

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

Jaume Terzán¹, Diego Martín²

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/cm²

[S] la superficie en cm²

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/cm²

[E] módulo de elasticidad en Kg/cm². (Para el acero 2.100.000 Kg/cm²)
[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/cm²

[S] la superficie en cm²

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/cm²

[E] módulo de elasticidad en Kg/cm². (Para el acero 2.100.000 Kg/cm²)

[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 crujiá 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

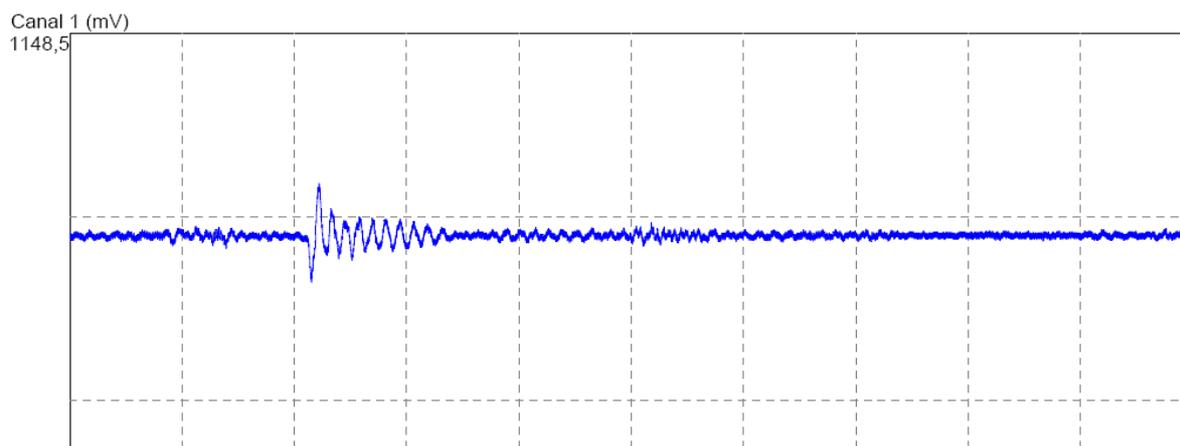
<p>LEGENDA</p> <p>■ MUR ORIGINAL</p> <p>■ MUR DE APEO</p> <p>■ MUR DE APEO CON REFORZOS</p> <p>■ MUR DE APEO CON REFORZOS Y MICROPILOTAJE</p> <p>■ MUR DE APEO CON REFORZOS Y MICROPILOTAJE Y CUBIERTA</p> <p>■ MUR DE APEO CON REFORZOS Y MICROPILOTAJE Y CUBIERTA Y SUELO</p> <p>■ MUR DE APEO CON REFORZOS Y MICROPILOTAJE Y CUBIERTA Y SUELO Y REFORZOS DE FONDO</p>	<p>FASE 1: ENERDICIONS I APUNTALAMENTS PROVISIONALS</p> <p>Establiment provisional de l'estructura exterior de l'edifici.</p> <p>Instal·lació de la estructura exterior i apuntalament dels murs de la planta superior, respecte de l'estructura original.</p> <p>Instal·lació de la estructura exterior i apuntalament dels murs de la planta inferior, respecte de l'estructura original.</p> <p>Instal·lació de la estructura exterior i apuntalament dels murs de la planta inferior, respecte de l'estructura original.</p>	<p>FASE 2: PERFORACIONS EN EL MUR I MICROPILOTAJE</p> <p>Realització de perforacions en el mur i instal·lació de micropilotes a l'estructura exterior de l'edifici.</p> <p>Instal·lació de la estructura exterior i apuntalament dels murs de la planta superior, respecte de l'estructura original.</p> <p>Instal·lació de la estructura exterior i apuntalament dels murs de la planta inferior, respecte de l'estructura original.</p>	<p>FASE 3: PERFIL DESTAINTAMENT</p> <p>Destintament del mur de la planta superior i instal·lació de la estructura exterior de l'edifici.</p> <p>Destintament del mur de la planta inferior i instal·lació de la estructura exterior de l'edifici.</p> <p>Destintament del mur de la planta inferior i instal·lació de la estructura exterior de l'edifici.</p>
	<p>FASE 4: APUNTALAMENT DEL MUR I FORJATS</p> <p>Instal·lació de la estructura exterior i apuntalament dels murs de la planta superior, respecte de l'estructura original.</p> <p>Instal·lació de la estructura exterior i apuntalament dels murs de la planta inferior, respecte de l'estructura original.</p> <p>Instal·lació de la estructura exterior i apuntalament dels murs de la planta inferior, respecte de l'estructura original.</p>	<p>FASE 5: DESAPUNTALAMENT I TENSATGE PROGRESSIU</p> <p>Desapuntament de la estructura exterior i instal·lació de la estructura exterior de l'edifici.</p> <p>Desapuntament de la estructura exterior i instal·lació de la estructura exterior de l'edifici.</p> <p>Desapuntament de la estructura exterior i instal·lació de la estructura exterior de l'edifici.</p>	<p>FASE 6: COBERTA DE FUSTA</p> <p>Instal·lació de la estructura exterior i apuntalament dels murs de la planta superior, respecte de l'estructura original.</p> <p>Instal·lació de la estructura exterior i apuntalament dels murs de la planta inferior, respecte de l'estructura original.</p> <p>Instal·lació de la estructura exterior i apuntalament dels murs de la planta inferior, respecte de l'estructura original.</p>
	<p>Secció: Patat Actual</p>	<p>Secció: Procés constructiu</p>	
		<p>PROJECTE DE RESTAURACIÓ DEL MONESTIR DE SANT BENET DE BAGES. FASE II</p>	<p>PROCÉS CONSTRUCTIU SECCIÓ 1</p>

