

# ENSAYOS DINÁMICOS PARA EL ANÁLISIS DE TENSIONES EN CABLES DE ACERO. APEO MONASTERIO SANT BENET (BARCELONA).

Jaume Terzán<sup>1</sup>, Diego Martín<sup>2</sup>

- 1 CONTROL TÉCNICO CATALÁN (COTCA). Director del Laboratorio.
- 2 BOMA. Responsable de Ingeniería

## RESUMEN:

Los **ensayos dinámicos** destinados a la medida de frecuencias de vibración en elementos lineales tipo cable, barra o semejante, permiten realizar valoraciones de la tensión existente en los mismos, ofreciendo una alternativa útil a la extensometría, a la dinamometría, a la hidráulica o a la topografía.

Se presenta un caso práctico de **instrumentación** en una obra en la que se recurre a la aplicación de los ensayos dinámicos como método alternativo y complementario a la realización de mediciones de tensiones mediante par de apriete de uniones atornilladas, mediante aplicación de galgas extensométricas, y mediante medidas topográficas de precisión.

Se evalúa la eficacia de los distintos métodos de medida, comentando las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos acaecidas durante la instrumentación realizada

El caso de aplicación corresponde a una instrumentación del proceso de **apeo** de una estructura histórica sobre una Bodega Gótica en el Monasterio de Sant Benet de Bagues (Barcelona)..

## INTRODUCCIÓN

Los ensayos aquí propuestos son una herramienta útil para realizar una estimación real de la tensión existente en un elemento tipo cable, barra o similar.

### Ensayos dinámicos

Consisten en la medida de frecuencias propias de vibración de un elemento lineal y estimar con ella la tensión existente en dicho elemento.

La tensión se estima a partir de de la relación teórica existente entre la frecuencia de vibración de una cuerda y la fuerza de tracción aplicada en sus extremos, de la que se obtienen las medidas de tensión

Se aplica la formula

$$T=4 l^2 \rho f^2 /n^2$$
$$t= T/S$$

Siendo

[T] la tensión en Kg

[l] la luz en m.

[ρ] la masa por unidad de longitud en Kg/m

[f] la frecuencia de vibración en Hz

[n] el nº de modo de vibración

[t] la tensión en Kg/cm<sup>2</sup>

[S] la superficie en cm<sup>2</sup>

Es un sistema de medidas absolutas.

Como métodos alternativos se utilizan:

### Extensometría

Consiste en la estimación de deformaciones unitarias a través de galgas extensométricas, que son resistencias eléctricas adheridas a las superficies de los materiales a ensayar. La variación de dichas resistencias por efecto de su variación de longitud es detectada por un circuito de medida (puente de Wheatstone), y un amplificador que permite acondicionar, leer y procesar posteriormente la señal.

Suponiendo que los niveles de deformación se encuentran dentro del comportamiento elástico de los materiales, se estiman tensiones de acuerdo a los principios de la elasticidad y resistencia de materiales que relacionan tensión y deformación a través del módulo de elasticidad.

Se aplica la fórmula

$$t= E \varepsilon$$

con

[t] tensión en Kg/cm<sup>2</sup>

[E] módulo de elasticidad en Kg/cm<sup>2</sup>. (Para el acero 2.100.000 Kg/cm<sup>2</sup>)

[ε] deformación unitaria

Es un sistema de medidas relativas respecto a un origen

Podrían haberse utilizado también galgas basadas en el principio de cuerda vibrante

### **Dinamometría**

Consiste en la estimación de la tensión existente mediante control del par de apriete de una unión atornillada determinada. Es una medida absoluta.

Se aplica la siguiente fórmula

$$N = M / (K d)$$

$$t = N/S$$

con

[N] Esfuerzo axial de pretensado en la espiga de la pieza atornillada en Kg

[M] Momento de par de apriete en Kg.m

[d] Diámetro del tornillo en m

[K] Coeficiente para tornillos en estado de suministro ( ligeramente engrasados), vale aproximadamente 0,18

[t] la tensión en Kg/cm<sup>2</sup>

[S] la superficie en cm<sup>2</sup>

Puede también estimarse la tensión mediante dinamómetros incorporados al cable de medida.

