

EL PROBLEMA DE LA FATIGA EN EL DISEÑO DE EJES DE CAMPANAS: ROTURA DE UNA CAMPANA EN LA CATEDRAL DE VALENCIA

Prof. Salvador Ivorra

Catedrático de Universidad – Dr. Ingeniero Industrial Mecánico



El día 25 de enero de 2014 durante los volteos del día de Navidad se produjo el colapso de la campana “*El Jaume*” en la sala de campanas de la torre campanario “*El Micalet*” de la Catedral de Valencia.

Peso: 2850 kg (1750 kg del bronce más yugo de madera, herrajes y badajo).

Volteo: Gira a una velocidad de unas 30 vueltas/minuto

- Sobre el eje existe una variación de los esfuerzos de flexión de positivo a negativo durante la fase de volteo.
- El eje de la campana se encuentra sometido a un proceso de fatiga durante este proceso.





INTRODUCCIÓN **ANÁLISIS CUALITATIVO** **ANÁLISIS CUANTITATIVO** **METALURGIA** **CONCLUSIONES**





Las asas presentan un color brillante en la sección de la rotura, todas ellas el mismo color sin existir muestras de oxidación. No se observa ningún síntoma de plastificación localizada. Todas ellas han sufrido una rotura frágil al mismo tiempo. Esto ha ocurrido debido a que este material, el bronce, procedente de fundición es un material frágil que rompe de forma brusca frente a una carga súbita que produzca tensiones superiores a las de su capacidad resistente.



INTRODUCCIÓN

ANÁLISIS CUALITATIVO

ANÁLISIS CUANTITATIVO

METALURGIA

CONCLUSIONES



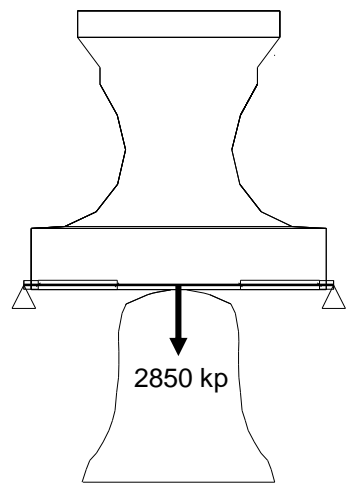
El siguiente punto de la inspección son los anclajes con los rodamientos, en este caso se observa una rotura en el eje izquierdo (desde el interior de la torre).

La rotura se ha producido en la transición del yugo de madera a la zona de anclaje.





INTRODUCCIÓN | ANALISIS CUALITATIVO | ANALISIS CUANTITATIVO | METALURGIA | CONCLUSIONES



El eje está constituido por un yugo de madera de grandes dimensiones, en la zona de anclaje con el rodamiento este eje de madera dispone de un cajeadado prismático, centrado en la parte inferior de este eje de 60x60x550 mm. En él se inserta una barra prismática de acero de 650 mm de longitud: uno de sus tramos posee 550 mm, es de 60x60 mm de sección y directamente se ancla mediante tornillos y dos abrazaderas de acero al yugo de madera. Esta barra prismática posee 100 mm adicionales, torneados a sección circular de $\varnothing 55$ mm que sobresalen del yugo para anclarse sobre el rodamiento.



Tras esta inspección visual, claramente se puede identificar el proceso de caída de la campana durante el proceso de volteo:

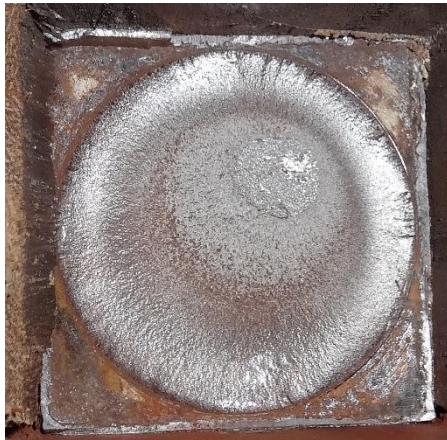
Rotura de eje izquierdo (desde el interior de la torre) cuando el bronce está casi horizontal hacia el exterior de la torre.



