







La fatiga en las estructuras tipo mástil*

Fatigue at the mast type structures**

José Ramón Arroyo Arroyo*,a, Raúl Rubén Rodríguez Escribanob, Ramón Álvarez Cabalc

^aIngeniero Industrial. INTEMAC Jefe de la Sección de Estructuras ^bDr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. INTEMAC Director de la División de Estudios ^cDr. Ingeniero Industrial. INTEMAC Director del Área de Estructuras

RESUMEN

Se describen algunos daños por fatiga en estructuras tipo mástil como son las banderolas, carteles, báculos de iluminación etc., estructuras muy comunes que habitualmente no se comprueban a fatiga. La normativa vigente incluye los métodos para determinar las principales acciones de viento en estas estructuras y el número de ciclos durante la vida útil de la misma. La resolución del problema de la fatiga requiere la adopción de medidas en el diseño y ejecución de las uniones.

ABSTRACT

It is exposed that there is fatigue damage due to wind actions in some mast type structures like traffic signs, signs, light supports, etc., These structures are not usually verified for fatigue and they are very common. The current standards include the methods for determining the main wind actions and the number of cycles over the service life. The fatigue problem resolution requires to adopt cautions with respect to the design and the execution of the joints.

PALABRAS CLAVE: fatiga, perno, ciclo, viento, mástil. **KEYWORDS:** fatigue, anchor bolt, cycle, wind, mast.

1. Introducción

Comúnmente, la fatiga en estructuras de acero se relaciona con cargas móviles, como es el caso de los puentes grúa, puentes de ferrocarril, etc.

También se asocia a la acción variable de cuando se analizan viento estructuras industriales esbeltas (torres, chimeneas, etc.), sin embargo, no es frecuente analizar la fatiga en algunas de las estructuras más próximas y más frecuentes en el entorno urbanizado. Nos referimos a los pórticos y banderolas de señalización tan comunes en nuestras carreteras, a los mástiles y báculos de iluminación, a los carteles publicitarios dispuestos en altura, etc.

Muchas de estas construcciones no han recibido tradicionalmente la atención que requieren conforme a su entidad (la cimentación de un "totem" identitario alcanza dimensiones muy superiores a las de cualquier zapata convencional), a la importancia de las solicitaciones que reciben o al riesgo que su localización urbana supone.

Estas estructuras son, además, especialmente sensibles a las solicitaciones de fatiga debido a:

elevada relación entre La las solicitaciones variables y permanentes.

- Lo reducido de sus frecuencias naturales situadas en el entorno de los máximos de la función de densidad espectral de la solicitación.
- Los bajos valores del amortiguamiento.

Por último, estas estructuras requieren un diseño poco robusto, muy sensible al fallo. Ello es debido a:

- Su carácter normalmente isostático, que condiciona el colapso global al fallo de una sola sección (normalmente la unión a la cimentación).
- Las exigencias funcionales y constructivas, que conducen a la ejecución de las uniones críticas en la situación más precaria.

Las uniones en las que se producen daños de fatiga suelen ser las soldadas y atornilladas de las placas base (véanse las figuras 1 y 2), pero se pueden producir también en otras uniones de responsabilidad cómo son las que fijan la estructura que soporta los carteles al fuste.

Una ejecución descuidada en la que se hayan producido por ejemplo entallas o el incorrecto relleno del mortero, acelera el proceso de fatiga. Obsérvese en la figura 2 la mala ejecución del agujero de la placa, agrandado in situ mediante oxicorte sin repasar y cómo la fisura de fatiga parte de una de las entallas.

Una de las razones que señala la presencia de fatiga en el fallo es que normalmente se produce ante acciones de viento muy inferiores a las de proyecto.





En nuestra opinión, la razón fundamental de estos fallos es la falta de consideración en proyecto de la fatiga, tanto directa como indirectamente, ya que la inadecuada consideración de la durabilidad en el proyecto acelera la fisuración por fatiga en las uniones debido a la oxidación.

La normativa actual (parte 1-4 del Eurocódigo 1 EN 1994-1-4:2005 [1]) proporciona herramientas para la evaluación, al menos parcial, de las acciones de viento en estas estructuras.