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

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.

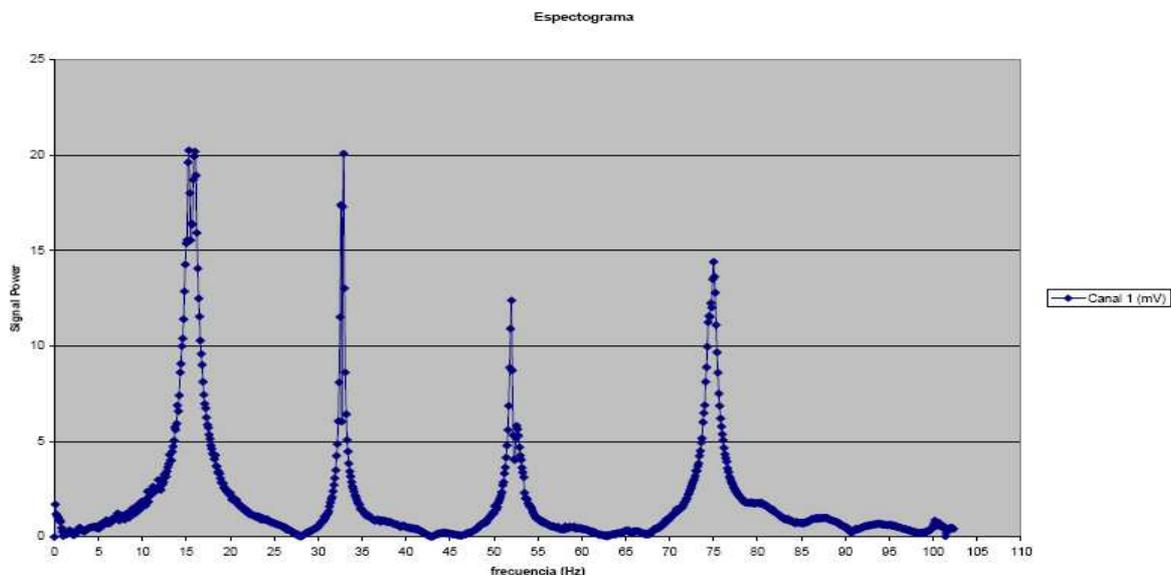
El ordenador utilizado es un Toshiba Satellite S 1800, de 1000 MHz, de 40 Gb de disco duro y 120 MB de RAM. El PC mediante un software específicamente diseñado para este tipo de aplicaciones, es capaz de monitorizar las lecturas, procesar los datos y guardar la información.



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.



RESULTADOS DE LAS MEDICIONES

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

REF BARRA	INCREMENTO TENSION (Kg/cm ²)			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/cm². 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 Tattagona

Tirantes estructura postensada Colegio en Cardona

Tirantes en sede Universidad Pompeu Fabra en C/ Wellington