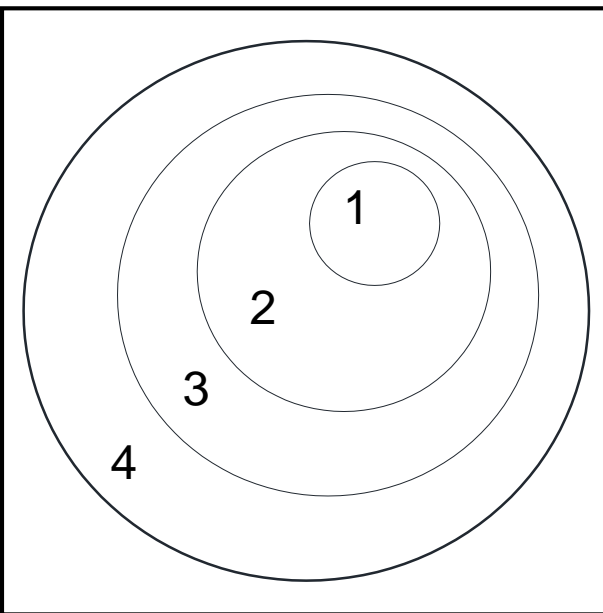
Se transmite todo el momento generado por peso de la campana -y sus fuerzas de inercia al girar-, al eje derecho lo que produce la rotura del anclaje del rodamiento.



El conjunto bronce y madera caen al suelo, se produce el impacto con un ángulo no superior a 50° y se parten frágilmente las alas. El bronce que queda finalmente con la boca hacia abajo y el yugo cae hacia el interior de la torre.