### **Hidráulica**

Consiste en la estimación de la tensión mediante el conocimiento de la presión aplicada a un émbolo de sección conocida

### **Medida de desplazamientos.**

Consiste en la medida de desplazamientos utilizando técnicas y utensilios como la topografía de precisión, la cinta extensométrica (cinta de invar), los captadores de desplazamiento (mecánicos o eléctricos), el pie de rey, etc.

Su finalidad primordial es la valoración de desplazamientos en sí, pero también pueden en determinadas fases constituir un elemento estimativo de la tensión a partir de una deformación unitaria

$$\varepsilon = \Delta l / l$$

$$t = E \varepsilon$$

con

[l] longitud en m

[t] tensión en Kg/cm<sup>2</sup>

[E] módulo de elasticidad en Kg/cm<sup>2</sup>. (Para el acero 2.100.000 Kg/cm<sup>2</sup>)

[ε] deformación unitaria

## **OBJETO DE LA INSTRUMENTACIÓN**

El objeto de la instrumentación es la auscultación de la estructura superior del Celler Gòtic durante su proceso de apeo. En concreto el interés de este seguimiento fue detectar el posible agotamiento tensional de los tirantes de los que acaba colgando el edificio.

## **DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA ESTUDIADA**

La zona de estudio corresponde a la situada sobre la bodega del monasterio, que en un principio se encuentra soportada por dos grupos de arcos de mampostería, los unos, más antiguos, localizados en la dirección perpendicular, y los otros longitudinales, perpendiculares a los anteriores, que son los que la actuación a llevar a cabo pretende eliminar.

La construcción consta de 2-3 alturas, diferenciándose dos zonas de apeo. La primera con una pared de carga mampostería de unos 3 m de altura y 40 cm de ancho y la segunda de unos 6m.

La planta esta dividida en 11 crujiás principales, separadas entre sí unos 3 m.

En cada crujía se han dispuesto dos barras roscadas de 25 mm de diámetro en la zona baja y de 32 mm de diámetro (estas niqueladas, con rosca solo en los extremos) en la zona alta. Dichas barras se encuentran encamisadas dentro de un tubo de PVC introducido mediante perforación vertical en el centro de la fábrica de mampostería.

Las barras soportan 2 perfiles metálicos continuos en la base del apeo, sobre el que se apoyan las paredes de mampostería, y transmiten la carga a jácenas metálicas habilitadas en la parte superior del edificio.