2. La acción de viento

La acción de viento produce variaciones de los esfuerzos en la estructura y, en algunos casos, efectos de resonancia por el acoplamiento entre las frecuencias de las rachas y las de la estructura o por estar sometidas a algunos de los otros efectos dinámicos del viento (desprendimiento de vórtices, flameo, etc.)

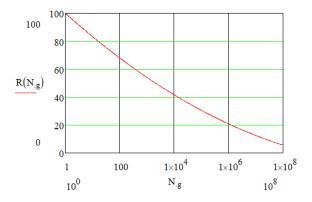
Es este carácter de la acción de viento el que provoca daños por fatiga en las estructuras. No obstante, en los pórticos y banderolas de carreteras resulta también importante la acción producida por el paso de los camiones y autobuses bajo las mismas. Esta solicitación no se precisa en ninguna normativa, aunque la hemos encontrado indicada en publicaciones USA [2] para la tipología de señalización que allí se utiliza.

2.1 Parte 1-4 del Eurocódigo 1

Su campo de aplicación incluye las estructuras que estamos tratando excepto las torres de celosía con cordones no paralelos, los mástiles o chimeneas atirantadas y las columnas o báculos de alumbrado hasta una altura de 20 m.

Esta parte del Eurocódigo 1 (UNE-EN 1991-1-4:2005) está dedicada a las acciones de viento en las estructuras, e incluye herramientas de cálculo para determinar los efectos variables y dinámicos del viento.

Una vez se ha obtenido la distribución estática de presiones y los esfuerzos, es posible determinar el número de ciclos e intensidad que esta acción tiene a lo largo de 50 años. Véase la figura 3.



La expresión analítica de la curva de la figura 3 es la siguiente:

$$\frac{\Delta S}{S_k} = 0.7 \cdot (\log(N_g))^2 - 17.4 \\ \cdot \log(N_g) + 100$$
 (1)

En la aplicación informática utilizada para construir la curva hemos denominado $\Delta S/S_k$ como R.

 $N_{\rm g}$ representa el número de veces en que el valor ΔS correspondiente a un efecto del viento es excedido o sobrepasado en un periodo de 50 años. El valor ΔS se expresa como un porcentaje del valor S_k que es el efecto de la

acción debida al viento para un periodo de retorno de 50 años. Observando el gráfico se aprecia que durante 50 años un valor del 60% del efecto de la acción de viento (S_k) va ha ser superado unas 400 veces, del 80% unas 20 veces y del 20% un millón de veces.

Por ejemplo, en una placa base podríamos determinar las tensiones de tracción en los pernos de anclaje debidas a las rachas de viento para un periodo de retorno de 50 años. Aceptando la dirección y sentido del viento más desfavorable en nuestro caso como permanentes, la expresión anterior nos permitiría conocer el número de veces que esas tensiones de tracción se van a producir para cada nivel de intensidad en valores iguales o superiores a ese nivel.

La expresión (1) permite expresar el número de ciclos como función del cociente $\Delta S/S_k$. Por otro lado, si se dispone de la curva de fatiga del detalle correspondiente será posible expresar el número de ciclos necesarios para que se produzca el fallo por fatiga como función del nivel de tensiones del detalle $N_F(\Delta\sigma_R)$. A partir de estas expresiones se pueden contabilizar los ciclos y aplicar la regla de Palmgren-Miner para determinar el daño acumulado.

Esta norma también permite comprobar si en la estructura se producen algunos de los otros efectos dinámicos del viento que contempla. En el caso del desprendimiento de vórtices incluye un método para determinar la magnitud de la acción y el número de ciclos.

2.2 Norma UNE 135311:2013 [3]

Esta norma de título Señalización vertical. Elementos de sustentación y anclaje. Hipótesis de cálculo es la normalmente aplicada al proyecto de pórticos y banderolas de carretera.

Prescribe un valor de la acción de viento muy reducido e independiente de todos los factores que condicionan la solicitación. No considera el efecto del entorno (prescribe la misma carga para una banderola situada en campo abierto que para una emplazada en un entorno urbano, al resguardo de los edificios), de la altura (con independencia de que se trate de una señal de tráfico de 1,50 m o una banderola de 10 m), ni de la localización geográfica (pese a que en nuestro país existen diferencias importantes en la presión de viento entre distintas localizaciones).

