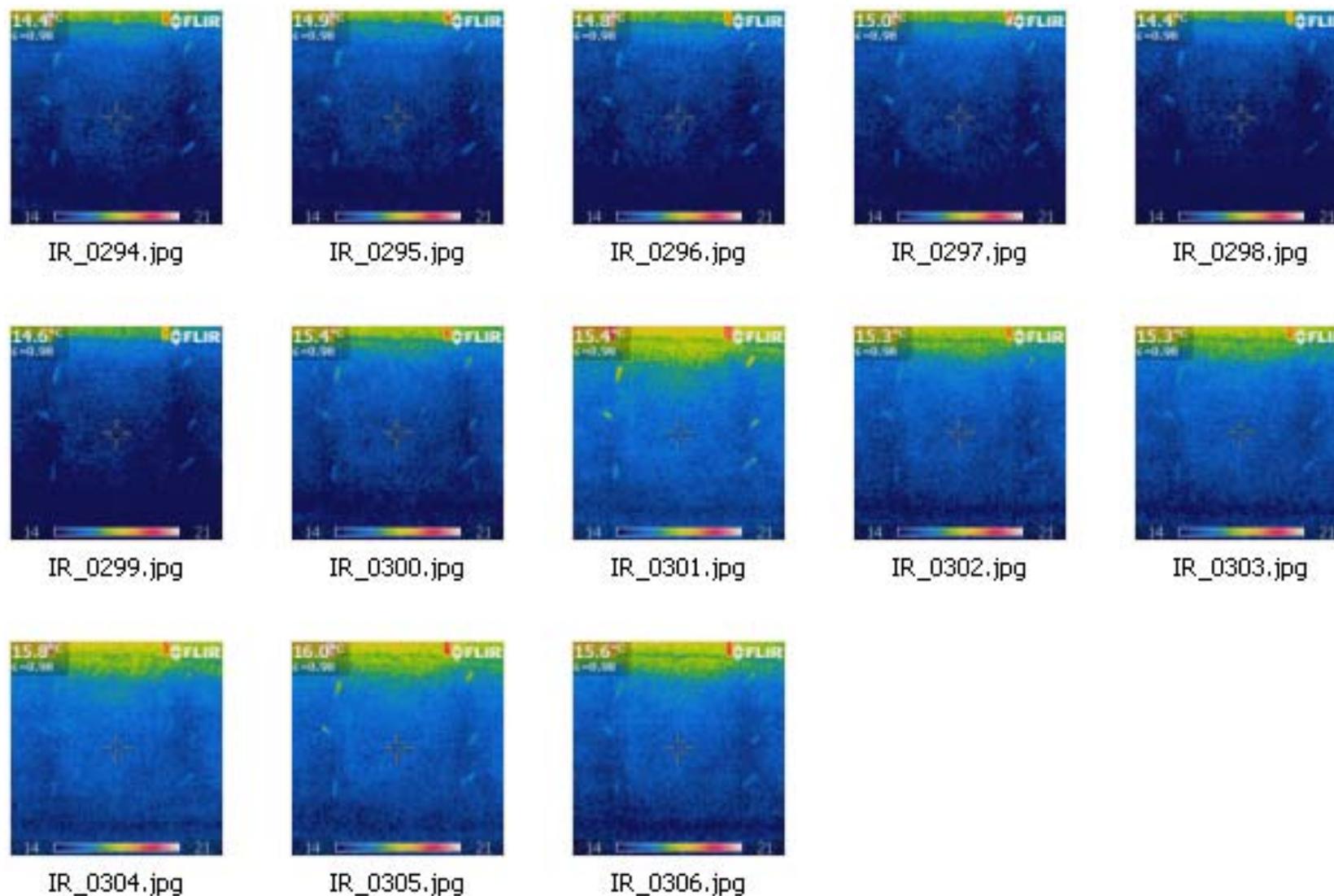


Figura 3.45. Imágenes térmicas recogidas durante el ensayo de cosido en el muro de tapial.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

Si se representan las temperaturas obtenidas con el sensor inalámbrico, la cámara (medida instantánea) y la referencia (Figura 3.46), siendo la referencia la temperatura que la cámara infrarroja marca al comienzo del minuto de medida, se observa que la diferencia de temperatura entre el sensor de ambiente y la cámara térmica se debe a la acumulación del aire caliente de la calefacción en la zona alta de la nave, que corresponde con la colocación del sensor ambiental.

Se observa una forma similar de la gráfica de la temperatura registrada por la cámara con el ciclo de funcionamiento de la calefacción de la nave; este ciclo también se refleja en el cambio de tonalidad de azul oscuro a azul claro de las termografías

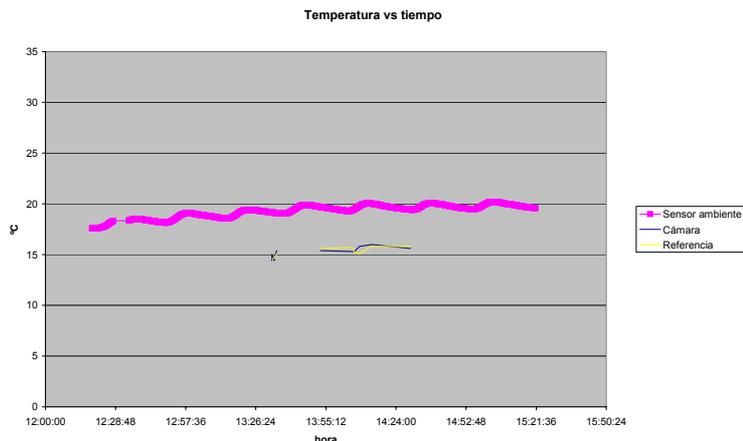


Figura 3.46. Comparativa de medidas de temperatura en el muro de tapial durante el ensayo de cosido.

Para determinar si se han producido cambios en la temperatura del muro al aplicar las cargas, se ha obtenido de la grabación de video un valor de referencia; este valor se corresponde con la temperatura instantánea que se registra en el momento que el reloj cambia de un minuto al siguiente.

Presión gato (kg/cm <sup>2</sup> )	Salto Presión (kg/cm <sup>2</sup> )	Número imagen	Temperatura (°C)	Temperatura referencia (°C)	Salto Temperatura (°C)
20	0	294	14.4	14.6	0.2
25	5	295	14.9	14.6	-0.3
30	5	296	14.8	14.6	-0.2
35	5	297	15	14.6	-0.4
40	5	298	14.4	14.6	0.2
45	5	299	14.6	14.6	0.0
50	5	300	15.4	15.1	-0.3
60	10	301	15.4	15.6	0.2
65	5	302	15.3	15.7	0.4
70	5	303	15.3	15.2	-0.1
75	5	304	15.8	15.1	-0.7
80	5	305	16	15.8	-0.2
90	10	306	15.6	15.8	0.2

Tabla 3.8. Datos de presión y temperatura calculados y adquiridos en el ensayo de cosido con la cámara termográfica en el muro de tapial.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

Representando los saltos de temperatura frente a la presión y al diferencial de presión se observa que no existe correlación entre las variables, es decir, todos los saltos de temperatura se pueden producir a cualquier carga o salto de carga.

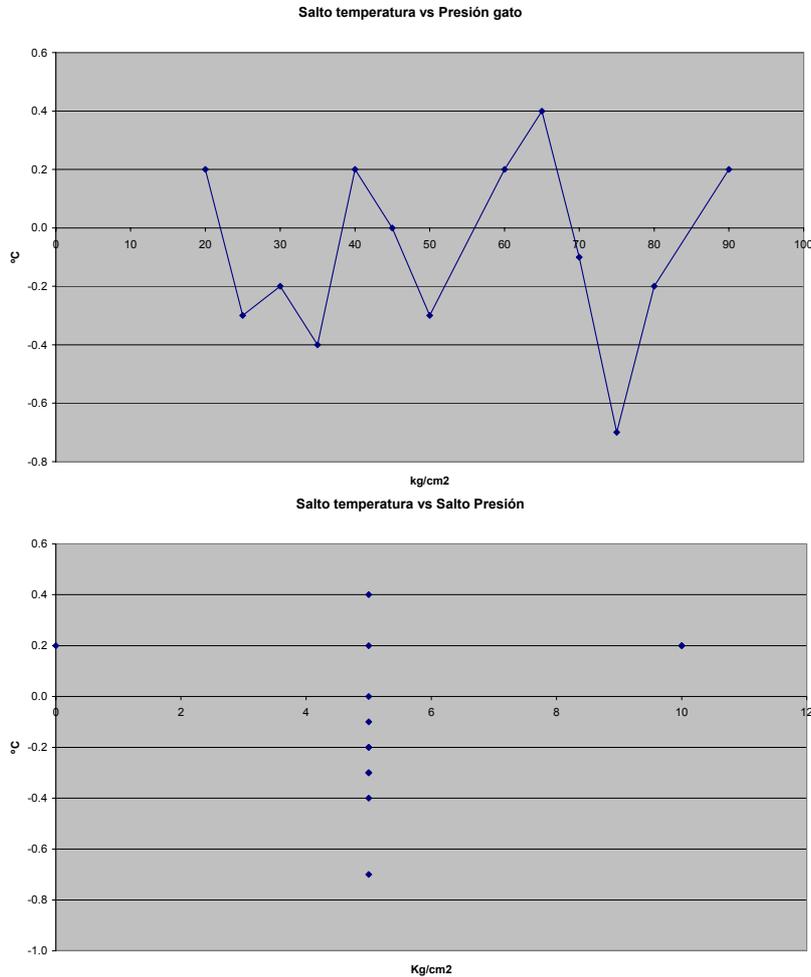


Figura 3.47. Comparativa de medidas de temperatura y saltos de presión.

Finalmente, en cuanto a las medidas realizadas en las bases de extensometría conviene notar que éstas se han colocado según se indica en las Figura 3.48 y Figura 3.49 procurando que fueran a un tercio de altura y además cerca de los cortes y las varillas para recoger una información más fidedigna si cabe. A diferencia con el muro de ladrillo macizo no se ha realizado la perforación en la parte central del muro porque en caso de llevarse a cabo existirían grandes posibilidades de que el muro se desmoronara. Por este motivo se ha efectuado el ensayo con el mismo procedimiento, es decir, aplicando escalones de carga en la parte central del muro y midiendo las deformaciones generadas en algunos pasos, a la vez que se ha medido el desplazamiento del bloque central en cada incremento de carga. Los datos obtenidos manualmente se encuentran en la Tabla 3.9. Así se puede estudiar el comportamiento de las varillas con las bases y conocer el diagrama tensión para esa zona.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

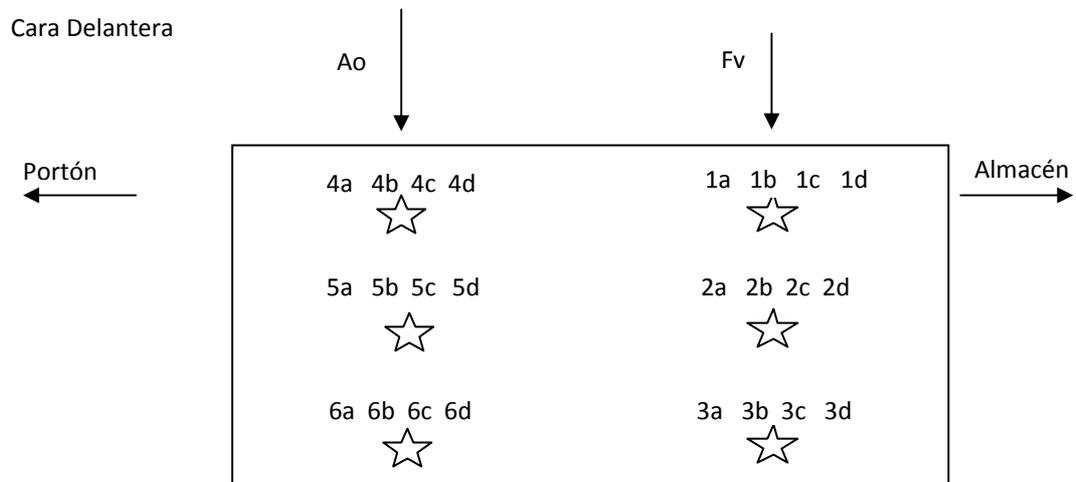


Figura 3.48. Esquema y fotografía de montaje de las bases extensométricas en la cara anterior del muro de tapial.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

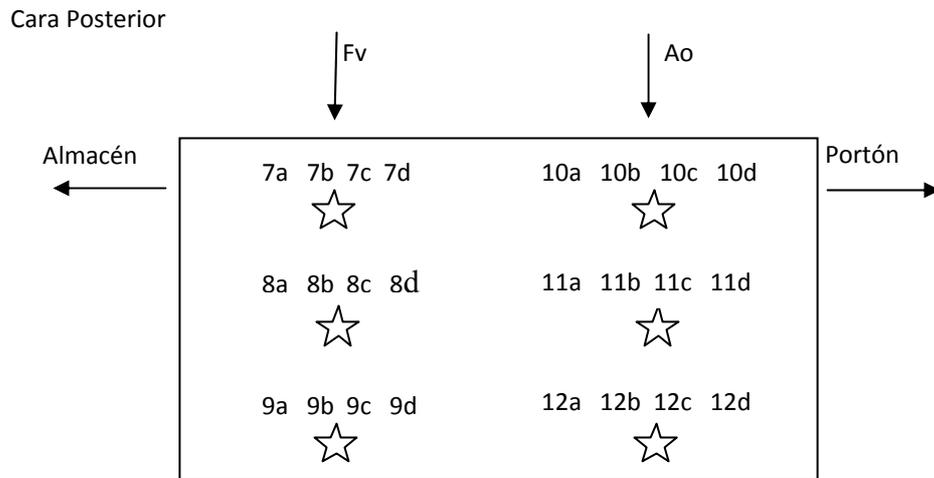


Figura 3.49. Esquema del montaje de las bases extensométricas en la cara posterior del muro de tapial.

Q Sección Central (t)	P gato (kg/cm <sup>2</sup> )	Lectura reloj (mm)	Tensión (kg/cm <sup>2</sup> )
0,0	0	0	0,00
2,6	20		0,26
3,3	25	0,007	0,11
4,0	30	0,034	0,13
4,6	35	0,063	0,16
5,3	40	0,104	0,18
6,0	45	0,145	0,20
6,6	50	0,252	0,22
7,3	55	0,271	0,24
7,9	60	0,4	0,27
8,6	65	0,452	0,29
9,3	70	0,55	0,31
9,9	75	0,83	0,33
10,6	80	1,274	0,35
11,9	90	2,04	0,40

Tabla 3.9. Carga aplicada, incrementos de presión, lectura del reloj comparador y la tensión calculada para el bloque central del muro de tapial

Del diagrama de tensión – deformación se deduce que el comportamiento plástico comienza a partir de los 55 bar de carga aplicada que se corresponde con 0.24 kg/cm<sup>2</sup> de tensión. Este valor es un valor extremadamente bajo de resistencia incluso para este tipo de material, también se notó durante la prueba que los desplazamientos eran mayores y las lecturas tardaban en estabilizarse.. El ensayo se dio por finalizado una vez que el bloque central sufrió un pequeño desplazamiento en bloque a la presión de 100 bar. Por lo tanto, la decisión de calicstrar fue adecuada ya resulta satisfactoria para este tipo de estructuras, no solo por el efecto estético sino también por el estructural.

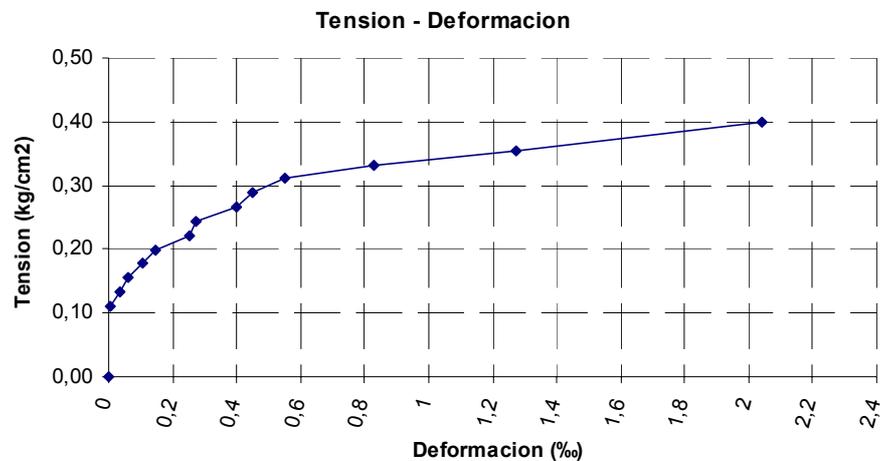


Figura 3.50. Diagrama tensión – deformación para el bloque central durante el ensayo de cosido en el muro de tapial.

En las siguientes figuras (Figura 3.51 y Figura 3.52) se muestran los resultados obtenidos con las bases. En referencia al cosido con fibra de vidrio se observa que las deformaciones son mayores en la base de la parte cargada, como era de esperar, ya que es ésta la que hace de tope y no puede continuar transmitiendo la carga. Además se comprueba que las varillas comienzan a trabajar a partir de  $0,32 \text{ kg/cm}^2$  de tensión, ya que es cuando la parte no cargada comienza a deformarse.

En cuanto a las varillas de acero, en ambas situaciones se comprueba que las varillas tienen un comportamiento lineal hasta que alcanzan el mismo nivel de tensión, a partir de ese instante las varillas comienzan a absorber los esfuerzos rasantes, prueba de ello, es que los más próximos a la aplicación de la carga son los que más se deforman y los más alejados los que dan lecturas más distantes entre sí. Además esta información viene corroborada por valores que alcanzan las varillas en el extremo no cargado, que presentan un comportamiento análogo pero a menor escala, como es de esperar.