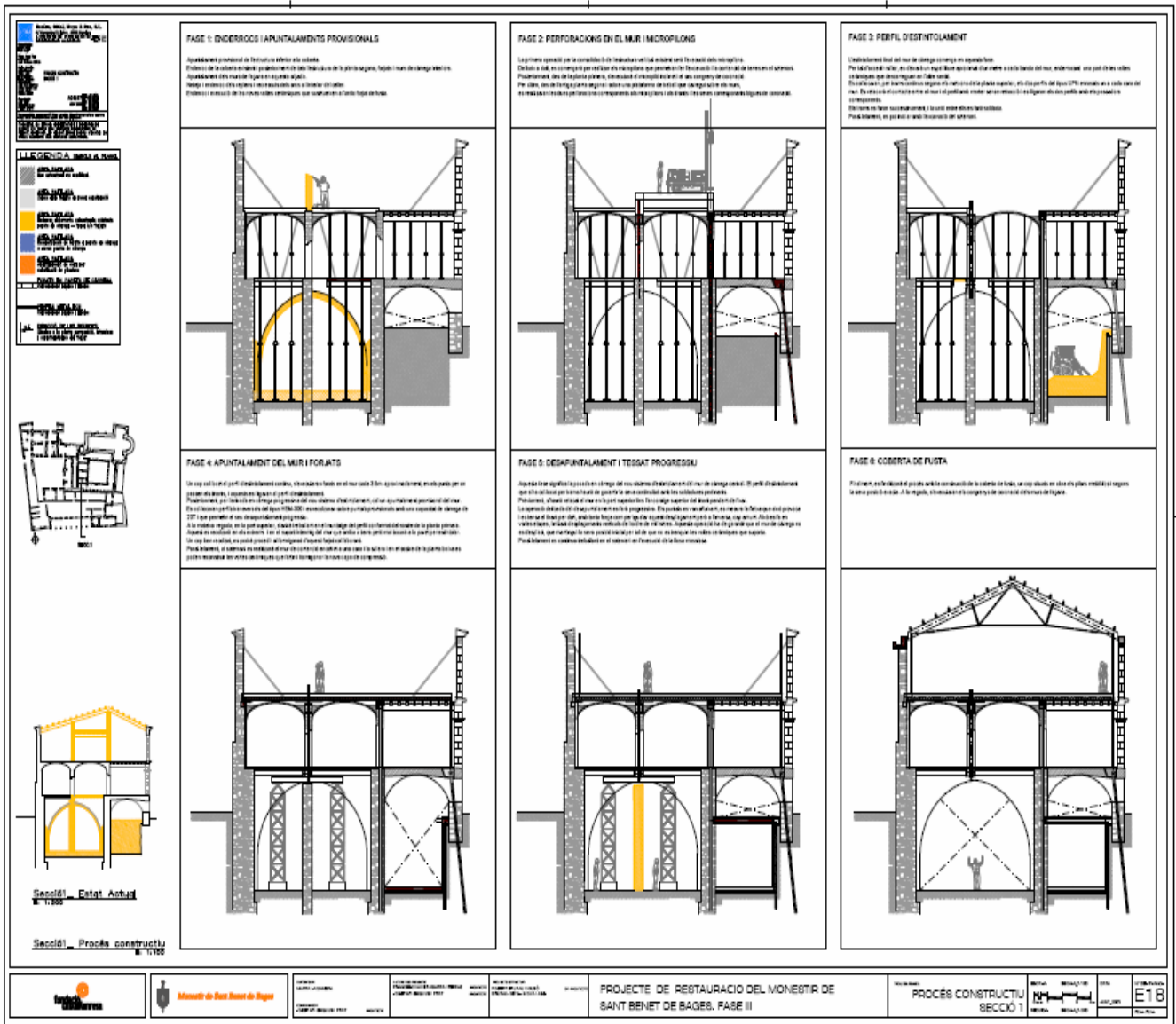
En la parte superior de las barras, sobre las jácenas metálicas que soportarán el peso de la estructura, se localiza una unión atornillada que permite tensar y/o desplazar las mismas.

Las barras de las crujiás 2 a la 7 tienen una longitud de unos 3,5 m y las de la 8 a la 11 de unos 9 m, estas últimas unidas por un casquillo situado a los 3,5 m aproximadamente.