El Eurocódigo sí tiene en cuenta todos estos aspectos. La acción de viento deducida de éste es muy superior en el caso de campo abierto a la obtenida con la UNE 135311.

La UNE 135311 cita al Eurocódigo como norma de consulta e indica expresamente que **no considera la fatiga**.

3. La fatiga

El diseño y dimensionamiento de los detalles puede seguir los pasos indicados en la Instrucción EAE [4], es decir, identificación de los ciclos básicos de carga, selección de los detalles a comprobar, determinación de las carreras de tensiones y del número de veces en las que cada una se repite durante la vida útil la estructura y teniendo en cuenta la curva S-N del detalle determinar la seguridad a fatiga aplicando la regla Palmgren-Miner.

Previamente, es necesario decidir el criterio de integridad estructural a utilizar, (tolerancia al daño ó integridad asegurada). En función de las consecuencias del fallo ello permitirá seleccionar el coeficiente parcial de minoración para cada categoría del detalle $\gamma_{\rm Mf}$. El criterio de tolerancia al daño exige un plan de inspección y vigilancia de la estructura. No obstante, el Anejo Nacional de Aplicación del Eurocódigo EN 1993-1-9 [5] prescribe que se utilice el método de integridad asegurada.

Está claro que cuando el número de ciclos de tensiones susceptibles de producir daño durante la vida útil supera 10⁸, algo que es fácil que suceda con las acciones de viento, habría que asegurar no superar el umbral de daño durante la vida útil de la estructura.

3.1 Pernos de anclaje

Son los elementos fundamentales por los que pasan casi todas las acciones de la estructura a la cimentación y en los que aparecen fallos por fatiga (véanse las figuras 4 y 5).



Figura 4. Vista de la rotura parcial por fatiga de un perno de anclaje de una placa base una vez decapada.



Para reducir la fatiga en los pernos son varios aspectos de la configuración habitual de placas base sobre los que se puede actuar:



Figura 6. Deformada de los pernos de anclaje por esfuerzo cortante.

- No disponer tuercas de nivelación bajo la placa para que el apriete de los pernos pase directamente al mortero. Esta medida exige que la nivelación de la placa se realice por otros medios como por ejemplo mediante calzos en las esquinas que cuando el mortero ha curado se retiran. En la figura 7 se aprecia la existencia de estas tuercas y la ausencia de mortero en una placa base.



Figura 7. Disposición de tuercas inferiores y ausencia de mortero de nivelación.

- Asegurar el perfecto relleno del mortero de nivelación. Es habitual que el relleno no se realice correctamente. La existencia de las tuercas inferiores dá una falsa sensación de que la placa base está bien montada (véase la figura 8).

Supongamos la placa base de la figura 13 anclada con 10 barras pretensadas \$\phi\$ 36 y que las 5 barras de un lado reparten su pretensado en un área de 200 mm x 1000 mm. Esta área homogeneizada a acero con un coeficiente de equivalencia de 6 es de 375.74 cm².

Por otro lado, el área de las 5 barras ϕ 36 es de 50.89 cm².

Si durante los esfuerzos de viento se mantiene pretensada la citada área y considerando invariable el axil producido por el momento flector de viento en el bloque traccionado tanto si la placa está pretensada como si no lo está, la tensión en las barras para el caso pretensado vale.

$$\sigma_{cp} = \frac{\sigma_{sp} \cdot 50.89}{375.74} = 0.14 \cdot \sigma_{sp} \tag{2}$$

Donde σ_{sp} es la tensión en las barras en el caso sin pretensar. Con esto hemos reducido en un 86% la tensión debida al momento flector de viento.

Para no solicitar las barras a flexión, ni deteriorar el mortero, habría que comprobar que las tensiones cortantes en la interfase entre la cara inferior de la placa base y el mortero debidas al esfuerzo cortante y al momento torsor en su caso, no superan el producto de la tensión normal por el coeficiente de rozamiento.

Esta solución requiere precauciones de ejecución para garantizar la eficacia del pretensado, así como de armado de la zapata con un esquema de bielas y tirantes adecuado y de comprobación también a fatiga de esta.

La ventaja del pretensado se puede apreciar en el siguiente ejemplo.



Figura 8. Defectos de relleno del mortero de nivelación.