Por lo que de la comparación de los dos grupos de varillas se comprueba una vez más que las varillas de fibra de vidrio tienen un comportamiento más acorde con el material de construcción, ya que se deforma de manera más gradual en comparación con el acero, que produciría los llamados puntos duros y quebraría la estructura a medio plazo.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

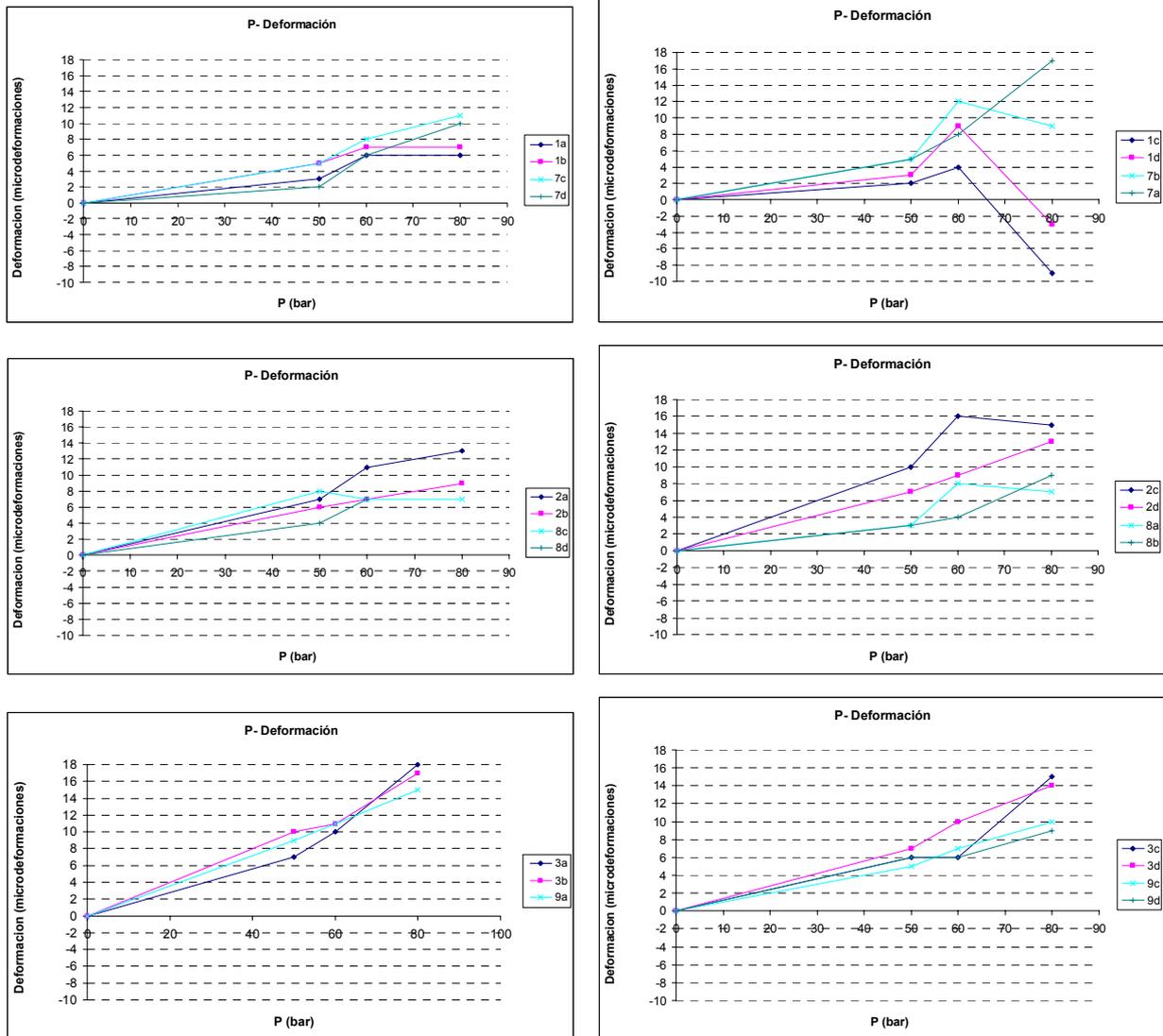


Figura 3.51. Deformaciones medidas con las bases en el cosido con varillas de fibra de vidrio, en la izquierda aparecen las correspondientes al bloque central y a la derecha aparece el extremo.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

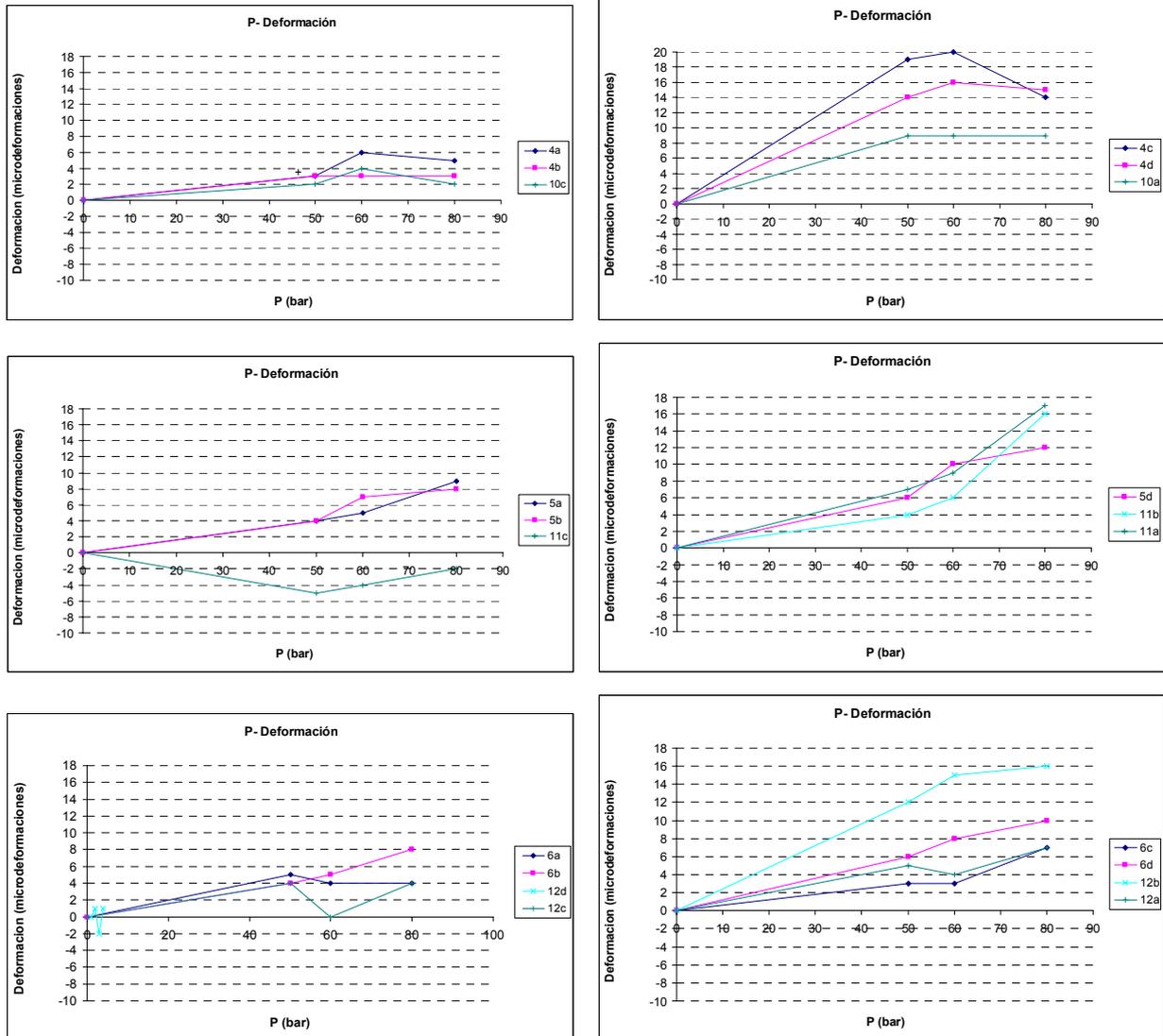


Figura 3.52. Deformaciones medidas con las bases en el cosido con varillas de acero, en la izquierda aparecen las correspondientes al extremo y a la derecha aparece el bloque central.

Una vez que esta tarea finalizó se procedió al desmantelamiento del banco de ensayos para la obtención de parte del material para el estudio de sus propiedades mecánicas. Como se temía, la mayor parte del material estaba disgregado y solo se han podido realizar un par de ensayo a compresión en 2 bloques de muro, de dimensiones 40 cm de lado. Éstos han dado unas resistencias muy bajas, 0.3 y 1 Kg/cm<sup>2</sup>. En general, estos resultados significan que en el ensayo de puesta en carga ya se sobrepasó el límite elástico y que si existiese una estructura con esta capacidad portante en la realidad haría imposible realizar cualquier tipo de intervención de este tipo.

### 3.3. MURO MAMPOSTERÍA

El siguiente muro estudiado ha sido el muro de mampostería. Las dimensiones han sido las mismas que la de los muros anteriores, esto es, 2 x 1 x 0.5 m, los mampuestos han sido de origen calizo y han sido ligados con un mortero de cal hidráulica en proporciones de 4 partes de arena y 1 de cal en un litro de agua. Una vez construido, se ha dejado a la intemperie para simular las condiciones reales de trabajo en los que se encuentra una estructura de este tipo (Figura 3.53).

Las operaciones llevadas a cabo han sido los comunes a todos ellos, es decir, la puesta en carga, un ensayo de gato plano, cortes con dos técnicas diferentes, cosido, prueba del cosido y pruebas secundarias (ensayos de compresión y flexotracción del mortero y lechada, y partes del muro).



Figura 3.53. Imagen general del muro de mampostería en el banco de ensayos.

#### 3.3.1. Puesta en Carga. Ensayo de Gato Plano

Dadas las circunstancias del muro de tapial, en las que quedó demostrado las condiciones tan sensibles de trabajo, se determinó ejecutar el traslado de la probeta y todos los ensayos con el mayor cuidado posible.

Una vez, colocado el muro en el banco de ensayos, y preparado para la ejecución de todas las operaciones, se advirtió que, el meteorización del mortero podría además haber afectado a zonas internas del muro, por este motivo el proceso de carga se ejecutó en escalones muy pequeños de carga como se indica en la Tabla 3.10 y muy lentamente para dar lugar a la estabilización de las lecturas. El resultado se ha representado en la Figura 3.54, ahí se aprecia una deformación excesiva, mayor de 4 ‰ frente a la

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

esperada, alrededor de 1.5 ‰. Este valor se antojó llamativo, aunque para cumplir con el compromiso de simular al máximo posible las condiciones reales, se continuaron las tareas planificadas, se realizó el ensayo de gato plano y se intentó realizar el ensayo de corte, pero el hecho de intentar perforar el muro para abrazar el muro con el hilo de diamante y comprobar que los mampuestos se movían ligeramente, bastó para paralizar las pruebas de corte y tomar las decisiones pertinentes, finalmente se optó por inyectar las zonas afectadas por las formas de meteorización con un mortero de cal hidráulica aditivado con una proporción de resina epoxi para que alcanzara resistencia lo antes posible. De esta manera, una vez transcurrido el tiempo de curado el muro se volvió a cargar en dos ciclos diferentes uno rápido y otro más lento para comprobar el funcionamiento del mismo (Figura 3.55). En la línea naranja se muestra la entrada en carga veloz y en la rosa la entrada en carga lenta (al menos transcurrieron 5 minutos entre incremento e incremento), como es de esperar, el proceso veloz posee una pendiente más acusada, o lo que es lo mismo es más rígido, mientras que en el segundo proceso, la pendiente es ligeramente menor, este efecto es debido a que los materiales tienen tiempo de reaccionar y adaptarse a sus nuevas posiciones y comenzar a trabajar en caso de ser necesario, sin embargo la resistencia final es prácticamente la misma, por lo que se podía concluir que el muro trabajaba correctamente y se podía continuar con el resto de las tareas planificadas. Además si se comparan los tres procesos de carga se observará que las deformaciones máximas han disminuido significativamente, alcanzando unos valores típicos de trabajo (Figura 3.56).

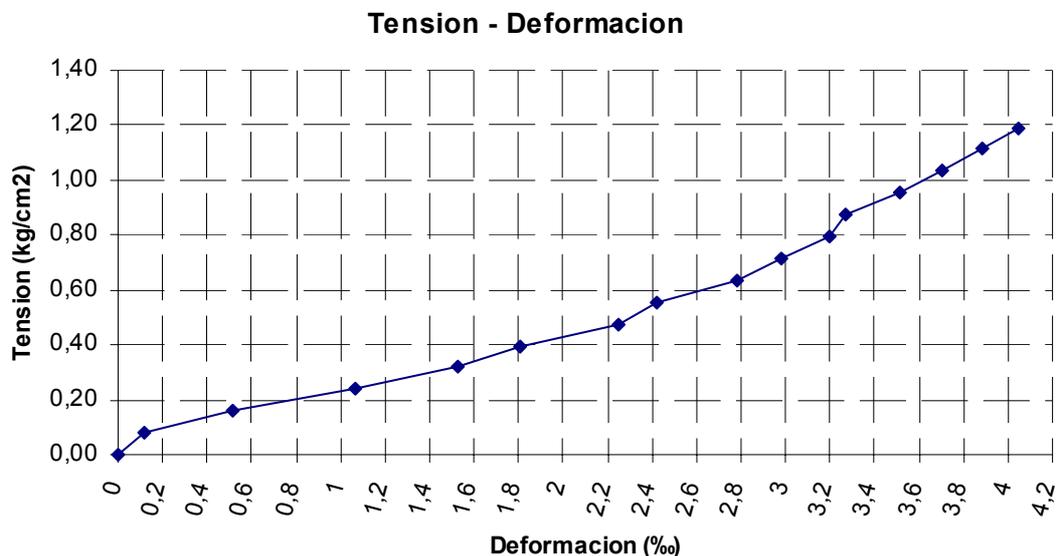


Figura 3.54. Diagrama tensión – deformación para el muro de mampostería.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

Q muro(t)	P gato (kg/cm <sup>2</sup> )	Micrometro (mm)	Tensión (kg/cm <sup>2</sup> )
0,0	0	0	0,00
0,8	2	0,12	0,08
1,6	4	0,518	0,16
2,4	6	1,07	0,24
3,2	8	1,529	0,32
4,0	10	1,81	0,40
4,8	12	2,249	0,48
5,6	14	2,423	0,56
6,4	16	2,781	0,64
7,1	18	2,977	0,71
7,9	20	3,2	0,79
8,7	22	3,274	0,87
9,5	24	3,518	0,95
10,3	26	3,707	1,03
11,1	28	3,884	1,11
11,9	30	4,045	1,19

Tabla 3.10. Escalones de carga aplicados al muro de mampostería.

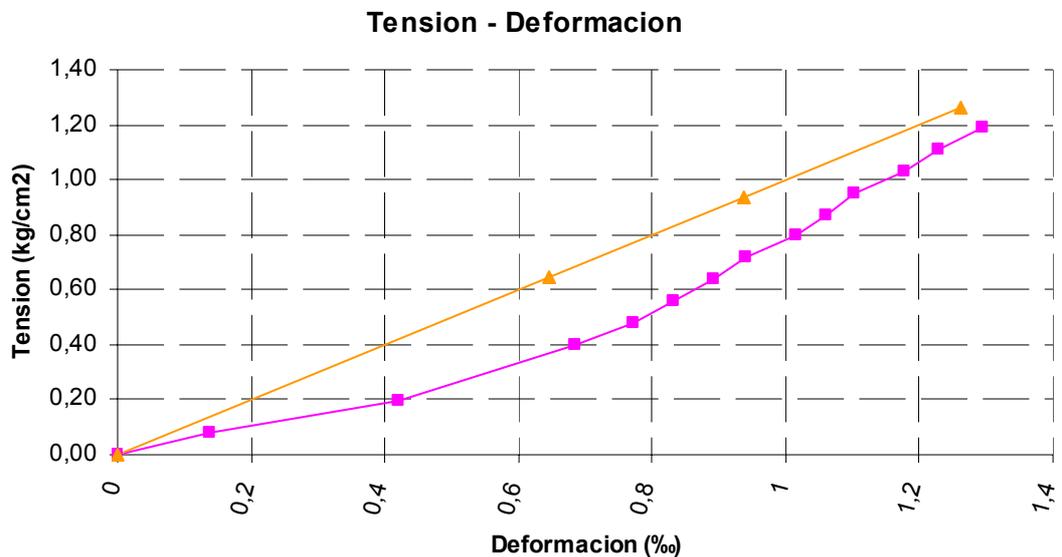


Figura 3.55. Diagrama tensión – deformación para el muro de mampostería inyectado.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

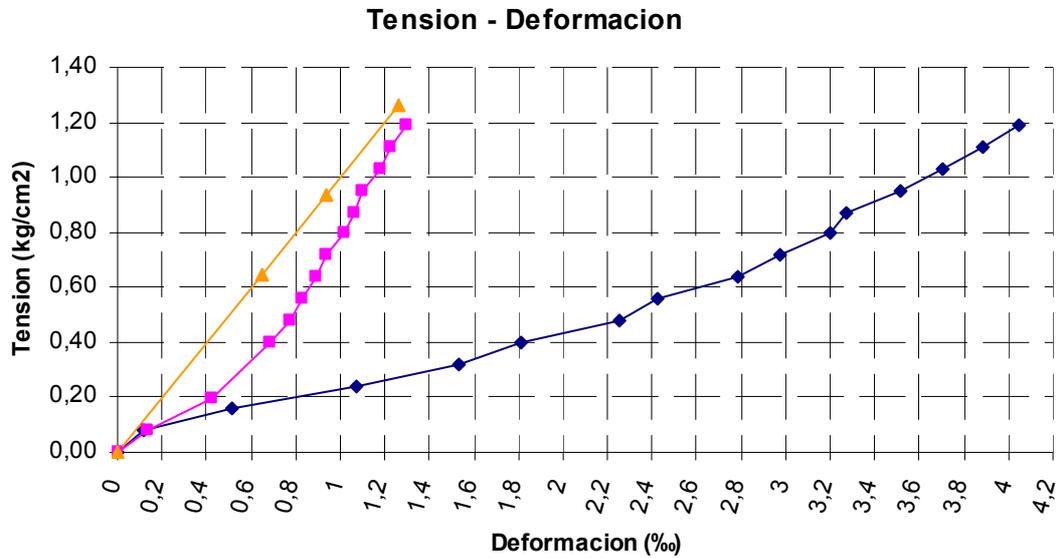


Figura 3.56. Comparativa de los diagrama tensión – deformación para los tres procesos de carga en el muro de mampostería.

Por otra parte, como ya se tenía constancia de la validez de los ensayos de gato plano en estas estructuras, se procedió además realizar uno en el mismo muro. El resultado se presenta en la gráfica siguiente (Figura 3.57). Como se advierte la tensión es  $0,76\text{kg/cm}^2$ , cantidad inusualmente baja. Este valor significa que el muro o bien no está trabajando, o bien la zona de contacto con el gato no es suficiente. Vistas las circunstancias, la causa más razonable parece ser que fuese esta última.

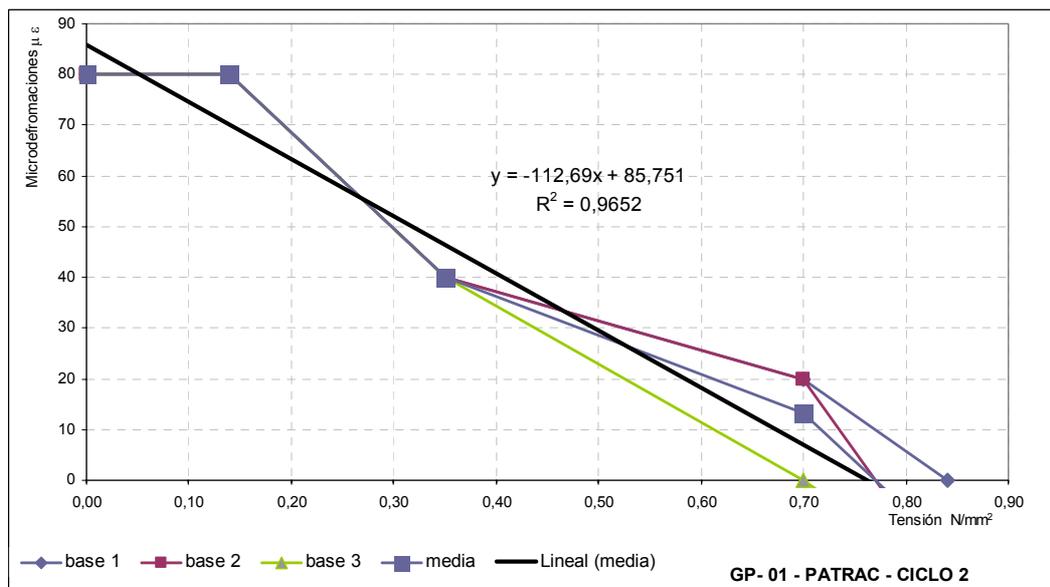


Figura 3.57. Resultados del ensayo de gato plano realizado en el muro de mampostería.

### 3.3.2. Estudio de Vibraciones con Diferentes Sistemas de Corte.

A fin de que las pruebas no se vieran afectadas se determinó realizar los cortes utilizando un hilo de diamante más fino y aplicando el líquido de refrigeración directamente sobre el hilo. Al igual que en los casos anteriores se analizaron en este apartado la instrumentación inalámbrica, los datos recogidos con la cámara termográfica así como con los acelerómetros.

De la instrumentación inalámbrica no se comentará información similar a los muros anteriores, sino que solo se presentarán los resultados obtenidos con ellos y la nueva aportación que se ha hecho con este muro y que se han añadido como sensores:

- Acelerómetro Dynatest Seismic Detector 86211-0855
- Módulo inalámbrico tipo Mota (Crossbow) con electrónica de adaptación para medida de acelerómetro.



Figura 3.58. **A la izquierda se aprecia la instalación de Transductor LVDT, acelerómetro y mota ambiental en el muro de mampostería. A la derecha se muestra la estación base recepción de motas.**

El acelerómetro Dynatest se colocó sobre la placa de distribución de carga de la sección central del muro.

Durante todo el proceso los sensores enviaron a la aplicación de monitorización los datos medidos por los transductores. Estos módulos enviaron una medida cada segundo. Para el acelerómetro, se realizó el disparo de adquisición rápida durante el proceso de corte con hilo de diamante. Este sistema permitió a la mota almacenar, durante periodos de dos minutos, un registro de 100 muestras/s.

El registro de datos obtenido comprende las medidas siguientes

- Desplazamiento del segmento central del muro (mm)
- Registro de la presión en la bomba hidráulica (bar)
- Registro de acelerómetro
- Condiciones ambientales del recinto del ensayo

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

- Temperatura ambiente (°C)
- Humedad relativa (%)
- Presión atmosférica (bar)
- Luminosidad (lux)

A continuación se presentan los registros obtenidos por las mota con acelerómetro (Figura 3.59) y mota ambiental (Figura 3.60 y Figura 3.61). El registro se realizó con una frecuencia de adquisición de una medida por segundo. En el caso del acelerómetro se midió también a 100 Hz. En la Figura 3.59 se nota que si bien quedan registradas algunas variaciones sobre el valor de reposo, el rango de medida y la velocidad de muestreo no permitieron extrapolar información válida para este tipo de ensayo. A partir de las 11.00 h se produjo una variación del valor en reposo que pudo ser debida a una tensión de alimentación insuficiente.