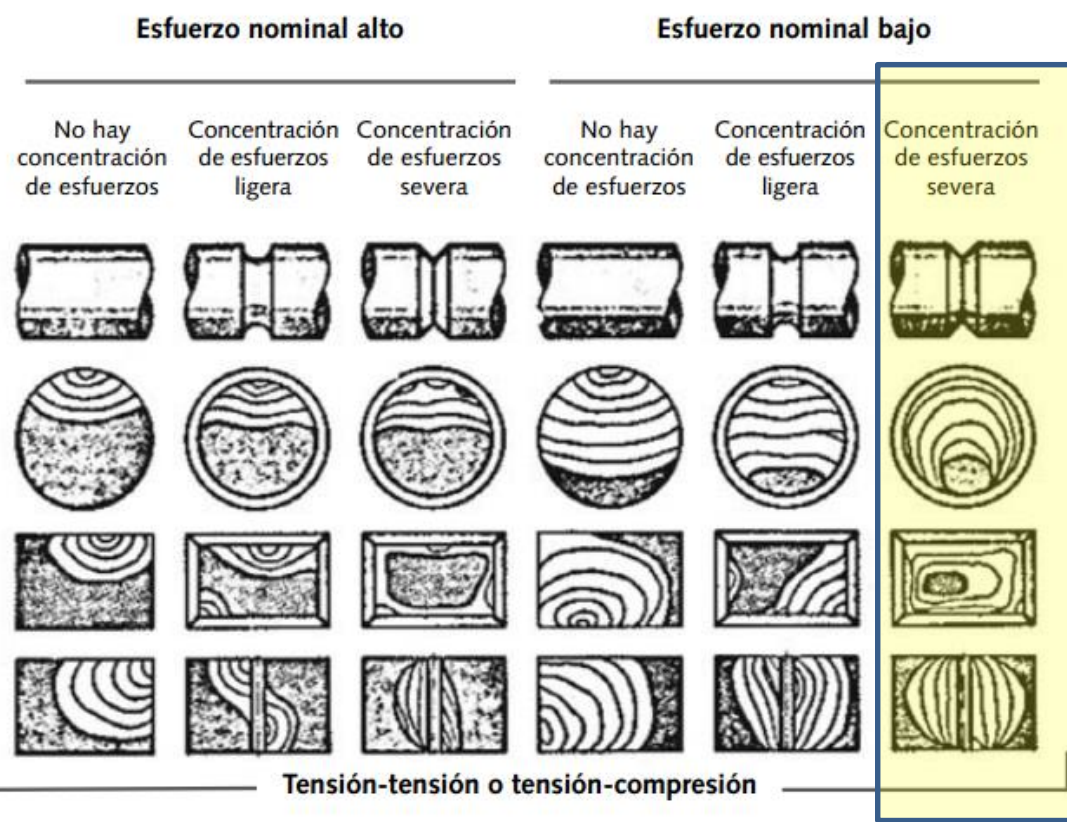


1. Circular, muy rugosa, de color brillante. Soportó los últimos esfuerzos el día de la rotura. **Se produjo una rotura dúctil final.**
2. Circular, con cierta rugosidad. Centro desviado respecto del centro del eje hacia arriba. Generada por la variación de los esfuerzos originados por la variación de tensión-compresión de la flexión rotativa. Se ha desviado hacia arriba como consecuencia que las partes inferiores estaban agrietadas. **Es una zona intermedia de avance de la grieta.**
3. Circular, color rojizo derivado de la oxidación del acero. Centro desviado hacia arriba como consecuencia que la zona inferior, estaba ya agrietada. **Esta zona llevaba tiempo ya abierta (fisura).**
4. Circular, presenta un color brillante. Este color es debido al roce entre los dos extremos de una grieta abierta que generan su pulido. **En esta zona se inició la rotura del eje.**





INTRODUCCIÓN | **ANÁLISIS CUALITATIVO** | ANÁLISIS CUANTITATIVO | METALURGIA | CONCLUSIONES



Claramente la rotura del eje de la campana “El Jaime” ha sido producida por un fenómeno de fatiga.

Se ha producido un exceso de esfuerzos originados por una concentración de esfuerzos severa al no existir radio de acuerdo. Esto ha originado el inicio de la fisura en la zona más traccionada de la sección (cara inferior) que se ha propagado durante el tiempo hasta producir el colapso final.

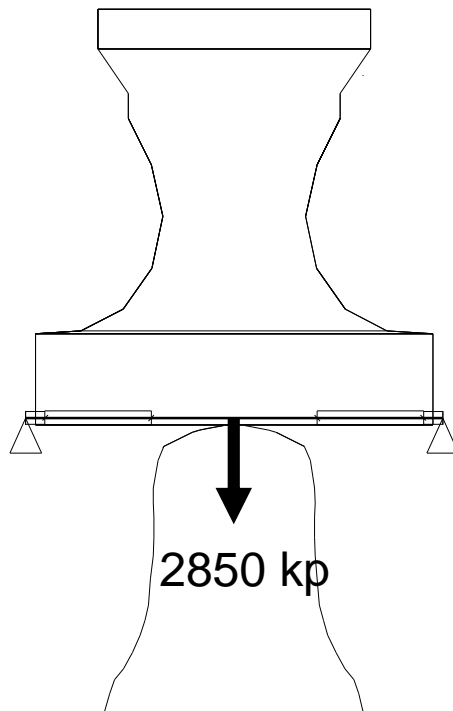
Dado el bajo número de ciclos al que se somete esta campana durante el año, probablemente la fisura se iniciaría hace varios años.

Metals Handbook, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, vol. 10, 8a. ed., 1975, p. 102



Análisis de los esfuerzos estáticos

Tal y como se ha indicado el peso total que ha de soportar el eje de la campana de forma estática es de 2850 kg . Asumiendo un modelo simplificado tipo **viga biapoyada** de 2.16 m para del conjunto, en la sección donde se ha producido la rotura se presentan 1500 N·m de momento flector y 13945 N de cortante.



A partir de las Leyes de la Resistencia de Materiales y del criterio de von Mises la tensión equivalente a la que está sometida una sección circular de $\varnothing 55$ mm en ese punto es de: **92.59 N/mm²**.

Valor muy inferior a los 340 N/mm² que es capaz de soportar este acero en régimen elástico