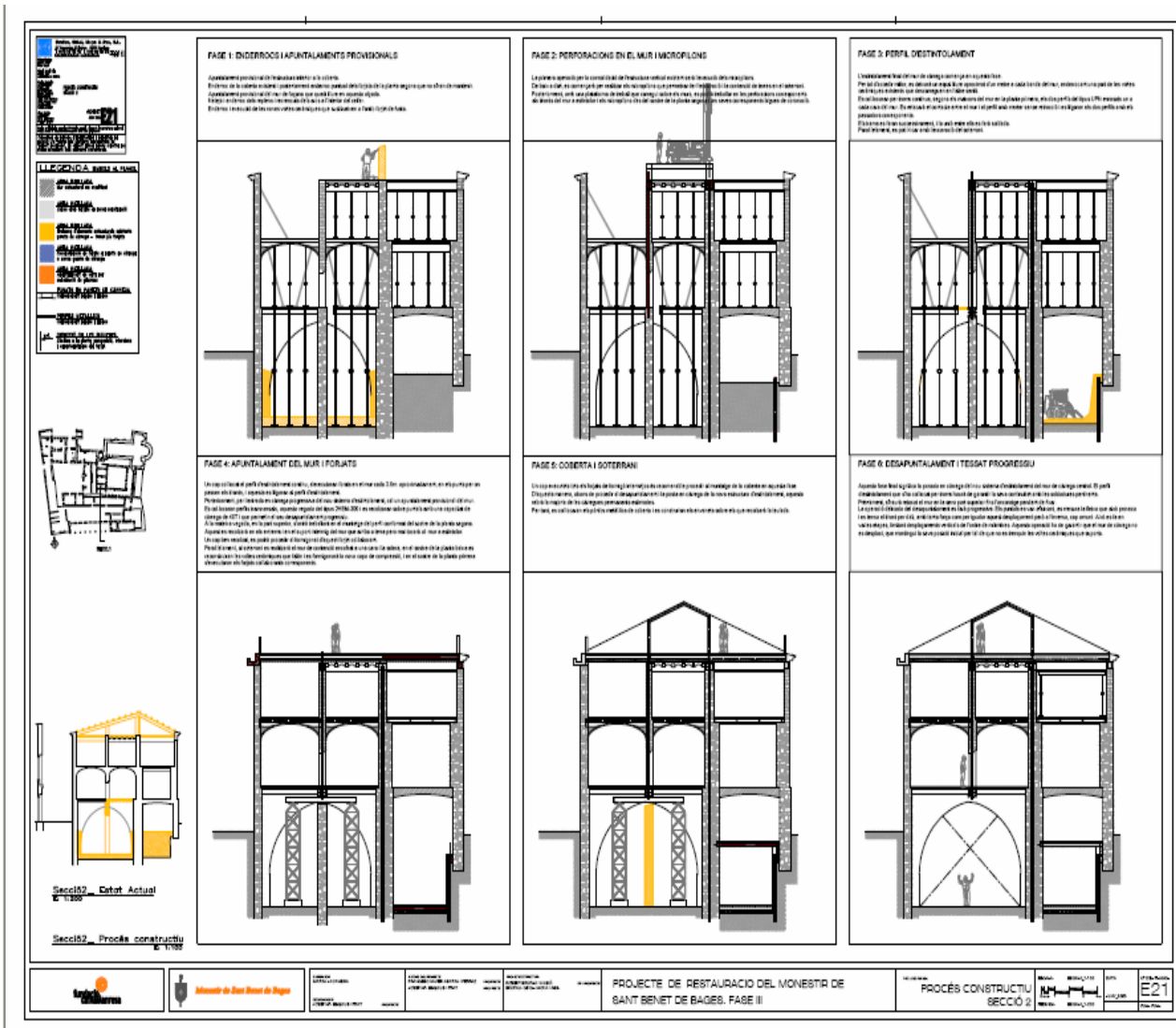
Una vez terminada la operación de apeo, los tubos de PVC son rellenados con mortero de lechada de cemento.

Los forjados son de diversas tipologías. (unidireccionales con viguetas de madera y acero).

# DESCRIPCIÓN DE LA OPERACIÓN DE APEO



- 1 Derribos y apuntalamientos provisionales
- 2 Perforaciones en el muro y micropiloteaje
- 3 Montaje perfil de apeo
- 4 Apuntalamiento del muro y los forjados
- 5 Desapuntalamiento y tensado progresivo
- 6 Montaje cubierta



## MODELIZACIÓN TEÓRICA

Se ha elaborado un modelo de cálculo por el método de elementos finitos que ha permitido realizar una previsión de los estados tensionales y deformacionales de la estructura.

Se han previsto los siguientes valores

Tirantes cortos (2) 16,65 T 10,8 mm  
 Tirantes largos (2) 33,10 T 26,8 mm

## DESCRIPCIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN

### Ensayos dinámicos

Los ensayos se realizan con objeto de valorar el nivel de vibración de las barras para poder extrapolar después su estado tensional.

Los ensayos dinámicos permiten determinar experimentalmente la frecuencia correspondiente al primer modo propio de vibración de los elementos ensayados. A partir de las frecuencias obtenidas se trata de correlacionar los resultados obtenidos con las tensiones de los elementos en cuestión.

La prueba consiste en la medida y el registro de la vibración experimentada por un elemento bajo el efecto de una excitación producida de forma artificial.

Para la realización de las medidas se dispone de un equipo de medida extensométrico, con acelerómetros piezorresistivos conectados a un amplificador dinámico que transmite señal analógica a un ordenador que procesa, analiza y guarda la señal.

Los acelerómetros se fijan en puntos correspondientes al centro (o cuarto) de la barra. El sistema de excitación de la estructura se realiza mediante el golpeo manual de una persona sobre la misma, por lo que se excita localmente la barra.

Para la medida de temperatura y humedad ambiente se han usado termómetros de mercurio e higrómetros digitales.