En cuanto al transductor de desplazamiento, éste no indicó ningún desplazamiento del bloque central durante los cortes, lo que indica el buen funcionamiento de las inyecciones realizadas con anterioridad.

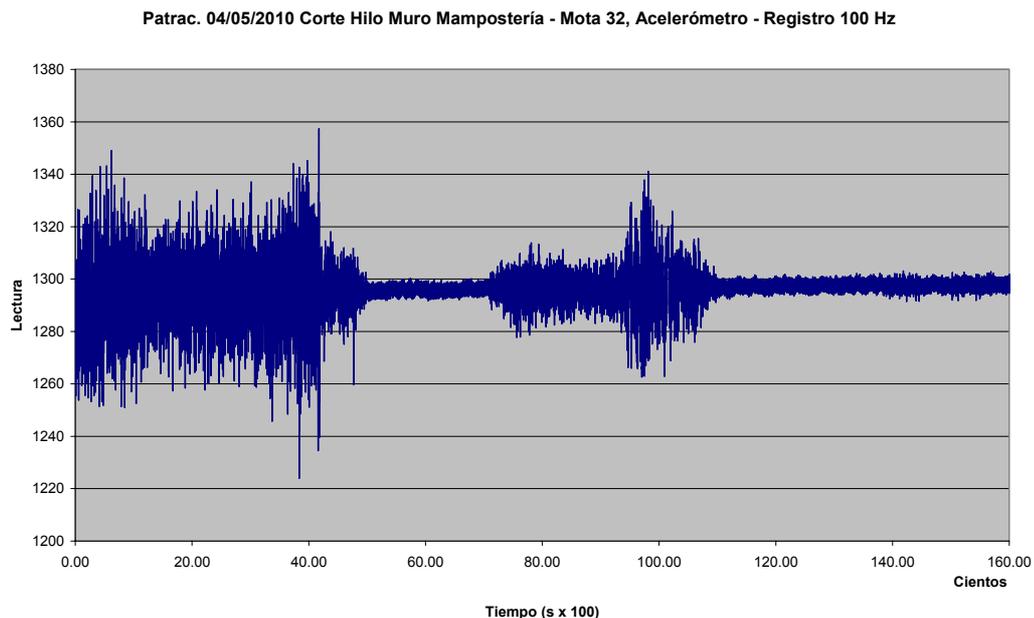


Figura 3.59. Registro adquirido con la mota con acelerómetro a 100 Hz/s durante el corte con hilo de diamante en el muro de mampostería.

E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

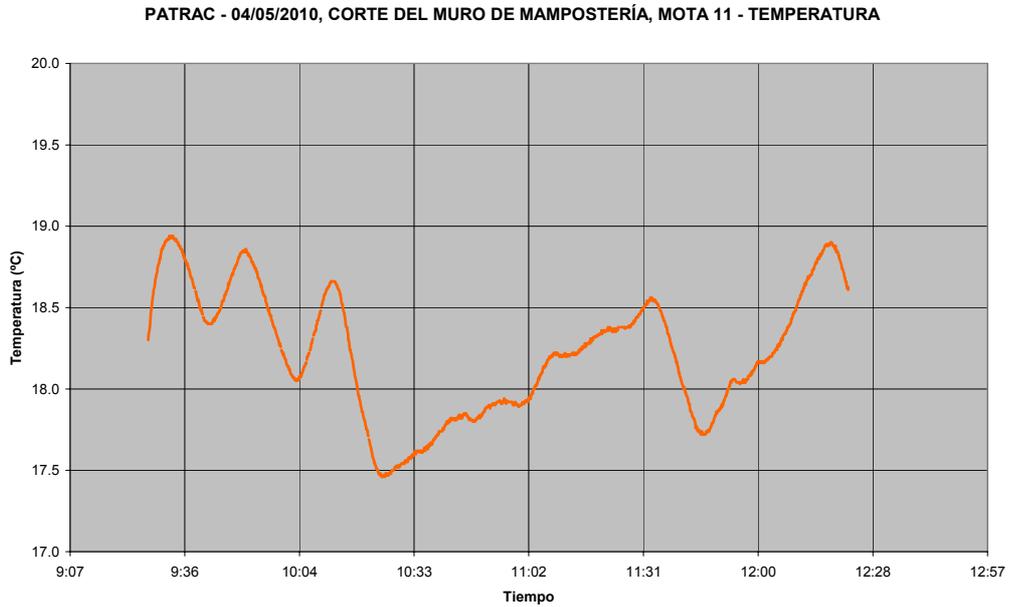


Figura 3.60. Temperatura en la nave de ensayo durante los cortes en el muro de mampostería.

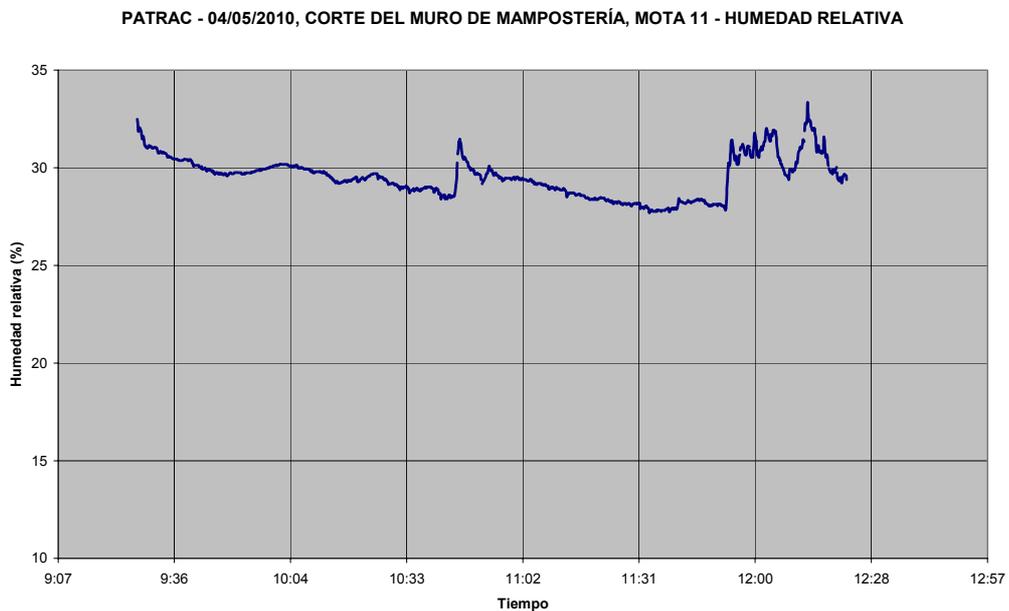


Figura 3.61. Registro de humedad relativa en la nave de ensayo durante los cortes en el muro de mampostería.

Para el estudio de las vibraciones se han utilizado los sensores utilizados con anterioridad fijado en las mismas posiciones que en los muros previos y con el mismo criterio de colores (Figura 3.7 y Figura 3.62).

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación



Figura 3.62. Localización de acelerómetros alámbricos en el muro de mampostería.

Igual que en los cortes previos se ha registrado el taladro pasante y el corte con hilo de diamante, el montaje del sistema de anclaje de la sierra y su corte. Una vez más, la cámara se situó en una posición alejada de la perpendicular del muro por el elevado volumen de las máquinas de corte y para evitar salpicaduras del líquido de refrigeración. En esta situación, la cámara quedó a 3 m de la línea de corte de hilo de diamante y a 2,2 m de la línea de corte con radial. La imagen muestra el muro en casi toda su altura. Se programó en la cámara un coeficiente de emisividad de 0.98. Durante todo el ensayo se realizó una grabación continua de la imagen de la cámara térmica; el rango de medida de la cámara se seleccionó manualmente entre 14 y 26 °C; posteriormente, durante el corte con el disco, se incrementó el rango hasta 37°C. Al finalizar los cortes, se tomaron fotografías térmicas de la pared para intentar apreciar la huella de calor.

Los registros continuos de vibraciones se han procesado para obtener el espectro de frecuencias de la aceleración y, por integración, el espectro de frecuencias de velocidad. Este cálculo se realiza para poder comparar los resultados de las medidas con la norma DIN 4150.

Los resultados del corte con hilo de diamante se muestran en los gráficos de la Figura 3.63. Los sensores que miden las vibraciones producidas por el hilo de diamante son X2, Y y Z. Nótese que al estar intacto todavía el muro, el sensor X1 recoge medidas muy similares al sensor X2 durante el taladrado inicial y las primeras fases del corte. Al final de la adquisición, el sensor X1 es menos sensible al proceso de corte, como cabía esperar. En cualquier caso, el modo más excitado es el primero en sentido longitudinal, como ha ocurrido también en los casos anteriores a una frecuencia de unos 900 Hz y  $80 \times 10^{-6}$  de amplitud.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación



Figura 3.63. Espectros de aceleración en el corte con hilo de diamante en el muro de mampostería.

Mientras que Los sensores que miden las vibraciones producidas por la sierra radial son X1, Y y Z. El registro del sensor X2 carece de sentido físico. En la Figura 3.64 se muestran los espectros más significativos del montaje del sistema de anclaje de la sierra de disco. En ellos se aprecia que los ceros de los acelerómetros longitudinales han quedado desplazados. Todas las señales contienen mucho ruido y la frecuencia más nítida es la que recoge el acelerómetro vertical a unos 9 kHz, valor altísimo que no afecta en absoluto al comportamiento del muro. Esto demuestra una vez más, el buen funcionamiento del inyectado previo.



Figura 3.64. Espectros de aceleración durante el taladro del sistema de anclaje de la sierra de disco el muro de mampostería.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

Durante el proceso de corte con sierra de disco, fue necesario utilizar dos discos de diferente diámetro para cortar la mayor cantidad de estructura automáticamente. A continuación se muestran los espectros más significativos de aceleraciones con los dos tipos de discos (Figura 3.65 y Figura 3.66). En este corte, cuando la sierra está en contacto con el muro la excitación vertical es más significativa que la excitación longitudinal, sin embargo según el corte avanza la respuesta longitudinal predomina, con un máximo de  $480 \cdot 10^{-6}$  de amplitud. Además, la frecuencia vertical se corresponde con el sexto modo de vibración. El offset de las señales longitudinales no se debe tener en cuenta. En ningún caso la magnitud es diferente de los otros casos estudiados, y conforme a la norma DIN 4150 las estructuras no se verían afectadas por este tipo de intervención.

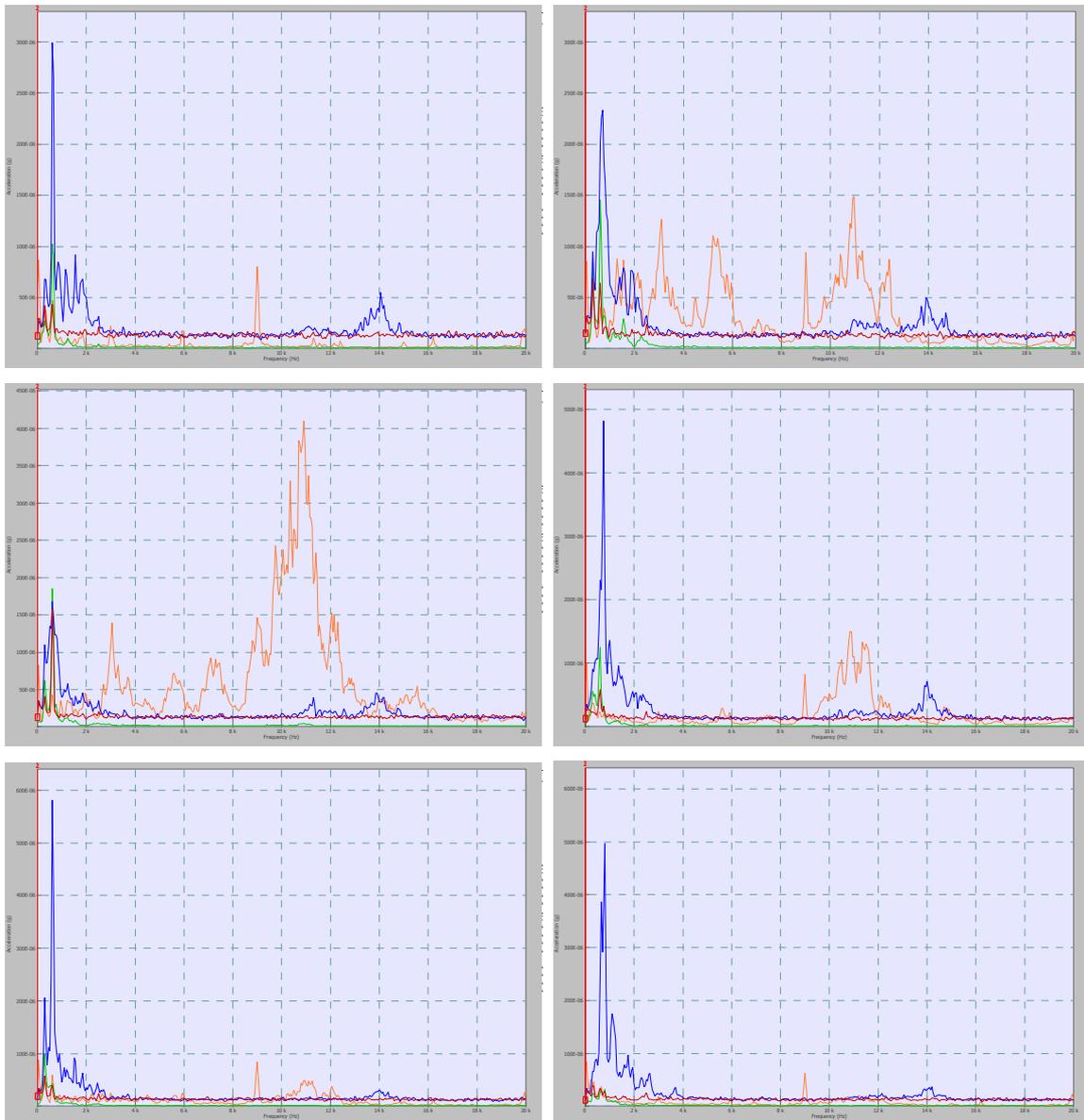


Figura 3.65. Espectros de aceleración del corte con el primer disco en el muro de mampostería.

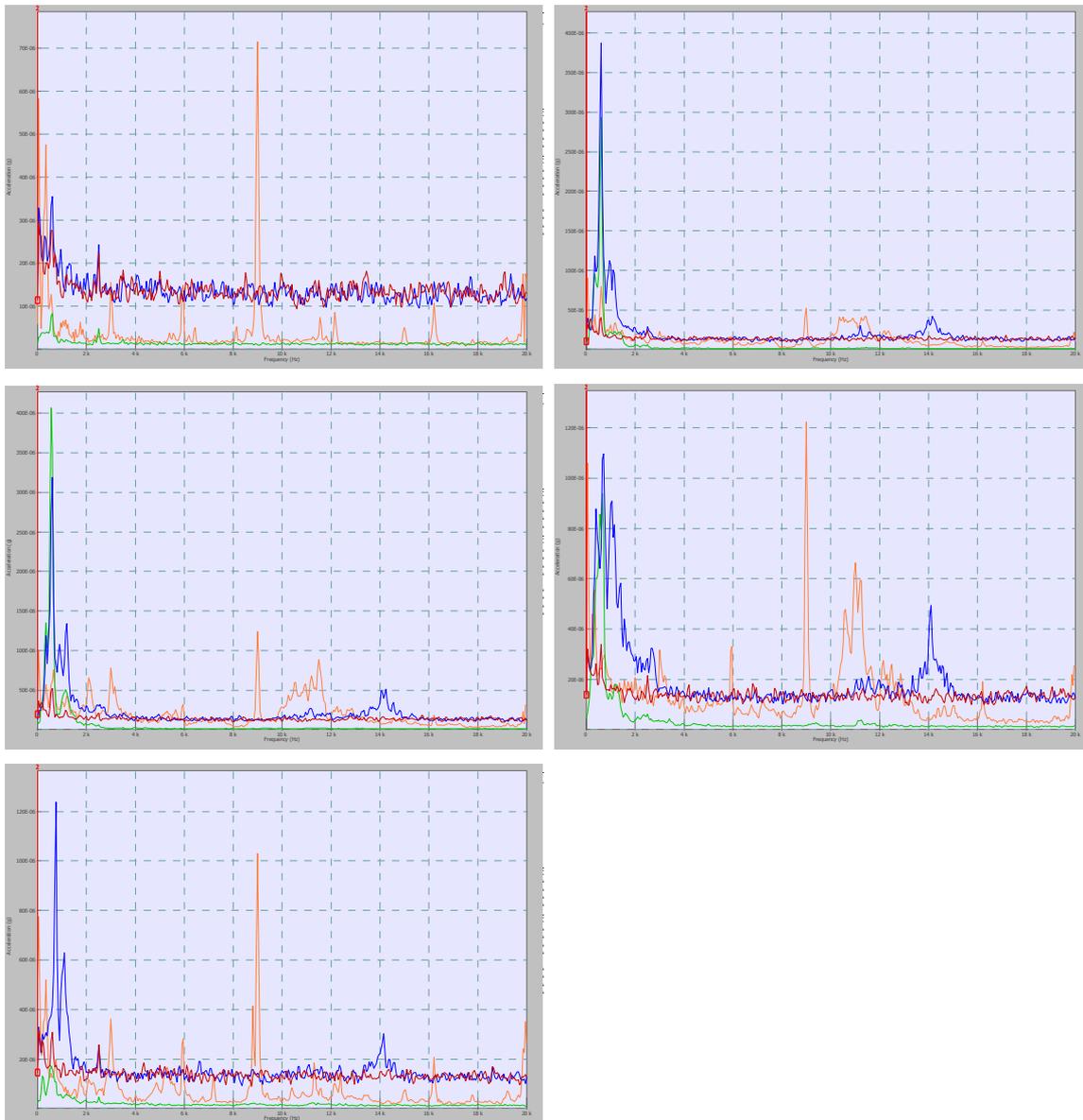


Figura 3.66. Espectros de aceleración del corte con el segundo disco en el muro de mampostería.

De la comparativa de los dos métodos de corte se observa que el corte con hilo de diamante ha producido valores de aceleración entre 0,45 y 0,9 mG, superiores a los obtenidos con la sierra de disco, 0,12 y 0,58mG.

De la grabación continua de imágenes térmicas se han extraído los fotogramas más significativos. Para facilitar la interpretación, cada imagen térmica se ha acompañado de su correspondiente imagen en el espectro visible. Al tratarse de cámaras diferentes, el ángulo de visión no ha sido exactamente el mismo. Debido a la forma de los discos no se ha podido realizar el corte de la probeta en su totalidad. La zona sin cortar ha permanecido seca y ha permitido obtener, por primera vez, una imagen de la zona de influencia térmica.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

---

La línea vertical indica el surco dejado por la sierra de disco, mientras que el objeto brillante horizontal, situado en contacto con la superficie de la pared, sirve como referencia de tamaño de la huella térmica.

Se han montado dos imágenes térmicas para tener sensación de continuidad; sin embargo, al no haber sido tomadas desde la misma posición, la escala no ha sido idéntica. Solamente se ha podido obtener indicación de distancia en la imagen que tiene el objeto horizontal, el cual mide 13cm.

Además, el hecho de que el ensayo se haya realizado en días fríos ha influido positivamente en la obtención de resultados. De hecho, tanto el agua de refrigeración como el muro mismo se encontraban a una temperatura muy inferior a la que se alcanza por la acción del corte, por lo que se ha obtenido un claro contraste en la imagen.

Durante el primer corte la refrigeración se realizó con una manguera sobre la superficie de la pared, empapando toda la zona de corte. Las imágenes tomadas reflejan el calentamiento del hilo de corte; la temperatura máxima detectada se podía medir desplazando el cursor sobre el punto del que se quería conocer la temperatura.

La temperatura alcanzada durante el corte de la pared se obtuvo estudiando el hilo y la proyección de agua por la parte inferior del lazo; la imagen 6 muestra valores próximos a 23°C. También como muestra la octava imagen térmica, una vez finalizado el corte, la pared se enfrió rápidamente y no quedó huella térmica del corte.

En el caso del corte con la sierra de disco la refrigeración de la sierra se realizó mediante un chorro de agua sobre una de las caras del disco (la orientada hacia la posición de la cámara térmica); de esta manera, solo quedó humedecida la superficie del muro por uno de los lados del corte. La huella del corte en la pared de la imagen 6, tras finalizar el corte, muestra valores próximos a 30°C.