El detalle de aplicación en este caso sería el de la figura 9 que tiene también un coeficiente de efecto tamaño.

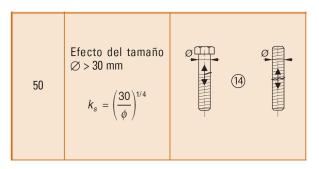


Figura 9. Categoría de los pernos de anclaje.

Se han producido también daños por fatiga en las placas base de este tipo de estructuras (véanse las figuras 10 y 11) motivadas por un diseño y ejecución afectado de entallas geométricas y metalúrgicas que propician el inicio de las fisuras.

La ubicación de los rigidizadores de la placa base de las figuras 10 y 11 es, en nuestra opinión, equivocada, ya que se producen unas flexiones locales en las zonas de encuentro de los extremos de los rigidizadores con las chapas de los fustes (entalla geométrica) que induce ràpidamente la aparición de la fisura de fatiga. En las figuras 10 y 11 se aprecian como las fisuras parten precisamente de esa localización.



Figura 10. Rotura por fatiga de la zona de los mástiles unida a los rigidizadores.



Figura 11. Rotura por fatiga de la zona del mástil unida a los rigidizadores.

La configuración de los rigidizadores de las figuras 10 y 11 no es conforme a las recomendaciones de los detalles incluidos en la Instrucción EAE que indica que el ángulo entre el borde del rigidizador y la chapa sea inferior a 45°, o que se disponga un acuerdo de transición suave así como que el cordón de soldadura se desbaste para eliminar por completo la raiz del cordón de soldadura transversal (figura 12).

En nuestra opinión es recomendable evitar la utilización de cartelas de rigidización, para reducir al mínimo las citadas entallas disponiendo espesores fuertes de placas base con pernos próximos al fuste para reducir las flexiones por esa excentricidad. Incluso, es ideal disponer placas de rigidización sobre la placa base para uniformizar y reducir las flexiones en el encuentro con el fuste (véase la figura 13).

71	L> 100 mm $lpha<$ 45°	
80	r > 150 mm	3 reforzado

Figura 12. Remate de rigidizadores.

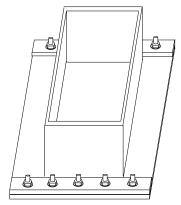


Figura 13. Placa base con placas de refuerzo.

4. Conclusiones

La norma aplicada habitualmente al proyecto de banderola y pórticos [3] prescribe un valor de la acción de viento reducido y no contempla la comprobación de la estructura ante los procesos de fatiga.

En la fase de proyecto se tiene que considerar la fatiga tanto en el diseño como en el cálculo de la estructura. La normativa actual [1], [4] y [5] permite determinar las acciones en casi todos los casos y realizar el diseño y las comprobaciones de cálculo. Las publicaciones especializadas [6], [7] y [8] complementan la comprensión de los fenómenos de las acciones de viento y de la fatiga.

Se ha propuesto la solución de pretensar los pernos de anclaje de las placas base para suprimir prácticamente los efectos de la fatiga en los mismos y se ha citado la necesidad de realizar un armado y cálculo de las zapatas adecuado.

Referencias

- [1] Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-4: Acciones generales. Acciones de viento. UNE-EN 1991-1-4 (septiembre 2007).
- [2] Guidelines for the Installation, Inspection, maintenance and Repair of Structural Supports for Highway Signs, Luminaries, and Traffic Signals. Publication No. FHWA NHI 05-36. March 2005.
- [3] Señalización vertical. Elementos de sustentación y anclaje. Hipótesis de cálculo. UNE 135311 (mayo 2013).
- [4] Comisión Permanente de Estructuras de Acero, Instrucción de Acero Estructural EAE, Ministerio de Fomento, 2011.
- [5] Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero. Parte 1-9: Fatiga. UNE-EN 1993-1-9 (abril 2013).
- [6] A. Nussbaumer, L. Borges, L. Davaine, Fatigue design of steel and Composite Structures 2nd Edition. ECCS Eurocode Design Manual (2018).
- [7] E. Simiu, R. H. Scanlan, Wind Effects on Structures. John Wiley and sons. Third edition (1996).
- [8] J. D. Holmes, Wind Loading of Structures. Taylor & Francis. Second edition (2007).