### Transductores

Los transductores están constituidos por un acelerómetro piezorresistivo, que consta de una masa de cristal de silicio suspendida dentro de una caja de silicio. Se ha acondicionado para que su salida equivalente sea la correspondiente a la de un circuito de medida (puente completo de Wheatstone).

Las características técnicas de los acelerómetros varían en función de los rangos de aceleración y frecuencia a medir. Se dispondrá de los siguientes:

Referencia: SEIKA B1

Rango de aceleración:  $\pm 3$  g

Rango de frecuencias: 0-160 Hz.

Calibración: 0.5mV/V - 41 mV (1 g=2000 mV) :0.5mV/V - 1057 mV ( 1 mV= 1 $\mu$ ξ)

Sensibilidad: 136 mV/g

Tensión de alimentación 5 V

Peso: 83 gramos.

### Amplificador

El amplificador que recibe la señal está integrado dentro de un instrumento "IMC", que consta de un módulo de alimentación, display y módulos de amplificación de transductores y galgas extensométricas tipo AC-VI.

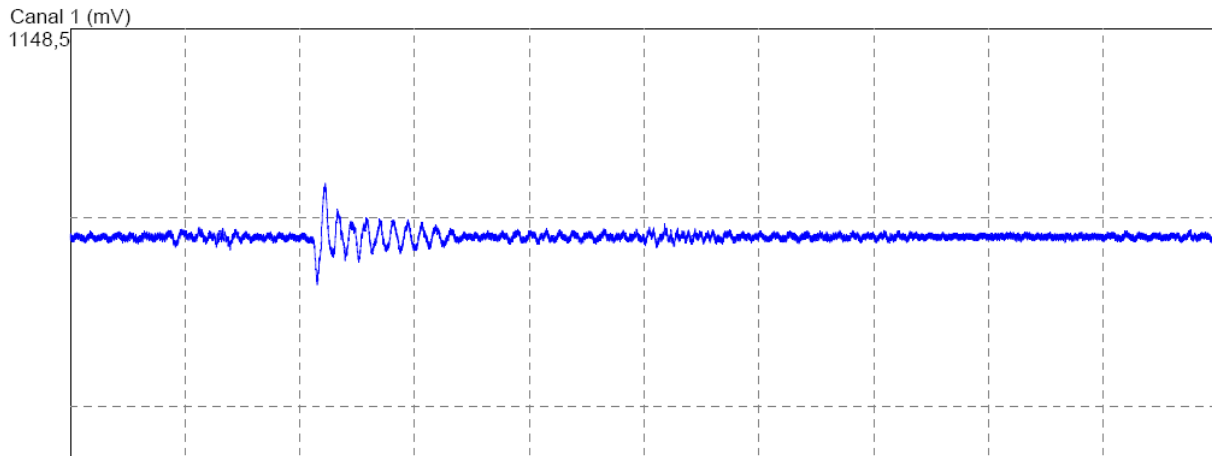
El amplificador es de corriente continua de circuitos integrados por galgas extensométricas y transductores en 1/4, 1/2 y puente completo. Exteriormente dispone de:

- Interruptor de selección de tipo de conexión del puente.
- Interruptor de calibración.
- Ganancia de basto y ganancia de fino.
- Ajuste de cero.

## Monitorización, análisis y adquisición de datos.

La señal de salida del amplificador de cada canal (señal 0-5 V) es recogida por una tarjeta de adquisición de datos incorporada a la CPU de un ordenador.