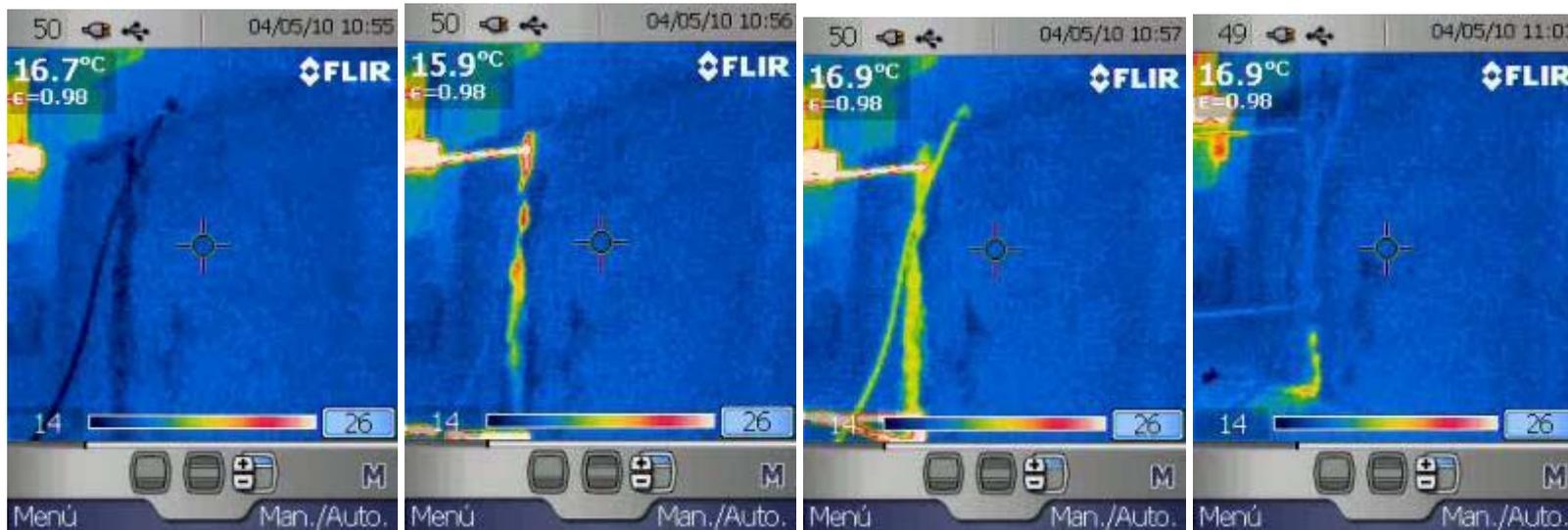
Las imágenes 7 y 8 muestran la huella térmica que quedó en la pared hasta 5 minutos después de finalizado el corte. El objeto de referencia (color blanco) mide 13 cm.

De la comparación de los dos cortes se puede concluir que el corte por disco de sierra genera mayor calentamiento, aproximadamente 32°C), que el hilo de diamante, 24°C.

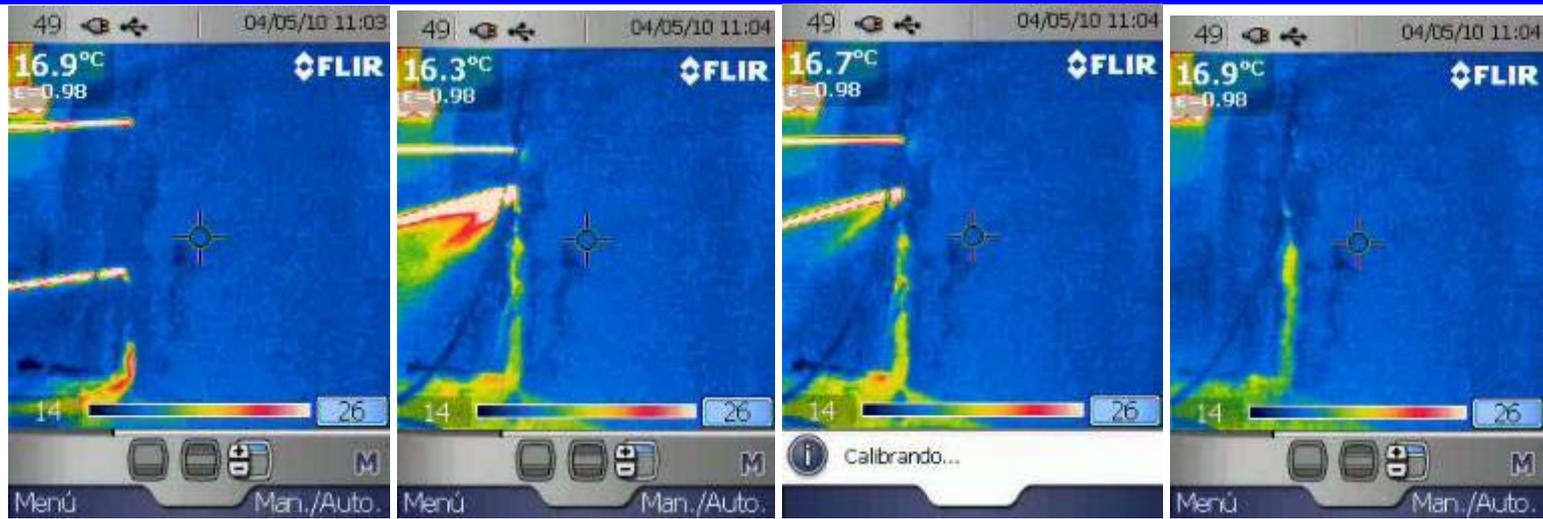
La temperatura del corte del hilo de diamante se disipó más rápido que la del corte con sierra radial. Y, la zona de influencia térmica del corte por sierra radial fue mayor que la de hilo de diamante y ha podido ser cuantificada. Desde la línea de corte, la huella se extendió unos 13cm a cada lado.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

### Corte con hilo de diamante

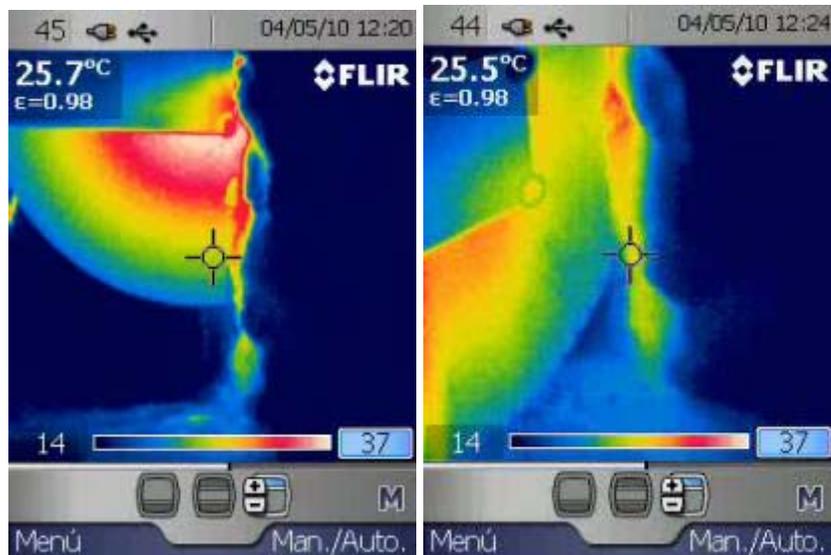
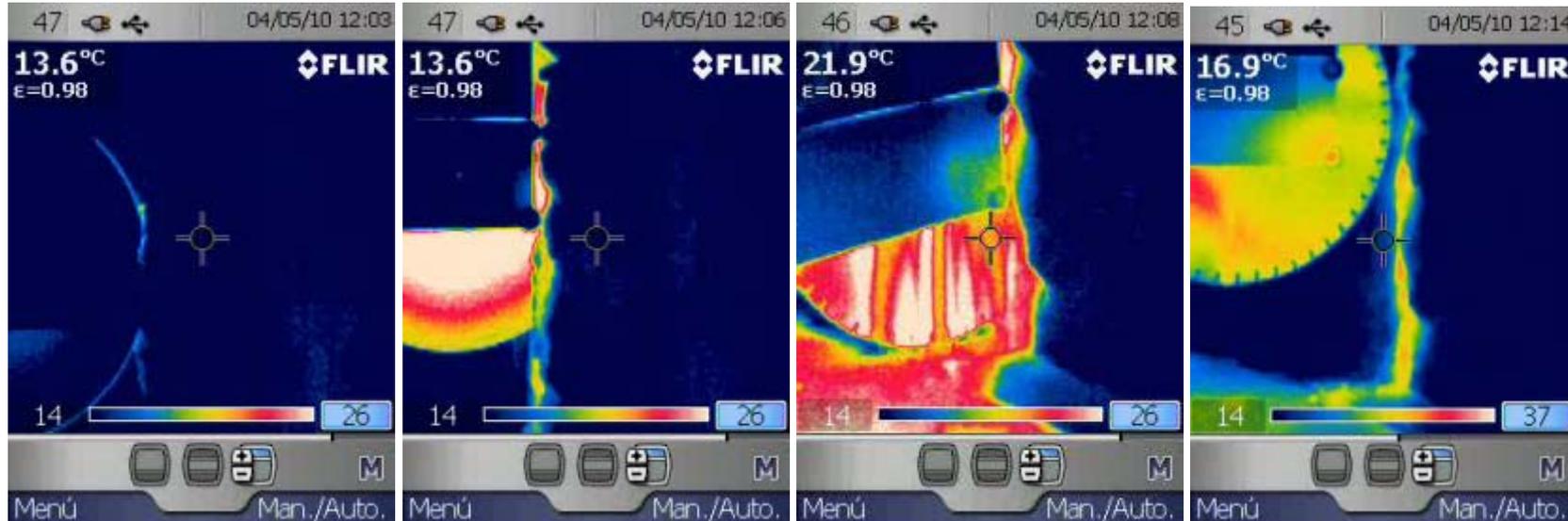


## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación



## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

### Corte con Sierra de Disco

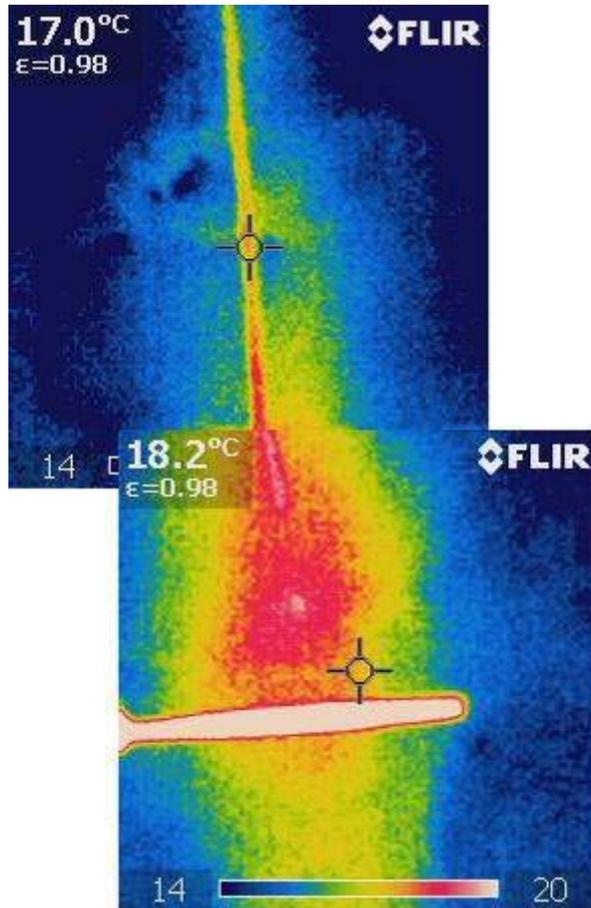


## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación



## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

### Zona de influencia térmica del corte con sierra de disco



## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación



### 3.3.3. Ensayos de los Cosidos

La siguiente tarea a realizar fue el cosido de las partes del muro recién cortadas. Para ello se reajuntó con el mismo tipo de mortero que en los muros anteriores y haciendo el mismo control de dureza que en los muros previos. Las varillas fueron también las mismas y lechada, como se ha explicado con detalle en el apartado 3.1.3. El estudio ha sido similar al realizado en los otros muros, es decir, se ha hecho un análisis de la instrumentación inalámbrica utilizada, las imágenes termográficas tomadas y las bases de extensometría ubicadas en posiciones similares al muro de tapial.

En este apartado se ofrecerán y analizarán los resultados provenientes de la instrumentación inalámbrica. Los registros adquiridos fueron:

- Desplazamiento del segmento central del muro durante los proceso de corte
- Condiciones ambientales del recinto del ensayo
  - Temperatura ambiente (°C)
  - Humedad relativa (%)
  - Presión atmosférica (bar)
  - Luminosidad (lux)

En este caso la carga se aplicó al total del muro, no solamente a la zona central, en pequeños escalones de carga. El ensayo comenzó aproximadamente a las 13:00. Se realizaron varios escalones de carga hasta alcanzarse los 80 bares a las 14:00. A continuación, se dejó esta presión mantenida durante algo más de una hora. Se reanudaron los escalones de carga sobre las 15:05 hasta las 16:00 en que finalizó el ensayo.

En el periodo comprendido entre las 14:00 y las 15:00 el sensor de presión se desconectó del sistema, por lo que si bien el registro de la MOTA 33 fue de 0 bares, la carga sobre el muro se mantuvo en 80 bares.

También hay que considerar que la posición de la LVDT se reajustó a las 15:20 porque llegó al límite de medida.

Durante todo el proceso los sensores enviaron a la aplicación de monitorización los datos medidos por los transductores. Estos módulos enviaron una medida cada segundo.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

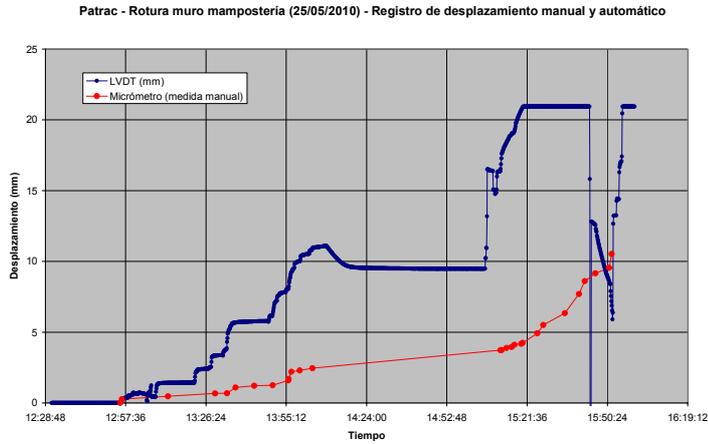


Figura 3.67. Desplazamientos manual y automático ocurridos durante el ensayo de cosido en el muro de mampostería.

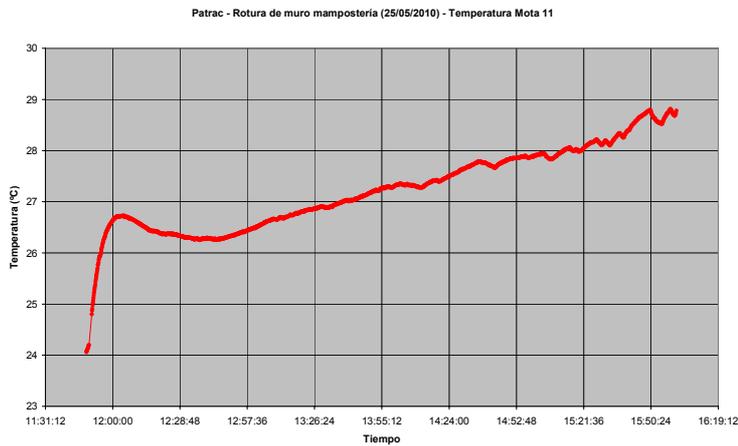


Figura 3.68. Temperatura registrada durante el ensayo de cosido en el muro de mampostería.

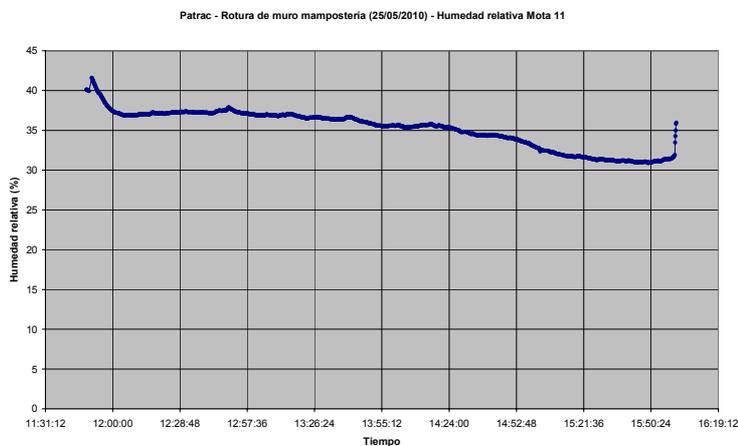


Figura 3.69. Humedad relativa registrada durante el ensayo de cosido en el muro de mampostería.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

En cuanto a las imágenes térmicas tomadas, la cámara se situó a 2,5m del muro, en perpendicular y ligeramente desviada hacia la izquierda. En esta situación se veían la chapa metálica de reparto de cargas y casi toda la altura de la pared. El coeficiente de emisividad fue de 0.98

Para evitar variaciones en la escala de color que pudieran confundir durante el ensayo, se canceló la opción de ajuste automático del rango de medida; y la escala se fijó entre los 22 y los 30 °C.

Mediante los gatos hidráulicos se aplicaron diferentes niveles de carga hasta la presión máxima prevista. Cada vez que la carga alcanzaba un valor predeterminado se tomó una foto térmica.

La Tabla 3.11 indica los escalones de carga aplicados, el número de imagen correspondiente y su temperatura.

Carga muro(t)	Presión gato (kg/cm <sup>2</sup> )	Salto Presión (kg/cm <sup>2</sup> )	Número imagen	Temperatura (°C)	Temperatura referencia (°C)	Salto Temperatura (°C)
0.000	0	0	329	24.1	24.1	0.0
0.662	5	5	330	23.9	23.9	0.0
1.324	10	5	331	24.0	23.9	-0.1
1.589	12	2	332	24.4	24.3	-0.1
2.118	16	4	333	23.9	24.3	0.4
5.296	40	24	334	24.3	23.9	-0.4
6.620	50	10	335	24.1	24.2	0.1
7.944	60	10	337	24.1	24.0	-0.1
9.268	70	10	338	24.2	23.9	-0.3
10.592	80	10	339	24.1	24.2	0.1
11.916	90	10	340	24.3	24.8	0.5
13.240	100	10	341	24.4	24.4	0.0
14.564	110	10	342	24.6	24.5	-0.1
15.888	120	10	343	24.7	24.8	0.1
17.212	130	10	344	25.1	24.9	-0.2
18.536	140	10	345	24.4	24.7	0.3
19.860	150	10	346	24.4	24.7	0.3
21.184	160	10	347	24.7	24.6	-0.1
22.508	170	10	348	25.2	25.1	-0.1

Tabla 3.11. Escalones de carga aplicados al muro de mampostería durante el ensayo de cosido.

La imagen siguiente muestra todas las imágenes térmicas tomadas durante el ensayo; todas ellas se tomaron con un rango de medida entre 22 y 30 °C

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación



IR\_0329.jpg



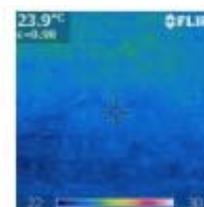
IR\_0330.jpg



IR\_0331.jpg



IR\_0332.jpg



IR\_0333.jpg



IR\_0334.jpg



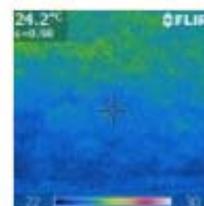
IR\_0335.jpg



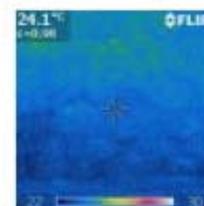
IR\_0336.jpg



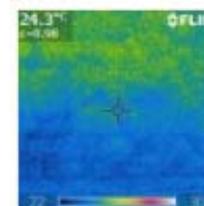
IR\_0337.jpg



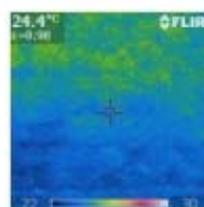
IR\_0338.jpg



IR\_0339.jpg



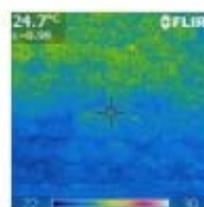
IR\_0340.jpg



IR\_0341.jpg



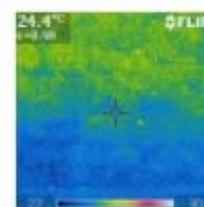
IR\_0342.jpg



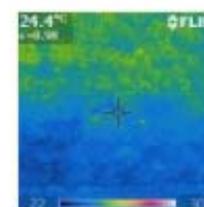
IR\_0343.jpg



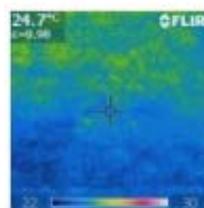
IR\_0344.jpg



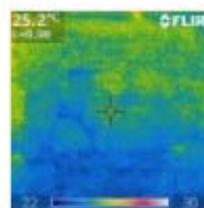
IR\_0345.jpg



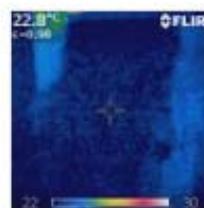
IR\_0346.jpg



IR\_0347.jpg



IR\_0348.jpg



IR\_0349.jpg



IR\_0350.jpg

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

Si se representan las medidas de temperatura adquiridas con el sensor inalámbrico, y las tomadas con la cámara, la lectura instantánea y de referencia (al inicio del minuto de la lectura instantánea) - Figura 3.70 - se observa que la diferencia de temperatura entre el sensor de ambiente y la cámara térmica se debe a la acumulación del aire caliente en la zona alta de la nave, que corresponde con la colocación del sensor ambiental.