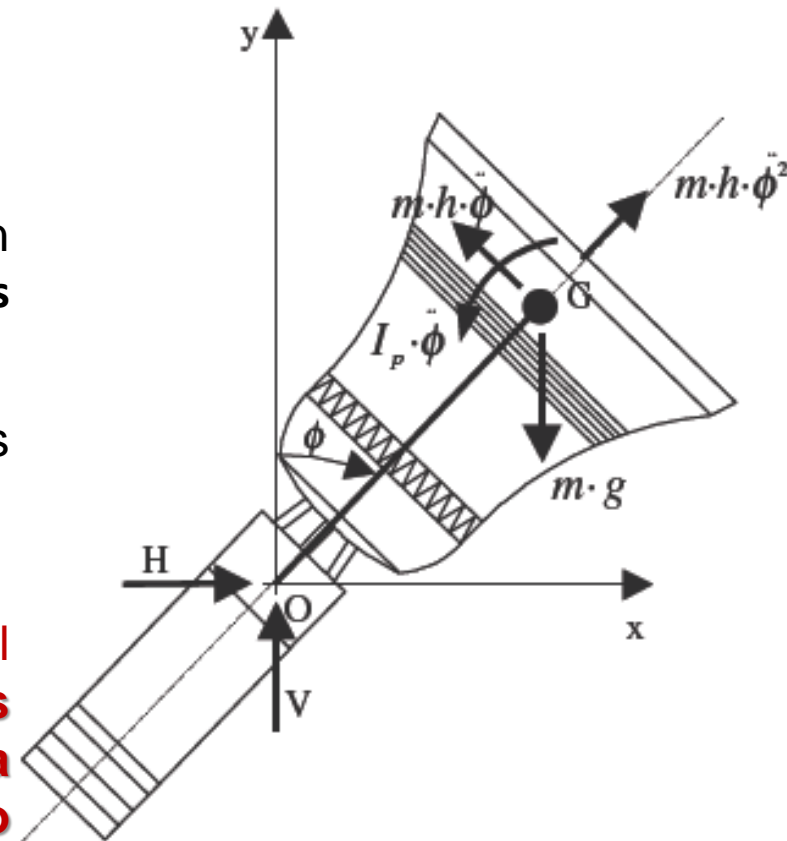
Análisis de los esfuerzos dinámicos

Es necesario conocer:

- Velocidad de giro. → 30 rev/min
- Masa total móvil → 2800 kg
- Número de oscilaciones desde que se instalaron los nuevos ejes en 1992. → **350.000 ciclos (incertidumbre)**

Se calculan los valores de las fuerzas horizontales (H) y verticales (V) sobre los apoyos (rodamientos).

Para campanas con el sistema de volteo español pueden adoptarse valores máximos de **1.5 veces el peso propio de la campana con respecto a la máxima carga vertical** y de **0.4 veces el peso propio de la campana con respecto a la máxima carga horizontal**.



Tesis doctoral Ivorra (2002)



Análisis de los esfuerzos dinámicos

En base a estos análisis, adoptaremos **un coeficiente de amplificación de la carga actuante sobre el eje de la campana de 1.5 por efectos dinámicos.**

Para la determinación de la curva tensión-vida de este eje procederemos a determinar las curvas S-N conocidas también como curvas de Wöhler. Se pueden aproximar estas curvas del siguiente modo:

- $S'_{1000} = 0.9 \cdot S_u$ (resistencia a mil ciclos, como el 90 % de resistencia última a tracción)
- $S'_e = 0.5 \cdot S_u$ (resistencia vida infinita 10^6 ciclos, como el 50 % de resistencia última a tracción)

En la sección crítica del eje, la tensión de fatiga se puede calcular a través de la siguiente expresión:

$$S_N = K_a \cdot K_b \cdot K_c \cdot K_d \cdot K_e \cdot (S' / K_f)$$



Análisis de los esfuerzos dinámicos

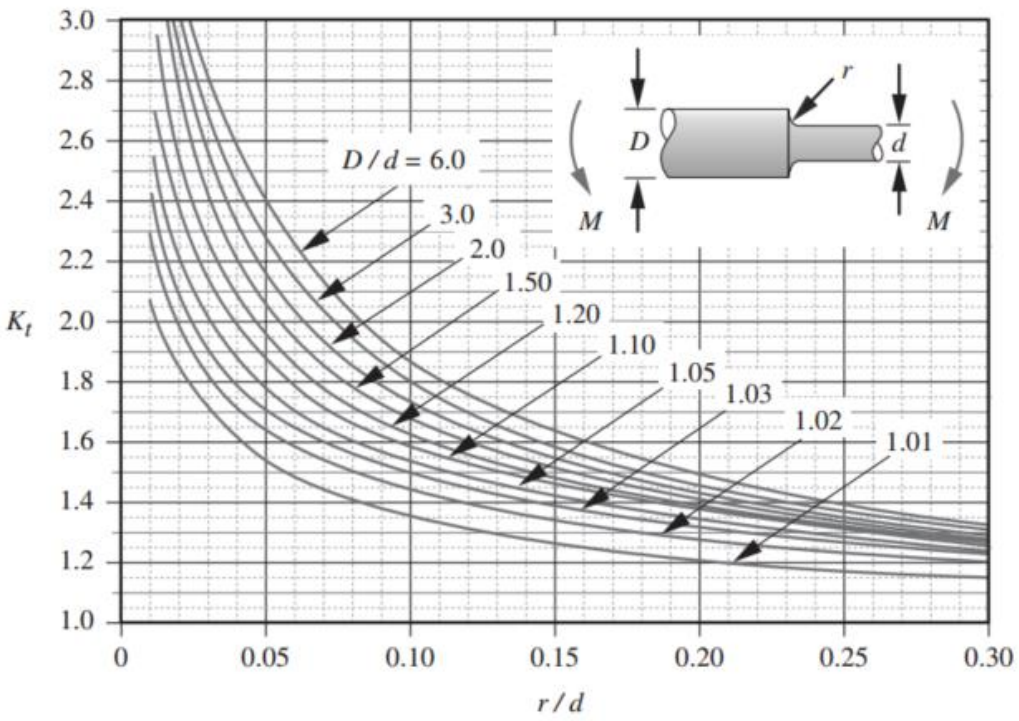
- K_b = Coeficiente de acabado superficial (adoptaremos 1 al no disponer de más datos)
- K_b = Coeficiente de tamaño, adoptaremos 1.
- K_c = Tipo de carga, adoptaremos 1 al ser una carga de flexión.
- K_d = Temperatura, al ser inferior a 450°C la temperatura ambiente, se adoptará 1.
- K_e = Confiabilidad, se adoptará un valor de 1, dado que la rotura ya se ha producido.
- K_f = Concentrador de tensiones. Se adoptará un valor de 1 para los primeros 1000 ciclos por ser este acero un acero dúctil. A partir de los primeros 1000 ciclos se evaluará el concentrador de tensiones dinámico a partir de la **FIGURA**