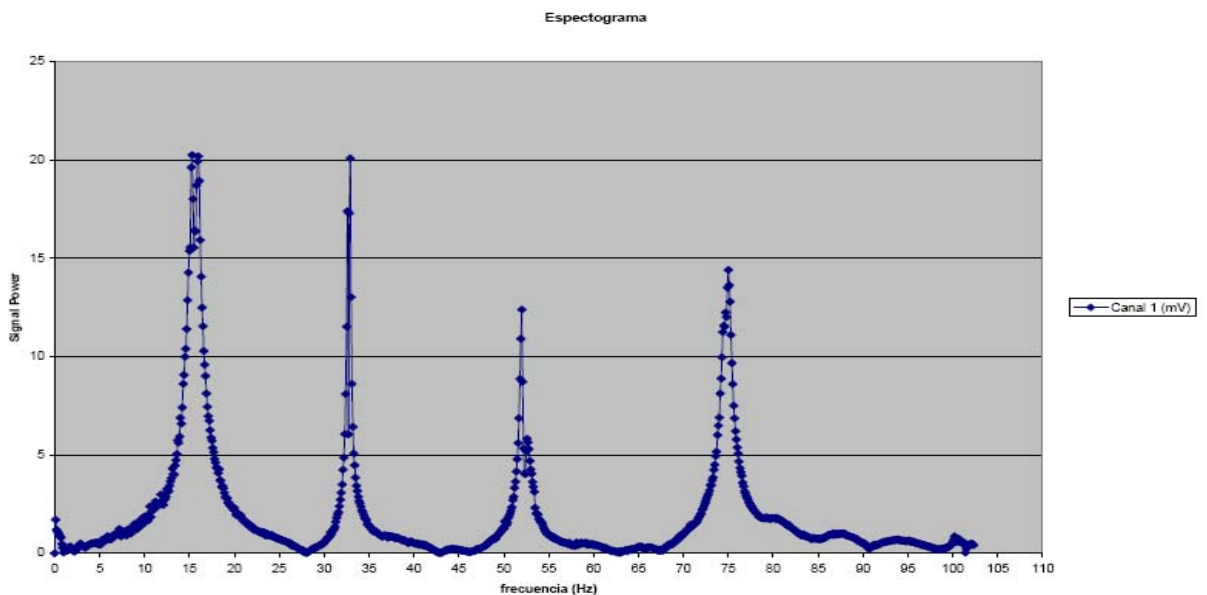
El ordenador utilizado es un Toshiba Satellite S 1800, de 1000 MHz, de 40 Gb de disco duro y 120 MB de RAM. El PC mediante un software específicamente diseñado para este tipo de aplicaciones, es capaz de monitorizar las lecturas, procesar los datos y guardar la información.



Las prestaciones del software permiten la calibración de los canales desde el ordenador, el control mediante display de los valores de 4 canales, la visualización en tiempo real de gráficas aceleración/tiempo, filtrado pasa-bajos de primer orden para la señal, cálculo de la frecuencia pico a pico, zooms de la pantalla, conversión de los ficheros a formato ASCII e impresión de resultados.

Un módulo independiente permite el análisis frecuencial utilizando la transformada de Fourier y encontrar el espectro de frecuencias.

En este caso concreto para la interpretación de los resultados se ha elaborado un modelo de elementos finitos que permite la realización cálculos teóricos y comparar los resultados con los experimentales.





## **Extensometría**

Para la determinación de las tensiones se ha recurrido a un sistema medida mediante galgas extensométricas compensadas térmicamente (20 en total). Las galgas son resistencias adheridas al material ensayado integradas dentro de puentes de medida y conectadas a un amplificador extensométrico, cuyo control corre a cargo del ordenador, que monitoriza, procesa y guarda la información recogida.

### Medida de tensiones

Durante la prueba se han realizado medidas de tensiones.

El sistema de medida empleado esta basado en medidas realizadas mediante puentes de galgas integradas dentro de un equipo de medida extensométrico.

### Transductores

Se dispone de tres puntos de medida simultáneos.



Se dispone de una caja de conexiones de 8 canales multiplexados

Los transductores están constituidos por galgas extensométricas de 120 ohms, previamente adheridas al elemento de medida (con adhesivo base de cianocrilato para el acero y de resina epoxi para otros casos).

Las características técnicas de los acelerómetros varían en función de los rangos de aceleración y frecuencia a medir. Se ha dispuesto de los siguientes:

Referencia: VISHAY C-120

Calibración: 0.5mV/V – 1057 mV: 1000 ohms 57 microdef

Cero: 5 h 00

Tensión de alimentación 120 V 50 Hz (SAI)

### Amplificador

El amplificador que recibe la señal está integrado dentro de un instrumento "IMC", que consta de un módulo de alimentación, display y módulos de amplificación de transductores y galgas extensométricas tipo AC-VI.