Para determinar si se han producido cambios en la temperatura del muro al aplicar las cargas, se ha obtenido de la grabación de video un valor de referencia; este valor se corresponde con la temperatura instantánea que se registra en el momento que el reloj cambia de un minuto al siguiente.

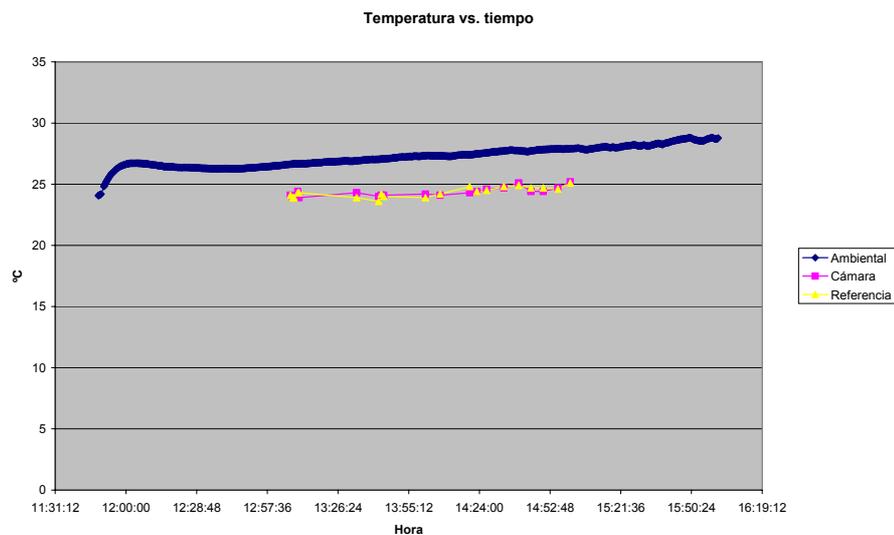


Figura 3.70. Comparativa de temperaturas registradas con diferentes sensores durante el ensayo de cosido en el muro de mampostería.

En este caso también se nota que representando los saltos de temperatura frente a la presión y al diferencial de presión no existe correlación entre las variables, es decir, todos los saltos de temperatura se pudieron producir a cualquier carga o salto de carga (Figura 3.71 y Figura 3.72).

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

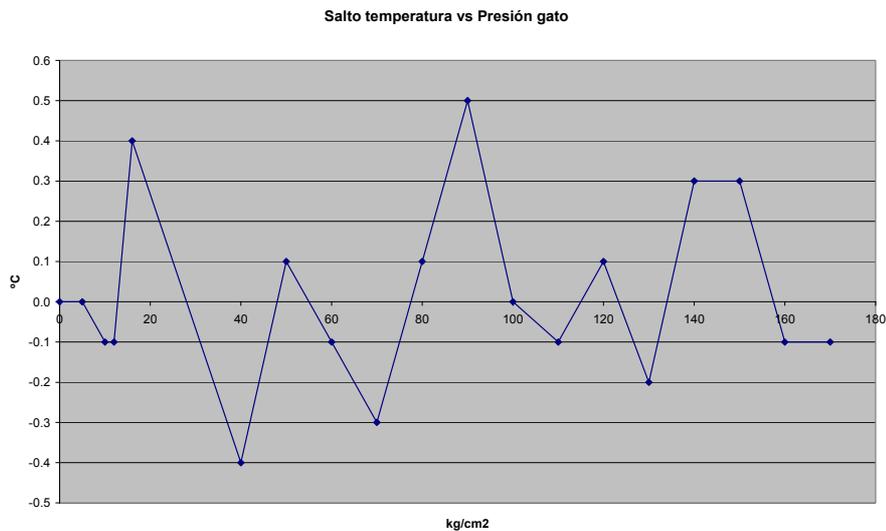


Figura 3.71. Comparativa de salto de temperaturas con la presión aplicada durante el ensayo de cosido en el muro de mampostería.

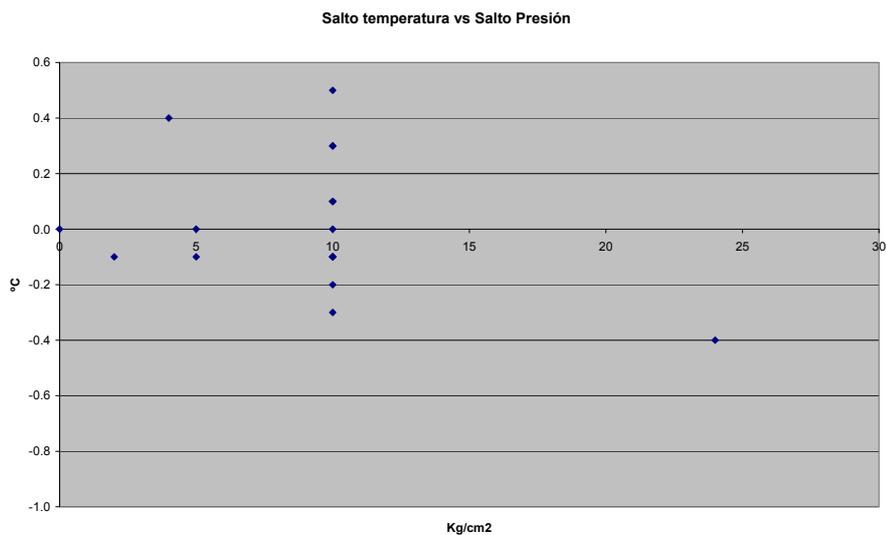


Figura 3.72. Comparativa de salto de temperaturas con los saltos de presión durante el ensayo de cosido en el muro de mampostería.

Tras la rotura, el muro se desmoronó por el lado izquierdo, lo que permitió obtener imágenes térmicas del interior (números 349 y 350). Estas imágenes no mostraron calentamiento interno.

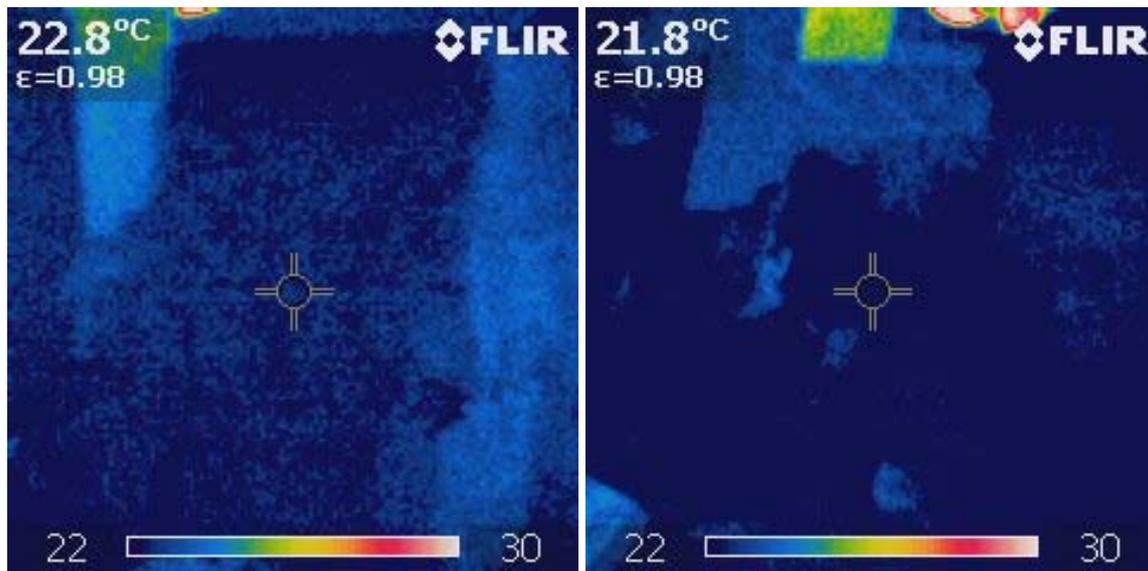


Figura 3.73. Fotografías térmicas del desmoronamiento del muro. izuquierda: Imagen 349 Derecha: Imagen 350.

En cuanto a las bases extensométricas, éstas se han colocado en posiciones similares al muro de tapial (Figura 3.48 y Figura 3.49). Como recoger el comportamiento del mortero era muy difícil debido a la forma de los mampuestos, se optó por medir las deformaciones de las piedras, no fuera a ser que en algún momento se pudiera estar transmitiendo carga a este elemento.

En las Figura 3.74 y Figura 3.75 se indican los resultados obtenidos con las bases extensométricas. Como se aprecia en todas ellas las deformaciones son mínimas excepto en los casos de las bases 2a y 2b donde una fisura en el mortero ha provocado estas grandes deformaciones. Por otra parte, los valores son generalmente muy pequeños debido a que la piedra es un material más rígido que el mortero. Se nota que las varillas de acero producen los puntos duros porque al aumentar la carga aplicada estos elementos van rompiendo el muro por dentro y es por este motivo además que las bases indican deformaciones y la causa por el que el muro rompió por este lado y no por el otro extremo, a igualdad de carga.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

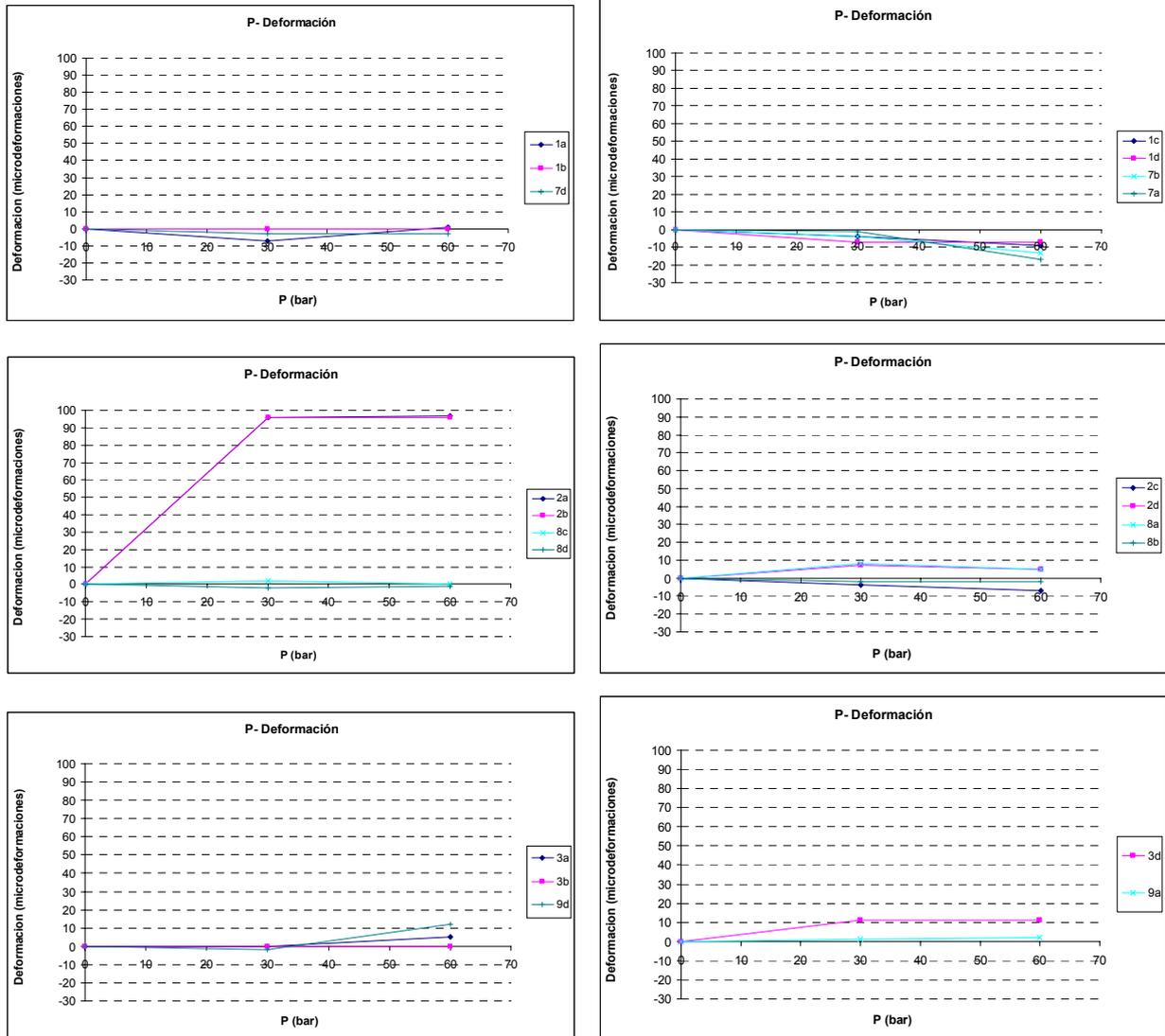


Figura 3.74. Deformaciones medidas con las bases en el cosido con varillas de fibra de vidrio, en la izquierda aparecen las correspondientes al bloque central y a la derecha aparece el extremo.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

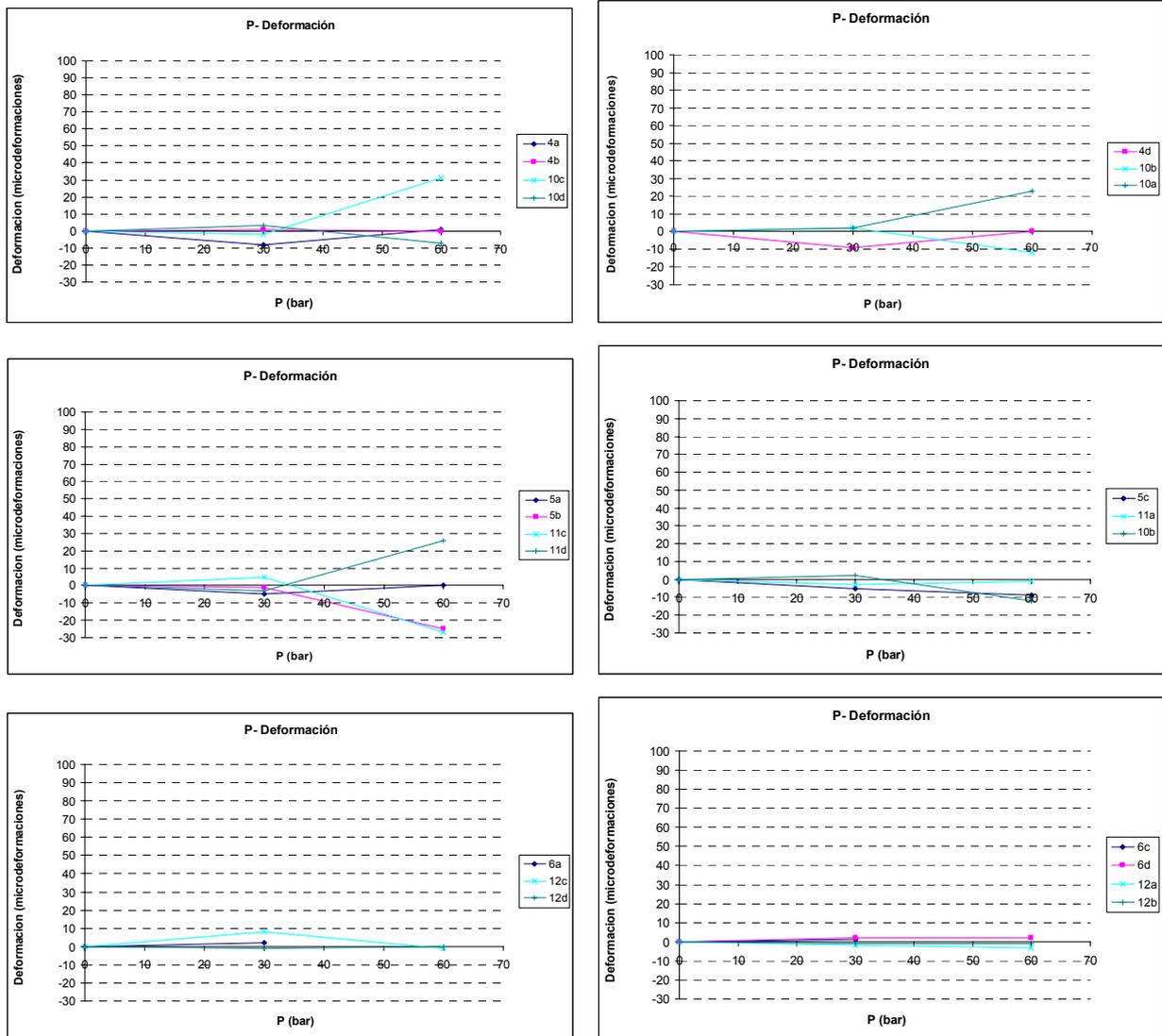


Figura 3.75. Deformaciones medidas con las bases en el cosido con varillas de acero, en la izquierda aparecen las correspondientes al bloque extremo y a la derecha aparece el central.

Además, se registraron los desplazamientos de la parte central del mismo (Tabla 3.12). Su diagrama de tensión deformación se encuentran en el gráfico siguiente (Figura 3.76). Como se comprueba la plasticidad que aportan el mortero y el acero hacen que el muro sobrepase el 1 ‰ de deformación y llegue al 4 ‰ sin demasiada dificultad a partir de ese valor el muro comienza a sufrir y las varillas deben comenzar a trabajar.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

Q Muro(t)	P gato (kg/cm <sup>2</sup> )	Micrómetro (mm)	Tensión (kg/cm <sup>2</sup> )
0,0	0	0	0,00
11,9	30	0,464	1,19
17,9	45	0,665	1,79
19,9	50	0,689	1,99
21,4	54	1,212	2,14
27,8	70	1,764	2,78
31,8	80	3,734	3,18
39,7	100	4,125	3,97
43,7	110	4,916	4,37
47,7	120	5,516	4,77
51,6	130	6,349	5,16
55,6	140	7,933	5,56
59,6	150	9,162	5,96
63,6	160	10,79	6,36

Tabla 3.12. Escalones de carga aplicados al muro de mampostería durante el ensayo de cosido.



Figura 3.76. Diagrama tensión deformación obtenido en el ensayo de rotura del muro de mampostería.

### 3.4. MURO SILLERÍA

El último muro que se ha ensayado ha sido un muro imitación de sillería cuyas medidas han sido 2 x 1.2 x 0.35 m. Como en los muros anteriores quedó demostrado la fragilidad del mortero y la baja resistencia del mismo se optó por construir este último con materiales también utilizados en obras de Restauración, imitación de los tradicionales pero con unas propiedades mecánicas mayores y estéticamente similares. Estos materiales han sido el cemento blanco y cal hidráulica como argamasa de unión, unos bloques imitación de sillería, de 53 x 20 x 4 cm de espesor, el relleno se compuso de mampuestos de este material y el mortero de cemento blanco. El muro se ejecutó in situ y la resistencia del mortero se controló mediante ensayos de compresión efectuados en los laboratorios de Geocisa realizados a uno, cuatro y siete días. Sus resultados fueron 1.99, 4.32 y 4.99 MPa, respectivamente. (Figura 3.77)



Figura 3.77. Imagen general del muro de sillería.