$$K_f = 1 + q (K_t - 1)$$

Donde q es la sensibilidad de la muesca que varía entre 0 y 1. El valor tiende a 1 cuando el radio de acuerdo de la muesca es muy pequeño (**FIGURA**), caso de este estudio, por lo que finalmente el valor de $K_f = 4.3$ asumiendo un radio de acuerdo de 0.1 mm (que podría llegar a ser menor incluso al ser una unión a 90°).



Análisis de los esfuerzos dinámicos



$$K_t \equiv A \left(\frac{r}{d} \right)^b$$

donde:

D/d	A	b
6.00	0.878 68	-0.332 43
3.00	0.893 34	-0.308 60
2.00	0.908 79	-0.285 98
1.50	0.938 36	-0.257 59
1.20	0.970 98	-0.217 96
1.10	0.951 20	-0.237 57
1.07	0.975 27	-0.209 58
1.05	0.981 37	-0.196 53
1.03	0.980 61	-0.183 81
1.02	0.960 48	-0.177 11
1.01	0.919 38	-0.170 32

Evaluación del coeficiente de concentrador de tensiones en un eje sometido a flexión

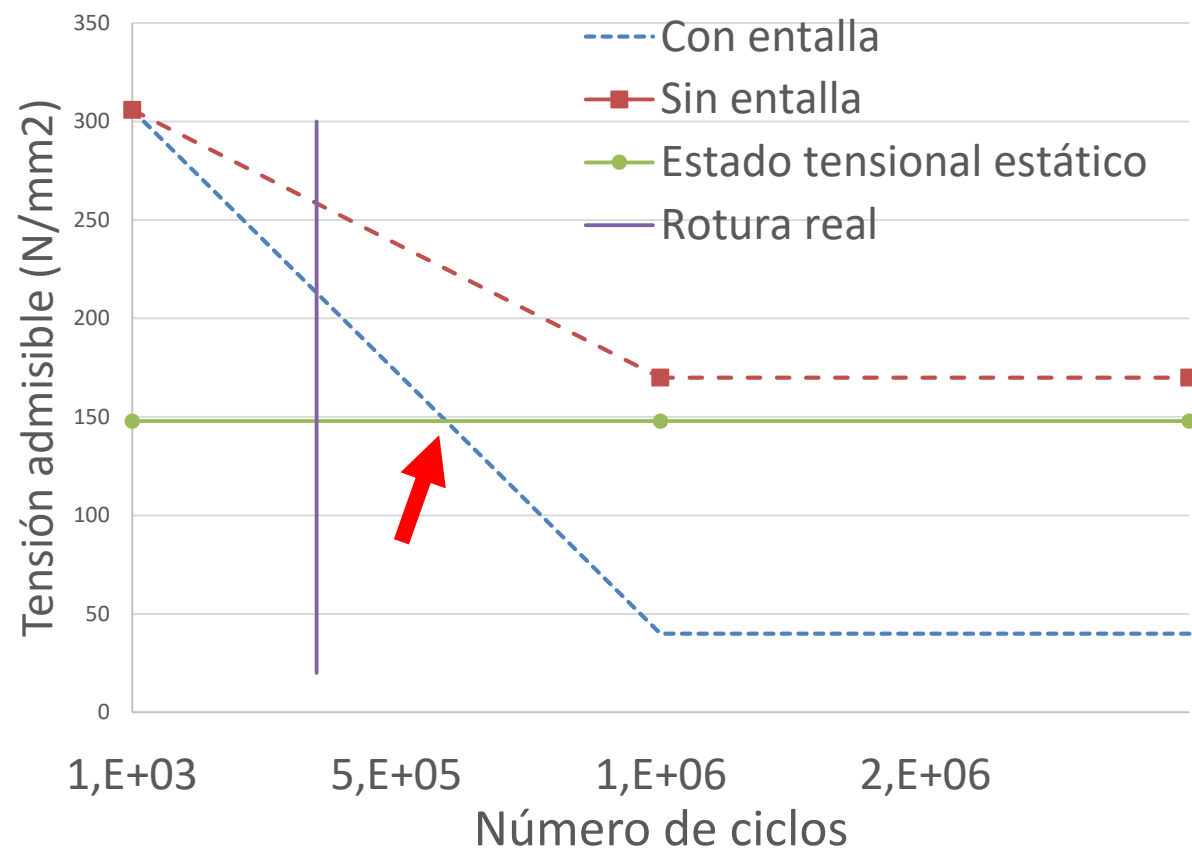
Robert L. Norton.
Machine Design (5th Edition). Ed. Pearson, September 16, 2013 (Apéndice G)

	S1000	Se
Tensión N/mm2	306	39,5
Ciclos N/mm2	1.000	1.000.000



Análisis de los esfuerzos dinámicos

	S1000	Se
Tensión N/mm ²	306	39,5
Ciclos N/mm ²	1.000	1.000.000



De esta curva puede concluirse que la rotura del eje ya estaba prevista en su curva de vida, si bien con las hipótesis se han estimado en este informe se habría producido a los 526.000 ciclos.