El amplificador es de corriente continua de circuitos integrados por galgas extensométricas y transductores en 1/4, 1/2 y puente completo. Exteriormente dispone de:

- Interruptor de selección de tipo de conexión del puente.
- Interruptor de calibración.
- Ganancia de basto y ganancia de fino.
- Ajuste de cero.

Previamente a la entrada del amplificador se dispone de un módulo de adaptación para a captadores piezorresistivos con alimentación desde la fuente, destinado a compensación térmica y preamplificación de la señal.

### Monitorización, análisis y adquisición de datos.

La señal de salida del amplificador de cada canal (señal 0-5 V) es recogida por una tarjeta de adquisición de datos incorporada a la CPU de un ordenador.

El ordenador utilizado es un Toshiba Satellite S 1800, de 1000 MHz, de 20 Gb de disco duro y 120 MB de RAM. El PC mediante un software específicamente diseñado para este tipo de aplicaciones, es capaz de monitorizar las lecturas, procesar los datos y guardar la información.

### **Pares de apriete**

La valoración de la tensión mediante medida del par de apriete se realiza mediante ayuda de una llave dinamométrica

La llave utilizada ha sido una llave Palmera  $\frac{3}{4}$  " OLT 053841

Para la estimación de tensiones se ha recurrido a la fórmula

$$M = N \cdot d \cdot 0,18$$

con M= momento en Kg.m, N= Tensión en Kg d= diámetro en m

### **Topografía de precisión:**

- Bases fijas

Se ha instalado 1 pilarete metálico anclado al pavimento mediante tacos mecánicos de modo que permita visualizar secciones por estacionamiento a distancias inferiores a 25 metros aproximadamente.

Se ha optado por trabajar en coordenadas relativas referenciadas a un valor arbitrario asignado al pilarete. De esta forma se determinará la situación espacial del otro prisma fijo y se utilizarán ambos como bases fijas. Desde estas bases fijas es posible localizar otros puntos en el mismo sistema referencial.

Se ha optado por bases fijas en forma de pilares metálicos con los que se estaciona el aparato topográfico mediante una rosca de cinco octavos situada en la plataforma superior del pilar. Este método aporta mayor precisión planoaltimétrica que el estacionamiento sobre clavo de acero con trípode.

En concreto, a partir de estas estaciones (bases fijas) se observarán aquellos puntos que se han definido y señalizado en las superficies de la estructura, distribuidos en diversas zonas.



Tras la colocación de pilaretes fijos, se desestimo la utilización de los mismos, ya que fueron retirados por necesidades constructivas, siendo sustituidos por pernos de referencia clavados en el suelo.

- Sección de control topográfica.

En cada sección a auscultar se han tomado 1 punto de puntería. Se han colocado mini móviles. Estos son trasladables, enroscables en pernos anclados mediante tacos mecánicos, con rosca de cinco octavos. Los prismas, encarados a la base topográfica, una vez enroscados, siempre mantienen la misma posición.

Los resultados se presentan en coordenadas relativas de cada sección junto con los diferenciales tomados a partir del promedio de las lecturas del primer estacionamiento. (este promedio se utilizará en lo sucesivo como cero).



- Instrumentos de medida

Para la realización de las medidas se ha contado con una estación total marca GEODIMETER modelo 500.

La precisión en topografía de auscultación según el sistema descrito esta cercana al milímetro.

**Cinta de convergencia.**

Las medidas de convergencia son muy representativas para obtener el desplazamiento relativo de puntos situados en la misma sección de control.

Se han colocado dos cáncamos por sec en las secciones a auscultar. Se toma una lectura por sección.

Instrumentos de medida

Para las medidas se utiliza una cinta extensométrica MKII Tape estensometer, de 25 m de longitud, 0,05 mm de resolución y con curva de incidencia de variaciones térmicas utilizada para corrección de las medidas. La precisión del método es del orden de 0,5 mm



## RESULTADOS DE LAS MEDICIONES

En la tabla siguiente se presenta un resumen de los mismos.