#### 3.4.1. Puesta en Carga.

Como en todos los muros las cargas se han aplicado con tres gatos hidráulicos de 90 t, uniformemente distribuidos y apoyados sobre chapas de acero de distribución de carga y vigas convenientemente rigidizadas (Figura 3.77). La carga se ha aplicado mediante incrementos según se indica en la Tabla 3.13. Si estos valores se representan en su correspondiente diagrama de tensión - deformación (Figura 3.78) se observa que la estructura es más rígida que los muros anteriores y que admite menos deformaciones

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

que las anteriores, pero, en contraposición las cargas pueden ser mayores. El ensayo se dio por finalizado cuando se alcanzó una tensión de 12 kg/cm<sup>2</sup>, ya que se consideró que era carga suficiente para realizar

Q muro(t)	P gato (kg/cm <sup>2</sup> )	Micrómetro (mm)	Tensión (kg/cm <sup>2</sup> )
0,0	0	0	0,00
13,5	34	0,322	1,93
15,9	40	0,346	2,27
19,9	50	0,4	2,84
30,6	77	0,411	4,37
39,7	100	0,529	5,67
49,7	125	0,626	7,09
59,6	150	0,674	8,51
72,7	183	0,705	10,38
79,4	200	0,709	11,35
83,4	210	0,709	11,92

Tabla 3.13. Incrementos de carga aplicados al muro de sillería, tensiones calculadas y deformaciones medidas durante la precarga.

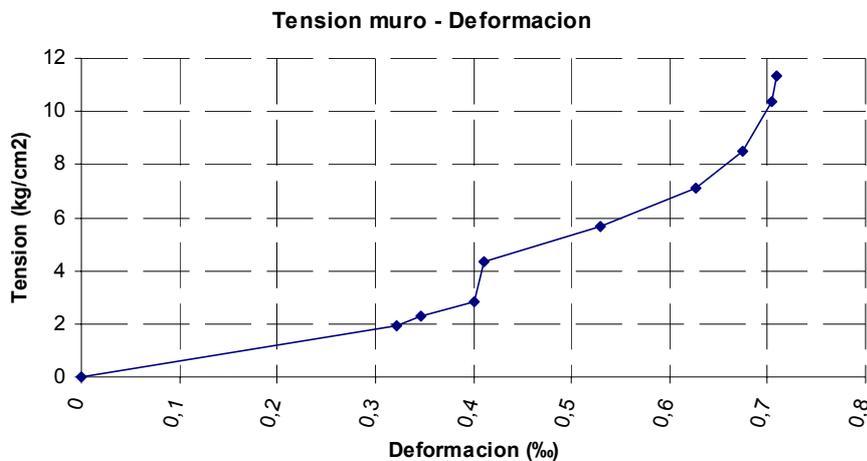


Figura 3.78. Diagrama tensión deformación obtenido en el ensayo de precarga del muro de sillería.

### 3.4.2. Estudio de Vibraciones con Diferentes Sistemas de Corte.

Como en los muros anteriores se ha realizado el estudio de vibraciones transmitidas con los dos sistemas de corte: El corte con hilo de diamante y el corte con sierra de disco. Las condiciones y metodología de trabajo ha sido la misma que en situaciones anteriores, por este motivo solo se van a presentar los resultados obtenidos y comentar aquellos aspectos que se consideren relevantes. Los datos adquiridos fueron:

- Desplazamiento del segmento central del muro durante los proceso de corte

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

- Condiciones ambientales del recinto del ensayo
  - Temperatura ambiente (°C)
  - Humedad relativa (%)
  - Presión atmosférica (bar)
  - Luminosidad (lux)

El gradiente térmico en la nave de ensayo fue inferior a 5 °C durante el proceso de ensayo y los aumentos durante los procesos de corte no llegaron a ser significativos, siendo debidos a las condiciones ambientales de trabajo. La humedad relativa se incrementó un 10% también durante el proceso de corte con disco, debido al empleo del agua para refrigerar los elementos cortantes.

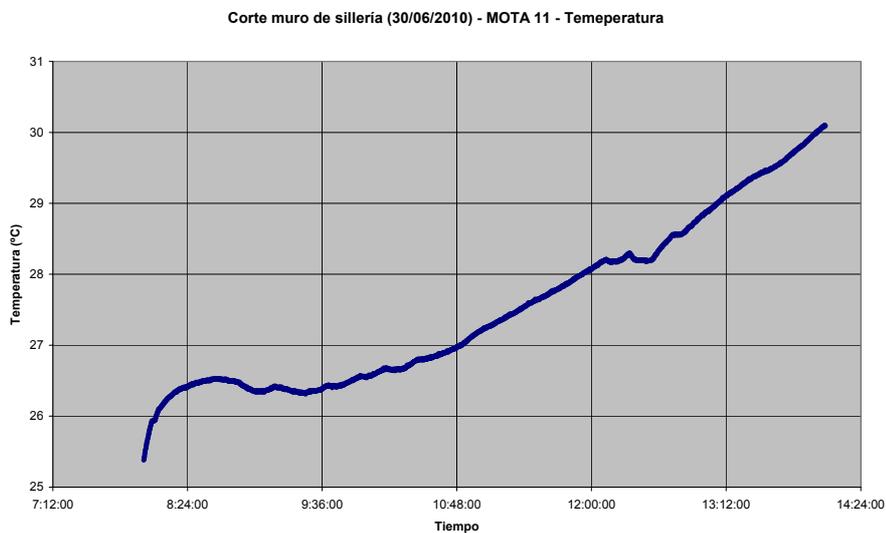


Figura 3.79. Evolución de la temperatura obtenida durante los cortes del muro de sillería.

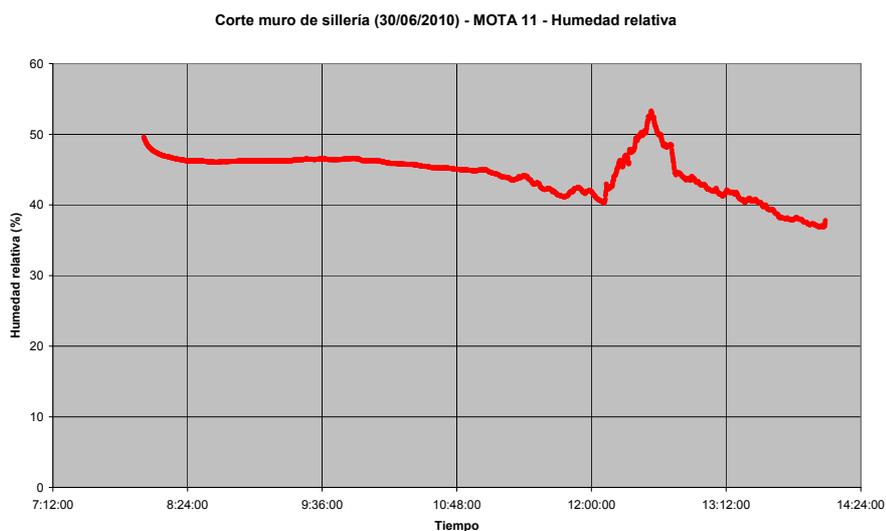


Figura 3.80. Evolución de la humedad relativa obtenida durante los cortes del muro de sillería.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

El primer corte se realizó con la sierra de disco en el tercio derecho de la estructura visto desde el centro de la nave. Antes del corte propiamente dicho, fue necesario acometer el montaje del sistema de anclaje y guiado de la sierra. Pese a utilizar dos discos de tamaño diferente y debido al espesor del muro, no se pudo realizar el corte de la probeta en su totalidad. En ambos casos se efectuaron las medidas planificadas.



Figura 3.81. Instantes del corte con sierra de disco en el muro de sillería.

El corte con hilo de diamante se efectuó siguiendo la misma metodología que en ensayos anteriores. En cuanto al estudio termográfico, la cámara se situó en una posición alejada de la perpendicular del muro por el elevado volumen de las máquinas de corte y para evitar salpicaduras del líquido de refrigeración. En esta situación, la cámara quedó a 3m de la línea de corte de hilo de diamante y a 2,2m de la línea de corte con radial. La imagen mostraba el muro en casi toda su altura. En la cámara se programó un coeficiente de emisividad de 0.98.

Durante todo el ensayo se realizó una grabación continua de la imagen de la cámara térmica. El rango de medida de la cámara se seleccionó manualmente entre 25 y 40°C; alguna de las imágenes presenta rangos diferentes para intentar observar mejor detalles de interés. Al finalizar los cortes, se tomaron fotografías térmicas de la pared para intentar apreciar la huella de calor.

De la grabación continua de imágenes térmicas se han extraído los fotogramas más significativos. Para facilitar la interpretación, cada imagen térmica está acompañada de su correspondiente imagen en el espectro visible. Al tratarse de cámaras diferentes, el ángulo de visión no fue exactamente el mismo.

La línea vertical indica el surco dejado por la sierra de disco, mientras que el objeto brillante horizontal, situado en contacto con la superficie de la pared, sirve como referencia de tamaño de la huella térmica. Por ello, Solo pudo deducirse información de las imágenes que tienen un objeto horizontal de referencia, el cual mide 24cm.

En el montaje de la sierra, para la sujeción del soporte de la sierra se utilizó una resina epoxi que produjo una reacción exotérmica. Las imágenes muestran la secuencia de calentamiento y la temperatura alcanzada en el entorno de la varilla roscada (30°C) y de un grumo de pasta (aprox. 70°C).

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

---

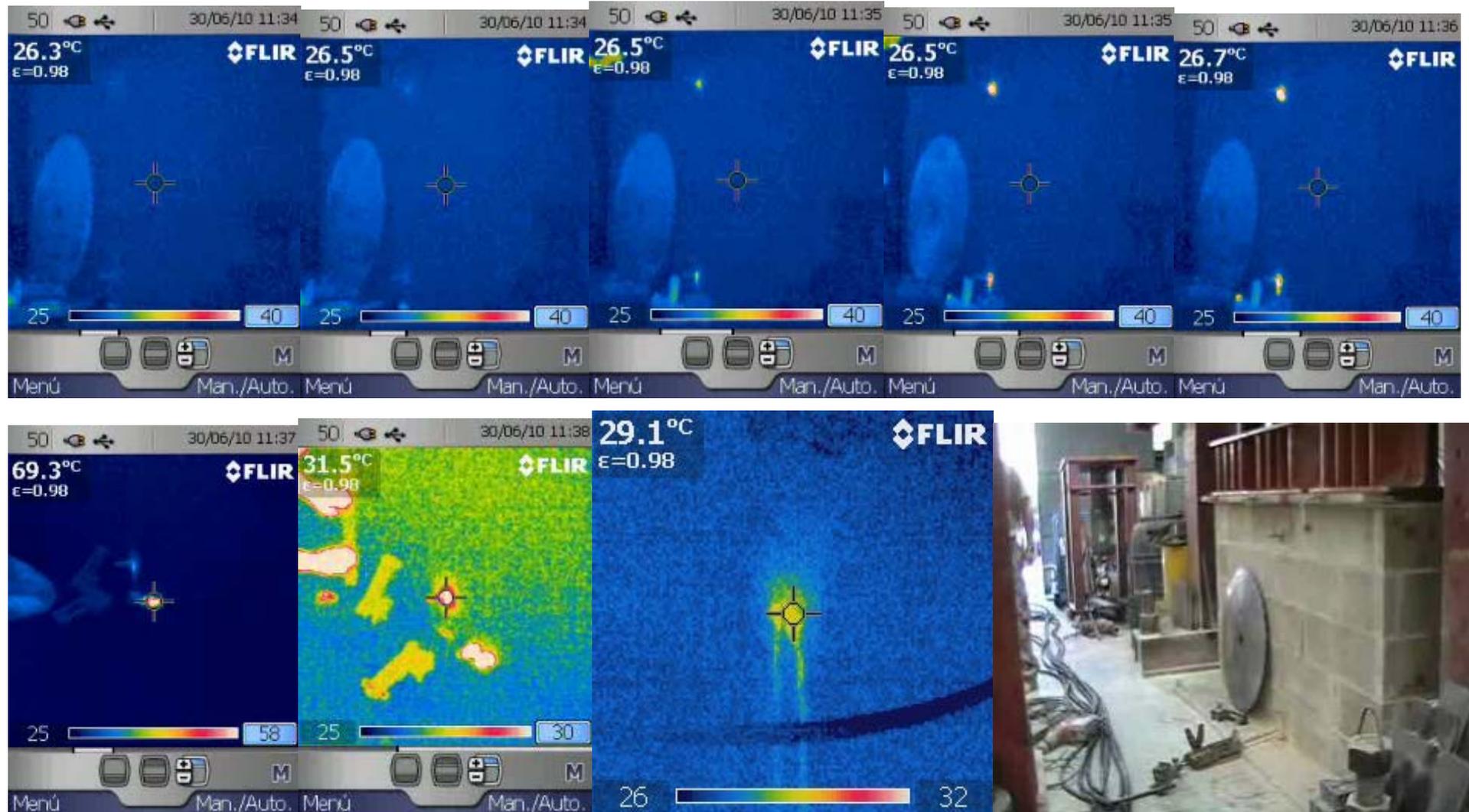
La refrigeración de la sierra se perpetró mediante un chorro de agua sobre una de las caras del disco (la orientada hacia la posición de la cámara térmica); de esta manera, solo quedó humedecida la superficie del muro por uno de los lados del corte.

En el corte con hilo de diamante, la refrigeración del hilo se realizó con una manguera apoyada sobre la coronación del muro, humedeciendo toda la zona de corte.

En la serie de imágenes se puede observar como se calienta el hilo de corte; pudo obtenerse la temperatura alcanzada durante el corte de la estructura estudiando el hilo y la proyección de agua por la parte inferior del lazo; la imagen 4 muestra valores próximos a 23°C

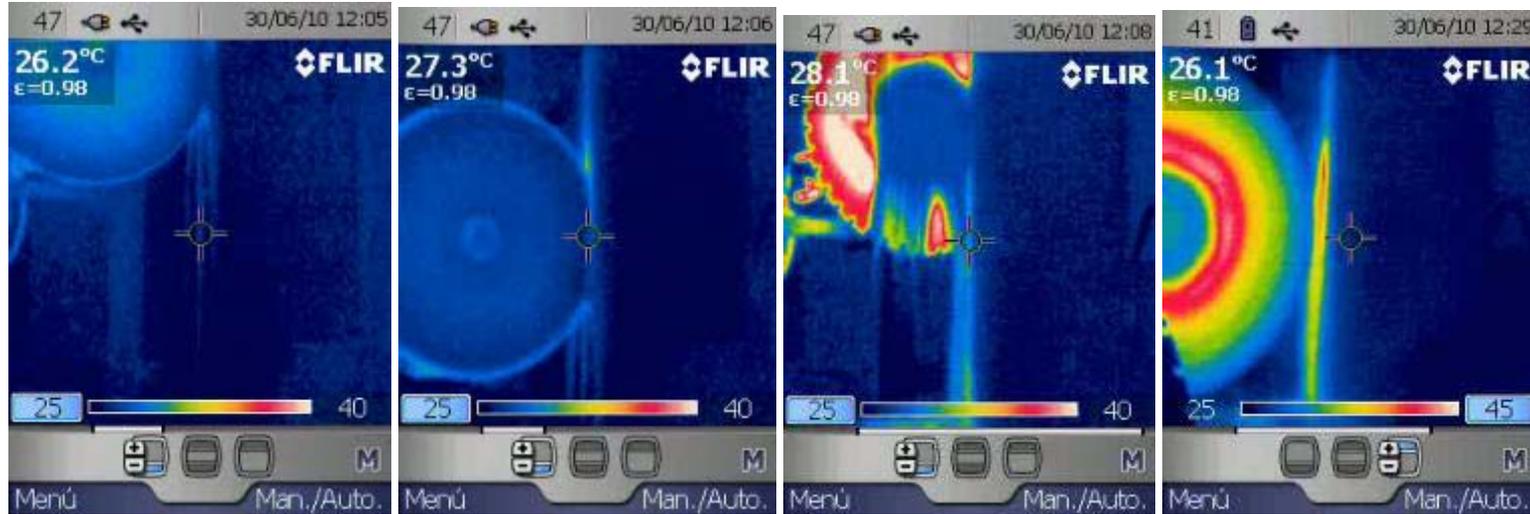
## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

Reacción exotérmica de la resina epoxi utilizada en la instalación del soporte de la sierra de disco



## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

### Corte con sierra de disco



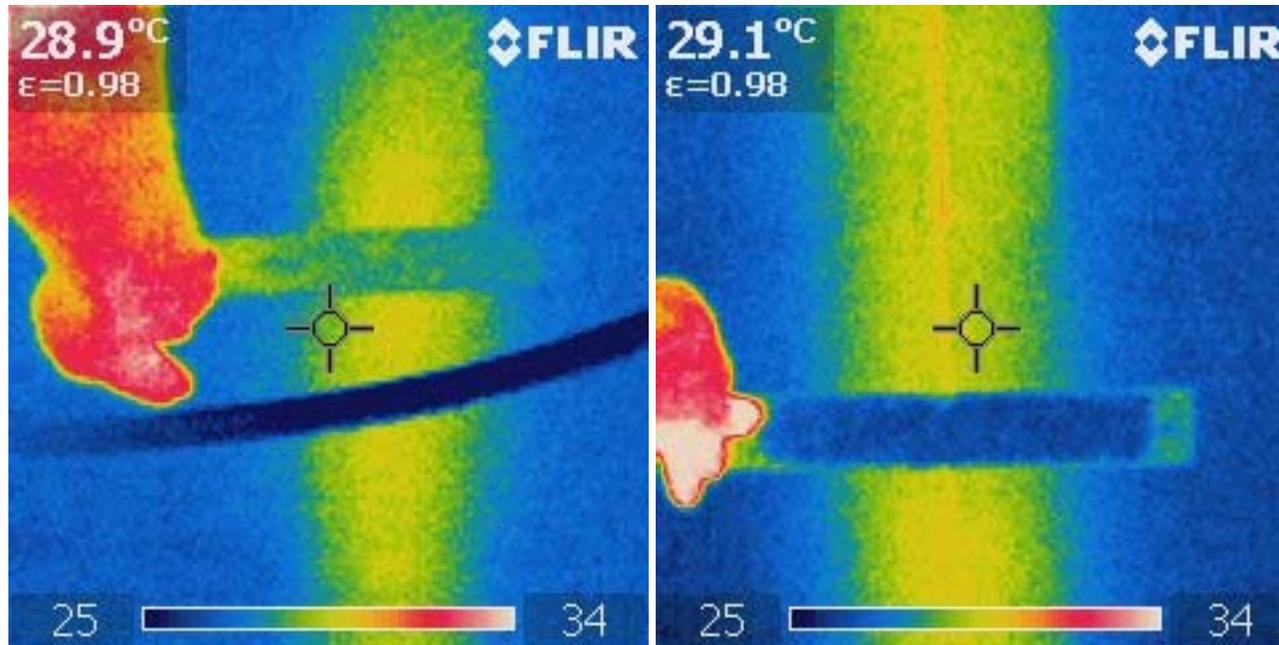
## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

### Corte con hilo de diamante



## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

### Zona de influencia térmica del corte con sierra de disco



## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

A continuación se presentan las medidas de vibraciones tomadas durante el proceso de montajes de las máquinas de cortes y durante el corte mismo. En la Figura 3.82 se presenta los espectros relativos al taladro pasante del corte con hilo de diamante, en la Figura 3.83 los espectros relativos al corte con hilo de diamante y en las figuras Figura 3.84 y Figura 3.85 los espectros obtenidos durante el corte con sierra de disco. El orden cronológico en este caso se invirtió, siendo el primero en el tiempo el corte con sierra de disco y posteriormente el corte con hilo de diamante. Como la sierra de disco no cortó todo el muro, éste quedó unido en su base y es por este motivo que en los espectros de del corte con hilo de diamante el sensor de este extremo (x2) aporte una señal de similar magnitud que la de x1 pero con un contenido inadmisibles de ruido. Una vez más, en cualquier situación la respuesta vertical ha sido despreciable. Respecto al primer grupo de gráficos se nota que los modos excitados son dos: el primero y el segundo. Asimismo, la frecuencia de excitación se ha incrementado un orden de magnitud, debido al incremento de rigidez de la propia estructura.