El diseño del eje de la campana, para un caso de esfuerzos estáticos estaba correctamente dimensionado con un coeficiente de seguridad de 2.2, para el caso de que el acero sea una F111 (**incertidumbre → Análisis metalográfico**).

Desde el punto de vista dinámico el dimensionado del eje de la campana tenía una vida útil limitada. Esto es debido a que existían concentradores de esfuerzos elevados que llevarían a la rotura de este eje tras 526.000 ciclos, lo cual puede alcanzarse con las previsiones realizadas en unos 30-40 años.

La reducción de la vida útil calculada con respecto a la que ha producido la rotura se debe a factores adicionales que pueden haber acelerado el fallo como el inicio de corrosión, los acabados superficiales del eje de acero y la incertidumbre actual con respecto al material del propio eje.

Como conclusión preliminar se dejaron de voltear todas las campanas de la catedral hasta que no se sustituyesen todos los ejes de las mismas con los cálculos adecuados.



Dureza superficial:

Se han realizado 6 medidas de dureza en la zona intermedia de la sección:

Dureza media Rockwell B \rightarrow 95.6

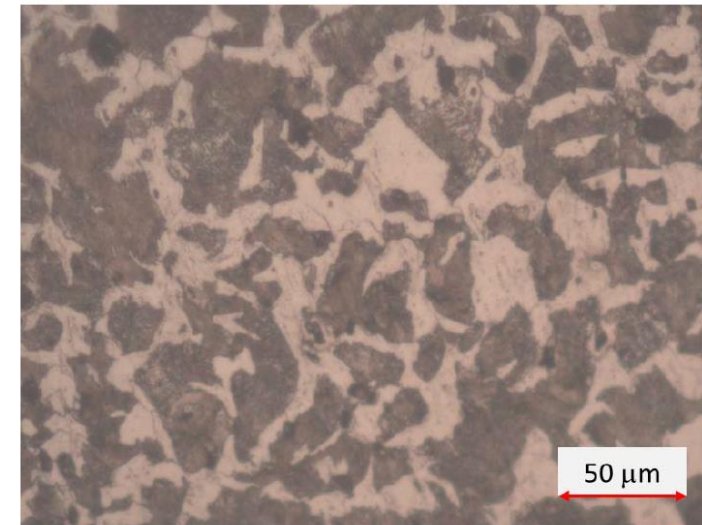
Dureza media Brinell \rightarrow 212

Con estos valores (DIN 50150) \rightarrow $R_{m\acute{a}x} \cong 720$
N/mm²

Análisis Microestructura:

Se realiza un ataque de la muestra con Nital 3. Se observan granos de ferrita proeutectoide y perlita, típica de aceros no aleados de medio contenido en carbono sin tratamiento térmico de temple y revenido. Proporción de ferrita y perlita indica contenido en C de 0.35-0.45%.

El tamaño medio del grano es fino, con la longitud interceptada por grano de valor 0.018-0.030 mm (UNE-EN-ISO 643-2013) \rightarrow Grano fino de microestructura ferrítico-perlítica propia de aceros hipoeutectoides en estado de tratamiento térmico normalizado.





INTRODUCCIÓN ANALISIS CUALITATIVO ANALISIS CUANTITATIVO METALURGIA CONCLUSIONES

Los valores de dureza medidos, la resistencia a tracción estimada y la microestructura observadas son coherentes con las propiedades típicas de aceros no aleados tipo C35 o C40 (UNE-EN 10083-2) (Aceros al carbono no aleados para temple y revenido) en estado laminado o normalizados, que son equivalente a los anteriormente denominados F-1130 o F-1140 de la antigua norma española UNE 36011

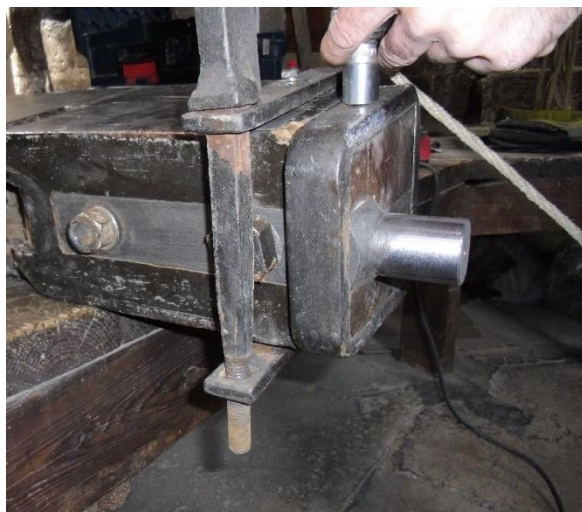
Acero	%C	%Mn	%Si	%P	%S	Dureza y resistencia típica en estado normalizado
F-1130 UNE36011	0.30-0.40	0.5-0.8	0.15-0.40	<0.035	<0.035	150-220 HB Rm:500-700 MPa Re>280 Mpa
C35 EN10083-2	0.32-0.39	0.5-0.8	<0.40	<0.045	<0.045	Rm>550 Mpa Re>300 Mpa
F-1140 UNE36011	0.40-0.50	0.5-0.8	0.15-0.40	<0.035	<0.035	175-255 HB Rm:590-770 Mpa Re>300 Mpa
C40 EN10083-2	0.37-0.44	0.5-0.8	<0.40	<0.045	<0.045	Rm>580 Mpa Re>320 Mpa

Hipótesis original del tipo de acero → Ok



INTRODUCCIÓN | ANALISIS CUALITATIVO | ANALISIS CUANTITATIVO | METALURGIA | CONCLUSIONES

- Se ha expuesto el origen del daño y rotura de la Campana “El Jaume” de la catedral de Valencia.
- Se ha mostrado que el factor de amplificación dinámica sobre los apoyos de las campanas debido al giro puede estar entre 1.5 y 0.4 veces su peso.
- La aplicación de los conocimientos de ingeniería mecánica tradicional al diseño de ejes de campanas puede garantizar su seguridad estructural
- Es fundamental el diseño de ejes evitando transiciones bruscas a 90 °.
- Se deben diseñar los ejes de las campanas para que su ciclo de vida sea infinito.



EL PROBLEMA DE LA FATIGA EN EL DISEÑO DE EJES DE CAMPANAS: ROTURA DE UNA CAMPANA EN LA CATEDRAL DE VALENCIA

Prof. Salvador Ivorra

Catedrático de Universidad – Dr. Ingeniero Industrial Mecánico

Gracias por su atención