REF BARRA	INCREMENTO TENSIÓN (Kg/cm <sup>2</sup> )			INCR. DEF (mm)	
	GALGAS	APRIETE	DINÁMICOS	CINTA	TOPOG.
2A	1094	1440	1110,3	1,68	
2B		1440	426,4		
3A	749	1440	692,0	1,57	1
3B	1193	1440	784,2		
4A	976	1440	457,1	1,47	0
4B	1823	1440	633,2		
5A	2953	1440	307,4	1,37	3
5B		1440	490,0		
6A	1682	1440	834,8	2,24	2
6B	1172	1440	1731,5		
7A	2926	1440	790,6	2,67	2
7B	1624	1440	2106,3		
8A		1567	634,5	1,36	
8B		1567	1029,9		
9A		1567	958,1	1,87	
9B		1567	1002,0		
10A		1567	804,4	1,66	
10B		1567	783,6		
11A		1567	1169,4	1,68	
11B		1567	240,8		

A la vista de los mismos puede decirse que:

Las tensiones máximas estimadas son del orden de 2500 Kg/cm<sup>2</sup>. Las fuerzas estimadas para las barras de 25 mm están entre los 3000 y 9000 Kg, y para las barras de 32 mm están entre 9.000 y 16.000 Kg., valores dentro del rango esperado.

La deformación medida y recuperada en la zona 4-8 de 12 m. de luz para la actuación inicial de apeo controlado ha sido del orden de 2,5 mm.

Se comparan los resultados de los distintos sistemas de medida. Previamente en función de la resolución de los instrumentos empleados es posible establecer la siguiente clasificación de cara a la evaluación de tensiones

Galgas extens.	Par de apriete	Frecuencia de vibr.	Cinta de invar	Estación topog.
2.1	74	6.6	36	360

Las medidas obtenidas con galgas extensométricas han resultado las más precisas a corto plazo, en procesos desencadenados durante intervalos cortos (p.e. 1 h). No obstante pierden efectividad en el uso prolongado, ya que las condiciones duras de la obra en cuanto a termo higrometría y alteraciones mecánicas de la instalación (tirones, sacudidas, vibraciones, polvo, etc) merman a largo plazo su rendimiento. Presentan como inconvenientes adicionales la complejidad de montaje y el hecho de valorar sólo incrementos de tensiones, no tensiones absolutas.

Las medidas estimadas con par de apriete son en general poco precisas, la dificultad de aplicación del par dada la proximidad de las tuercas entre sí (la llave dinamométrica no podía actuar en alguna de

las uniones), el diferente grado de engrase (se procedió a engrasar los tornillos mediante spray-antioxidante previamente a cada medición), el efecto local de la medición, así como la poca resolución son las causas principales de la poca fiabilidad. No obstante dan una aproximación general aceptable con relativa sencillez, a falta de otros métodos, y permiten valorar tensiones absolutas.

Las tensiones estimadas mediante valoración de frecuencias propias de vibración (método de la cuerda vibrante) constituyen en todo momento un método robusto de cálculo y que permite estimar tensiones absolutas. (Sus inconvenientes son el caso de aquellas barras muy próximas al tubo de PVC que no permiten ser excitadas de forma natural y en menor grado la dificultad de estimar la luz real). Debe tenerse en cuenta el hecho de que en las barras grandes aparece en la mayoría de los casos más claramente la frecuencia asociada al segundo modo de la longitud total y es la que se ha utilizado en los cálculos.

La cinta extensométrica, la topografía y el pie de rey no se han utilizado directamente para la estimación de tensiones, aunque con ayuda de un modelo teórico más ajustado podrían extrapolarse valores de tensión a partir de las deformaciones obtenidas del orden de los obtenidos. Aportan siempre valores relativos

	EXTENSOMETRIA	PARES	DINAMICOS	CINTA	TOPOGRAFIA
SENCILLEZ	+	++++	++	+++	++
VALORES ABSOLUTOS	+	++	++	+	+
ROBUSTEZ	+	++++	++	+++	+++
PRECISIÓN	++++	++	+++	++	+
FIABILIDAD	+	+	+++	++++	+
ACCESIBILIDAD	++	++++	+++	+++	+++

### OTROS CASOS SEMEJANTES

Cubierta Delfinario Zoológico de Barcelona

Tirantes escalera metálica fachada Universidad Rovira i Virgili de Tarragona

Tirantes estructura postensada Colegio en Cardona

Tirantes en sede Universidad Pompeu Fabra en C/ Wellington