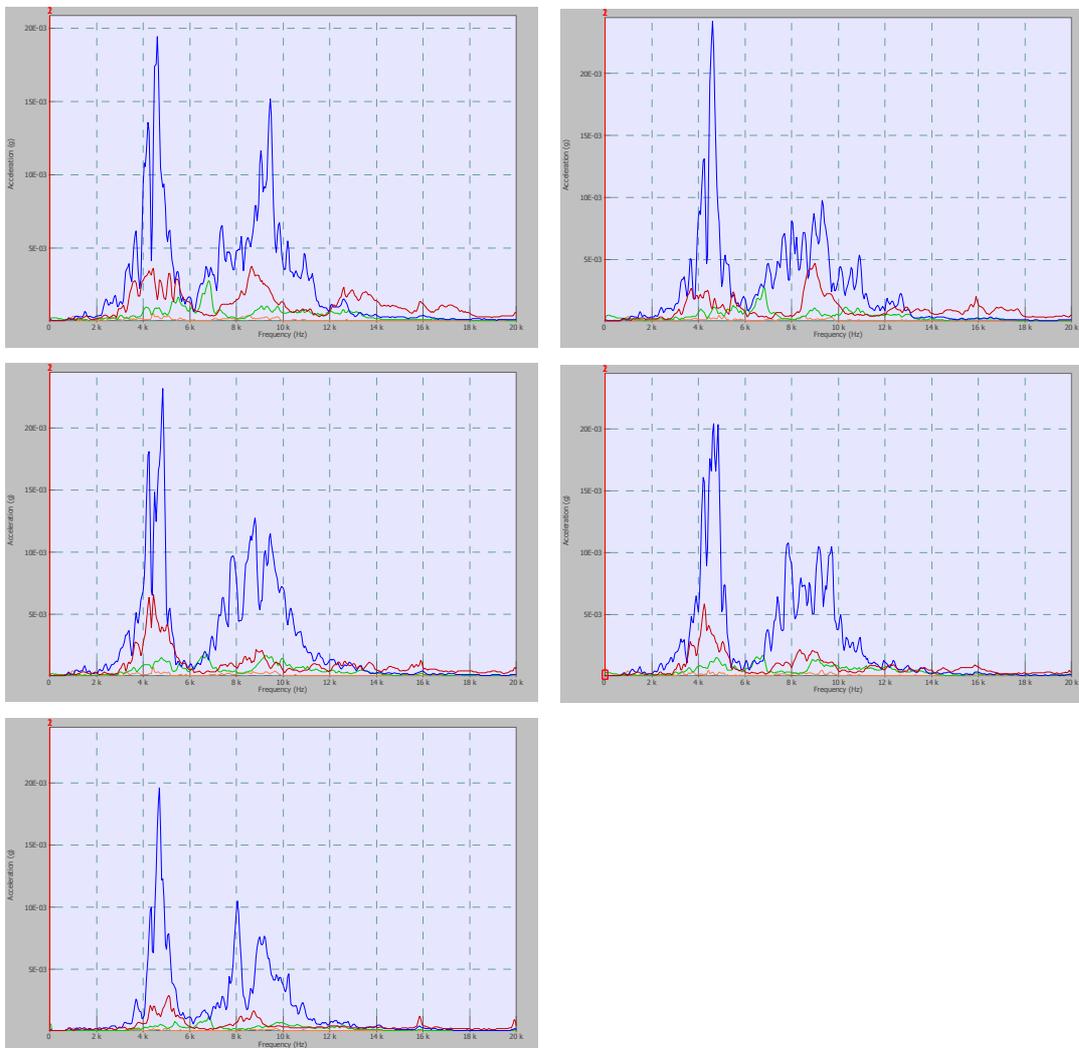


Figura 3.82. Espectros de aceleración del taladro pasante durante la preparación del corte con hilo de diamante en el muro de sillería.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

En cuanto a los espectros del corte con hilo de diamante, la señal procedente del acelerómetro x2 contiene mucho ruido y hace que este registro no aporte información útil. Asimismo, se aprecia una respuesta significativa fuera del plano debido a que la máquina de corte ha debido de incrementar su fuerza de trabajo como causa de la alta resistencia de los materiales del muro.

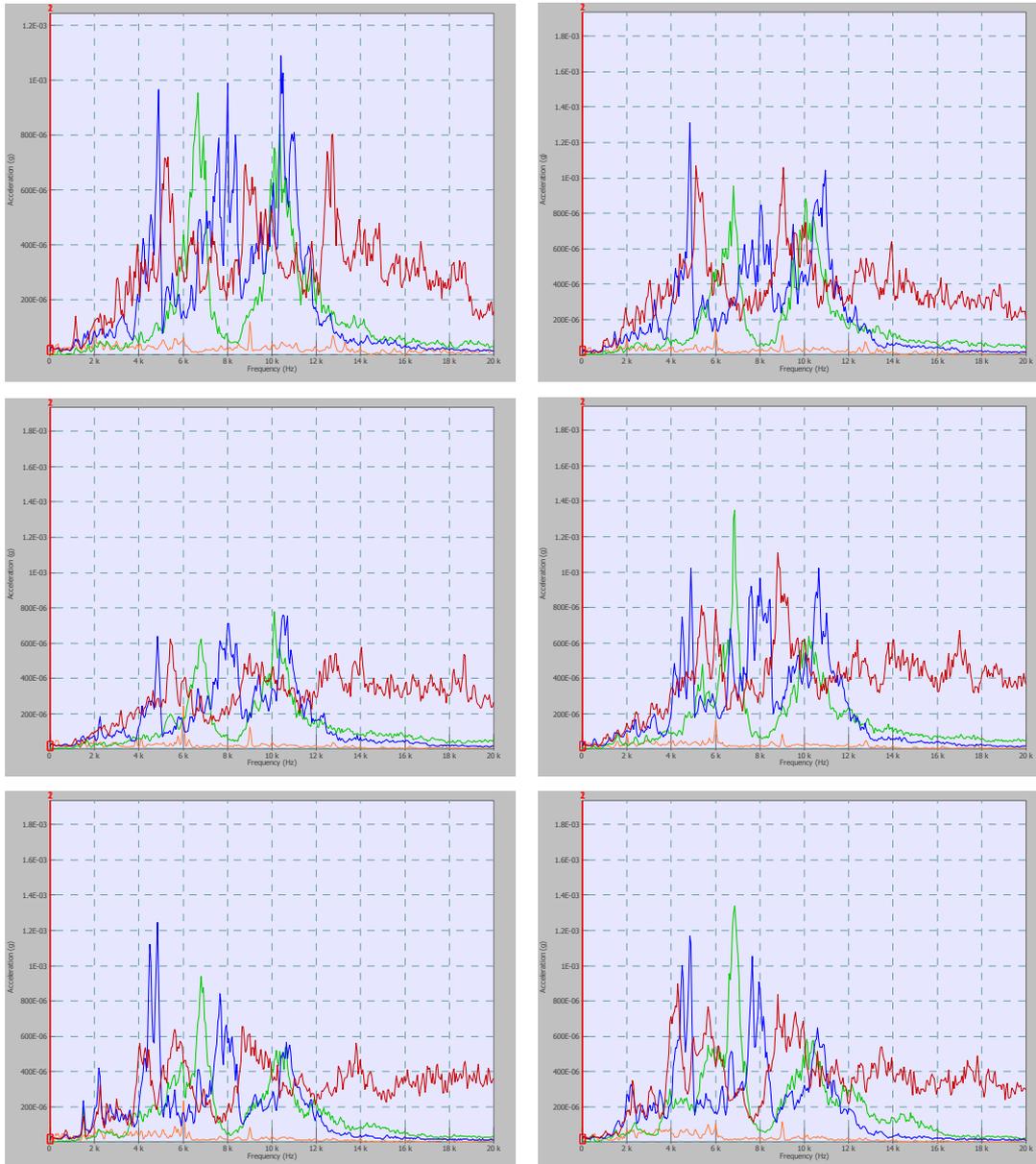


Figura 3.83. Espectros de aceleración del corte con hilo de diamante en el muro de sillería.

En cuanto al corte con sierra de disco conviene señalar que las señales son más nítidas porque han sido las primeras en recabarse. Los modos de vibración son el segundo, tercero y cuarto. Debido a problemas técnicos la señal x2 fue despreciable. Igualmente, la estructura presenta una ligera respuesta fuera del plano, entre 5 y 6 órdenes de magnitud menor que la respuesta en el plano, con motivo de ese incremento de rigidez.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

Si se comparan los espectros de ambos métodos de corte se aprecia que el corte con sierra de disco ha generado valores de aceleración elevados de hasta 14 mG superiores a los obtenidos con la hilo de diamante, de 0.8 a 2,4mG. Esto podría porque la máquina de corte no ha sido la misma que la habitual y podría influir en la respuesta.

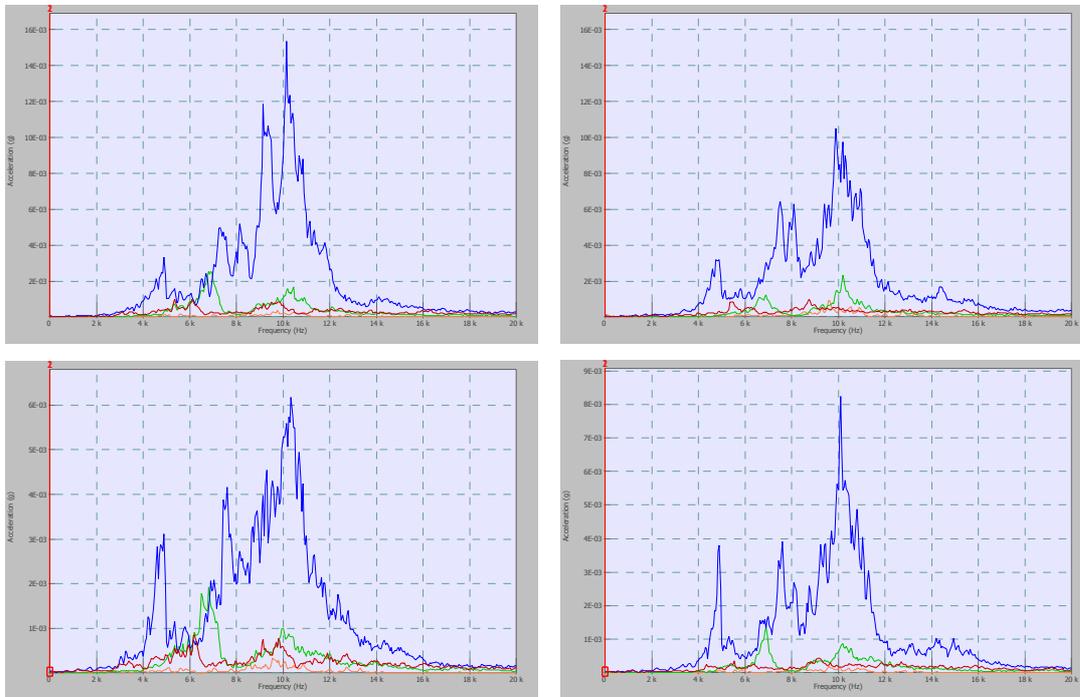


Figura 3.84. Espectros de aceleración del corte con el primer disco en el muro de sillería.

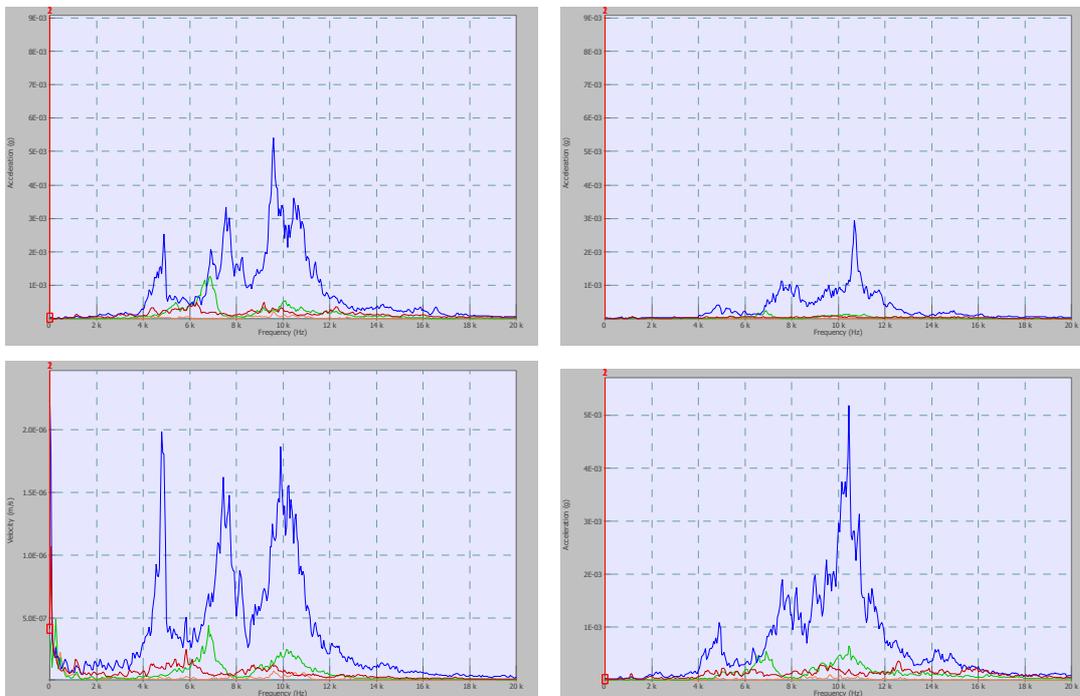


Figura 3.85. Espectros de aceleración del corte con el segundo disco en el muro de sillería.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

### 3.4.3. Ensayo de los Cosidos.

Al igual que ya sucedió en las demás probetas, el muro se reparó después del corte aplicando los mismos materiales empleados en su construcción. Al igual que en el muro de ladrillo macizo se ha perforado la base del tercio central para realizar un ensayo a cortante de esa zona de muro y estudiar el comportamiento de los cosidos.

La cámara se situó a 2.5 m del muro, en perpendicular y ligeramente desviada hacia la izquierda. En esta situación se ve el suelo, el hueco creado para realizar el ensayo de cortante y casi toda la altura de muro. La cámara se programó con un coeficiente de emisividad de 0.98. Para evitar variaciones en la escala de color que pudieran confundir durante el ensayo, se canceló la opción de ajuste automático del rango de medida y la escala se fijó entre 26 y 37 °C.

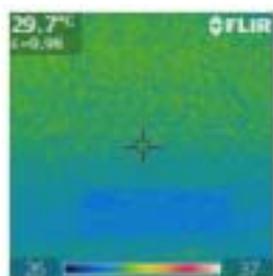
Mediante gatos hidráulicos se aplicaron diferentes niveles de carga hasta la presión máxima prevista. Cada vez que la carga alcanzó un valor predeterminado se tomó una foto térmica. Durante todo el ensayo se realizó una grabación continua de la imagen de la cámara térmica (Tabla 3.14).

Q Zona Central (t)	Presión gato (kg/cm <sup>2</sup> )	Salto Presión (kg/cm <sup>2</sup> )	Numero imagen	Temperatura (°C)	Temperatura referencia (°C)	Salto Temperatura (°C)
3.9	30	0	371	29.7	29.7	0.0
5.2	40	10	372	29.7	30.0	0.3
7.9	60	20	373	29.5	29.8	0.3
10.6	80	20	374	29.8	30.1	0.3
13.2	100	20	375	29.6	29.7	0.1
15.9	120	20	376	29.6	29.5	-0.1
18.5	140	20	377	29.7	30.0	0.3
21.2	160	20	378	30.3	30.1	-0.2
23.8	180	20	379	30.1	29.6	-0.5
26.5	200	20	380	30.1	29.7	-0.4
29.8	225	25	381	29.9	30.2	0.3
31.8	240	15	382	30.5	30.0	-0.5
35.7	270	30	383	30	30.4	0.4
39.7	300	30	384	30.5	29.9	-0.6
39.7	300	0	385	30.1	30.1	0.0

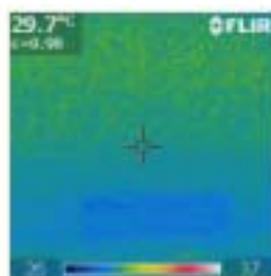
Tabla 3.14. Datos utilizados en el estudio termográfico durante el ensayo de cortante del muro de sillería.

Las fotos térmicas se representan en la página siguiente

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación



IR\_0371.jpg



IR\_0372.jpg



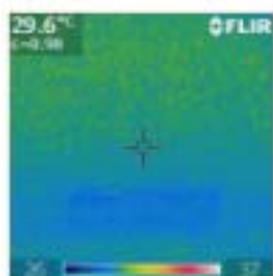
IR\_0373.jpg



IR\_0374.jpg



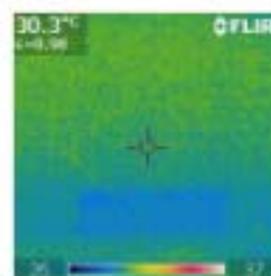
IR\_0375.jpg



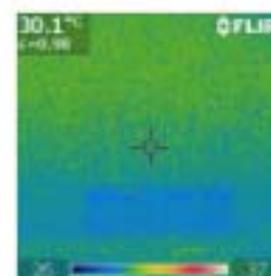
IR\_0376.jpg



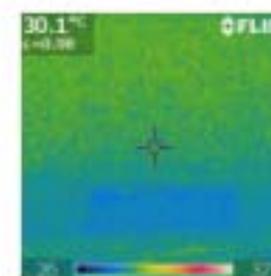
IR\_0377.jpg



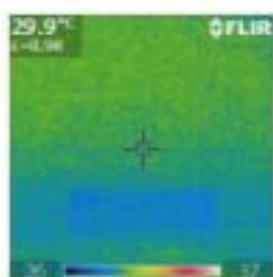
IR\_0378.jpg



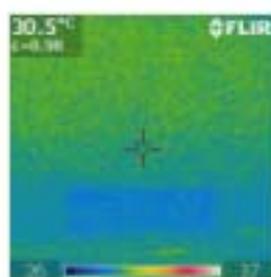
IR\_0379.jpg



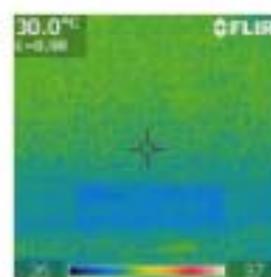
IR\_0380.jpg



IR\_0381.jpg



IR\_0382.jpg



IR\_0383.jpg



IR\_0384.jpg



IR\_0385.jpg

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

La comparativa de sensores de temperatura se encuentra en la gráfica de la Figura 3.86. Igualmente, de forma similar el ciclo diario se refleja en el cambio de tonalidad de azul claro a verde de las termografías.

Para determinar si se produjeron cambios en la temperatura del muro al aplicar las cargas, se obtuvo de la grabación de video un valor de referencia; este valor se corresponde con la temperatura instantánea que se registra en el momento que el reloj cambia de un minuto al siguiente. Representando los saltos de temperatura frente a la presión y al diferencial de presión se observa que no existe correlación entre las variables, es decir, todos los saltos de temperatura se pueden producir a cualquier carga o salto de carga (Figura 3.87 y Figura 3.88).

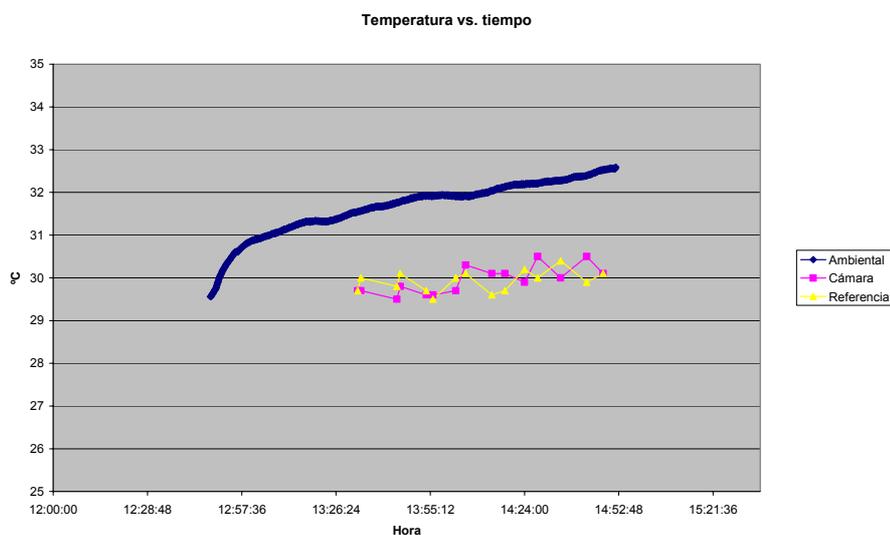


Figura 3.86. Comparativa de temperaturas durante el ensayo de cortante en el muro de sillería.

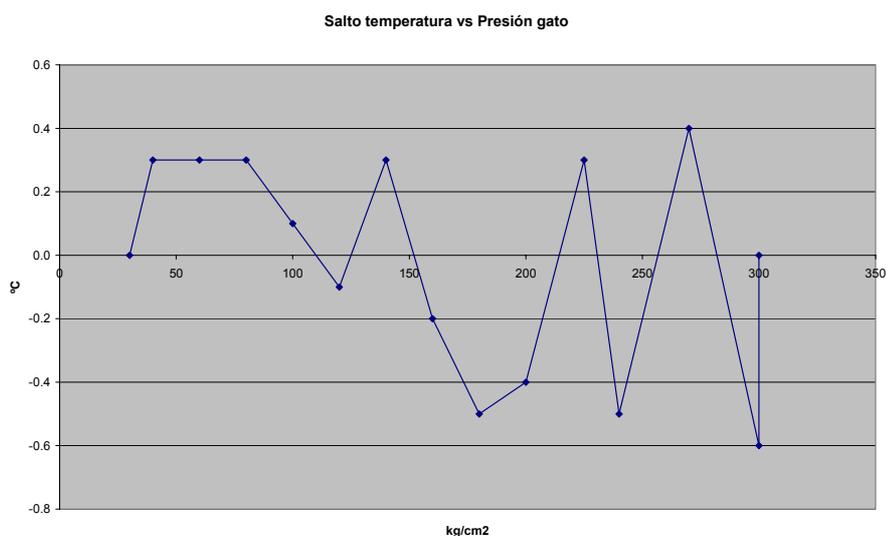


Figura 3.87. Comparativa de salto de temperatura y presión del gato durante el ensayo de cortante en el muro de sillería.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

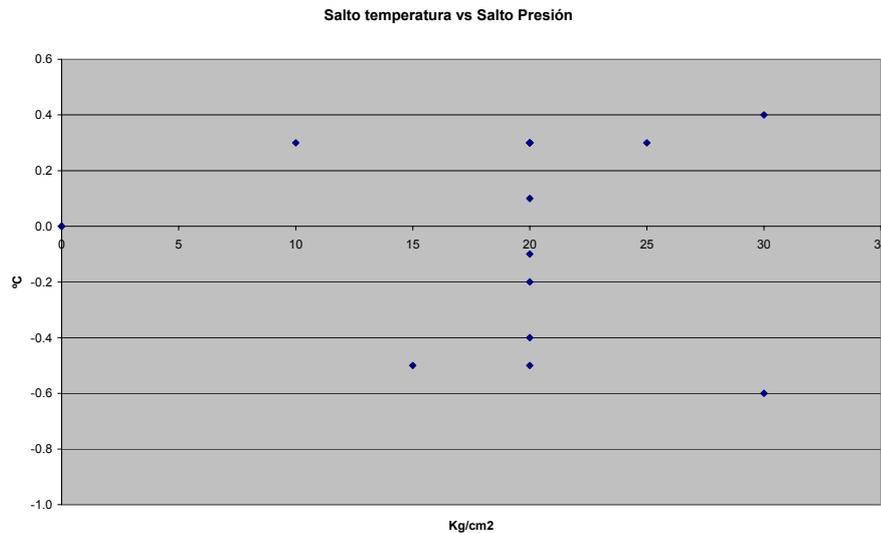


Figura 3.88. Comparativa de salto de temperatura y el salto de presión del gato durante el ensayo de cortante en el muro de sillería.

El estudio estructural del ensayo de cosido se efectuó, otra vez, por medio de las bases de extensometría, ubicadas en las zonas ya planificadas (Figura 3.48 y Figura 3.49). Y un micrómetro que midió el desplazamiento de la zona central. Los datos adquiridos se encuentran en la Tabla 3.15. Si además estos datos se representan en forma de un diagrama de tensión-deformación (Figura 3.89) se observa que el muro tiene un comportamiento elástico hasta los 6 kg/cm<sup>2</sup> a partir de ese momento comienza el comportamiento plástico hasta una tensión de rotura de 17 kg/cm<sup>2</sup>. El ensayo se dio por finalizado cuando el bloque central descendió en bloque unos milímetros.

Q Sección Central (t)	P gato (kg/cm <sup>2</sup> )	Micrómetro (mm)	Tensión (kg/cm <sup>2</sup> )
0,0	0	0	0,00
5,3	40	0,107	2,26
7,9	60	0,153	3,39
10,6	80	0,218	4,52
13,2	100	0,245	5,65
15,9	120	0,404	6,78
18,5	140	0,555	7,90
21,2	160	0,729	9,03
23,8	180	0,901	10,16
26,5	200	1,141	11,29
30,5	230	1,385	12,99
32,7	247	1,65	13,95
35,7	270	2,23	15,24
39,7	300	2,943	16,94

Tabla 3.15. Datos utilizados en el estudio estructural del ensayo a cortante del muro de sillería.

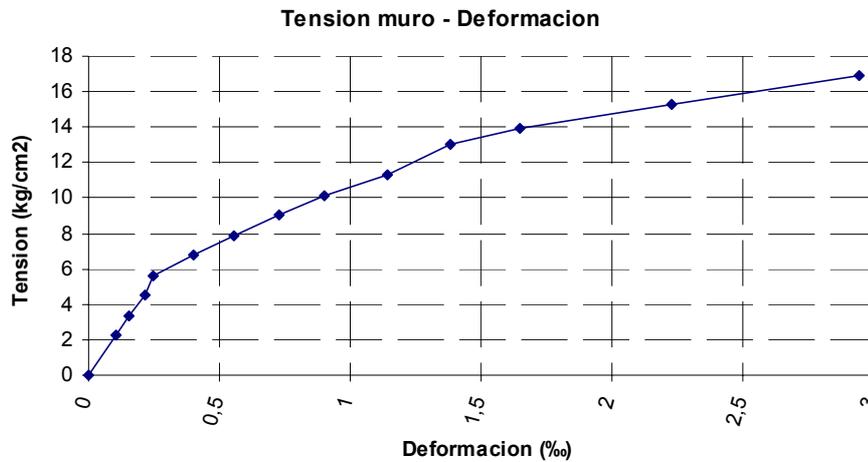


Figura 3.89. Diagrama de tensión – deformación del muro de sillería durante el ensayo a cortante.

Las deformaciones medidas por las bases de extensometría se han representado en las Figura 3.90 y Figura 3.91. El motivo de haber instrumentado es que a pesar de saber que el cemento es un material más rígido y resistente que la cal hidráulica, se ha querido conocer si se transmitía carga a este material y verificar su comportamiento durante la ejecución de este ensayo. Se debe indicar que en este caso, no se ha instrumentado la cara posterior del muro con cosido de acero.

En general, todos los valores de las deformaciones son muy bajos, cantidades inferiores a 25 microdeformaciones. Valores razonables para los materiales que se han utilizado en la construcción de este muro. Al ser valores tan bajos no se distingue entre los extremos no cargados y la zona central (cargada), ni se puede diferenciar que parte se corresponde con el comportamiento del material en sí, ni como con un error de precisión intrínseco al reloj manual comparador. Lo que sí se puede afirmar es que las varillas de fibra de vidrio se han deformado más que las varillas de acero galvanizado.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

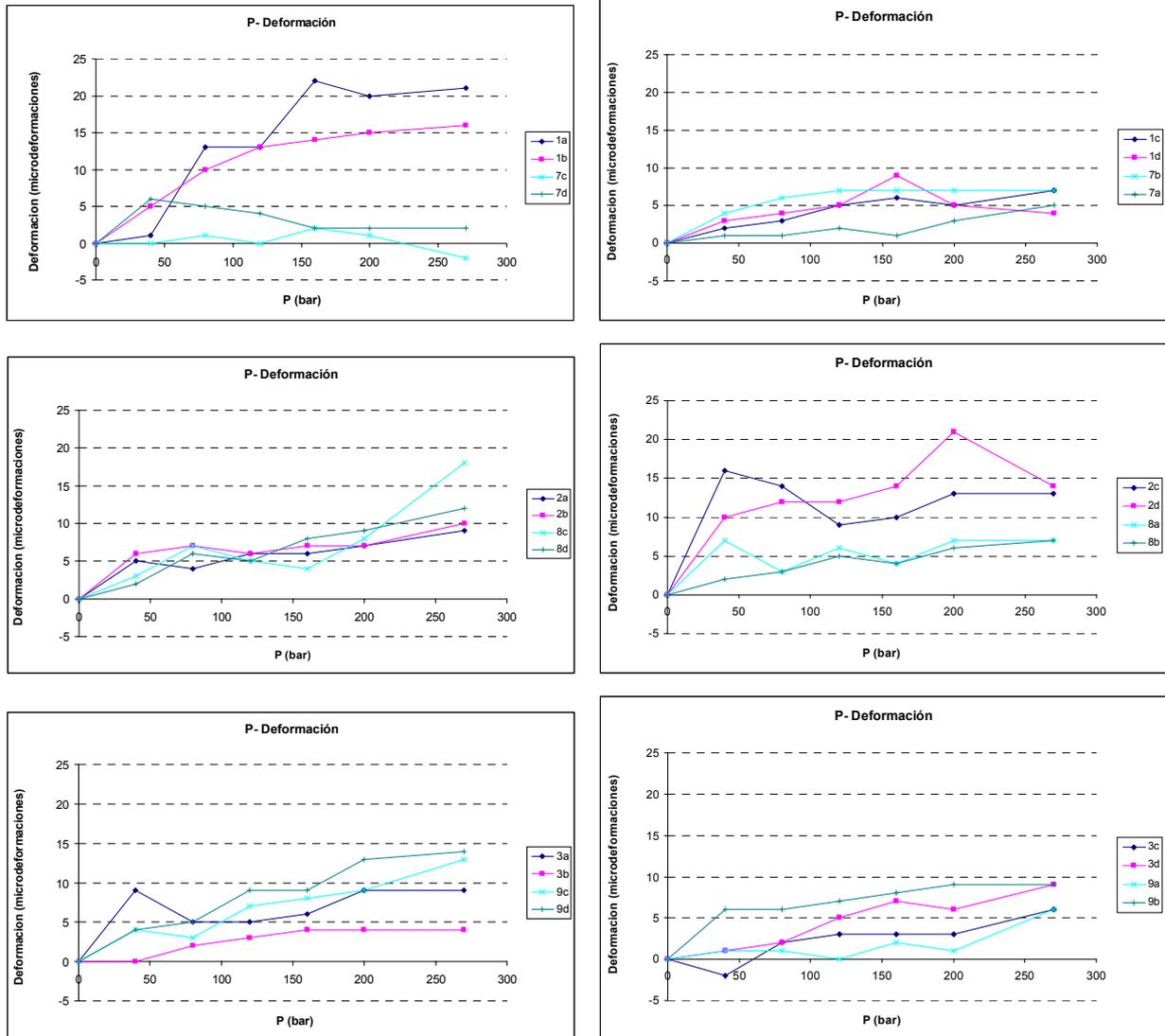


Figura 3.90. Deformaciones medidas con las bases de extensometría en el cosido con varillas de fibra de vidrio, en la izquierda aparecen las correspondientes al bloque central y a la derecha aparece el extremo.

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

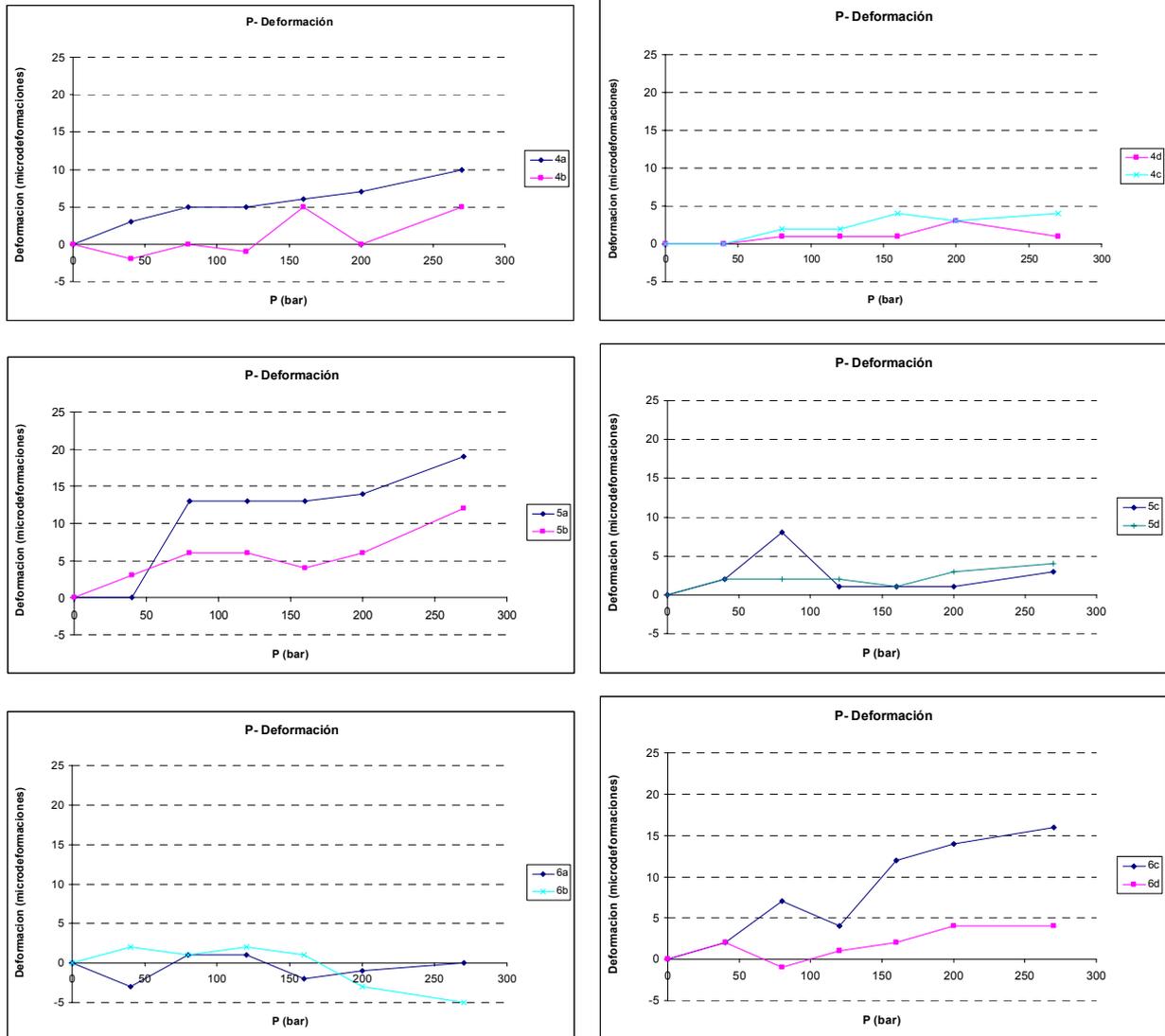


Figura 3.91. Deformaciones medidas con las bases de extensometría en el cosido con varillas de acero roscado, en la izquierda aparecen las correspondientes al extremo y a la derecha aparece el tercio central

### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

La mayoría de las intervenciones de accesibilidad que se realizan en Patrimonio representan modificaciones estructurales de los edificios. Éstos deben ser analizados morfológica y estructuralmente para verificar su adecuación a la nueva situación. Esta investigación se debe realizar con ensayos no destructivos o ensayos ligeramente destructivos que proporcionen la información necesaria para la adopción de la solución de accesibilidad más apropiada. Además, en los tratamientos a ejecutar en este tipo de intervenciones se efectúan operaciones que podrían modificar las propiedades físico-mecánicas y estructurales de los elementos afectados, tales como un aumento excesivo de la temperatura, vibraciones, incompatibilidad de deformaciones etc. Por este motivo, se decidió estudiar el efecto de estas intervenciones en varias tipologías de muro: de ladrillo hueco, de ladrillo macizo, de tapial, de mampostería y de sillería.

Este documento presenta el trabajo experimental realizado dentro del subproyecto 2, Cirugía del Bien Cultural, éste ha consistido en el estudio de seis muros de fábrica, dos de ellos se analizaron en la anualidad anterior y en esta se han ensayado los cuatro muros restantes. En todos ellos se ha comprobado que la precarga aplicada, previa a los ensayos, no sobrepasaba el 50% teórico de sus correspondientes cargas de rotura, mediante un ensayo de gato plano. Posteriormente han sido estudiadas las vibraciones transmitidas con dos métodos de corte diferente, hilo de diamante y sierra de disco. En general se ha observado que ambas técnicas no dañan estructuralmente a los muros ya que las frecuencias excitadas son muy altas, probablemente coinciden con algún modo de vibración de las máquinas de corte, y ni siquiera en la norma DIN 4150 son contempladas esas frecuencias. Sin embargo, el corte con hilo de diamante se ha mostrado más favorable con la estructura, ya que las magnitudes de las aceleraciones son menores en todos los casos excepto en el muro de sillería, respecto al corte con sierra de disco. Y por otro lado, el modo de ejecución ha permitido que no se pierda masa, la ejecución del ensayo es más corta y limpia, por lo tanto, esta técnica sería la recomendable para materiales como el tapial o mampostería meteorizada donde el corte con la sierra de disco puede afectar a la estabilidad de las tensiones internas y producir daños irreparables.

Además, esta fase ha estado completada con la comprobación del uso de la cámara termográfica e instrumentación inalámbrica. El estudio termográfico ha verificado que este uso no aporta información significativa, en cuanto al ensayo propiamente dicho se refiere, ya que las condiciones ambientales se han revelado más importantes que las estructurales, y generalmente estas intervenciones se ejecutan a la intemperie.

La instrumentación inalámbrica se ha mostrado de gran utilidad, porque además de suministrar datos fiables, es rápida de instalar la duración es muy larga, dependerá de la batería que se instale, podría llegar a varios años y se puede ubicar en zonas de difícil acceso, se puede establecer la conexión con estas motas sin necesidad de establecer "contacto visual", sino que la red de sensores se puede planificar de tal forma que no sea necesario que todas las motas "vean" la estación base.

A continuación los tercios separados del muro se unieron de nuevo con mortero de características similares a las de su ejecución y se establecieron controles de curado con

## E2.21 - Descripción técnica de sistemas de cosido, refuerzo y consolidación

ensayos de compresión y flexotracción a los dos y siete días de ejecución, como mínimo. Cuando alcanzaron una resistencia admisible se procedió a su cosido con varillas de 12 mm de diámetro de acero galvanizado roscado y fibra de vidrio respectivamente y 50 cm de longitud cada una embebidas en una lechada de mortero de cal hidráulica. El control de curado fue el mismo que para el del mortero. Después se verificó el estado tensional del muro, para comprobar que en ningún momento se había perdido carga. Y, seguidamente, se procedió al estudio del cosido, tanto desde un punto de vista cualitativo, como cuantitativo con la cámara termográfica y bases de extensometría.

En los casos del muro de ladrillo macizo y sillería se perforó la base del tercio central para ejecutar un ensayo a cortante, aplicando presión en ese tercio y manteniendo la precarga en los dos tercios extremos. En ambos casos la fractura fue de carácter frágil. Sin embargo en los muros de tapial y mampostería, no se perforaron dada la delicadeza de los materiales pero se les aplicó la misma metodología. En estos casos la fractura fue plástica, demostrando la poca resistencia de estos materiales y permitiendo estudiar con mayor detalle el comportamiento de las varillas. De hecho, se ha podido comprobar como en estos dos últimos muros las varillas transmiten carga. Y, en general, el efecto de la incompatibilidad de los módulos de elasticidad en los materiales de soporte. Prueba de ello es la causa de fallo del muro de mampostería, donde el mayor módulo de elasticidad del acero provocó los llamados puntos duros dentro del elemento fisurándolo primero y agrietándolo posteriormente, ocasionando la pérdida de capacidad portante del muro. Además, esta diferencia en los módulos de rigidez ha demostrado que las varillas de fibra de vidrio se comportan más solidariamente con la estructura, evidencia de ello fue que al desmontar los muros ya ensayados, las varillas de acero galvanizado estaban sueltas y presentaban una holgura en su perforación, mientras que las varillas de fibra de vidrio todavía se encontraban íntimamente ligadas a la lechada. Estos hechos demuestran que a largo plazo la opción más ventajosa en términos de comportamiento, mantenimiento y/o duración son las varillas de fibra de vidrio en muros de fábrica.

Igual que en el estudio de las vibraciones durante los cortes la cámara termográfica no aportó información relevante, y la instrumentación inalámbrica funcionó correctamente.

Sin embargo la utilización del estudio termográfico es elemental para los estudios previos destinados a conocer la morfología del muro y por tanto determinar la existencia de elementos ocultos incluidos en el muro. Que pueden condicionar los tratamientos a seguir.

Los resultados obtenidos con la utilización del cemento Portland en la consolidación del muro, recomiendan no utilizarlo de forma aislada en zonas concretas incluidas en él, debido a sus diferentes módulos de deformabilidad respecto al muro existente. Otro asunto sería la construcción de un muro adosado exclusivamente para absorber las nuevas cargas.